Steinige Wege *zum Leben*

Seit Milliarden von Jahren sind die Welt der Gesteine und die Welt des Lebens über die Wirkung des Wassers eng verbunden. Die mineralische Vielfalt und die biologische Entwicklung stehen somit in Zusammenhang.

Gerade im Dialog mit den Steinen zeigen sich daher auch Wege zu einem tieferen Verständnis von Leben. Zentrale Fragen öffnen diese Wege und führen zu den Ursprüngen, Beziehungen und Merkmalen der belebten Welt: Welche Rolle spielen Gesteine beim Ursprung des Lebens? Welche Beziehungen bestehen zwischen Leben und Gestein? Durch welche Merkmale unterscheidet sich Leben grundlegend von Gestein?

Drei steinige Wege führen durch diese Ausstellung:

Vom Stein zum Leben

Vom Leben zum Stein

Vom Unterschied zwischen Stein und Leben

Ursprung in der tiefen Erdkruste

Entstand das Leben auf der Erde vielleicht gar nicht im Meer, sondern in der Erdkruste?

Hintergrund

Noch heute kommt Leben in der Erdkruste auch in Tiefen weit über 1000 m vor. Einzellige Lebewesen nutzen winzige wassergefüllte Gesteinsspalten und Risse, um Energie aus chemischen Reaktionen in Gesteinen zu gewinnen. Sonnenlicht benötigen sie dazu nicht.

Vor 4 Milliarden Jahren muss es zu ausgeprägter Bildung von Rissen bis tief in die Gesteinskruste gekommen sein. Denn Mond und Erde waren sich viel näher, und der Mond umkreiste die Erde in wesentlich kürzerer Zeit als heute. Auch drehte sich die Erde damals deutlich schneller. Gezeitenkräfte waren somit enorm stark und wirkten in kürzeren Zyklen, so dass sich die Erdkruste periodisch sehr deutlich verformte. Zudem waren Einschläge von Asteroiden viel häufiger als heute. All dies muss zu einer tiefen Zerrüttung der Erdkruste geführt haben.

Was bedeutet das für den Ursprung des Lebens?

Wasser und CO_2 unter hohem Druck füllten Verwerfungen und feine Risse der zerrütteten Kruste. In diesen Rissen standen verschiedene Energieformen zur Verfügung: Neben chemischer Energie durch die Reaktion von Wasser mit Gestein sowie Wärme durch Asteroideneinschläge und Gezeitenreibung konnte auch elektrische Energie über die periodische Verformung piezoelektrischer Minerale entstehen. Die Risse erweiterten und verengten sich periodisch im Zyklus der extremen Gezeiten. So könnten sie als winzige, langsam pulsierende Reaktionsräume die chemische Evolution und schließlich die Entstehung von Leben ausgelöst haben.[1]

Was zeigt das Exponat?

Ausgestellt ist eine Gesteinsprobe der Erdkruste aus mehr als 1000m Tiefe, die aus dem Rieskrater durch eine Bohrung an die Oberfläche geholt wurde. Das Gestein wurde durch den Asteroideneinschlag zerbrochen und hat sich neu verbunden. Es enthält mikroskopisch kleine Risse, ähnlich denen, die in der Frühzeit der Erde als Ort für die Entstehung des Lebens diskutiert werden.[2]

Ursprung in der Tiefsee

Wenn das Leben im Meer entstand, dann vermutlich nicht in offenem Wasser. Denn ohne einen abgegrenzten Reaktionsraum, der die molekularen Bausteine des Lebens zusammenbringt und beisammen hält, ist die Entstehung von Leben kaum vorstellbar. Aber die Tiefsee hält einige Überraschungen bereit.

Hintergrund

Völlig unerwartet fand man vor einigen Jahrzehnten in der Tiefsee bizarre mineralische Gebilde, die als heiße rauchende Schlote aus dem Boden ragen. Obwohl in dieser Meerestiefe keinerlei Sonnenlicht mehr vordringt, wimmelt es an diesen Schloten vor Leben.

Was bedeutet das für den Ursprung des Lebens?

Die Forschung zur Geologie und den Eigenschaften von Tiefseeschloten konnte zeigen, dass sie eine hoch poröse Struktur besitzen. Die winzigen Poren stellen vom offenen Meer weitgehend abgegrenzte Reaktionsgefäße dar. Eine Nachstellung solcher Schlote in Laborexperimenten zeigte, dass sich in den Poren komplexe organische Verbindungen bilden und konzentrieren können. Die erforderliche Wärmeenergie für solche Vorgänge stammt in der Tiefsee aus dem Erdinneren, während die benötigte chemische Energie entsteht, wenn das Krustengestein unter hohem Druck mit dem Meerwasser reagiert.

Was zeigt das Exponat?

Das Exponat zeigt einen hydrothermalen Schlot aus wasserhaltigen Eisenydroxid-Mineralen. Er wurde an der Ludwig-Maximilians-Universität München im Labor der Forschungsgruppe um Prof. Bill Orsi gezüchtet. Solche Schlote dienen Untersuchungen zum Ursprung des Lebens in der Tiefsee. Züchtung und Präparation für die Ausstellung: Vanessa Helmbrecht.

Ursprung durch Meteorite

Leben ist auf der Erde erstaunlich schnell entstanden. Die ältesten Hinweise stammen aus einer Zeit, als die noch abkühlende Erde gerade lebensfreundliche Bedingungen erreichte. Ist der Ursprung des Lebens relativ einfach oder entstehen zumindest die Bausteine des Lebens schon im All? Die Untersuchung von Meteoriten fördert Überraschendes zu Tage.

Hintergrund

Meteoriten sind auf der Erde gelandete Bruchstücke anderer Himmelskörper des Sonnensystems. Vor allem Asteroiden sind ihre Quelle. Beim Zusammenprall von Asteroiden können herausgeschlagene Gesteinsbrocken und Staub auf eigenen Bahnen um die Sonne geraten und schließlich auf die Erde stürzen. Einige Meteoriten weisen Merkmale auf, die auf flüssiges Wasser im ursprünglichen Asteroiden hinweisen. Wärme, vor allem erzeugt durch radioaktive Strahlung im Kern größerer Asteroiden, kann Eis im darüber liegenden Krustengestein zum Schmelzen bringen. Durch chemische Energie aus dem Kontakt des Gesteins mit dem flüssigen Wasser können Bedingungen entstehen, die eine chemische Entwicklung in Gang setzen.

Was bedeutet das für den Ursprung des Lebens?

Einige kohlenstoffreiche Meteoriten enthalten organische Moleküle, die das Ergebnis einer erstaunlich weit fortgeschrittenen chemischen Entwicklung sind.[11] Darunter sind molekulare Bausteine von DNA, Proteinen und Zellmembranen. Da diese Moleküle die heiße Phase beim Eintritt der Meteoriten in die Erdatmosphäre überstehen, ist es möglich, dass auch in der Frühzeit der Erde komplexe Biomoleküle aus dem All auf die Erde gelangen konnten und dort als Bausteine für die Entstehung des Lebens dienten.

Was zeigt das Exponat?

Ausgestellt sind Stücke des Meteoriten „Almahata Sitta". Es ist ein kohliger Chondrit, in dem molekulare Bausteine von DNA und Proteinen nachgewiesen werden konnten.[11] Im Hintergrund ist eine Aufnahme eines Mikrometeoriten zu sehen. Mikrometeoriten sind kosmische Staubteilchen, die ebenfalls komplexe organische Moleküle mitführen können. Schätzungsweise 100 Tonnen pro Tag erreichen die Erdoberfläche.

Ursprung an Land

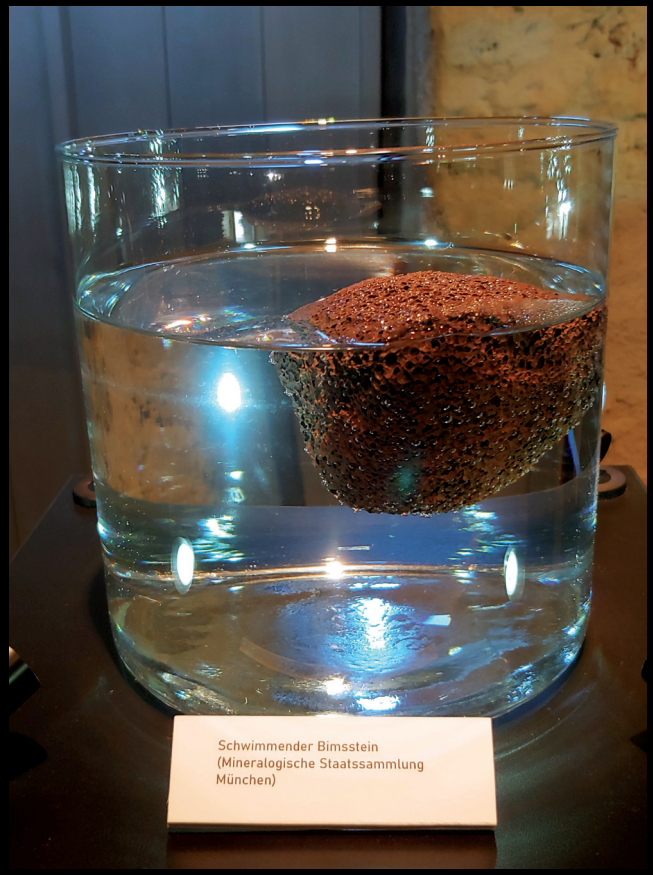
Vor 4 Milliarden Jahren hatte die Erde ein ganz anderes Erscheinungsbild: Kontinente als Landmassen fehlten, wie geologische Befunde nahelegen. Ein weltumspannender Ozean muss daher die Erde bedeckt haben. Dennoch wird eine Entstehung des Lebens an Land vielfach diskutiert. Warum?

Hintergrund

Molekulare Bausteine des Lebens können sich in freiem Wasser nicht zu DNA oder Eiweißstoffen verbinden. Das Wasser hemmt diesen Vorgang. Zahlreiche Annahmen zur Entstehung des Lebens basieren daher auf Umgebungen, in denen Wasser durch wiederholtes Austrocknen von Lösungen immer wieder entfernt wird. Austrocknung erfordert jedoch einen direkten Kontakt mit der Atmosphäre. Dafür muss eine feste Oberfläche vorhanden sein. Trotz eines globalen Ozeans ist das auf verschiedene Weise möglich: Zum einen können sich durch Ausbrüche von Unterwasser-Vulkanen mit gasreichem Magma schwimmende Steinfelder bilden. Sie bestehen aus Bimsstein, der durch viele luftgefüllte Poren so leicht ist, dass er auf Wasser treibt. Auch können Vulkane so groß werden, dass sie vereinzelt die Wasseroberfläche durchbrechen. Sie formen durch Inselketten auf diese Weise Landmassen mit heißen Quellen.

Was bedeutet das für den Ursprung des Lebens?

Es gibt zahlreiche Hypothesen und Laborexperimente, die Austrocknungszyklen zur Grundlage haben. Sie beziehen sich auf geologische Umgebungen wie schwimmenden Bimsstein[8] oder heiße Quellen[9], die solche Zyklen auf Mineraloberflächen erlauben. Unter diesen Bedingungen können sich einfache Moleküle zu Eiweißstoffen oder RNA verbinden, aber auch Fettsäurebläschen ähnlich biologischer Zellwände bilden.



Was zeigt das Exponat?

Ausgestellt ist ein auf Wasser treibender Bimsstein. Aus solchen Steinen können sich nach untermeerischen Vulkanausbrüchen sogenannte „Bimssteinflöße“ bilden – ausgedehnte Steinfelder, die auf dem Meer schwimmen. Hinweise auf solche Felder sind aus der Erdfrühzeit bekannt. Als eine Art „Landoberfläche“ könnten sie günstige Bedingungen zur Entstehung des Lebens geschaffen haben.

Ursprung durch Blitze

In einem bahnbrechenden Experiment, das die Forschung zum Ursprung des Lebens sehr beeinflusste, spielten Blitze in einer simulierten Uratmosphäre eine zentrale Rolle. Es gelang, wichtige molekulare Bausteine des Lebens zu erzeugen. Jahrzehnte später machten jedoch Forscher, die das Experiment nachstellten, eine völlig überraschende Entdeckung: Ein Mineral stellte sich für die Erzeugung als sehr wichtig heraus. Doch es wurde dem Experiment nie zugesetzt. Wie ist das erklärbar?

Hintergrund

Die Bildung komplexer Moleküle aus einfacheren Bausteinen erfordert Energie. Blitzentladungen sind eine Möglichkeit, diese Energie zuzuführen. Im Miller-Urey- Experiment werden in einem Glaskolben Blitze in einer simulierten Uratmosphäre erzeugt, um zu testen, ob sich dadurch wichtige Bausteine des Lebens bilden. Es entsteht ein Niederschlag im Glaskolben, in dem man tatsächlich auch Komponenten von Proteinen und DNA findet. Als man nun versuchte, das Experiment mit einem Kolben aus Teflon anstelle von Glas nachzustellen, war die Ausbeute jedoch extrem gering, einige Moleküle fand man gar nicht.[10] Die Oberfläche des Kolbens aus Silikatglas im ursprünglichen Experiment spielte also eine sehr wichtige Rolle, was bis dahin niemand bemerkt hatte.

Was bedeutet das für den Ursprung des Lebens?

Silikatglas kann unter Bedingungen der frühen Erde vielfach entstehen. Darunter auch als vulkanisches Glas in Aschewolken. Blitze sind in solchen Wolken häufig. Die aktuellen Erkenntnisse aus diesem Experiment zeigen, dass der Weg zur Bildung molekularer Bausteine des Lebens durch Blitzentladungen in der frühen Atmosphäre über mineralische Silikatpartikel in den Wolken führt.

Was zeigt das Exponat?

In der Vitrine ist eine Plasmaröhre aufgebaut. In ihrem Glaskolben werden Blitzentladungen in einer sauerstofffreien Atmosphäre wie die der Urerde nachstellt. Vor der Plasmaröhre befindet sich ein fossiler Blitz. Solche Gebilde werden als Fulgurit bezeichnet. Sie entstehen, wenn ein Blitz in einen sandigen Boden einschlägt und durch die große Hitze im Plasmakanal die Sandkörner zu länglichen Gebilden verschmilzt.

Ursprung in nanofluidem Wasser

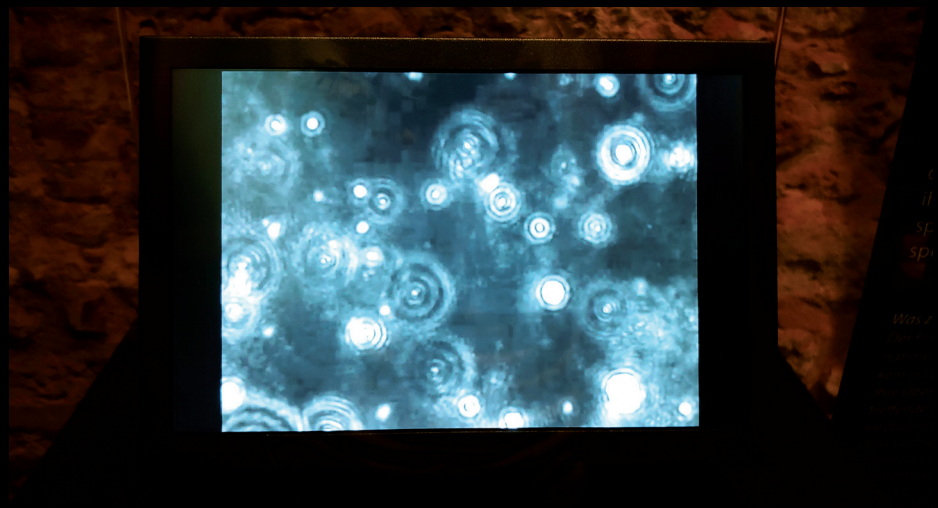
Ein großes Rätsel, wenn es um den Ursprung des Lebens geht, ist Wasser. Es verhindert die Bildung lebensnotwendiger Eiweißstoffe und Nukleinsäuren oder zerstört sie sogar, falls sie vorhanden sind. Gleichzeitig ist Wasser aber die Grundlage allen Lebens. Wie lässt sich dieser Widerspruch auflösen?

Hintergrund

Wasser kann völlig andere Eigenschaften als gewohnt annehmen, wenn es räumlich stark eingegrenzt wird.[4] Dies geschieht unter anderem, wenn kleinste mineralische Partikel dicht gepackt in ihm verteilt sind. Wasser liegt dann überwiegend als wenige Nanometer (milliardstel Meter) dünner Film um die Partikel oder zwischen ihnen vor. Geologisch kommt dies in Gesteinsspalten der Erdkruste und in Asteroiden sowie insbesondere in Tiefseeschloten, lockeren Sedimentschichten, heißen Quellen und in Wolkentröpfchen vor.

Was bedeutet das für den Ursprung des Lebens?

Das Innere lebender Zellen ist dicht gepackt mit kleinsten Biopartikeln, darunter Proteine. Zwischen ihnen, aber auch innerhalb einiger Proteine, ist Wasser stark räumlich begrenzt. Es wird dabei genau wie in geologischen Umgebungen zu einem Nanofluid und nimmt sehr exotische Eigenschaften an. Doch gerade diese Eigenschaften sind in einer Zelle unverzichtbar für die Bildung und Stabilität von DNA und Proteinen. Die Bedeutung dieser Eigenschaften für die Biologie und ihre Brücke zur Geologie löst die Widersprüche zur Rolle des Wassers beim Ursprung des Lebens.



Was zeigt das Exponat?

Der Film zeigt eine Echtzeit-Aufnahme von Kohlenstoff-Nanopartikeln in Wasser.
Ihre Oberfläche streut das auftreffende Laserlicht und macht sie dadurch sichtbar. Zu sehen ist, dass sie ihren Abstand zueinander ständig ändern. Dies erfolgt durch Wärmebewegung. Beim Annähern bildet sich nanofluides Wasser zwischen den Mineralpartikeln. Mit dessen exotischen Eigenschaften gelang es, RNA aus molekularen Bausteinen ohne Hilfe lebender Zellen zu erzeugen.[12] Das Video entstand mit einem NanoSight Analyzer im Zentrum für Rieskrater- und Impaktforschung Nördlingen (ZERIN).

Mineralisation wird verursacht

Das Leben auf der Erde wird von einer mineralischen Vielfalt begleitet, die auf anderen Himmelskörpern im Sonnensystem bisher nicht bekannt ist. Wie hängt beides zusammen?

Hintergrund

Das Leben verändert seine geologische und atmosphärische Umgebung seit seinem Ursprung. Das treibt sowohl die biologische Evolution als auch mineralische Entwicklung der Erde an. So kam es vor etwa 2,5 Milliarden Jahren zu einer Anreicherung von Atmosphäre und Ozeanen mit Sauerstoff aus der Photosynthese. Doch Sauerstoff ist für Organismen eigentlich giftig. Das Leben musste sich daher an die Zunahme von Sauerstoff durch Evolution anpassen. Dies führte schließlich zur Vielzelligkeit und damit letztlich zu uns selbst.

Was bedeutet das für Gesteine?

Vor allem gelöste Eisenverbindungen werden durch die Reaktion mit Sauerstoff aus der Photosynthese ausgefällt oder umgewandelt und es bilden sich Gesteine aus Eisenoxiden. Auch die Ausfällung und Kristallisation anderer Minerale wird von den Bedingungen in der Umgebung wie etwa dem Gehalt an Kohlendioxid im Wasser bestimmt. Sind Lebewesen in der Nähe, verändern sie durch ihren Stoffwechsel diesen Gehalt. So entziehen Kolonien von Bakterien, Algen, Moosen oder auch Wurzeln in ihrer unmittelbaren Nähe dem Wasser gelöstes Kohlendioxid. Dadurch fällt Kalk um die Organismen aus und es kommt zur Bildung von Kalktuff. Zu den ältesten Nachweisen von Leben auf der Erde zählen Kalkablagerungen an Bakterienmatten. Diese sogenannten Stromatolithe stammen aus einer Zeit vor etwa 3,5 Milliarden Jahren.[13] Sie entstanden durch solche Ausfällungsprozesse.

Was zeigt das Exponat?

Ausgestellt ist Kalktuff, der 2024 in Nördlingen geborgen wurde. Relativ nahe an ihrem Ursprung enthält das Karstwasser der Eger viel gelösten Kalk. Dieser wird am Ufer durch Baumwurzeln, Moose und Algenteppiche ausgefällt – es entsteht Kalktuff.

Mineralisation wird organisiert

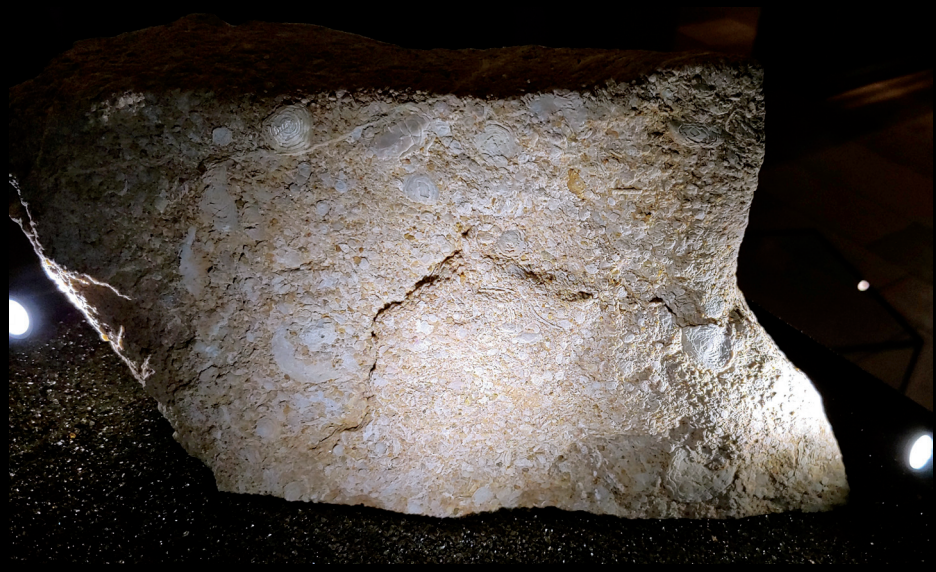
In manchen Gesteinen sind mineralische Gebilde in großer Formenvielfalt zu finden, die unmöglich durch normales Kristallwachstum entstehen könnten. Denn ihre Formen und Zusammensetzungen sind fern einer strengen Ordnung. Andererseits sind sie aber auch nicht chaotisch, denn sie treten untereinander in exakten Kopien auf. Wie ist das möglich?

Hintergrund

Die Zellen vieler Lebensformen können mit Hilfe von Proteinen Mineralbildungen auslösen und die entstandenen Minerale dabei organisieren. Dabei steuern Zellen bei der biologisch kontrollierten Mineralisation die Bildung von Kristallisationskeimen, die Wachstumsdynamik und das Erscheinungsbild des Mineralverbunds. Es können dabei auch sogenannte Nanokomposite entstehen, also Gebilde aus einem mineralischen Anteil aus Nanopartikeln, der für eine hohe Druckfestigkeit sorgt, und einem organischen Anteil aus Proteinen, der die Zugfestigkeit erhöht. Solche Nanokomposite sind etwa die Gehäuse von Schnecken oder die Knochen von Wirbeltieren.

Was bedeutet das für Gesteine?

Vor allem Kalk, Siliziumdioxid und Apatit spielen bei kontrollierter Biomineralisation eine große Rolle. Sterben solche Organismen ab, können sich deren mineralische Reste in so großen Mengen als Sediment ablagern, dass sie nach Verdichtung gesteinsbildend werden. Gesteine wie Kreide, Riffkalke (z.B. Weißjura der Schwäbischen und Fränkischen Alb, Kalkalpen), Radiolarit oder Feuerstein entstehen auf diese Weise.



Was zeigt das Exponat?

Ausgestellt ist Stein aus Nummulitenkalk. Er stammt aus einem Steinbruch bei Bad Heilbrunn (Geotop-Nummer: 173A003) und wurde dort früher als „Enzenauer Marmor" zur Verwendung als Baustein abgebaut.[14] Der Stein besteht nahezu vollständig aus den Gehäusen von Großforaminiferen – Einzellern, die in einem Schelfmeer vor rund 45 Millionen Jahren abgelagert wurden. Ein Dünnschliff dieses Gesteins ist als Projektion zu sehen.

Gestein wird genutzt

Es gibt einzelne Steine in Sedimentablagerungen, die dort aufgrund ihrer Größe, Form und Textur eigentlich nicht hingehören. Doch sie weisen keine der Merkmale von Meteoriten auf, die als Fremdkörper normalerweise in Frage kämen. Wie sind diese Steine dort hin gelangt und was hat sie geformt?

Hintergrund

Manche Tierarten nehmen Steine in ihren Magen auf. Pflanzen fressende Vögel nutzen sie, um darin Nahrung durch Reibung der Steine zu zerkleinern. Krokodile nehmen Steine dagegen als Ballast auf, um ihren Auftrieb im Wasser zu kontrollieren.

Was bedeutet das für Gesteine?

Diese Art der Nutzung von Steinen hinterlässt charakteristische Spuren. Obwohl Gastrolithen wie Kieselsteine gerundet sind, gibt es Merkmale, die sie von Kieseln unterscheiden. Dazu zählen mikroskopische Rillen durch die Wirkung von Magensäure und eine starke Polierung, die sich besonders an Erhebungen zeigt (bei Kieseln umgekehrt) und sie ähnlich wie ein benutztes Stück Seife aussehen lassen. Solche Steine werden als Gastrolithen bezeichnet. Sie werden durch die Wanderung der sie nutzenden Tiere in Gegenden verfrachtet, in denen sie geologisch eigentlich nicht vorkommen. Daraus lassen sich unter anderem auch bei Dinosauriern aus dem Jura teils lange Wanderungen ableiten.[15]

Was zeigt das Exponat?

Ausgestellt sind zwei Steine. Ihre Merkmale weisen darauf hin, dass es sich um Gastrolithen handelt. Vermutet wird eine Polierung im Magen von Pflanzen fressenden Dinosauriern wie etwa Tenontosaurus. Die Gastrolithen sind zwischen 140-100 Millionen Jahre alt und stammen aus der Cloverly Formation[16] in Montana, USA.

Gestein wird bearbeitet

Findet man im Gelände einen Faustkeil, so sticht er zwischen den anderen Steinen heraus. Etwas an seiner Gestalt ist als nicht natürlich erkennbar. Doch was ist das?

Hintergrund

Es gibt Tierarten wie Rabenvögel, die Materialien der Natur nicht nur in vorgefundener Form als Werkzeug nutzen, sondern aus ihnen Werkzeuge herstellen/ diese für den geplanten Werkzeuggebrauch bearbeiten.[17]
Dem Menschen gelingt eine Bearbeitung durch seine geistigen wie manuellen Voraussetzungen auch mit Gestein. Die Bearbeitung von Steinen zu Faustkeilen lässt sich bis zu 2 Millionen Jahre zurückverfolgen.[18] Bei der Bearbeitung ist eine Idealvorstellung der Form nötig, die dem beabsichtigten Zweck folgt.

Was bedeutet das für Gesteine?

Durch die Bearbeitung können Natursteine von einer chaotischen in eine geordnete Gestalt gebracht werden, die eine bestimmte Funktion für den Besitzer oder die Gesellschaft erfüllt. Mit der funk-tionellen Ordnung wird der Stein in den Grenzbereich zwischen Ordnung und Chaos geholt, in dem das Leben verortet ist, ohne dass es sich selbst um Leben handelt.

Was zeigt das Exponat?

Die Vitrine enthält eines der ältesten archäologischen Artefakte aus dem Nördlingen Ries: Ein Faustkeil, der auf ein Alter von 70.000 bis 80.000 Jahre geschätzt wird. Anhand der Größenverhältnisse und Bearbeitungsmerkmale wird er der Micoquien-Kultur der Neanderthaler zugeordnet. Gefunden wurde er in der Flur „Straßäcker“ (Flur Nr. 166) bei Großsorheim von Franz Krippner (Nördlingen).
Der Faustkeil wurde durch Bearbeitung von Jura-hornstein gefertigt. Haptik sowie Bearbeitungs- und Abnutzungsspuren des Artefakts weisen darauf hin, dass er als Werkzeug für eine eher kleine Hand gefertigt und mit der rechten Hand geführt wurde.

Gestein wird verarbeitet

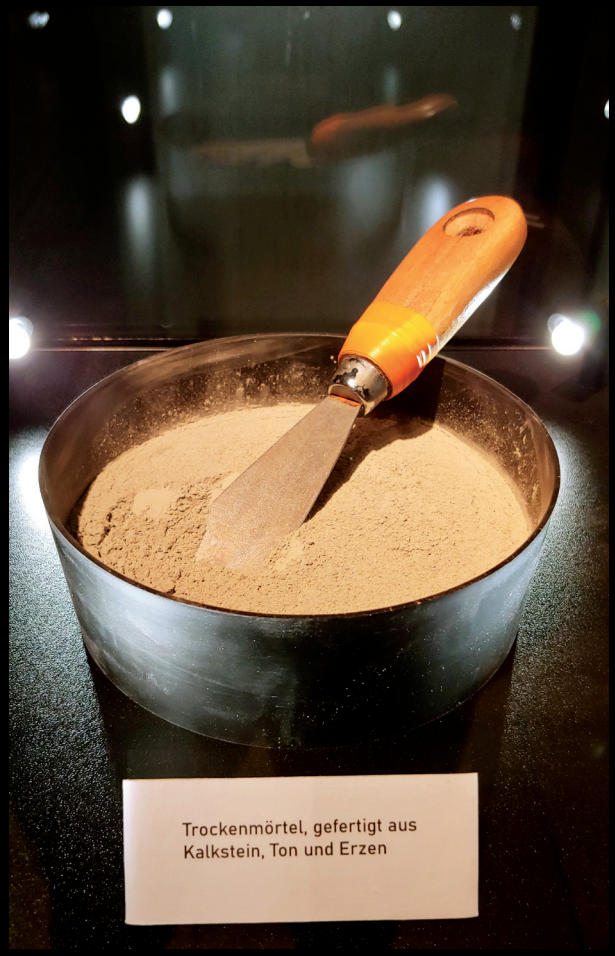
Kalk wird seit fast 10.000 Jahren gebrannt. Doch nicht die Energiegewinnung ist das Ziel wie etwa beim Verbrennen von Holz. Im Gegenteil, Kalkbrennen verbraucht viel Energie. Doch welchen Zweck hat es dann?

Hintergrund

Im Gegensatz zur Bearbeitung von Kalkstein durch Schneiden, Behauen, Schleifen oder Polieren wird er bei der Verarbeitung zu einem Produkt (Zement) umgeformt. Mit Wasser vermischt wirkt Zement als Bindemittel zwischen Gesteinskörnchen und erhärtet schließlich, so dass sich ein festes Gemisch bildet: Mörtel oder Beton. Das Brennen von Kalk ist eine wichtige Vorstufe und nutzt ein entscheidendes Phänomen: Beim Brennen wandelt sich Kalk unter Abgabe von Kohlendioxid in eine neue Phase um. Diese kann als Pulver gelagert und transportiert werden. Sobald jedoch Wasser zugegeben wird, erfolgt eine weitere Umwandlung, und das Gesamtgemisch wird hart. Werden dem Kalk zusätzlich Ton, Sand sowie Erze hinzugemischt und dieses Gemisch gemahlen und gebrannt, entsteht der sogenannte Portlandzement, der in der Bauindustrie eine große Bedeutung hat.

Was bedeutet das für Gesteine?

Die Verarbeitung von Kalk, Ton, Sand und Erzen bedeutet für diese Gesteine, dass sie zu einem völlig neuen Gesteinsmaterial umgeformt werden. Es bildet sich mit Mörtel und Beton ein unter Raumtemperatur quasi flüssiger Stein, der sich in eine beliebige Form gießen lässt, bis er aushärtet. Bringt man noch Bewehrungsstahl in das Gemisch, erhält man einen Verbundwerkstoff, der aufgrund des Betons eine hohe Druckfestigkeit und durch den Stahl eine hohe Zugfestigkeit besitzt. Dies ist ähnlich der Nanokomposite, die durch Biomineralisation entstehen.



Was zeigt das Exponat?

Ausgestellt ist eine Schale gefüllt mit Trockenmörtel. Verschiedene Gesteine, darunter Kalkstein, Ton und Erze, wurden bei der Verarbeitung zu diesem Produkt umgeformt.

Was ist der Unterschied?

Wie sähe Mars aus, wenn es dort Leben gäbe? Das Bild einer bewaldeten Landschaft in Tasmanien, die zufällig in ihrer Form einer Kraterlandschaft auf dem Mars ähnelt, gibt uns eine Vorstellung. Blicken wir jedoch hinter die Kulisse des sichtbaren Eindrucks, stoßen wir auf eine sehr wesentliche Frage: Was ist es genau, was wir auf dem Bild vom Mars nicht sehen? Was ist Leben?

Hintergrund
Nähert man sich der Frage über die Physik, beginnen sich die Grenzen zwischen Geologie und Biologie aufzulösen. Kristalle und Lebewesen erscheinen dann nur als zwei Extreme im Verlauf einer Anhäufung von Eigenschaften, die etwas mit Ordnung, Chaos, Energie und Information zu tun haben.

Was ist auf dem Mars zu sehen?
Die Marslandschaft zeigt nur Gestein – ein chaotisches Gemisch kleiner Kristalle, deren innere Struktur jedoch hoch geordnet ist. Wir sehen also ein Nebeneinander von Ordnung und Chaos. Manche Bilder zeigen aber auch Wirbelwinde. Es sind sogenannte dissipative Strukturen – geordnete Gebilde, die nur solange bestehen wie Energie ununterbrochen zugeführt wird (hier durch Aufwinde). Bei Wirbelwinden gehen chaotische Turbulenzen kurzzeitig in geordnete Bewegungen über, bis sie sich wieder auflösen. Wir sehen damit ein Pendeln zwischen Chaos und Ordnung.

Was ist auf dem Mars nicht zu sehen?
Was die Marslandschaft nicht zeigt, sind dissipative Strukturen, die sich selbst regulieren und Information aus der Umwelt verarbeiten. Damit passen sie sich an den Grenzbereich zum Chaos an, ohne ihn zu überschreiten. Sie verharren dort mittels einer Form von Stabilität, die durch Vervielfältigung ihrer Elemente erreicht wird. Die irdische Landschaft zeigt genau solche Strukturen: Lebewesen.

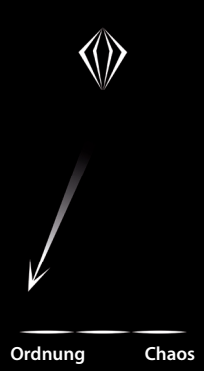
Marslandschaft. Foto: NASA / JPL / Cornell / Damia Bouic

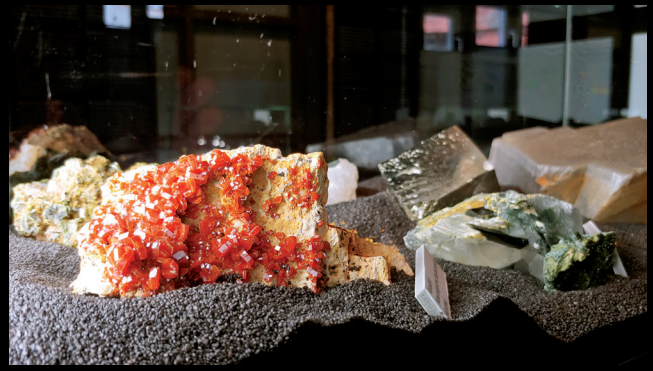
Landschaft in Tasmanien. Foto: Felix Andrews (Floybix)

Kristalle, Krill und Chaos

Die Aquarien lassen uns in verschiedene Welten zwischen Ordnung und Chaos eintauchen. Der Vergleich dieser Welten ebnet einen Weg zur Antwort auf die Frage, was Leben im Unterschied zu Gestein eigentlich ist. Was zeigen die einzelnen Aquarien?

Kristallgarten
Die ausgestellten Kristalle sind Gebilde, deren innere Struktur hoch geordnet ist. Das bedeutet: Die Anordnung der Atome, aus denen sie bestehen, folgt einer klaren Regelmäßigkeit. Das Aquarium bietet daher einen Blick in eine Welt, in der **Ordnung dominiert.**

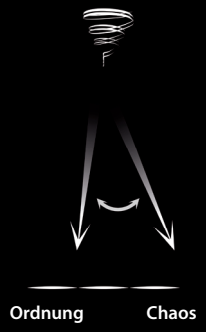




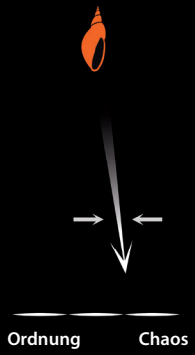
Chemischer Garten
Bizarre Strukturen aus Metallsilikaten wachsen in einer Wasserglaslösung von Metallsalzen. Sie werden von mikroskopisch kleinen Kristallen mit hoher innerer Ordnung gebildet. Die Kristalle verbinden sich untereinander jedoch so, dass weitgehend ungeordnete Strukturen entstehen. Wir blicken in eine Welt mit einem **Nebeneinander von Ordnung und Chaos.**

Kristalle, Krill und Chaos

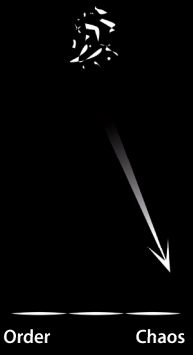
Wirbel
Ein Wirbel ist ein geordnetes Gebilde, das nur so lange besteht, wie Energie und Materie beständig hindurchfließt. Es handelt sich damit um ein sogenanntes dissipatives System: kein Gegenstand, sondern ein organisierter Zustand an der Grenze zum Chaos. Beim Wirbel gehen chaotische Turbulenzen kurzzeitig in geordnete Kreisbewegungen über, bis sie wieder die Grenze zum Chaos überschreiten und sich auflösen. Wir sehen damit ein **Pendeln zwischen Ordnung und Chaos.**



Lebewesen
Die Organismen im Aquarium sind ebenfalls dissipative Systeme. Im Unterschied zum Wirbel regulieren sie sich jedoch anhand von Information aus der Umwelt selbst, um im Fluss von Energie und Materie zu bleiben. Wir sehen damit eine **Anpassung an den Grenzbereich zwischen Ordnung und Chaos.**



Chaos
Es gibt hier keine Verbindung zwischen Bestandteilen, keine Regelmäßigkeit in der Anordnung und keine Funktionen als Elemente eines Systems. Das Aquarium zeigt daher eine Welt des **Chaos.**



Steinige Wege *zum Leben*

Eine Ausstellung des RiesKraterMuseums Nördlingen

Konzept / Kuratierung / Texte
PD Dr. Frank Trixler

Realisierung
PD Dr. Frank Trixler, R. Schumacher, K. Heck, Prof. Dr. Stefan Hölzl

Fotodesign / Grafiken
Hana Turhyt

Video- und Bildmaterial
DNA in Vesikel auf Granit:
Prof. Dr. Irep Gözen (University of Olso, Norway)
Foto Gastrolith:
Dr. Marcus Moser (Bayerische Staatssammlung für Paläontologie und Geologie)
Foto Mikrometeorit groß:
Jon Larsen & Jan Braly Kihle
Foto Mikrometeoriten klein:
Thilo Hasse

Leihgeber Kristalle und Bimsstein
Mineralogische Staatssammlung München

Leihgeber / Synthese hydrothermaler Schlot
Prof. Dr. William Orsi, Vanessa Helmbrecht (LMU München)

Weiterhin Dank an:
Daniel Birnbaum (Aqua Birne): Konzeption und Beratung Garnelen-Aquarium

Ines Günther mit Nin & Auri: Spende *Caridina*-Garnelen

Literatur

[1] Schreiber, U., Locker-Grütjen, O., Mayer, Ch. (2012): Hypothesis: Origin of Life in Deep-Reaching Tectonic Faults. Orig. Life Evol. Biosph. 42, 47–54.
[2] Matreux, T., Aikkila, P., Scheu, B., Braun, D., Mast, Ch. B. (2024): Heat flows enrich prebiotic building blocks and enhance their reactivity. Nature 628, 110-116.
[3] Padovani, E. R., Batzle, M. L.; Simmons, G. (1978): Characteristics of microcracks in samples from the drill hole Nördlingen 1973 in the Ries crater, Germany. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th, 2731-2748.
[4] Lee, H.-E., Russell, M., Nakamura, R. (2024) Water Chemistry at the Nanoscale: Clues for Resolving the "Water Paradox" Underlying the Emergence of Life. Chemistry Europe, e202400038.
[5] Martin, W., Russell, M. J. (2003): On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 358, 59–85.
[6] do Nascimento Vieira, A., Kleinermanns, K., Martin, W. F., Preiner, M. (2020): The ambivalent role of water at the origins of life. FEBS Letters 594, 2717–2733.
[7] Helmbrecht, V., Weingart, M., Klein, F., Braun, D., Orsi, W. D. (2023): White and green rust chimneys accumulate RNA in a ferruginous chemical garden. Geobiology 21, 758–769.
[8] Brasier, M. D., Matthewman, R., McMahon, S., Wacey, D. (2011): Pumice as a Remarkable Substrate for the Origin of Life. Astrobiology 11(7), 725-735.
[9] Damer, B., Deamer, D. (2020): The Hot Spring Hypothesis for an Origin of Life. Astrobiology 20(4): 429-452.
[10] Criado Reyes, J., Bizzarri, B. M., García Ruiz, J. M., Saladino, R., Di Mauro, E. (2021): The role of borosilicate glass in Miller–Urey experiment. Sci. Rep. 11:21009.
[11] Callahan, M. P., et al. (2011): Carbonaceous meteorites contain a wide range of extraterrestrial nucleobases. PNAS 108(34), 13995–13998.
[12] Greiner de Herrera, A., Markert, T., Trixler, F. (2023): Temporal nanofluid environments induce prebiotic condensation in water. Commun. Chem. 6:69.
[13] T. Djokic, t. et al. (2024): Trace elements (REE + Y) reveal marine, subaerial, and hydrothermal controls on an early Archean habitat for life: The 3.48 Ga volcanic-caldera system of the dresser formation, Pilbara Craton. Chemical Geology 644 121865.
[14] Trixler, F. (1989): Enzenauer Steinbruch. Fossilien 6 (1), 8–9.
[15] Malone, J.R., et al. (2021): Jurassic dinosaurs on the move: Gastrolith provenance and long-distance migration. Terra nova 33 (4): 375-382.
[16] Nudds, J.R., Lomax, D.R., Tennant, J.P. (2022): Gastroliths and Deinonychus teeth associated with a skeleton of Tenontosaurus from the Cloverly Formation (Lower Cretaceous), Montana, USA. Cretaceous Research 140, 105327.
[17] Jacobs, I., Osvath, M. (2023): Tool use and tooling in ravens (Corvus corax): A review and novel observations. Ethology 129, 169–181.
[18] Mussi, M. et al.(2023): Early Homo erectus lived at high altitudes and produced both Oldowan and Acheulean tools. Science 382 (6671), 713-718.