

Die Eiszeit... aglagla

21. Jan. – 21. Okt. 2007

Übersicht über die Ausstellung

Die verschiedenen Säle in der logischen Abfolge des Besuchs

1. Zeitgeist

Vorne heiss, hinten kalt

2. Louis Agassiz, Zoologe, Paläontologe, Glaziologe : einer der grössten Gelehrten des 19. Jahrhunderts

Louis-Jean-Rodolphe Agassiz wurde 1807 in Môtier (Freiburg) geboren und starb 1873 in Cambridge (Massachusetts, USA).

Er begeistert sich schon sehr früh für Naturwissenschaften und studiert Fische, erst in Deutschland, dann in Paris. 1832 wird er in Neuenburg zum Professor ernannt und gründet, zusammen mit Louis Coulon, das Naturhistorische Museum. Sein aussergewöhnlicher Tatendrang bleibt der Wissenschaft nicht lange verborgen. In 14 Jahren veröffentlicht er mehr als 20 grundlegende, mit 2'000 Bildtafeln grossartig illustrierte Werke über lebende und fossile Fische, Seeigel, Mollusken und Gletscher und macht so Neuenburg zu einem wissenschaftlichen Zentrum Europas.

Sein Name ist verbunden mit der Erforschung des Unteraargletschers in den 1840er Jahren und dem Begriff der „Eiszeit“. Seine Stellungnahme für die Eiszeittheorie beeinflusst in entscheidender Weise eine Kontroverse, die zu seiner Zeit die Wissenschaftler entzweit.

1846 zieht er von Europa in die Vereinigten Staaten, wo er ausserordentlich populär wird. Er wird Professor in Harvard und gründet das Museum of Comparative Zoology von Cambridge, eines der grössten naturhistorischen Museen. Als Verfechter der Theorie sukzessiver Schöpfungen wird er zum Hauptgegner von Darwin und verliert gegen Ende seines Lebens an Einfluss. Er bleibt jedoch einer der grössten Gelehrten des 19. Jahrhunderts. Heute ist Agassiz vor allem bekannt für die Rolle, die er in der amerikanischen Wissenschaft gespielt hat.

Erinnerungen von jenseits des Eises, ein unbearbeitetes Film von Célestin Quartier-Dumittan

Dieses Video wurde im August 2006 in der Grimselregion gefunden. Es befand sich in einer Kamera, die auf dem Unteraargletscher gefunden wurde. Die wenigen persönlichen Sachen, die hier ausgestellt sind, fand man in der unmittelbaren Umgebung zerstreut.

Dieses Dokument ist das Werk eines begeisterten Laien, Célestin Quartier-Dumittan. Er brach von Neuenburg auf, um im Alleingang einen Film zum Gedenken an Louis Agassiz und seine Gletscherforschungen zu drehen. Anscheinend verschwand er während der Dreharbeiten an seinem Film auf dem Unteraargletscher. Alle Versuche, ihn zu finden, blieben erfolglos.

Wir zeigen hier die unbearbeiteten Bilder dieses Videos. Im Andenken an Célestin Quartier-Dumittan haben wir auf eine Montage dieses eindrücklichen Dokuments verzichtet.

3. Von der Sintflut zum Gletscher

• Atemberaubende Gipfel, schreckliche Abgründe und erhabene Gletscher

„Früher gingen nur die Einheimischen und einige arme Reisende, die über den Griesgletscher aus Italien kamen, über den Grimselpass. Aber heutzutage, wo jedermann das Gefühl hat, er müsse seine Schweizerreise absolvieren und sich an schrecklichen Abgründen in grosse Gefahr begeben, ist der Grimsel eine vielbesuchte Örtlichkeit geworden [...]“

E. Desor *Excursions et séjours dans les glaciers et les hautes régions des Alpes, de M. Agassiz et de ses compagnons de voyage* (1844)

Über Jahrhunderte hinweg haben die Alpen die Reisenden in Angst und Schrecken versetzt. Doch in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts verleiht die Romantik ihnen eine neue Anziehungskraft. Immer zahlreicher strömen die Touristen in die Schweizer Täler, um dort den Höhenkitzel zu geniessen.

Damals faszinieren die Berge die Eliten aus ganz Europa. Eine subtile Mischung aus feindseliger, unberührter und geheimnisvoller Natur, erhabener Schönheit und einem Anflug von Grausen lockt Dichter, Maler und Dilettanten zu den Gipfeln.

Die Wissenschaftler stehen nicht abseits. Nach der Publikation der *Voyages dans les Alpes* des Genfers Horace-Bénédict de Saussure (1779) streifen Naturalisten, Botaniker und Geologen durch die Alpen und veröffentlichen ihre Beobachtungen. Der Solothurner Franz Josef Hugi (1791–1855) gehört zu den ersten, die die Gletscher erforschen und ausmessen.

• Das Rätsel der Findlinge (erratischen Blöcke)

Rätselhafte Blöcke: Diluvianisten & Co.

„Die Granite entstehen nicht wie Trüffel in der Erde und wachsen auch nicht wie Tannen auf Kalkfelsen.“

H.-B. de Saussure *Voyages dans les Alpes* (1779)

Das Vorkommen riesiger Granitfelsen im kalkigen Jura hat die Gelehrten schon früh beschäftigt. Wie kann man ihre so weit von den Alpen entfernten Standorte erklären? Welche ungeheure Kraft war in der Lage, sie über solche Distanzen, ja sogar bergaufwärts zu befördern?

Auch wenn es heute sonderbar anmutet, haben de Saussure und die grössten Geologen seiner Zeit die Lösung dieses Rätsels in der biblischen Erzählung der Sintflut gesucht (deshalb wurden die Findlinge lange als „diluvianisches Material“ – lat. *diluvium* = Sintflut) bezeichnet. Für sie waren es die gigantischen Wogen der biblischen Sintflut, die die Granitblöcke so weit von den Alpen wegtrugen. Leopold von Buch errechnete sogar die Kraft, die ein Schlammstrom benötigte, um mehrere tausend Tonnen schwere Blöcke die Jurahänge aufwärts zu befördern.

Transport auf Eisflossen, gigantische Eislawinen, Gasexplosionen, die die Blöcke Hunderte von Kilometern weit wegschleuderten, wurden auch als mögliche Ursachen des verstreuten erratischen Materials vorgeschlagen. Diese etwas verrückten Theorien beruhten kaum auf Beobachtungen im Gelände; es handelte sich vielmehr um Spekulationen im Elfenbeinturm. Sie fanden aber trotzdem bis in die 1850er Jahre hinein ihre Verfechter.

• Das Rätsel der Findlinge : die Pioniere der Eiszeittheorie

„Die Gletscher unserer Berge hatten früher eine viel weitere Ausdehnung als heute. Unser ganzes Tal war von einem grossen Gletscher zugedeckt. Er war höher als das Bett der Drance (Wildbach des Tales) und erstreckte sich bis nach Martigny, wie die Felsbrocken beweisen, die man in der Umgebung dieser Stadt findet, und die zu gross sind, als dass das Wasser sie hätte hierher transportieren können.“

Jean-Pierre Perraudin, Äusserungen aus dem Jahre 1815, aufgezeichnet von Jean de Charpentier

Louis Agassiz wird oft als „Vater“ der Eiszeittheorie bezeichnet. In Wirklichkeit ist er vor allem ihr Verbreiter, denn er stützte sich auf Arbeiten von Vorgängern, die im Schatten blieben. Wer aber ist der Vater der Idee, dass es Gletscher waren, die die Findlinge transportierten und verstreuten?

Es ist nicht einfach, auf diese Frage eine genaue Antwort zu geben. Jean-Pierre Perraudin, ein Bauer aus Lourtier (Wallis) kam aufgrund seiner persönlichen Beobachtungen ganz alleine zum Schluss, dass die Gletscher früher das ganze Valée de Bagnes zudeckten. 1815 unterbreitet er seine Ansichten zuerst dem Ingenieur Ignaz Venetz, dann dem Geologen Jean de Charpentier, der schreibt: „... ich fand seine Hypothese so ungewöhnlich, ja so extravagant, dass ich es nicht für nötig hielt, über sie nachzudenken oder ihr sonst Beachtung zu schenken.“

Ignaz Venetz liefert in seinem Aufsatz *Mémoire sur les variations de la température dans les Alpes suisses* (1821 verfasst, aber erst 1833 publiziert) zahlreiche Beweise für eine viel grössere Ausdehnung der Gletscher in der Vergangenheit. Seine sorgfältigen Beobachtungen fanden im ganzen Wallis Beachtung und regten seinen Freund Charpentier an, seinerseits das erratische Material bis in den Jura zu untersuchen, um Venetz von seinem Irrtum zu überzeugen. Seine Beobachtungen bewirkten das Gegenteil: sie führten dazu, dass er nun selber die These der Eiszeit unterstützte. Charpentiers ausgezeichnete Beobachtungen sind in seinem *Essai sur les glaciers et sur le terrain erratique du bassin du Rhône* (1841) zusammengestellt. Heute gelten Venetz und Charpentier als die wahren Väter der Eiszeittheorie.

Andere Gelehrte hatten jedoch schon vorher ähnliche Ideen veröffentlicht. Der Berner Bernhard-Friedrich Kuhn veröffentlichte 1787 als erster eine Untersuchung über den Transport von Felsblöcken durch Gletscher; der Schotte James Hutton erwähnte die Hypothese der Eiszeit in einem 1795 erschienenen Werk mit wenigen Worten; sein Landsmann John Playfair beschrieb 1802 die Transportkraft der Gletscher; 1824 schrieb Jens Esmark die in ganz Norwegen zu beobachtende Streuung der Findlinge den Gletschern zu; auch Goethe erwähnte 1829 die Hypothese eines Transports durch Gletscher. Bei ihrer Publikation stiessen diese Arbeiten jedoch alle auf wenig Echo.

• Die Rede „*Discours sur les glaciers*“ – visionärer Text oder Hirngespinnst?

„Seit ich die Gletscher gesehen habe, bin ich ganz schneeiger Laune; ich will, dass die ganze Erdoberfläche einst mit Eis zugedeckt war und dass alle Schöpfungen, die unserer eigenen vorangingen, erfroren sind. Ich bin tatsächlich völlig überzeugt, dass die letzten Veränderungen, die auf der Oberfläche Europas stattgefunden haben, der Tätigkeit des Eises zugeschrieben werden müssen.“

Louis Agassiz, Brief an den englischen Gelehrten Buckland, 1838

Louis Agassiz lässt sich von Charpentier von der Stichhaltigkeit der Gletscherthese überzeugen und setzt alles daran, um dieser zum Durchbruch zu verhelfen.

1837 hält er in Neuenburg vor der versammelten Helvetischen Gesellschaft der Naturwissenschaften seinen berühmten Vortrag über die Gletscher (*Discours sur les glaciers*), der bei seinen Kollegen ein allgemeines Protestgeschrei auslöst und der manchmal – zu Unrecht – als Ausgangspunkt der Eiszeittheorie angesehen wird.

1836 war Agassiz ein junger, dank seiner Arbeiten in Zoologie und Paläontologie schon berühmter Wissenschaftler. Er hatte mehrere Monate in Bex verbracht, wo Charpentier ihm im Gelände die Spuren der einstigen Ausdehnung von Gletschern zeigte.

Ausgehend von Venetz' und Charpentiers Arbeiten, die er durch persönliche Beobachtungen erweitert, verleiht Agassiz der Eiszeittheorie eine neue, weltweite Dimension. Von seinem Freund Karl Schimper übernimmt er den Ausdruck „Eiszeit“ und behauptet, dass eine riesengrosse Eiskappe früher einen grossen Teil Europas und Nordamerikas zudeckte. Er irrt sich, indem er diese „Eiszeit“ vor der Bildung der Alpen einordnet; ihm zufolge gelangten die Findlinge bis in den Jura, indem sie die vereisten, in Bildung begriffenen Abhänge der Alpen hinuntergerutscht wären. Diese Idee wurde von Charpentier aufs heftigste bekämpft.

Agassiz' Behauptungen werden in wissenschaftlichen Kreisen sehr schlecht aufgenommen. Damals war man überzeugt, dass in früheren geologischen Perioden auf der Erde stets ein wärmeres Klima herrschte. Der gekränkte Agassiz beschliesst, seine Gegner mit einer gründlichen Studie über die heutigen Gletscher zu verblüffen.

• Gletscherforschung: der Unteraargletscher und das „Hôtel des Neuchâtelois“

„Seit 60 Stunden schneit es ohne Unterbruch, die Lufttemperatur ist seit zwei Tagen nicht über +1°C gestiegen, und in der Nacht haben wir -4°C. Wir sind alle im Heu in unserem Zelt vergraben, und ich kann die Feder nur mit Mühe in der Hand halten, um Ihnen unsere Beobachtungen der letzten zwei Wochen mitzuteilen...“

Carl Vogt und Louis Agassiz, im „Hôtel des Neuchâtelois“ verfasster Briefentwurf

Im August 1840 richtet sich ein Team von sechs jungen Wissenschaftler unter der Leitung von Louis Agassiz auf der Mittelmoräne des Unteraargletschers in der Grimselregion ein. Unter dem Vorsprung eines riesigen Blocks aus Glimmerschiefer bauen sie einen Notunterstand und taufen ihn ironisch „*Hôtel des Neuchâtelois*“. Bis 1845 folgt jeden Sommer – und manchmal sogar auch im Winter - eine weitere Expedition. Dieses wissenschaftliche Unterfangen ist für seine Zeit einzigartig und der Umfang der Studien - die oft unter sehr schwierigen Bedingungen durchgeführt werden - beeindruckend.

Zwischen 1838 und 1845 durchstreifen Agassiz und seine Gefährten die Alpen und sammeln Beobachtungen, Messungen, und Erfahrungen verschiedenster Art. Der Unteraargletscher wird schnell zum Zentrum der Gletscherforschung. Agassiz' ansteckende Begeisterung, sein ausgeprägter Sinn für Kommunikation und das Neuartige der kollektiven Arbeit machen aus dem *Hôtel des Neuchâtelois* einen Anziehungspunkt für ausländische Forscher, der aber auch von einfachen Touristen aufgesucht wird.

Louis Agassiz' Kameraden Edouard Desor, Carl Vogt, Célestin Nicolet, Arnold Guyot und andere mehr nehmen in Begleitung der Künstler Jacob Bourckhardt und Joseph Bettanier an den Expeditionen teil. An Untersuchungsthemen mangelt es nicht: Bildung und Struktur des Eises, Temperaturschwankungen, Mächtigkeit und Bewegung des Gletschers, Zirkulation des Wassers, Moränen, Blöcke und sogar die mikroskopische Flora und Fauna des Gletschers. Aus dieser grossen wissenschaftlichen Ernte entstehen unzählige Publikationen, darunter zwei wichtige Werke mit prächtigen Bildtafeln: *Etudes sur les glaciers* (1840) und *Système glaciaire* (1847).

• Louis Agassiz, Prophet der Wissenschaft

„So war also die Kälteperiode, die der heutigen Schöpfung voranging, nur eine vorübergehende Schwankung der Erdtemperatur... Sie sah das Aussterben der Tiere im Diluvium der Geologen, wie es die sibirischen Mammuts noch bezeugen, und fand vor der Hebung der Alpen und dem Erscheinen der heutigen Lebewesen statt...“

Louis Agassiz, *Discours sur les glaciers*, 1837

Für Agassiz bedeutet die Eiszeit die Auslöschung aller Lebewesen. Als „Pflug Gottes“ schabten die Gletscher die Erde bis auf den Fels ab und schufen Platz für eine neue Schöpfung - und den Beginn der Herrschaft des Menschen.

Als Anhänger des „Katastrophismus“ des berühmten Georges Cuvier betrachtet Agassiz die Lücken, die in den geologischen Abfolgen beobachtet wurden, als Resultat weltweiter Kataklysmen. Die Geschichte der Erde wurde von einer Reihe von Katastrophen geprägt, jede einzelne machte jeweils den Weg für eine neue Schöpfung frei. Mit der „Eiszeit“ kennt die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts endlich die konkrete Ursache der letzten Katastrophe, jener, die der heutigen Schöpfung und der Krönung von Gottes Werk – dem Menschen – voranging.

Agassiz' Gletscherforschungen fügen sich in ein wissenschaftliches Werk ein, die klar auf die Offensichtlichkeit eines göttlichen Planes in der Geschichte der Natur hinweist. Mit seinen Forschungen in Embryologie, Zoologie und Paläontologie wollte Agassiz beweisen, dass die Abfolge der Arten einem regelmässigen Fortschreiten nach einem Plan entsprach, der von Gott am Anfang aller Zeiten festgelegt worden war. Für ihn boten die Naturwissenschaften eine noch bessere Möglichkeit als die Bibel, sich der göttlichen Offenbarung zu nähern. Und als Entzifferer des „Grossen Buches der Natur“ hielt Agassiz sich für einen Propheten – den Propheten der Wissenschaft.

In den Vereinigten Staaten, wo er sich 1846 niederlässt, wird diese Botschaft begeistert aufgenommen. Im Land der puritanischen Pioniere versöhnt Agassiz die Werte der Wissenschaft mit den Anforderungen der Religion. Er wird zum selbsternannten Haupt der amerikanischen Wissenschaft und zu Darwins wichtigstem Gegner, obwohl seine Arbeiten in manchen Hinsichten dessen Evolutionstheorie vorwegnehmen.

Heute hat der Triumph des Darwinismus Agassiz im Dunkel der Geschichte verschwinden lassen. Sein Versuch, die Sklaverei wissenschaftlich zu rechtfertigen, schadet seinem Ansehen zusätzlich. Doch mit seinen Arbeiten wie auch wegen seines Engagements für die Förderung der Wissenschaft bleibt Agassiz einer der grössten Gelehrten des 19. Jahrhunderts.

4. Gletscher verstehen

• Wie entstehen Gletscher?

Von Schnee zu Eis

Wie kann sich Schnee, so leicht und schwebend, in Eis verwandeln? Ganz einfach durch Zusammenpressen. Dort wo er sich anhäufen und setzen kann – an Abhängen und in Felsenkesseln (oder an den Polen) – muss es allerdings kalt genug sein. Die Struktur des Schnees verändert sich, die Schneekristalle verwandeln sich in Eiskristalle, die – zusammengepresst – stetig wachsen. Das Wechselspiel zwischen Frost und Tau begünstigt die Transformation: beim Schmelzen geht der Schnee in die flüssige Phase und rekristallisiert dann als Eis wieder.

Unter günstigen Bedingungen häuft sich also das Eis zuerst bergseits an, bevor es sich, einzig und allein durch den Einfluss der Schwerkraft hangabwärts bewegt. Die Geschwindigkeit hängt sowohl von der Schneezufuhr ab, als auch von der Neigung des Hanges, von den Eigenschaften des Bodens (Moräne oder Felsen) und von den klimatischen Bedingungen. Im Sommer ist die Geschwindigkeit höher, da das Schmelzwasser als Schmiermittel wirkt und dadurch die Bewegung beschleunigt.

• Ist ein Gletscher ein Fluss aus Eis?

Es ist sicher etwas übertrieben, einen Gletscher als Eisfluss zu bezeichnen, aber er rückt tatsächlich vor! Auf dem Gletscher selbst sind Seracs (Türme aus Gletschereis), Gletscherspalten und Mittelmoränen die sichtbaren Beweise dieser langsamen aber unaufhaltsamen Bewegung.

Gletscher bewegen sich gewöhnlich mit einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern bis einigen Dezimetern pro Tag fort, und gewisse unter ihnen bringen es sogar auf mehrere Meter pro Tag. Der Kangerlussuaq-Gletscher in Grönland hält den absoluten Rekord mit einer Geschwindigkeit von 40 Metern pro Tag, was in etwa 14 Kilometern pro Jahr entspricht!

Durch das Gewicht des Eises entsteht unter dem Gletscher ein Überdruck. Dabei schmilzt das Eis teilweise im Kontakt mit dem Felsen oder der Grundmoräne: diese Wasserschicht fördert das Gleiten des Gletschers auf einem felsigen Boden. Da es sich beim Eis um ein zähflüssiges Material handelt, bewirken Neigungs- oder Richtungsänderungen Risse an Stellen, wo die Spannungen sehr gross sind.

Die gesamte Dynamik eines Gletschers hängt vom Gleichgewicht zwischen der Schneeanammlung im Nährgebiet und dem Auftauen und Verdampfen im Zehrgebiet ab.

• Warum ist das Eis der Gletscher manchmal blau und manchmal weiss?

Die Farbe des Eises hängt von seinem Luftanteil ab. Bei seiner Entstehung aus Schnee ist Eis weiss, weil es viel Luft enthält. In einem Gletscher nimmt der Luftanteil ständig ab. Das Eis wird zuerst blau und dann durchsichtig.

Die Farbe des Gletschereises hängt vor allem vom Gewicht des darüberliegenden Eises oder Schnees ab. Während der Transformation des Schnees zu Eis nimmt der Luftanteil stetig ab. Frisch gefallener Schnee besteht aus einer lockeren Anhäufung von Kristallen, die durch Luft voneinander getrennt sind. Ein neuer Schneefall presst die alte Schicht zusammen und drückt dabei einen Teil der Luft heraus.

Pulverschnee enthält 90% Luft, während der Luftanteil im Eis der Gletscher im Durchschnitt nur noch 2% beträgt. Firnschnee – eine Zwischenstufe in der Eisbildung – enthält zwischen 50% und 80% Luft.

Das Eis der Gletscher zeigt oft eine Wechsellagerung von weissen und blaugrünlichen Schichten auf. Diese Schichtung hängt mit den Jahreszeiten zusammen. Wenig dichtes, weisses Eis mit vielen Bläschen entsteht im Winter. Blau-grünliches Eis hingegen ist dichter, enthält weniger Luft und entsteht im Sommer, wenn der Wechsel von Frost und Tau bei hoher Temperatur den Luftanteil vermindert.

Ganz anders sieht das Eis eines zugefrorenen Sees aus. Da Wasser praktisch keine Luft enthält, wird das Eis, das entsteht, durchsichtig wie eine Glasplatte. Das Wasser unter ihm scheint dunkel und manchmal sogar ganz schwarz zu sein.

• Gibt es nur in den Bergen Gletscher?

In den Alpen können Gletscher erst in einer Höhe von mindestens 2700 m entstehen. Aber je mehr man sich den Polen nähert, desto öfter findet man Gletscher in geringerer Höhe. Sie können sogar auf der Höhe des Meeresspiegels existieren, wenn Temperaturen und Niederschläge es erlauben.

Es gibt zwei grosse Arten von Gletschern :

Die alpinen Gletscher. Ihre Morphologie hängt vom Relief ab. Man findet sie in verschiedenen Arten von „Gletscherfallen“, wie z. B. in einer Talsohle (Tal­gletscher), auf dem Grund eines Felsenkessels (Kargletscher) oder auf der Schattenseite eines Berggipfels, meistens an den Nordflanken (Hängegletscher). Wenn ein Tal­gletscher in eine offene Landschaft gelangt, breitet er sich aus und bildet von Spalten durchsetzte Loben Eiskappen(Piedmontgletscher).

Die kontinentalen Gletscher. Diese riesigen Anhäufungen von Eis sind weit ausgedehnt und sehr dick. Sie decken jedes Relief ab und haben eine gewölbte Oberfläche. Man unterscheidet die **Eiskappen**, die sich über weniger als 50'000km² ausdehnen, von den **Eisschilden (Inlandeis)**, die grösser als 50'000km² sind. Es gibt nur zwei Eisschilde auf der Erde, die Antarktis und Grönland.

• Gibt es Gletscher im Jura?

Die letzten Gletscher der Jurakette sind vor ungefähr 10'000 Jahren verschwunden. Man kann jedoch an gewissen Stellen noch Eis im Boden (Permafrost) und in unterirdischen Höhlen (Eishöhlen) finden.

Als **Permafrostboden** bezeichnet man einen ständig gefrorenen Boden. Er breitet sich auf ungefähr 20% des gesamten Erdbodens aus. In den Alpen findet man ihn ab 2'500 m Höhe, besonders an den Nordhängen. In der Schweiz sind schätzungsweise 5–6% des Bodens Dauerfrostböden. Das ist mehr als die von den Gletschern zugedeckte Fläche. Im Jura gibt es Beispiele von ständig gefrorenen Böden. Sie sind an eine besondere Lage und Luftzirkulation gebunden, wie dies z. B. auf dem Grund des Felsenkessels des Creux-du-Van der Fall ist.

Eine natürliche **Eishöhle** ist ein unterirdischer Hohlraum, in dem man über das ganze Jahr hinweg Eis findet, und dies in einer Gegend, in der die durchschnittlichen Jahrestemperaturen über null Grad liegen. Die Eishöhle funktioniert wie ein natürlicher Gefrierschrank: Die kalte Luft, die in ihrem Inneren dichter ist als die Luft ausserhalb, bleibt gewissermassen in der Höhle gefangen und ermöglicht die Konservierung des Eises. Im Jura gibt es ungefähr zwanzig solcher Eishöhlen. Die grösste unter ihnen ist die Eishöhle von Monlési (6'000 m³) im Kanton Neuenburg.

• Wo befindet sich der Grossteil des Süsswassers der Erde?

Alleine in den Gletschern und im ewigen Schnee sind mehr als zwei Drittel des Süsswassers der Erde enthalten, d. h. mehr als 24 Millionen km³. Das ist jedoch nur – oder fast nur – ein Tropfen verglichen mit den 1'000 Millionen km³ Salzwasser, die sich in den Meeren und Ozeanen befinden.

Das Süsswasser ist der wertvollste natürliche Rohstoff, unentbehrlich für alle lebenden Organismen, ob Pflanzen oder Tiere, und für unser eigenes Wohlbefinden. Im Eis sind die grössten Reserven enthalten: In der Antarktis allein befinden sich 61,7% der Süsswasservorkommen, in Grönland 6,7%. Ein grosser Teil des restlichen Süsswassers befindet sich im Grundwasser (30%). Das Wasser der Seen und Flüsse, das uns direkt zugänglich ist, bildet nur einen winzig kleinen Anteil (0,27%) des Gesamtvolumens.

• Gibt es Eis im Weltall?

Eis spielt im Universum eine sehr grosse Rolle, nicht nur im interstellaren Raum, sondern ebenfalls in der Zusammensetzung der Planeten. Eine kleine, sehr vereinfachte Übersicht über die heutigen Kenntnisse, von der Geburt der Sterne über die Kometen und die Ringe des Saturns bis hin zu den Eisruptionen.

• Woran erkennt man eine von Gletschern gestaltete Landschaft?

Die Gletscher können als riesige Hobel bezeichnet werden, die die Täler nach ihrem Durchgang in gut erkennbaren Formen von Trögen oder U-Formen hinterlassen. Rundhöcker, Riegel und Mulden, Moränen und erratische Blöcke sind weitere charakteristische Spuren, die einen Gletscherdurchgang in der Landschaft markieren.

Die Gletschererosion geschieht durch Abschleifen, Abspalten und Zersplittern des Felses. Trogtäler sind die am leichtesten erkennbaren Zeugen der Gletschertätigkeit in einer Landschaft.

Nach dem Rückzug des Gletschers bleiben im Tal abwechslungsweise Vorsprünge (**Gletscherriegel**) und Vertiefungen (**Mulden**) zurück. Diese Mulden bilden sich in weicheren, tief ausgeschürften Zonen, die oft von Seen aufgefüllt sind. Widerstandsfähige Felsbänke, die talwärts eine unebene und bergwärts eine polierte Seite aufzeigen, bilden **Rundhöcker** (siehe Schema).

Erratische Blöcke und **Moränen**, Ablagerungen von verschiedenartigem Felsmaterial, das auf dem Rücken der Gletscher transportiert oder vor ihnen hergeschoben und dann beim Rückzug liegengelassen wurde, prägen die Landschaft noch lange nach dem Durchgang der Gletscher.

• Was ist ein erratischer Block?

Das Wort „erratisch“ kommt vom Lateinischen *erraticus*, was „umherirrend“ bedeutet. Ein erratischer Block ist also ein Block, der sich fortbewegt hat. Er hat dies jedoch nicht ganz alleine getan: er wurde auf dem Rücken eines Gletschers transportiert.

Der von einer Felswand losgelöste und auf einem Gletscher gelandete Block, bewegt sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Eis. Seine Reise nimmt dort ein Ende, wo das Eis, das ihn transportiert hat, schmilzt und ihn liegenlässt. Dies kann bis zu mehreren Hunderten von Kilometer von seinem Ursprungsort entfernt sein.

Mit einer petrographischen Analyse (Zusammensetzung, Kristallstruktur und Mineralchemie) kann manchmal der genaue Herkunftsort eines Blockes bestimmt werden. Oder einfacher: einige ganz besondere Gesteinsarten sind nur in gewissen Gebieten der Alpen zu finden, wie zum Beispiel die im Jura auftretenden Serpentinblöcke – metamorphe, dunkelgrüne Gesteine, die unverkennlich aus dem Gebiet des Matterhornes stammen.

Wenn eine intensive Erosion die Moränen völlig abgetragen hat, können isolierte erratische Blöcke helfen, die maximale Ausdehnung eines früheren Gletschers zu bestimmen. Dies ist der Fall beim erratischen Block des Croix-Rousse-Hügels in Lyon, einem Überbleibsel aus der Risseiszeit (vor 300'000 bis 120'000 Jahren).

• Gibt es im Jura erratische Blöcke?

Bis auf 1100 m, und am Suchet sogar auf 1250 m Höhe, liegen im Jura überall erratische Blöcke. So hoch reichte der Rhonegletscher während seiner grössten Ausdehnung der letzten Eiszeit.

Einige Blöcke befinden sich sogar noch höher, oder in Gegenden, die von der Würmeiszeit nicht betroffen waren, wie z. B. die Umgebung von La Chaux-de-Fonds. Es handelt sich also um Blöcke, die vorher - während der Risseiszeit - abgelagert wurden.

Die meisten erratischen Blöcke sind aus kristallinem Gestein, das viel härter ist als der Kalk, aus dem der Jura besteht. Diese Gesteinsart war für den Bau von Häusern sehr gefragt. Im 19. Jahrhundert z. B. dienten die riesigen Granitblöcke aus der Umgebung von Noiraigue im Val-de-Travers zur Herstellung von Treppenstufen und Fensterrahmen für viele Häuser des Dorfes.

Aber schon zuvor haben Leute diese Blöcke bearbeitet, um daraus Menhire, Mühlsteine oder Schalensteine herzustellen. Es ist sehr schwierig, dieses megalithische Material zu datieren. Nur in

einigen wenigen Fällen, dort wo archäologische Überbleibsel unter einem Dolmen gefunden wurden, konnte man diesen ersten Spuren menschlicher Nutzung, die bis ins Neolithikum zurückgehen, ein Datum zuordnen (vor 5'000 bis 2'500 Jahren).

Gewisse erratische Blöcke gehören zu den ersten natürlichen Objekten, die unter Schutz gestellt wurden. So der „Pierre-à-Bot“ oberhalb von Neuenburg. Dieser riesige, 3000 Tonnen schwere Granitblock, wurde 1838 auf Antrag von Louis Agassiz als „wertvolles Monument der Naturgeschichte“ eingestuft und so vor dem Zugriff der Steinmetze gerettet.

Der Rhonegletscher, Ursprung der erratischen Blöcke im Jura.

Dieser Gletscher (ca. 3 km nordwestlich des Furkapasses), der heute nur noch ein Überbleibsel ist, bedeckte einmal das ganze Rhonetal und breitete sich bis zum Jura aus. Die Gletscher der Nebentäler führten dem Hauptgletscher ihre Eismassen zu. Im Gebiet des heutigen Genfersees wurde er zu einem Piedmontgletscher. Als er auf den Jura auflief, teilte er sich in zwei Arme: der eine stiess über Genf bis nach Lyon vor (Riss- und Würmeiszeit), der andere verlief über Neuenburg und endete knapp nach Solothurn, bei Wangen an der Aare (während der Würmeiszeit - in der Risseiszeit reichte er viel weiter).

Der Aargletscher, der im Aarmassiv seinen Ursprung nahm, breitete sich über die heutigen Seen von Thun und Brienz aus. In der Nähe von Bern stiess er auf den Rhonegletscher, der ihn in Richtung Solothurn umleitete.

Alle erratischen Blöcke, die sich auf den Jurahängen befinden, stammen vom Rhonegletscher. Die beiden Eiszeiten, in welchen die Blöcke abgelagert wurden, die man heute findet, sind die Risseiszeit (-300'000 bis -120'000 Jahre) und die Würmeiszeit (-80'000 bis -10'000 Jahre). In der Risseiszeit war die Ausdehnung der Gletscher viel grösser. Die Blöcke, die in jener Zeit transportiert wurden, sind bis hin zum Doubs und sogar noch weiter weg bis nach Frankreich zu finden, während der Gletscher der Würmeiszeit nicht einmal bis nach La Chaux-de-Fonds reichte. Es gab in den Alpen noch andere, ältere Eiszeiten während des Quartärs (vor 1,8 Millionen Jahren), aber ihre Spuren wurden von neueren Eiszeiten verwischt.

• Was ist eine Moräne?

Alles, was von Gletschern transportiert wurde, wird als Moräne bezeichnet: die Anhäufungen von Felsschutt auf ihrer Oberfläche, wie auch Ablagerungen, die sie liegengelassen haben.

Das Material der Moränen ist unsortiert: Gesteinsmehl, Lehm, feiner oder grober Sand, Kieselsteine in allen Grössen sowie grosse Blöcke sind völlig chaotisch vermischt.

Eine Moräne ist leicht an kantigen Kieselsteinen und Blöcken erkennbar.

Im Gegensatz dazu sind die einzelnen Steinchen in Sand- und Kiesbänken sowie Gerölle, die von Flüssen oder allgemein von Wasser transportiert wurden stets mehr oder weniger nach ihrer Grösse sortiert, und die Kanten durch den Transport abgerundet (z. B. runde Kieselsteine).

Man unterscheidet vier Haupttypen von Moränen:

- Seitenmoräne: Gesteinsmaterial, das vom Gletscher abgetragen wurde oder von den seitlichen Felshängen auf seine Oberfläche stürzte.
 - Mittelmoräne: Sie entsteht aus den Seitenmoränen zweier zusammenströmender Gletscher.
 - Grundmoräne: Material, das vom felsigen Untergrund abgetragen und vom sich bewegenden Gletschers zermalmte wurde.
 - Endmoräne: Anhäufung von Material, das bis zum Rand der Gletscherzunge vorgedrungen ist.
- Eine nicht konsolidierte Moräne (Geschiebemergel) wird auch Till genannt.

• Wie entstehen Gletschermühlen?

Eine Gletschermühle ist ein topfförmiges – oder eher kesselförmiges - Loch im Felsen, in welchem sich oft ein grosser Stein befindet. Gletschermühlen bilden sich unter der Einwirkung von Schmelzwasser, das mit scheuernden Gesteinspartikeln angereichert ist.

Das Wasser fliesst von der Gletscheroberfläche in die Spalten bis zum felsigen Grund, wo Wildbäche entstehen. An gewissen Stellen entstehen Strudel, in denen das Wasser unter riesigem Druck eine Geschwindigkeit von 200 km/h erreichen kann. Das mit feinen Sand- und Kiespartikeln angereicherte Wasser wäscht den Felsen aus.

Im Gegensatz zu einer weit verbreiteten Meinung wird das Loch also nicht durch die Bewegung des sich darin befindenden Gesteinsblockes gegraben. Der Stein, der etwas kleiner ist als der Grund der Gletschermühle, ist ganz einfach in ihr hängengeblieben. Während ein grösserer Stein gar nicht erst ins Loch gefallen wäre, wäre ein kleinerer durch die starke Strömung im Strudel wieder hinaus transportiert worden.

• **Wie entstehen die Gletscherschrammen?**

Gletscherschrammen sind in Felsen eingekerbte Spuren eines Gletschers. Sie entstehen durch die Reibung von Felsbrocken oder Gesteinsfragmenten, die sich im Eis befinden, auf den darunterliegenden Felsen, die sich auf ihrem Weg befinden. Sie geben Auskunft über die Richtung der Gletscherbewegung. In den Zonen, die mit dem „Schmirgelpapier“ des mit feinem Felsenmehl angereicherten Gletschers in Kontakt waren, erscheinen Gletscherschliffe.

Mit den Gletscherschrammen kann die Existenz von Gletschern in sehr frühen Perioden der Erdgeschichte nachgewiesen werden. Man hat z. B. in Südafrika Gletscherschrammen auf Felsen gefunden, die aus dem Karbon (vor 355 bis 295 Millionen Jahre) stammen und in der Sahara sogar solche aus dem Ordovizium (vor 500 bis 440 Millionen Jahren). Dank einer eingehenden Studie der Richtung der Schrammen konnte man die Bewegungen der Eiskappen bestimmen, die sich während dieser beiden geologischen Perioden im damals noch nahe am Südpol gelegenen Afrika befanden.

Gibt es im Jura Gletscherschrammen?

Der Rhonegletscher hat den Kalkfelsen des Juras wirklich seinen „Stempel“ aufgedrückt. Die geschrammten Steinplatten von Le Landeron, in der Umgebung von Neuenburg, sind bis heute eines der bekanntesten Beispiele dafür. Louis Agassiz hatte sie in den 1840er Jahren im Rahmen seiner Gletscherforschungen untersucht. Leider ist heute fast nichts mehr von ihnen übriggeblieben.

• **Gab es seit der letzten Eiszeit immer Gletscher in den Alpen?**

Seit der letzten Eiszeit hat sich die von Gletschern bedeckte Fläche oft verändert. Neuere Forschungen auf der Basis der Datierung pflanzlicher Reste, die von den Gletschern freigegeben wurden, ergaben, dass die Gletscher im Lauf der letzten 10'000 Jahre meistens weniger ausgedehnt waren als heute. Gebiete, die heute von Gletschern bedeckt sind, waren vor einigen tausend Jahren eisfrei.

Baumstämme (vor allem Lärchen und Arven), die von den Gletschern freigegeben wurden, zeigen, dass in Gebieten, die heute von Gletschern bedeckt sind, früher Bäume wuchsen. Die Datierung von Holz oder Torf aus Moränen, die höher liegen als die heutige Gletscherfront mit der Radiokarbonmethode, macht es möglich, die lokale Geschichte der Vegetation und des Klimas zu rekonstruieren. Die Resultate zahlreicher Analysen dieser Hölzer erlauben es, zehn Rückzugsphasen der Gletscher (warme Perioden) und ebenso viele Wachstumsphasen seit dem Maximum der letzten Eiszeit vor 20'000 Jahren zu bestimmen.

• **Was war die grösste Ausdehnung der schweizer Gletscher?**

Obwohl die Schweiz mehrere Eiszeiten erlebt hat, so verfügen wir nur über klare Spuren der zwei letzten beiden Eiszeiten: der Risseiszeit (ca. -300'000 bis -120'000 Jahre) und der Würmeiszeit (ca. -80'000 bis -10'000 Jahre). In beiden Fällen war der grösste Teil unseres Landes mit Eis bedeckt.

Da jede neue Eiszeit mindestens teilweise die Spuren der vorherigen verwischt, finden wir heute nur noch steinige Ablagerungen, Moränen und erratische Blöcke der beiden letzten Eiszeiten.

Die maximale Ausdehnung der Gletscher war während der Risseiszeit grösser als während der Würmeiszeit. Der Rhonegletscher dehnte sich über das ganze schweizerische Mittelland aus. Er reichte weit über die schweizerische Jurakette hinaus und bedeckte einen grossen Teil des französischen Juras.

Die Würmeiszeit erreichte vor ca. 18'000 bis 20'000 Jahren ihren Höhepunkt (siehe Karte): Der Rheingletscher bedeckte den ganzen Nordosten des Landes und der Rhonegletscher wiederum das Mittelland. In der Umgebung von Bern stiess er auf den Aaregletscher und breitete sich weiter über Solothurn hinaus bis nach Wangen an der Aare aus. Er erreichte jedoch nicht den Reussgletscher und liess das Napfmassiv und seine Umgebung eisfrei. Auf der Alpensüdseite wurde die Gegend des Monte Generoso verschont.

Der Jura blieb teilweise eisfrei, mit Ausnahme des Vallée de Joux, der Gegend von Saint-Croix, des Val-de-Travers und des Val-de-Ruz, während lokale Gletscher die Gipfel bedeckten.

• **Warum stossen Gletscher vor und weshalb ziehen sie sich zurück?**

Der „Gesundheitszustand“ der Gletscher hängt nicht nur von den sommerlichen Temperaturen ab, sondern auch von den jährlichen Niederschlägen. Damit die Grösse eines Gletscher unverändert bleibt, muss die Schneezufuhr im Nährgebiet das Auftauen des Eises im talwärts gelegenen Zehrgebiet kompensieren. Die regionalen Klimaverhältnisse, die ihrerseits von Höhe und Breitengrad abhängen, sind ausschlaggebend, zumindest auf der menschlichen Zeitskala.

Das direkte Auftauen des Eises an der Oberfläche des Gletschers und am Rand der Zunge speist einen Gletscherwildbach, dessen Wassermenge je nach Jahres- und Tageszeit variiert. Darüber hinaus verwandelt sich an sehr heissen Tagen das Eis an der Oberfläche des Gletschers durch Sublimierung (Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand) direkt in Wasserdampf.

Diese Verluste können durch genügend ausgiebige Schneefälle ausgeglichen werden. Eine Reihe kalter, schneereicher Jahre lässt den Gletscher wachsen. Die heissen Sommer hingegen, die seit einigen Jahrzehnten herrschen, haben zu einem beträchtlichen Rückzug der Gletscher geführt. Die Ursache liegt in der heutigen Klimaerwärmung, die mit der vom Menschen verursachten Zunahme der Treibhausgase zusammenhängt.

• **Gibt es in den Alpen einen Zusammenhang zwischen Berggrutschen und Gletscherschmelze?**

Zwei verschiedene Vorgänge, die sich in unterschiedlichen Zeiträumen abspielen, sind am Werk:

- **das Auftauen des Permafrostbodens, das mit der vom Menschen verursachten Klimaerwärmung abhängt**

- **der seit dem Ende der letzten Eiszeit, vor 20'000 Jahren, anhaltende Rückzug der Gletscher, der nicht direkt mit dieser Erwärmung zusammenhängt**

Die Steinschläge am Matterhorn und der Berggrutsch am Eiger haben beide Schlagzeilen gemacht, und sind Beispiele für die beiden unterschiedlichen Vorgänge.

Die Steinschläge am Matterhorn, die den Aufstieg zu seinem berühmten Gipfel gefährlich machen, stehen im direkten Zusammenhang mit der vom Menschen verursachten Klimaerwärmung. Über 2500 m ist der Boden seit Tausenden von Jahren ständig gefroren. Durch die Klimaerwärmung beginnt der „Zement“, den das Eis bildete, zu schmelzen. Grosse Felsmassen können sich jederzeit lösen und abstürzen.

Die Ursachen des Berggrutsches am Eiger müssen in zeitlich grösserer Entfernung gesucht werden und stehen in keinem direkten Zusammenhang mit der aktuellen Klimaerwärmung. Seit Millionen von Jahren existieren in den Felsmassen der Alpen Spalten und Sprünge. Wenn diese Spalten parallel zu einem Tal verlaufen, ist die Gefahr eines Berggrutsches gross.

Während der letzten Eiszeit haben die Gletscher tiefe Täler gegraben und so das Risiko von Berggrutschen erhöht. Solange die Gletscher die Täler auffüllen, besteht keine Gefahr, aber sobald sie sich zurückziehen, werden die Felsmassen nur noch durch ihr Eigengewicht zurückgehalten. Ihr Sturz ist nur noch eine Frage der Zeit – aber der geologischen Zeit, denn es können Jahrhunderte und sogar Jahrtausende verstreichen, bevor sie sich tatsächlich in Bewegung setzen.

• **Wie alt ist das älteste Eis auf der Erde**

Das älteste auf der Erde gefundene bzw. erbohrte Eis ist 900'000 Jahre alt. Es stammt aus der Antarktis und wurde bei einer Bohrung in 3270 Meter Tiefe gefunden. Die Bohrmaschinen brauchten neun Jahre, um in diese Tiefe vorzudringen.

Das Eis wurde während einem achtjährigen Projekt („Europäisches Projektes für die Eisbohrung in der Antarktis“, EPICA) von Wissenschaftlern und

Technikern aus zehn europäischen Ländern erbohrt. An diesem Eisbohrkern werden sodann kleinste Blasen aus dem Eis extrahiert, um herauszufinden, wie sich die Zusammensetzung der Atmosphäre verändert hat.

Analysen an den Eisbohrkernen zeigen einerseits die Temperaturveränderungen in der Vergangenheit, aber auch, wie sich die Konzentration von Gasen und Partikeln in der Atmosphäre verändert hat.

5. Der Walzer des Klimas, warum ?

Die Ursachen der Vergletscherungen

Sie hätten gerne eine einfache Erklärung über die Ursachen der Eiszeiten und der klimatischen Veränderungen? Nun, das gibt es leider nicht. Kein einziger Faktor, wie wichtig er auch sein mag, kann allein und über alle Zeitalter hinweg die Klimaänderungen erklären. Die Wahrheit liegt irgendwo in der Kombination der Mechanismen, zu deren Entdeckung wir Sie einladen.

1. Das Geheimnis der ersten Eiszeiten

Gesteinsblöcke mit Gletscherschrammen, die in Südafrika gefunden wurden, könnten die ersten Beweise einer Eiszeit auf der Erde sein. Sie sind mehr als 3 Milliarden Jahre alt. Vor 2,4 bis 2,2 Milliarden Jahren häufen sich dann die Spuren von Eiszeiten: in Kanada, im Norden Europas, in Südafrika und Australien. Dann verschwinden sie für 1,4 Milliarden Jahre, um 850 bis 550 Millionen Jahre vor unserer Zeitrechnung wieder aufzutauchen.

Die Ursachen der ersten Eiszeiten sind unklar; die klimatischen Bedingungen, die damals auf der Erde herrschten, unterscheiden sich zu sehr von den heutigen. Es dominiert die Ungewissheit...

Aussergewöhnliche Szenarien wurden ins Gespräch gebracht. So vertritt zum Beispiel Paul Hoffmann von der Harvard-Universität, Autor einer kürzlich erschienenen Publikation, die These, die Erde hätte vor 700 Millionen Jahren so intensive Eiszeit gekannt, dass selbst die Ozeane gefroren wären und sich eine 1400 Meter dicke Eisschicht gebildet hätte. Die Temperaturen seien bis auf -50° gefallen, was das Leben, mit Ausnahme in der Umgebung submariner Vulkane, überall ausgelöscht hätte..

Er greift damit eine Hypothese auf, die die Wissenschaft entzweit, seit Louis Agassiz sie als erster 1837 in seinem berühmten Vortrag von Neuenburg formulierte. Seither wurden verschiedene Varianten dieser Idee bereits sieben Mal zur Debatte gestellt.

Muss man sich die früheren Eiszeiten im Licht der gegenwärtigen vorstellen? Diese alte Frage spaltet die Geologen noch heute in verschiedene Lager.

2. Die verkehrte Welt : *die Kontinentaldrift*

Vor 300 Millionen Jahren waren Afrika und Australien mit Eis bedeckt, während in Europa und Nordamerika üppige Wälder und riesige Sumpfbereiche das Landschaftsbild bestimmten. So war da, wo sich heute die Wüste erstreckt, früher Eis, und unter dem heutigen Eis finden sich Spuren tropischer Wälder.

Die Ursache dieses "Wunders" liegt im Auseinanderdriften der tektonischen Erdplatten, also der Kontinente. 1924 entdeckte Alfred Wegener, dass sich die Kontinente seit Millionen von Jahren auf der Oberfläche der Erdkugel verschieben. Er wies nach, dass die südlichen Kontinente Afrika, Indien, Australien, Südamerika und Antarktis vor 300 Millionen Jahren eine einzige Landmasse um den Südpol bildeten, den "Superkontinent" Gondwana.

Was hat das mit dem Klima zu tun? Die Verteilung der Kontinente ist entscheidend für die Eiszeiten: Ohne Landmassen in Nähe der Pole ist eine Eiszeit nicht möglich, da sich im Meer kein Eis auf türmen kann. Im Karbon befanden sich die meisten Kontinente in der Nähe des Südpols, was eine Vergletscherung ermöglichte, die sich von dort bis zum 40. südlichen Breitengrad erstreckte.

Auch wenn die Kontinente sich jährlich nur um einige Zentimeter verschieben, so bestimmt ihre Position im Rahmen geologischer Zeiträume das Klima. Wir spüren die Auswirkungen nicht, und die Menschheit wird vermutlich noch vor einem neuen Klimaumschwung von der Erde verschwunden sein, denn das Auseinanderdriften der Kontinente spielt sich im Zeitraum von Millionen von Jahren ab.

3. Milankovitch, die Intuition des Astronomen : *die Erdumlaufbahn*

Zwischen 1920 und 1941 wies der serbische Astronom Milutin Milankovitch nach, dass sich der Rhythmus der Eiszeiten seit 400'000 Jahren durch schwache Unregelmäßigkeiten in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne erklären lässt.

Für Milankovitch sind die Ursachen der Eiszeiten in den Schwankungen der Erdumlaufbahn zu suchen. Die Bewegung der Erde um die Sonne ändert sich unter dem gemeinsamen Einfluss der anderen Planeten und des Mondes auf drei Arten und bewirkt dadurch Zyklen von 100'000, 40'000 und 20'000 Jahren.

Die erste Abweichung betrifft die Exzentrizität der Erdumlaufbahn um die Sonne. Über eine Periode von 100'000 Jahren hinweg geht diese von einer fast kreisrunden Form zu einer leicht elliptischen Form über.

Die zweite Abweichung betrifft die Neigung der Rotationsachse der Erde bezogen auf ihre Umlaufbahn. Sie variiert im Zeitraum von 41'000 Jahren zwischen 22° und 25° .

Die dritte Abweichung wird von der Präzession verursacht, einer Richtungsveränderung der Erdachse, die – ein bisschen wie bei einem Kreisel – im Zeitraum von 21'000 Jahren Schwankungen aufweist.

Exzentrizität, Neigung und Präzession ergeben jeweils eine eigene Kurve für die Sonneneinstrahlung. Die Kombination dieser Kurven widerspiegelt exakt die Abfolge der Eiszeiten und Wärmeperioden und bestätigt damit die geniale Intuition von Milankovitch.

4. Eine Heizungsperiode : *Meeresströmungen*

Vor 10'000 Jahren, am Ende der letzten Eiszeit erwärmte sich das Klima in Europa so stark, dass es damals im Durchschnitt 2° heisser war als heute. Aus diesem Grund lag die Waldgrenze in den Alpen dazumal auf 2500 m Höhe, wo heute nur noch magere Wiesen vorhanden sind. Dann kehrte vor ungefähr 8200 Jahren die Kälte plötzlich zurück – ein gewaltiger Temperatursturz von fast 4° , der 200 Jahre lang anhielt.

Die Ursache dieser Abkühlung ist ein immenser, heute verschwundener See in Nordamerika. Der Lake Agassiz, benannt nach dem berühmten Forscher, war 9mal so gross wie die Schweiz. Das Wasser war von einer riesigen Eiskappe eingedämmt, die den Norden Kanadas bedeckte und die Flüsse daran hinderte, sich in die Hudson-Bay zu ergiessen.

Nach dem Rückzug der nordamerikanischen Gletscher vor ungefähr 8200 Jahren gab der Damm nach, und in sehr kurzer Zeit entleerte sich praktisch der ganze See über die Hudson-Bay in den Nordatlantik.

Die Wissenschaftler vermuten, dass dieser gewaltige Zufluss von Süßwasser ins Meer die Strömungen des Nordatlantik durcheinanderbrachte. Die Zirkulation des Golfstroms – eine Meeresströmung, die in den warmen Wassern des Golfs von Mexiko entsteht und den Atlantik durchquert – sei unterbrochen worden und hätte dadurch die Rückkehr der Kälte in Europa bewirkt.

Es gab also eine Art "Heizungsperiode", die uns daran erinnert, dass ohne den Golfstrom unsere Winter so kalt wie in Québec wären und die Eisbären sich in den norwegischen Fjorden tummeln würden.

5. Die eisige Herrschaft des Sonnenkönigs : *die Aktivität der Sonne*

Der Sonnenkönig trägt seinen Namen zu Unrecht. Die Herrschaft Ludwig XIV. fällt Tat und Wahrheit in die kälteste Periode der Kleinen Eiszeit, die das Klima in Europa von ungefähr 1300 bis 1850 bestimmte.

Diese Periode, von den Klimatologen das Maunder-Minimum genannt, dauert von 1645 bis 1715. Die mittleren Temperaturen waren nur um 1° niedriger als heute, aber die Folgen waren verheerend. Die beissende Kälte einiger Winter und die dadurch verursachte Hungersnot haben es zu trauriger Berühmtheit gebracht. In Frankreich starben allein in den Jahren 1693 und 1694 fast 2 Millionen Menschen.

Die Ursache dieser Katastrophe liegt in der Veränderung der Sonnenaktivität, die sich an der Anzahl Sonnenflecken ablesen lässt. Schon damals waren die Sonnenflecken Anlass für genaue Beobachtungen und lebhaft Debatten. Galilei, der Erfinder des astronomischen Teleskops, studierte sie seit 1609. Nach 1645 wurden sie seltener und verschwanden fast gänzlich, um 70 Jahre später wieder zu erscheinen – unmittelbar gefolgt von einem Temperaturanstieg.

Die Launen der Sonne scheinen mit dem Klima unseres Planeten zu spielen. Dies hängt jedoch mehr von der zeitlichen Veränderung des Magnetfelds der Erde als von den Schwankungen der Sonnenintensität ab.

6. 1816, das Jahr ohne Sommer : *Vulkanismus*

Bei gewaltigen Vulkanausbrüchen werden grosse Wolken von Asche bis in die Stratosphäre geschleudert. Daraufhin werden diese von den Jet-Streams, starken Winden in grosser Höhe, schnell rund um den Erdball verteilt. Die Zeit, während der die Staubteilchen in der hohen Atmosphäre schweben, kann mehrere Jahre dauern. Dadurch ist die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche reduziert.

So hat am 10. April 1815 der Ausbruch des Vulkans Tambora in Indonesien eine weltweite Abkühlung um fast 1° bewirkt.

Das folgende Jahr, 1816, war katastrophal. Dauerregen und Hagel hatten eine schlechte Ernte und Hungersnot zur Folge. In Frankreich und in der Schweiz war die Weinlese so spät wie nie mehr danach.

Drei Jahre lang lag die Sonneneinstrahlung, behindert durch einen sauren, trockenen Dunst, unter dem Durchschnitt. . Spuren dieses Dunstes waren auf den Gletschern Grönlands noch bis 1818 zu sehen.

Ein einziger Ausbruch reicht nicht aus, um eine langfristige Klimaänderung zu bewirken. Doch die grössten vulkanischen Ereignisse der Erdgeschichte haben vermutlich Eiszeiten ausgelöst.

7. Warum ist das Packeis des Nordpols bedroht? : *die Albedo der Erde*

Jeder, der sich einmal im Sommer die Oberschenkel verbrannt hat, weil er das Auto an der Sonne stehen liess, weiss, dass schwarze Sitze viel mehr Hitze absorbieren als weisse. Aber wussten Sie auch, dass die Erde ebenso reagiert und dass dieses Phänomen Albedo genannt wird?

Die Albedo eines Spiegels beträgt 100%, weil er das Licht in seiner Gesamtheit reflektiert. Umgekehrt beträgt die Albedo eines schwarzen Gegenstands 0%, da er nur die Wärme, aber nicht das geringste sichtbare Licht reflektiert..

Im Fall der Erde ist die Albedo sehr unterschiedlich. Sie beträgt 75-95% für Neuschnee, 40-60% für Eis, 30-40% für das Meer, 15-25% für Kulturland, 5-15% für dunklen Boden.

Die Albedo der Erde spielt eine wichtige Rolle für das klimatische Gleichgewicht. Die Veränderung der Albedo ist stets die Folge einer Abkühlung oder Aufwärmung unseres Planeten. Dieser Faktor verstärkt die Klimaänderung zusätzlich: bei einer Abkühlung steigt mit der Zunahme der schnee- und eisbedeckten Flächen auch die Albedo und verringert den Anteil der von der Erde gespeicherten Wärme der Sonne. Umgekehrt bei einer Klimaerwärmung: Je mehr Schnee schmilzt, desto mehr Wärme absorbiert die Erde - und der Schnee schmilzt noch schneller.

Das gegenwärtige Schmelzen der arktischen Eiskappe könnte also ausser Kontrolle geraten, wenn an Stelle des reflektierenden Packeises ein Meer träte, das das Licht absorbieren würde.

8. Der Planet erwärmt sich : *das CO₂ und die Treibhausgase*

In den letzten 150 Jahren hat sich die Erde um 0,7° erwärmt. Dies macht sich besonders in der nördlichen Hemisphäre und dort vor allem in den höheren Breitengraden bemerkbar. Die Ursache dieser Erwärmung steht ausser Zweifel. Als Folge der industriellen Entwicklung hat sich der Gehalt der Treibhausgase in der Atmosphäre gewaltig erhöht

Metan z. B. wird beim Reisanbau und bei der Viehzucht freigesetzt oder entweicht aus lecken Leitungen. Vor allem aber spielt das CO₂ eine Rolle. Kohlendioxid wird bei der Verbrennung fossiler Energien frei: Heizungen, Automobile, Kraftwerke.

Jedes Jahr entweichen 7 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre. Die Hälfte davon wird von der Vegetation und von den Ozeanen absorbiert, die andere Hälfte aber sammelt sich in der

Atmosphäre an. Das Resultat ist dramatisch: Der Gehalt an Kohlendioxid ist seit Beginn der Industrialisierung um 30% gestiegen.

Man wird nicht darum herumkommen: Um die Klimaerwärmung wirksam zu bekämpfen, gibt es keine andere Lösung, als mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln die Emission von Kohlendioxid zu verringern.

9. Die Zukunft der Gletscher?

Das Eis zieht sich überall zurück: In den Alpen schrumpfen die Gletscher und der ewige Schnee. Das arktische Packeis zerfällt. In der Antarktis driftet eine Eisscholle die halb so lang wie die Schweiz ist ab und es entstehen neue Küsten.

Ist damit schon das Ende der Gletscher eingeläutet?

Das Ende der Menschheit vielleicht, nicht aber dasjenige der Gletscher. Vielleicht überleben nur einige wenige Menschen in einer Welt, die wegen des angestiegenen Meeresspiegels und der Versteppung der Kontinente verwüstet ist.

Aber das Ende der Eiszeiten? Das anzunehmen, wäre übertrieben. Glaubt man den Geologen, so werden die Gletscher in einigen zehntausend Jahren wieder wachsen. Das ist ebenso gewiss wie die kleinen Umwege die sich die Erde, bei ihrem Tanz um die Sonne weiterhin gestatten wird.

6. Zum Abschluss: Optimismus oder Pessimismus?

Ich führe den Kampf für den Planeten und den Menschen weiter, ohne die geringste Aussicht auf Erfolg. Aus Gewohnheit. Aus Pflichtgefühl. Aber ohne anderes zu erhoffen, als darüber lachen oder weinen zu können – wie der Musiker der Titanic, der Näher mein Gott zu Dir spielte, bis zu den Knien im Wasser.

Yves Paccalet *L'humanité disparaîtra, bon débarras!*
(Die Menschheit wird verschwinden, die hätten wir los!)
2006

Soll man in einer Zeit, in der das Eis sich überall zurückzieht und in der die Klimaerwärmung ein Anlass zu weltweiter Besorgnis geworden ist, denken, die Gletscher würden für immer verschwinden?

Gewiss nicht. Neue Eiszeiten werden bestimmt wieder kommen. Man muss sich weniger um die Gletscher Sorgen machen als vielmehr um die Menschheit. Es ist durchaus möglich, dass die Menschen eine Klimaerwärmung nicht überleben werden, oder wenn, dann nur eine sehr kleine Anzahl von ihnen und unter wenig beneidenswerten Bedingungen. Die Erwärmung wird von den Menschen selbst verursacht – darüber bestehen keine Zweifel mehr – sie schicken jedes Jahr Milliarden von Tonnen CO₂ in die Atmosphäre.

Bringen wir es fertig, unserem zügellosen Konsum fossiler Brennstoffe Einhalt zu gebieten? Kann man ein Happy End erhoffen? Nach mehr als zehn Jahren ziemlich unfruchtbarer Versuche in der Schweiz und in einigen europäischen Ländern und angesichts ausbleibender konkreter Massnahmen auf dem restlichen Erdball, ist es erlaubt, pessimistisch zu sein.

Anhang

Was für ein Fortschritt seit 10 Jahren? Das zu langsame Bewusstwerden um die globale Erwärmung.

Im Rahmen der Ausstellung *L'AIR* (Die Luft) (1996-1997) führte das Naturhistorische Museum von Neuenburg in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Gesellschaft für Umweltschutz (SGU) bei seinen Besuchern eine Umfrage durch. Sie diente dazu, den Grad des Bewusstseins über die Gefahren zu messen, die die Luft und die Atmosphäre im allgemeinen bedrohen.

Indem Sie heute die selben Fragen beantworten, helfen sie uns, die Entwicklung des Bewusstwerdens um die klimatische Problematik besser zu erfassen.

Resultate der Umfrage 1996-1997

Sind Sie bereit, Ihr Auto weniger und die öffentlichen Verkehrsmittel mehr zu benutzen, um Ihren Kohlendioxidausstoss zu vermindern?

- | | |
|--|-------|
| - nein | 22% |
| - nein, aber ich werde ihn nicht vermehren | 9,5% |
| - ja, aber erst wenn die öffentlichen Verkehrsmittel billiger werden | 14% |
| - ja, ich werde ihn ein wenig vermindern | 15,5% |
| - ja, ich werde ihn stark vermindern | 39% |
- (Anzahl Antworten: 16'737)

Was halten Sie von einer CO₂-Steuer?

- | | |
|--|-------|
| - ich bin dafür | 18,5% |
| - ich akzeptiere sie nur widerwillig | 9% |
| - ich bin dagegen | 16,5% |
| - sie dient nur dazu, die Bundeskassen zu füllen | 39% |
| - was ist die CO ₂ -Steuer? | 17% |
- (Anzahl Antworten: 11'096)

Befürchten Sie katastrophale klimatische Auswirkungen bei einer globalen Erwärmung der Erde um nur 2 Grad?

- | | |
|--|-------|
| - ja | 36,5% |
| - nein | 34% |
| - ich glaube nicht an diese Voraussagen | 7,5% |
| - nein, nicht bei einem so kleinen Temperaturanstieg | 10% |
| - wir hätten schöneres Wetter in der Schweiz | 12% |
- (Anzahl Antworten: 12'560)

Energie der Verzweiflung... Hoffnung auf Energien

Mit diesem Text endete die Ausstellung L'AIR (1996-1997) des Naturhistorischen Museums Neuenburg, die auch in Lausanne und in Genf gezeigt wurde. Er hat nichts von seiner Aktualität eingebüsst, das Bedürfnis an konkreten Massnahmen ist heute grösser denn je.

Seid fruchtbar und mehret Euch... füllet die Erde und machet sie Euch untertan. Bravo! Wir haben es geschafft... wir sind fünfeinhalb Milliarden. Nur ist es jetzt die Erde, die uns nicht mehr aushält.

Nichts kommt hinzu, nichts geht verloren. Die Gesetze der Chemie machen weder Geschenke noch Kompromisse. Die Bilanz ist unerbittlich: Wenn wir die Reserven fossiler Energien verbrennen, steigt der Gehalt an Kohlendioxyd in der Atmosphäre und mit ihm die Erdtemperatur um 0,3 Grad pro Jahrzehnt.

Sein geographischer Ursprung ist bekannt: $\frac{3}{4}$ des von Menschen erzeugten Kohlendioxyds stammen aus der industrialisierten Welt, nur ein Viertel kommt aus den Entwicklungsländern, deren Bevölkerung 4mal so gross ist.

Ein Amerikaner produziert gleichviel Kohlendioxyd wie 20, ein Europäer gleichviel wie 10 Afrikaner.

Auch die Quelle des Kohlendioxyds ist bekannt: mehr als 90% stammen von fossilen Brennstoffen, die für den Gewinn von Energie verbrannt werden. Je mehr Erdöl, Kohle oder Erdgas konsumiert werden, desto mehr Kohlendioxyd befindet sich in der Atmosphäre.

Wie kann die – legitime – Entwicklung weniger fortgeschrittener Länder mit Hilfe fossiler Brennstoffe stattfinden, ohne die Krise zu verschärfen? Wie kann der enorme Energiekonsum unserer Länder vermindert werden? Machen wir uns doch nichts vor :ohne eine tiefgreifende Veränderung der Lebensweise und der industriellen Produktion ist dies unmöglich.

Auch wenn wir nur eine winzig kleine Verbesserung der Lebensbedingungen für die Milliarden der Bewohner der armen Länder anstreben und dabei den Konsum in den entwickelten Ländern beispielsweise um 20% reduzieren würden: Dies würde nicht genügen, um die Konzentration des Kohlendioxyds in der Atmosphäre zu stabilisieren.

Also, was tun? Nukleare Energie liefert Strom, ohne den Treibhauseffekt zu vergrössern, das stimmt. Aber, um jedem Chinesen den Besitz eines Kühlschranks und eines Autos zu ermöglichen, bräuchte es 3500 Atomkraftwerke! Wie kann eine solche Vielzahl von Installationen kontrolliert, wie können ihr Unterhalt und ihre Sicherheit gewährleistet, die Unfallrisiken in Grenzen gehalten werden? Wie kann die Kontrolle des gefährlichen, radioaktiven Atommülls über mehrere tausend Jahre garantiert werden? Die katastrophalste aller Lösungen ist programmiert.

Es bleibt nur ein vernünftiger Weg: die wissenschaftlichen und technologischen Erkenntnisse nutzbar machen und entwickeln, um den Konsum zu drosseln, die Quellen erneuerbarer Energien besser nutzen: Holz, Sonnen- und Windenergie, hydraulische und geothermische Energie. Zugegeben, der zu leistende Aufwand ist kolossal. Aber es bleibt keine andere Wahl!

Wenn wir diese Wette gewinnen wollen, so müssen wir uns aber auch bewusst sein, dass es sich nicht um ein rein technisches oder ökonomisches Problem handelt... Jeder einzelne Bewohner der Erde muss sich betroffen fühlen, jede Regierung muss, mit ihren eigenen Mitteln am gemeinsamen Projekt mitarbeiten. Die neuen Technologien der fortgeschrittenen Länder sind für die Entwicklungsländer unentbehrlich. Die Tropenwälder sind auch für uns lebenswichtig!

Und wenn die Solidarität heute mehr als nur ein moralisches Prinzip wäre? Wenn sie eine Bedingung für das Überleben geworden wäre?