

## Fäulepilz- und weitere Schäden an Hafen-Dalben und Wasserbauholz

TOBIAS HUCKFELDT<sup>1</sup>, ECKHARD MELCHER<sup>2</sup> & MATHIAS REHBEIN<sup>3</sup>

HUCKFELDT T, MELCHER E, REHBEIN M (2019) Wood-destroying fungi and other damages at fender piles and water construction. *Zeitschrift für Mykologie* 85(2): 271-309.

**Summary:** Timber in water constructions (especially fender piles) were examined for rot and other damages. Typical wood-destroying basidiomycetes, soft-rot and bacterial attacks were found. Two poroid fungi which are rare in northern Germany were observed: *Antrodia xantha* and *Gloeoporus taxicola*. Besides *Auricularia auricula-judae* has also been detected six times on the tropical wood *Dicorynia paraensis*. The most common basidiomycete in coniferous and deciduous timbers was *Dacrymyces stillatus*. Six ecological niches are distinguished, which offer different habitats for wood destroyers: 1. soil/sludge zone, 2. tidal area with constant water changes and swirling mud, 3. flood line, 4. wood above seawater level, but with influence of seawater, 5. wood above sea water and little influence of sea water and 6. timber as before, but structurally protected. In the context of these investigations, no differences were found in the fungal population between seawater and freshwater, apart from the fact that no macromycetes were observed in the areas regularly covered by seawater. Micro-fungi, soft-rot and wood-destroying bacteria have not been determined, but the damage caused by these organisms is described and shown in light- und polarized-microscopy pictures.

**Key words:** biodiversity, morphology, soft rot, polarized light microscopy, fender piles, occurrence in Germany, harbour, wood decay, bacterial attacks

**Zusammenfassung:** Wasserbauhölzer wurden auf Holzzerstörer untersucht. Neben Fäuleschäden durch Basidiomyceten und Moderfäulepilze wurden auch Bakterienfäulen und zwei im Norden seltenere Porlinge nachgewiesen: *Antrodia xantha* und *Gloeoporus taxicola*. Zudem wurde *Auricularia auricula-judae* an *Dicorynia paraensis* (Basralocus) nachgewiesen. Der häufigste Basidiomycet an Wasserbauhölzern aus Nadel- und Laubholz war *Dacrymyces stillatus*. An Dalben im Salzwasser werden ökologische Nischen unterschieden: 1. Erdreich-/Schlamm-/Bodenzone, 2. Tidebereich mit ständigen Wasserwechseln und wirbelndem Schlamm, 3. bis Hochwasserlinie (als Übergangsbereich), 4. Holz über Wasser, aber vom Salzwasser beeinflusst, 5. Ungeschützt bewittertes Holz über Wasser und kaum vom Salzwasser beeinflusst und 6. Holz wie zuvor, aber mit Abdeckung. Es wurden kaum Unterschiede in der pilzlichen Besiedlung zwischen Meer- und Süßwasser gefunden, abgesehen davon, dass in den durch das Meerwasser stark beeinflussten Bereichen keine Großpilze vorkamen. Mikropilze, Moderfäulepilze und holzerstörende Bakterien wurden nicht bestimmt, aber deren licht- und polarisationsmikroskopische Abbaubilder werden dargestellt.

**Stichwörter:** Holzabbau, Anatomie, Polarisationsmikroskopie, Wasserbauhölzer, Dalben, Moderfäulepilze, Bakterienfäule, Bestimmung, Ökologie

**Anschriften der Autoren:** <sup>1</sup>Hohe Liedt 75, 22417 Hamburg, huckfeldt@ifholz.de (Korrespondenz); <sup>2</sup>Thünen-Institut für Holzforschung, Leuschnerstraße 91 d, 21031 Hamburg; <sup>3</sup>Institut für Holzqualität und Holzschäden (IF-Holz), Essener Straße 4, D2, 22419 Hamburg

## Literatur

Während umfangreiche Untersuchungen zu marinen Pilzen und Bakterien vorliegen (GARETH JONES 1968, KOHLMAYER 1958, 1980, VRIJMOED & HODGKISS 1987, HYDE et al. 1998, PANG & MITCHELL 2005), sind Publikationen zu holzerstörenden Großpilzen an verbaumtem Holz im Meerwasser selten (HIGHLEY & SCHEFFER 1989). Der Fokus liegt eher auf der Vermeidung von Pilzschäden als auf der Differenzierung der verursachenden Pilzarten (TROSCHEL 1916, ESLYN 1976, ESLYN & CLARK 1979, JOHNSON & ESLYN 1986, HIGHLEY & SCHEFFER 1989).

Anders ist die Situation bei Treibholz (AZEVEDO et al. 2012, RÄMÄ et al. 2014) oder an tragenden Hölzern unter Gebäuden, wie Gründungspfählen, von denen Schadbilder beschrieben sind, jedoch oft mit Hilfe des Elektronenmikroskops (COURTOIS 1963, HOUGHTON 1968, LUNDSTRÖM 1972, NILSSON 1974, 1984, ZAINAL 1980, HALE & EATON 1985, NILSSON & DANIEL 1987). Jedoch wurden erste Bakterienschadensbilder lichtmikroskopisch publiziert (LIESE 1955). So ist ein Vergleich mit den in der Natur vorgefundenen Schadbildern und mit denen eines Freiland-Versuches möglich. In der Literatur finden sich Hinweise auf ein Zusammenwirken von Pilzen und wirbellosen tierischen Holzerstörern (KOHLMAYER 1958, OEVERING et al. 2001, NOLDT 2014); wie weit das Zusammenleben geht, ist bisher unklar. Die Schiffsbohrmuschel soll mit Mikroorganismen (vor allem Pilzen) besetztes Holz bevorzugen (NOLDT 2014). Viele Autoren beschreiben jedoch nur die tierischen Schadbilder (z. B. LANGENDORF 1988, UNGER 1990, HAUSTEIN & HAUSTEIN 2015). KOHLMAYER (1958) beschreibt die Abhängigkeiten zwischen Mikroorganismen und Tieren.

Ein Aspekt zu *Dacrymyces stillatus* (NESS) FR. kann mit Bezug auf Wasserbauhölzer bestätigt werden: „überall häufig“ MICHAEL et al. (1986) und der Hinweis von JAHN (1979): „Die Zerfließende Gallerträne ist einer der häufigsten holzbewohnenden Pilze überhaupt, ...“.

## Fundorte und Holzfeuchte

Die Funde stammen aus den Jahren 2010 bis 2018 von einer Reihe von Standorten in Norddeutschland und aus einem Versuchsbecken des Thünen-Institutes (Abb. 9); Standortinformationen sind in Tab. 1 zusammengefasst. Weitere Detailinformationen finden sich im Forschungsbericht (MÜLLER et al. 2018), der auf den Internet-Seiten der DBU, des Thünen-Institutes sowie des Institutes für Holzqualität und Holzschäden eingesehen werden kann. Insgesamt wurden rund 139 Proben von Dalben untersucht, neun Kiefernholz-Proben aus einer Kaimauer (unter Wasser) in Bremen und als Vergleichsgruppe wurden 114 Proben aus einer Holzsteg-Anlage herangezogen (Tab. 1). Da es sich um Wasserbauhölzer im „Betrieb“ handelte, war es nicht an jedem Bauteil möglich Holzproben mitzunehmen. In diesen Fällen konnten ggf. nur Fruchtkörper untersucht werden. Meist konnte zumindest ein Span oder Bohrkern entnommen werden, selten mehr.

Für die Untersuchung der Holzfeuchteänderung in Nadelholzstämmen unter praxisnahen Bedingungen wurden insgesamt 24 Stämme (Abb. 4G-I) im Freiland auf dem

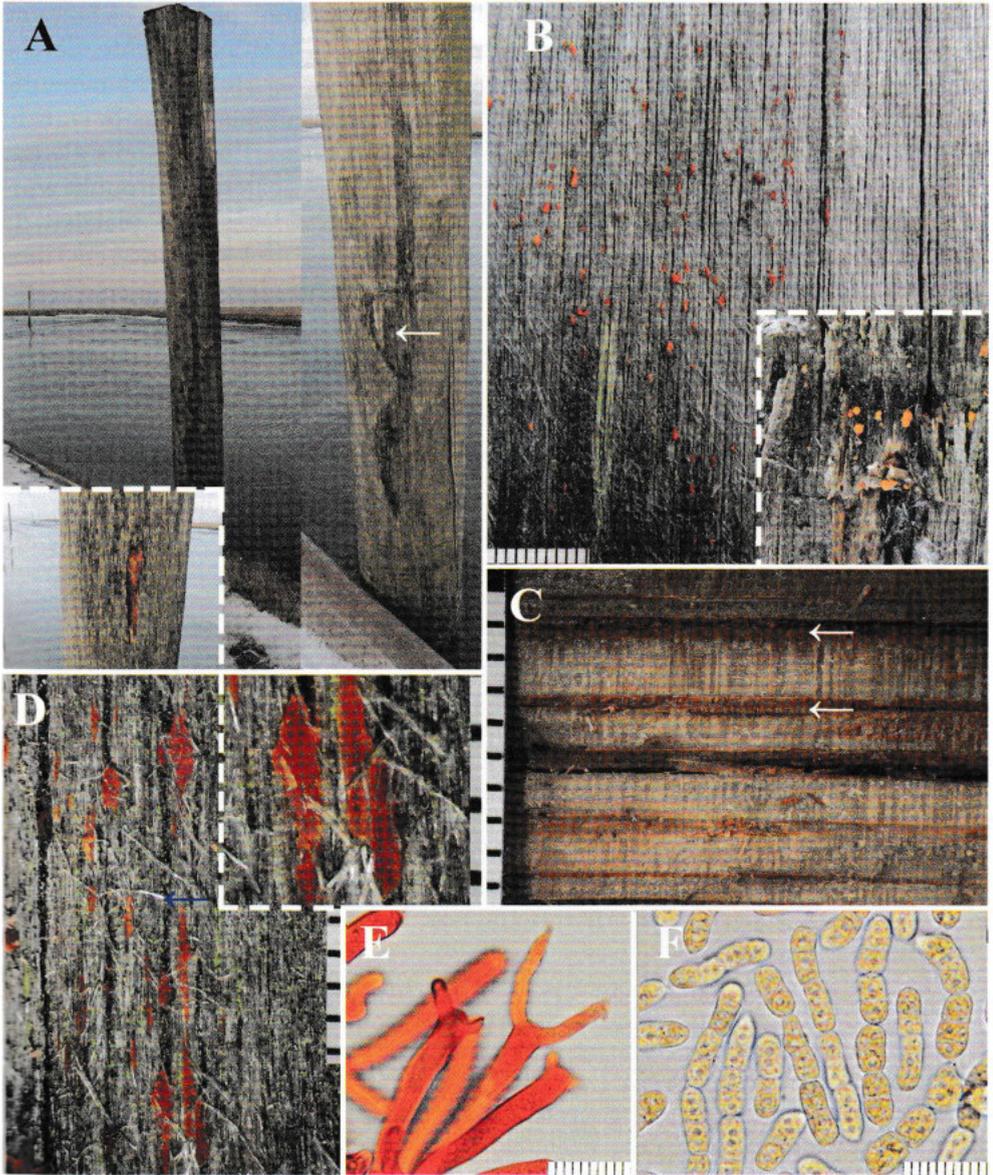


Abb. 1: *Dacrymyces stillatus* – Fruchtkörper, Probenahme: 22.01.2016; **A**) Übersicht des Fundorts, Nessmer-Siel; Dalbe ca. 1,5 m über Kai (Salzwasser, aber oberhalb des direkten Spritzwassereinflusses); **B**) Detail der Dalbe; frische rote Fruchtkörper (Eckbild mit Hauptfruchtform); **C**) Braunfäule unterhalb der Fruchtkörper, besonders im Bereich des Jahringübergangs (Pfeile; Spätholz); **D**) Detail der Fruchtkörper, Nebenfruchtform: zerlaufene Fruchtkörper auf der silbergrauen, bewitterten Holzoberfläche mit durch das Sonnenlicht delignifizierten Holzfasern (Pfeil); **E**) gegabelte Basidie; **F**) in Ketten liegende Arthrosporen (Konidien) der Nebenfruchtform. Fotos: T. HUCKFELDT

Gelände des Thünen-Instituts in einem Versuchsbecken aufgebaut; sechs Stämme wurden nach rund zwei Jahren mikroskopisch untersucht (Kiefer, Fichte, Lärche und Douglasie). Die Holzfeuchte wurde mittels elektrischer Holzfeuchtemessung bestimmt. Hierzu wurden in unterschiedlichen Stammhöhen sechs bzw. acht Elektrodenpaare 25, 35, 50 und 100 cm oberhalb der Wasserlinie (jeweils gleiche Anzahl auf der Ost- bzw. Westseite) eingebaut. Zu einem späteren Zeitpunkt wurden zusätzlich – soweit möglich – Messfühler 15 cm über der Wasserlinie platziert, da nach mehrmonatiger Exposition sowohl bei Douglasie als auch Lärche in 25 cm Höhe lediglich witterungsbedingte Änderungen der Holzfeuchte zu verzeichnen waren.

<b>Tab. 1: Probennummer und Entnahmeort von Dalben und Hafen-Wasserbauhölzern</b>	
<b>Nr.</b>	<b>Standort, Nr./Bezeichnung; Probenahme-Datum</b>
Probe 1	Greetsiel; ca. 1,5 m über Wasser (keine Tide – Brack-/Süßwasser); 15.11.2015.
Probe 2-3	Norddeich; Dalbe oben, Holz außerhalb des Salzbereiches; 28.11.2015.
Probe 4	Harlesiel; Dalbe oben, außerhalb des Salzwassereinflusses von unten; 15.11.2015.
Probe 5-8	Bensersiel; FK am Pfahl an der Westseite des Hafenbeckens, über Hochwasser.
Probe 9-11	Nessmer-Siel; Pfahl 1; 0,8-1,8 m über Kai, Süd- und Westseite, an Nadelholz, Splint; 22.01.2016.
Probe 12-29	Hafen Norddeich - Yacht-Zentrum Störtebeker GmbH; verschiedene Höhen an drei gezogenen Dalben (Nadelholz, <i>Pseudotsuga menziesii</i> und <i>Pinus sylvestris</i> ), 18 Proben; 22.01.2016.
Probe 30-38	Harlesiel, 9 Proben: Einzelproben von acht Dalben an der Kaimauer-Kante, ca. 1-3 m über Hochwasser, 1 x Nadelholz, 8 x Tropenholz; 15.11.2015.
Probe 39-40	Neuharlingsiel: 3. Pfahl von Süd ( <i>Pinus sylvestris</i> ); Entnahme Nord- und Südseite, 1,5 bis 3 m über HW, 15.11.2015.
Probe 41	Hamburg, Hafen, Zusatzprobe: Dalbe im Museumshafen (Am Sandtorkai); Pfahl 1; etwas über dem oberen Befestigungsholz; 30.03.2017. Hinweis: Alle Proben aus dem Hamburger Hafen stammen von Dalben oder Deko-Dalben (nostalgische Dalben ohne Funktion), die dicht an der Kaimauer standen.
Probe 42	Hamburg, Hafen – Großer Grasbrook, erstes Dalben-Paar am Anleger Elbphilharmonie, <i>Pinus sylvestris</i> , am Anleger; 30.03.2017.
Probe 43	Einfahrt Museumshafen, unterhalb der Mahatma-Gandhi-Brücke; Osten, <i>Pseudotsuga menziesii</i> , ca. 150 cm über Wasser (ca. 240 cm über N.N.), ca. 1 Jahr alt; 05.03.2017. Jeweils ausgehend vom mittleren Tidenhub von 363 cm (Messwerte: St-Pauli). Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2017; unter <a href="http://www.bsh.de/de">http://www.bsh.de/de</a>

Probe 44-57	Hamburg, Hafen – Großer Grasbrook, Elbnordseite, Nordseite des Hafenbeckens (Abb. 8); 14 Proben, 1. und 2. Deko-Dalben-Paar, jeweils eine davon, am Anleger der Elbphilharmonie; ( <i>Pinus sylvestris</i> ), 2,2-5,1 cm über N.N.; Probennahme 30.03.2017, von Westen.
Probe 58-66	Hamburg, Museumshafen (Am Sandtorkai), Elbnordseite, Südseite des Hafenbeckens, Kai-Südseite, 8 Proben, mittlere Dalbe (Abb. 6); Probennahme: 30.03.2017, von Westen, ca. 60 bis 260 cm über Wasser (1,6-3,6 cm über N.N.); Holzart: <i>Pseudotsuga menziesii</i> ; Tidenhub: Wasserstand um 11:55 h, 85 cm über N.N., fallend (Pegel: Kehrwinderspitze).
Probe 67-73	Hamburg; Am Sandtorkai, Elbnordseite; 7 Proben; Südseite des Hafenbeckens, Kai-Südseite, achte Dalbe von Westen (Abb. 10); Holzart: <i>Pseudotsuga menziesii</i> , ca. 55-275 cm über Wasser (1,45-3,65 cm über N.N.); Probennahme: 30.03.2017 von Osten. Tidenhub: Wasserstand um 11:55 h, 85 cm über N.N., fallend (Pegel: Kehrwinderspitze).
Probe 74	Nordsee, <i>Pseudotsuga menziesii</i> ; 2017.
Probe 75	Hafen-Norddeich, <i>Larix decidua</i> ; Kontrollpfahl; 2017.
Probe 76	Hafen-Norddeich, <i>Larix decidua</i> ; Geotex; 2017.
Probe 77-79	Rammpfähle aus Bensorsiel: Probe 2, <i>Larix decidua</i> , Hirnende; ca. 15.10.2017.
Probe 80-82	Rammpfähle aus Bensorsiel: Probe 3, <i>Pseudotsuga menziesii</i> , unter Hirnende, mehr als 2 m über Hochwasser, Splintholz; ca. 15.10.2017.
Probe 83-84	Norddeich, am 28.07.2017 aus Fahrrinne gezogen: Probe 1, <i>Larix decidua</i> , Kontrollpfahl, Westseite, ca. 2 m über HW, 16.09.2017.
Probe 85-86	Norddeich, am 28.07.2017 aus Fahrrinne gezogen: Probe 2, <i>Larix decidua</i> , Westseite, 1,5-2 m über HW, 16.09.2017.
Probe 87-89	Norddeich, am 28.07.2017 aus Fahrrinne gezogen: <i>Pseudotsuga menziesii</i> , Radialriss, 0,5-2,5 m über der Hochwasserlinie, 16.09.2017.
Probe 90-95	Neuwerk, Bauernhafen auf der Insel-Südseite, Hafenbecken, Proben von sechs Pfählen, oberhalb des Salzeinflusses, 18.10.2017; Die Proben wurden zwischen der Hochwasserlinie und ca. 1 m über Hochwasserlinie genommen. Das Hafenbecken fällt bei Ebbe weitgehend trocken (6 Proben). Auffällig war hier die dunkle Verfärbung des Holzes. Zudem gibt es helle Oberflächen an einigen Flächen.
Probe 96-99	Thünen-Institut: Versuche im Außentank (vor dem Einbau): <i>Pinus sylvestris</i> , weißes Mycel; 20.09.2016.
Probe 100-114	Hafen Norddeich, 0-0,5 m über Hochwasserlinie; Die Proben wurden am 10.05.2016 eingebaut und am 26.03.2018 ausgebaut; die Proben-Abschnitte ragten bei Hochwasser ca. 50 cm aus dem Wasser, <i>Pinus sylvestris</i> , viel Splintholz, alle Oberflächen gealtert, Kantholz ca. 5 x 8 cm (angeschraubt an verschiedene Dalben).

Probe	115-118	Versuche im Außentank; Lärche (-0,5-15 cm unter/über Wasserlinie), Salzwasser, Thünen-Institut, 17.04.2018.
Probe	119-122	Versuche im Außentank; Rundholz, <i>Pinus sylvestris</i> , (-0,5-15 cm unter/über Wasserlinie), Süßwasser, Thünen-Institut, 17.04.2018
Probe	123-126	Versuche im Außentank; Rundholz, <i>Pseudotsuga menziesii</i> : (-0,5-15 cm unter/über Wasserlinie), Süßwasser, Thünen-Institut, 17.04.2018
Probe	127	Versuche im Außentank; Rundholz, <i>Larix decidua</i> : (-0,5-15 cm unter/über Wasserlinie), Süßwasser, Thünen-Institut, 17.04.2018
Probe	128-131	Versuche im Außentank; Rundholz, <i>Pinus sylvestris</i> : (-0,5-15 cm unter/über Wasserlinie), Süßwasser, Thünen-Institut, 17.04.2018
Probe	132-139	Versuche im Außentank; Rundholz, <i>Picea abies</i> : (-0,5-15 cm unter/über Wasserlinie), Süßwasser, Thünen-Institut, 17.04.2018
Probe	140-248	Kontrollgruppe: steg-/hafenähnliche Anlage im Nord-Ostsee-Kanal, Konstruktion mit 502 Pfähle aus Basralocus/Angelique ( <i>Dicorynia paraensis</i> ); 07.07.2014 bis 03.02.2015; keine tierischen Schäden.
Probe	249-254	Kontrollgruppe: steg-/hafenähnliche Anlage im Nord-Ostsee-Kanal, Längsträger (4 x Eiche (ca. 3 m über dem Wasser) und 2 x <i>Dicorynia paraensis</i> (ca. 2,5 m über dem Wasser)); 10.10.2012; keine tierischen Schäden.
Probe	255-263	Kontrollgruppe: Bremen, Kaimauer, hölzernes Tragwerk, <i>Pinus sylvestris</i> , 03.12.2009 und 08.04.2010; neun Bohrkerne, Unterwasser geborgen durch Taucher; keine tierischen Schäden.

## Methoden

Untersucht wurde meist direkt nach der Entnahme getrocknetes Material; einige frische Proben wurden zur Lagerung auch eingefroren (-18°C). Das Material wurde mit Ethanol benetzt und dann in Leitungswasser überführt. Gefärbt wurde mit Kongorot in wässriger Lösung, mit Melzers-Reagenz und mit Baumwollblau in Milchsäure (CLÉMENÇON 2009, ERB & MATHEIS 1983). Die mikroskopische Bestimmung der Großpilze erfolgte nach DOMANSKI (1973), DOMANSKI et al. (1973), ERIKSSON et al. (1973-1988), GINNS (1974, 1978), JÜLICH (1984), RYVARDEN & GILBERTSON (1994), HANSEN et al. (1997), KRIEGLSTEINER (2000), BERNICCHIA (2005), BERNICCHIA & GORJÓ (2010).

Ein Befall durch holzerstörende Bakterien (Bakterienfäule) wird meist im Transmissions-Elektronenmikroskop nachgewiesen. In dem vorgelegten Artikel wird dargestellt, dass dies auch licht- und polarisationsmikroskopisch möglich ist (Abb. 3 und Abb. 9; vgl. auch ADOLF et al. 1972, HOLT 1983, BJÖRDAL et al. 2000). Dies wird durch elektronenmikroskopische Untersuchungen gestützt (z. B. SCHMITT & HOFFMANN 1998, REHBEIN et al., 2009, 2012). Jedoch können nicht die Bakterien selbst, sondern nur deren Abbaubilder im Holzgewebe nachgewiesen werden. Dies ist eine analoge Untersuchung wie bei den Moderfäulepilz-Schäden, deren Substrathyphe

in der Holzzellwand auch nur selten klar erkennbar sind, die Kavernen sind jedoch fast immer deutlich (Abb. 9E, 7H, 8E und 9C). Der Nachweis von feinen Kavernen im Holz erfolgte mittels Polarisationsmikroskopie. Dazu wird je ein Polfilter vor und hinter dem Objekt (Holzschnitt) in den Strahlengang gelegt, am einfachsten mit einem Polarisationsmikroskop mit Drehtisch; fehlt dieser, kann ein Polfilter aus dem Fotozubehör auf die Leuchtfeldblende gelegt und ein zweiter kleiner Polfilter direkt ins Objektiv eingebracht werden (Firma Roth). Zur Fixierung genügt ein kleiner Punkt Fixiermasse (Knetmasse, Plakat-Knetmasse, Autokitt etc.). Durch Drehen des Polfilters auf der Leuchtfeldblende und ggf. auch des Objektivs vorsichtig im Gewinde kann die richtige Einstellung gefunden werden. Die Zellulose im intakten Holz zeigt eine helle Polarisation bei dunklem Hintergrund; ist die Zellulose abgebaut, erlischt die Polarisation; Kavernen werden deutlich (Abb. 3C, I; 8C; 10B; SCHMIDT & LIESE 1994). Zum Hintergrund siehe SCHNEIDER (1922), LOHWAG (1937), MOUZOURAS (1989) und ANAGNOST (1998).

## Ergebnisse und Diskussion

Die Tabelle 2 zeigt die nachgewiesenen Arten und Gruppen an Wasserbauhölzern und Dalben und Tabelle 3 zeigt eine Vergleichsgruppe von Wasserbauhölzern aus *Dicorynia paraensis*.

Wasserbauhölzer bieten verschiedene Lebensräume mit speziellen biologischen Anforderungen an die Destruenten. Die Bedingungen reichen von aerob zu anaerob, von salzarm zu salzreich, von wassergesättigt zu wechselfeucht und von gleichmäßig temperiert zu wechselhaften Temperaturen. Hinzu kommen noch die unterschiedlichen Standorte: Meer, Süßwasser oder aber Häfen und Flüsse, z. T. mit Brackwasser. Der Dalben-Fuß im Meer liegt im annähernd anaeroben Salzwasser bei gleichmäßigen Temperaturen. Der baulich geschützte Dalben-Kopf ist stark wechselfeucht (z. T. Süßwasser) und erheblichen Temperaturwechseln ausgesetzt. An einer Dalbe lassen sich sechs Zonen definieren (Abb. 11). An Masten wurden vier ähnliche Zonen beschrieben (CORBETT & LEVY 1963).

Tab. 2: Häufigkeit von Fäuleschäden an Dalben und anderen Wasserbauhölzern

Lateinscher Name etc.	Fäule-Aktivitäts-Hinweis, Fäuletyp	Häufigkeit
Moderfäulepilze (Ascomyceten)	langsam, oft von außen nach innen und nach oben und unten abnehmend, m	70
Bakterien-Fäule	sehr langsam von außen nach innen, nur in dauerfeuchten Bereichen; Befall auch tiefgreifend, wenn Befall mit Bohrrasseln/Bohrmuscheln vorlag. bb	49
<i>Dacrymyces stillatus</i> Ness	schwach (bevorzugt Splintholz, an der Oberfläche); nie in Zonen mit eindeutiger Salzbelastung, b	15

<i>Dacrymyces</i> spp.	schwach (bevorzugt Splintholz, an der Oberfläche), nie in Zonen mit eindeutiger Salzbelastung, b	7
Basidiomycet; Braunfäule-Erreger: n.n.	-, b	6
<i>Antrodia-/Oligoporus</i> spp.	stark, b	5
Basidiomycet, Weißfäule-Erreger: n.n.	-, w	4
<i>Hyphodontia</i> spp.	schwach, w	4
<i>Coniophora</i> spp.	stark, b	3
<i>Antrodia xantha</i> (Fr.: Fr.) Ryv.	stark; nur an Dalben (Süßwasser) mit Wandkontakt, b	2
<i>Fomitopsis pinicola</i> (Fr.) Karst.	bis stark, nur an Zier-Dalben ohne eigentliche Funktion im HH-Hafen, b	2
<i>Pleurotus</i> spp. (nach Foto)	bis stark, w	2
Ascomycet (Fragmente)	unbekannt	1
<i>Auricularia auricula-judae</i> (Bull.: Fr.) Wettstein	schwach; nur an Basralocus, w	1
<i>Cerocorticium confluens</i> (Fr.: Fr.) Jülich	schwach, w	1
<i>Coniophora puteana</i> (Schum.: Fr.) Karst.	stark, b	1
<i>Corticaceae</i>	schwach, w	1
<i>Dacryobolus karstenii</i> (Bres.) Oberw. et Parma.	schwach, w	1
<i>Exidia</i> spp.	schwach; nur an Basralocus, w	1
<i>Gloeoporus taxicola</i> (Pers.: Fr.) Murril	unbekannt; nur an Dalben (Süßwasser) mit Wandkontakt, w	1
<i>Gloeophyllum sepiarium</i> (Wulf.: Fr.) Karst.	stark, b	1
<i>Hyphoderma puberum</i> (Fr.) Wallroth	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
<i>Lentinus lepideus</i> (Fr.: Fr.) Fr.	bis stark, b	1
<i>Mycena galericulata</i> (Scopoli: Fr.) Gray	unklar, gefunden nur an final faulem Holz (kein primärer Holzzerstörer)	1

<i>Myxomyceten</i>	kein Fäulepilz	1
<i>Phanerochaete/Phlebiopsis</i> spp.	schwach (bevorzugt Splintholz; Rotstreifigkeit), w	1
<i>Phlebiopsis gigantea</i> (Fr.: Fr.) Jülich	schwach (bevorzugt Splintholz; Rotstreifigkeit), w	1
<i>Pycnoporellus</i> spp. (cf)	beste Annäherung; unklar	1
<i>Resinicium bicolor</i> (Alb. et. Schwein.: Fr.) Parm.	schwach bis mäßig, w	1
<i>Stereum hirsuta</i> * (Willd.) Pers.	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
<i>Trametes multicolor</i> (L.: Fr.) Pilat	stark, w	1
<i>Trametes</i> spp.	stark, nur an Dalben im Süßwasser, w	1
Summe (Mehrfachbefälle vorhanden)		189
b = Braunfäule, bb = Bakterienfäule, m = Moderfäule, w = Weißfäule; * nach Foto; Süßwasser, 40 cm über Wasser, an Eiche, Hafen Lübeck.		

**Tab. 3: Häufigkeiten von Fäuleschäden an einer 10 Jahre alten Pfahlkonstruktion aus 502 *Dicorynia paraensis*-Pfählen mit 7 Schäden an Querträger-Balken aus *Quercus* spp.**

lateinscher Name	Fäule-Aktivitäts-Hinweis, Fäuletyp	Häufigkeit
<i>Stereum hirsuta</i> (Willd.) Pers.	schwach (bevorzugt Splintholz), w	16
<i>Dacrymyces minor</i> Peck	schwach (bevorzugt Splintholz), b	14
<i>Cerocorticium confluens</i> (Fr.: Fr.) Jülich & Stalpers	schwach, w	11
Bakterien/Moderfäulepilze, 10 mikroskopisch geprüft	langsam von außen nach innen an allen Pfählen, m	10
<i>Trametes multicolor</i> * cf. (Schaeffer) Jülich	stark, w	12
<i>Schizopora paradoxa</i> (Schrader ex Fr.: Fr.) Donk	schwach (bevorzugt Splintholz), w	8
<i>Stereum</i> spp.	schwach (bevorzugt Splintholz), w	6
<i>Auricularia auricula-judae</i> (Bull.: Fr.) Wettstein	schwach, w	5

<i>Daedalea quercina</i> an <i>Quercus</i> spp.	stark (Befallsbeginn oft im Splintholz oder im Mark)	5
Verdacht: <i>Daedalea quercina</i> (an <i>Dicorynia paraensis</i> )	mäßig stark, b	3
<i>Hyphoderma</i> spp.	schwach (bevorzugt Splintholz), w	3
<i>Kurschia lignicola</i> (Ascomycet)	schwach (bevorzugt Splintholz), ?	3
Basidiomycet: Weißfäulepilz n.n.	-, w	3
<i>Phellinus</i> spp.	mittel-stark, w	2
<i>Reticularia lycoperdon</i> Bull.	kein Fäulepilz, -	2
<i>Antrodia xantha</i> (Fr.: Fr.) Ryvarden, an <i>Quercus</i> spp.	stark; an Eiche, b	1
<i>Cerocorticium molare</i> (Chaillet: Fr.) Jülich et Stalpers	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
<i>Laccaria laccata</i> (Scopoli: Fr.) Cooke	unklar, Laubstreu-Pilz, ?	1
<i>Oligoporus</i> spp.	stark, b	1
<i>Peniophora lycii</i> (Pers.) Höhnelt et Litschauer	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
<i>Peniophora</i> spp.	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
<i>Phanerochaete laevis</i> (Fr.) Eriks. et Ryvarden	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
<i>Phanerochaete</i> spp.	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
<i>Schizopora flavipora</i> (Cooke) Ryvarden, an <i>Quercus</i> spp.	mittel-stark, w	1
<i>Stereum subtomentosum</i> Pouzar an <i>Quercus</i> spp.	schwach (kein Fäuleschaden erkennbar), w	1
<i>Trechispora farinacea</i> (Pers.: Fr.) Liberta	schwach (bevorzugt Splintholz), w	1
	Summe	114
* Molekularbiologisch wurde eine Sequenz gewonnen, die sich nur zur Gattung <i>Trametes</i> spp. zuordnen ließ.		

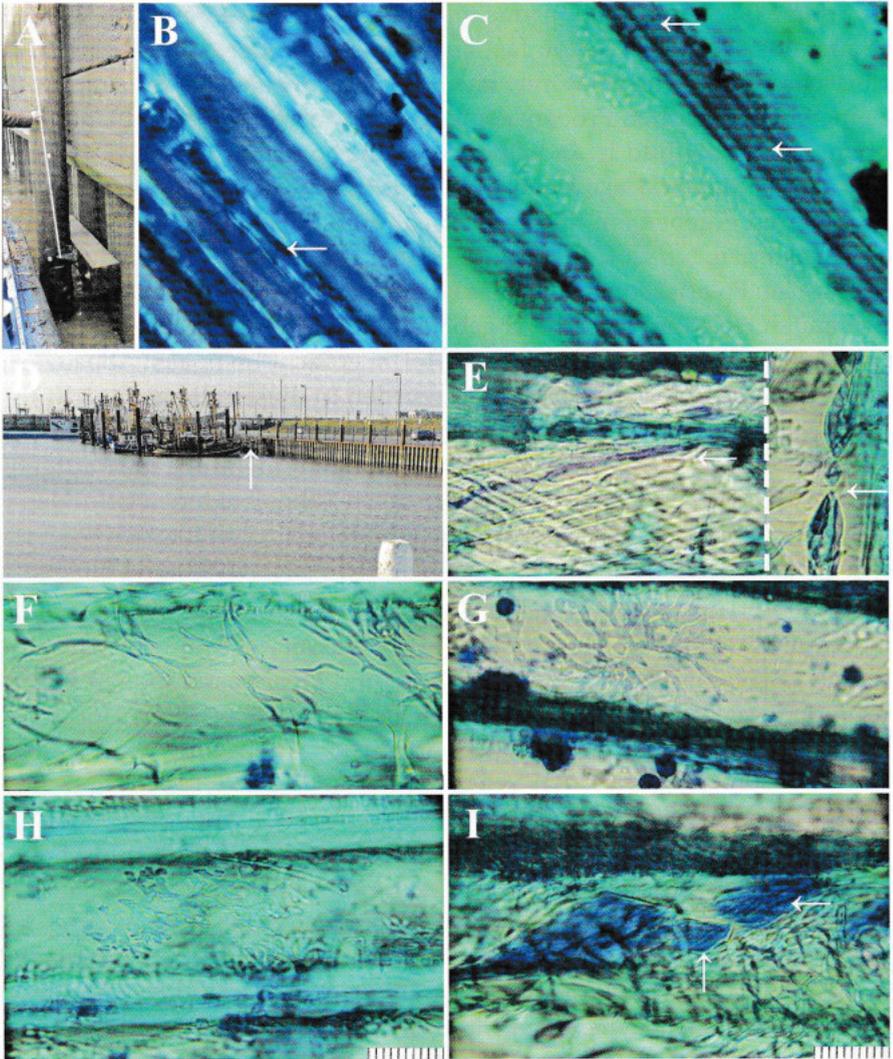
Die Untersuchungen zu Holzerstörern an Wasserbauhölzern und Dalben zeigen ein differenziertes Bild in den verschiedenen Zonen:

**In der Zone 1** (Schlamm-/Bodenzone im Süß- und Meerwasser unter weitgehendem Sauerstoffabschluss) liegen fast ausnahmslos Bakterien vor, als sehr langsam fortschreitende Holzzerstörer. Im ersten Jahr dringen sie ca. 1 mm weit ins Holz ein, wobei zwischen Proben aus Süß- und Meerwasser kaum Unterschiede bestehen. Das Abbaubild ist in frühen Stadien rhomben- bis etwas diamantenförmig, später fließen diese Kavernen-Strukturen durch den weiteren Abbau zusammen und ergeben ein flächiges Abbaubild; übrig bleibt die Mittellamelle (Erosionsbakterien; NILSSON & HOLT 1983, Abb. 2I und Abb. 3I). Erkennbar ist dieses Stadium am Polarisationsverlust des Holzes und einer lichtmikroskopisch "rau" erscheinenden Holzoberfläche im abgebauten Bereich. Im Gegensatz dazu zeigen Braunfäule-Schäden meist eine fast glatte Holzoberfläche im finalen Abbauzustand. Kavernensysteme von Tunnelbakterien wurden in diesem Bereich nicht festgestellt und Moderfäule-Kavernen nur im Randbereich. Dies deckt sich mit rund 40 Untersuchungen von Gebäudepfahlgründungen (nicht in Tab. 1 aufgeführt; HUCKFELDT & SCHMIDT 2015), bei denen nur selten Tunnelbakterien gefunden wurden, aber immer das Erosionsbakterien-Abbaubild und im Randbereich Moderfäule-Kavernen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch SINGH (1997) und BJÖRDAL et al. (2000).

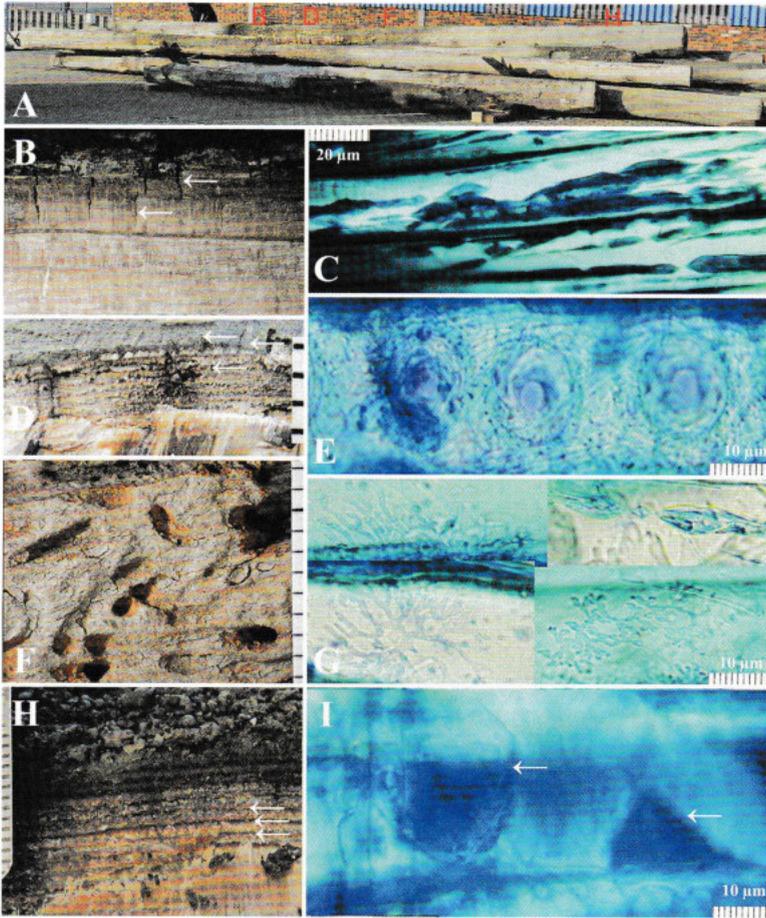
**In der Zone 2a** (Tidebereich mit ständigem Wasserwechsel und wirbelndem Schlamm – „Schlamm-Wasser-Zone“ im Süß- und Meerwasser; Boden kurzzeitig freiliegend; diese Zone fehlt in Seen) liegen als wichtigste pilzliche Holzzerstörer Moderfäulepilze vor, die als normale, natürliche „Abnutzung“ von Dalben im Wasserbau gelten können. Die Bakterien-schäden sind hier anders als im Schlamm: meist vom Tunneltyp bzw. Actinomyceten (Abb. 10G, Abb. 2F-H, I und Abb. 3G). In dieser Zone sind die Schäden durch Bohrasseln und Bohrmuscheln größer als die durch Moderfäulepilze und Bakterien, sofern der Salzgehalt ausreichend hoch ist (HAUSTEIN & HAUSTEIN 2015) und die Hölzer nicht zu lange freiliegen. Bemerkenswert ist, dass an den drei untersuchten Dalben mit Bohrassel- und Bohrmuschelbefall in den Bohrgangwänden sehr viele Kavernen von Bakterien- und Moderfäulepilzen nachgewiesen wurden (Abb. 3F)<sup>1</sup>. Da unter der Kalkschicht der Bohrmuscheln vergleichsweise viele Bakterienkavernen gefunden wurden, zeigt sich, dass die Moderfäulepilze und Bakterien von der Aktivität dieser Tiere profitieren. Zu dem gleichen Schluss kommt auch KOHLMAYER (1958). Im Meerwasser bei starkem Tidehub endet die Bakterienfäule z. T. erst 370<sup>2</sup> cm über N.N. (z. B. Yacht-Zentrum Störtebeker), wobei die Kavernenanzahl von unten nach oben abnimmt. Moderfäulepilze sind an allen Untersuchungspunkten der Zone 2 nachgewiesen worden und haben ihre größte Bedeutung in diesem Bereich bis zum Auftreten der Basidiomyceten-Fäule (Abb. 9 - Abb. 3). Ihre Anzahl nimmt auch von außen nach

<sup>1</sup> Die genaue Höhenlage der tierischen Schädlinge war an den gezogenen Dalben nicht mehr feststellbar, da das Hafenecken zum Verschlicken neigte. Zum Zeitpunkt der Probenahme lag der Hafengrund bei Ebbe frei/trocken.

<sup>2</sup> Diese Angabe ist relativ und wahrscheinlich immer abhängig von dem jeweiligen mittleren Tidehub, der von Hafen zu Hafen unterschiedlich sein kann.



**Abb. 2:** **A-C)** Hamburg, unterhalb der Mahatma-Gandhi-Brücke, Holz ca. 1 Jahr im Hafenbecken; Probenahme: 30.03.2017. **A)** Übersicht des Fundorts (stark wechselfeuchter Bereich), **B-C)** mikroskopische Details des Holzabbaus; **B)** spitz zulaufende Kavernen der Moderfäule (Polarisationsmikroskopie, 400-fach, Holz bläulich leuchtend; Kavernen dunkler); **C)** Bakterien-Ansammlung in Schleimmatrix mit beginnendem Holzabbau an einfachen Tüpfeln (Pfeile, 1000-fach); **D-I)** Hafen Norddeich - Yacht-Zentrum, Flut; Proben-Kanthölzer ca. 2 Jahre im Hafenbecken, Probenahme: 22.01.2016; **D)** Übersicht des Fundorts. **E-I)** mikroskopische Details des Holzabbaus in unterschiedlichen Zonen; **E-F)** stark wechselfeuchter Bereich; **E)** außen (ca. 1 mm tief), spitz zulaufende Kavernen der Moderfäule (1000-fach); **F)** innen (ca. 3 mm tief im Holz), feine Bakterien-Tunnel, 1000-fach; **G-H)** dauerhaft im Wasser stehender Bereich (Holz durch Geotextil vor Tieren geschützt), verschiedene Muster des Abbaus mit tunnelbildenden Bakterien und Actinomyceten. **I)** dauerhaft im Schlamm liegender Bereich; diamantförmige Kavernen und Tunnel von Bakterienfäulen, mikroskopische Aufnahme gefärbt mit Baumwollblau; Fotos: T. HUCKFELDT.



**Abb. 3:** **A)** Übersicht des Fundorts (Hafen Norddeich - Yacht-Zentrum) gezogene Dalben (vgl. Abb. 8D), **B-H)** Details der Schadbilder in unterschiedlichen Höhen; **B-C)** dauerfeuchter Bereich mit Bakterien- und Moderfäulepilz-Schäden oberhalb der Schlamm-Zone; **B)** Lupenaufnahme des moderfaulen Holzes mit feinem Würfelbruch (Pfeil); **C)** spitz zulaufende Kavernen der Moderfäule (Polarisationsmikroskopie, 400-fach, Holz grünlich leuchtend; Kavernen schwarz); **D-E)** stark wechselfeuchter Bereich mit Bakterien und Moderfäulepilzen; **D)** Lupenaufnahme des bakterien- und moderfaulen Holzes mit zoniertem Holzabbau besonders im dunkler verfarbten Spätholz (Pfeile); **E)** spitz zulaufende Kavernen der Moderfäule und feine sich überlagernde Bakterien-Tunnel und Durchbrechungen (Polarisationsmikroskopie, 1000-fach; **F-G)** dauerhaft im Wasser stehender Bereich mit tierischen Schäden durch Bohrrassel (*Limnoria lignorum*) sowie vielen Bakterien- und wenigen Moderfäule-Schäden; **F)** Lupenaufnahme eines tierischen Schadbildes: Viele feine Gänge im faulen Holz gehören zum Schadbild eines Bohrrassel-Angriffs; **G)** spitz zulaufende Kavernen der Moderfäule und feine Bakterien-Tunnel (Actinomyceten) und Durchbrechungen (Durchlicht- und Polarisationsmikroskopie, 1000-fach, Holz hell leuchtend; Kavernen/Tunnel dunkelblau); **H-I)** dauerhaft im Schlamm liegender Bereich mit überwiegend Bakterien-Schäden; **H)** Lupenaufnahme des Holzschadens: Spätholz stärker abgebaut als Frühholz. **I)** diamantförmige Kavernen der Bakterienfäule (Pfeile; Polarisationsmikroskopie, 1000-fach, Holz hell leuchtend; Kavernen/Tunnel dunkelblau); E, G und I gefärbt mit Baumwollblau; FOTOS: T. HUCKFELDT.

innen ab. Dieser Übergang liegt an Dalben (Hafen Hamburg) im oberen Bereich des Tidehubes. Im Salzwasser liegt er höher, hier besteht noch Forschungsbedarf.

**In der Zone 2b** (Holz ständig unter Wasser, nicht von Gezeiten beeinflusst); wurde eine langsam von außen nach innen fortschreitende Zerstörung festgestellt. In der Mantelzone der Dalben wurden viele Moderfäulepilze, aber auch Bakterienschäden nachgewiesen und im inneren Bereich überwiegend Bakterienschäden. Im Meerwasser wurden zudem auch Schäden durch holzzerstörende Meerestiere nachgewiesen; sonst wie 2a.

**Zone 3:** Die Wasser-Luft-Zone ist der gedachte Horizont der Wasserlinie, der zwei Lebensräume trennt. Der Übergangsbereich wurde mit einem Versuchsaufbau im Thünen-Institut erfasst (Abb. 4A). An der wenig bewegten Wasseroberfläche des „Klotzteiches“<sup>3</sup> wurde dieser Bereich genauer untersucht (Abb. 4G). Hier ergab sich eine erste Kavernen-Bildung im Süßwasser durch Moder- und Bakterienfäule am Wasserspiegel (ca. -0,5 und +0,5 cm). Unter Wasser drangen die Mikroorganismen weniger tief ins Holz ein (unter 1 mm) als über dem Wasserspiegel (bis 2,3 mm tief). Kavernen wurden auch in den Tüpfeln nachgewiesen (Abb. 9G), wie sie auch nach dreijähriger Wasserlagerung entstehen (ADOLF et al. 1972). 9-10 cm über dem Wasserspiegel entstanden nur noch selten und zerstreut Moderfäule-Kavernen an den untersuchten Nadelholzarten und keine mehr durch Bakterien. Den Holzfeuchtemessungen in 25 cm Höhe über dem Wasserspiegel entsprechend, wären für die Kavernenbildung in den untersuchten Nadelhölzern in grober Näherung größere Holzfeuchten als 50 % nötig, hier besteht jedoch noch Forschungsbedarf. Erwähnenswerte Unterschiede bei den verschiedenen Nadelholzarten ergaben sich nach dem kurzen Versuchszeitraum im Versuchsaufbau am Thünen-Institut kaum (vgl. Tab. 1<sup>4</sup>). Am Hafen Norddeich (Meerwasser) kam es in einem ähnlichen Zeitraum von rund 2 Jahren auch zu einer deutlichen Kavernenbildung in den Kantholz-Proben (Proben 100-114), die vergleichbar ist mit den Süßwasser-Kontrollproben im „Klotzteich“<sup>3</sup> am Thünen-Institut. Für Hafen-Dalben kann ein ähnliches Befalls-Szenario angenommen werden. An den Proben aus Bremen, die von Tauchern geborgen wurden, zeigten sich fast nur Kavernen durch Bakterien, nur an der Außenseite der Bohrkerne fanden sich an einigen Proben Moderfäule-Kavernen.

<sup>3</sup> Der sogenannte „Klotzteich“ ist ein Versuchsbecken des Thünen-Instituts, in dem schon viele Versuche zum Holzabbau durchgeführt wurden. Es ist ein offenes Betonbecken mit Holzeinbauten und geregelter Wasserstand (Überlauf), das von Gebäuden und Hecken umgeben ist, so dass der Wasserstand sehr gleichmäßig und die Wasseroberfläche beruhigt ist. Zuweilen wird es von Enten aufgesucht, die zusammen mit Wind und Wetter für Biodiversität im Becken sorgen.

<sup>4</sup> Bei Befallstiefen-Unterschieden von z. T. nur einem Millimeter ist eine verlässliche Tiefen-Untersuchung an sägeraurem und nassem Holz bei kleiner Stichprobenzahl repräsentativ schwer möglich, hier sehen wir noch Forschungsbedarf.

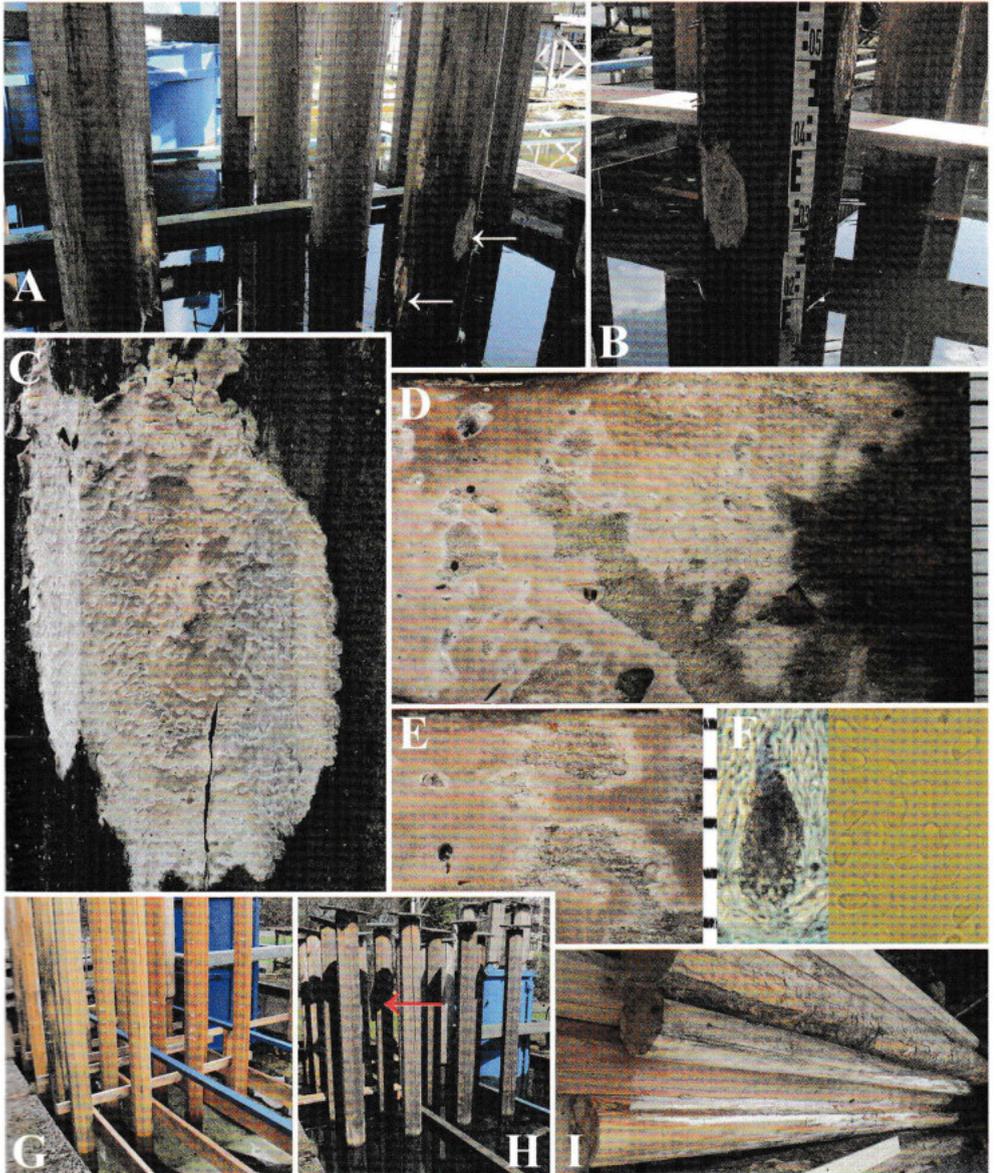


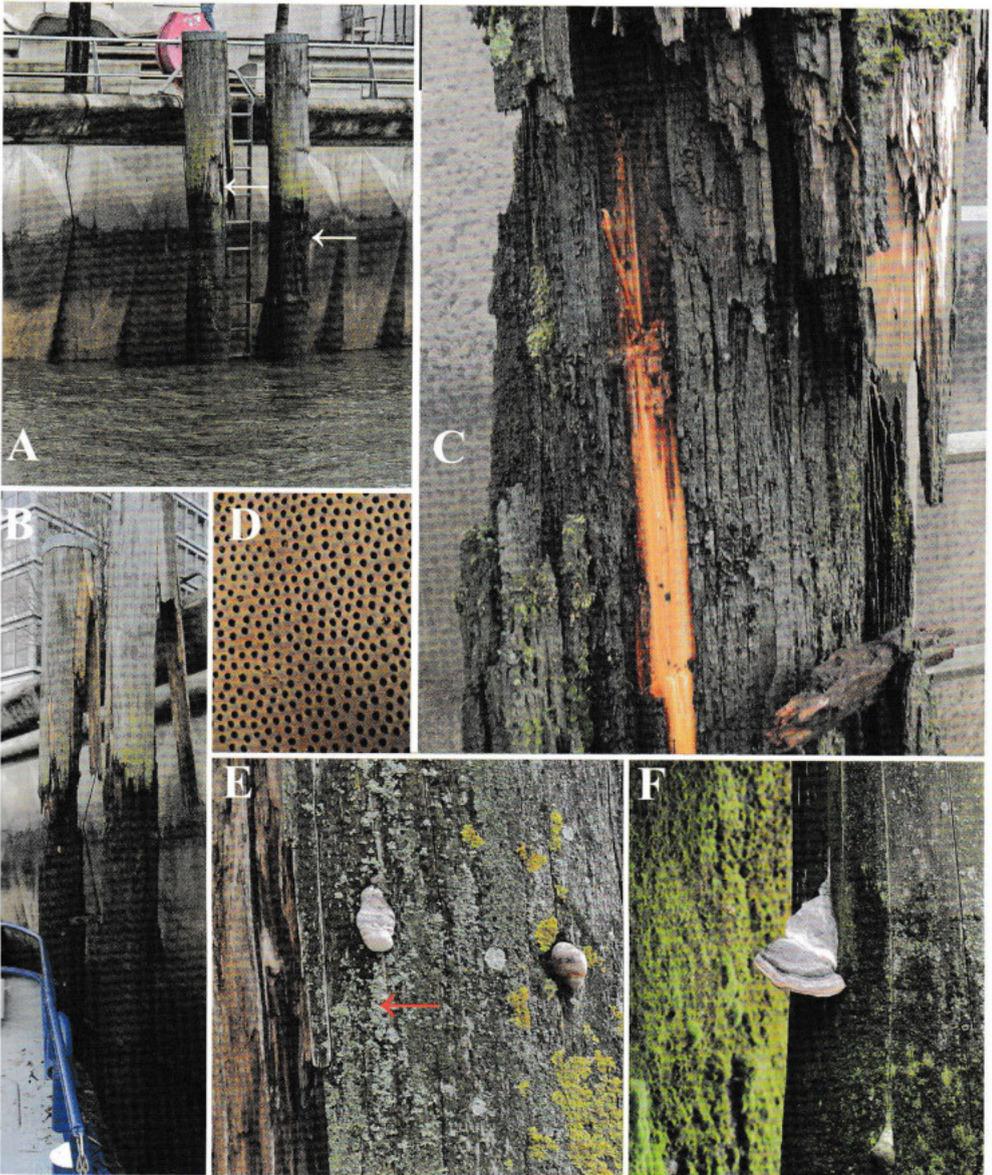
Abb. 4: A, G, H) Übersicht Klotzteich mit den Probe-Dalben/-Balken (Kiefer, Fichte, Lärche und Douglasie) im Süßwasser am Thünen-Institut, Hamburg - Rundholz-Nr. 1 und 5: Kiefer mit Fruchtkörper (Pfeil); B) Detail der Dalbe mit Probenahme-Ort an der Wasseroberfläche am Rundholz Nr. 5; C-E) Detail des Fruchtkörpers von *Phlebiopsis gigantea*, eingebracht durch Vorinfektion des Holzes, Fruchtschicht in zwei Schichten gewachsen, die untere Schicht jedoch etwas abgetragen; E) Cystiden sind mit der Lupe nicht erkennbar, sie liegen im Fruchtkörper; F) links: massiv kristallbesetzte Cystide unterhalb des Hymeniums, rechts: hyaline, etwas tropfenförmige, dünnwandige Sporen, 6-7  $\mu\text{m}$  lang (1000-fach); D-E) Millimeter-Maßstäbe (Fotos: T. HUCKFELDT, außer G und I: E. MELCHER).

In dem Bereich der **Zone 4** (dem Augenschein nach von Salzwasser beeinflusst) oberhalb der Wasser-Luft-Zone (Meerwasser mit Tidehubzone) finden sich vor allem Moderfäulepilze und wenige Bakterien; Basidiomyceten sind rar, es treten *Dacrymyces*-Arten auf (Abb. 1). Im Hamburger Hafen fehlt diese Zone, da zu wenig salzig, die Basidiomyceten können fast direkt über der Tidehubzone nachgewiesen werden und im Substrat auch etwas darunter.

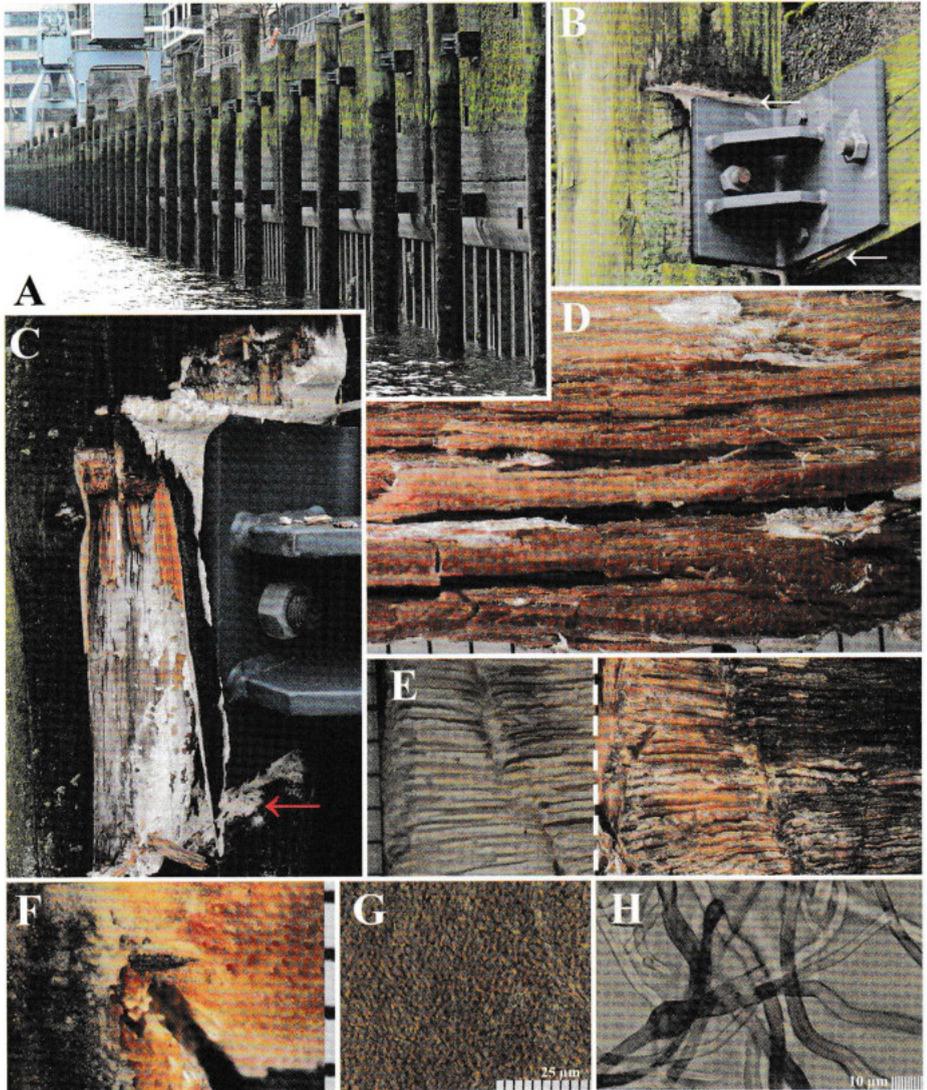
In dem Bereich der **Zone 5**, baulich nicht geschützt (wahrscheinlich<sup>5</sup> kaum/nicht vom Salz-/Seewasser beeinflusst) oberhalb der Tidehubzone finden sich vor allem Moderfäulepilze und kaum noch Bakterien; Basidiomyceten wie z. B. a) Gallertränen und Corticiaceae mit schwachem Abbaupotenzial im Splintholz und an dauerfeuchten Kernholz-Bereichen waren vertreten und b) einige massive Fäule-Erreger wie *Lentinus lepideus* (Braunfäule), *Trametes* spp. (Weißfäule) und *Fomitopsis pinicola* (Braunfäule) waren selten. Beim Befall mit *Fomitopsis pinicola* waren verhältnismäßig junge Dalben betroffen, deren Holzqualität aufgrund eines hohen Splintholzanteils zu wünschen übrigließ, so dass hier hochwahrscheinlich eine Vorinfektion im Wald stattgefunden hatte (Abb. 5). *Fomitopsis pinicola* wird an Holzkonstruktionen im Hochbau fast immer eingeschleppt. Wie massiv die Schäden durch *Fomitopsis pinicola* sind, zeigt Abb. 5. In diesen jungen Dalben wurden oberhalb des Tidenhubes viele Werftkäfer-Larven im massiv braunfaulen Kiefernholz gefunden. Insgesamt wurden in dieser Zone die massivsten Fäuleschäden an Kiefernspint- und -kernholz festgestellt (Abb. 5).

In dem Bereich der **Zone 6** (verminderte Bewitterung durch Abdeckung) finden sich bevorzugt Basidiomyceten als Fäule-Erreger. Jedoch ergab sich eine weitere Differenzierung der Lebensräume, die einen Vergleich erschwerte. An der Nordsee standen die untersuchten Dalben einzeln und ragten hoch empor. Auf den Mantelflächen wurden Pilzarten nachgewiesen, die an wechselfeuchte Lebensräume angepasst sind, z. B. *Dacrymyces* spp. (Braunfäule; Abb. 1), aber nur wenige Großpilze mit Innenfäule. Im Hamburger Hafen war die Situation anders: Viele Dalben lagen der Hafenbeckenwand vergleichsweise dicht an und waren mit der Mole durch Bohlenabschnitte verbunden; somit lief der bauliche Holzschutz ins Leere (Abb. 5 - Abb. 7), es ergaben sich fast erdähnliche Bedingungen. In diesen Bereichen wurden *Antrodia xantha* (Braunfäule; Abb. 6) und *Gloeoporus taxicola* (Weißfäule; Abb. 7) nachgewiesen. In Einzelfällen dehnten sich Innenfäulen bis unter die obere Abdeckung aus. Hier wurde das Artenspektrum breiter und es wurden z. B. *Gloeophyllum* spp. (Braunfäule) und als Weißfäule-Erreger *Trametes* sp., *Dacryobolus karstenii*, *Hyphoderma puberum* und *Resinicium bicolor* nachgewiesen.

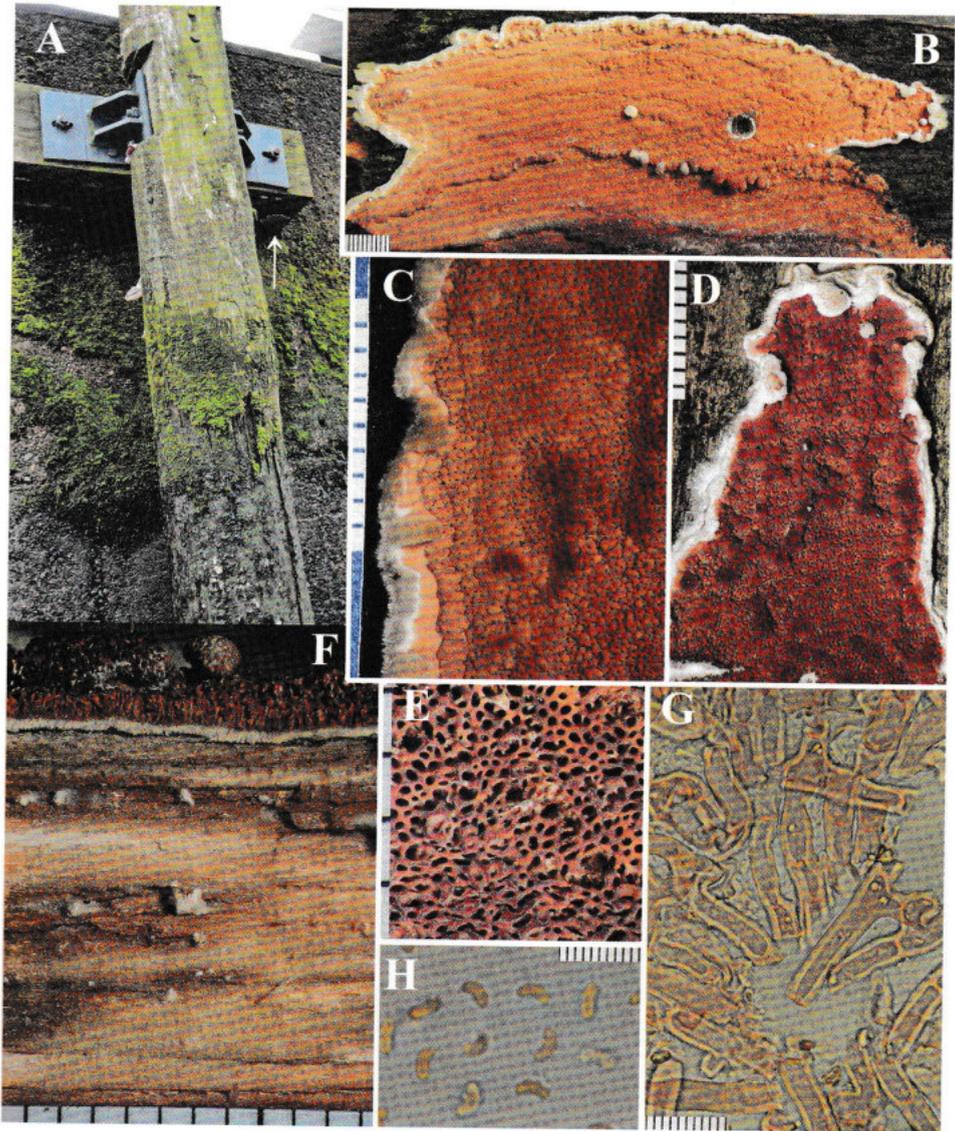
<sup>5</sup> An den Proben aus dieser Zone, an denen der Salzgehalt bestimmt wurde, konnte keine erhöhte Salzkonzentration nachgewiesen werden, jedoch liegen nicht zu allen Proben-Entnahme-Punkten Salzanalysen vor. Auch kann diese Zone an Dalben – ohne eine Salzkonzentrations-Bestimmung – kaum sicher benannt werden, so dass hier noch Forschungsbedarf besteht.



**Abb. 5:** A-F) *Fomitopsis pinicola*, Hamburg, Hafen – Großer Grasbrook, 2. Deko-Dalben (funktionslos), 30.03.2017; A) Übersicht des Fundorts mit Schadbereich über der Tidehubzone (Pfeile); B) Schadbereich der Dalbe; C) Detail des Schadbereiches mit massiver Braunfäule und Insektenschaden (u.a. Werftkäfer); D) Porenansicht mit 3-4 Poren je mm; E-F) Übersicht Fruchtkörper; Fotos: T. HUCKFELDT



**Abb. 6:** *Antrodia xantha*, 30.03.2017; **A)** Übersicht des Fundorts, Hamburger Museumshafen, Innenstadt (Süßwasser; Fertigstellung 2008); **B)** Detail der Dalbe; weiße Fruchtkörper nur in Metallwinkel-Nähe gewachsen (Pfeile); **C)** nach Öffnung/Aufbruch: Braunfäule tiefgreifend mit viel weißem, lappigem und festem Mycel, auch tief im Holz (Mycel von außen nur an der Anschnitt-Fläche unter dem Winkel sichtbar - Pfeil); **D)** Detail der Braunfäule mit bevorzugtem Abbau des Frühholzes, es ergibt sich der typische muschelähnliche Bruch der Gattung *Antrodia*; **E)** Fruchtkörper im Querschnitt, links ohne, rechts mit flächigem Melzer-Reagenz-Auftrag, die Blau-Reaktion in den Poren deutlich, aber nicht flächig; **F)** wie vor, aber insgesamt mit flächigem Melzer-Reagenz-Auftrag: Reaktion nur in der Trama, Poren ohne Reaktion (Fund in einem Gebäude); **G-H)** Melzer-Reaktionen, **G)** schwach amyloid auch in der Hyphenmasse (Übersicht: 200-fach); **H)** einige Faserhyphen stark amyloid, andere nicht amyloid (Material aus einer Kultur); charakteristisch sind die Aufblasungen der Faserhyphen, die auch am Hyphenende vorkommen können (Pfeil, 1000-fach). D-F) Millimeter-Maßstäbe. Fotos: T. HUCKELDT



**Abb. 7:** *Gloeoporus (Meruliopsis) taxicola* – Fruchtkörper, 30.03.2017; **A)** Dalbe, Standort wie zuvor; **B-C)** frischer Fruchtkörper, gewachsen an der Unterseite des Distanzhalters (Übergriff auf Dalbe nicht erkennbar); **B)** Übersicht Fruchtkörper ; **C)** Detail aus B, Fruchtschicht wirkt merulioid; Rand wulstig und glasig mit feinen Haaren vergleichbar *Merulius tremellosus* Fr.; **D-F)** getrocknete Fruchtkörper; **D)** Detail von B: Die weinrote Farbe hat sich durch die Trocknung vertieft, der Rand ist weiß und eingefallen; **E)** Detail von B: Die Fruchtschicht wirkt porig; **F)** Fruchtkörper-Querschnitt mit Substrat: Trama weiß und deutlich abgesetzt, direkt unterhalb des Fruchtkörpers Holz mit Weißfäule (*G. taxicola*), ab ca. 1 mm Holztiefe auch eine dominante Braunfäule durch *Fomitopsis pinicola* (primärer Befall, mit Schnallen); die Mycelien bis 10 mm tief im Holz gehören aber zu *G. taxicola* (ohne Schnallen), **G)** etwas dickwandige Grundhyphen ohne Schnallen und mit deutlichem Lumen **H)** hyaline, gebogene Sporen, 4,5-5 µm lang (1000-fach); **B-F)** Millimeter-Maßstäbe; **G-H):** 10 µm lang, gefärbt in Kongorot (in Wasser). FOTOS: T. HUCKFELDT

Zudem ergaben sich weitere Aspekte:

- A. Im Vergleich zwischen den Proben aus dem Yacht-Zentrum (Salzwasser) und Hamburger Hafen (Süßwasser), zu denen Bildmaterial und aufsteigende Untersuchungsreihen vorlagen, zeigt sich im Meerwasser eine Tendenz zur Verschiebung der Zone 5 (Schäden durch Basidiomyceten) nach oben.
- B. Es zeigt sich, dass die Pilzaktivität von Moderfäulepilzen an diesen Standorten von der Sauerstoff-Verfügbarkeit abhängt, welche wiederum durch die Fraßstätigkeit von wirbellosen Tieren stark beeinflusst wird.
- C. Die frühen Stadien (Inkubationszeit bis 18 Monate im Freiland) zeigten eine interessante Kavernen-Verteilung in der Zone 3 (Ergebnis aus „Klotzteich“ und Hafen Norddeich). Die Erreger der Moderfäule- und Bakterienkavernen dringen von außen nach innen ins Holz ein (von Rissen etc. abgesehen). Bei guter Sauerstoffversorgung dringen die Moderfäulepilze jedoch schneller ins Holz ein (mit Kavernenbildung). Kavernenbildende Bakterien dringen nur sehr langsam ins Holz vor. Dabei ist jede Mittellamelle eine Barriere und trennt zwei Befallsbereiche, die getrennt sind, sich aber lichtmikroskopisch oft überlagern. So wurden Moderfäulepilz-Kavernen bis etwa 2 mm Tiefe nachgewiesen, Bakterien-Kavernen aber nur bis 1 mm Tiefe. Bei längeren Standzeiten drehte sich die Verteilung um: Im inneren Bereich des Holzes wurden dann nur Bakterien-Kavernen nachgewiesen (i.d.R. bei einer Befallstiefe über 2 mm). An einer Dalbe im Hamburger Museumshafen (Mahatma-Gandhi-Brücke) mit der Standzeit von einem Jahr waren Moderfäule- und Bakterienkavernen fast gleich tief nachweisbar. Bei Dalben mit längeren Standzeiten finden sich im Inneren der Dalben fast nur Bakterien-Kavernen.
- D. An einigen Pfählen wurde ein Vorschaden (Rohholzbefall) durch *Phlebiopsis gigantea* nachgewiesen. Diese Pfähle wurden trotz Vorschaden im Klotzteich exponiert und nachfolgend untersucht. Ein Kiefernpfahl war beim Einbau auf der gesamten Länge zumindest einseitig mit Mycel bewachsen (Abb. 4I). Hier zeigte sich, dass dieser Befall während der bisherigen Versuchsdauer räumlich nur im unteren, stärker durchfeuchteten Teil des Pfahles erhalten blieb und weiterwuchs. Es kam sogar zu einer Fruchtkörperbildung (Abb. 4B-E). Die mittels Widerstandsmessung ermittelte Holzfeuchte schwankte zwischen 70-85%. Während das Mycel oberhalb der Wasserlinie auf bis zu 50 cm erhalten blieb, waren es an der wetterabgewandten, trockeneren Seite nur etwa 35 cm. Im oberen Bereich der Pfähle waren – bei Holzfeuchten zwischen 21-50 % – dem Augenschein nach nur noch kleine Mycelreste erkennbar, obwohl einige Hölzer beim Einbau in fast ganzer Länge streifig bewachsen waren (Abb. 4I); die Mycelien waren über den Versuchszeitraum fast verschwunden. An je einem Lärchen- und Douglasienstamm scheint der *Phlebiopsis gigantea*-Befall vollständig vertrocknet zu sein (mehr als 50 cm über dem Wasserspiegel). Somit gehört *Phlebiopsis gigantea* zu den feuchteliebenden holzzerstörenden Pilzen. Zum Vergleich: *Antrodia*-, *Coniophora*- und *Serpula*-Arten zerstören Holz unter Fasersättigung, also unter 28 % Holzfeuchte (STIENEN et al. 2014).

- E. Die Vergleichsgruppe lässt sich sowohl mit den Proben aus dem Hamburger Hafen (geschütztere Lage als am Meer, aber nur Nadelholz-Dalben) als auch mit den Proben von der Nordsee vergleichen (viele Proben aus Laubholz). An den Laubhölzern wurden in beiden Gruppe z. B. *Dacrymyces* sp., *Stereum hirsuta*, *Trametes* sp. und auch *Auricularia auricula-judae* an *Dicorynia paraensis* nachgewiesen. Bei den Laubhölzern fiel auf, dass die meisten Schäden durch Basidiomyceten im Splintholz begannen (wenn vorhanden) und Ausgangspunkt für tieferliegende Schäden im Kernholz waren. Zum Teil war aber auch nur das Splintholz befallen, so z. B. durch *Stereum hirsuta*. Einige Ausnahmen ergaben sich durch Vorinfektionen an *Dicorynia paraensis*, deren Verursacher aber nicht bestimmt werden konnten. Aufgrund der Homogenität der Steganlage aus *Dicorynia paraensis* ergab sich eine geringere Artenvielfalt als bei den Dalben. Die Untersuchungen aus dem Hamburger Hafen und der Steganlage zeigen, dass sich durch fehlerhafte Konstruktionsdetails bei beiden Anlagen erdähnliche Bedingungen ergaben. Weißfäulepilze wie *Dacryobolus karstenii*, *Gloeoporus taxicola*, *Hyphoderma puberum*, *Mycena galericulata*, *Resinicium bicolor*, *Schizopora paradoxa*, *Laccaria laccata* (Fäuletyp unklar) und *Trechispora farinacea* zeigten diese baulichen Schwächen auf.
- F. Bei einigen Pilzen konnte ein massiver und zur Pilzgattung passender Fäuletyp direkt nachgewiesen werden, so z. B. bei *Antrodia/Oligoporus* spp., *Antrodia xantha*, *Coniophora* sp., *Coniophora puteana*, *Daedalea quercina*, *Fomitopsis pinicola*, *Gloeophyllum sepiarium*, *Phellinus* sp., *Schizopora paradoxa* und *Trametes multicolor*. Bei vielen anderen Pilzen ließ sich vor Ort kein direkter Zusammenhang zum Fäulepilz finden. Zahlreiche Schichtpilze, die eine Weißfäule verursachen, wuchsen auf von Braunfäule-Erregern vorgeschädigtem Holz.
- G. Wenn Arten wie *Coniophora puteana*, *Daedalea quercina*, *Fomitopsis pinicola*, *Gloeophyllum sepiarium* und *Trametes* sp. auftraten, lag, soweit erkennbar, eine massive Innenfäule vor, so dass der Befall keiner Himmelsrichtung zugeordnet werden konnte. Bei Kleinpilzen, wie *Dacrymyces* war die Lage der Fruchtkörper gleich dem Fäule-Ort.
- H. In den Proben von der Übergangszone Wasser-Luft (Zone 3) wurden immer die gleichen Schadbilder nachgewiesen, ob in Salz- oder Süßwasser, ob an Nadel-, Eichen- oder Tropenholz, je nach Alter und Holzart nur unterschiedlich in der Befallstiefe. Nachgewiesen wurden immer Abbaubilder von Moderfäulepilzen und Bakterien, selten Bläuepilze, selten Basidiomyceten und dann nur Substrathyphen.
- I. Eine Besonderheit ergab sich unterhalb der Kalkauskleidungen der Bohrmuschelgänge: Hier fanden sich etwas eigenartige Kavernen, die wahrscheinlich auch von Bakterien stammen; sie waren ähnlich den Abbaumustern der Erosionsbakterien (Abb. 8). Moderfäulepilz-Kavernen waren in diesem Bereich seltener. Die Schäden durch Bakterien in dieser Zone können durchaus bedeutend werden, jedoch ist deren Ausbreitungsgeschwindigkeit in radialer Richtung gering und beträgt nach den vorliegenden Untersuchungen weniger als 1 mm im Jahr. Durch die

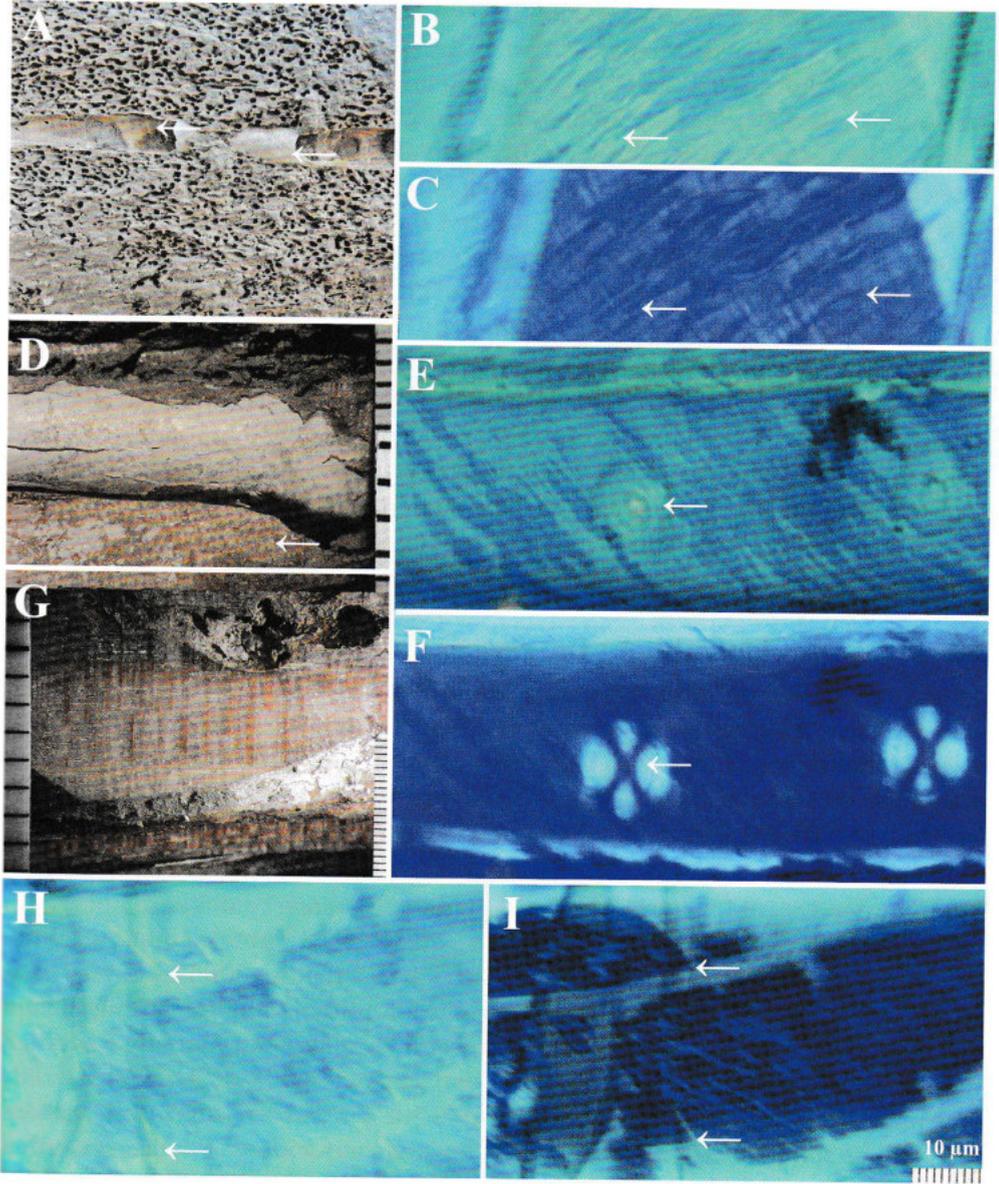
Aktivität der Bohresseln und -muscheln steigt ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit. Im Kernholz ist sie wahrscheinlich noch langsamer, hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

- J. Ein Befall an *D. paraensis* durch *Trametes* sp. ließ sich auch über eine Sequenzierung nicht weiter als bis zur Gattung bestimmen, da die Art in den Datenbanken nicht enthalten und auch anatomisch nicht zuzuordnen war. Basidien und Sporen fehlten.

Unseres Erachtens lässt sich ein wesentlicher Teil des Pilzbewuchses oberhalb der Moderfäulepilz-Zone vermeiden. Ist dies erwünscht, ergibt sich die Notwendigkeit, den baulichen Holzschutz zu verbessern, da auch holzerstörende Pilze mit geringer Abbauleistung mit den Jahren/Jahrzenten zu starken Fäulen führen können (vgl. z. B. LIESE 1928). Dabei zeigt sich ein altbekanntes Muster bei Wasserbau-Pfählen, vergleichbar den Schäden an Masten und Schwellen: Der Ausfall einzelner Bauteile erscheint in den ersten Jahren beliebig, folgt aber einer Gaußschen Kurve. Bei einer großen Anzahl von Pfählen/Hölzern fallen die ersten schon nach wenigen Jahren aus (BOLLMUS et al. 2014; NOWOTNY 1928). Dies könnte auch im Fall der Dalben so sein, nur war die Stichprobenzahl zu klein; bei der Steganlage aus *D. paraensis* konnte dies nachgewiesen werden. Oft wird bei Angaben wie der „mittleren Lebensdauer“ übersehen, dass erst, wenn 50 % ausgefallen sind, die mittlere Lebensdauer erreicht ist. Hiervon sind Dalben in gleicher Weise betroffen. Vermutlich sind hierfür die Inhomogenität des Holzes der einzelnen Holzarten, aber auch Vorinfektionen verantwortlich. Dieses Phänomen ist auch an anderen, ähnlich stark belasteten Produkten, wie z. B. Masten, Eichen-Zaunpfählen (BRISCHKE & ROLF-KIEL 2009) und Hölzern in Testfeldern (RAPP et al. 2010, MEYER et al. 2014) zu beobachten.

Zwei Szenarien waren verantwortlich für erste, oft frühe Dalben-Ausfälle: 1. die Besiedlung durch Basidiomyceten im oberen Teil (so im Hamburger Hafen) oder 2. durch Meerestiere im Zusammenwirken mit Moderfäulepilzen und Bakterien in der Wasserzone. Hierbei haben bei den untersuchten Dalben die Meerestiere zu den stärksten Schäden geführt (so im Yacht-Zentrum Störtebeker).

Die meisten anderen der in Tab. 1 bzw. Tab. 2 genannten Pilze sind frühe Holz-Besiedler (initiale Abbauphase, z. B. *Stereum hirsuta* und *Dacrymyces stillatus*) – sie führen zu langsam fortschreitenden Fäuleschäden und sind zuweilen auf Splintholzbereiche begrenzt. Andere Fäulepilze zeigen erdähnliche Verhältnisse in Konstruktionen an (z. B. *Mycena galericulata* und *Gloeoporus taxicola*), und eine dritte Gruppe wächst an Holz in jedem Abbaustadium (z. B. die Braunfäulepilze *Coniophora*, *Antrodia* und *Oligoporus* spp.). Wie für alle anderen Konstruktionen (Altbau, Fachwerk, Fenster, Flachdächer, GaLa-Bau und Spielplätze) gilt, dass die massiven und schnell fortschreitenden Schäden im oberen Bereich der Dalben von Braunfäulepilzen verursacht wurden. Starke Schäden durch Weißfäulepilze waren selten und vereinzelt, so durch *Phellinus*-, *Pleurotus*- und *Trametes*-Arten an Tropenholz. Ungewöhnlich waren bei den Pilzvorkommen zwei Aspekte: a) Die Seltenheit von Blättlingen (*Gloeophyllum*



**Abb. 8:** A-I) Dauerfeuchter Bereich mit Moderfäulepilz- (nicht gezeigt) und Bakterien-Schäden unterhalb der Kalkröhren von Schiffsbohrmuscheln (*Teredo navalis*); A, D und G) Schäden durch Schiffsbohrmuscheln (*Teredo navalis*) – von der Übersicht zum Detail: Das Holz zeigt dem Augenschein nach kaum Schäden, es schneidet sich jedoch leicht und zeigt mikroskopisch massive Schäden; B-C) Bakterien-Schäden mit feinen Kavernen; B) Durchlicht; C) Polarisationsmikroskopie; E-F) Bakterien-Schäden fein spitz zulaufend; E) Durchlicht; F) Polarisationsmikroskopie, Hof-Tüpfel und Teile der Zellwand ohne Bakterien-Schäden (normale Polarisation); H-I) flächige Bakterien-Schäden; H) Durchlicht; I) Polarisationsmikroskopie, 1000-fach, Holz hell leuchtend; Kavernen/Tunnel dunkelblau, mikroskopische Aufnahmen gefärbt mit Baumwollblau; Fotos: T. HUCKFELDT.

spp.) an den untersuchten Nadelholz-Stichproben, die häufiger zu erwarten gewesen wären, da *Gloeophyllum*-Arten im Garten- und Landschaftsbau häufig sind (JAHN 1979, KRIEGLSTEINER 1991), und b) das zweimalige Auftreten von *Antrodia xantha* im Freiland<sup>6</sup>. Diese Art ist bislang im Norden Deutschlands im Freiland nicht nachgewiesen<sup>7</sup>. Die Gruppe der Moderfäulepilze und Bakterien zeigt die sauerstoffarmen Bereiche an; während die Zonen mit ausschließlichen Bakterienschäden (rhomben- bis diamantförmigen Kavernen) sauerstofffrei sind (DANIEL & NILSSON, 1998). Ein sicheres Anzeichen für vorinfiziertes Bauholz ist das Vorkommen des Rotrandigen Baumschwamms<sup>8</sup> (HUCKFELDT & SCHRÖTER 2005).

Im Allgemeinen war kein klarerer Zusammenhang zwischen der Himmelsrichtung und der Art des Fäule-Erregers/Befalls herstellbar. Einzig bei den vorinfizierten Versuchsdalben zeigte sich an der Wetterseite, bedingt durch eine höhere Holzfeuchte, dass die Fruchtkörper hier bis ca. 20 cm höher wuchsen. Bei den Freiland-Dalben überlagerten andere Faktoren den möglichen Einfluss der Wetterseite, so bei den Dalben im Hamburger Hafen, die alle dicht an der Hafenanwand standen. Bei denen an der Nordsee trat zuweilen Innenfäule auf, die sich zerstörungssarm nicht weiter untersuchen ließ (Abb. 1A).

## Merkmale des Holzabbaus im Wasser und Schlamm

An den untersuchten Dalben wurden neben Weiß- und Braunfäule-Schäden im oberen Bereich auch die im Folgenden näher beschriebenen Moderfäule- und Bakterienfäule-Schadbilder nachgewiesen. Basidiomyceten als Verursacher der Abbaumuster wurden in den unteren Zonen ausgeschlossen, da sich in diesen Bereichen unabhängig vom Befallszeitraum keine Basidiomyceten-Hyphen nachweisen ließen.

Moderfäulepilze und Bakterien finden sich an den Wasserbauhölzern bevorzugt im ständig nassen Holz. Die Moderfäule-Schäden sind gut erkennbar an ihren spitz zulaufenden Kavernen, die sie von den kavernenbildenden Weißfäulepilzen abgrenzen, welche Kavernen mit runden Enden bilden. Die unterschiedlichen Abbaumuster sind in Abb. 12 bis Abb. 16 zusammengefasst. Moderfäule-Kavernen wurden an Dalben im Süß- und Meerwasser nachgewiesen (Abb. 9 bis Abb. 3). Für ihr Auftreten bedarf es nur einer hohen Holzfeuchte. Sie wurden auch in den Dalben-Abschnitten mit höherem Salzgehalt nachgewiesen; aus anderen Bereichen werden sie oft von Basidiomyceten verdrängt. Wird der Sauerstoffgehalt zu gering, übernehmen die Bakterien mit einem flächigen Abbau die Holzzersetzung. Durch ihr Hyphenwachstum dringen Moderfäulepilze im Vergleich zu den Bakterien etwas schneller ins Holz ein. Da sie aber im Gegensatz zu den Weiß- und Braunfäulepilzen direkt in der Holzzellwand wachsen, ist ihre Ausbreitungs-Geschwindigkeit im

<sup>6</sup> In Gebäuden ist *Antrodia xantha* durchaus häufig, auch im Norden (HUCKFELDT/SCHMIDT 2015).

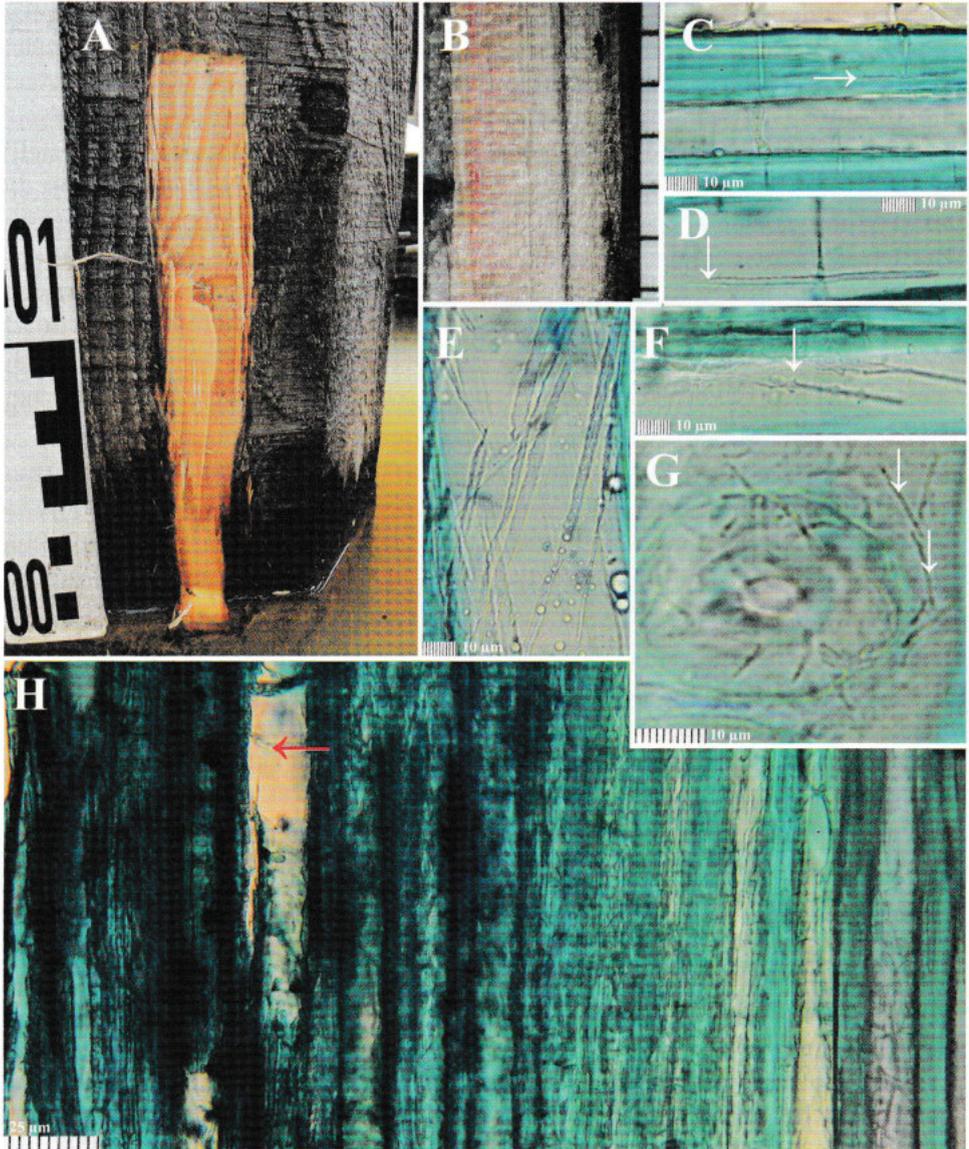
<sup>7</sup> Hinweis: Von der DBU wird ein Projekt zur Biodiversität von Pilzen gefördert, in dem hierzu ggf. schon weitere Erkenntnisse zur Verbreitung von *Antrodia xantha* vorliegen könnten.

<sup>8</sup> Dies unterstreicht die Mutmaßung, dass für die Deko-Dalben zweitklassiges Holz verwendet wurde.

Vergleich zu den Basidiomyceten wiederum gering. Weiß- und Braunfäulepilze wachsen kaum in den Holzzellwänden, sie durchwachsen die Lumina der Holzzellen und können so erheblich schneller ins Holz vordringen als die Moderfäulepilze. Auch zum Holzabbau dringen ihre Hyphen kaum in die Holzzellwand ein (HUCKFELDT 2003). Eine Übersicht der Abbauarten ist in Abb. 12 bis Abb. 16 zusammengestellt. Am Anfang des Befalls dringt eine Moderfäulepilz-Hyphe ins Holz ein und löst die Holzsubstanz zu einer T-förmigen Kaverne auf. Die Enden sind zugespitzt (Abb. 9D); auch die Hyphen in den Kavernen verzweigen sich zuweilen, wachsen aus und bilden neue T-förmigen Kavernen aus (Abb. 9F); es entsteht ein Kavernennetzwerk (Abb. 9E). Wozu die spitz zulaufenden Kavernen nötig sind, ist unbekannt; durch die Zuspitzung läuft in jedem Fall eine ca. 0,2 µm breite Hyphe (Abb. 12) und durchwächst so mehrere Kavernen, welche z. T. perlenschnurartig aufgereiht zu sein scheinen (Abb. 14).

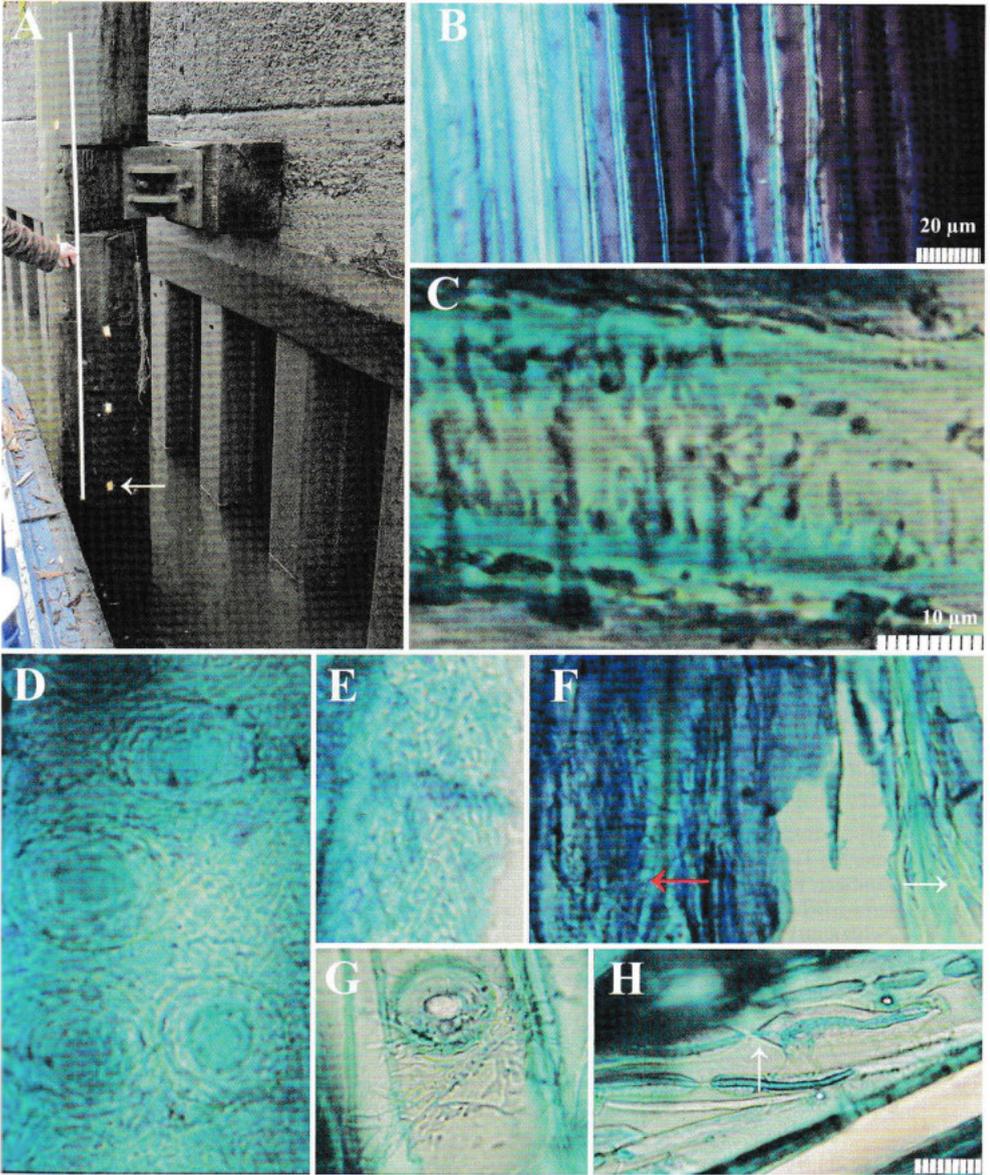
Der Zellwandabbau durch Bakterien und Moderfäulepilze erfolgt im Gegensatz zu den Basidiomyceten in der Holzzellwand. Sie können sich im Lumen des Holzes durch Teilung/Wachstum, Wasserbewegung und wahrscheinlich Tiere verbreiten. Am Anfang scheinen einige in eine Schleimschicht eingebettet zu sein (Abb. 2C).

Bakterien im Holz sind lichtmikroskopisch meist nicht sichtbar, zuweilen treten aber größere Stäbchen-Bakterien auf (Abb. 2C). Zur Erkennung von Bakterien Schäden ist die Polarisationsmikroskopie hilfreich, da so die sehr feinen Kavernen von Ablagerungen auf der Zellwand unterschieden werden können. An Dalben wurden zwei Arten von Bakterien Schäden gefunden: Kavernen von Tunnelbakterien, die zusammen mit Moderfäulepilzen in den nicht sauerstofffreien Bereichen auftraten (Abb. 9H), und Bakterien-Abbaubilder, die ein flächenförmiges Schadbild zeigen (Erosionsbakterien; Abb. 16) und im Anfangsstadium breite rhomben- bis diamantenförmige Kavernen bilden (Abb. 3I). Der flächenförmige oder erosionsähnliche Schaden wurde nur in Bereichen der Dalbe gefunden, die unter Sauerstoffabschluss standen, also tief im Schlick. Das gleiche Abbaumuster wurde auch an Gründungspfählen von Gebäuden nachgewiesen, die Jahrzehnte im nassen Erdreich lagen. Die Kavernensysteme der Tunnelbakterien zeichnen sich am Anfang durch feine buschähnliche Verzweigungsmuster aus, die jedoch unterschiedlich aussehen können (Abb. 10C, Abb. 2F-I, Abb. 3G; Abb. 15). Schreitet der Befall voran, wird es bei der lichtmikroskopischen Untersuchung oft unübersichtlich, da sich diverse Kavernen überlagern (Abb. 9H, Abb. 10D-E, Abb. 3E). In der Elektronenmikroskopie sind die Schnitte zwar dünner, aber die Verzweigungsmuster sind dadurch oft nicht mehr zu erkennen, dafür aber die verursachenden Bakterien. Der Abbau durch Bakterien wird als langsam beschrieben, dies stimmt jedoch nur bedingt: Der eigentliche Holzabbau kann nach nur 18 Monaten final sein. Am Ende zerfällt das Holz zu einer breiigen Masse. Der Abbau reicht jedoch nur wenige Holzzellreihen tief; also entsteht nur ein marginaler Gesamt-Schaden. Dies konnte an 18 Monate alten Versuchs-Dalben gezeigt werden – sie sind dann von einem etwas schmierigen Film überzogen (Abb. 9). Das Langsame an den Bakterien-Schäden und etwas



**Abb. 9:** **A)** Übersicht des Fundorts (Klotzteich, vgl. Abb. 1), **B)** Detail des Pfahls im Längsschnitt, Fäule kaum 1 mm ins Holz eingedrungen; **C-H)** mikroskopische Details des Holzabbaus (Durchlicht); **C-F)** unterschiedliche Stadien der Bildung von Moderfäule-Kavernen, 1000-fach; **C)** T-förmiges Anfangsstadium **D)** Detail aus **D)**; **E)** normal entwickelte spitz zulaufende Kaverne; **F)** normal entwickelte, spitz zulaufende und sich verzweigende Moderfäule-Kaverne; **G)** stärker vergrößerte Tunnel von Bakterien zum Vergleich, ca. 2000-fach; **H)** Übersicht: Holzabbau mit Kavernen von Bakterien und Moderfäulepilzen, die in diesem Bereich nur 1 mm tief ins Holz vorgedrungen sind, links: Dalben-Außenseite – dunkel geworden durch Abbauprozesse (Abbau final; Pfeil); rechts: innerer Bereich; Holz fast intakt (heller; Abbau initial mit wenigen Kavernen), mikroskopische Aufnahmen gefärbt mit Baumwollblau

Fotos: T. HUCKFELDT.



**Abb. 10: A-H)** Pfaahl, ca. 9 Jahre im Hafenbecken; Fertigstellung der Anlage 2008, Probenahme: 30.03.2017. **A)** Übersicht des Fundorts, **B-H)** stark wechselfeuchter Bereich (mit Tidenhub), mikroskopische Details des Holzabbaus; **B)** Polarisationsmikroskopie, Übersicht Holzabbau (ca. 100-fach), links: innerer Bereich; Holz intakt; rechts: außen – Polarisation erloschen durch Celluloseabbau; **C)** feine Bakterien-Tunnel (in 2-3 mm Tiefe), 1000-fach; **D-E)** spitz zulaufende Kavernen der Moderfäule und feine überlagernde Bakterien-Tunnel und Durchbrechungen (in 1-2 mm Tiefe), 1000-fach; **F)** Übergang vom Mischbefall (roter Pfeil) zu überwiegend Moderfäule-Befall (weißer Pfeil). **G)** nur Bakterienkavernen (Actinomyceten), 1000-fach; **H)** nur spitz zulaufende Moderfäule-Kavernen (Pfeil), mikroskopische Aufnahme gefärbt mit Baumwollblau;

FOTOS: T. HUCKFELDT.

**Zonen-Definition an einer Dalbe**

**Zone 6:** baulich geschützter Kopf (nur, wenn vorhanden)

**Zone 5:** Holz über Wasser und wenig von Salzwasser beeinflusst; „Bereich der Basidiomyceten“  
Ein Kennzeichen kann reiches Flechtenwachstum sein.

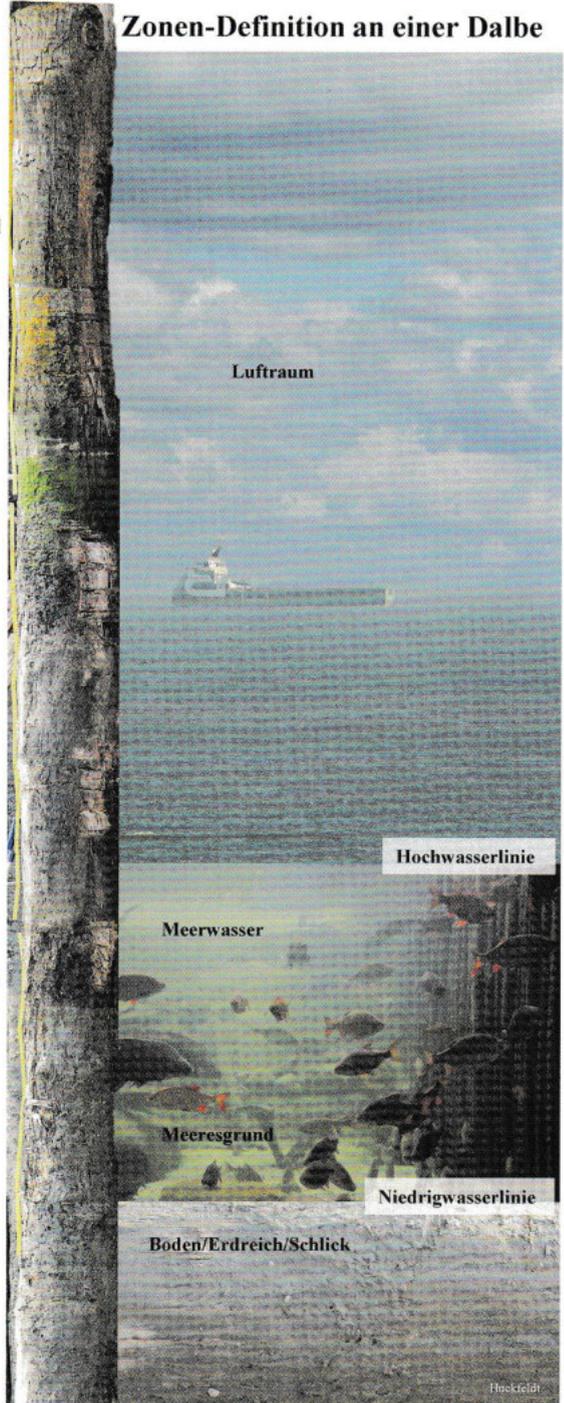
**Zone 4:** Holz über Wasser, aber von Salzwasser beeinflusst; „Bereich der Moderfäulepilze und Insekten“  
Ein Kennzeichen kann üppiges Algenwachstum sein.

**Zone 3:** Hochwasserlinie „Wasser-Luft-Zone“ bzw. „Bereich des Übergangs“

**Zone 2a:** Tidebereich mit ständigen Wasserwechsellern und wirbelndem Schlamm „Schlamm-Wasser-Zone“ bzw.  
„Bereich der Moderfäulepilze und der holzerstörenden Meerestiere“  
Ein Kennzeichen ist oft ein sanduhrenförmiger Einschnitt.

**Zone 2b:** Holz ständig unter Wasser, nicht von Gezeiten beeinflusst.

**Zone 1:** Erdreich - „Schlamm-/Bodenzone“ (Meerwasser)  
„Bereich der Bakterien“



**Abb. 11:** Dalben sind in unterschiedlichen Höhen verschiedenen biotischen Belastungen ausgesetzt; Hauptschaden jeweils genannt (Bildmontage: T. HUCKFELDT).

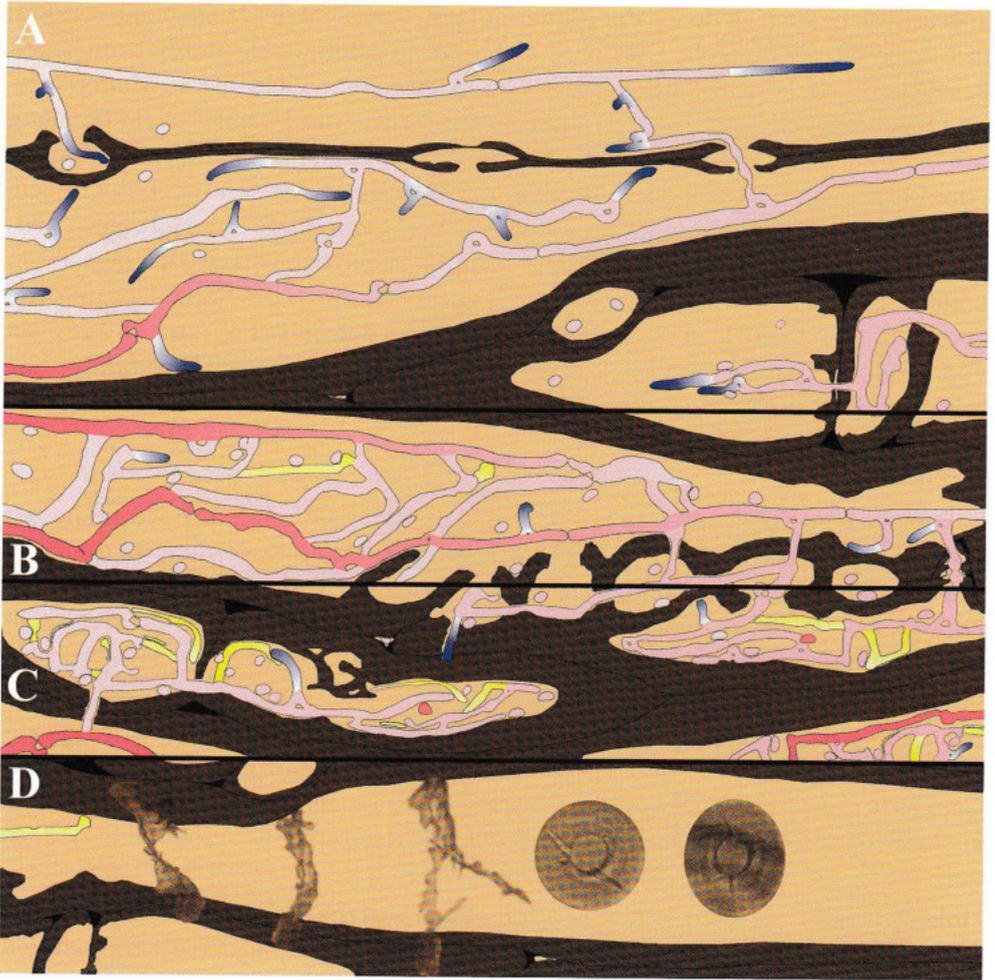
abgeschwächt auch an denen der Moderfäulepilze ist nicht der Holzabbau, sondern ihre Ausbreitung im Holz. Dies wird an Stellen mit Bohrrassel- und Bohrmuschel-Besatz deutlich. In den Gängen dieser Tiere wurden eine Vielzahl von Moderfäule- und Bakterien-Kavernen nachgewiesen. Diese Beobachtung steht z. B. im Einklang mit Befunden von SLEETER et al. (1978) und DANIEL et al. (1991), die die Aufnahme von durch Pilze oder Bakterien abgebautem Holz durch *Limnoria* sp. beschreiben. KOHLMAYER (1958) beschreibt, dass Bohrrasseln nicht von pilzfreiem Holz leben können und dass sich die Bohrmuschel-Larven nur an pilzbefallenem Holz festsetzen können. Die Pilze profitieren nach KOHLMAYER (1958) durch die Verschleppung von Sporen und Hyphen. Demnach sind Bohrrassel und Bohrmuscheln auf die Tätigkeit von Moderfäulepilzen und Bakterien angewiesen; ggf. lassen sich damit neue Schutzkonzepte ableiten.

## Fazit

Bakterien-Kavernen im Holz können mittels Polarisationsmikroskopie besser als mit der klassischen Lichtmikroskopie indirekt erkannt werden, da die Polarisationsmikroskopie hilft, die sehr feinen Kavernen von Ablagerungen auf der Zellwand zu unterscheiden. Hierzu sind Holz-Längsschnitte nötig; in Querschnitten kann nur sehr eingeschränkt zwischen den Abbauarten Weiß-, Moder- oder Bakterienfäule unterschieden werden.

Bakterien- und Moderfäule wurden nicht nur im bodenbefindlichen Holz diagnostiziert, sondern auch in den durch Bohrrasseln oder Schiffsbohrmuscheln verursachten Gängen und an dauernassen oder durchaus bei Ebbe freiliegenden Hölzern. An trockenfallenden Hölzern fehlen Bakterienschäden, Moderfäule-Kavernen treten jedoch noch auf.

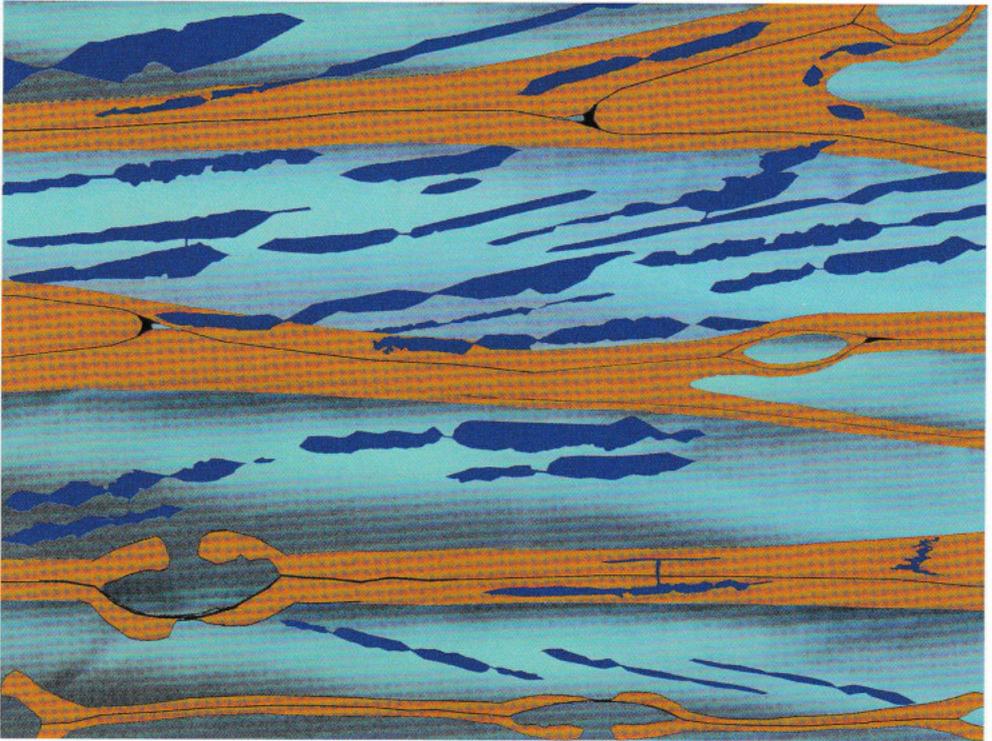
Höhere Basidiomyceten fehlen in allen stärker salzbeeinflussten Bereichen der Dalben; ihr Lebensraum setzt erst darüber ein (Tab. 2 und 3). Bei den Basidiomyceten ist das seltene Vorkommen von *Gloeophyllum* spp. bemerkenswert. Es wäre eine ähnliche Häufigkeit wie bei *Dacrymyces* spp. zu erwarten gewesen, weil die Gattung an Land in ähnlichen Lebensräumen vorkommt. An Dalben mit Hafenmolen-Kontakt treten Fäulepilze auf, die sonst in Bodennähe oder unter der Rinde wachsen; sie zeigen Konstruktions-Defizite an.



**Abb. 12:** Braunfäule-Abbaumuster von *Antrodia xantha*; der Abbau schreitet von oben nach unten fort; solange das Holz feucht ist, sind keine Abbaumuster erkennbar, abgesehen von den seltenen Tüpfel- und Zellwand-Durchbrechungen und Hyphen im Lumen; die Hyphendichte nimmt zunächst zu und nimmt dann wieder ab; im Späten-Abbaustadien sind Hyphen dann rar und es treten zuweilen Risse in den Tüpfeln und der Zellwand auf; charakteristisch ist das Fehlen eines mikroskopisch sichtbaren Holzabbaus im Durchlicht; Kavernen fehlen; im finalen Abbau fehlt dann die Polarisation der Holzzellwände (Bild: T. HUCKFELDT).

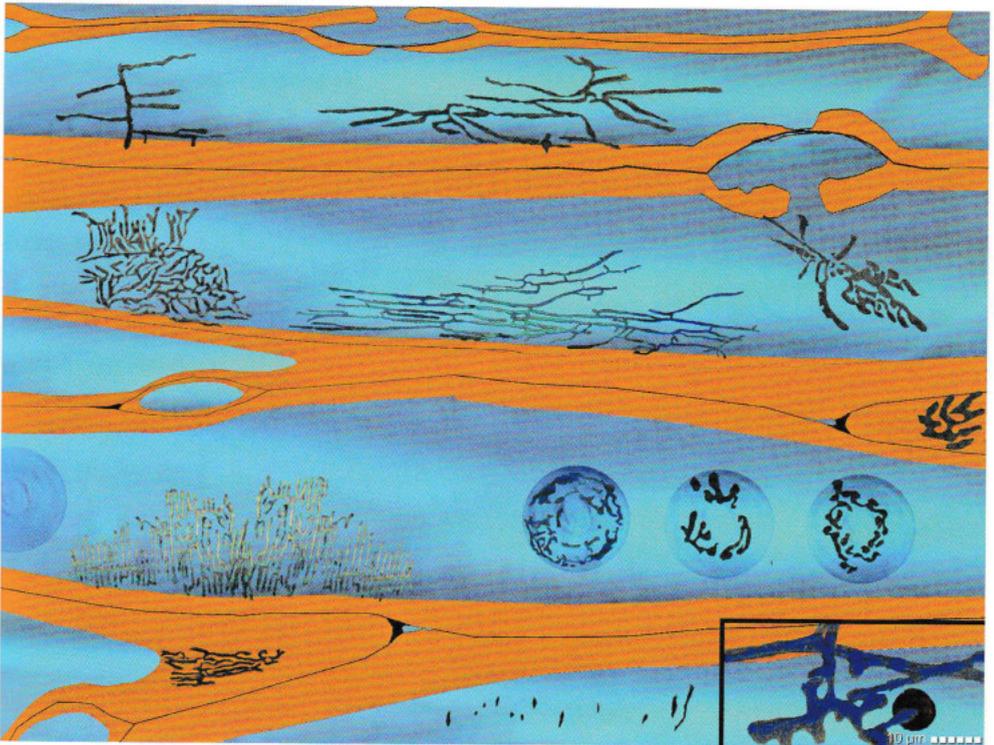


**Abb. 13:** Simultan-Weißfäule-Abbaumuster von *Donkioporia expansa*; braun-graue Holzzellwand im Anschnitt mit schwarzer Mittellamelle; Holzzellwand in Aufsicht nicht gezeigt; alle Zellwandbereiche werden im Abbauprozess zerstört, der Abbau geht vom Lumen aus und überschreitet die Mittellamelle; Kennzeichen sind: eng am Holz anliegende Hyphen (rot), größere flächenförmige Kavernen, Abbau auch in Nestern und Beibehaltung der Polarisation bis in den finalen Abbau hinein; linker Seitenstreifen: coloriertes elektronenmikroskopisches Bild (Bild: T. HUCKFELDT).

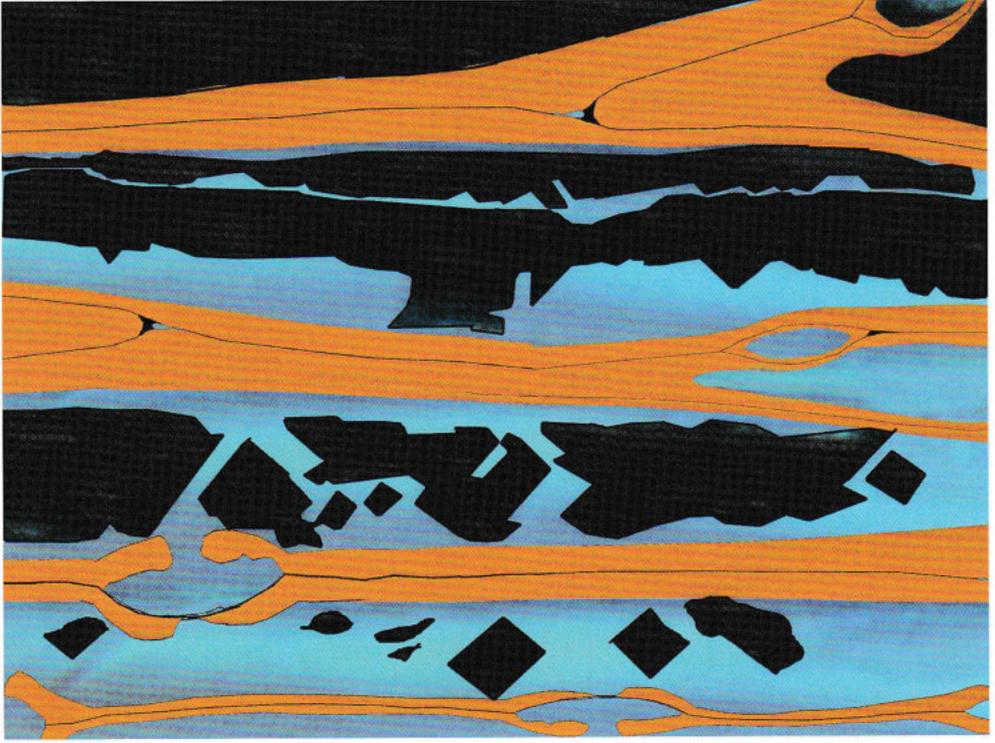


**Abb. 14:** Moderfäulepilz-Abbaumuster (Polarisationsmikroskopie nachempfunden): der Abbau schreitet von unten nach oben fort; braun: Holzzellwand im Anschnitt mit schwarzer Mittellamelle (Kavernen-Verlauf in den Anschnitten nicht vollständig gezeichnet – da zu viele Überlagerungen); grau-blau: Holzzellwand in Aufsicht (gezeigt ist in der Aufsicht nur eine Lage der Zellwand: aus Mittellamelle, Primärwand und Sekundärwand); dunkel Bereiche: Kavernen mit zerstörter Cellulose und Hemicellulose – Polarisation erloschen; die Mittellamelle kann von Moderfäulepilz durchwachsen werden; Hauptkennungsmerkmal sind die fast perlschnurähnlich aneinander gereihten, spitz zulaufenden Kavernen

(Bild: T. HUCKFELDT).



**Abb. 15:** Tunnelbakterien-Abbaumuster (Polarisationsmikroskopie nachempfunden): der Abbau schreitet von unten nach oben fort bzw. es sind unterschiedliche Abbaumuster erkennbar; braun: Holzzellwand im Anschnitt mit schwarzer Mittellamelle (Tunnel-Verlauf in den Anschnitten nicht vollständig gezeichnet – da zu viele Überlagerungen); blau: Holzzellwand in Aufsicht (gezeigt ist in der Aufsicht nur eine Lage der Zellwand: aus Mittellamelle, Primärwand und Sekundärwand); dunkel: Bereiche mit zerstörter Cellulose und Hemicellulose – Polarisation erloschen; die Mittellamelle kann von Tunnelbakterien nicht/kaum durchwachsen werden; Eckbild: Größenvergleiche zu Hyphen von *Trametes versicolor* mit Loch (schwarz) (Bild: T. HUCKFELDT).



**Abb. 16:** Erosionsbakterien-Abbaumuster (Polarisationsmikroskopie nachempfunden): Abbau schreitet von unten nach oben fort; braun: Holzzellwand im Anschnitt mit schwarzer Mittellamelle (Holzabbau nicht eingezeichnet); blau: Holzzellwand in Aufsicht (gezeigt ist in der Aufsicht nur eine Lage der Zellwand: aus Mittellamelle, Primärwand und Sekundärwand); dunkel: Bereiche mit zerstörter Cellulose und Hemicellulose – Polarisation erloschen; die Mittellamelle kann von Erosionsbakterien nicht/kaum durchwachsen werden; aus einzelnen rhombenähnlichen Kavernen werden flächige Abbaubereiche mit stegähnlichen Restzellwandbereichen, die mehr und mehr abgebaut werden, die der Polarisationsverlust der gesamten Zelle, die vollständige Zerstörung der Zellulose anzeigt (Bild: T. HUCKFELDT).

## Förderung/Finanzierung

Das Projekt „Praxisnahe Untersuchungen zum Schutz von Holz im Meerwasser“ wurde freundlicherweise durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert; Aktenzeichen DBU-AZ 32571/01. Der Abschlussbericht steht als kostenloser Download zur Verfügung: [https://www.dbu.de/projekt\\_32571/01\\_db\\_2848.html](https://www.dbu.de/projekt_32571/01_db_2848.html). Die Untersuchungen an der Steganlage im Nord-Ostsee-Kanal wurde durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Lübeck finanziert und die in Bremen durch Ingenieurbüro D. C. Knospe, Hamburg.

## Danksagung

Wir danken herzlich für die tatkräftige Unterstützung durch Herrn Jonetzki und Herrn Meyer von der HPA, ohne die eine Probennahme nicht möglich gewesen wäre. Zudem danken wir dem Wasser- und Schifffahrtsamt Lübeck und dem Ingenieurbüro D. C. Knospe (Hamburg).

## Stellungnahme

Die Aufsammlungen/Proben wurden von den jeweiligen Betreibern genehmigt bzw. veranlasst. Die Autoren versichern, dass darüber hinaus keine speziellen Genehmigungen für die Durchführung der Arbeit nötig waren. Die Geldgeber waren nicht an der Planung, Durchführung und dem Artikelschreiben beteiligt, nur insofern sie die Proben bereitgestellt haben oder dabei halfen, besonders wenn Boote, Flöße oder Taucher zur Probennahme nötig waren. In diesen Fällen (Taucher) hatten wir z. T. keinen Einfluss auf den genauen Probennahmeort. Die Forschungsarbeit wurde nur z. T. mit Mitteln der Autoren finanziert (Fremdförderanteil: ca. 50 %).

## Literatur

- ADOLF P, GERSTETTER E, LIESE W (1972): Untersuchungen über die Eigenschaften von Fichtenholz nach dreijähriger Wasserlagerung. *Holzforschung* **26**: 18-25
- ANAGNOST, S. E. (1998): Light microscopic diagnosis of wood decay. *IAWA Journal* **19**: 141-167
- AZEVEDO E, REBELO R, CAEIRO MF, BARATA M (2012): Use of drift substrates to characterize marine fungal communities from the west coast of Portugal. *Mycologia*, 104:3, 623-632, DOI: 10.3852/11-191
- BERNICCHIA A (2005): Polyporaceae s. l. *Fungi Europaei* 10, - Candusso, Italien, 808 S.
- BERNICCHIA A, GORJÓN SP (2010): Corticiaceae s. l. *Fungi Europaei* 12. - Candusso, Italien, 1008 S.
- BJÖRDAL CG, DANIEL G, NILSSON T (2000) Depth of burial, an important factor in controlling bacterial decay of waterlogged archaeological poles. *International Biodeterioration & Biodegradation*. **45**: 15-26
- BOLLMUS S, GELLERICH A, BRISCHKE C, MELCHER E (2014): Review: Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz. Stand der aktuellen Diskussion. *Holztechnologie*. **56** (2), 44-51

- BRISCHKE C, ROLF-KIEL H (2009) Durability of European Oak (*Quercus* spp.) in ground contact – A case study on fence posts in service. *Eur. J. Wood and Wood Prod.* **68**: 129-137
- CORBETT NH, LEVY JF (1963): Ecological studies on fungi associated with wooden fence posts. Part II. *B.W.P.A. News Sheet* **28**: 4 S.
- COURTOIS H (1963): Mikromorphologische Befallsymptome beim Holzabbau durch Moderfäulepilze. *Holzforschung und Holzverwertung* **15**: 88-101
- DANIEL G, NILSSON T (1998): Developments in the study of soft rot and bacterial decay. *Forest Products Biotechnology*, Taylor & Francis, London, S. 37-62
- DANIEL G, NILSSON T, CRAGG S (1991): *Limnoria lignorum* ingest bacterial and fungal degraded wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* **49**, 488-490
- DOMANSKI S (1973): Fungi, Polyporaceae I. (Translated from polish by Radziwill A), – Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warschau, Polen, 235 S.
- DOMANSKI S, Ortoś H, Skirgietto A (1973): Fungi. Polyporaceae II (Translated from polish by Radziwill A), - Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warschau, Polen, 332 S.
- ERIKSSON J, HJORTSTAM K, LARSSON KH, RYVARDEN L (1973-1988): The Corticiaceae of North Europe. Vol. 1-8. - *Fungiflora*, Oslo, 1631 S.
- Esllyn WE (1976): Wood preservative degradation by marine bacteria. *Proc. Of the 3<sup>rd</sup> International Biodegradation Symposium*, Applied Science Publishers Ltd., London, S. 979-986
- ESLYN WE, CLARK JW (1979): Wood bridges - decay inspection and control. U. S. department of agriculture (USDA) forest service, *Agriculture handbook No. 557*, Madison, 32 S.
- GARETH JONES EB (1968): The distribution of marine fungi on wood submerged in the sea. *Biodeterioration of material*, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Biodeterioration Symposium*, Southampton, 460-485
- GINNS J H (1974): *Merulius*: s. s. and s. l., taxonomic disposition and identification of species. *Canadian Journal of Botany* **54**: 100-167
- GINNS J H (1978): *Leucogyrophana* (Aphyllphorales): Identification of species. *Canadian Journal of Botany* **56**: 1953-1973
- Greaves H (1970): The effect of some wood-inhabiting bacteria on the permeability characteristics and microscopic features of *Eucalyptus regnans* and *Pinus radiata* sapwood and heartwood. *Holzforschung* **24**: 7-14
- HALE MD, EATON RA (1985): The ultrastructure of soft rot fungi. II. Cavity-forming hyphae in wood cell walls. *Mycologia* **77**: 594-605
- HANSEN L, KNUDSEN H, DISSING H, AHTI T, ULVINEN T, GULDEN G, RYVARDEN L, PERSSON O, STRID A (1997): Nordic macromycetes, heterobasidioid, aphyllphoroid and gastromycetoid basidiomycetes. Vol. 3. - *Nordsvamp*, Copenhagen, 444 S.
- HAUSTEIN T, HAUSTEIN VH (2015): Holzschädigende Insekten und Meeresorganismen. In: Scheiding et al. (Hrsg.) *Holzschutz*. C. Hanser, München, 109-164
- HIGHLEY TL, SCHEFFER T (1989): Controlling decay in waterfront structures. U. S. department of agriculture (USDA) Division of Forest Disease Research, Forest Service, Research Paper FPL 494, Madison, 26 S.

- HOLT DM (1983): Bacterial degradation of lignified wood well walls in aerobic aquatic habitats: Decay patterns and mechanisms proposed to account for their formation. *J. Inst. Wood Sci.* 9 (5): 212-223
- HOUGHTON DR (1968): Mechanisms of marine fouling. *Biodeterioration of Materials*, Elsevier Publishing co. LTD, Amsterdam, 55-61
- HUCKFELDT T, SCHMIDT O (2015): Hausfäule- und Bauholzpilze. 2. Auflage. - Rudolf Müller Verlag, Köln, 610 S.
- HYDE KD, JONES EBG, LEAÑO E, POINTING SB, POONYTH AD, VRIJMOED LLP (1998): Role of fungi in marine ecosystems. *Biodiversity and Conservation* 7: 1147-1161
- JAHN H (1979): Pilze die an Holz wachsen. Verlag Busse, Herford, 268 S.
- JOHNSON BR, ESLYN WE (1986): Soft rot preservative-treated southern pine in a marine environment. *American wood-preservers' association AWPA* 82: 150-158
- JÜLICH W (1984): Basidiomyceten 1. Teil, Die Nichtblätterpilze, Gallertpilze und Bauchpilze. In: Gams H (Hrsg.) *Kleine Kryptogamenflora Bd. IIb/1, Basidiomyceten, 1. Teil.* - Gustav Fischer, Stuttgart, 626 S.
- KOHLMEYER J (1958): Beobachtungen über mediterrane Meerespilze sowie das Vorkommen von marinen Moderfäule-Erregern in Aquariumszuchten holzerstörender Meerestiere. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* LXXI (1): 98-116
- KOHLMEYER J (1980): Bacterial attack on wood and cellophane in the deep sea. *International Biodeterioration Symposium*, 4: 187-192.
- KRIEGLSTEINER GJ (2000): Die Großpilze Baden-Württembergs. Bd. 1, - E. Ulmer, Stuttgart, 629 S.
- LIESE W (1955): On the decomposition of the cell wall by micro-organisms. *Rec. Br. Wood Preserv. Assoc.*, S. 159-160
- LOHWAG, K. (1937): Polarisationsmikroskopische Untersuchung pilzbefallener Hölzer. *Mikrochemie* 23: 198-203
- LUNDSTRÖM H (1972): Microscopy studies of cavity formation by soft rot fungi *Allescheria terrestris* Apinis, *Margarinomyces luteo-viridis* v. Beyma and *Phialophora richardsiae* (Nannf.) Conant. *Studia Forestalia Suecica* 98, 5-18
- Meyer L, Brischke C, Melcher E, Brandt K, Lenz M-T, Soetbeer A (2014): Durability of English oak (*Quercus robur* L.) - Comparison of decay progress and resistance under various laboratory and field conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 86: 79-85
- Mouzouras R (1989): Soft rot decay of wood by marine organisms. *J. Inst. Wood Sci.* 11(5): 193-201
- MÜLLER J, MELCHER E, WELLING J, HUCKFELDT T (2018): Praxisnahe Untersuchungen zum Schutz von Holz im Meerwasser. DBU Abschlussbericht, 190 S., Aktenzeichen: 32571/01-32. [https://www.dbu.de/projekt\\_32571/01\\_db\\_2848.html](https://www.dbu.de/projekt_32571/01_db_2848.html)
- NILSSON T (1974): Microscopic studies on the degradation of cellophane and various cellulosic fibres by wood-attacking microfungi. *Studia Forestalia Suecica* 117
- NILSSON T, DANIEL G (1987): Bacterial attack of wood cell walls. In: Houghton DR, Shith RN, Eggins HOW (Ed.) *Biodeterioration* 7. Elsevier Applied Science, London, 739-742
- NILSSON T, DANIEL G (1990): Microscopic evidence for wood cell wall degradation by actinomycetes. *Holz als Roh-und Werkstoff* 48: 360

- NILSSON T, HOLT D (1983): Bacterial attack occurring in the S2 layer of wood fibres. *Holzforchung* 37: 107-108
- NILSSON T, SINGH AP (1984): Cavitation bacteria. The International Research Group on Wood Preservation, IRG/WP/1235. 15 S.
- NOLDT, U. (2014) Insekten. In: BINKER G.; BRÜCKNER, G.; FLOHR, E.; HUCKFELDT, T.; NOLDT, U.; PARISEK, L.; REHBEIN, M.; WEGNER, R. (2014) *Praxis-Handbuch Holzschutz*. Rudolf Müller Verlag, Köln, S. 112-153
- OEVERING P, MATTHEWS BJ, CRAGG SM, PITMAN AJ (2001): Invertebrate biodeterioration of marine timbers above mean sea level along the coastlines of England and Wales. *International Biodeterioration & Biodegradation* 47: 175-181
- PANG K-L, MITCHELL JI (2005): Molecular approaches for assessing fungal diversity in marine substrata. *Botanica Marina* 48: 332-347
- RAPP AO, AUGUSTA U, BRANDT K, MELCHER E (2010): Natürliche Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten. Ergebnisse aus acht Jahren Feldversuch. *Wiener Holzschutztage 2010*, 43-49
- RÄMÄ T, MATHIASSEN GH, KAUSERUD M (2014): Marine fungi new to Norway, with an outlook to the overall diversity. *Agarica* 35: 35-47.
- REHBEIN M, KOCH G, KLEIN P (2009): Moorleiche: Frau von Peiling, Holzbiologische Befundes vom Sarg. *Restauro* 5: 320-325
- REHBEIN M, KOCH G, SCHMITT U, HUCKFELDT T (2012): Topochemical and transmission electron microscopic studies of bacterial decay in pine (*Pinus sylvestris* L.) harbour foundation piles. *Micron* 44: 150-158
- RYVARDEN L, GILBERTSON RL (1994): European polypores. *Synopsis Fungorum* 7, - Fungiflora, Oslo, Norwegen, S. 743.
- RYVARDEN L, MELO I (2014): Poroid fungi of Europe. *Synopsis Fungorum* 31, - Fungiflora, Oslo, Norwegen, S. 455.
- SCHMIDT O, LIESE W (1994): Occurrence and significance of bacteria in wood. *Holzforchung* 48: 271-277
- SCHMITT U, HOFFMANN P (1998): Zur Zellwandstruktur von 1600 Jahre altem, wassergesättigtem Eichenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 56: 211-212
- SCHNEIDER, H. (1922): Die botanischen Mikrotechniken. Ein Handbuch der mikroskopischen Arbeitsverfahren. Fischer Verlag, Jena, 458 S.
- SINGH, A. P. (1997) Initial pit borders in *Pinus radiata* are resistant to degradation by soft rot fungi and erosion bacteria but not tunnelling bacteria. *Holzforchung* 51: 15-18
- SLEETER TD, BOYLE PJ, CUNDELL AM, MITCHELL R (1978): Relationships between Marine Microorganisms and the Wood-Boring Isopod *Limnoria tripunctata*. *Marine Biology* 45: 329-336
- STIENEN T, SCHMIDT O, HUCKFELDT T (2014): Wood decay by indoor basidiomycetes at different moisture and temperature. *Holzforchung* 68 (1): 9-15
- TROSCHEL E (1916): Zerstörung des Holzes durch Holzschädlinge: Wassertiere. In: TROSCHEL, E. (Hrsg.) *Handbuch der Holzkonservierung*. Springer Verlag, Berlin, 207-216

- VRIJMOED LLP, HODGKISS IJ (1987): Wood degrading activity of some lignicolous marine fungi. In: HOUGHTON DR, SHITH RN, Eggins HOW (Hrsg.) Biodeterioration 7. Elsevier Applied Science, London, S. 768-773
- ZAINAL AS (1980): Micro-Morphological Studies if soft rot fungi in wood. Bibliotheca Mycologia 70. J. Cramer, Lehre

**Dr. rer. nat. Dipl.-Biol. Tobias Huckfeldt**

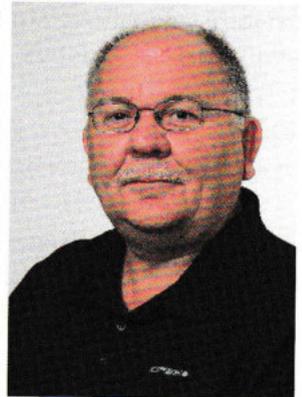
seit 1999 Forschung zu Fäulepilzen und Holzschäden  
an Konstruktionen seit 2012 am Institut für  
Holzqualität und Holzschäden  
– Dr. Rehbein und Dr. Huckfeldt GbR



**Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Eckhard Melcher**

**Hauptarbeitsgebiete:**

Entwicklung von Analysemethoden zur Quantifizierung von Bioziden in behandeltem Holz Untersuchungen zur Resistenz von naturbelassenem und behandeltem Holz mittels Labor- und Freilandverfahren einschließlich der Optimierung entsprechender Testmethoden Arbeiten im Rahmen der Standardisierung auf DIN- und CEN-Ebene seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Holzbiologie und Holzschutz der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft in Hamburg; Umbenennung 2008 in Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Holztechnologie und Holzbiologie 2012 Thünen-Institut für Holzforschung



**Dr. rer. nat. Dipl.-Holzwirt Mathias Rehbein**

1996 bis 1999 Berufsausbildung zum Tischler, 2007 bis 2011 Wissenschaftlicher Angestellter am Johann Heinrich von Thünen-Institut, seit 2012 am Institut für Holzqualität und Holzschäden – Dr. Rehbein und Dr. Huckfeldt GbR