

frieren aneinander fest und bilden große Flocken, die zudem noch flüssige Wassermoleküle mit sich reißen. Das flüssige Wasser verklebt einzelne Kristalle zu bauschigen Flocken. Dieser Schnee eignet sich hervorragend für Schneeballschlachten und Schneemänner. Durch etwas Druck wird die Verzahnung noch erhöht.

### **Vom Pulverschnee zur Lawinengefahr**

Je kälter es wird, desto schneller gefriert das Wasser – die entstehenden Kristalle sind kleiner und schweben fein verteilt durch die Luft: Pulverschnee, dessen Eissterne zum Sinnbild für den Winter wurden. Neben zu wenig Schnee bereitet auch zu trockener Schnee den Menschen in den Bergen immer wieder Sorgen. Denn mit dem trockenen Schnee steigt die Lawinengefahr – so wie zum Beispiel im Februar 2014, als Lawinen Ortschaften in Tirol und Kärnten von der Außenwelt abschnitten. Die Lawinengefahr steigt vor allem, wenn verschiedene Schneelagen aufeinander geschichtet sind, die sich relativ leicht gegeneinander verschieben lassen. Was beim Gletscher ein langsames Fließen ist, wird bei Lawinen durch Auslöser wie eine punktuelle Belastung durch Skifahrer zum rasanten Abgang.

Lockerschneelawinen durch trockenen Schnee ereignen sich meist nur lokal. Von Schneebrettern ist die Rede, wenn an Hängen große zusammenhängende Schneetafeln ins Rutschen kommen. Besonders tückisch wird es, wenn auf Sonnenhängen die Schneedecke erweicht und nachts verharscht. Darauf fallender Neuschnee haftet schlecht. Wenn nun viel Schnee fällt und sich nicht mit der Schicht darunter verbindet, reißt die Schneeschicht, und ein Schneebrett rutscht den Hang hinab. Die Geschwindigkeit steigert sich zunehmend, wobei trockene Schneebrettlawinen etwa mit 50–100 km/h den Hang hinabrutschen. Wenn sich die Schicht durch die Zugspannungen und Erschütterungen in eine Staublawine auflöst, steigt die Geschwindigkeit auf 200–300 km/h.

Allerdings können solche Schichtungen auch zunächst unbemerkt bleiben. Dann reicht schon das Gewicht von Wintersportlern, um lokal für einen Abriss der aufliegenden Schneeschicht zu sorgen. Neben Indikatoren wie Hangneigung und Schneemenge werden Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung und Schneealter herangezogen, um die Lawinengefahr einschätzen zu können.

Reibung und Druck sind wichtige Parameter nicht nur für die Eisbildung, sondern auch für den Wintersport. Aus Schulbüchern gut bekannt ist das Prinzip des Schlittschuhlaufens: Die Kufen üben so viel Druck aus, dass die Moleküle der obersten Eisschicht aus dem Kristall gelöst werden – ein Flüssigkeitsfilm lässt die Kufen gleiten. Für diesen Schmelzvorgang löst

sich etwa ein Viertel der Wasserstoffbrücken. Bei den Temperaturen unterm Nullpunkt umgeben sich die Wassermoleküle dann sogar im Schnitt mit vier bis fünf anderen Molekülen, die Wasserstoffbrücken wechseln schnell zwischen den Partnern. Bei steigender Temperatur sind es nur noch drei oder weniger Moleküle. Hier bewegen sich die Atome innerhalb des Moleküls mehr, sodass eine hoch geordnete, nahe Verknüpfung zu kleinen Clustern nicht mehr möglich ist. Dieser Effekt verstärkt sich noch beim Übergang zum Gas: Einzelne Wassermoleküle verlassen dann den Molekülverbund des flüssigen Wassers.

Statt schmaler Kufen, die das gesamte Körpergewicht konzentrieren und so den Druck auf eine kleine Fläche bringen, werden beim Skilaufen vergleichsweise breite Bretter untergeschnallt. Wieviel Sachkunde das Wachsen selbiger erfordert, verdeutlichen Fernsehübertragungen von Skilanglaufrennen. Ganze Teams unterstützen die Sportlerinnen und Sportler: Physiotherapeuten kümmern sich um die Menschen, Techniker um das Gerät, und vor allem das richtige Wachs wird oft erwähnt.

Aus dem Jahr 1673 gibt es erste Aufzeichnungen darüber, wie die damaligen Skier aus Holz mit Gleitstoffen zu behandeln seien, darunter Fette und andere Stoffe, die wasserabweisend, also hydrophob, machen. Die Liste enthält Harz, Teer, Talk, Pech und Öle. Aber auch moderne Skier aus Verbundstoffen werden gewachst – mit Hartwachs und Klister für Anstiege beim Langlauf oder Wachse für besseres Gleiten auf der Grundlage von Hydrocarbon- oder Fluorcarbonwachsen. Mehr zu diesen Stoffen in Kap. 4 (April).

## Eis als Klimaarchiv

An den Polen liegen unter mehreren Metern Schnee nochmals Kilometer von Eis. In der kanadischen Arktis sind die Eisschichten in 25 m Tiefe etwa 42 Jahre alt. Verdichtet sich der Schnee im ewigen Eis oder auf hohen Bergen wie den Alpen, entstehen über lange Zeiträume daraus Gletscher. Die Vernetzung nimmt zu, und es bildet sich ein geordnetes Kristallgitter. Wenn durch den Klimawandel die Gletscher schmelzen, geben sie ihre Geheimnisse wieder preis.

Berühmt wurde die Mumie eines Mannes aus den Öztaler Alpen, für die sich der Name „Ötzi“ durchsetzte. In Bozen widmet sich eine Ausstellung der Erkundung der Lebensumstände dieses Mannes, der möglicherweise ein Bote war. Anhand seiner Kleidung, seines Jagdbogens und seiner Messer wird rekonstruiert, was sein Ziel in den schon zu seiner Zeit verschneiten

Bergen gewesen sein mag. Kräuter und Mineralien, die er bei sich trug, zeigen, wie kundig er auch in der Heilkunst war. Andere Gruppen jagten in den Bergen. Erst viel später kamen der Abbau von Gesteinen und Erzen sowie wiederum lange Zeit später der Aufenthalt zur Erholung dazu.

Wie die Gletscher der Alpen bergen auch die der Eismeere Einschlüsse von Fremdkörpern oder Luft. So werden in der Arktis mit Hohlbohrern lange Bohrkerne aus dem Eis gewonnen und gut gekühlt zu Forschungseinrichtungen wie dem Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven verschifft. Sie sind wie ein Klimaarchiv – Forscher analysieren die Reste von Gasen aus der Umgebungsluft, die seit Jahrhunderten eingeschlossen sind. Schwermetalle und Aschereste geben Auskunft über vergangene Klimaperioden und Ereignisse. So schleudern Vulkanausbrüche nicht nur viel Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) in die Atmosphäre, die Asche enthält auch alles, was an Elementen tief unter der Erdoberfläche vorhanden ist, darunter Schwermetalle wie Quecksilber. Junge Eisschichten enthalten alles, was der Schneefall aus der Luft mitnimmt: Pestizide, Stickoxide und durch menschlichen Einfluss in die Umwelt gelangte Schwermetalle – zusätzlich zu jenen aus natürlichen Quellen. Was in die Luft gerät, bleibt dort etwa ein bis zwei Wochen, bevor zumindest die schwereren Stoffe absinken. Winde sorgen für eine schnelle weltweite Verteilung.

Zur Analyse werden die Bohrkerne zunächst von außen abgeschabt, denn der Hohlbohrer kontaminiert die äußere Schicht, da durch den Abrieb Stoffe ins Eis gelangen. Bis hierher wird der Bohrkern mindestens auf  $-12\text{ °C}$  gekühlt. Wichtig sind diese Proben vor allem deshalb, weil sie nicht durch lokale Quellen beeinflusst werden – sie geben nur wieder, was sich zur Zeit ihrer Entstehung in der Luft befand.

Die letzte Kaltklimaphase hatte vor 12.500 Jahren ihren Höhepunkt. Das Wachstum von Pflanzen war gehemmt, und der Wind konnte die Böden leichter davontragen. Mehr Staub wurde transportiert und in den Schnee eingelagert. Dies zeigt sich zum Beispiel anhand des hohen Antimon-Gehalts dieser alten Eisschichten. Die Siedlungsgeschichte und der technische Fortschritt spiegeln sich im Vorkommen charakteristischer Stoffe wider. Beim Abbau und Verarbeiten von Bleierzen wurden große Mengen von Arsen, Bismut und Antimon frei. Ihr Gehalt stieg erstmals vor 3000 Jahren durch die Aktivität der Griechen und Phönizier an und dann abermals vor 2000 Jahren durch die Römer.

Die Industrialisierung setzte vor rund 170 Jahren ein. Damit einher ging die Eisen- und Kupferverhüttung, aber auch die Kokserzeugung. Entsprechend vielfältig ist das Spektrum der Schwermetalle, die von nun an in die Atmosphäre und damit ins Eis gelangten. Neben Einbrüchen durch

Wirtschaftskrisen ist dokumentiert, wann eine Reinigung der Abgase einsetzte – seit den 1960er-Jahren verminderten sich die Gehalte von eingetragenen Spurenelementen. Einschneidend war das Verbot von Bleisalzen im Benzin, das nun schon seit Jahrzehnten gilt. Gleichwohl gelangt weiterhin viel Blei in die Luft, da es noch Länder in Afrika und Asien gibt, die den Einsatz erlauben.

Interessant ist der Anstieg von Antimon (Sb), ein Element, das allgemein nicht so viel diskutiert wird. Es ist als Antimonoxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) in Flammenschutzmitteln enthalten, Katalysator für die Herstellung von Polymeren und somit Zeuge des Kunststoffzeitalters einerseits und der Müllverbrennung andererseits.

## Streusalz – Salzgewinnung und Einsatz auf Straßen

Gefrorenes Wasser bildet also die herrschenden Umweltbedingungen gut ab. Im Winter allerdings interessiert uns mehr, dass Schnee und Eis die Mobilität einschränken. Lange war es üblich, Asche oder feinen Sand auf die glatten Flächen zu streuen. Die feinen Körner setzen sich in Mulden und machen die Oberfläche stumpf. Zugleich wird weniger Licht reflektiert: Das absorbierte Licht wird in Wärme gewandelt und unterstützt so bei steigenden Temperaturen den Tauvorgang. Allerdings ergibt das Ganze einen ziemlichen Matsch, und bei Asche ist nie so ganz klar, was zuvor verbrannt worden ist. Als Abstumpfungsmittel verwenden wir daher nun neben dem Sand oft Splitt, also kleine Steine. Da jedoch die Steinchen auch mit Fahrradreifen und Schuhsohlen transportiert und die Gehwege mitunter erst spät nach der Schneeschmelze wieder gefegt werden, wandert der Splitt nicht nur in Busse und Bahnen, sondern auch in Geschäfte, Büros und Wohnungen. Trotz des eigentlich geringen Gewichts des Schnees ist Schneeschippen eher unbeliebt, denn es kostet Zeit und ist anstrengend.

Nicht nur auf den Gehwegen, auch auf den Straßen muss der Schnee weg, und immer wieder ist hier das Streuen von Salz (und die Frage, ob die Salzvorräte für den Winter ausreichen) Gesprächsthema. Dabei wird neben Salz auch eine Sole versprüht. Diese wässrige Salzlösung verteilt sich einerseits besser, andererseits fließt sie durch die Straßenneigung schneller ab.

Nun soll möglichst wenig Salz gestreut werden, da es mit dem Schmelzwasser in die Böden und Flüsse geschwemmt wird. Die wenigsten Pflanzen vertragen hohe Salzkonzentrationen. Zugleich reagiert Beton mit Salzwasser,

was zu Schädigungen der inneren Struktur des Baustoffs führen kann. Ein Dilemma: Einerseits sind Betonplatten bei Autobahnen ein viel verwendeter Baustoff, andererseits müssen gerade die großen Straßen frei von Schnee und Eis gehalten werden, damit der Verkehr rollt.

Salz wirkt physikalisch-chemisch. Das Salz löst sich im Regen, der auf den kalten Straßenbelag fällt. Der Effekt besteht darin, dass das Salz die Schmelztemperatur des Wassers senkt; es stört die Ausbildung von Kristallen, und das Wasser ist länger flüssig. Eine Studie aus dem Jahr 2016 stellte fest, dass eine Konzentration von 2 g Salz pro Quadratmeter ausreicht, um die Eisbildung bei 0 °C zu vermeiden.

Übrigens gefriert Salzwasser nicht zu „Salzeis“ – beim Erstarren verdrängen Wassermoleküle die Salze weitestgehend. Daher ist das Wasser der Meere salzig und nicht trinkbar, Meereis jedoch kann geschmolzen und dann als Wasser getrunken werden.

Wer dem Tipp folgen will, Schnee mit heißem Wasser abzuschmelzen, der ahnt, wie viel Energie nötig ist. Mit 1 l Wasser, das auf 80 °C erwärmt wurde, kann bei Standardbedingungen gerade einmal 1 kg Schnee geschmolzen werden – was dann bei 0 °C entsprechend 2 l Wasser ergibt. Daher ist Salz immer noch das Mittel der Wahl, um Straßen zu enteisen.

Da die Autoreifen einen Teil des Salzes mitnehmen, sinkt die Konzentrationen auf viel befahrenen Straßen. Daher wird zunächst in höherer Konzentration abgestreut, abhängig davon, ob die Straßen nass oder trocken sind. Auf trockenen Straßen bleibt die Konzentration länger erhalten. Allerdings haftet trockenes Salz nicht gut auf der Fahrbahn. Präventiv wird mitunter mit feuchtem Salz gestreut oder mit einer Lösung von Calciumchlorid. Letzteres zieht Wasser stärker an als das günstigere Natriumchlorid. Die Fahrbahn ist zwar feucht, gefriert jedoch nicht. Allerdings reagiert Calciumchlorid auch stärker mit dem häufig verwendeten Beton.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass „Salze“ Verbindungen aus Kationen mit Anionen sind. Kationen sind die positiv geladenen Atome etwa von Metallen oder anorganischen Resten wie Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), die negativ geladenen Salzanionen können sich von Elementen wie Chlor ( $\text{Cl}^-$ ) oder Sauerstoff ( $\text{O}^{2-}$ ) ableiten oder ebenfalls aus mehreren Atomen zusammengesetzt sein, wie etwa beim Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Die Ionen ziehen sich aufgrund der entgegengesetzten elektrischen Ladung an und bilden ionische Bindungen aus. Als Feststoff ordnen sie sich in charakteristische Kristalle. Säuren (Glossar) wie Salzsäure ( $\text{HCl}$ ) oder Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) geben leicht Protonen ( $\text{H}^+$ ) ab, und die entstehenden Säurereste, etwa Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bilden dann mit den Metallkationen Salze.