

N Ries
Krater
Museum
Nördlingen

STEINIGE WEGE *zum Leben*

Sonderausstellung 14.03.25 - 15.02.26

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 beiden



Ursprung in nanofluidem Wasser

Origin in nanofluid water

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

Hintergrund

Wasser kann völlig andere Eigenschaften als gewohnt annehmen, wenn es stark eingegrenzt wird.⁴ Dies geschieht unter anderem, wenn in ihm kleinste mineralische Partikel dicht gepackt verteilt sind. Wasser liegt dann überwiegend als nanometer 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 selbst, ist Wasser stark begrenzt. Es wird dabei genau wie in geologischen Umgebungen zu einem Nanofluid und nimmt sehr exotische Eigenschaften an. Doch gerade diese Eigenschaften sind unverzichtbar für die Bildung und Stabilität von DNA und Proteinen in einer Zelle. Die Bedeutung dieser Eigenschaften für die Biologie und ihre Brücke zur Geologie löst viele bisherige Widersprüche beim Ursprung des Lebens.

Was zeigt das Exponat?

Der Film zeigt eine Echtzeit-Aufnahme von Kohlenstoff-Nanopartikeln in Wasser. Die Streuung von Laserlicht an ihnen macht sie sichtbar und zeigt, dass sie durch Wärmebewegung ihren Abstand zueinander ständig ändern. Beim Annähern bildet sich nanofluides Wasser zwischen den Mineralpartikeln. Mit dessen exotischen Eigenschaften gelang es Forschern am Rieskratermuseum, 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).

Water is a great mystery when it comes to the origin of life. It prevents the formation of vital proteins and nucleic acids and even destroys them if they are present. At the same time, however, water is the basis of all life. How can this contradiction be resolved and what message does it convey?

Background

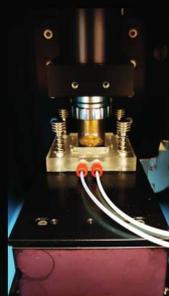
Water can take on completely different properties than usual if it is strongly confined.⁴ This happens, among other things, when the smallest mineral particles are densely packed in it. Water is then predominantly present as a nanometer-thin film around the particles or between them. Geologically, this occurs in rock crevices in the earth's crust and in asteroids, as well as in deep-sea vents, loose sediment layers, hot springs and cloud droplets in particular.

What does this mean for the origin of life?

The interior of living cells is densely packed with tiny bioparticles, including proteins. Between them, but also within some proteins themselves, water is very limited. Just as in geological environments, it becomes a nanofluid and takes on very exotic properties. However, it is precisely these properties that are indispensable for the formation and stability of DNA and proteins in a cell. The significance of these properties for biology and their bridge to geology resolves many previous contradictions regarding the origin of life.

What does the exhibit show?

The movie shows a real-time image of carbon nanoparticles in water. The scattering of laser light on them makes them visible and shows that they constantly change their distance from each other due to thermal movement. As they approach each other, nanofluid water forms between the mineral particles. Using its exotic properties, researchers at the Ries Crater Museum have succeeded in producing RNA from molecular building blocks without the help of living cells.¹² The video was created using a NanoSight Analyzer at the Center for Ries Crater and Impact Research Nördlingen (ZERIN).



Laserkammer des NanoSight im ZERIN / Laser chamber of the NanoSight at ZERIN



Foto: morgun, Bremen

Ursprung durch Blitze

Origin through lightning

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. Tatsächlich findet man im Produkt auch Komponenten von Proteinen und DNA. Als man nun versuchte, das Experiment mit einem Kolben aus Teflon nachzustellen, war die Ausbeute jedoch extrem gering, einige Moleküle fand man gar nicht.¹⁰ Die Oberfläche des Silikatglas-Kolbens im ursprünglichen Experiment spielte also eine sehr wichtige Rolle, was bis dahin niemand bemerkte.

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 auch in solchen Wolken häufig. Die aktuellen Erkenntnisse 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 Plasma-kanal die Sandkörner zu länglichen Gebilden verschmilzt.

Lightning in a simulated primordial atmosphere played a central role in a groundbreaking experiment that greatly influenced research into the origin of life. It succeeded in producing important molecular building blocks of life. Decades later, however, researchers recreating the experiment made a completely surprising discovery: a mineral turned out to be very important for the production. But it was never added to the experiment. How can this be explained?

Background

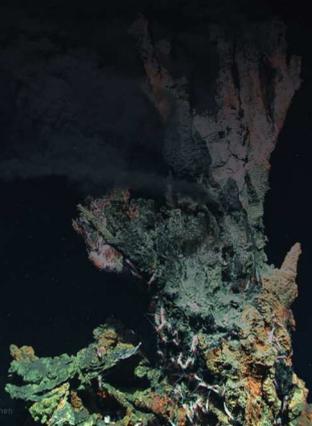
The formation of complex molecules from simpler building blocks requires energy. Lightning discharges are one way of supplying this energy. In the Miller-Urey experiment, lightning is generated in a glass flask in a simulated urate atmosphere to test whether important building blocks of life are formed as a result. In fact, components of proteins and DNA are also found in the product. However, when an attempt was made to recreate the experiment using a Teflon flask, the yield was extremely low and some molecules were not found at all.¹⁰ The surface of the silicate glass flask in the original experiment therefore played a very important role, which no one had noticed until then.

What does this mean for the origin of life?

Silicate glass can form in many ways under early Earth conditions. This also includes volcanic glass in ash clouds. Lightning is also common in such clouds. Current findings show that the path to the formation of molecular building blocks of life through lightning discharges in the early atmosphere leads via mineral silicate particles in the clouds.

What does the exhibit show?

A plasma tube is set up in the display case. In its glass bulb, lightning discharges are simulated in an oxygen-free atmosphere like that of the primeval earth. In front of the plasma tube is a fossil lightning bolt. Such formations are known as fulgurites. They are formed when lightning strikes a sandy soil and the high heat in the plasma channel melts the grains of sand into elongated shapes.



Ursprung an Land

Origin on the land surface

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, damit das Wasser verdunsten kann. Dafür muss eine feste Gesteinsoberfläche 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 dann Inselketten mit heißen Quellen an Land.

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 Bimsstein⁸ oder heiße Quellen⁹, 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“ können sie günstige Bedingungen zur Entstehung des Lebens geschaffen haben.

Four billion years ago, the Earth had a completely different appearance: there were no continents as land masses, as geological findings suggest. A global ocean must therefore have covered the earth. Nevertheless, the origin of life on land is often discussed. Why?

Background

Molecular building blocks of life cannot combine in free water to form DNA or proteins. Water inhibits this process. Numerous assumptions about the origin of life are therefore based on environments in which water is repeatedly removed by the repeated drying out of solutions. However, desiccation requires direct contact with the atmosphere in order for the water to evaporate. This requires the presence of a solid rock surface. Despite a global ocean, this is possible in various ways: on the one hand, floating rock fields can form due to eruptions of underwater volcanoes with gas-rich magma. They consist of pumice, which is so light due to its many air-filled pores that it floats on water. Volcanoes can also become so large that they occasionally break through the surface of the water. They then form chains of islands with hot springs on land.

What does this mean for the origin of life?

There are numerous hypotheses and laboratory experiments based on desiccation cycles. They refer to geological environments such as floating pumice⁸ or hot springs⁹ that allow such cycles on mineral surfaces. Under these conditions, simple molecules can combine to form proteins or RNA, but can also form fatty acid vesicles similar to biological cell walls.

What does the exhibit show?

On display is a pumice stone floating on water. Such stones can form so-called "pumice rafts" after submarine volcanic eruptions - extensive stone fields that float on the sea. Evidence of such fields is known from the Earth's early history. As a kind of "land surface", they may have created favorable conditions for the emergence of life.



Ursprung durch Meteorite

Origin through meteorites

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 bringt Überraschendes zu Tage.

Hintergrund

Meteoriten sind auf der Erde gelandete Bruchstücke anderer Himmelskörper im Sonnensystem. Vor allem Asteroiden sind ihre Quelle. Beim Zusammenprall von Asteroiden können Gesteinsbrocken und Staub aus dem Hauptkörper herausgeschlagen werden und auf eigenen Bahnen um die Sonne gelangen, wo manche von ihnen schließlich auf die Erde stürzen. Manche Meteoriten weisen Merkmale auf, die auf flüssiges Wasser im Ursprungs-Asteroiden hinweisen. Wärme, vor allem erzeugt durch radioaktive Strahlung im Kern des Asteroiden, kann Eis im darüber liegenden Krustengestein schmelzen. Durch chemische Energie aus dem Kontakt des Gesteins mit dem flüssigen Wasser können Bedingungen entstehen, die eine chemische Evolution in Gang setzt.

Was bedeutet das für den Ursprung des Lebens?

Einige kohlenstoffreiche Meteorite 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?

In der Vitrine sind Stücke des Meteoriten „Almahata Sitta“ ausgestellt. Es ist ein kohliges Chondrit, in dem molekulare Bausteine von DNA und Proteinen nachgewiesen werden konnte.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.



Fotos: Thilo Hasse

Life arose on Earth surprisingly quickly. The oldest evidence comes from a time when the still cooling Earth was just reaching life-friendly conditions. Is the origin of life relatively simple, or do at least the building blocks of life originate in space? The study of meteorites brings surprising things to light.

Background

Meteorites are fragments of other celestial bodies in the solar system that have landed on Earth. Asteroids are their main source. When asteroids collide, chunks of rock and dust can be ejected from the main body and travel on their own orbits around the sun, where some of them eventually fall to Earth. Some meteorites have characteristics that indicate liquid water in the asteroid of origin. Heat, mainly generated by radioactive radiation in the core of the asteroid, can melt ice in the overlying crustal rock. Chemical energy from the contact of the rock with the liquid water can create conditions that set chemical evolution in motion.

What does this mean for the origin of life?

Some carbon-rich meteorites contain organic molecules that are the result of an astonishingly advanced chemical evolution.¹¹ These include molecular building blocks of DNA, proteins and cell membranes. As these molecules survive the hot phase when the meteorites enter the Earth's atmosphere, it is possible that complex biomolecules were able to reach the Earth from space in the early days of the Earth and served as building blocks for the development of life.

What does the exhibit show?

Pieces of the meteorite "Almahata Sitta" are on display in the showcase. It is a carbonaceous chondrite in which molecular building blocks of DNA and proteins have been detected.¹¹ A picture of a micrometeorite can be seen in the background. Micrometeorites are cosmic dust particles that can also carry complex organic molecules. An estimated 100 tons per day reach the earth's surface.

Ursprung in der Tiefsee

Origin in the deep sea

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 Schloten 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 Schloten 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 Eisenhydroxid-Mineralen. Er wurde an der Ludwig-Maximilians-Universität München im Labor der Forschungsgruppe um Prof. Bill Orsi gezüchtet. Solche Schloten dienen Untersuchungen zum Ursprung des Lebens in der Tiefsee. Züchtung und Präparation für die Ausstellung: Vanessa Helmbrecht.

If life originated in the sea, then presumably not in open water. Because without a defined reaction space that brings together the molecular building blocks of life and keeps them together, the emergence of life is almost inconceivable. But the deep sea has a few surprises in store.

Background

A few decades ago, completely unexpectedly, bizarre mineral formations were found in the deep sea, rising out of the ground as hot, smoking chimneys. Although no sunlight penetrates this depth of the sea, these vents are teeming with life.

What does this mean for the origin of life?

Research into the geology and properties of deep-sea vents has shown that they have a highly porous structure. The tiny pores represent reaction vessels that are largely separated from the open sea. A simulation of such vents in laboratory experiments showed that complex organic compounds can form and concentrate in the pores. The thermal energy required for such processes in the deep sea comes from the earth's interior, while the chemical energy required is produced when the crustal rock reacts with the seawater under high pressure.



What does the exhibit show?

The exhibit shows a hydrothermal vent made of hydrous iron hydroxide minerals. It was grown at the Ludwig Maximilian University of Munich in the laboratory of Prof. Bill Orsi's research group. Such vents are used to study the origin of life in the deep sea. Cultivation and preparation for the exhibition: Vanessa Helmbrecht.

Ursprung in der tiefen Erdkruste

Origin in the deep biosphere

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 CO₂ 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

Did life on Earth perhaps not originate in the sea, but in the Earth's crust?

The background

Even today, life can still be found in the earth's crust at depths of well over 1000 meters. Single-celled organisms use tiny water-filled crevices and cracks in rocks to generate energy from chemical reactions in rocks. They do not need sunlight to do this.

Four billion years ago, cracks must have formed deep into the rock crust. This is because the moon and earth were much closer to each other and the moon orbited the earth in a much shorter time than it does today. The Earth also rotated much faster back then.

Tidal forces were therefore enormously strong and acted in shorter cycles, so that the Earth's crust periodically deformed very significantly. In addition, asteroid impacts were much more frequent than today. All this must have led to a deep disruption of the Earth's crust.

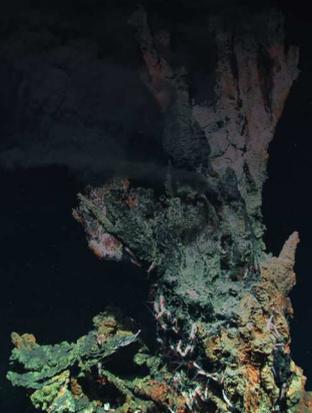
What does this mean for the origin of life?

Water and CO₂ under high pressure filled faults and fine cracks in the shattered crust. Various forms of energy were available in these cracks: In addition to chemical energy from the reaction of water with rock and heat from asteroid impacts and tidal friction, electrical energy could also be generated via the periodic deformation of piezoelectric minerals.

The cracks widened and narrowed periodically in the cycle of extreme tides. As tiny, slowly pulsating reaction spaces, they could have triggered chemical evolution and ultimately the emergence of life.¹

What does the exhibit show?

On display is a sample of rock from the Earth's crust from a depth of more than 1000m, which was brought to the surface from the Ries crater through a borehole. The rock was broken up by the asteroid impact and has re-bonded. It contains microscopically small cracks, similar to those discussed as the site for the origin of life in the early days of the Earth.²



Mineralisation wird verursacht

Mineralisation is caused

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 gelöstes Kalk. Dieser wird am Ufer durch Baumwurzeln, Moose und Algentepiche ausgefällt – es entsteht Kalktuff

Life on Earth is accompanied by a mineral diversity that is not yet known on other celestial bodies in the solar system. How are the two connected?

Background

Life has been changing its geological and atmospheric environment since its origin. This drives both the biological evolution and mineral development of the Earth. Around 2.5 billion years ago, for example, the atmosphere and oceans were enriched with oxygen from photosynthesis. However, oxygen is actually toxic to organisms. Life therefore had to adapt to the increase in oxygen through evolution. This eventually led to multicellularity and ultimately to us.

What does this mean for rocks?

Dissolved iron compounds in particular are precipitated or transformed by the reaction with oxygen from photosynthesis and rocks are formed from iron oxides. The precipitation and crystallization of other minerals is also determined by the conditions in the environment, such as the carbon dioxide content of the water. If living organisms are nearby, they change this content through their metabolism. For example, colonies of bacteria, algae, mosses or roots in their immediate vicinity extract dissolved carbon dioxide from the water. This causes lime to precipitate around the organisms, resulting in the formation of calcareous tufa. The oldest evidence of life on earth includes calcium deposits on bacterial mats. These so-called stromatolites date from around 3.5 billion years ago.¹³ They were formed by such precipitation processes.

What does the exhibit show?

On display is lime tuff that was recovered in Nördlingen in 2024. Relatively close to its source, the karst water of the Eger contains a lot of dissolved lime. This is precipitated on the banks by tree roots, mosses and algae carpets - resulting in calcareous tufa



Mineralisation wird organisiert

Mineralization is organized

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, Rifffalke (z.B. Weißjura der Schwäbischen und Fränkischen Alb, Kalkalpen), Radiolarit oder Feuerstein entstehen auf diese Weise.

Was zeigt das Exponat?

Die Vitrine zeigt einen 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, in die man mit einer Maus hineinzoomen kann. Neben der Maus befindet sich eine wissenschaftliche Illustration eines Nummuliten von William B. Carpenter.



What does the exhibit show?

The display case shows a stone made of nummulite limestone. It comes from a quarry near Bad Heilbrunn (geotope number: 173A003) and was once quarried there as "Enzenau marble" for use as building stone.¹⁴ The stone consists almost entirely of the shells of large foraminifera – single-celled organisms that were deposited in a shelf sea around 45 million years ago. A thin section of this rock can be seen as a projection that you can zoom into with a mouse. Next to the mouse is a scientific illustration of a nummulite by William B. Carpenter.



Gestein wird genutzt

Rock is utilized

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 hingelangt 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 Kieselsteinen unterscheiden. Dazu zählen mikroskopische Rillen durch die Wirkung von Magensäure und eine starke Polierung, die sich besonders an Erhebungen zeigt (bei Kieselsteinen 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 Formation¹⁶ in Montana, USA. Das abgebildete Foto zeigt einen Gastrolith im Magen eines Stenosauros. Das Fossil ist ca. 180 Millionen Jahre alt und ist im Museum der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Geologie München ausgestellt.

There are individual stones in sedimentary deposits that do not actually belong there due to their size, shape and texture. But they have none of the characteristics of meteorites that would normally be considered foreign bodies. How did these stones get there and what formed them?

Background

Some animal species take stones into their stomachs. Herbivorous birds use them to crush food by rubbing the stones. Crocodiles, on the other hand, use stones as ballast to control their buoyancy in the water.

What does this mean for rocks?

This way of using stones leaves characteristic marks. Although gastroliths are rounded like pebbles, there are features that distinguish them from pebbles. These include microscopic grooves caused by the action of stomach acid and a strong polish, which is particularly evident on elevations (the reverse of pebbles) and makes them look similar to a used bar of soap. Such stones are called gastroliths. They are transported by the migration of the animals that use them to areas where they do not actually occur geologically. This can also be used to deduce the long migrations of dinosaurs from the Jurassic period.¹⁵

What does the exhibit show?

Two stones are on display. Their characteristics indicate that they are gastroliths. It is assumed that they were polished in the stomachs of herbivorous dinosaurs such as Tenontosaurus. The gastroliths are between 140-100 million years old and come from the Cloverly Formation¹⁶ in Montana, USA. The photo shows a gastrolith in the stomach of a Stenosauros. The fossil is about 180 million years old and is on display in the Museum of the Bavarian State Collection of Paleontology and Geology in Munich.



Gestein wird bearbeitet

Rock is processed

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.¹⁸ 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.¹⁹ 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 funktionellen 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 „Straßacker“ (Flur Nr. 166) bei Großsorsheim von Franz Krippner (Nördlingen). Der Faustkeil wurde durch Bearbeitung von Jura-Hornstein gefertigt. Haptik sowie Bearbeitungs- und Abnutzungspuren des Artefakts weisen darauf hin, dass er als Werkzeug für eine eher kleine Hand gefertigt und mit der rechten Hand geführt wurde.

Ein weiteres Exponat ist der Ausstellungsraum selbst. Der bearbeitete Naturstein der Bodenplatten und der Bruchstein der Mauer geben Zeugnis von der ungeborenen Bedeutung bearbeiteten Gestein bis in die Gegenwart.



What does the exhibit show?

The display case contains one of the oldest archaeological artifacts from the Nördlingen Ries: a hand axe that is estimated to be 70,000 to 80,000 years old. Based on its size and processing characteristics, it is attributed to the Micoquian culture of the Neanderthals. It was found in the "Straßacker" field (field no. 166) near Großsorsheim by Franz Krippner (Nördlingen).

The hand axe was made by working Jura chert. The feel of the artifact and the traces of processing and wear indicate that it was made as a tool for a rather small hand and was wielded with the right hand.

Another exhibit is the exhibition room itself. The worked natural stone of the floor slabs and the quarry stone of the wall bear witness to the unbroken importance of worked stone right up to the present day.



Gestein wird verarbeitet

Rock is processed

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.

Lime has been burned for almost 10,000 years. However, the aim is not to generate energy, as is the case when burning wood. On the contrary, burning lime consumes a lot of energy. But what purpose does it serve?

Background

In contrast to the processing of limestone by cutting, hewing, grinding or polishing, it is transformed into a product (cement) during processing. When mixed with water, cement acts as a binding agent between the grains of rock and finally hardens to form a solid mixture: Mortar or concrete. The burning of lime is an important preliminary stage and utilizes a decisive phenomenon: during burning, lime transforms into a new phase by releasing carbon dioxide. This can be stored and transported as a powder. However, as soon as water is added, a further transformation takes place and the overall mixture becomes hard. If clay, sand and ores are added to the lime and this mixture is ground and fired, the result is Portland cement, which is very important in the construction industry.

What does this mean for rocks?

The processing of lime, clay, sand and ores means that these rocks are transformed into a completely new rock material. A quasi-liquid stone is formed with mortar and concrete at room temperature, which can be poured into any shape until it hardens. If reinforcing steel is added to the mixture, the result is a composite material that has a high compressive strength due to the concrete and a high tensile strength due to the steel. This is similar to the nanocomposites created by biomineralization.

What does the exhibit show?

On display is a bowl filled with dry mortar. Various rocks, including limestone, clay and ores, were transformed into this product during processing.



Brannkalk/Quicklime
Foto: Freilichtmuseum Ballenberg (Ballenberg.ch)



Was ist der Unterschied?

What is the difference?

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?



Foto: NASA / JPL / Cornell / Damia Bouic

What would Mars look like if there was life there? The image of a forested landscape in Tasmania, which coincidentally resembles the shape of a cratered landscape on Mars, gives us an idea. However, if we look behind the scenes of the visible impression, we come across a very important question: What exactly is it that we don't see in the picture of Mars? What is life?



Foto: Felix Andrews (Playbox)

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 Vielfältigkeit ihrer Elemente erreicht wird. Die irdische Landschaft zeigt genau solche Strukturen: Lebewesen.

Background

If we approach the question via physics, the boundaries between geology and biology begin to dissolve. Crystals and living beings then appear as just two extremes in the course of an accumulation of properties that have something to do with order, chaos, energy and information.

What can be seen on Mars?

The Martian landscape shows only rock – a chaotic mixture of small crystals whose inner structure is, however, highly ordered. So we see a juxtaposition of order and chaos. However, some images also show whirlwinds. These are so-called dissipative structures – ordered formations that only exist as long as energy is continuously supplied (here by updrafts). In the case of whirlwinds, chaotic turbulence briefly turns into orderly movement until it dissipates again. We thus see an oscillation between chaos and order.

What can't be seen on Mars?

What the Martian landscape does not show are dissipative structures that regulate themselves and process information from the environment. In this way, they adapt to the border area to chaos without exceeding it. They remain there by means of a form of stability that is achieved by multiplying their elements. The earthly landscape shows exactly such structures: living beings.



Kristalle, Krill und Chaos

Crystals, krill and 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.

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.

The aquariums allow us to immerse ourselves in different worlds between order and chaos. Comparing these worlds paves the way to answering the question of what life actually is in contrast to rock. What do the individual aquariums show?

Crystal garden

The crystals on display are highly ordered structures. This means that the arrangement of the atoms that make them up follows a clear regularity. The aquarium therefore offers a glimpse into a world in which order dominates.

Chemical garden

Bizarre structures of metal silicates grow in a water glass solution of metal salts. They are formed by microscopically small crystals with a high degree of internal order. However, the crystals combine with each other in such a way that largely disordered structures are formed, allowing us to look into a world where order and chaos coexist.

Vortex

A vortex is an ordered structure that only exists as long as energy and matter are constantly flowing through it. It is therefore a so-called dissipative system: not an object, but an organized state on the verge of chaos. In a vortex, chaotic turbulence briefly turns into orderly circular motion until it crosses the boundary to chaos again and dissolves. We thus see an oscillation between order and chaos.

Living organisms

The organisms in the aquarium are also dissipative systems. In contrast to the vertebrate, however, they regulate themselves using information from the environment in order to maintain the flow of energy and matter. We thus see an adaptation to the border area between order and chaos.

Chaos

There is no connection between components, no regularity in the arrangement and no functions as elements of a system. The aquarium therefore shows a world of 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 Oslo, Norway)

Animation Tiefseeschlote:
Prof. Dr. William Martin (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf)

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
(Ludwig-Maximilians-Universität München)

Weiterhin Dank an:

Daniel Birnbaum (Aqua Birne):
Beratung Aquarium)

Ines, Nin & Auri Günther-Bekavac:
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., Aikkilä, 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., Kleiner, 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.