

Haarförmiges und bandförmiges Eis

Autor(en): **Fontana, Pietro / Preuss, Gisela / Mätzler, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen / Naturforschende Gesellschaft des Kantons Solothurn**

Band (Jahr): **44 (2021)**

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904322>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Haarförmiges und bandförmiges Eis

Pietro Fontana, Gisela Preuss, Christian Mätzler

Dr. Pietro Fontana
Josef Reinhart-Weg 1
4500 Solothurn
pietro.fontana@gawnet.ch

Gisela Preuss
Birkenweg 7
57555 Brachbach
Deutschland
gisela-preuss@gmx.de

Prof. Dr. Christian Mätzler
Krauchthalstrasse 3A
3324 Hindelbank
christian.matzler@iap.unibe.ch

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	 11
	Schlagworte	 11
1	Einleitung	 12
2	Beobachtungen	 12
2.1	Haareis	 12
2.2	Bandeis	 15
2.2.1	Bandeis aus Pflanzenstängeln	 15
2.2.2	Bandeis aus Stahlröhren	 17
2.2.3	Bandeis aus Schlackebrocken	 17
2.2.4	Kieselsteineis (Pebble Ice)	 18
2.2.5	Kammeis	 18
2.2.6	Kammeis- und bandeisähnliche Formen auf Pilzen	 20
2.3	Vergleich von haarförmigem und bandförmigem Eis mit Steinsalzfasern	 20
3	Resultate	 21
4	Diskussion	 22
5	Dank	 22
6	Literatur	 23

Haarförmiges und bandförmiges Eis

Pietro Fontana, Gisela Preuss, Christian Mätzler

Zusammenfassung

Es wurde das durch Poren beeinflusste, anisotrope Faserwachstum von verschiedenen Erscheinungsformen von Eis und Steinsalz beobachtet. Im Falle der Eisbildung findet die Kristallisation aus der Schmelze (Wasser) und bei Steinsalz aus einer gesättigten wässrigen Salzlösung statt. Die Kristalle wachsen an ihrer Basis auf dem Substrat (Unterlage) durch Anlagerung der Wassermoleküle bzw. der Natrium- und Chloridionen. Die in die Kristallstruktur einzubauenden Teile werden über ein durchgehendes, mit flüssigem Wasser oder gesättigter Salzlösung gefülltes Porensystem aus dem Substrat nachgeliefert. Dabei wirken die durch den Segregationsprozess erzeugte Saugkraft, die Kapillarkraft und in den Poren vorhandener Druck. Es zeigt sich, dass sowohl bei Eis- wie auch bei Steinsalzkristallen bevorzugt Faserbänder entstehen, die durch physikalische Prozesse ausgelöst werden. Eine Ausnahme bildet Haareis, das durch einen biophysikalischen Prozess ergänzt wird. Dabei verhindert ein winteraktiver Pilz (*Exidiopsis effusa*) die Sinterung zwischen benachbarten Haaren.

Das Erscheinungsbild der Eisformen wird auch wesentlich durch die Anordnungen und Grössen der Poren sowie ihrer gegenseitigen Abstände im Substrat bestimmt.

Die weisse Farbe der Eiskristalle entsteht durch Mehrfachstreuung des Lichts an den Kristallfasern, weil Eis im sichtbaren Wellenlängenbereich keine wesentliche Absorption zeigt.

Schlagworte

Haareis, Bandeis, Kieselsteineis, Kammeis, Steinsalzhare, Steinsalzfasern, Haarsalz, Eis-Segregation

1 Einleitung

Das vorherrschende Eis auf der Erde entsteht in der Atmosphäre in Form von Schneekristallen, sowie auf den polaren Meeren und Flüssen. Aus Schnee entstanden u. a. unsere alpinen Gletscher und die grossen Eisschilder in den Polarregionen. Seltener entstehen Haareis und Bandeis, Ausbildungsformen von Eis, die aus einem porösen Substrat wachsen und durch Sublimation auch schnell wieder vergehen.

Die ungewöhnlich schneefreien und teilweise nebligen Monate Januar und Februar 2020, mit Tagestemperaturen von bis zu 10°C und nächtlichen Temperaturen nur wenige Grade unter 0°C, gleichzeitig verbunden mit teilweiser Windstille und hoher relativer Feuchtigkeit, waren ideale Bedingungen für das Wachstum dieser Ausbildungsformen von Eis in Solothurn.

Die Beobachtungen wurden in einem Buchen-Tannen-Mischwald nordöstlich von Solothurn und in einem Garten in Solothurn durchgeführt. Das Haareis wuchs nur auf toten, auf dem Boden liegenden, rindenfreien Buchenholzästen (*Fagus sylvatica*). Wagner (2012) verglich Haareis, Bandeis und Kammeis. Dabei stellte er zusammenfassend fest, dass es verwandte Erscheinungen sind, die alle aus Wasser eines porösen Substrats (Unterlage) stammen und wie Haare an der Basis wachsen. Deshalb nannte er sie Basicryogene.

Nachfolgend wird die Entstehung von Haareis und verschiedenen Bandeisarten (inklusive Kammeis) beschrieben und mit der Entstehung von Steinsalzhaaren und Steinsalzfasern verglichen.

2 Beobachtungen

2.1 Haareis

Eine bis 2019 aktualisierte Literaturzusammenstellung über die Haareisbildung ist aus Fontana (2020) ersichtlich. Messungen ergaben, dass sich Haareis bei Normaldruck knapp unterhalb 0°C und kaum unter -3°C bildet (Wagner & Mätzler, 2009; Hofmann et al., 2015). Unter derartigen Bedingungen hat Eis eine hexagonale Kristallstruktur. Als Folge der unterschiedlichen Dichten von Eis und Wasser ist das sichtbare Eisvolumen ca. 9% grösser als das zu seiner Herstellung benötigte Wasservolumen. Das anisotrope Längenwachstum der Fasern ist eine Folge des Eiswachstums aus Poren des Substrats. In der Literatur variieren die Angaben über die Durchmesser der Eishaare von 10–100µm (Wagner & Mätzler, 2009) bzw. 20µm (Hofmann et al., 2015). Dabei ist der angegebene Durchmesser von 100µm für ein Einzelhaar unrealistisch gross.

Durch mikroskopische Untersuchungen stellte Ch. Mätzler fest, dass die einzelnen Haare eine glatte Oberfläche haben und transparent wie Glas erscheinen. Das weisse Aussehen von Haareis entsteht nicht wie bei Milchquarz durch Streuung an mikroskopisch kleinen Gas- und Mutterlaugeneinschlüssen, sondern durch Mehrfachstreuung des Lichts an den einzelnen Eishaaren oder in Bändern an den einzelnen Fasern, wenn sie in grosser Zahl und vielschichtig vorkommen. Da Licht von Eis praktisch nicht absorbiert wird, wird die Mehrfachstreuung begünstigt.

Eishaare entstehen nicht aus Wasserdampf oder Tröpfchen der Atmosphäre, wie etwa Reif oder Raureif. Sie wachsen aus feuchten, toten Ästen und Stämmen verschiedener Laubholzarten, die vom winteraktiven Pilz *Exidiopsis effusa* (Bref. ex Sacc.) A. Moeller besiedelt sind (Hofmann et al., 2015). Eine wesentliche Rolle spielen die im Holzkörper verlaufenden Holzstrahlen, deren Zellen ein radiales Transport- und Speichersystem im Holz bilden. Die Hyphen des Cellulose und Lignin abbauenden Pilzes wachsen im Haareisholz u. a. entlang der Holzstrahlen, so dass diese wahrscheinlich wasserdurchlässiger werden und auch als Kapillaren funktionieren.

An der Oberfläche eines rindenfreien Buchenholzastes (Durchmesser 1,5cm) sind die Mündungen der Holzstrahlen als ca. 0,3mm breite, dunkle Längsrillen sichtbar (Abbildung 1). Ihr gegenseitiger Abstand beträgt ca. 1,5mm. Haareiskristalle wachsen senkrecht zu diesen Längsrillen d. h. in den Verlängerungen der radial im Ast verlaufenden Holzstrahlen. Haareis wächst gelegentlich auch aus den längsverlaufenden Holzgefässen

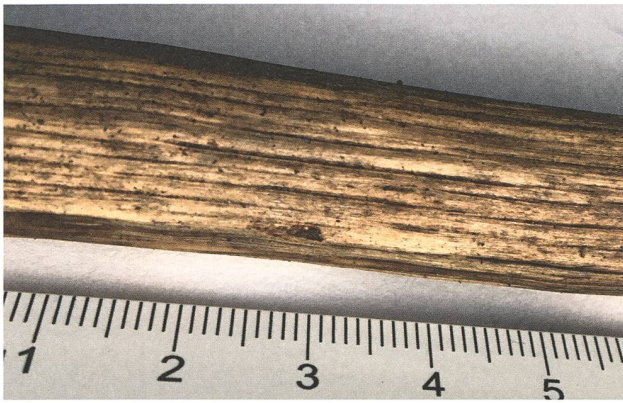


Abbildung 1: Rindenfreier Buchenast (*Fagus sylvatica*) mit den in Längsrillen angeordneten Mündungen der senkrecht zu ihnen verlaufenden radialen Holzstrahlen. Aus ihnen sind die in Abbildung 2 gezeigten Haareiskristalle gewachsen. Bild: P. Fontana



Abbildung 2: Feine über Nacht aus den Holzstrahlen (Abbildung 1) gewachsene, bis 4 cm lange Haareiskristalle (Bildbreite: ca. 15 cm). Bild: P. Fontana

an Bruch- oder Schnittstellen von Ästen und Stämmen. Es wurde auch an nur 3 mm dicken Ästen gefunden. Abbildung 2 zeigt 4 cm lange Haareiskristalle, die in einer einzigen Nacht aus den Längsrillen (Abbildung 1) gewachsen sind. Durch einen zwei Tage zuvor auftretenden Regen (ca. 5 mm) waren das Holz und die um den Ast liegenden Blätter feucht. Die feinen, gleich orientierten Eishaare sind in diesem ca. 15 cm breiten Bereich alle ungefähr gleich lang. Dies bedeutet, dass die Haareiskristalle gleichzeitig zu wachsen begannen und ihre Wachstumsgeschwindigkeit konstant blieb oder sich mindestens immer gleichzeitig änderte (gleiche Abkühlgeschwindigkeit, gleiche Unterkühlung des Wassers, gleicher Wassernachschub, gleiche Porengrösse).

Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass die parallel wachsenden Haareiskristalle nicht miteinander verwachsen sind. Nur ihre Spitzen sind vielfach mit benachbarten Haareiskristallen verknüpft. Dadurch verhalten sich die Eishaare bündelweise gleich. Ein Zeitraffervideo (Albisser, siehe Literaturverzeichnis) zeigt, dass sich



Abbildung 3: Gut sichtbar sind die miteinander verwachsenen Haareisspitzen und die getrennt gewachsenen Eishaare. Bild: P. Fontana

das Haareis entlang der Längsrillen verbreitet. Möglicherweise entsteht darin zuerst ein hauchdünner Eisfilm, der sich in den Längsrillen ausbreitet. Die Eisschicht wirkt beim Erreichen einer Holzstrahlmündung als Impfkristall und löst das Haareiswachstum aus. Auf diese Weise werden die benachbarten Mündungen der Holzstrahlen miteinander verbunden und der Eis-Segregationsprozess (Ozawa & Kinoshita, 1989) beginnt. Die Segregation ist ein komplexer Prozess, der auf den unterschiedlichen Kräften an Grenzflächen zwischen Porenwand, Luft, Eis und Wasser beruht. Aus energetischen Gründen meidet das entstehende Eis den direkten Kontakt mit der Porenwand durch Bildung eines Wasserfilms. Neu entstehendes Eis wird deshalb weggeschoben. Dadurch wachsen die Eishaare nach aussen solange unterkühltes Wasser nachfliessen kann. Die Saugkraft ist umso stärker, je grösser der Wärmefluss ist, d. h. je kälter die Umgebung ist bzw. je schneller das Eishaar wächst. Die Verbindung der Haareisspitzen ist besonders ausgeprägt, wenn das Holz vor dem Gefrieren sehr feucht ist.



Abbildung 4 : «Gescheiteltes» bis 4 cm langes Haareis mit abgehobener Rinde. Bild: P. Fontana



Abbildung 5: Schmelzwasser von Haareis von zwei verschiedenen Fundstellen. Bild: P. Fontana

Die feinen Eisfäden sintern nicht zusammen (Hofmann et al., 2015), obwohl dadurch die hohe Oberflächenenergie (grosses Längen-/Durchmesser-Verhältnis) gesenkt würde.

Das durch Segregation verursachte Wachstum von Eiskristallen wurde auch auf Mikroporenfiltern (sehr kleine Porendurchmesser: 0,015–0,2µm) untersucht (Ozawa & Kinosita, 1989). Durch den Segregationsprozess wurde unterkühltes Wasser an die Porenoberfläche des Filters gesaugt, gefror und lagerte sich dabei an die Basis des wachsenden Eiskristalls an. Der Kristallisationsprozess wurde jeweils durch einen Eisimpfkristall ausgelöst.

Bei der Kristallisation von Wasser wird die Gefrierwärme (–6,0 kJ/mol) frei. Durch Temperaturmessungen konnte daher das Einsetzen und der Verlauf des Haareiswachstums ermittelt werden (Hofmann et al., 2015). Die Kristalle wachsen mit zunehmender Unterkühlung des angesaugten Porenwassers schneller (Ozawa & Kinosita, 1989). Die Wachstumsgeschwindigkeiten betragen durchschnittlich 6mm/h (Mühl-eisen & Lämmle, 1975). Bei zu tiefen Temperaturen gefriert das Wasser bereits im Holz, wodurch das Wachsen von Haareis beendet wird.

Bei nicht ganz am Boden aufliegenden Ästen wachsen die zum Boden hin orientierten Haareiskristalle meist lockerer. Auch bei ihnen sind die Haareisspitzen verknüpft.

Vielfach wird «gescheiteltes» Haareis gefunden (Abbildung 4). Diese Art wird nicht nur bei liegenden, sondern auch bei stehenden Ästen gefunden. Die Krümmung der Eishaare wurde auf den seitlichen Geschwindigkeitsgradienten beim Wachsen von Haareis zurückgeführt (Hofmann et al., 2015, s. auch Haareisvideo von Albisser, siehe Literaturverzeichnis).

Obwohl die Haareiskristalle weiss aussehen, ist ihr Schmelzwasser oft leicht trübe und gelbbraun gefärbt, d. h. das Eis enthält Verunreinigungen (Abbildung 5).

Dies wurde bereits 1918 festgestellt (Wegener, 1918). Die Farbe wird von den enthaltenen Lignin- und Tanninfragmenten hervorgerufen, die chemisch nachgewiesen wurden (Hofmann et al., 2015), während mikroskopische Untersuchungen von G. Preuss zeigten, dass keine Pilzhyphen oder -sporen enthalten sind. Die chemische Zusammensetzung wird zurzeit weiter untersucht. Durch Abtöten des Pilzes in kochendem Wasser konnte das erneute Wachstum der Haareiskristalle gestoppt werden (Wagner & Mätzler, 2009). Interessanterweise zeigen die neuesten Untersuchungen (Preuss, 2020), dass anschliessendes Hinzufügen von Haareisschmelzwasser das Wachsen von Haareis reaktiviert! Wird das Schmelzwasser jedoch vorgängig auch erhitzt, bleibt seine Wirkung aus. Es wird vermutet, dass eine durch den Pilz produzierte, nicht hitzebeständige Substanz verantwortlich ist, die als Rekrystallisationsinhibitor wirkt. Es könnte sich um ein zum Selbstschutz produziertes Anti-Frost-Protein (AFP) handeln, wie es für verschiedene kälteadaptierte Organismen – u. a. auch



Abbildung 6: Der schwach rosagefärbte Fruchtkörper von *Exidiopsis effusa* breitete sich direkt auf dem Buchenholz aus (Astdurchmesser ca. 2 cm). Bild: P. Fontana

winteraktive Pilze – bekannt ist (Rahman, 2009). Diese Moleküle lagern sich aufgrund ihrer Raumstruktur derart an der Oberfläche von Eiskeimen im Zellinneren an, dass jene nicht weiter wachsen können. Sie wirken bereits in nanomolaren Konzentrationen (Griffith et al., 2004). Wenn *Exidiopsis effusa* eine derartige Substanz zum Selbstschutz produziert und ausscheidet, kann das die Entstehung der einzelnen d.h. nicht zusammengewachsenen Haareiskristalle erklären. Ein Nutzen der Haareisbildung für *Exidiopsis effusa* besteht darin, dass noch vorhandene Borke vom Holz abgesprengt wird und so Platz für den Fruchtkörper entsteht.

Der Pilzkörper von *Exidiopsis effusa* (deutsch: rosa getönte Wachskruste) kann durch Überwachsen der Längsrillen das Wachsen von Haareis verhindern, indem er das Austreten von Wasser blockiert (Abbildung 6).

Das Haareis haftet nicht am Buchenholz, es fällt teilweise schon beim Bewegen der Äste ab. An den Unterseiten der entfernten Haareisbüschel werden dann die einzelnen voneinander getrennten Haaransätze sichtbar.

Isoliert gewachsene Eisfasern entstehen einerseits als Folge der Anwesenheit des Pilzes und andererseits im Substrat auch durch zu grosse Abstände zwischen den Poren. Einzelfasern sind ein Sonderfall des nachfolgend beschriebenen linear angeordneten Bandedeises, das aus zusammengewachsenen Fasern oder als Extrudat auftritt.

2.2 Bandedeis

2.2.1 Bandedeis aus Pflanzenstängeln

Eine andere Ausbildungsform von Eis ist das weisse Bandedeis, das aus Pflanzenstängeln wächst. Auch hier gelangt unterkühltes Porenwasser an die Oberfläche und gefriert. Eine Liste von 40 mehrjährigen krautigen Pflanzen, bei welchen Bandedeis an ihren Stängeln beobachtet wurde, ist aus Carter (2019a) ersichtlich. «Ihnen gemeinsam ist, dass sie nicht verholzen und dass ihre Sprossachsen, also die gemeinhin als Stiel oder Stängel bezeichneten Organe zwischen Wurzeln und Blättern, am Ende der Vegetationsperiode absterben» (Carter, 2014). Weiter müssen die Pflanzen genügend porös und die radialen Markstrahlen genügend gross ausgebildet sein (Harms, 2010).

Am 9. Februar 2020 fand P. Fontana Bandedeis in Solothurn. (Zur Beseitigung des im Englischen vorhandenen Begriffswirrwars schlug Harms (2010) vor, Bandedeis als *Crystallofolia* = Eisblatt zu bezeichnen).

Es wuchs aus einem frei stehenden Stängel einer im Herbst auf eine Höhe von ca. 30mm zurückgeschnittenen mehrjährigen Bodendeckerpflanze (Chinesischer Bleiwurz, *Ceratostigma plumbaginoides*). Die mikroskopische Ansicht des Stängelquerschnitts einer im Frühling frisch gewachsenen Pflanze zeigt den Stängelaufbau mit den in Bildung begriffenen radial verlaufenden Markstrahlen (Abbildung 7).

Abbildung 8 zeigt die längsgestreiften Eisbänder desselben 1 mm dicken Stängels aus verschiedenen Richtungen. Sie erreichen einen Umkreis von 1–1,5cm. Deutlich sind ein dünner, sich ablösender, nach unten hängender Epidermis- und Cortexteil und einzelne aufgerissene, kleinere Epidermisteile sichtbar. Am oberen Stängelteil zeigt sich die freigelegte gelbliche Xylemoberfläche. Es ist kein wie vielfach bei bandedeisbildenden krautigen Pflanzen beobachteter durchgehender Längsriss im Stängel erkennbar. Bei den faserigen Eisbändern sind auch transparentere Randpartien sichtbar. Am Stängel ist deutlich Reif er-

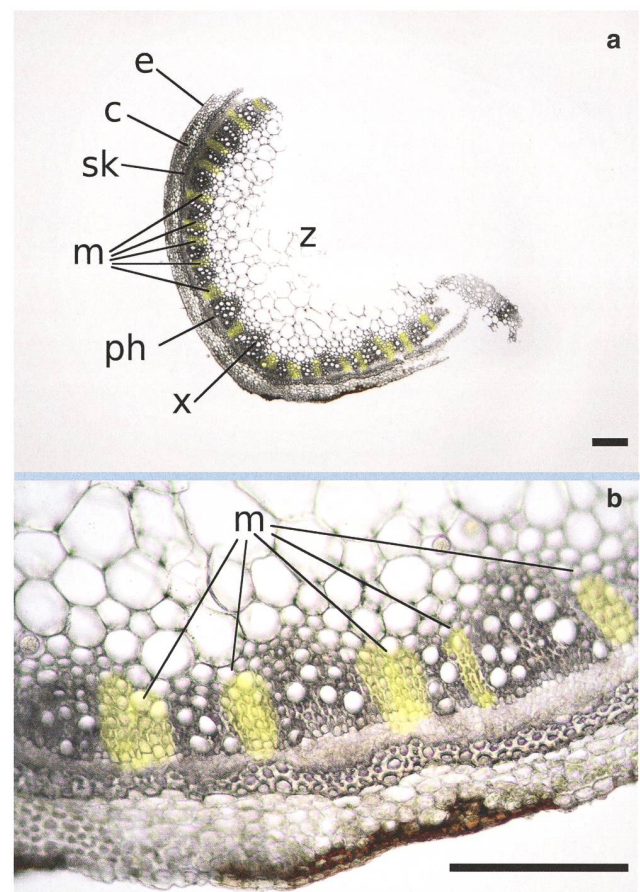


Abbildung 7: Mikroskopische Querschnitte (Übersicht und Detailansicht) eines Stängels des Chinesischen Bleiwurzes (*Ceratostigma plumbaginoides*) von 2 mm Durchmesser, Massstab: 100 µm. , e = Epidermis, c = Cortex, sk = Sklerenchym, ph = Phloem, x = Xylem, m = Markstrahl (nachträglich gelb eingefärbt), z = Zentralmark. Mikroschnitte: G. Preuss



Abbildung 8: Über Nacht aus einem abgeschnittenen, 1 mm dicken Stängel von Chinesischem Bleiwurz (*Ceratostigma plumbagoides*) gewachsenes Bandeis (Ansicht aus drei verschiedenen Richtungen). Bild: P. Fontana

kennbar, der nach Carter (persönliche Mitteilung) als Keim für das Kristallwachstum wirkt.

Die in Abbildung 8 gezeigten, komplex geformten Eiskristalle bestehen einerseits aus ca. 20 mm langen, 2,5 mm breiten und ca. 0,035 mm dicken Eisbändern. Sie wuchsen senkrecht zur Oberfläche aus Längsrissen des epidermisfreien, gelben Stängels. Es gibt keine geradlinigen Bänder analog zu Haareis wie in Abbildung 2. Sie sind teilweise in der Längsachse verdreht und unregelmässig gewellt. Das sind Zeichen für variierende Wachstumsbedingungen wie z.B. unregelmässiger Nachschub von unterkühltem Wasser (ev. hervorgerufen durch wechselnde Druckverhältnisse bei unregelmässigen Abkühlgeschwindigkeiten) oder auftretenden Spannungen. Andererseits

wuchsen etwas tiefer am Stängel wild gekrauste, ca. 1 mm breite Eisbänder (Abbildung 8b). Diese könnten folgendermassen entstanden sein: Ein plötzlicher Druckanstieg hat kleinere zusätzliche Epidermistteile aufgerissen (am Stängel sichtbar) und so öffnete sich quasi ein «Überdruckventil». Das unterkühlte Wasser wurde mit grösserer Geschwindigkeit als im oberen Stängelteil ausgespresst und gefror. Dies könnte durch das plötzliche Gefrieren des Stängels beim Erreichen der am Morgen gemessenen Lufttemperatur von -6°C erfolgt sein.

Im Gegensatz zu Haareis handelt es sich hier um kompakte Eisbänder. Die parallelen Streifen lassen vermuten, dass das Eis aus radial verlaufenden Markstrahlen wächst (Harms, 2010; Carter, 2014) und die Eisfäden zusammenwuchsen.

Basierend auf dem grob gemessenen Stängeldurchmesser von 1 mm hat die einzelne Faser einen Durchmesser von ca. $40\mu\text{m}$ (Abbildung 9). Sie liegt damit auch in der Grössenordnung eines einzelnen Haars von Haareis. Drei zusammengewachsene Fasern (analog zu Abbildung 18) sind sichtbar. Sie sind wie die von Ch. Mätzler beobachteten Eishaare nahezu transparent und haben eine glatte Oberfläche. Im grossen mit Reif überzogenen Band ist diese Faser-einheit deutlich erkennbar.

Die in der Literatur gezeigten wunderschönen Eisblüten (Carter, 2014; Carter, 2013) entstanden aus grösseren Pflanzen mit dickeren Stängeln. Die Eisbänder sind breiter, aber winden sich auch um ihre Stängel. Die Forscher sind sich nicht einig, ob das im Stängel und der Wurzel vorhandene Wasser allein genügt, um die voluminösen Eisbänder zu bilden oder ob dazu zusätzlich noch Wasser aus dem Boden benötigt wird.

G. Wagner beobachtete im Dezember 2008 im botanischen Garten in Bern das Resultat eines weniger turbulenten Eiswachstums, das zur fast durchsichtigen, schleierähnlichen Bandeisbildung am Stängel



Abbildung 9: Am reifbedeckten, 1 mm dicken Stängel ist links eine einzelne und darunter ein Dreierbündel transparenter Fasern erkennbar. Bild: P. Fontana



Abbildung 10: Hauchdünnes, schleierähnliches, ca. 1,5cm langes Bandeis, das aus dem Stängel der Gamander-Art *Teucrium arduini* wuchs. Bild: G. Wagner

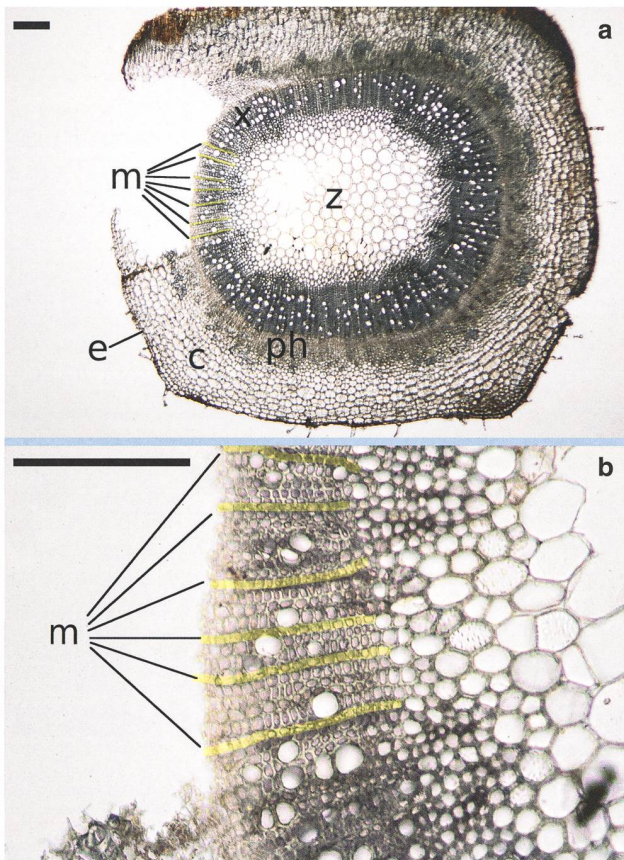


Abbildung 11: Mikroskopische Querschnitte (Übersicht und Detailansicht der Gamander-Art *Teucrium arduini*) mit Stängeldurchmesser 2,8 mm, Massstab: 200 µm (jeweils oben links), e = Epidermis, c = Cortex, ph = Phloem, x = Xylem, m = Markstrahl (einige nachträglich gelb eingefärbt), z = Zentralmark. Mikroschnitte: G. Preuss

der Gamander-Art *Teucrium arduini* führte (Abbildung 10). Der Stängeldurchmesser betrug ca. 5 mm und die Bandeislänge 1,5 cm. Im Vergleich zu Chinesischem Bleiwurz ist die Stängelquerschnittsfläche 25x grösser. Dies ermöglicht stabilere Wachstumsbedingungen für Bandeis als in einem nur 1 mm dicken Stängel. Die mikroskopische Untersuchung zeigt, wie ein Stängel dieser Pflanze aufgebaut ist (Abbildung 11). Die Breite der Markstrahlen beträgt bei *Teucrium* etwa 6–9 µm und bei *Ceratostigma* ca. 25–70 µm. Allerdings bestehen die Markstrahlen bei *Ceratostigma* aus 4–6 Zellreihen, deren einzelne Breite jeweils auch nur 6–8 µm beträgt. Auch die Abstände der Strahlen (-bündel) sind unterschiedlich: 15–30 µm bei *Teucrium* und 40–120 µm bei *Ceratostigma*. Die Frage, ob die Breite (eine oder mehrere Zellreihen) jedes Markstrahles für die Ausbildung der feinen Schleier bei *Teucrium* eine Rolle spielt oder der Durchmesser der einzelnen Zellen, müsste durch weitere Beobachtungen geklärt werden.

Ein weiterer Unterschied zu Haareis besteht darin, dass das Schmelzwasser des Bandeises analog zu Abbildung 5 farblos und klar ist! J. Carter fand bei seinen zahlreichen Beobachtungen von Bandeisbildungen keinen Grund zur Annahme, dass dabei Pilze involviert sind (Carter, persönliche Mitteilung). G. Preuss mikroskopierte Bandeis-produzierende Distelstängel und fand dabei auch keinerlei Hinweise auf Pilzbefall. Es muss sich bei der Bandeisbildung um einen rein physikalischen Prozess handeln (Carter, 2014).

2.2.2 Bandeis aus Stahlröhren

J. Carter gelang es, Bandeis künstlich herzustellen (Carter, 2009). Er verwendete z. B. ein mit Schlitz versehenes, zu 1/10 mit Wasser gefülltes Stahlrohr (Durchmesser 1,27 cm, Länge: 90 cm). In der Nacht gefror dieses vollständig. Nun füllte er das restliche Rohrvolumen mit gekühltem Wasser und verschloss das Rohr. In der nächsten Nacht gefror das Wasser im senkrecht stehenden Rohr und presste das am oberen Röhrende schwimmende Eis durch den Schlitz. Dadurch entstand ein längsgestreiftes, zum Teil spiralförmiges Eisband.

2.2.3 Bandeis aus Schlackebrocken

G. Preuss fand natürliche, bandförmig ausgebildete Eislocken, die sich aus sehr porösen, etwa faustgrossen Schlackebrocken (nach einer zweiten Nacht in Folge bei Temperaturen unter -5°C) gebildet hat-



Abbildung 12: Lockenartige Eisbänder, die aus zwei faustgrossen Schlackebrocken gepresst wurden (Bildbreite je ca. 4,5 cm). Bild: G. Preuss

ten (Abbildung 12). Die Schlackebrocken befanden sich an der Oberfläche einer wenige Wochen alten Aufschüttung im Bereich einer Quelle. Die für die Eisbildung geeigneten Poren sind ungleichmässig auf der Schlackenoberfläche verteilt. Sie befinden sich auf der Oberseite der Schlacke. Es ist denkbar, dass diese Formen analog zu J. Carter's Eisbändern durch Druck aus den Schlackeporen gepresst wurden. Die extrudierten Bänder haben eine faserige Struktur. Auch bei Steinsalz, das bei hohen Temperaturen durch Ritzen, Löcher und Poren in eine Basaltkluft gepresst wurde, konnten längsgestreifte, bandförmige «Halit Locken» gefunden werden (Dietrich et al., 2006). Sie erreichten Längen bis zu 55 cm (!) und Breiten bis zu 0,5 cm.

2.2.4 Kieselsteineis (Pebble Ice)

J. Carter fand, dass Bändeis auch aus porösem Substrat wie Ziegelsteinen, Tonsteinen und Kieselsteinen (4-63 mm) entstehen kann. Er fasste all diese Eisbildungen unter dem Begriff Pebble Ice (Kieselsteineis) zusammen. Die Voraussetzung dazu ist, dass das Substrat eine geeignete Textur und Porosität hat, um Wasser an die Oberfläche zu fördern. Das Wasser wird durch die Kapillarkraft in den Poren gehalten. Gefriert das Wasser an der Oberfläche, wird durch den Segregationsprozess weiteres für das Wachstum benötigtes Wasser nachgesaugt (Carter, 2019b). Möglicherweise ist das Bändeis auf den Schlackebrocken ebenfalls mit diesem Prozess zu erklären. Im

Allgemeinen sind diese Eisbänder jedoch wenig gekrümmt. Es können sich auch zylinderförmige Formen ausbilden (Ozawa & Kinoshita, 1989).

2.2.5 Kammeis

Eine weitere porenabhängige Kristallisationsform von Eis ist das vielfach vorkommende Kammeis (Nadeleis), das in feuchten, feinkörnigen, lockeren und vegetationsfreien Böden sowie in organischen Moorböden entsteht. Messungen an Bodenproben ergaben, dass im Substrat ein Mindestfeinkornanteil (Partikelgrösse < 62 µm) von 7–25 % für die Kammeisbildung notwendig ist. Dabei steigt der notwendige Feinkornanteil mit abnehmendem Wassergehalt (Meentemeyer & Zippin, 1981). Die Kammeisbildung ist ein Spezialfall, da die Eissegregation an Bodenporen unter der gefrorenen Erdoberfläche (Carter, 2019c) oder unter einer Mulchschicht (gefallene Blätter) stattfindet. Die Eiskristalle wachsen unter der Bodenoberfläche senkrecht zur Abkühlungsfläche, d. h. in Richtung des Wärmeflusses, und stehen daher senkrecht auf der Bodenoberfläche (Troll, 1944). Damit die Eiskristalle wachsen können, muss auch hier das flüssige Wasser durch Kapillarkräfte aus dem nicht gefrorenen Substrat nachgeliefert werden. Das wachsende Kammeis fördert durch den Kristallisationsdruck aufliegendes Bodenmaterial über die Erdoberfläche, wenn es nahe an der Erdoberfläche wächst oder hebt den ganzen Boden, z. B. 3–10 cm, an. Durch einen mehrfachen Zyklus mit Kammeisbildung und anschliessen-



Abbildung 13: a) Kammeis auf heterogenem Substrat gewachsen. Bild: A. Leuenberger | b) Mehr bandförmiges Kammeis, das vermutlich auf einem homogenen Substrat wuchs. Bild: A. Hasler

dem Schmelzen werden an Hanglagen Bodenpartikel hangabwärts verlagert, weil die senkrecht zur Oberfläche angehobenen Bodenpartikel beim Tauen durch die Erdanziehung lotrecht herunterfallen. Die geomorphologischen Veränderungen sind umso grösser, je steiler die Hanglagen sind und je häufiger der Zyklus Kammeisbildung-Schmelzen vorkommt (Furrer, 1955; Ellenberg, 1974).

A. Leuenberger fand am 10. Februar 2013 Kammeis am Hang oberhalb Locarno (Abbildung 13a). Es wuchs aus einem heterogen-körnigen Substrat. Die variierende Porengrösse führte zur Ausbildung von Einzelfasern und kleinen Eisbändern. Da die Poren statistisch verteilt sind und nicht in einer botanisch vorgegebenen Struktur vorliegen, sind die daraus wachsenden Eisformen auch ungeordnet.

A. Hasler beobachtete vielfach Kammeisbildungen. Abbildung 13b entstand am 4. Februar 2007 oberhalb Golzeren im Maderanertal (Kanton Uri) und zeigt Kammeis mit angehoben Bodenpartikeln. Es sind bündelweise auftretende Eisbänder, die geschätzt



Abbildung 14: Das aus dem Moor gewachsene Kammeis stösst die überlagernde Blatterschicht kalottenartig in die Höhe. Bild: Ch. Mätzler



Abbildung 15: a) In kleinen Bändern im Moor ausgebildetes Kammeis. Bild: Ch. Mätzler | b) Bis 10cm langes, faseriges Kammeisband, das im Moor unterhalb der Laubdecke senkrecht zur Oberfläche stehend gewachsen ist. Bild: Ch. Mätzler

0,2–0,5mm dick sind. Sie sind im Vergleich zu Abbildung 13a breiter und wuchsen vermutlich auf einem homogenen Substrat.

Ch. Mätzler fand Kammeis, das sich über mehrere Tage um den 24. Februar 2018 an zahlreichen Orten am Rand eines Hochmoors (Hurstmoos in Hin-

delbank) gebildet hatte. Das Knistern beim Spazieren auf dem laubbedeckten Boden machte auf das Phänomen aufmerksam. Hier gefror das Eis unter der mit Buchenlaub bedeckten Mooroberfläche und hob die überlagerte Laubschicht kalottenartig bis zu 10cm in die Höhe (Abbildung 14).

Nach Entfernung des Mulchs zeigte sich die Anordnung des Kammeises, das aus einzelnen schmalen Bändern bestand (Abbildung 15a). Diese faserigen Bänder wuchsen in einem homogenen, feinkörnigen organischen Substrat. Das Wachstum von Kammeis begann in der gleichen Moortiefe (in Abbildung 15b auf der linken Seite). Es wuchs im Moor senkrecht zur Oberfläche stehend, also wiederum in Richtung des Wärmeflusses. Das Bandeis erreichte bei einem Faserdurchmesser von ca. 0,2mm Längen von über 10cm.

2.2.6

Kammeis- und bandeisähnliche Formen auf Pilzen

Gelegentlich wurden kammeisähnliche Formen auf den Hüten von bereits verrottenden Pilzen gesehen



Abbildung 16: a) Kammeis auf Violettem Rötelritterling (*Lepista nuda*). Bild: G. Preuss | b) Bandeis am Stiel eines kleinen Helmlings (nicht näher bestimmt, ca. 5 cm hoch). Bild: G. Preuss

(Abbildung 16a). Auch an Stielen frischer Pilze konnten vereinzelt bandeisähnliche Strukturen (Abbildung 16b) beobachtet werden, die analog zum Bandeis an Pflanzenstängeln entstehen könnten, wenn auch die mikroskopische Struktur eines Pilzfruchtkörperstieles deutlich undifferenzierter ist als die eines Pflanzenstängels. Es fällt auf, dass auch hier die Bandeislänge mit zunehmender Höhe über Boden abnimmt (Carter, 2013). Beide Phänomene sind selten, weil zusätzlich zu den meteorologischen Bedingungen, die für ihre Entstehung erfüllt sein müssen, sich die entsprechenden Pilzfruchtkörper auch noch schnell zersetzen. Daher konnte ihr Auftreten noch nicht eingehend untersucht werden.

2.3

Vergleich von haarförmigem und bandförmigem Eis mit Steinsalzfasern

Faserbildung entsteht nicht nur beim Gefrieren von Wasser (Kristallisation aus der Schmelze), sondern auch bei der Kristallisation von Mineralien aus wässrigen Lösungen. So entstehen beispielsweise Steinsalzhaare in alten Grubenräumen durch Austritt von

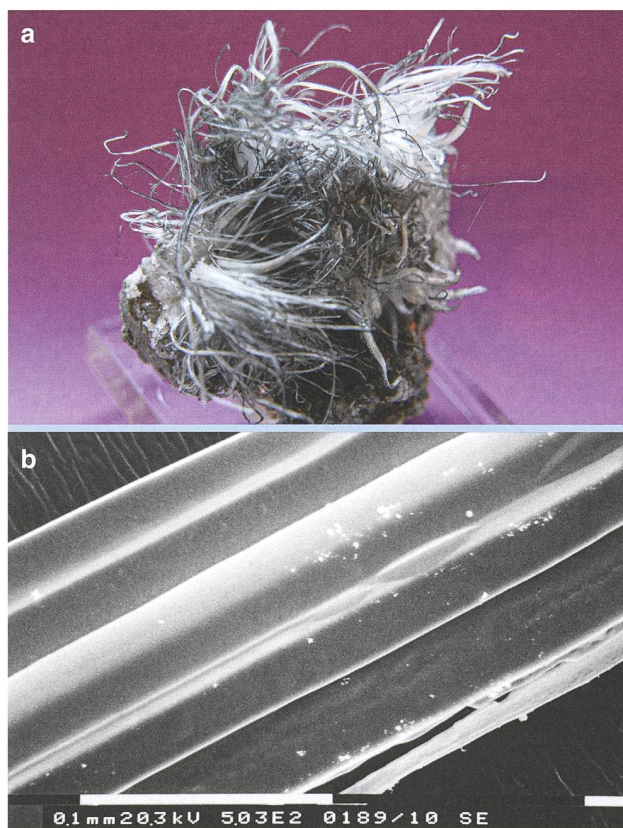


Abbildung 17: a) Steinsalzbüschel, die aus einer ungeordneten porösen Gesteinsschicht gewachsen sind (Mineralienstufenbreite ca. 5 cm) | b) REM-Bild eines einzelnen Haars. Bilder: Fontana (2013)

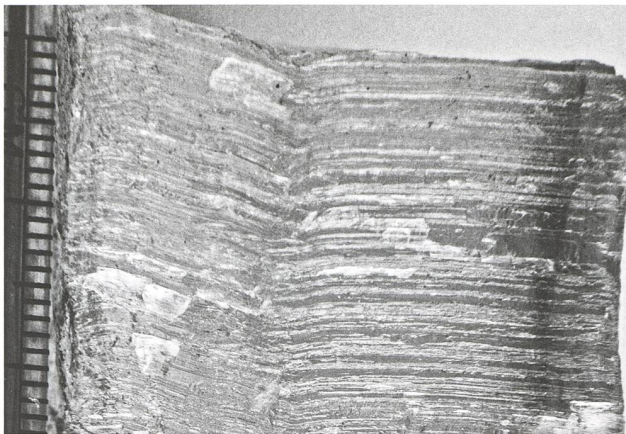


Abbildung 18: Kluftfüllung mit parallelfaserigem, verwachsenem Steinsalz (Naturhistorisches Museum Bern) Millimetermasstab. Bild: P. Fontana

Sickersole aus porösem Gestein. Das anisotrope Wachstum erfolgt durch Salzanlagerung an der Basis der aus den Poren wachsenden Kristalle (Görgey, 1912). Die Kristallisation von NaCl aus wässrigen Lösungen ist ein schwach exothermer Prozess (-4,87 kJ/mol). Steinsalz (Halit, NaCl) kristallisiert im kubischen Kristallsystem.

Abbildung 17a zeigt «wild» gewachsene Büschel von Steinsalzhaaren aus dem Bergbau Dürnberg, wie sie im Museum «Salzkammer» der Schweizer Salinen AG in Pratteln ausgestellt sind. Die Steinsalzhaare produzierenden Poren sind, wie im Falle der aus der Schlackenoberfläche bündelweise wachsenden Eiskristalle, unterschiedlich gross und unregelmässig auf der Gesteinsoberfläche verteilt. Die Steinsalzhaare sind wesentlich stabiler als Haareis und lassen sich daher auch im REM untersuchen (Abb. 17b)! Dabei zeigt sich, dass bereits ein einzelnes, 4 cm langes und 140 µm dickes Haar ein parallelfaseriges Bündel ist. Die einzelnen ca. 30 µm dicken Fasern sind lückenlos miteinander verwachsen. Sie haben eine glatte Oberfläche.

Im Gegensatz zu den Eishaaren, die botanisch bedingt aus rillenförmig angeordneten Poren entstehen, wachsen die Steinsalzfasern aus auf der ganzen Kluftoberfläche verteilten Gesteinsporen. Analog zum «zweidimensional» gewachsenen Bandeis können parallelfaserige, aber dreidimensional lückenlos verwachsene Steinsalzfasern gefunden werden (Abbildung 18). Derartige Steinsalzklüfte wurden erstmals von Mügge (1928) beschrieben. Durch Elektronenrückstreuung konnte festgestellt werden, dass die unterschiedlich dicken Fasern kristallographisch zufällig orientiert sind. Das ist nur möglich, wenn die Salzfasern in engem Kontakt mit den Kluftporen wachsen (Hilgers et al., 2006)!

3 Resultate

Bei meteorologisch geeigneten Bedingungen wachsen Eisfasern aus Poren. Dabei muss im Substrat ein durchgehendes, mit Wasser gefülltes Porensystem vorhanden sein, welches das Nachfliessen von Wasser aus einem Reservoir an die Basis der wachsenden Eiskristalle ermöglicht. Bei den wachsenden Eisformen können zwei Arten unterschieden werden: Einzelne Haare (Haareis) und miteinander verwachsene Fasern (Bandeis). Haareis und Bandeis bilden sich aus einer anisotropen Struktur des Substrats. So entsteht Haareis bei Buchenholz aus einer linearen Anordnung der Holzstrahlen und Bandeis bei krautigen Pflanzen aus einer linearen Anordnung der Markstrahlen.

Für die Bänderbildung ist das bei der Eis-Segregation beobachtete Seitwärtswachstum (Ozawa & Kinoshita, 1989) verantwortlich. Wird dieses durch zu grosse Abstände zwischen den wachstumsaktiven Poren verhindert, ist die Bänderbildung unterbrochen. Dadurch kann das bündelweise auftretende Faserwachstum erklärt werden. Das ist besonders deutlich in Abbildung 13a zu sehen. Im Falle von Haareis wird das Seitenwachstum verhindert. Dadurch bleiben die getrennt aus den Poren wachsenden einzelnen Fasern auch weiter getrennt.

Die Bandeisbildungen in einem Bodensubstrat oder Schlacke beruhen auf einer zufälligen, lokal vorhandenen linearen Anordnung der Poren. Daher können im Vergleich zu einem geordnet aufgebauten pflanzlichen Substrat nur kleinere, bündelweise auftretende Bandeisbildungen gefunden werden. Je heterogener das Substrat aufgebaut ist, umso chaotischer sind die Arten und Anordnungen der Eisformen (Abbildung 13a). Dies gilt auch für die aus Gesteinsporen wachsenden Steinsalzkristalle (Abbildung 17a). Die Faserlängen werden bei genügendem Wassernachschub durch die Wachstumsbedingungen (Wachstumsgeschwindigkeit und Wachstumszeit) bestimmt. Die weisse Farbe der Eiskristalle entsteht nicht durch Luft- und Wassereinschlüsse, sondern durch Mehrfachstreuung des Lichtes an den Kristallfasern.

4 Diskussion

Sowohl bei Eis wie auch bei Steinsalzkristallen entstehen bevorzugt Faserbänder oder dreidimensional verwachsene Strukturen wie z. B. Kluffüllungen mit Steinsalzfasern (Abbildung 18). Im Falle von Haareis wird das die Fasern verbindende seitliche Kristallwachstum am Porenmund verhindert. Mikroskopische Untersuchungen zeigen, dass die Zellgrößen und Wanddicken in den Markstrahlen der untersuchten Bandeis tragenden krautigen Pflanzen sich nicht wesentlich von denen, die man im Holz der Haareis-bildenden Baumarten findet, unterscheiden. Während in haareisproduzierendem Totholz mikroskopisch immer Pilzhyphen nachweisbar waren, gab es bei bandeisproduzierenden Pflanzen bislang nie einen Hinweis auf Pilzbefall. Preuss (2020) zeigte, dass das durch Erhitzen blockierte erneute Wachsen von Haareis auf Buchenholz durch erneutes Zufügen von Schmelzwasser reaktiviert werden kann. Da das Schmelzwasser hyphenfrei ist, können nur in ihm vorhandene Stoffe für das erneute Wachsen von einzelnen Eishaaren verantwortlich sein.

Die gemessene Eiskeimbildung setzte jeweils gleichzeitig an verschiedenen Buchenästen bei ca. $-2,5^{\circ}\text{C}$ ein und durch die freiwerdende Kristallisationswärme erfolgte das anschliessende Eiswachstum trotz weiterer Abkühlung in der Nacht jeweils nur ganz knapp unter 0°C (Hofmann et al, 2015). Wir schliessen beim Wachstum den Einfluss von bei tieferen Temperaturen wirksamen INAs (Eisnukleierungsmittel) aus. Wir vermuten, dass ein vom Pilz produziertes AFP (Antifrostprotein) als Rekristallisationsinhibitor wirkt und so das Seitwärtswachsen der Eishaare blockiert.

Auch im Bodensubstrat entstehen einzelne Eisfasern oder Eisnadeln (Needle Ice), wenn die wachstumsaktiven Poren zu weit voneinander entfernt sind.

5 Dank

Wir danken Prof. James R. Carter für den regen Informationsaustausch, Andreas Hasler für Abbildung 13b, Andreas Leuenberger für Abbildung 13a und Gerhart Wagner für Abbildung 10.

Weiter danken wir Katja Rembold vom Botanischen Garten Bern für das Bereitstellen der Pflanzenstängel für die Mikroschnitte.

Den Peer Reviewern danken wir für ihre nützlichen Anregungen und Ergänzungen und dem Redaktor für seine Unterstützung.

6 Literatur

- Albisser, E., <https://www.geo.de/natur/oekologie/819-rtkl-exidiopsis-effusa-naturschauspiel-so-entsteht-haariges-eis> (Zugriff: 22.5.2020).
- Carter, J., 2019a. <http://my.ilstu.edu/~jrcarter/ice/diurnal/stems/> (Zugriff: 22.5.2020).
- Carter, J., 2019b. Pebble Ice: <http://my.ilstu.edu/~jrcarter/ice/pebble/> (Zugriff: 22.5.2020).
- Carter, J., 2019c. Needle Ice: <http://my.ilstu.edu/~jrcarter/ice/needle/> (Zugriff: 22.5.2020).
- Carter, J., 2014. Blüten und Bänder aus Eis, *Spektrum der Wissenschaften* 36-45.
- Carter, J., 2013. Flowers and Ribbons of Ice, *American Scientist*, 101 360-369.
- Carter, J., 2009. Extruding Ice from Steel Fences and Pipes with Diurnal Freeze/Thaw: <http://my.ilstu.edu/~jrcarter/ice/diurnal/extrude/> (Zugriff: 22.5.2020)
- Dietrich, A., Behnke, G., Thönelt, T. 2006. Armdicke Salzlocken vom Basaltkontakt, *Lapis*, 31(9) 13-21
- Ellenberg, L., 1974. Shimobashira – Kammeis in Japan, *Geographica Helvetica* 1 <https://www.geogr-helv.net/29/1/1974/gh-29-1-1974.pdf> (Zugriff: 22.5.2020).
- Fontana, P., 2020. Haarförmiges Eis als Mineral – nicht ohne Pilze, *Lapis* 45(3) 5. <https://www.lapis.de/lapis-aktuell/270-haarfoermiges-eis-als-mineral-nicht-ohne-pilze> (Zugriff: 23.6.2020).
- Fontana, P., 2013. Die Vielfalt der Salzkristalle, ISBN 978-3-033-04031-1. Im Eigenverlag. Kann beim Autor bestellt werden: pietro.fontana@gawnet.ch.
- Furrer, G., 1955. Die Strukturformen der Alpen, *Geographica Helvetica*. 10, 193-213.
- Griffith, M., W.F. Yaish, M. W. F., 2004. Antifreeze proteins in overwintering plants: a tale of two activities, *Trends in Plant Science*, 9 (8), 400-405.
- Görgy, R., 1912. Zur Kenntnis der Kalilager von Wittelsheim im Ober-Elsass, *Mineralog. und petrogr. Mitt.* 31, 339–468. <https://doi.org/10.1007/BF02994163>.
- Harms, B., 2010. Crystallofolia in Central Texas, <http://w3.biosci.utexas.edu/prc/VEV13/crystallofolia.html> (Zugriff: 22.5.2020).
- Hilgers, Ch., Pennock G., Schléder Z., Burliga S, Urai J.L., 2006. Microstructures of fibrous halite veins, <https://core.ac.uk/reader/71919830> (Zugriff: 22.5.2020).
- Hofmann, D., Preuss, G., Mätzler, C., 2015. Evidence for biological shaping of hair ice, *Biogeosciences*, 12, 4261-4273.
- Meentermeyer, V., Zippin, J., 1981. Soil moisture and texture controls of selected parameters of needle ice growth, *Earth Surface Processes and Landforms*, 6 (2) 113-125.
- Mügge, O., 1928. Über die Entstehung faseriger Minerale und ihrer Aggregationsformen, *Neues Jahrb. Mineral. Geol. Abt. A* 58, 303.
- Mühleisen, R., Lämmle, A., 1975. Neue Untersuchungen zur Entstehung von Kammeis (Haareis), *Meteorol. Rundsch.*, 28, 55-60.
- Ozawa, H., Kinoshita S., 1989. Segregated ice growth on a microporous filter. *Journal of Colloid and Interface Science* 132, 113-124.
- Preuss, G., 2020. Haareis- Geheimnis eines unauffälligen Rindenpilzes, *Südwestdeutsche Pilzrundschau*, 56(1), 16-21.
- Rahman A.T, 2009. Analysis of Ice Recrystallization Inhibition. Activities among Different Antifreeze Proteins. Dissertation Hokkaido University (2019), doi: 10.5772/54992
- Troll, C., 1944. Strukturböden, Solifluktion und Frostklimat der Erde, *Geographische Rundschau*, 34, 545-694.
- Wagner, G., 2012. Haareis-Bandeis-Kammeis: Drei rätselhafte winterliche Naturerscheinungen, Jubiläumsband zum 225-jährigen Bestehen der naturforschenden Gesellschaft 2012 Neue Folge 69 214-218.
- Wagner, G., Mätzler, C., 2009. Ein seltenes biophysikalisches Phänomen im Winter, *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 62(3), 117-123.
- Wegener, A., 1918. Haareis auf morschem Holz. *Die Naturwissenschaften* 6 /1, 598–601.

