

Haareis auf morschem Laubholz als biophysikalisches Phänomen

*Hair Ice on Rotten Wood of Broadleaf Trees – a Biophysical Phenomenon**

Gerhart Wagner und Christian Mätzler



Forschungsbericht Nr. 2008-05-MW
22. August 2008

Universität Bern
Institut für Angewandte Physik

Abteilung Mikrowellenphysik

Sidlerstrasse 5
3012 Bern
Schweiz

Tel. : +41 31 631 89 11
Fax : +41 31 631 37 65
E-mail : iapemail@iap.unibe.ch
matzler@iap.unibe.ch

** Although this research report is in German, it contains English translations of various parts.*

Bild auf der Titelseite

Haareis an morschem Buchenast (Durchmesser ca. 3 cm) im Wiliwald in Moosseedorf, Schweiz, am 18. Februar 2007. Die Haare haften auf dem Holzkörper des Astes; ihre Länge beträgt etwa 3 bis 7 cm. Sie sind von mehreren Springschwänzen bevölkert, die als kleine längliche Punkte sichtbar sind. Der Ast befindet sich in seiner natürlichen Umgebung auf abgestorbenen Buchenblättern und Tannennadeln. Foto Christian Mätzler.

Picture on the cover page

Hair ice on a rotten branch of beech wood (diameter about 3 cm) in Wiliwald at Moosseedorf, Switzerland. The hairs are rooted on the wood surface of the branch, and their length ranges from about 3 to 7 cm. They are populated by small insects (collembolids), seen as elongated points. The branch is in its natural environment on the litter of beech leaves and spruce needles.

Haareis auf morschem Laubholz als biophysikalisches Phänomen

Gerhart Wagner und Christian Mätzler

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung	4
Abstract	5
1 Einleitung	5
1.1 Beschreibung	5
1.1.1 Haareis	6
1.1.2 Bandeis	6
1.1.3 Stängel- oder Kammeis	7
1.1.4 Vergleich der drei Typen von Eisbildungen	12
1.2 Literatur	13
1.2.1 WEGENER 1918	13
1.2.2 LENGGENHAGER 1985	14
1.2.3 WAGNER 2005 und 2007	15
1.3 Die Pilzhypothese	17
1.3.1 Entstehung der Hypothese	17
1.3.2 Biologische Grundlagen	17
2 Material und Methode	18
2.1 Material	18
2.2 Methode	18
2.2.1 ‚Zuchtmethode‘	19
2.2.2 Versuche zur Pilzhypothese	19
2.2.2.1 Hitzeversuch	19
2.2.2.2 Fungizidversuch	19
2.2.2.3 Alkoholversuch	19
3 Ergebnisse	22
3.1 Hitzeversuche	22
3.2 Fungizidversuche	22
3.3 Alkoholversuch	23
3.4 Wie lange ist ‚Nachzucht‘ möglich?	23
3.5 Besondere Beobachtungen	23
3.5.1 Anwesenheit von Insekten	23
3.5.2 Geräusch beim Lossprengen der Rinde	23
4 Diskussion	26
4.1 Beurteilung der Pilzhypothese	26
4.1.1 Hitzeversuche	26
4.1.2 Fungizidversuche	26
4.1.3 Bilanz	26
4.2 Zur physikalisch-chemischen Natur von Haareis	27
4.3 Zur Frage der Herkunft des Wassers	28
4.4 Schlussfolgerungen	28
4.5 Notwendigkeit weiterer Versuche	29
Verdankungen	30
Literatur	30

Zusammenfassung

Die haar- oder watteartigen Eisbildungen, die bei Temperaturen leicht unterhalb 0°C auf morschem und feuchtem Laubholz (Buche *Fagus*, Eiche *Quercus* und andere) entstehen können (Fig. 1-6, 11-12, 18) und als **Haareis** bezeichnet werden, sind wissenschaftlich noch nicht befriedigend geklärt. Die vorliegende Studie beschreibt die Erscheinung und vergleicht sie aufgrund der verfügbaren Literatur mit zwei ähnlichen, aber genetisch nicht identischen Bildungen: **Stängel- oder Kammeis** (Fig. 7) und **Bandeis** (Ice Ribbons, Ice Flowers, Fig. 8). Verschiedene Beobachtungen führten die Autoren zur Vermutung, dass - im Gegensatz zu Band- und Stängelseis - **Haareis durch ein im Holz lebendes Pilzmyzel verursacht wird**. Sie prüften diese schon von WEGENER 1918 aufgestellte Hypothese theoretisch und experimentell. Auf Holzstücken, die in der Natur mit Haareis befallen waren, gelang es, in Frostnächten erneut Haareis zu ‚züchten‘ (Fig. 15). Wenn das Holz mit Hitze (Kochen), Alkohol oder einem Fungizid behandelt wurde, so war die Bildung von Haareis ganz oder teilweise unterdrückt (Fig. 16-17). Durch Analyse ihrer Beobachtungen und Experimente kommen die Autoren zu folgender Deutung:

- Urheber des zur Haareisbildung führenden Prozesses ist ein im Holzkörper, vor allem in den Holzstrahlen (Fig. 10a-c) lebendes Myzel eines winteraktiven Pilzes. Es konnten mehrere Arten von auf Laubholz spezialisierten Asko- und Basidiomyceten identifiziert werden.
- Der Pilz baut die in den Holzstrahlen vorhandenen organischen Nährstoffe (Kohlenhydrate, Lipide) durch einen aeroben Dissimilationsprozess (Zellatmung) ab. Oxydative Endprodukte sind CO₂ und H₂O.
- Der Druck des entstehenden CO₂-Gases drängt mit dem Oxydationswasser auch im Holz gespeichertes Wasser durch die Holzstrahlkanäle an die Oberfläche.
- Im ausgestossenen Wasser befinden sich als ‚Verunreinigung‘ unvollständig abgebaute organische Substanzen. Dank den als Kristallisationskeime wirkenden organischen Molekülen gefriert das Wasser beim Austritt an die Luft schon knapp unterhalb von 0° C: Am Ausgang der Holzstrahlen entstehen Eishaare.
- Die in den Eishaaren enthaltene organische Substanz kann winteraktive Insekten (Collembolen) anziehen (Fig. 18).
- Beim Schmelzen der Eishaare wird die organische Substanz als dünner Faden sichtbar, an dem sich perlenartig Wassertröpfchen bilden (Fig. 6).
- Wenn der Pilz getötet wird oder wenn die für den Pilz abbaubaren Stoffe aufgebraucht sind, erlischt der Dissimilationsprozess: es ist dann keine Haareisbildung mehr möglich.

Abstract

Hair-ice or ice-wool formations (Figures 1-6, 11-12, 18) on rotten and wet branches of leaf wood (beech *Fagus*, oak *Quercus*, and others) can appear at temperatures slightly below 0°C. A satisfactory understanding of the phenomenon is still missing. In the present study we describe the phenomenon and review the associated literature, and we distinguish **hair ice** from related forms, such as **ice ribbons** or ice flowers (Figure 7), and **needle ice** (Figure 8). In contrast to ice needles and ribbons, **hair ice appears to be related to a special fungus activity**. We tested the fungus hypothesis of Wegener (1918), and we succeeded in reproducing hair ice (Figure 15) during many frost nights on beech-wood samples, which had been collected in different forests in Switzerland. Treatments of wood samples by heat (boiling water), alcohol, and most effectively by a fungicide, suppressed the hair-ice formation (Figures 16-17). Based on the analysis of the observations and experiments we came to the following conclusions:

- The origins of the hair-ice forming processes are winter-active fungi in the decaying wood, mainly in the nutrient-rich wood rays (Figures 10a-c). Various forms of asco- and basidiomycetes were identified.
- The fungus decomposes the nutrients (carbohydrates, lipids) by aerobic dissimilation whose end products are CO₂ and H₂O. - The gas pressure of CO₂ expels the stored and the produced water through the radial channels of the rays to the wood surface.
- Organic material contained in the expelled water acts as a freezing catalyst for rapid ice formation at temperatures slightly below 0°C near the exit points.
- The organic matter contained in hair ice can attract insects (Figure 18).
- At the onset of hair-ice melt a very thin organic fibre becomes apparent which carries pearl-like water drops (Figure 6).
- After severe damaging or extinction of the fungus, or when no nutrients are left, hair-ice formation stops and is no longer possible.

1 Einleitung

1.1 Beschreibung

Die vorliegende Studie befasst sich mit Formen von Eis, die bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt aus einem nicht gefrorenen Substrat herauswachsen und somit nicht zu den Hydrometeoren zu zählen sind. Neben dem Haareis, dem eigentlichen Gegenstand dieser Studie, gibt es eine grössere Anzahl verwandter Eisbildungen, die in der Literatur oft dem Haareis gleichgesetzt oder mit diesem verwechselt werden. Zudem werden für dieselben Bildungen oft verschiedene Bezeichnungen, aber auch für verschiedene Bildungen dieselben Bezeichnungen verwendet. Es ist daher nötig, zuerst eine ordnende Übersicht zu gewinnen. Wir glauben, nach Morphologie und

Entstehungsbedingungen drei Grundtypen unterscheiden zu können und verwenden für sie die Bezeichnungen: Haareis *Hair Ice*, Bandeis *Ice Ribbons* und Stängeleis *Needle Ice*.

1.1.1 Haareis

Haareis entsteht an schneefreien Tagen an am Boden liegenden morschen und feuchten Laubholzästen. Voraussetzungen sind lokal hohe Luftfeuchtigkeit und Temperaturen ($-4^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$) knapp unterhalb des Gefrierpunkts. Zudem zeigt sich das Phänomen nur an einzelnen Stellen und nur an einem Teil aller möglichen Äste. Wir fanden es auf Holz von Buche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus robur*). MÜHLEISEN & LÄMMLE (1975) melden es auch von Haselholz (*Corylus avellana*), Brenda Callan in Victoria, Kanada (schriftl. Mitteilung) auf Holz von Ahorn (*Acer macrophyllum*) und Erle (*Alnus rubra*). Auf dem dunkelbraunen Waldboden erscheint Haareis in der Gestalt vereinzelter weisser Flecken, die man aus der Ferne für kleine Schneereste halten kann, meist nicht grösser als eine oder zwei Handflächen (Abb. 1-6, 11-12, 18). Aus der Nähe gesehen erweist es sich als Bildung aus feinen, dicht stehenden, bis über 10 cm langen Eishaaren. Sie wachsen aus dem Holzkörper von morschen Aststücken, an denen die Rinde sich eben löst oder schon gelöst hat. Oft wird das Abheben der Rinde durch den Druck der wachsenden Haare gefördert (Abb.3, vgl. 3.5.2). Die Haare sind entweder glatt mit seidigem Glanz (Abb. 5) und einer Dicke von 0,05 bis 0,1 Millimeter, oder sie haben eine raue, etwas filzige Oberfläche, bilden aber nie raureifartige Verästelungen. Sie können steif gerade oder lockig gebogen sein, oft parallel über mehrere cm Länge, häufig linear angeordnet und gescheitelt, manchmal wellig kraus. Benachbarte Haare sind gleich lang und verlaufen korreliert über ganze Haarbüschel, sodass man von Locken oder Wellen sprechen kann. In seltenen Fällen ist darin eine Zonierung erkennbar (Abb. 5). Gelegentlich entstehen Haarschlaufen, welche sich zur Holzoberfläche zurückbiegen (Abb. 2). Trotz der auffälligen Ordnung sind die einzelnen Haare oft über weite Strecken unabhängige Gebilde. Beim Kontakt mit noch vorhandener Rinde oder mit Laubblättern werden sie aber aussen verschweisst. Sie können auch auf der ganzen Länge zu Bändern oder Strängen mehr oder weniger zusammenwachsen. Bei hoher Luftfeuchtigkeit (Nebel) kann sich an den Haaren sekundär feiner Raureif ansetzen. Steigt die Temperatur über den Schmelzpunkt, so werden die Haare watteartig-filzig, lokal gelegentlich mit einer bräunlichen Verfärbung (Abb. 2 unten), und degenerieren zu einer schneeartigen Masse. Der umgebende Waldboden kann Oberflächenreif aufweisen, aber oft entsteht Haareis auch ohne jede Reifbildung. Das Holz muss jedoch feucht sein, sei es durch Kontakt mit nassem Boden oder durch Niederschlag, und auch die Luft in der unmittelbaren Umgebung muss nahezu feuchtigkeitsgesättigt sein. Selten erscheint Haareis an noch stehenden, aber abgestorbenen Buchenstämmchen (Abb. 4).

1.1.2 Bandeis

Eine verwandte, aber nicht auf morschem Holz entstehende Erscheinung wurde schon von HERSCHEL 1833 und von mehreren weiteren Autoren des 19. und 20. Jahrhunderts beschrieben (vgl. Lit. Angaben in Tabelle, Abschnitt 1.1.4). HERSCHEL beobachtet sie einmal „um die Wurzeln und Stiele von vertrockneten Disteln“ und einmal auf den Strüngen von Sonnenblumen. Er beschreibt sie wie folgt

(zitiert nach WEGENER 1918): „Eine band- oder hemdkrausenartige wellenförmige Masse, die scheinbar aus Längsrissen des Stiels im weichen Zustande hervorgequollen war. Die Bänder hatten eine glänzende seidenartige Oberfläche und ein faseriges Gefüge . . .“ Diese Darstellung stimmt gut überein mit der 2007 von JAMES R. CARTER in Illinois als ‚Ice Ribbons‘ ausführlich beschriebenen und reich dokumentierten Erscheinung (Ice Ribbons, Ice Flowers, Frost Flowers or whatever they might be called). Eine authentische deutsche Bezeichnung für die ‚Ice Ribbons‘ ist uns nicht bekannt. Wir verwenden – in Analogie zu ‚Haareis‘ – die Bezeichnung ‚Bandeis‘. Bei den von Carter beschriebenen Fällen entstand Bandeis in vielgestaltigen Formen auf toten Stängeln der amerikanischen Gattungen *Cunila*, *Helianthemum*, *Pluchea*, *Verbesina*, *Veronia*. Aus der Schweiz ist uns bisher eine einzige belegte Beobachtung dieser Erscheinung bekannt geworden: André Masson beobachtete sie am 4. Januar 2008 an einer Wegrandbepflanzung zwischen Zug und Baar an maschinell abgeschnittenen Stängeln von *Ceratostigma plumbaginoides* (Abb. 7). Er schreibt dazu: „Alle Eis tragenden Stängel stecken noch im Boden, das Eis muss aus den Wurzeln kommen, es ist recht viel Eis, verglichen mit der Masse der Stängel. Es sind nicht Eis-Haare, es sind Eis-Filme, die seitlich herausgedrückt werden, wobei in den Filmen schon Strukturen sind, wie zusammengeklebte Haare. Die Eisfilme stammen aus haarscharf definierten Längslinien, zwei oder drei oder ev. auch vier im Umfang.“

1.1.3 Stängel- oder Kammeis

Eine weitere verwandte, aber mit Haar- und Bandeis nicht zu verwechselnde Frosterscheinung ist das Stängel- oder Kammeis. Es wächst nicht aus einem pflanzlichen Substrat, sondern aus feuchter Erde heraus und unterscheidet sich von Haar- und Bandeis auch morphologisch klar: Es hat nicht die Gestalt von Eishaaren oder -bändern, sondern von geraden oder leicht gebogenen Eisstängeln von wenigen Millimetern Dicke, die sich zu kräftigen Säulen von wenigen cm bis über 20 cm Länge zusammenschliessen oder flächenhafte Kämmen bilden können (Abb. 8). Das Wasser, aus dem das Eis entsteht, stammt aus der nicht gefrorenen Erde. Bei einer Lufttemperatur knapp unter null Grad gefriert es direkt am Austrittsort. Durch weiteres Wasser, das durch denselben Kanal langsam nachstösst, wächst der Stängel – wie das Haareis – an seiner Basis. Die Erscheinung bedarf also eines unterirdischen Vorrats an flüssigem Wasser, das, durch Erdstrukturen mehr oder weniger kanalisiert, langsam an die Oberfläche gelangt. Die Erscheinung ist ausführlich beschrieben bei ROSSMANN 1937. Dieser Autor weist auch auf das Haareis hin und zitiert diesbezüglich WEGENER 1918.



Abb. 1: Haareis mit markanter Scheitelung. Haarlänge ca. 5cm. Foto Emil Suter.

Figure 1: Hair ice with clear parting, hair length approx. 5 cm.



Abb. 2: Haareis-Locke. Länge ca. 10 cm. Foto. Maroia Gsell.

Figure 2: Hair-ice curl, length approx. 10 cm.



Abb. 3: Das Haareis wächst auf dem Holzkörper. Die in Ablösung begriffene Rinde wird oft durch die wachsenden Eishaare abgehoben, wobei ein knisterndes Geräusch auftreten kann. Foto Christian Mätzler.

Figure 3: Hair ice is growing on the surface of the wood body. Often the bark is detached by the growing ice hairs, and this process can be accompanied by a crackling noise.



Abb. 4: Haareis auf totem, aber noch stehendem Buchenstämmchen. Länge ca. 5 cm. Foto Emil Suter.

Figure 4: Hair ice on a dead, but still standing beech stem.



Abb. 5: Seidenartiges, über 10 cm langes Haareis ('Seideneis') mit deutlicher Zonierung. Foto Konrad Lauber 1984. WEGENER 1918 schreibt dazu: „... eine Art Schichtung, welche sich durch den ganzen Schopf parallel zur Ausgangsfläche hindurchzog, indem nämlich alle Härchen in gleichem Abstände vom Holz durchsichtiger oder undurchsichtiger wurden, was wohl auf Wachstumsstockungen hindeutet.“

Figure 5: Silky hair ice (length at least 10 cm) with clear zoning. Wegener (1918) described this feature as a type of layering parallel to the original surface by variations in the hair opacity in a coherent fashion, indicating variations in the growth process.



Abb. 6: Schmelzendes Haareis. Bei einigen noch frei stehenden Haaren sind längs eines extrem dünnen Restfadens kleine Wasserperlen zu sehen. Die meisten Haare wachsen beim Schmelzprozess zusammen. Foto Christian Mätzler.

Figure 6: Melting hair ice. Some individual hairs without contact to others show water pearls attached to a much thinner thread. The majority of hairs sinter together during the early melt phase.



Abb. 7. Bandeis auf abgeschnittenen, noch im Boden steckenden Stängeln von *Ceratostigma plumbaginoides*. Die Eisbänder sind ca. 2-3 cm breit. Die Thujapflanze dient nur als Hintergrund. Foto André Masson.

Figure 7: Ribbon ice on harvested stems still sticking in the soil of Ceratostigma plumbaginoides. The width of the ribbons is about 2 to 3 cm. The thuja plant serves as background only.



Abb. 8. Stängel- oder Kammeis auf lockerem Humus. Länge ca. 5 cm. Foto Maroia Gsell.

Figure 8: Stem or comb ice on soft humus. Length approx. 5cm.

1.1.4 Vergleich der drei Typen von Eisbildungen

Comparison of three types of ice formations

Bezeichnung <i>Name</i>	Haareis <i>Hair Ice</i>	Bandeis <i>Ice Ribbons</i> <i>Ice Flowers</i>	Stängeleis, Kammeis, Säuleneis <i>Needle Ice, Frost Pillars</i>
Form <i>Form</i>	Haare <i>Hairs</i>	Bänder <i>Ribbons</i>	Stängel oder Säulen aus vereinigten Stängeln <i>Stems or Pillars of United Stems</i>
Substrat <i>Substratum</i>	Morsches Laubholz <i>Rotten leaf- wood</i> <u>Europa:</u> Fagus, Quercus, Corylus, . . . <u>Nordamerika:</u> Alnus, Acer, . . .	Stängel und Zweige von: <i>Stems and Twigs of:</i> <u>Nordamerika:</u> Cunila, Helianthemum, Pluchea, Verbesina, Veronia . . . <u>Europa:</u> Carduus, Helianthus, Ceratostigma	Humuserde oder poröses Gestein <i>Humus Soil or Microporous Rock</i>
Basis <i>Source, Base</i>	Mündung von Holzstrahlen (punktuell) <i>Openings of Histological Rays in the Wood (points)</i>	Längsspalten in den Stängeln (linear) <i>Fissures in the Stems (lines)</i>	Poren im Substrat (kleine Flächen) <i>Pores in the Structure of the Base (small surfaces)</i>
Herkunft des Wassers <i>Origin of the water</i>	aus dem Substrat, inkl. Atmungswasser <i>from the substratum, including oxidation water</i>	aus dem Substrat <i>from the substratum</i>	aus dem Substrat <i>from the substratum</i>
Wirkende Kraft <i>acting force</i>	Bio-physikalisch: Gasdruck durch Metabolismus eines Pilzes <i>pressure of CO₂ by the metabolism of a fungus</i>	Rein physikalisch: Kapillarität der Gefäße und/oder der Spalte <i>capillarity of vessels and fissures</i>	Rein physikalisch: Wasserdruck und/oder Kapillarität <i>pressure of water and/or capillarity</i>
Literatur (Auswahl) <i>Literature (selection)</i>	WEGENER 1918 EMEIS 1919 MINNAERT 1970 MÜHLEISEN & LÄMMLER 1975 HILDEFORS 1976 LENGGENHAGER 1986 WAGNER 2005, 2007 DE BRUIN & VAN DEN BERG 2006	HERSCHEL 1833 LECONTE 1850 WARD 1893 BAY 1894 ABBE 1905 COBLENTZ 1914 CARTER 2007	LECONTE 1850 NIMMO 1928 ROSSMANN 1937 MINNAERT 1970 LAWLER 1988

Gemeinsam allen drei Erscheinungen:

- Sie entstehen bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt nicht aus atmosphärischem Wasser, sondern aus flüssigem Wasser ihres Substrates.
- Der Zuwachs erfolgt – im Gegensatz zu Reifnadeln – an der Basis und nicht an der Spitze.
- Beim Gefrieren dehnt sich das Eis um 1/10 des Volumens aus.

- Beim Gefrieren wird Wärme frei (80 cal pro g), die teilweise auf das Substrat übergeht: dieses bleibt etwas wärmer als die Umgebung.

Nur für Haareis gilt nach unserer Hypothese: Es braucht den Metabolismus eines lebenden Organismus.

Die folgende Studie bezieht sich auf das Haareis. **Hauptziel ist die Überprüfung der Pilzhypothese.**

1.2 Literatur

Die neuere Literatur über Haareis ist dürftig und grösstenteils rein deskriptiv. In den Lehrbüchern über Hydrometeore, die Reifbildungen im weitesten Sinne, wird es nicht aufgeführt, da es nicht aus atmosphärischem Wasser entsteht, sondern aus Wasser der Unterlage. Zu seiner Erklärung wurden bisher hauptsächlich die Ausdehnung des Wassers unterhalb von 4°C und beim Gefrieren (EMEIS, 1919), sowie die Wirkungen von Kapillarität (MINNAERT, 1970) und Osmose (MÜHLESTEIN UND LÄMMLE, 1975) in Betracht gezogen. Diese rein physikalischen Deutungen können nicht befriedigen. Vor allem die Vorstellung von Osmose ist in totem Holz unwahrscheinlich wegen des Fehlens von semipermeablen Membranen. Zudem vermögen die rein physikalischen Methoden nicht zu erklären, weshalb Haareis immer nur an wenigen von vielen gleichartigen zur Verfügung stehenden Hölzern entstehen. WEGENER (1918) gibt zum Verständnis dieser Tatsache erstmals eine plausible Deutung mit der Vermutung, dass ein im Holz lebender Pilz das Phänomen verursachen könnte. Wir gehen im Folgenden kurz auf die Studie von WEGENER (1918) sowie auf die bisherigen Publikationen aus der Schweiz ein.

1.2.1 WEGENER 1918

Alfred Wegener, der Vater der Kontinentalverschiebungstheorie, beobachtete Haareis im Winter 1916/1917 in einem Wald der Vogesen und im Februar 1918 in einem Garten bei Rheinsberg i. d. Mark in Norddeutschland. Er gibt folgende Beschreibungen:

Vogesen 1916/1917: „ . . . haarbüschelförmigen Eisbildungen von etwa 4 cm Länge an einem morschen, am Boden liegenden Holzstück. Sowohl mein Begleiter wie ich selbst hielten es für einen Pilz, und wir erkannten unsern Irrtum erst, als uns das Eis in der Hand zerschmolz. . . . Der Wald war sehr nass. Auf dem ganzen Weg aber war dies das einzige Stück Holz, an welchem die merkwürdige Eisbildung auftrat, obwohl der Boden überall mit anscheinend ganz gleichartigen Holzstücken bedeckt war.“ (S. 598)

Rheinsberg 1918: „ . . . Nirgends war Reif zu sehen. Der ganze . . . Garten war vielmehr triefend nass, zumal es den ganzen Tag vorher geregnet hatte. Seit dem Abend . . . war die Temperatur nach Aufhören des Regens gesunken und war am Tage des Fundes ein wenig unter 0 Grad. . . .“ „ . . . dass nur an diesem einen Zweig die merkwürdige Bildung, und zwar gleich in so prachtvoller Fülle, auftrat.“ „Abgesehen vom firnartig gealterten Rest von Winterschnee war . . . dies das einzige Eis im Garten. Der Zweig war nur 1 bis 1½ cm dick. An jedem Ende sass die Rinde noch auf 10 cm Länge fest am Holz, und hier war kein Eis vorhanden. Auf der 30-40 cm langen mittleren Strecke aber war die Rinde aufgeplatzt und abgehoben. . . . Und hier wuchs das Haareis in dichten, unregelmässigen Schöpfen

von etwa 1½ cm Länge mit . . . scheidelähnlichen Trennungen, meist gerade, bisweilen im oberen Teil zunehmend gekrümmt, ja an einzelnen Stellen spiralig eingerollt. Es sah aus, als sei die Rinde durch den Druck des wachsenden Eises gesprengt und abgehoben.“ Es gelang Wegener, auf demselben, nach Sofia mitgenommenen Teil des Zweiges wiederum Haareis zu erzeugen: „Der Zweig wurde dazu durch Eintauchen auf seiner ganzen Länge befeuchtet und dann mit dem unteren Ende in ein Wasserglas gestellt, welches . . . einer Nachttemperatur von – 4 ° ausgesetzt wurde. Schon nach einigen Stunden hatten sich oberhalb der Wasserlinie bis zu etwa 5 cm darüber, . . . die gleichen haarbüschelförmigen Eisansätze gebildet, und zwar bis zu etwa ¾ cm Länge.“ Wenn das Experiment im geheizten Zimmer durchgeführt wurde, so konnte Wegener mit einer starken Lupe auf dem aus dem Wasser ragenden Teil des Versuchsstücks anstelle von Eishaaren „zahlreiche winzig kleine Wassertröpfchen auf der Holzoberfläche“ erkennen. Bezüglich der stofflichen Zusammensetzung der Eishaare sagt WEGENER: „Ich streifte einige Haarbüschel ab und legte sie auf weisses Papier. In der Wärme schmolzen sie zu einer hellbraunen und anscheinend schwach riechenden Flüssigkeit ohne erkennbare feste Bestandteile.“ Da Wegener einen Zusammenhang der Haareisbildung mit dem auf der Holzoberfläche beobachteten Pilzmyzel vermutete, liess er das Holz durch den Mykologen Geheimrat Arthur Meier untersuchen. Dieser stellte fest, dass es von Pilzhyphen durchwuchert war. Aber Pilzfruchtkörper waren nicht vorhanden. Nach dem Myzel vermutete Arthur Meier einen Askomyzeten. Wegener zieht folgenden Schluss: „Meine . . . Beobachtungen dürften einen weiteren Schritt zur Klärung der Entstehung dieses Eises bedeuten, da aus ihnen hervorgeht, dass ein Pilz in entscheidender Weise dabei mitwirkt. Kristallographisch scheint das Haareis zu den als ‚Trichiten‘ bezeichneten Wachstumsformen zu gehören.“ Über die Art des Holzes sagt Wegener nichts. An älterer Literatur erwähnt er einzig eine Arbeit von HERSCHEL 1833, in der aber nicht das Haareis auf morschem Holz beschrieben ist, sondern die verwandte Erscheinung von Bandeis auf Strüngen von Disteln und Sonnenblumen (vgl. 1.1.3).

1.2.2 LENGGENHAGER 1985

Lenggenhager beschreibt Haareis aus der Umgebung von Bern 1979 und 1984 sowie aus der Umgebung von Burgdorf 1985. Es gelang auch Lenggenhager auf den im Wald gesammelten Stücken Haareis nachzuzüchten. Im Gegensatz zu Wegener steckte er die vorgängig gründlich gewässerten Versuchszweige nicht in Wasser, sondern in feuchte Erde. Bei Nachttemperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt erhielt er im Februar 1985 regelmässig bis 4 cm langes Haareis. Nach Mitte März gelang dies mit denselben Holzstücken und bei denselben Bedingungen nicht mehr. Auch Versuche im Kühlraum (-4°C) und im Tiefkühlraum (-20°C) verliefen negativ. Lenggenhager machte auch Versuche mit künstlich entrindeten Aststücken verschiedener Laubbölzer, aber ohne jeden Erfolg: Nur auf Buchenholz, das er mit Haareis gesammelt hatte, konnte er solches nachzüchten. Über die Ursache der Erscheinung stellt er nur Mutmassungen an. Die Pilzhypothese taucht dabei indirekt auch auf, indem er einen Gärungsprozess als mögliche Ursache vermutet. Für die häufig zu beobachtende Scheitelung zieht Lenggenhager die Schwerkraft und elektrische Ladungen in Betracht.

1.2.3 WAGNER 2005 und 2007

Wagner beobachtet Haareis erstmals 1972 in einem Wald bei Meikirch in der Nähe von Bern. 1974 entdeckte er in demselben Wald auf Haareis tragenden Hölzern Fruchtkörper zweier Pilzarten, welche von H. Cléménçon als *Tremella mesenterica* und *Exidia glandulosa*, zwei ganzjährig aktive Basidiomyzeten, bestimmt wurden. Im Gegensatz zum Haareis standen die Pilzfruchtkörper nicht auf dem rindenlosen Holzkörper, sondern in der Nachbarschaft auf noch vorhandener Rinde. Ohne Kenntnis der Arbeit von Wegener 1918 kam Wagner auf die Vermutung, dass zwischen der Anwesenheit dieser Pilze und dem Haareis ein Kausalzusammenhang besteht. Er machte den emeritierten Berner Chirurgen Prof. K. Lenggenhager auf die merkwürdige Erscheinung aufmerksam. Als dieser Jahre später Haareis auch zu Gesicht bekam, stellte er Experimente darüber an und publizierte sie 1985 (siehe oben!).

Wagner selbst publizierte darüber 2005 und 2007 in populärwissenschaftlichen schweizerischen Zeitschriften, um möglichst viele Beobachter auf das seltene, in der Literatur immer noch nicht befriedigend erklärte Naturphänomen aufmerksam zu machen. Er hält die rein physikalischen Erklärungsansätze für ungenügend. Wie Wegener sieht er im Haareis ein biophysikalisches Phänomen verursacht durch die Stoffwechsellätigkeit eines im Holzkörper lebenden saprophytischen Pilzes.

Die Publikationen von Wagner 2005 und 2007 führten zu wertvollen Kontakten mit weiteren Beobachtern. Durch diese kamen wir in den Besitz zahlreicher neuer Informationen und konnten im Januar bis April 2008 dank günstiger Wetterbedingungen die Pilzhypothese auch experimentell prüfen.

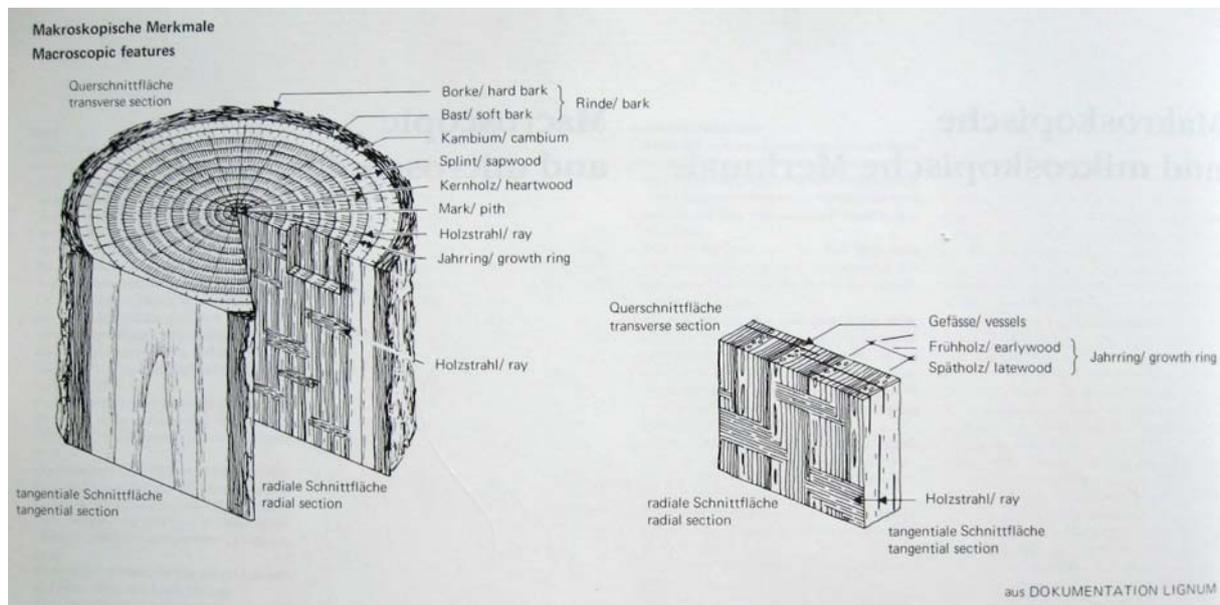


Abb. 9: Makroskopischer Bau von Hölzern. Aus SCHWEINGRUBER 1990.

Figure 9: Macroscopic structure of wood, from Schweingruber (1990).

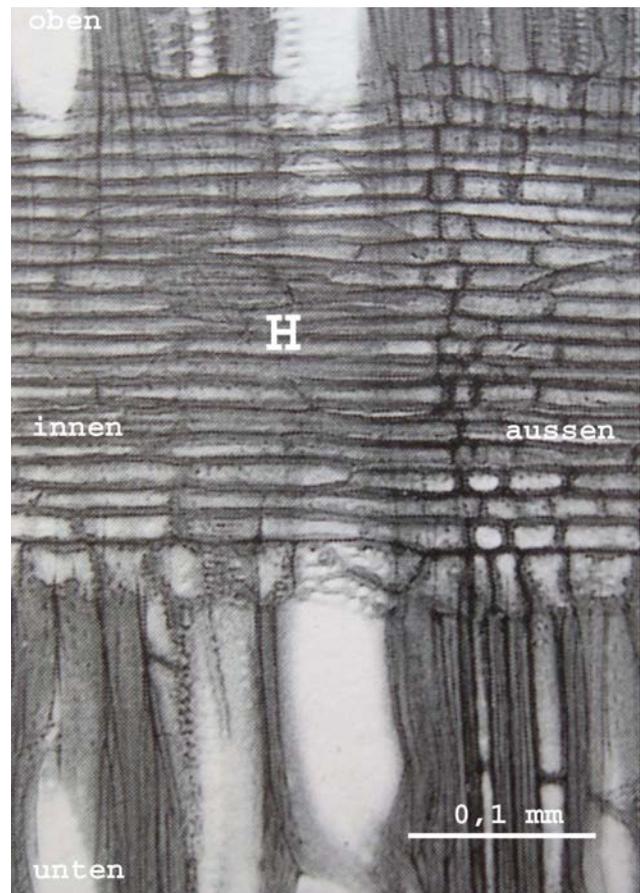
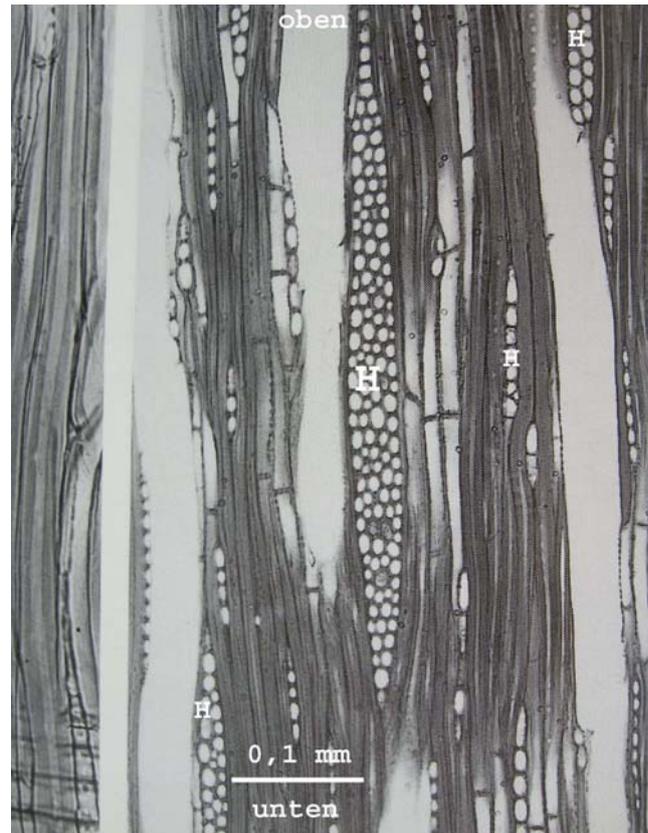
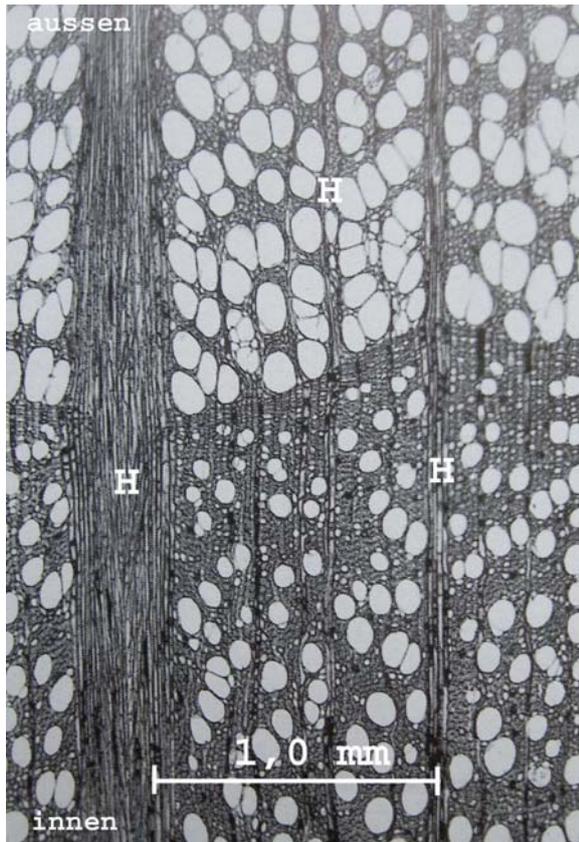


Abb. 10: Buchenholz-Anatomie in drei verschiedenen Schnittrichtungen, aus SCHWEINGRUBER 1990.

a) Oben links: Querschnitt an einer Jahrringgrenze: oben Frühjahrsholz mit weiten Leitgefässen, unten dichtes Spätholz des Vorjahres. Die Holzstrahlen (H) bestehen aus bis über 10 Reihen röhrenförmiger Zellen, welche Kanäle zwischen den vertikal verlaufenden Leitgefässen (weiss) bilden.

b) Oben rechts: Längsschnitt tangential durch Frühjahrsholz. Die 1 bis 4 Zellen breiten Holzstrahlen (H) sind quer geschnitten.

c) Rechts: Längsschnitt radial durch einen kräftigen Holzstrahl (H). Der Holzstrahl ist ca. 20 Zellen hoch.

Figure 10: Beech-wood anatomy in three different sections, from Schweingruber (1990): a) cross section (top left), b) tangential-longitudinal section (top right), c) radial-longitudinal section (right).

1.3 Die Pilzhypothese

1.3.1 Entstehung der Hypothese

Die Vermutung, dass ein lebender Pilz hinter dem merkwürdigen Phänomen stecken könnte, entstand bei WEGENER 1918 und unabhängig von ihm bei WAGNER 2005 aus der Beobachtung, dass das Haareis tragende Holz von Pilzmyzel durchwuchert ist, was man an Querschnittbildern schon makroskopisch feststellen kann (Abb. 13) und was Geheimrat Arthur Meier 1918 auch mikroskopisch nachgewiesen hat. Auch die Oberfläche des Holzkörpers zeigt in der Nachbarschaft des Haareises oft einen sichtbaren grauen Pilzüberzug. Auf solchen grauen Flächen selbst wächst allerdings kein Haareis. Nicht selten treten auf dem befallenen Holz in der Nachbarschaft des Haareises – meist auf der noch intakten Rinde – Pilz-Fruchtkörper auf. Zusätzlich zu den beiden unter 1.2.3 schon genannten Basidiomyzeten konnte die Mykologin Beatrice Senn-Irlet auf den von uns 2008 gesammelten Versuchsstücken *Diatrypella favacea* und *Hypoxylon spec. (H. multiforme?)* bestimmen, zwei winteraktive Askomyzeten. Auf einer Foto stellte sie zudem vermutlich den Basidiomyceten *Dacrymyces stillatus* fest (Abb. 14).

1.3.2 Biologische Grundlagen

Die Pilzhypothese stützt sich auf folgende physiologischen und holzanatomischen Fakten: Anders als grüne (autotrophe) Pflanzen braucht ein saprophytischer Pilz für sein Wachstum und für seinen Lebensunterhalt organische Nährstoffe, die er enzymatisch abbauen kann. Solche finden sich in totem Fallholz vor allem in den Holzstrahlen in Form von Stärke und Fett. Durch ihren aeroben (oxydativen) Abbau entstehen als Endprodukte CO₂ und H₂O sowie etwas Wärme. Das feuchte Gasgemisch verlässt das Holz auf dem Weg des geringsten Widerstandes und gefriert beim Austritt an die Luft, falls diese genügend kalt und wenigstens lokal mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Als Austrittsporen kommen die Mündungsstellen der Holzstrahlen in Betracht (Abb. 9-10). Die Holzstrahlen (früher als primäre und sekundäre Markstrahlen bezeichnet) sind radiär zwischen den Leitbündeln verlaufende Reihen dünnwandiger Zellen, die dem radialen Stofftransport und der (winterlichen) Speicherung organischer Nährstoffe dienen. Ihre leicht durchlässigen Zellen bilden ein dichtes System feiner Kanäle. Die Breite der Markstrahlen beträgt bei Buchen und Eichen nach SCHWEINGRUBER 1990 eine bis über 10 Zellen, ihre Höhe bis 5 mm. Sie liegen stockwerkartig übereinander. Ihre Mündungen sind auf dem hellen Holz als braune Linien sichtbar.

Warum kommt Haareis nur auf Laubholz und nicht auch auf Nadelholz vor? Die Ursache kann in der Anatomie des Holzes gesucht werden: Bei den Nadelhölzern sind die Holzstrahlen nur eine Zelle breit. Sie kann aber auch darin vermutet werden, dass die in unseren Breiten vorkommenden winteraktiven Pilze auf Laubholz angewiesen sind, während die auf Nadelhölzer spezialisierten Pilze unserer Wälder (z. B. der Hallimasch) im Winter nicht aktiv sind. Auch ist die Speicherung von Nährstoffen im Holz bei den immergrünen Nadelhölzern vermutlich von geringerer Bedeutung als bei den Laubhölzern.

Mit den im Folgenden beschriebenen Versuchen wird im Wesentlichen die Pilzhypothese geprüft. Wenn es gelingt, die Haareisbildung durch Abtöten des Pilzes zu unterdrücken, so spricht dies für die Hypothese. Bildet sich Haareis auch nach dem Abtöten des Pilmyzels, so ist sie widerlegt.

2 Material und Methode

2.1 Material

Um mit Haareis arbeiten zu können, musste geeignetes Material, d. h. mit Haareis versehenes Holz, zunächst in der Natur gefunden werden. Die Bedingungen dafür sind in unseren Breiten gegeben in Laub- oder Mischwäldern, wenn die Nachttemperaturen unter den Gefrierpunkt sinken, aber kein Schnee liegt und der Boden feucht ist. Auf totem Buchen- oder Eichenholz tritt es dann stellenweise auf, oft lokal gehäuft, aber oft auch nur ganz vereinzelt. Die Versuchshölzer für die zu beschreibenden Versuche konnten im Winter 2007/2008 in drei verschiedenen Wäldern gesammelt werden:

- Serie GW: 3 Hölzer, gesammelt von G. Wagner im Utzlebergwald bei Stettlen/Bern auf ca. 710 m Höhe am 8. Januar 2008,
- Serie MG: 5 Hölzer, gesammelt von M. Gsell im Bannholz bei Wettingen AG auf ca. 500 m Höhe am 30. Januar 2008,
- Serie RF, gesammelt von R. Fries und G. Wagner im Grauholzwald E Moosseedorf auf ca. 600 m Höhe am 15. Februar 2008.

Es handelte sich ausschliesslich um totes Buchenholz, meist Zweigstücke von 0,5 bis 2 cm Durchmesser, auf denen die Rinde wenigstens stellenweise schon abgelöst war oder sich eben löste. Auf der noch intakten Rinde fanden sich bei einigen Stücken Fruchtkörper von Pilzen der oben genannten Gattungen.

2.2 Methode

Zur Durchführung von Versuchen musste eine Methode gefunden werden, auf den im Wald gesammelten Holzstücken Haareis ‚in vitro‘ zuverlässig ‚nachzuzüchten‘. ‚In vitro‘ heisst in diesem Fall: vor Niederschlägen geschützt, aber bei geeigneten Aussentemperaturen auf einem Wohnungsbalkon in Stettlen. Falls dies gelang, konnten die experimentellen Eingriffe zur Bestätigung oder Widerlegung der Pilzhypothese vorgenommen werden. Die äusseren Bedingungen für dieses Unternehmen waren im Januar/Februar und nochmals in der zweiten Hälfte März 2008 im Gebiet von Bern in fast optimaler Weise gegeben: In den Nächten sank die Temperatur meist wenige Grad unter den Gefrierpunkt. Da die Tagestemperaturen immer im positiven Bereich lagen, konnten allerdings nie ‚Dauerzuchten‘ über mehrere Tage durchgeführt werden.

2.2.1 ‚Zuchtmethode‘

Das ‚Nachzüchten‘ von Haareis auf Holz, das in der Natur schon mit Haareis infiziert war, ist schon WEGENER 1918 gelungen, indem er die Versuchshölzer mit einem unteren Teil in Wasser stellte und einer Temperatur knapp unter dem Gefrierpunkt aussetzte. LENGGENHAGER 1985 erreichte eine ‚Nachzucht‘, indem er die Versuchshölzer bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt in feuchte Erde steckte. Unsere eigenen Versuche gelangen am besten, wenn die Hölzer durch längeres Wässern mit Feuchtigkeit gesättigt, dann oberflächlich abgetrocknet und zur Kälteexposition auf ein nasses Tuch gelegt wurden. Sobald die Lufttemperatur unter den Gefrierpunkt sank, kamen unter diesen Bedingungen Wachstumsgeschwindigkeiten von einem halben bis über einen Zentimeter pro Stunde zustande. (MÜHLEISEN & LÄMMLE, 1975 stellten bei derselben Versuchsanordnung eine mittlere Geschwindigkeit von 6 mm pro Stunde fest). Das nasse Tuch frohr gleichzeitig zu. Bei weiter sinkender Temperatur trat eine Verlangsamung des Haareis-Wachstums auf. Wir erreichten in einer Nacht Haarlängen von 4-5 cm (Abb.15).

2.2.2 Versuche zur Pilzhypothese

Für die Versuche wurden die besten der zur Verfügung stehenden Hölzer verwendet, d. h. diejenigen, bei denen sich in den Vorversuchen der üppigste Wuchs von Haareis zeigte. Diese Stücke wurden halbiert und die eine Hälfte als unbehandelte Kontrolle verwendet, die andere Hälfte der zu testenden Einwirkung zur Schädigung des Pilzmyzels (Hitze, Fungizid, Alkohol) ausgesetzt.

2.2.2.1 Hitzeversuch

Bei den Hitzeversuchen wurde das Versuchsstück während 2 bis 3 Minuten siedendem Wasser ausgesetzt. Vor der Versuchsnacht wurde es zusammen mit dem nicht behandelten Kontrollstück in destilliertem kaltem Wasser ca. 1 Stunde gewässert. In der Folge wurden die behandelten Versuchsstücke in mehreren Nächten auf Haareiswuchs getestet und mit den unbehandelten Kontrollstücken verglichen. Es konnten Versuche mit drei verschiedenen Stücken durchgeführt werden.

2.2.2.2 Fungizidversuch

Als Fungizid wurde ein käuflicher ‚Schimmel-Entferner‘ mit 2,4% Natriumhypochlorit und 0,4% Natriumhydroxid (Giftklasse 5) verwendet, eine klare, farblose wässrige Flüssigkeit. Das Versuchsstück wurde beim ersten Versuch während 90 Minuten, beim zweiten während 15 Minuten, beim dritten während 60 Minuten senkrecht in ein mit dem Fungizid gefülltes Becherglas gestellt, wobei ein Teil des Stücks aus der Flüssigkeit herausragte. Anschliessend wurde das Versuchsstück während mindesten 15 Minuten in fliessendem Leitungswasser vom Fungizid befreit.

2.2.2.3 Alkoholversuch

Das Versuchsstück wurde während 90 Minuten in Alkohol 70 % gebadet und anschliessend zur Entfernung des Alkohols gründlich gewässert.



Abb. 11: Flächiges Haareis auf gelagertem Eichenholz. Durchmesser der Äste ca. 25 cm. Haareis erscheint nur auf noch hellem (oberflächlich nicht schwarz ‚verpilztem‘) Holz. Foto Karsten Dörfer.

Figure 11: Flat type of hair ice on deposited oak wood. Branch diameter approx. 25 cm. Hair ice appears on the bright parts of the wood, only.



Abb. 12: Haareis von etwa 3 cm Länge auf Eichenholz (Detail von Abb. 11). Die Eishaare entspringen den Mündungslinien von Holzstrahlen. Foto Karsten Dörfer.

Figure 12: Hair ice on oak wood (detail of Figure 11). The hairs (length about 3 cm) originate at exit points of wood rays.

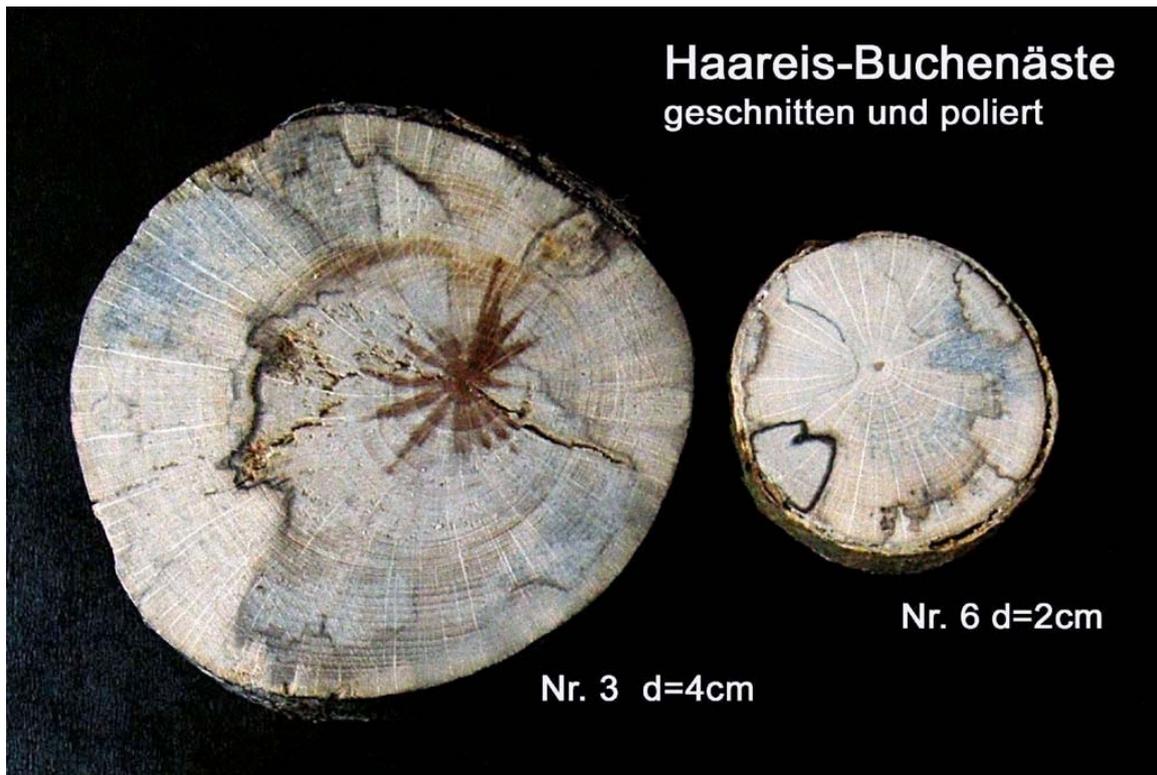


Abb. 13: Polierte Querschnitte durch Buchenzweige, welche Haareis trugen, mit gut erkennbaren Jahrringen, primären und sekundären Holzstrahlen. Die von Pilzmyzel durchwucherten Partien unterscheiden sich klar von dem hellen, noch nicht befallenen Holz. Foto Richard Wanner.

Figure 13: Polished cross sections of beech-wood branches which carried hair ice. Annual rings are visible as well as primary and secondary wood rays. The fungus-infected parts can be clearly separated from the other wood.



Abb. 14: Fruchtkörper von Pilzen auf Buchenholz, das Haareis trug: wahrscheinlich *Dacrymyces stillatus* (gelb) und *Hypoxyylon spec.* (schwarz). Foto Maroia Gsell.

*Figure 14: Fruit bodies of fungi on beech wood which carried hair ice, probably *Dacrymyces stillatus* (yellow) and *Hypoxyylon spec.* (black).*

3 Ergebnisse

3.1 Hitzeversuche

Ein erstes Versuchsstück (Wg. 2) zeigte nach der Hitzebehandlung vom 22. Januar während 19 Tagen in 10 Versuchsnächten keine Spur von Haareis. Nach 23 Tagen, am Morgen des 14. Februar, entstand erstmals wieder eine Spur von ca. 1mm langem ‚Flaumeis‘, eine äusserst feine Form des Haareises.

Das zweite Versuchsstück (Wg. 1) bildete nach der Hitzebehandlung vom 28. Januar während 10 Tagen keine Spur von Haareis. Nach 14 Tagen, am Morgen des 12. Februar, entstanden erstmals wieder Spuren von ca. 1 mm, am 14. Februar von 2 mm langem Flaumeis.

Das dritte Versuchsstück (RF2) zeigte in der ersten Nacht nach der Hitzebehandlung vom 16. Februar eine Flaumeisbildung von 2mm, in den Nächten zum 18. und zum 20. Februar von 1cm. Bei den Nachversuchen in den kalten Nächten um den 20. März zeigte das Hitzestück keine oder nur eine minimale Haareisbildung (Abb. 16).

Die unbehandelten Kontrollstücke wiesen bei allen Versuchen üppiges, 3-4 cm langes Haareis auf.

3.2 Fungizidversuche

Einwirkung 90 Minuten: Das behandelte Versuchsstück wies am ersten Morgen (5. Februar) nach der Behandlung keine Spur von Haareis auf, während das Kontrollstück üppiges, 1,5 cm langes Haareis zeigte (Abb.16). Auch der Teil des Versuchsstücks, der bei der Behandlung aus der Fungizid-Flüssigkeit herausgeragt hatte, zeigte noch 1 cm langes Haareis. Bei Folgeversuchen am 8., 11., 12. und 14. Februar bildeten sich am Versuchsstück nur sehr feine, flaumige Ansätze von Haareis, während die Kontrolle jeweils üppigen Haareiswuchs zeigte.

Einwirkung 60 Minuten: Das Versuchsstück wies am ersten Morgen nach der Behandlung (17. Februar) nur 0,2 cm Haareis auf, das Kontrollstück zeigte üppigen Haareiswuchs von 3,5 cm. Die Wiederholung des Versuchs am 20. Februar ergab dasselbe Resultat.

Einwirkung 15 Minuten: Das Versuchsstück wies am ersten Morgen nach der Behandlung (12. Februar) 1 cm langen Haareis-Flaum auf, das Kontrollstück nur 0,2 cm. Ein Nachversuch am 14. Februar zeigte erneut auf dem Versuchsstück eher bessere Haareisbildung als auf der Kontrolle. Das sah nach einer begünstigenden Wirkung einer kurzen Einwirkungszeit aus. Ein solcher Hormesis-Effekt konnte jedoch bei einer Wiederholung des Versuchs am 6./7. März mit einem anderen Versuchsstück nicht bestätigt werden: das behandelte Stück bildete diesmal nur 2-5mm, das Kontrollstück 5-10mm langes Haareis.

Das Ergebnis ist auch hier eindeutig: *Die Haareisbildung wird durch eine Fungizid-Behandlung genügender Intensität unterdrückt oder entscheidend geschwächt.* Vom 19. bis 30. März waren in sieben kalten Nächten nochmals Haareis-Nachzuchten möglich: Die mit Fungizid behandelten Versuchsstücke zeigten im Gegensatz zu den Kontrollstücken auch jetzt keine oder nur eine minimale Haareisbildung (Abb.17).

3.3 Alkoholversuch

Beim Versuch mit Alkohol 70% (90 Minuten Einwirkung) zeigte sich am ersten Tag nach der Behandlung (8. Februar) kein Unterschied gegenüber der Kontrolle, wohl aber bei den Folgeversuchen vom 9., 11., 12. und 14. Februar: Das mit Alkohol behandelte Stück zeigte jetzt nur noch 1 bis 1,5 cm Haareis, während auf dem Kontrollstück regelmässig 3-4 cm Haareis gebildet wurde.

Auch durch Alkohol lässt sich also die Haareisbildung beeinflussen. Warum die Wirkung erst vom zweiten Tag an sichtbar wurde, bleibt fraglich.

3.4 Wie lange ist ‚Nachzucht‘ möglich?

LENGGENHAGER gelang die Nachzucht von Haareis auf seinen Versuchsstücken auch bei geeigneten Bedingungen nach Mitte März nicht mehr. Unsere Überprüfung dieser Frage ergab folgendes: Am 4./5. März waren nach einer Wärmeperiode von zwei Wochen erstmals wieder Haareis-Bedingungen erfüllt. Auf den im Januar gesammelten Versuchsstücken (Serien GW und MG) zeigten sich schon jetzt nur noch vereinzelte Haareis-Ansätze, während die am 15. Februar gesammelten Stücke (Serie RF) noch üppiges Haareis produzierten, soweit sie nicht mit Fungizid oder Hitze behandelt waren. Dasselbe konnten wir nochmals in den Nächten vom 19. bis 29./30. März sowie in drei Frostnächten im April (5., 8., und 17. April) feststellen. Lenggenhagers Befund bestätigte sich also mit den im Januar, aber nicht mit den im Februar gesammelten Versuchsstücken. Bei einem Kontrollversuch am 20. Mai in einer Klimakammer des Instituts für Wald, Schnee und Landschaft WSL in Birmensdorf gelang aber auch mit den Hölzern vom Februar trotz geeigneten Bedingungen keine Haareis-Nachzucht mehr. Die Annahme liegt nahe, dass das Pilzmyzel in einem Holzstück nur während einer gewissen Zeit aktiv sein kann. Die Versuchsstücke von Lenggenhager waren, wie die unserer zwei ersten Serien, im Januar gesammelt worden.

3.5 Besondere Beobachtungen

3.5.1 Anwesenheit von Insekten

Im Wiliwald bei Moosseedorf beobachtete Ch. Mätzler im Haareis mehrfach die Anwesenheit von zahlreichen ca. 1 mm langen schwarzen Insekten (Abb. 18). Diese Beobachtung ist bisher von keinem andern Ort gemeldet worden. Nach den Photos handelt es sich um Springschwänze (Collembolen). Ihre Anwesenheit gibt neue Rätsel auf. Was lockt sie in das Haareis? (vgl. 4.2.).

3.5.2 Geräusch beim Lossprengen der Rinde

Der Arzt F. Burnier in Pampigny VD meldet uns eine akustische Beobachtung, die vermutlich mit der Haareisbildung zusammenhängt: Beim Campieren in einem Wald im Kanton Waadt im Jahr 1974 hätte er während einer kalten Nacht mehrfach knisternde Geräusche („des claquements très secs“) gehört. Es sei kein Tier anwesend gewesen. Aber am Morgen hätte sich in der Umgebung auf morschen Buchenästen Haareis befunden . . . Der Verdacht liegt nahe, dass das knisternde Geräusch durch das Lösen der Rinde vom Holzkörper zu erklären ist: Haareis wächst mit Vorliebe unter sich eben lösender Rinde. Es bedarf dann nur noch einer geringen Kraft, um sie loszusprengen.



Abb. 15:
Experimentelle
Nachzucht von
Haareis auf einem
Wohnungsbalkon. Das
gut durchnässte Holz
wurde auf einem
nassen Tuch (blau)
während einer Nacht
exponiert. Foto
Gerhart Wagner.

*Figure 15:
Experimentally grown
hair ice on the
balcony of an
apartment. The fully
wet wood was exposed
on a wet towel (blue)
during the night.*



*Figure 16: Result of a
test on the fungus
hypothesis of 17 Feb
2008: Part of a hair-
ice producing piece
was put in boiling
water for 2 min,
another one was put
in a fungicide for 60
min. These pieces did
not produce hair ice
afterwards in contrast
to untreated ones.*

Abb. 16: Ergebnis eines Versuchs zur Pilz-Hypothese am 17.2.2008: Ein abgetrenntes Versuchsstück, das in Vorversuchen Haareis gebildet hatte, wurde während 2 Minuten gekocht, ein zweites während 60 Minuten in einem Fungizid gebadet. Auf den behandelten Stücken entstand im Gegensatz zu den unbehandelten Kontrollstücken derselben Hölzer kein Haareis mehr. Foto Ulrich Schär.



Abb. 17: Versuch am 28. März 2008: Die unbehandelten Hölzer zeigten in einer kalten Nacht immer noch kräftigen Haareiswuchs. Auf den behandelten Stücken (Fungizid 90 Min. am 4.2., 15 Min. am 13.2., Kochen 2 Min. am 16.2.) entstand nur 1-2 mm langer Eisflaum. Foto Gerhart Wagner.

Figure 17: Experiment of 28 Mar 2008: The untreated pieces showed full growth of hair ice whereas treated pieces (with fungicide 90 min on 4 Feb, 15 min on 13 Feb, 2 min in boiling water on 16 Feb) only produced a fluffy layer of ice.



Abb. 18: Haareis mit einer Ansammlung von Springschwänzen (Collembolen). Diese sind ca. 2mm lang. Foto Christian Mätzler.

Figure 18: Hair ice with an assembly of small insects (collemboles). Their length is about 2 mm.

4 Diskussion

4.1 Beurteilung der Pilzhypothese

4.1.1 Hitzeversuche

Die drei durchgeführten Versuche zeigen eine radikale Hemmung der Haareisbildung durch die Einwirkung von Siedehitze. Jedoch trat in einem Fall nach 23, im zweiten nach 14 Tagen wieder eine geringe Haareisbildung auf; im dritten Fall war sie schon in der ersten Versuchsnacht nicht hundertprozentig unterdrückt. Dieser Befund lässt sich leicht damit deuten, dass der Pilz zwar schwer geschädigt, aber nicht ganz abgetötet war. Ob es sich dabei um überlebende Reste des Myzeliums oder um eine Neubildung aus Sporen handelte, kann nicht entschieden werden.

Eindeutig ist in jedem Fall: *Die Haareisbildung wird durch eine Hitzebehandlung ganz entscheidend geschwächt.* Die Frage, ob durch die Hitzewirkung im Holz eine Strukturveränderung stattgefunden hat, welche die Haareisbildung verunmöglichte, kann mit grosser Wahrscheinlichkeit verneint werden: Nach Prof. Fritz Schweingruber (persönliche Mitteilung) wird die Holzstruktur durch Kochen nicht verändert.

4.1.2 Fungizidversuche

Die Fungizidversuche zeigten eine klare Abstufung des Effekts nach der Einwirkungsdauer:

Bei 90 Minuten Einwirkung des Fungizids war die Wirkung radikal: Auf dem Versuchsstück wuchs zunächst, im Gegensatz zum üppigen Haareis auf dem Kontrollstück, keine Spur von Haareis mehr nach. Es trat aber auch hier eine Erholung ein: Ab dem dritten Tag nach der Behandlung bildete sich bei den Folgeversuchen auf dem behandelten Stück wieder zunehmende Spuren von flaumigem Haareis. Sie blieben aber rudimentär. Durch eine Einwirkungsdauer von 60 Minuten wurde die Haareisbildung auch in der ersten Nacht nicht vollkommen unterdrückt, aber schwer geschädigt. Das Ergebnis ist auch bei diesen Versuchen eindeutig: *Die Haareisbildung wird durch das Fungizid ganz entscheidend geschwächt.*

4.1.3 Bilanz

Die Beobachtungstatsachen und Experimentalergebnisse, die als Indizien für die Pilzhypothese sprechen, seien hier nochmals zusammengestellt.

- Das Haareis wächst auf morschem Totholz, das von Pilzmyzel durchwuchert ist.
- In der Nachbarschaft von Haareis treten oft Fruchtkörper von ganz bestimmten Pilzen auf. Gefunden wurden Arten der Gattungen *Tremella*, *Exidia*, *Diatrypella*, *Hypoxylon*, *Dacrymyces*.
- Die als Urheber vermuteten Pilze sind ausgeprägt winteraktive oder ganzjährig aktive Arten.
- Die als Urheber vermuteten Pilze sind – wie das Haareis - auf Laubholz spezialisiert.
- Haareis tritt immer nur auf einzelnen von vielen zur Verfügung stehenden gleichartigen Hölzern auf und auch auf diesen nur in einzelnen Partien. Dies erinnert an das Verhalten seltener Pflanzen.
- Alle Eingriffe, welche den Pilze schädigen oder töten, hemmen oder verhindern auch die Bildung von Haareis.

- Eine gewisse Zeit (Tage bis Wochen) nach dem die Haareisbildung unterdrückenden Eingriff kommt diese langsam wieder in Gang: Es findet eine gewisse Erholung des Myzels statt.

- Nach einer gewissen Zeit (mehrere Wochen) wird auch bei günstigen Bedingungen kein Haareis mehr gebildet: Die für den Pilz abbaubaren Nährstoffe sind aufgebraucht, der damit verbundene Stoffwechsel ist erloschen.

Als Bilanz kann festgestellt werden: Alle Befunde sprechen für, keiner gegen die Pilzhypothese. WEGENERS Schlussfolgerung von 1918, „*dass ein Pilz in entscheidender Weise dabei mitwirkt*“, kann als bestätigt gelten.

4.2 Zur physikalisch-chemischen Natur von Haareis

Verschiedene Beobachtungen und Überlegungen machen es wahrscheinlich, dass die Eishaare nicht aus reinem Wasser bestehen:

- Wird reines Wasser unter 0° C gekühlt, so bleibt es ohne die Anwesenheit von Gefrierkeimen, die für den Kristallisationsprozess katalytisch wirken, bis zu tiefen Minustemperaturen flüssig (im Extremfall, etwa in Form von kleinen Wolkentröpfchen, bis – 40°). Die Eishaare werden aber schon bei einer Lufttemperatur knapp unterhalb 0° C gebildet, typischerweise bei – 1° C, kaum mehr unterhalb von – 3° C. Aus der Atmosphärenphysik (PRUPPACHER & KLETT, 2000) ist bekannt, dass in diesem Temperaturbereich vor allem organische Verbindungen als Gefrierkeime wirksam sind, zum Beispiel Metaldehyd (CH₃CHO)₄. Diese sind in der Regel nur schwer löslich in Wasser.

- Bei den gegebenen Bedingungen ist die Eisstruktur hexagonal. Es entstehen Plättchen und Säulen. Um Fäden zu generieren, müssen die Eiskristalle viel kleiner sein als der Durchmesser der Haare. Entsprechend viele Gefrierkeime sind deshalb erforderlich. Die hohe Gleichmässigkeit in Dicke und Länge der aus verschiedenen Oeffnungen quellenden Fäden erfordert formgebende Kräfte, die sich nicht aus der Natur von Eis ableiten lassen.

- Die Tatsache, dass Haareis Insekten anzieht, deutet auf die Anwesenheit einer für sie geruchlich wahrnehmbaren organischen Substanz.

- Beim Einsetzen des Schmelzprozesses können aus einzelnen Eishaaren perlkettenartig angeordnete Wassertröpfchen entstehen, die durch feinste, von blossen Auge knapp sichtbare Fäden verbunden bleiben. Aus Gründen der Oberflächenspannung, die bei Eis und Wasser nahezu identisch ist, können die Restfäden nicht aus Eis bestehen. Es muss sich um einen fadenziehenden Stoff handeln, der dem Haareis auch die beobachtete Flexibilität verleiht. Es kommt eine Substanz in Frage, die mit dem Wasser aus dem Holz austritt. Es ist vermutlich dieselbe Substanz, deren Moleküle als Gefrierkeim wirken und die auch die Insekten anzieht. Es dürfte sich um ein organisches Nebenprodukt beim Abbau von Stärke oder Fett handeln.

- Beim Schmelzen entstehen manchmal lokale bräunliche Verfärbungen (vgl. Abb. 2), und auch das Schmelzwasser hat, wie schon WEGENER 1918 feststellte, eine schwach hellbräunliche Tönung, ist aber trotzdem recht klar.

- Die Schmelzflüssigkeit ist nach WEGENER „anscheinend schwach riechend“. Einen sehr schwachen, undefinierbaren Geruch konnten auch wir feststellen.

4.3 Zur Frage der Herkunft des Wassers

Angesichts der oft erstaunlich grossen Haareisbüschel auf unscheinbaren kleinen Aststücken stellt sich zwingend die Frage nach der Herkunft des Wassers, aus dem das Haareis entsteht. Es kommen in Frage:

(1) Wasserdampf aus der Atmosphäre, (2) Wasser aus der Unterlage des Holzes, (3) Wasserdampf aus dem aerobischen Abbauprozess organischer Stoffe, (4) im Holz vorhandenes Wasser. Die folgenden Überlegungen zeigen, dass alle diese Quellen eine Rolle spielen.

Die Tatsache, dass Haareis manchmal unter noch anliegender Rinde gebildet und diese durch das Eis abgestossen wird, lässt darauf schliessen, dass das nötige Wasser weder aus der Atmosphäre (1) noch aus der Unterlage des Holzes (2) stammt, sondern aus dem Holz. Bezüglich der Annahme (3), das Wasser stamme aus dem Abbauprozess organischer Stoffe, stellt sich die Frage nach der Massenbilanz. Das Monomer der Stärke, die als Ausgangsstoff in erster Linie in Frage kommt, ist $C_6H_{10}O_5$. Mit 6 aus der Luft stammenden Sauerstoffmolekülen O_2 bilden sich bei der Verbrennung 5 Wassermoleküle H_2O und 6 Kohlendioxidmoleküle CO_2 . Eine einfache Rechnung ergibt, dass für die Bildung von 1 g Eis aus Atmungswasser ca. 1,8 g Stärke abgebaut werden muss. Diese Möglichkeit fällt aufgrund unserer Messungen ausser Betracht: Ein Holzstück mit einem Feuchtgewicht von ca. 50 g bildet in einer einzigen Nacht gut 1 g Haareis. Das entspricht etwa 4–5 % des reinen Holzgewichtes. Mit dieser Abbaurate wäre nicht nur die Stärkereserve im Holz, sondern die ganze Holzmasse in wenigen Tagen abgebaut. Wir konnten aber auf denselben Holzstücken während mehr als 60 Tagen immer wieder Haareis züchten.

Es bleibt somit nur die Annahme (4) bezüglich der hauptsächlichen Wasserquelle für das Eis der Haare: Im feuchten Holz gespeichertes Wasser. Warum tritt dieses aus dem Holzkörper aus? Der oxydative Abbau organischer Nährstoffe (3) durch den Pilz liefert den nötigen Antriebsmechanismus: Das entstehende CO_2 wirkt als Treibgas für den Ausstoss des im Holz gespeicherten sowie des durch die Zellatmung entstandenen Wassers. Der Oxydations-Wasserdampf ist bezüglich Gasdruck unbedeutend, da er sofort kondensiert: Das Volumen des entstehenden Wassers ist etwa 1000mal kleiner als dasjenige des Gases.

4.4 Schlussfolgerungen

Unsere Beobachtungen und theoretischen Überlegungen zur Natur von Haareis deuten auf folgenden Entstehungsprozess: Der Druck des CO_2 -Gases, das durch den aeroben Stoffwechsel eines winteraktiven Pilzes entsteht, drängt das im Holz gespeicherte Wasser durch die Holzstrahlen an die Oberfläche. Im Wasser vorhandene organische Keime leiten den Gefrierprozess schon knapp unterhalb von $0^\circ C$ ein (Immersionsmodus: die Keime sind schon vor der Abkühlung unter den Gefrierpunkt vorhanden). Bei Anwesenheit von Metaldehyd gefriert Wasser schon bei $-0,4^\circ C$. Bei

Haareis muss ein Stoff mit ähnlichen Eigenschaften im Spiel sein. Die durchlässigen Zellreihen der Holzstrahlen wirken als Austrittskanäle des leicht unterkühlten Wassers. Zwei Wärmequellen verzögern das Abkühlen des Holzes und damit das Gefrieren des im Holz enthaltenen Wassers: Die beim Atmungsprozess im Pilzmyzel entstehende Verbrennungswärme sowie die Wärme aus dem Phasenübergang des Wassers beim Gefrieren. Da sich die Stoffwechselaktivität des Pilzes unterhalb eines Optimums mit abnehmender Temperatur verringert, ist es einleuchtend, dass die Haareisbildung auf einen kleinen Temperaturbereich knapp unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser beschränkt ist. Wenn das Wasser im Holz gefriert, hört das Haareiswachstum auf.

Obschon Wasser aus den Quellen 1 (Atmosphäre) und 2 (Unterlage) für die Haareisbildung kaum in Frage kommt, spielt es doch eine wesentliche Rolle: Aus den Experimenten wissen wir, dass nicht nur das Holz mit Feuchtigkeit mehr oder weniger gesättigt sein muss, sondern auch dessen nächste Umgebungsluft. Die auf feuchter Unterlage liegenden Versuchsstücke zeigten den weitaus stärksten Wuchs von Haareis regelmässig an ihren Seiten, das heisst an den Orten grösster Luftfeuchtigkeit, und nicht nach oben. In der Natur kann man beobachten, dass die Eishaare mit Vorliebe einem feuchten Gegenstand entgegenwachsen. Wo die Luft mit Wasserdampf nicht gesättigt ist, sublimiert und verschwindet der aus den Holzstrahlen fliessende Eisflaum in kurzer Zeit. Die Luftfeuchtigkeit in der nächsten Umgebung ist also eine notwendige Randbedingung, jedoch nicht die Ursache für den Haareiswuchs. Die Feuchtigkeit des Untergrundes insofern eine wichtige Rolle, als sie die Durchnässung des aufliegenden Holzes verursacht. Wo in der Natur Haareis auf Holz ohne Bodenkontakt beobachtet wird, ist das Holz durch vorhergegangenen Regen oder geschmolzenen Schnee durchnässt. Wo sich Haareis auf noch stehenden morschen Stämmen bis auf Manneshöhe bildet, wird vermutlich durch die immer noch kapillar wirksamen Gefässe Wasser aus dem Boden nachgesaugt. Bei trockenem Wetter wird in der Natur kein Haareis gebildet.

4.5 Notwendigkeit weiterer Versuche

Obschon unsere Beobachtungen und Versuche die Pilzhypothese als gut gesichert erscheinen lassen und die physikalischen Überlegungen zu Schlussfolgerungen über die Entstehung von Haareis geführt haben, sind sie doch noch weit davon entfernt, dem Phänomen Haareis alle Geheimnisse zu entreissen. Weitere systematische Versuche mit Laborhilfsmitteln, die uns bisher nicht zur Verfügung standen, sind unerlässlich. In solche Versuche wären einzubeziehen:

- Die genaue Lage der Austrittsstellen der Eishaare bezüglich der Holzanatomie,
- das Verhalten des Pilzmyzels im Holz bezüglich der Holzanatomie und -histologie,
- die Stoffwechselaktivität des Pilzes bei verschiedenen Temperaturen,
- die genauen Temperaturverhältnisse im Holz und ausserhalb bei der Haareisbildung,
- die genaue Beschaffenheit des Eises (kristalline Struktur, Beimengungen),
- die Zusammensetzung der Schmelzflüssigkeit,
- die Massenbilanz.

Verdankungen

Die vorliegende Studie wäre nicht möglich gewesen ohne die Mitwirkung zahlreicher interessierter und aufmerksamer Helferinnen und Helfer, denen wir Hinweise auf Haareis-Vorkommen, das Sammeln von Versuchsstücken, gute fotografische Aufnahmen, Literaturhinweise oder die Mitteilung besonderer Beobachtungen verdanken: Werner Bezold in Bayreuth, François Burnier in Pampigny, Karsten Dörfer in Heinade im Weser-Bergland, Bernhard Fischer in München, Rolf Fries in Ittigen, François Gautier in Confignon GE, Maroia Gsell in Wettingen, Niklaus Kämpfer in Ittigen BE, Niklaus Lüthi in Tuttwil TG, André Masson in Baar, Peter Mosimann in Schliern BE, Hans Christian Rufener in Moosseedorf, Christoph Scheidegger in Birmensdorf, Benno Schildknecht in Hagenwil TG, Fritz Schweingruber in Birmensdorf, Beatrice Senn-Irlet in Bolligen, Toni Sgier in Bern, Emil Suter in Hildisrieden bei Sempach, Richard Wanner in Baden, Alfred Weiersmüller in Ostermundigen, Henk de Bruin in Holland und andere. Ihnen allen sei hier unser herzlicher Dank ausgesprochen. Von ganz besonderem Wert waren auch die zeitweise intensiven Mail-Kontakte mit James R. Carter in Illinois/USA und mit Brenda Callan in Victoria/Kanada.

Literatur

- ABBE, C. 1905: Ice Columns in Gravelly Soil. *Monthly Weather Review*, 157-158.
- BAY, J.C. 1894: Crystals of Ice on Plants, *Botanical Gazette*, 19, No. 8, 321-326
- CARTER, J. R. 2007: Ice Ribbons, Ice Flowers, Frost Flowers or whatever they might be called, <http://www.ilstu.edu/~jrcarter/ice/>.
- COBLENTZ, 1914: The Exudation of Ice from Stems of Plants. *Journal of the Franklin Institute*, 589-621.
- DE BRUIN, H. & VAN DEN BERG, B. 2006 : Ijsvezels. *Meteorologica* 2/2006, 9-10.
- EMEIS, W. 1919: Eine weitere Erklärung zur Bildung von Haareis auf morschem Holz. *Die Naturwissenschaften* 7/8, S. 124.
- HILLEFORS, A. 1976: Needle Ice on Dead and Rotten Branches. *Weather* 31, 163-168.
- HERSCHEL, J. F. W. 1833: Notice of a remarkable Deposition of Ice around the decaying Stems of Vegetables during Frost. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 3rd Series, 110-111.
- LAWLER, D. W. 1988: A Bibliography of Needle Ice. *Cold Regions Science and Technology* 15, 295-310.
- LECONTE, J. 1850: *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 3rd Series, 329-342.
- LENGGENHAGER, K. 1986: Zur Frage der ,Haareis'-Bildung. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Ser. B.* 36, 371-379.
- MINNAERT, M. 1970: *De natuorkunde van 't vrije veld*, 2. Geluid, warmte, elektriciteit, Thieme & Cie, Zutphen, Niederlande.
- MÜHLEISEN R. & A LÄMMLE 1975: Neue Untersuchungen von Kammeis (Haareis), *Meteorol. Rundschau*, 28 Heft 2, 55-60.
- NIMMO, E. 1928: Frost Pillars. *Quart. J. of the Roy. Meteorol. Soc.* 54, 18.

- PRUPPACHER, H. R. & KLETT, J. D. 2000: *Microphysics of Clouds and Precipitation*, 2nd rev. & enlarged Edition, Kluwer, Dordrecht.
- ROSSMANN, F. 1937: Stängeleis am wasserführenden Hang. *Meteorol. Zeitschrift*, Februar, 64-67.
- SCHWEINGRUBER, F. H., 1990: Anatomie europäischer Hölzer. – *Anatomy of European Woods*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf (Hrsg.). Haupt, Bern und Stuttgart. 800 S.
- WAGNER, G. 2005: Haareis – eine seltene winterliche Naturerscheinung. *Schweiz. Zeitschrift für Pilzkunde*, November 2005, 269-271.
- WAGNER, G. 2007: Haareis und Stängeleis, zwei seltene winterliche Naturerscheinungen. *Die Alpen* 11/2007, 64-67.
- WARD, L. F. 1893: Frost Freaks of the Dittany. *The Botanical Gazette*.
- WEGENER, A. 1918: Haareis auf morschem Holz. *Die Naturwissenschaften* 6/1, 598-601.