



CO₂-Spaziergänge

Gibt es Orte, an denen CO₂ in besonders eindrücklicher Weise zum Vorschein kommt, oder an denen bestimmte CO₂-Prozesse besonders eindrucksvoll sichtbar sind?

Wir haben solche Orte aufgesucht und stellen im Folgenden einige Ausflugsziele dar. Es ist nicht weniger lohnend, auf den Spuren des CO₂ zu wandern wie auf den Spuren eines Theodor Fontane.

Einige weitere Wanderungen finden sich auf der Lernplattform unserer CO₂-Ausstellung, im Internet zu finden unter www.co2-story.

Vulkanismus als CO₂-Quelle

Ein Spaziergang durch die Vulkaneifel

Die Entstehung von Öl und Ölschiefer

Ein Spaziergang in Holzmaden

Höhlenbildung durch CO₂

Ein Spaziergang durch die Erdmannshöhle

Kalk als CO₂-Speicher

Zwei Spaziergänge in der Fränkischen Alb

Torfbildung und CO₂-Bindung

Ein Spaziergang ins Moor

CO₂-Bilanz von Wäldern

Ein Spaziergang durch die Baumkronen

im »Urwald« des Nationalparks Hainich

Alpiner Klimawandel

Ein Spaziergang in den Bergen Garmisch-Partenkirchens

CO₂-Hotspot Flughafen

Ein Spaziergang und eine Rundfahrt

auf dem Frankfurter Flughafen

Eine Welt aus CO₂, Staub und Eis

Virtuelle Exkursion auf dem Mars

CO₂ – Lebenselixier und Klimakiller

Aufsteigende CO₂-Blasen
am Ufer des Laacher Sees:
Hinweise auf die nach wie
vor vulkanische Aktivität
der Region (siehe S. 232 f.).





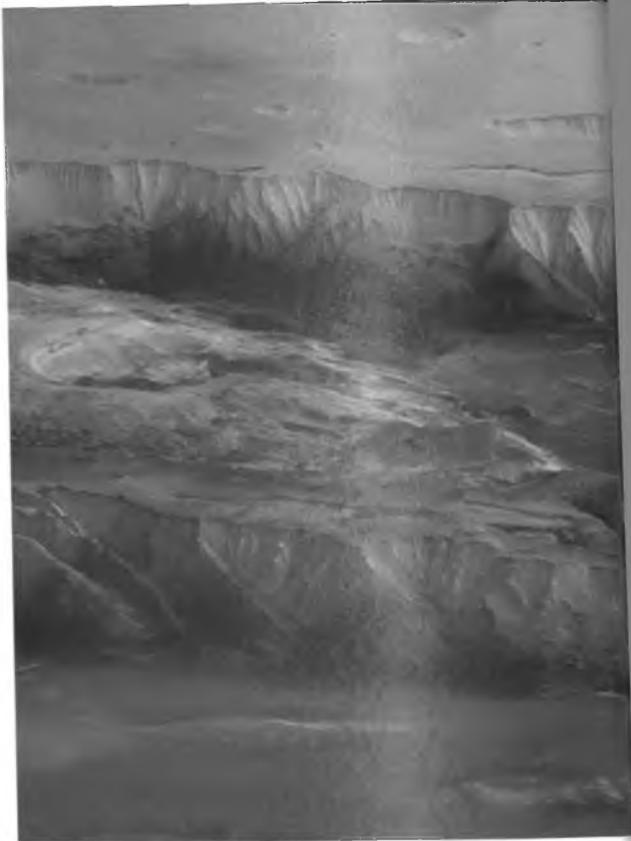
||

Wie viel CO_2 nimmt ein Wald im Jahr auf?
Dieser Frage gehen wir bei der Begehung des
Baumkronenpfades im »Urwald« des Nationalparks
Hainich nach (siehe S. 260–265).

III
Durch Kalkabscheidungen erhöhtes Bachbett.
Dieses seltene Spiel der Natur, »Steinerne Rinne« oder
auch »Wachsender Stein« genannt, findet man auf
einem Spaziergang in der Fränkischen Alb (siehe S. 250).



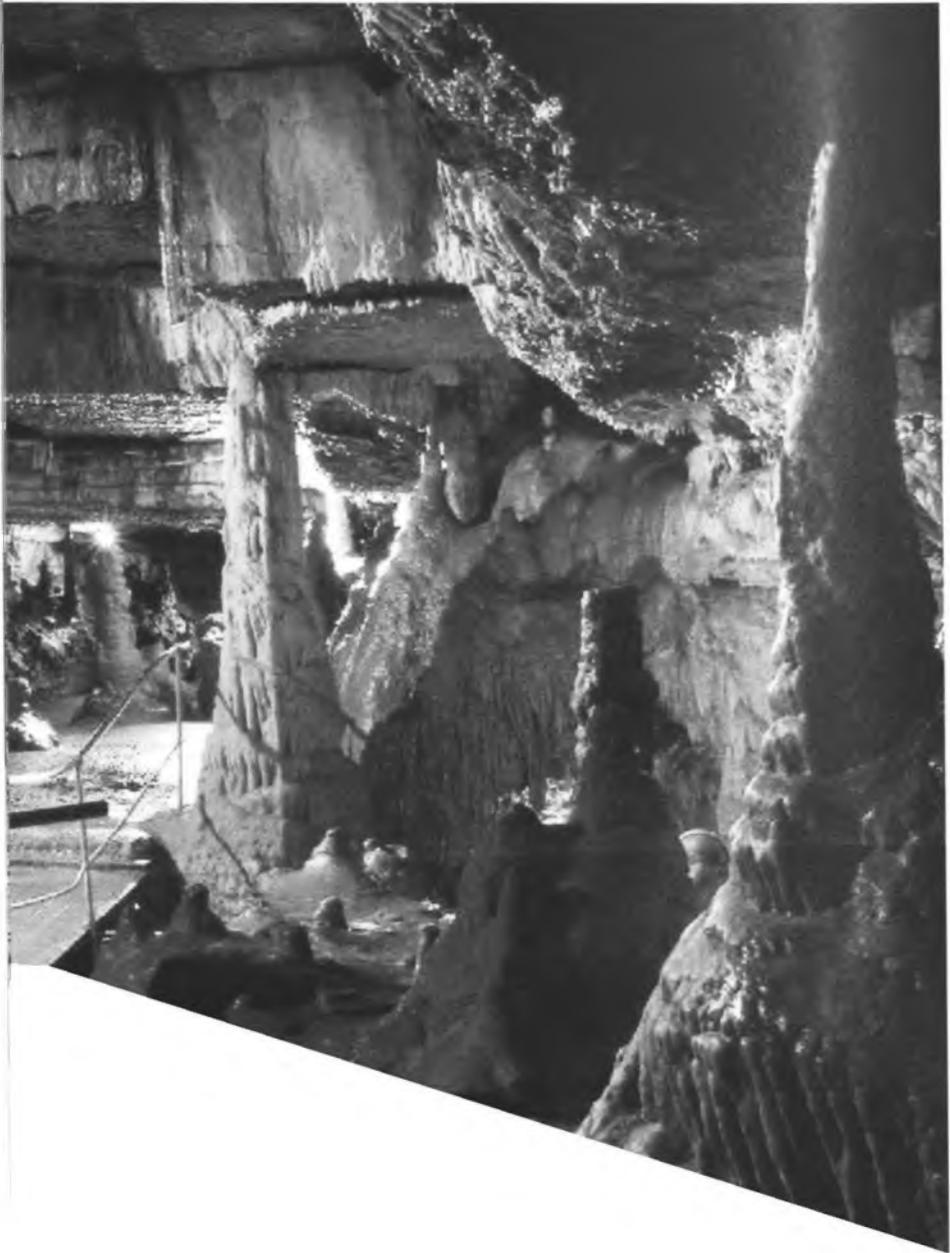
IV und V
Eine Welt aus CO,
Staub und Eis erwartet
uns auf unserem
Nachbarplaneten Mars.
Seine Atmosphäre
besteht zu 95 Prozent
aus CO₂ (siehe S. 282
bis 294).

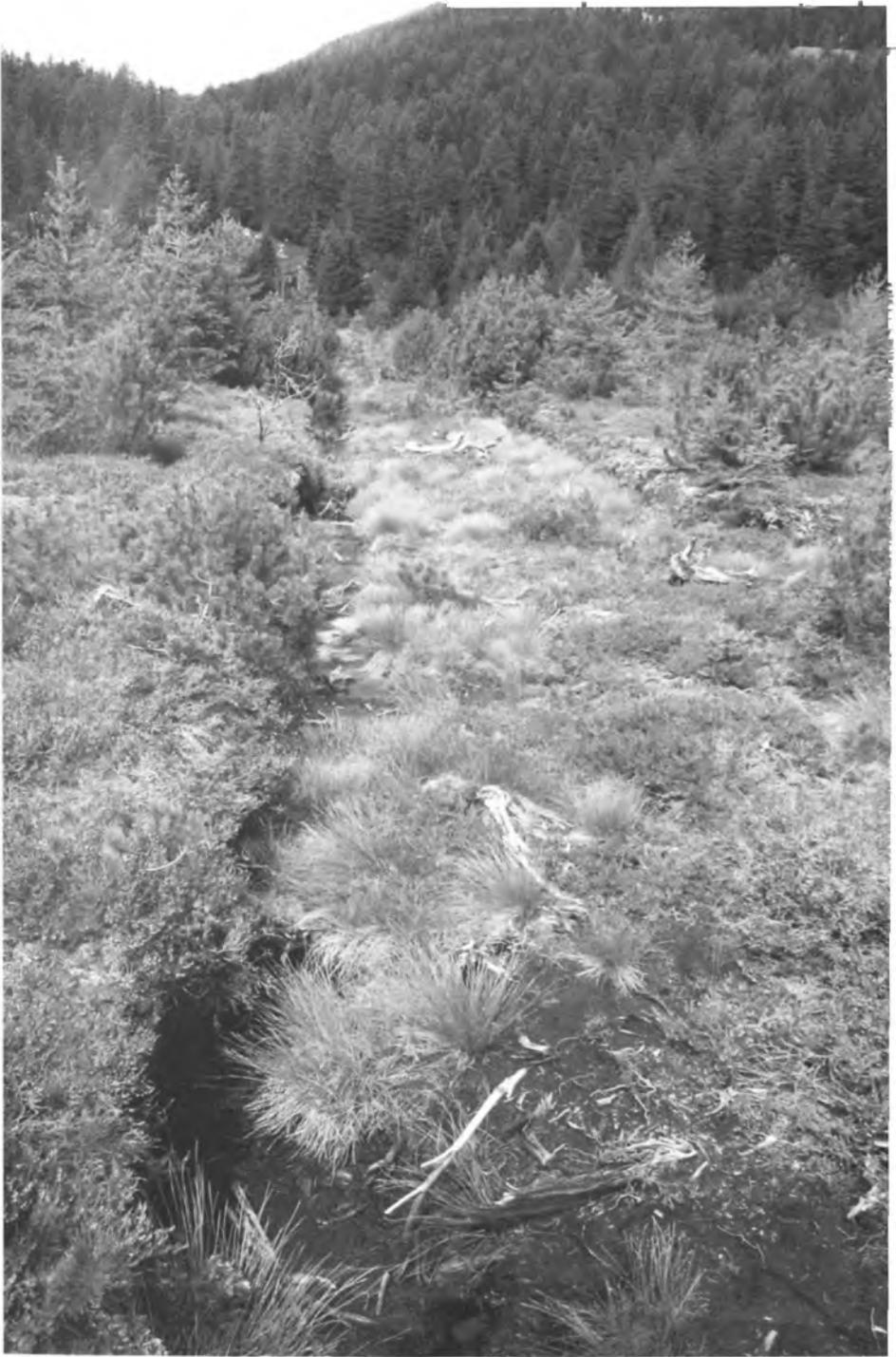




VI

CO₂ ist einer der größten Baumeister der Natur.
Die meisten Kalksteinhöhlen verdanken ihre Existenz
letztlich dem CO₂. Blick in eine der ältesten
Tropfsteinhöhlen Deutschlands: die Erdmannshöhle
im Schwarzwald (siehe S. 242-245).





VII

Moore spielen eine wichtige Rolle im Kohlenstoffkreislauf: Sie entziehen der Atmosphäre CO_2 und speichern es (siehe S. 252–258).

Vulkanismus als CO₂-Quelle – Ein Spaziergang durch die Vulkaneifel

Anfahrt

Maria Laach__über die A 61 von Koblenz Richtung Bonn, circa 19 Kilometer entfernt von Koblenz. Bei der Autobahnausfahrt Mendig den Beschilderungen folgen.

Daun__vom Laacher See Richtung Mayen und auf der A 48 Richtung Trier. Am Autobahndreieck Vulkaneifel in Richtung Daun. Das Vulkanmuseum befindet sich in der Stadtmitte.

Steineberg__von Daun aus Richtung Mehren. Mitten im Dorf links Richtung Steiningen (drei Kilometer). Hier Richtung Steineberg. Folgen Sie den Hinweisschildern zur Vulcanolnfoplattform.

Anforderungen

Der gesamte Spaziergang kann an einem Tag durchgeführt werden. Für die 1 bis 1,5-stündige Wanderung um Maria Laach wird etwas Ausdauer benötigt, der Besuch des Museums (circa 1 Stunde) und der Infoplattform kann individuell eingeteilt

werden. Das Museum ist auch für einen Besuch mit Kinderwagen oder Rollstuhl geeignet, die CO₂-Austritte am See sowie die Infoplattform sind hingegen nur zu Fuß erreichbar.

Informationen

Maria Laach
www.maria-laach.de
Eifel-Vulkanmuseum Daun
Leopoldstraße 9
54550 Daun
Telefon 0 65 92/98 53 53
www.vulkaneifel.de/eifel-vulkanmuseum/

Öffnungszeiten

1. März bis 15. November:

Di bis Fr 13.00–16.30 Uhr

Sa, So, feiertags 11.00–16.30 Uhr

2. bis 6. Januar und 26. bis

31. Dezember:

Di bis Fr 13.00–16.30 Uhr Führungen

für Gruppen nach Vereinbarung.

Vulkane sind eine natürliche CO₂-Quelle – und in der Urzeit der Erde waren sie die wichtigste. Heute ist das CO₂, das Vulkane liefern, mengenmäßig kaum bedeutend verglichen mit dem, das wir Menschen freisetzen. In Gegenden, in denen Vulkane aktiv sind, spielt das CO₂ aber sehr wohl eine Rolle – man muss sich vor ihm in Acht nehmen. Manche Kraterseen können bisweilen ganz plötzlich große Mengen CO₂ freisetzen, die dann zu einer Bedrohung für Mensch und Tier werden (siehe hierzu auf den Seiten 115 f. den Bericht über die Katastrophe am Nyos-See in Kamerun).



Andererseits nutzen die Menschen in den Gegenden, in denen es natürliche CO_2 -Quellen gibt, dieses Gas als Ressource. Es wird zum Beispiel abgezapft, in Druckflaschen gefüllt und verkauft. Oder es gelangt direkt, als sogenannte quelleigene Kohlensäure, in den Sprudel.

Besonders aktive Vulkangebiete lassen sich meist an den Rändern der Erdkrustenplatten finden, da hier viele Umwandlungs- und Umgestaltungs-kräfte wirken, welche Druck auf die Erdmassen dieser Regionen ausüben. Darüber hinaus kann das Magma aus dem Erdinneren hier leichter aufsteigen, was eine erhöhte vulkanische Tätigkeit zur Folge hat.

In Deutschland gibt es keine aktiven Vulkane, aber Gebiete, in denen es vulkanische Aktivitäten gab: zum Beispiel den heutigen Kaiserstuhl im Oberrheintalgraben bei Freiburg, das Hegau am Bodensee und die Eifel, als jüngstes Vulkangebiet Mitteleuropas. Dieses Gebiet von circa 1.200 Quadratkilometern ist ganz besonders interessant, um die Auswirkungen des Vulkanismus zu verfolgen und die landschaftlichen Besonderheiten und erdgeschichtlichen Veränderungen zu entdecken.

So ist die Vulkaneifel nicht am Rande einer Erdkrustenplatte, sondern innerhalb einer Platte in einer Bruchzone – dem Rheintalgraben – entstanden. Der Eifel-Vulkanismus begann dabei während der erdgeschichtlichen Zeit des Tertiärs (also bis vor 65 Millionen Jahren), legte dann eine Ruhepause ein und brach vor circa 600.000 Jahren in der Zeit des Quartärs wieder auf. Darüber hinaus ist das Gebiet der Eifel für Geologen besonders interessant, da es mehrere geologische »Stockwerke«, also Gesteine aus fast allen Epochen der Erdgeschichte, aufweist.

Die Eifel bietet für Hobbygeologen oder Vulkanismusinteressierte eine Vielzahl von Angeboten entlang der »Deutschen Vulkanstraße« (www.deutsche-vulkanstrasse.com), um die Vulkaneifel zu entdecken.

Im Folgenden soll ein Spaziergang speziell zum Thema CO_2 beschrieben werden, dem man in der Eifel auf unterschiedliche Weise begegnen kann. Schon wer ein Glas Gerolsteiner Sprudel trinkt, kommt in Kontakt mit CO_2 aus der Eifel: Das CO_2 , das in diesem Sprudel enthalten ist, ist kein gereinigtes Nebenprodukt eines industriellen Prozesses, wie es sonst bei Sprudeln oder SoftDrinks meist der Fall ist, sondern kommt direkt aus dem Boden. Es ist damit chemisch gesehen nicht besser oder schlechter. Es hat einfach eine besondere Herkunft. Besonders eindrucksvoll kann man das vulkanische CO_2 der Eifel am Laacher See entdecken.

Laacher See

Der Lacher See (Abbildung 1) liegt direkt beim Kloster Maria Laach. Der ovale See, der circa 3,3 Quadratkilometer groß ist, liegt 281 Meter über dem Meeresspiegel, ist 1.964 Meter lang und 1.186 Meter breit. An der tiefsten Stelle ist er 51 Meter tief. Der Laacher See entstand vor circa 13.000 Jahren,



1 Laacher See in der Vulkaneifel.

als an dieser Stelle ein Vulkan ausbrach. Man vermutet, dass eine Aschewolke von 30 Kilometern Höhe entstand und man kann nachweisen, dass diese Asche bis nach Schweden geweht wurde. Nachdem sich der Vulkan beruhigt hatte, sammelte sich in der Ausbruchssenke Wasser – es entstand ein See.

Für Wanderungen wurden unterschiedliche Routen entwickelt und ausgeschildert. Wer aber das aufsteigende CO_2 sehen möchte, sollte den Uferweg direkt um den See wählen. Er ist circa acht Kilometer lang, weist kaum Höhenunterschiede auf und kann in ein bis 1,5 Stunden zurückgelegt werden. Die CO_2 -Austritte können nur über einen Abstieg zum Ufer des Sees besichtigt werden. Leider führt der Uferweg zu großen Teilen nicht direkt am See entlang.



2 Aufsteigendes CO_2 im Uferbereich des Laacher Sees.

Die für das Thema CO₂ interessanten Bereiche liegen an der südöstlichen Uferzone des Sees. Das hier aufsteigende durchsichtige Gas strömt in sogenannten Mofetten als blubbernde Blasen aus dem Seegrund hervor (Abbildung 2). An der mit einem Hinweisschild gekennzeichneten Stelle blubbert und zischt das Wasser, als hätte man eine große Badetablette in den See geworfen. Sogar im Winter zeigen Löcher im Eis die Gasaustritte.

Auch wenn der letzte Ausbruch des Vulkans, aus welchem der See entstanden ist, schon 12.900 Jahre her ist, zeigen die CO₂-Austritte noch immer die vulkanische Aktivität der Region. Ob und wann noch einmal eine Eruption hier stattfindet, kann nicht vorausgesagt werden. Die Gefahr ist momentan eher gering – unterschätzen sollte man sie jedoch nicht.

Vulkanmuseum Daun

Als nächste Station des Spaziergangs empfehlen wir das Vulkanmuseum in Daun. Im Vulkanmuseum sind die wichtigsten Grundlagen zu globalen und lokalen Vulkantätigkeiten veranschaulicht. Anhand von Modellen kann man die Zusammenhänge von Kontinentaldrift und (aktuellem) Vulkanismus nachvollziehen und selbst an einem Hands-on-Exponat einen Modellvulkan zum Ausbruch bringen. Des Weiteren gibt es hier Sammlungen der Gesteine, die in der Eifel zu finden sind und die aus fast allen Erdzeitaltern stammen.

Zur Vertiefung der geologischen Grundlagen wurde ein Schulungsbe- reich unter dem Vulkanmuseum eingerichtet, in welchem Gesteine oder Fossilien untersucht, bestimmt und unter dem Mikroskop betrachtet werden können.

Im Museum werden außerdem zwei Besonderheiten erklärt: Zum einen die Entstehung von Maaren, das sind jene kreisrunde Seen, die auch in der nahen Umgebung von Daun zu finden sind und dort besucht werden können. Diese entstanden, weil beim Ausbruch eines Vulkans das Magma beim Aufsteigen zur Erdoberfläche auf wassergesättigte Gesteinszonen traf. Beim Kontakt zwischen heißer Lava und Wasser kam es zu einer Explosion, welche die Erdmassen emporschleuderte und einen Trichter entstehen ließ. Die Sprengkraft war dabei so groß, dass das Gestein zu Staub zerbröselte, der sich als eine Art Aschendecke wieder über den Trichter und die Umgebung legte. Im Laufe der Zeit füllten sich die Trichter mit Wasser und bildeten die Maare.

Zum anderen wird im Museum das Thema Mineralwasser und dessen Entstehung erklärt, was insbesondere für CO₂ interessant ist. Das Mineralwasser, das in Daun oder im bereits erwähnten Gerolstein gewonnen wird, unterscheidet sich von gewöhnlichem Grundwasser durch seinen höheren Gehalt an gelösten Stoffen. So muss ein echtes Mineralwasser nach gesetzlicher Regelung mindestens ein Gramm gelöste feste oder gasförmige Stoffe in

1.000 Gramm Wasser enthalten. Je mehr CO_2 in Wasser gelöst ist, desto saurer wird es – und desto besser kann es Mineralien lösen. In der Eifel gibt es Quellen – sogenannte Drees oder Drees – die besonders viel CO_2 enthalten.

Die Menge des CO_2 , das in der Eifel jährlich zutage tritt, wird auf 0,5 bis eine Millionen Tonnen geschätzt. Die hier lebenden Menschen kennen die Gefahren, die vom CO_2 ausgehen können. Da das Gas schwerer ist als Luft, sammelt es sich in Vertiefungen im Boden sowie in Höhlen oder Kellern, sodass Mäuse dadurch getötet werden können. Auch Menschen können in Gefahr geraten, wenn sie sich nicht in Acht nehmen.

Zusätzlich bietet das Vulkanmuseum regelmäßig Veranstaltungen für Kinder an, welche (bei schönem Wetter) die Fahrt zu einem Maar mit Erklärungen und weiteren Programmpunkten vor Ort beinhalten. Aktuelle Informationen und Termine zu diesen Veranstaltungen finden Sie auf der Homepage des Vulkanmuseums.

VulcanoInfoplattform in Steineberg

Um einen Überblick über die Landschaft der Eifel zu erhalten, lohnt sich als letzte Station die Vulcano-Infoplattform in Steineberg.

Steineberg auf dem »steinernen Berg« liegt 558 Meter über dem Meeresspiegel, wurde vor 34 bis 35 Millionen Jahren durch Vulkanismus geschaffen und ist dadurch schon viel älter als beispielsweise die Dauner Maare, die »erst« vor 20.000 Jahren entstanden.

Hier wurde ganz oben auf dem Berg in einer idyllischen und ruhigen Umgebung, mitten in einem kleinen Waldstück, ein Aussichtsturm gebaut (Abbildung 3). Um zur Aussichtsplattform in 24 Meter Höhe zu gelangen, führen fast 140 Stufen nach oben. Hier kann man in einem fantastischen Rundblick über die Landschaft der Eifel die vulkanischen Aktivitäten erkennen. Holzbänke und -tische laden zu einer Pause ein.

Claudia Schmidt



3 Die 24 Meter hohe Vulcano-Infoplattform in Steineberg.



4 Übersichtskarte Maria Laach.

Die Entstehung von Öl und Ölschiefer – Ein Spaziergang in Holzmaden

Anfahrt

Autobahn A8 zwischen Stuttgart und Ulm, Ausfahrt Aichelberg oder Ausfahrt Kirchheim/Teck Ost.

Anforderungen

Leichte Tour, individuell zu gestalten mit mehreren Möglichkeiten zur Einkehr. Für einen Besuch mit Kinderwagen oder Rollstuhl ist das Museum teilweise geeignet, der Steinbruch gar nicht.

Informationen

Urweltmuseum Hauff
Aichelberger Straße 90
73271 Holzmaden
Telefon 0 70 23 / 28 73
www.urweltmuseum.de

Öffnungszeiten

ganzjährig, Di bis So 9.00–17.00 Uhr

Steinbruch Museum

www.urweltsteinbruch.de

Steinbruch Kromer in Ohmden

www.schieferbruch-kromer.de

Erdöl ist der Grundstoff unseres modernen Lebens. Nicht nur Autos, Flugzeuge, viele Industrieanlagen und Heizungen wurden und werden damit betrieben – wir laufen auch über Erdölprodukte, tragen sie, cremen uns mit ihnen ein, trinken aus ihnen und wir kauen sie sogar. Wären nicht viele dieser Produkte parfümiert, würden wir riechen wie eine Tankstelle.

Woher kommt dieser Stoff? Dass es im Irak und im Iran viel Erdöl gibt, weiß jeder. Dort wurde es schon vor dreitausend Jahren genutzt. Man verwendete das Öl aber nicht nur als Brennstoff, sondern vor allem zum Abdichten von Booten oder Häusern. Denn wenn Erdöl an die Erdoberfläche kommt, verdichtet es sich zu einer klebrigen, teerigen Masse. Nicht nur im Nahen Osten kommt Erdöl vor, sondern auch in Deutschland, wenn auch nur in geringen Mengen. Es reicht nicht einmal für wenige Prozent unseres Bedarfs.

An sich ist Erdöl ein Gemisch aus vielen tausend Verbindungen: Es ist meistens schwarz und oft ziemlich dickflüssig. Wie das Erdöl entstanden ist, darüber gibt es viele Theorien. In der Bibel findet sich die Vermutung, dass

das Erdöl irgendwann auf die Erde geregnet ist. Heute glauben die meisten Wissenschaftler, dass sich das Erdöl aus den Resten von marinen Lebewesen gebildet hat.

Und zwar nicht aus den Überresten von toten Dinosauriern. Sondern aus den Überresten vieler winziger Lebewesen, der Dinoflagellaten, die auch heute noch in vielen Meeren, zum Beispiel im Mittelmeer, leben. Wenn diese Lebewesen absterben, sinken sie ab auf den Meeresgrund, sofern sie nicht vorher von anderen Tieren oder Tierchen gefressen werden. Erreichen sie also den Meeresboden, entsteht dort ein Faulschlamm und aus diesem kann sich unter besonderen Bedingungen Erdöl bilden.

Dem Erdöl selbst sieht man auf den ersten Blick nicht an, dass es aus organischen Lebewesen entstanden ist. Anders ist es mit dem Ölschiefer. Ölschiefer ist ein schwarzer, schiefriger Stein, den man in Deutschland an manchen Orten finden kann. Er riecht, besonders wenn man ihn über einer Kerze etwas erhitzt, stark nach Öl und glänzt auch ölig. Früher hat man aus solchem Ölschiefer auch Erdöl destilliert; jedoch ist dies eine sehr aufwendige Methode. Tatsächlich passiert aber in der Erde nichts anderes: Das Öl, das irgendwo in Lagerstätten gefunden wird, stammt in aller Regel ebenfalls aus Ölschiefer, der in tiefere, heiße Erdlagen gerutscht ist oder geschoben wurde und aus dem in dieser natürlichen Destillationsanlage das Öl herausdestilliert wurde.

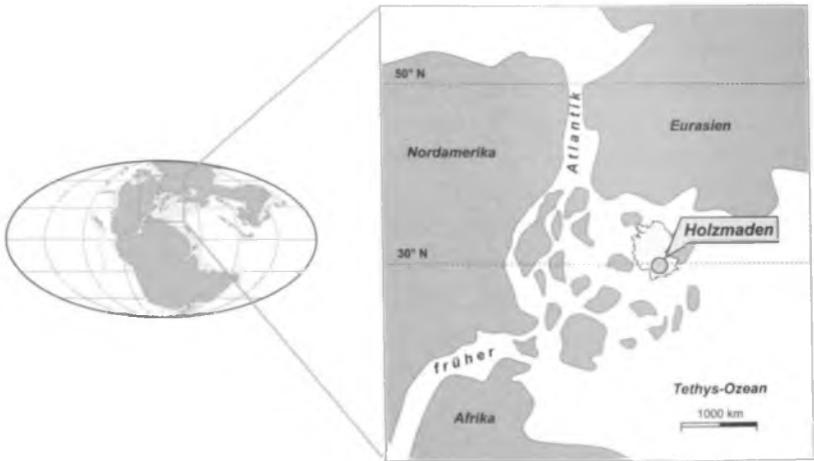
Im Ölschiefer findet man viele Fossilien, die vor dem tiefschwarzen Grund des Schiefers besonders schön aussehen. Einige der berühmtesten Ölschieferfundstellen findet man in Holzmaden, Baden-Württemberg, wohin Sie dieser Spaziergang führen will.

Holzmaden

Die Gegend um Holzmaden war – wie der ganze süddeutsche Raum – von vor 180 bis vor 130 Millionen Jahren von einem Meer überflutet (Abbildung 1). In diesen 50 Millionen Jahren Jurameer lagerten sich unterschiedliche Schichten auf dem Meeresgrund ab, die sich auch heute noch nachverfolgen lassen. Bei Solnhofen und im Altmühltal hat sich Kalk abgelagert (siehe Spaziergang Solnhofen), der teilweise sehr regelmäßig gebankt und vor allem aus Schwammriffen entstanden ist. Hier findet man heute das »weiße« Juragestein.

Die Schichten des Jura, die man heute um Holzmaden herum findet, werden »schwarzes« Juragestein genannt: Zwar wurden hier auch Kalke abgelagert, doch sind diese mit Schwefelkies und Bitumen (das ist fein verteiltes Erdöl) eingefärbt, weshalb dieser Kalk auch den Namen »Ölschiefer« trägt.

Man vermutet, dass sich in der heutigen Holzmadener Gegend in der Jurazeit ein Sedimentbecken befunden hat. Die Kontinente Europa und



- 1 Die Gegend von Holzmaden lag vor 180 bis 130 Millionen Jahren noch in einem Meer. Aus dieser Zeit stammen die im Ölschiefer eingelagerten Fossilien.

Amerika trennten sich damals gerade, und zwischen ihnen bildete sich ein junger, neuer Ozean – der heutige Atlantik. Das junge Meer war flach und nährstoffreich – beste Bedingungen für reiches Leben. Wo aber viel Leben ist, da gibt es auch viele Leichen (soweit man bei Mikroorganismen von Leichen sprechen kann). Die fielen hinunter und sammelten sich am Meeresgrund. Dort herrschte offenbar Sauerstoffknappheit – jedenfalls verweseten die Leichen nicht, sondern wurden vom ständig herabrieselnden Kalk und von neuen Leichen zugedeckt. Heute noch kann man die großen und kleinen Tiere – Fische, Ammoniten, Muscheln und Mikrolebewesen – zwischen den Gesteinsschichten finden. Da hier auch viele kleine Muscheln gefunden wurden, die *Posidonia* genannt werden, nennt man das Gestein auch »Posidonianschiefer«. Es wird heute noch in mehreren Steinbrüchen abgebaut und aufgrund seiner Schönheit teilweise zu Tischplatten verarbeitet. Manchmal finden sich zwischen den Platten auch große Fische – dann rufen die Steinbruchbesitzer das Stuttgarter Naturkundemuseum an und die Fossilien werden fachgerecht geborgen. Je nach Größe kann der Wert solcher Fossilien bei einigen zehntausend Euro liegen. Vermutlich gibt es aber hier wie auch in Solnhofen neben den offiziellen Verfahren auch einen Schwarzmarkt, auf dem die Fossilien illegal gehandelt werden.

Urweltmuseum Hauff

Eine erste Adresse für weitere Informationen und Anschauungsbeispiele bereits gefundener Fossilien ist das Urweltmuseum Hauff. Dieses wurde von Dr. h.c. Bernhard Hauff (1866–1950), einem Nachfahren des Dichters Wilhelm

Hauff, gegründet, der es zusammen mit seinem Sohn Prof. Dr. Bernhard Hauff (1912–1990) aufgebaut hat. Das erste Museum steht seit 1936/37 in Holzmaden.

Hier findet sich mitten im Museum ein riesiger Schichtaufbau von 16 Metern Länge und fünf Metern Höhe im Maßstab 1:1 nachgebaut, wie er für die Umgebung von Holzmaden typisch ist. Dieser Schichtaufbau enthält 17 Schichten, die einen Eindruck von den verschiedenen Ablagerungen geben und in welchen die unterschiedlichen Lebewesen, welche zu den jeweiligen Zeiten der Ablagerung gelebt haben, zu sehen sind.

Dass die ausgestellten Fossilien noch so detailliert erhalten sind, liegt an der Zusammensetzung des Meeresschlammes aus planktonischen Organismen wie Pollen und Sporen, aber vor allem auch Algen. Diese haben die abgestorbenen Lebewesen umschlossen, ohne deren Strukturen zu schädigen, und unter sauerstoffarmen Bedingungen über Jahrtausende erhalten.

Man kann nur ahnen, welche gewaltigen Mengen organischer Biomasse sich am Meeresboden abgelagert haben müssen, die noch in kleinsten Schichten sedimentiert wurden, was beim genauen Betrachten der einzelnen Stufen auffällt.

Neben den ausgestellten Fossilien (Abbildung 2), das heißt den teilweise mehrere Meter großen Sauriern (Fische, Meereskrokodile, aber auch Flugsaurier, Ammoniten und vieles mehr) ist vor allem die 18×6 Meter große Seelilienkolonie (Abbildung 3) beeindruckend, die sich entlang eines Baumstamms wie ein modernes Gemälde über eine große Wand des Museums erstreckt.

Ein weiterer Bereich des Museums zeigt anschaulich, wie die einstigen Lebewesen sedimentiert und fossilisiert wurden. Obwohl die Fossilien während der Sedimentation auf den circa zwanzigsten Teil ihres ursprünglichen Umfangs zusammengepresst wurden, sind einige Überreste – besonders die Skelette der Saurier – noch dreidimensional erhalten geblieben.

Was jedoch nach dem Fund der Fossilien im Steinbruch noch geleistet werden muss, damit der Besucher die Versteinerungen bewundern kann, zeigt eine eigene Abteilung des Museums. Hier wird der Vorgang der Präparation mit den Materialien und Hilfsmitteln nachgestellt, die teilweise einige Monate in Anspruch nimmt.



2 Skelettstruktur eines Sauriers in Ölschiefer.



3 Kolonie von Seelinien.

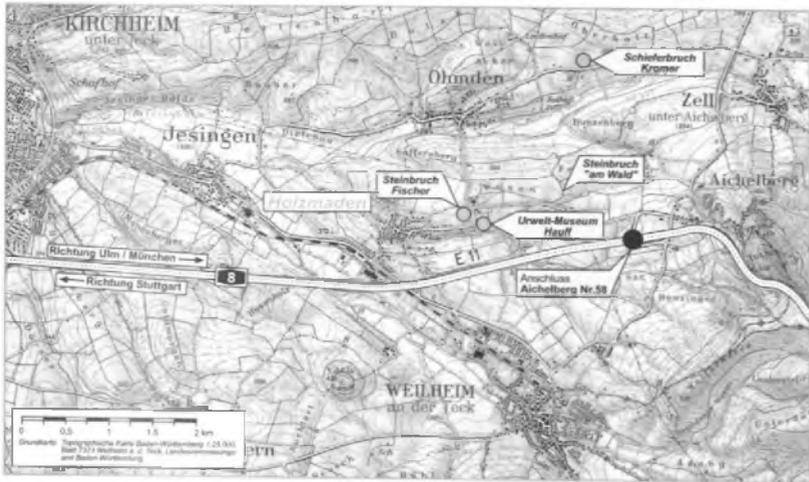
Im Dinopark des Museums sind weitere Ergebnisse der Arbeit eines Fossilienpräparators zu sehen: Aus den fossilen Überresten können nämlich die Gestalt und das Aussehen der Lebewesen rekonstruiert werden. Dabei spielen Vergleiche und Verwandtschaften mit heute lebenden Tieren eine ebenso große Rolle wie Rückschlüsse auf den damaligen Lebensraum und dessen Veränderungen. Viele Einzelheiten sind und bleiben offen, da trotz detaillierter Knochenfunde eine umfassende Rekonstruktion nicht möglich ist. Dennoch sind die, den Fossilien nachgebildeten, teilweise riesigen Dinosaurier im Park spannend und interessant.

Unterwegs im Steinbruch

Wollen Sie selbst auch nach Fossilien suchen? – Das können Sie zum Beispiel direkt gegenüber dem Museum im Museumssteinbruch. Hier können Sie gegen eine Leihgebühr Hammer und Meißel ausleihen und selbst nach versteinerten Lebewesen suchen. Leider findet man aber in diesem Steinbruch nur recht wenig.

Wir empfehlen Ihnen daher den Weg zum Steinbruch Kromer in Ohmden (siehe Karte; Informationen, ob der Steinbruch aktuell für Besucher geöffnet ist, erhalten Sie an der Kasse des Urweltmuseums), wenige Kilometer weiter, auf sich zu nehmen, da hier die Anzahl der schönen Funde weit aus größer ist als beim Museum. Da die Ölschieferplatten teilweise scharf sein können, ist der Besuch der Steinbrüche mit Kindern erst ab einem Alter von sechs Jahren zu empfehlen.

Claudia Schmidt



4 Übersichtskarte Holzmaden.

Höhlenbildung durch CO₂ - Ein Spaziergang durch die Erdmannshöhle

Anfahrt

Auf der A 98 (aus Freiburg Richtung Basel zunächst über die A 5); Ausfahrt Lörrach Mitte, Richtung Schopfheim. Dort auf der B 518 Richtung Wehr. Beschilderung folgen.
Oder am Rhein entlang zwischen Bad Säckingen und Rheinfelden bei Brennet auf die B 518 Richtung Wehr.

Anforderungen

Ein Spaziergang ohne besondere Anforderungen – der Besuch der Höhle (circa 1 Stunde) kann nach eigenen Interessen und Tagesform gestaltet werden. Ein Besuch der Höhle ist auch mit Kinderwagen oder einem Rollstuhl möglich.

Informationen

Erdmannshöhle
Telefon 0 77 62 / 80 99 01
www.gemeinde-hasel.de/hoehle/hoehle.html

Öffnungszeiten

April und Oktober:
Di bis So 9.00–17.00 Uhr
werktags 13.00–17.00 Uhr
Sa, So, feiertags 10.00–17.00 Uhr
Mai bis September:
täglich 10.00–17.00 Uhr

Die meisten Höhlen verdanken ihre Existenz dem Wasser und dem CO₂. Sie entstehen, indem CO₂-reiches, saures Wasser sich in Kalkstein hineinfrisst. Dieser ist ein auf den Kontinenten sehr verbreitetes Gestein – etwa ein Fünftel der Kontinentalfläche ist mit Kalkstein bedeckt. Gelangt Kalk in Kontakt mit CO₂-reichem Wasser, dann wird er aufgelöst – und abtransportiert. Nach und nach bildet sich so aus einem Spalt ein Gang und aus dem Gang eine Höhle. Unter der Erde ist das Wasser dabei oft viel reicher an CO₂ als auf der Erdoberfläche. Es nimmt CO₂ auf, das über Spalten im Gestein aus tieferen Erdschichten aufsteigt. Dadurch haben unterirdische Gewässer eine hohe Lösungskraft. Es muss dabei nicht immer ein Wasserlauf sein, der als Höhlenbaumeister fungiert. Auch reine Luftfeuchtigkeit kann im Laufe der Zeit große Kuppeln entstehen lassen. Dabei bildet sich auf den Wänden Kondenswasser, dieses löst mithilfe von CO₂ den Kalk – und fließt ab. So

entstehen manch hohe Kuppeln und besonders die abgerundeten Formen einiger Höhlen. Ihre ersten Behausungen und zugleich eine unerschöpfliche Quelle für Phantasie und Imagination haben die ersten Menschen also dem CO₂ zu verdanken.

Oft enthalten Höhlen noch recht viel CO₂ in der Luft – daher kann es gefährlich sein, in sie hinabzusteigen. Besonders in Bodennähe droht Gefahr! Bei Schauhöhlen, die für Besucher geöffnet sind, kann man sich jedoch auf eine gute Luftzirkulation verlassen.

Der Dinkelberg

Die Verbindung von Kalk-Themen mit der Region des Südschwarzwaldes mag auf den ersten Blick etwas verwundern – schließlich besteht das Grundgebirge des Schwarzwaldes aus Gneis und Granit, das im Laufe der vergangenen Jahrmillionen durch Gletscher, Erosion sowie Hebe- und Senkprozesse geformt wurde.

Eine kleine Region unterscheidet sich geologisch betrachtet jedoch grundsätzlich vom Schwarzwald und von dem im Süden durch den Oberlauf des Rheins abgetrennten Schweizer Juragebirge: der 535 Meter hohe Dinkelberg, ein kleiner Gebirgszug im Südschwarzwald, der zwischen den Orten Schopfheim (Norden), Rheinfelden (Süden), Wehr (Osten) und Lörrach (Westen) liegt.

Dieser Berg ist eine alte Kalksteinformation, die als Karstgebiet eingestuft wird, also eine Landschaft, die vor allem durch Kohlensäureverwitterung auf Kalksteinuntergrund entstanden ist und sich auch heute noch immer weiter entwickelt.

Wie entsteht eine Karstlandschaft?

Der Name »Karst« leitet sich von der Landschaftsbezeichnung der Kalksteinhochfläche im slowenisch-kroatischen Gebirge bei Triest ab, wo die Eigenschaften und die Entstehungen des Karst und seine Formen weitreichend untersucht wurden.

Durch die Lösung von Kalkgestein können ganze Karstlandschaften entstehen, die sich durch eine einzigartige Formenvielfalt auszeichnen. Diese Karstformen verdanken sich alle letztlich dem CO₂, das sie in Verbindung mit dem Regen- und Grundwasser geschaffen hat. Solche Formen treten in verschiedenen Größenordnungen auf, beginnend bei kleinsten Oberflächenstrukturen wie Karren (Furchen und Rinnen) bis hin zu großen, zum Teil unterirdischen Hohlräumen, die beim Einsturz trichterförmige Senken (Dolinen) bilden (Abbildung 1). Charakteristisch für Karstgebiete ist die vorwiegend unterirdische Entwässerung durch Spalten, Schlote und Höhlen. Daher ist es in Karstgebieten oftmals zu beobachten, dass Oberflächengewässer im eigenen Flussbett versickern (Flussschwinden; wie zum Beispiel die Donauversickerung bei Immen-



1 Doline Hasel.

dingen), um dann als unterirdischer Höhlenfluss im Kalkgestein weiterzufließen. Ebenso kann das in einer Karstlandschaft unterirdisch verlaufende Wasser an entsprechender Stelle wieder zutage treten (Karstquelle, Speiloch, Höhlentor und so weiter).

Beim Versickern des Wassers kann es unter anderem auch zur Bildung von Höhlenseen und periodischen Oberflächenseen kommen, die durch schnell schwankendes Grundwasser entstehen. Auch dies lässt sich in der Gegend um den Dinkelberg besichtigen – wenn man Glück hat.

Wenn Sie aus Richtung Schopfheim auf der B 518 nach Hasel oder Wehr gefahren sind, dann ist Ihnen vielleicht ein kleiner See (der »Eichener See«) auf der rechten Seite der Straße aufgefallen – oder auch nicht. Denn eventuell war er gar nicht da! Hier zeigt sich eine weitere Besonderheit dieser Karstlandschaft. Der Grundwasserspiegel liegt normalerweise circa acht Meter unter dem See. Aufgrund starker Niederschläge kann sich aber hier das Grundwasser um bis zu elf Meter heben, sodass plötzlich – und relativ schnell – ein bis zu drei Meter tiefer See gebildet wird, der einen Durchmesser von 300 Metern hat. Der See »verschwindet« dann wieder durch Verdunstung des Wassers. – Wann der See sichtbar ist, ist schwer vorhersehbar. Manchmal ist er mehrmals im Jahr zu sehen, dann bleibt er über Jahre verschwunden.

Das urzeitliche Meer, das vor circa 200 Millionen Jahren Süddeutschland bedeckte – dessen Spuren uns auch bei dem Spaziergang nach Solnhofen und Umgebung begegnen (siehe S. 247–251) – hinterließ im Bereich des heutigen Schwarzwaldes durch Ablagerungen und Sedimentation von Muscheln und Korallen seine Spuren. Im Tertiär, also vor circa 65 Millionen Jahren, begann sich die Gegend zu heben, was zugleich zum Einbruch des Oberrheingrabens führte, der noch heute die Grenze zwischen Deutschland, der Schweiz und Frankreich im Dreiländereck anzeigt.

Im Bereich des Schwarzwaldes setzte eine besonders starke Erosion ein, sodass das aufliegende Deckgebirge, also die Kalkablagerungen aus dem Meer, vollständig abgetragen wurden – bis auf den Dinkelberg! Die vielen Erosionsprozesse, die noch immer sowohl frei sichtbar als auch unterirdisch ablaufen, sind rund um diese »geologische Insel« zu beobachten.

Die Erdmannshöhle am Ortsrand Hasel

Bei der Erdmannshöhle (auch Hasler Höhle genannt) handelt es sich um eine der ältesten Tropfsteinhöhlen Deutschlands (Abbildung 2). Tropfsteinhöhlen entstehen nur in kalkhaltigem Gestein, in welchem über Jahrtausende und Jahrmillionen kalkhaltiges Wasser von der Decke tropft und sich der Kalk sowohl an der Decke (Stalaktiten) als auch am Boden (Stalagmiten) ablagert. Mit einer vermessenen Gesamtlänge von 2.185 Metern, von denen circa 360 Meter seit dem Jahr 1773 als Schauhöhle besucht werden können, bietet die Erdmannshöhle ein einmaliges Naturschauspiel. Sie hat ihren Namen übrigens von einer Sage, nach welcher die Höhle von kleinen Erdmännchen und Erdweibchen bevölkert wurde.

Der Besucher durchwandert während der Führung durch den Schauteil unterschiedliche Bereiche wie den »Tempel«, die »Bachhöhle« und den »Rittersaal«, in deren Namen sich die phantastische Umgebung widerspiegelt. Vielleicht sehen und finden Sie auch neue Phantasiegebilde, die sich aus den Kalkformationen zusammensetzen? Was man in einer Tropfsteinhöhle zu sehen bekommt, ist ein Miniaturkreislauf des CO_2 . Kohlendioxidreiches Wasser löst Kalk – dabei bildet sich Calciumhydrogencarbonat. Tropft dieses Wasser nun von einer Höhlenwand, dann löst sich das CO_2 aus dieser lockeren Verbindung – und der Kalk kristallisiert wieder aus. So bildet sich ein Tropfstein.



2 Eine der ältesten Tropfsteinhöhlen Deutschlands: die Erdmannshöhle im südlichen Schwarzwald.



3 Circa eine Million Jahre benötigen die Tropfsteine in der Erdmannshöhle, um eine Höhe von vier Metern und einen Durchmesser von zwei Metern zu erreichen.

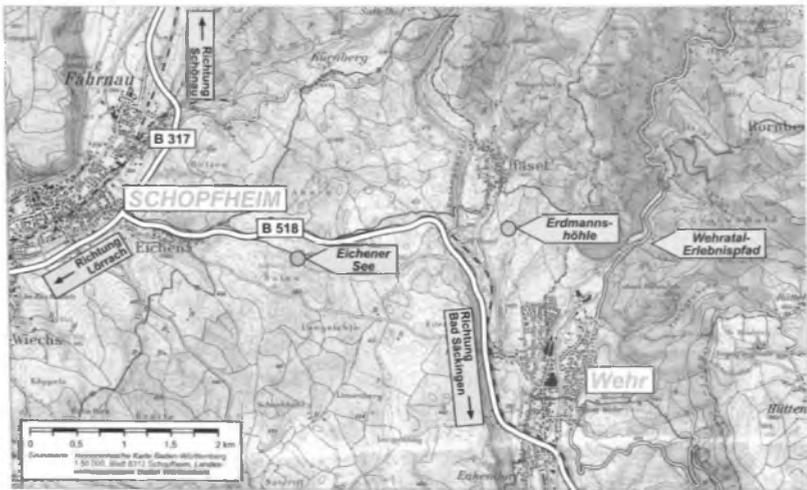
Wenn man dem Kalk, dem Wasser und dem CO₂ viel Zeit läßt, dann können gewaltige Tropfsteine entstehen: In der Erdmannshöhle kann man den größten und ältesten Tropfstein mit über vier Metern Höhe, zwei Metern Dicke und einem geschätzten Alter von über einer Million Jahre besichtigen (Abbildung 3)!

Hier noch die Beschreibung der Erdmannshöhle im Alemannischen - dem einheimischen Dialekt. Na, verstehen Sie was?

D'Erdmannshöhli isch e Charschdhöhli im Wehratal im Südschwarzwald. Well de ligang grad öbbe bi Hasel isch, isch si au unter Hasel Höhli bekannt. Di erschdi urkundlich Erwähning isch vo anne 1755. Ihre Name het si vo nere Sage, wonoch in de Höhli Zwärgli, also Erdmännli, läbe un schaffe. De erforschte Teil isch öbbe 2350 m lang, aber es het no ne huffe Gäng, wo so eng sin, daß mer nit weiß was no hindedra chunt. 360 m dodevo chasch aluege. In de Höhli hets ä huffe Tropfstei, ä chlaine See un au e unterirdische Bach goht dedure. Sällem Bach würd nochgesait, daß e Deil vom Wasser vom Eiemer See stammt.

Quelle: <http://als.wikipedia.org/wiki/Erdmannsh%C3%B6hle>

Claudia Schmidt



4 Übersichtskarte Erdmannshöhle und Eichener See.



Kalk als CO₂-Speicher - Zwei Spaziergänge in der Fränkischen Alb

Anfahrt

Solnhofen—Aus Nürnberg Richtung Schwabach, weiter auf der B 2 durch Weißenburg. Kurz nach Dietfurt geht es links Richtung Eichstätt ins Altmühltal und nach Solnhofen.

Von Stuttgart oder München auf der A 8 bis zur Ausfahrt Augsburg West, dort Richtung Donauwörth. Ab hier führt die Straße (B 2) circa 30 Kilometer bis zur Abzweigung Richtung Eichstätt und Altmühltal.

Steinerne Rinne—Zwischen Solnhofen und Treuchtlingen, Richtung Weißenburg. Dort Richtung Oberhochstatt (circa fünf Kilometer) und Rohrbach. Dann der Beschilderung folgen.

Anforderungen

Leichte Exkursion – viele Einkehr- oder Picknickmöglichkeiten. Das Museum ist auch für Kinderwagen oder Rollstühle geeignet, die Steinbrüche und die Steinerne Rinne nur eingeschränkt.

Informationen

Bürgermeister-Müller-Museum,
Bahnhofstraße 8, 91807 Solnhofen,
Postfach 49
Telefon 0 91 45 / 83 20 30
www.solnhofen.de (Link »Museum«)

Öffnungszeiten

April bis Oktober:

täglich von 9.00 bis 17.00 Uhr

werktags 13.00–17.00 Uhr

Sa, So, feiertags 10.00–17.00 Uhr

November bis März:

Sonntag von 13.00 bis 16.00 Uhr

oder nach Vereinbarung

Kalk spielt im Kohlenstoffkreislauf – im Geozyklus – eine bedeutende Rolle, denn man schätzt, dass in Sedimenten (wie zum Beispiel Kalkstein oder Dolomit) über 40 Millionen Gigatonnen Kohlenstoff gespeichert sind. Nirgendwo sonst gibt es solch große Lagerstätten für CO₂. Aber wie gelangt es überhaupt in die Gebirge und Gesteine? Atmen die Steine etwa auch CO₂ ein? In gewisser Weise schon – zumindest tun das manche Gesteinsarten.

Die Geschichte fängt mit dem CO₂ in der Luft an. Das löst sich in Regenwasser. Dabei bildet sich Kohlensäure (H₂CO₃). Dieser leicht saure Regen

tropft auf die Berge und löst ein wenig das Gestein auf. Das Gebirge verwittert. Es entsteht unter anderem Kalk (CaCO_3), der in gelöster Form mit den Flüssen ins Meer geschwemmt wird. Dort wird er schon erwartet. Viele Meereslebewesen nutzen den Kalk im Wasser und bauen ihre Gehäuse daraus. Damit deponieren sie das im Kalk fest gebundene CO_2 und entziehen es dem Kreislauf. Sie verwandeln es gewissermaßen in eine langfristige Anlage. Die Kalkgebilde, welche die Meeresorganismen im Laufe der Zeit aufbauen, können viele Hundert Meter hoch werden. In ihnen ist eine ungeheure Menge an CO_2 gebunden. In manchen Gegenden, wie zum Beispiel in den Alpen oder auf der Schwäbischen Alb, wird dieser Kalkstein abgebaut. Er wird zu Natursteinen verarbeitet und zum Teil auch in Öfen zu Zement gebrannt. Dabei wird das im Kalk gespeicherte CO_2 wieder freigesetzt.

Solnhofen - Die Welt in Stein

Kalkvorkommen gibt es in Deutschland an vielen Stellen. Kein Kalk ist aber so berühmt wie die Solnhofener Plattenkalksteine. Man könnte sogar behaupten, diese Kalksteine seien weltweit die allerberühmtesten – aufgrund der vielen Fossilien, die sich darin finden.

Solnhofen, das Altmühltal und seine umliegenden Steinbrüche sind weit hin bekannt, denn hier bietet sich – neben der industriellen Nutzung des Gesteins – für Interessierte ein besonderer Einblick in die geologische, ökologische und biologische Vergangenheit vor circa 150 Millionen Jahren.

In dem Meer, das Süddeutschland von vor 180 bis vor 130 Millionen Jahren im Zeitalter des Jura bedeckte, war im Bereich des heutigen Solnhofen ein riesiges Riff mit reichlich Flora und Fauna verschiedenster Arten. Dieses war durchzogen mit Senken und Wannern, in welchen sich im Laufe der Zeit abgestorbene Korallen sowie Muscheln und Kalkschalen (also Kohlenstoff) der Meeresbewohner in feinen Schichten abgelagerten und dem »Plattenkalk«, wie man ihn heute findet, seinen Namen gab. Dieser Kalk prägte die Landschaft in dieser Gegend.

Es wurden darin auch Lebewesen der damaligen Zeit eingebettet, die nach ihrem Tod auf den Meeresgrund gesunken waren. Sie legen heute Zeugnis davon ab, wie vielfältig das Meer und das umgebende Land bevölkert waren.



1 Versteinerter Pfeilschwanzkrebs.

So finden sich hier nicht nur Fossilien von Meeresbewohnern wie Quallen, Krebsen (Abbildung 1), Ammoniten, Fischen und Meeressäuriern, sondern auch Landlebewesen wie Pflanzen, Insekten, Schildkröten, Eidechsen und kleine Dinosaurier, aber auch Urvögel und Flugsaurier. – Wie eine Reise in die Vergangenheit aussehen kann, soll im Folgenden dargestellt werden.

Das Bürgermeister-Müller-Museum

Als Start der Spurensuche nach den Zeugen längst vergangener Zeiten bietet sich ein Besuch im Bürgermeister-Müller-Museum im Rathaus von Solnhofen an. Hier gibt es neben erdgeschichtlichen Informationen viele Originalexponate aus der Jurazeit zu sehen, wie etwa ein Exemplar des Urvogels *Archaeopteryx* (gefunden im Jahr 1861, Abbildung 2), für den Solnhofen weltberühmt ist, sowie andere Pflanzen und Tiere. So gibt es Reptilien, Fische und weitere Meeresbewohner wie Quallen, Krebse und Kopffüßler (Tintenfische, Ammoniten und Belemniten) zu bestaunen.



2 Der 1861 gefundene versteinerte Urvogel *Archaeopteryx*.

Versteinerter Urvogel

Als der versteinerte Urvogel *Archaeopteryx* im Kalk gefunden wurde (bis heute wurden weitere Exemplare gefunden), erregte dieser Fund in mehrerer Hinsicht Aufsehen: Zum einen war dies ein gesicherter Hinweis, dass es schon in der Zeit des Jura Vögel gegeben haben musste. Bisher hatte man nur Überreste aus sehr viel jüngerer Zeit gefunden. Zum anderen zeigte sich aber bei genauerer Untersuchung, dass es sich bei der Art des *Archaeopteryx* um einen Übergang vom Reptil zum Flugtier handelt, was ein wichtiges Argument für die Evolutionstheorie darstellte, die Darwin 1859 – also nur zwei Jahre vor dem Fossilienfund – veröffentlicht hatte. Darwin hatte beschrieben, dass bei der Entwicklung neuer Arten zunächst Übergangsformen entstehen, welche Merkmale der alten, aber auch schon Eigenschaften neuer Arten haben.

Im oberen Stockwerk des Museums kann man sich über die Erfindung der Lithografie (Steindruck) durch Alois Senefelder um das Jahr 1798 informieren, für die nur der feinkörnige Solnhofener Stein verwendet werden kann.

Nach dem Besuch im Museum bietet sich ein Besuch im nahe gelegenen Hobbysteinbruch an, um selbst nach einem weiteren *Archaeopteryx* oder auch nur einem Ammoniten oder Krebs zu suchen. Erfahrene Sammler haben bestimmt eigene Arbeitsgeräte wie Hammer und Meißel bei sich. Alle anderen können sich in der Nähe des Museums gegen eine geringe Leihgebühr mit ausreichend Werkzeug versorgen.

Dass die Solnhofener Gegend durch den Kalk geprägt wird, erkennt man auch an den vielen Steinbrüchen mit industriellem Abbau und der Aufbereitung von Juramarmor. Er wird für die unterschiedlichsten Zwecke wie zum Beispiel Fensterbänke, Fliesen, Brunnen und Küchenplatten verwendet.

Steinerne Rinne - wachsender Stein

»Steinerne Rinnen«, auch »Wachsende Steine« genannt, entstehen durch Kalkabscheidungen aus fließendem Wasser. Normalerweise gräbt sich ein Bach durch die erosive Kraft des fließenden Wassers sein Bett. Bei steinernen Rinnen, einem seltenen Spiel der Natur, wird dagegen das Bachbett durch Kalkabscheidungen erhöht. Das Bächlein fließt schließlich auf einem Damm (Abbildung 3).



3 Steinerne Rinne.

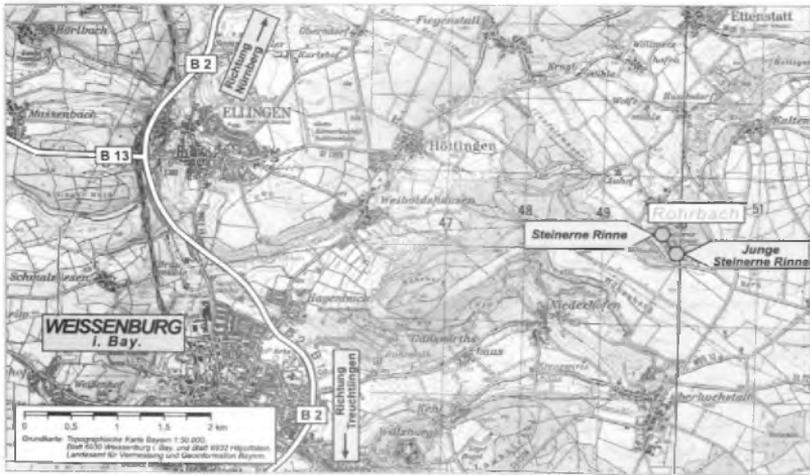
Die Rinne entsteht durch den Kalk im abfließenden karbonatreichen Wasser, das an der Oberfläche durch die Landschaft fließt. Der Kalk, der bei diesem Abfluss »ausfällt« wird, setzt sich im Bachbett ab. Im Laufe der Zeit bildet sich dabei Kalktuff (hier auch Travertin genannt), der emporwächst und eine Rinne für das abfließende Wasser bildet. Die Steinerne Rinne bei Rohrbach ist circa achtzig Meter lang und teilweise bis zu einem Meter hoch.

Da die Ausfällung des Kalks und die Fortbildung der Rinne ein noch immer andauernder Prozess ist, sollte der Besucher die Rinne mit Respekt betrachten und nicht daran herumwerken, so sehr es verlocken mag. Unter günstigen Bedingungen wächst die steinerne Rinne jährlich um ein bis zwei Zentimeter.

Claudia Schmidt



4 Übersichtskarte Solnhofen und Umgebung.



5 Übersichtskarte Fränkische Alb - Steinerner Rinne.

Moorbildung und CO₂-Bindung

Anfahrt

Über die Bundesstraßen 72 und 210, circa fünf Kilometer westlich der Stadt Aurich.

Anforderungen

Der Besuch des Moormuseums ist für Familien geeignet, dauert bis zu zwei Stunden und kann nach Interesse und Tagesform gestaltet werden.

Informationen

Moormuseum Moordorf e.V.
Victorburer Moor 7a,
26624 Südbrookmerland
Telefon 0 49 42 / 27 34
www.moormuseum-moordorf.de

Öffnungszeiten

Die Anlage ist vom Frühlingsanfang bis zum 31. Oktober geöffnet.
Mo bis So 10.00-18.00 Uhr

Moore sind gefährlich, gruselig und schlammig! Das ist wohl die Meinung der meisten, wenn es um dieses Thema geht. Und nicht ohne Grund, wird uns doch durch Literatur und Film oft diese Vorstellung bestätigt, sei es im »Erlkönig« (Goethe) oder in dem Gedicht »Der Knabe im Moor« (Droste-Hülshoff); in dem Buch »Der Herr der Ringe« (Tolkien), wenn Frodo von Smeagol durch die Totensümpfe geführt wird, oder in der »Unendlichen Geschichte« (Ende), wenn Atreju sein Pferd in den Sümpfen der Traurigkeit verliert. Und dann gibt es ja auch noch die Moorleichen ...

Wäre es nicht besser, wenn es gar keine Moore mehr gäbe? Wozu sind sie gut und was soll das alles mit dem Thema CO₂ zu tun haben?

Entstehung und Funktion von Mooren

Moore entstehen aus den Überresten von Pflanzen, die nicht zersetzt wurden. Dadurch spielen sie eine wichtige Rolle im Kohlenstoffkreislauf, weil hier durch die Photosynthese das in den Pflanzen gebundene CO₂ beim Absterben nicht wieder freigesetzt wird, sondern über lange Zeit – manchmal Jahrtausende bis hin zur Entstehung von Steinkohle – im Boden festgesetzt wird. Moore entziehen – solange sie gesund sind – der Atmosphäre CO₂ und speichern es. So können je nach Zersetzungsgrad 40 bis 60 Prozent

bei Trocknung des Moores aus Kohlenstoff bestehen. Das sind circa 500 Gramm pro Kilogramm Torf. Mehr als in einem Kilogramm Holz (in einem Kilogramm trockenem Buchenholz sind etwa 400 Gramm Kohlenstoff gespeichert)!

Moores entstehen überall dort, wo zwei Bedingungen erfüllt sind: eine wasserundurchlässige Unterschicht, auf welcher sich das Wasser ansammeln kann, und mindestens 1.200 bis 1.500 Millimeter jährlicher Niederschlag. Diese Bedingungen werden in Deutschland in zwei Regionen erfüllt. An der Küste im Norden, wo es viel Niederschlag im Jahresdurchschnitt gibt und sich die Moore über weite Strecken ausdehnen können, und im Süden von Deutschland, am Alpenrand, wo die Berge als Wolkenbremsen für ausreichend Regen sorgen (Abbildung 1).



1 Moorverteilung in Deutschland.

Moores brauchen eine lange Zeit, um zu entstehen, und müssen laut Definition mindestens 30 Zentimeter Torf – so nennt man die Schicht der organischen abgestorbenen Pflanzenmasse – aufweisen. Bei der Entstehung bilden sich zunächst sogenannte Nieder- oder Flachmoore. Diese werden noch vom Grundwasser feucht gehalten. Im Gegensatz dazu wachsen in Hochmooren (Abbildung 2) nur die obersten Schichten – an den Torfmoosen. Im Übergang von Flach- zu Hochmooren wachsen die Moose immer weiter nach oben, während sie in den unteren dunklen und sauerstoffarmen Schichten absterben und »vertorfen«. Dadurch fehlt der Zugriff auf das Grundwasser. Torfmoose können dennoch durch die Niederschläge weiter wachsen – es entsteht ein Hochmoor, das ausschließlich »von oben« sein Wasser enthält. Es lebt also mehr oder weniger ausschließlich von reinem Wasser und CO_2 . So werden Hochmoore oft von einer Art Pufferzone aus Niedermooren umgeben; die Moore verändern sich jedoch stetig.



2 Hochmoorfläche.



3 Torfmoos (oben). 4 Moorfläche mit Kiefernbeständen.

Die Torfmoose (Abbildung 3) haben eine extrem große Wasserspeicherkapazität und wirken wie ein lebender Schwamm. Dies wird anschaulich, wenn man eine Handvoll Torfmoose zusammendrückt. Damit zeigt sich aber auch die Abhängigkeit vom Wasser, welche Moore so sensibel für Umwelteinflüsse macht. Fehlen also die Niederschläge oder wird Wasser durch Drainagen abgeführt, trocknen die obersten Schichten schnell aus.

Moore sind für Pflanzen und Tiere aufgrund der Nähr- und Mineralstoffarmut, aber auch durch die Sonnenexposition und der daraus entstehenden Anfälligkeit in Trockenperioden extreme Lebensorte. Dabei sind in Niedermooren andere Tier- und Pflanzenarten anzutreffen als in Hochmooren. Wo in den Niedermooren noch Schilf, Mädesüß und eine Vielzahl anderer Pflanzen gedeihen, enthält das Hochmoor zu viel Säure, als dass – außer Spezialisten wie Sonnentau und Moosbeere – mehr als Torfmoose überlebend könnten. Lediglich auf kleinen trockeneren Anhöhen können noch Fichten, Kiefern und Birken existieren (Abbildung 4).

Wie groß der Unterschied hier ist, lässt sich am besten bei einem Weg durch die Moortypen erfahren: Kann man Niedermoore noch einigermaßen trockenen Fußes begehen, steht man im Hochmoor schnell bis zu den Knöcheln und weiter im Wasser. Dieses ist aber überhaupt nicht schlammig oder brackig, sondern oft klar, da es sich ja um das reine Regenwasser handelt. Waren außerdem die Pflanzen und der Untergrund im Niedermoor noch etwas härter und kantiger, umschließt das Moos im Hochmoor weich und angenehm die Füße.

Man sollte sich dabei vor zwei Dingen in Acht nehmen: vor Schlangen, meist Kreuzottern, die man aber durch den Lärm beim Laufen meist verschleicht, und vor Wasserlöchern (Abbildung 5), die mit Torfmoosen überwachsen sind. Diese kann man oft mit bloßem Auge erkennen, da sie etwas tiefer liegen und frische Torfmoose eine andere Farbe haben. Jedenfalls sollte man nie alleine ins Moor gehen, damit man sich im Notfall gegenseitig helfen kann. Auch stehen die meisten Moore unter Naturschutz, so dass es oft nicht gestattet ist, abseits vom Weg zu spazieren.

Obwohl die beschriebenen Eigenschaften von Mooren als Wasserspeicher oder beim Binden von Kohlenstoff sowie auch ihre kühlende Wirkung enorm wichtig sind, setzt der Mensch den Mooren seit Jahrhunderten zu und hat sie etwa in Deutschland bis auf wenige Reste fast ganz zum Verschwinden gebracht. Der Grund: Moore, insbesondere Hochmoore, lassen sich nicht landwirtschaftlich nutzen und bilden für die Landwirtschaft »totes« Gelände.

Besonders aus diesem Grund wurden und werden noch immer Moore trockengelegt, um eine landwirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen. So lebt von den 13.000 Quadratkilometern Torffläche in Deutschland mittlerweile nur noch ein kleiner Teil.

Da getrocknete Torfe reich an Kohlenstoff sind, den die Moose als CO_2 aus der Luft gesogen hatten, können diese verbrannt werden, um zu kochen und zu heizen, was gerade im 18. und 19. Jahrhundert insbesondere für ärmere Menschen eine billige Alternative zu Holz bedeutete.

Heute wird er auch als Erde für Balkonpflanzen oder zur Champignonzucht verwendet, wobei diese Torferde allerdings noch mit Kunstdünger und oft auch mit Kalk versetzt werden muss. Denn von sich aus ist Torf sehr mineralarm. – Torf kann auch ein Luxusartikel sein, beispielsweise in einem



5 Trittfest ist so ein Moor nicht.

Moorbad, das sowohl wärmend als auch entzündungshemmend wirken soll. Weiter ist Torf auch für die Liebhaber irischen und schottischen Whiskys von Bedeutung, da dort der Malz über Torffeuer getrocknet wird und dabei unverwechselbare Aromen annimmt, die man im gebrannten Whisky schmecken kann.

Von weltweit vier Millionen Quadratkilometern Torffläche ist ein großer Teil mittlerweile zerstört und kann damit kein CO_2 mehr binden. Im Gegenteil: Der gelagerte Kohlenstoff wird wieder freigesetzt. Denn wenn das Moor trockengelegt wird, gelangt der Sauerstoff der Luft durch zahllose winzige Kapillaren, die alle zuvor mit Wasser gefüllt waren, in den Torfkörper. Der Kohlenstoff wird dabei langsam zu CO_2 oxidiert.

Dabei ist die Renaturierung von Mooren eigentlich sehr einfach, indem man der Landschaft wieder ihr Wasser belässt und dafür sorgt, dass es nicht abläuft. So kann auf freigelegten Flächen wieder Torfmoos entstehen und wachsen, und schon nach wenigen Jahren kann wieder ein lebendiges Moor entstehen.

Wir stellen im Folgenden einen Spaziergang durch das Moormuseum Moordorf bei Aurich in Ostfriesland vor. Dieses Museum zeigt zum einen die Bedingungen, unter denen die frühen Moorkolonisten leben mussten. Es verfügt aber auch über einen kleinen Hochmoorrest, an dem man sehen und spüren kann, was ein Hochmoor ausmacht. Zwar vermittelt das kleine Hausmoor keinen so tiefen Eindruck von der Ästhetik eines Moores wie dies andere Moore, zum Beispiel das ebenfalls nicht weit entfernt gelegene »Ewige Meer«, vermögen. Der Spaziergang in Moordorf hat aber den Vorzug, auch Kinder jeden Alters zu begeistern.

Moormuseum Moordorf

Das Museum zeigt verschiedene Hütten, die begangen werden können – für Kinder ein großer Spaß. Auf dem Gelände gibt es auch einige Ziegen, was die Kleineren freuen wird. Über das Jahr verteilt gibt es verschiedene Museumsprojekte, bei denen mit Torf oder Lehm hantiert werden kann.

Ostfriesland war ursprünglich weitgehend von Mooren bedeckt. Diese Moore wurden seit dem 18. Jahrhundert mehr und mehr kultiviert und in Ackerland umgewandelt. Das Leben im Moor war äußerst hart, und der Ertrag der Ackerflächen, die dem Moor durch Entwässerung oder Brandrodung abgetrotzt wurden, war nur gering. Mit ergreifenden Tatsachenberichten schildert das Museum das bittere Elend der Menschen, die, weil sie nirgendwo sonst Zuflucht fanden, im Moor lebten. Einige prähistorische Funde, die in der Gegend um Moordorf im Moor geborgen wurden, darunter auch eine Goldscheibe aus der Bronzezeit, werden ebenfalls (in Kopie) gezeigt.

Der Freiluftbereich zeigt verschiedene Kolonistengebäude, die aus Holz, Lehm und Torfplacken errichtet wurden. Denn der aus dem Moor gewonnene Torf war nicht nur eine Handelsware, die auf Kähnen in die Städte verschifft wurde, er war auch Brennstoff (getrocknet brannte er besser als Holz) sowie Baumaterial. Der Weg führt schließlich zum »Hausmoor« des Moormuseums. Es ist angestochen und vermutlich als Moor nicht mehr wirklich intakt. Aber man sieht vielleicht gerade deshalb die Schichten des Moores ganz klar: Unten liegt der dunkle, gut verwendbare Torf, darüber der wenig geschätzte sogenannte Weißtorf und obenauf wächst das Moos in die Höhe. Wie Tausende Lagen riesiger Teppiche wölben sich die Schichten nach oben. Gerade das ist das zentrale Phänomen eines Hochmoores: Es steigt als Fläche langsam in die Höhe, wobei es den Grundwasserspiegel übersteigt, sodass es schließlich nur noch vom Regenwasser gespeist wird – und von CO_2 .

Es gibt keinen anderen Ort, der den Zusammenhang zwischen Pflanzenwachstum und CO_2 so deutlich macht wie ein Hochmoor, und das Hochmoor am Moormuseum ist, obwohl es klein ist und keinen landschaftlichen Eindruck vermittelt, in besonderer Weise geeignet. Denn das wachsende Torfmoos ernährt sich ja von nichts anderem als von Regenwasser und CO_2 . Ihm werden über das Grundwasser keine Nährstoffe zugeführt – denn es hat sich längst über das Grundwasser hinausgehoben! Und wenn eine Schicht Moos vergangen ist, so wird sie nicht zersetzt, sondern konserviert. Übrig bleibt am Ende ein fossiler Energieträger: der Torf. In Friesland wird dieser Torf auch heute noch hier und da in Anlagen zur Energieerzeugung genutzt – so wird er zum Beispiel zum Brennen von Backsteinen verwandt, die, wenn sie mit Torf und nicht mit Erdgas gebrannt werden, eine schön bunte Färbung erhalten. Für die Stromerzeugung wird Torf nicht mehr benutzt. Jedoch sind auch die in Deutschland viel verwendeten fossilen Energieträger Steinkohle und Braunkohle ebenfalls nichts anderes als verfestigter, uralter Torf.

Torf ist aber nicht nur ein Energieträger, sondern auch ein Archiv! Jede neue Wachstumsperiode der Torfmoose wirkt wie ein grüner Teppich, der sich über die älteren Schichten legt. Und fast alles, was von außen in das Moor und damit in und zwischen die Schichten gelangt, bleibt erhalten – seien es Holz, Schmuck, Pflanzenpollen oder Leichname. Diese Archive sind für die Archäologie wie auch für die historische Umweltforschung von höchstem Interesse, denn nur mit den hier gelagerten Informationen kann man zum Beispiel die Geschichte der deutschen Wälder rekonstruieren.

Verlässt man das Moormuseum, so werfe man einen Blick auf den davorliegenden Wassergraben: Es ist ein typischer Entwässerungsgraben. Solche Gräben wurden ausgehoben, um zum einen das Wasser aus den Mooren abfließen zu lassen und zum anderen, um Verkehrswege zu schaffen, auf denen Torf in die Städte gebracht werden kann. In ganz Friesland – ja überhaupt vielerorts in Norddeutschland und auch in den nördlichen Nieder-

landen – trifft man auf ähnliche Kanäle. Sie werden normalerweise Fehn genannt, manchmal auch Feen oder Venn. Allein ein Aufsuchen aller norddeutschen Ortsnamen, die diese Silbe führen, zeigt, wie ausgedehnt die Moorflächen einmal waren, die der Mensch inzwischen trockengelegt und seiner Nutzung unterworfen hat.

Heute, im Zuge der Klimadiskussion, werden manche trockengelegte Moore wieder vernässt. Grund ist, dass aus einem trockenen Moor kontinuierlich Treibhausgase – CO₂ und Methan – entweichen. Wird das Moor wieder unter Wasser gesetzt, so wird auf diese CO₂-Quelle gewissermaßen ein Stöpsel gesetzt. Auch die vielen besonderen Lebewesen, die an das Leben im kargen Moor angepasst sind, freuen sich darüber. Die Wiedervernässung von Mooren ist eines der Beispiele, wie Klimaschutz und Naturschutz Hand in Hand gehen können.

Ähnliche Möglichkeiten zur Begehung von Mooren kann man im Süden und Norden Deutschlands an verschiedenen Stellen wahrnehmen. Untenstehend einige Hinweise auf weitere Moore.

Claudia Schmidt und Jens Soentgen

**Moormuseen im Norden
Deutschlands**

Moormuseum Benthullen

bei Oldenburg, Hof Berg,
Zu den Birken 15, ab Ammerländer
Straße, 26203 Benthullen,
Telefon 0 44 07 / 83 02
[www.wardenburg.de/sehenswu/
moormuseum.htm](http://www.wardenburg.de/sehenswu/moormuseum.htm)

Emsland Moormuseum

Geestmoor 6
49744 Geeste – Groß Hesepe,
Telefon 0 59 37 / 70 99 90
www.moormuseum.de

Haus im Moor

Goldenstedt, Naturschutz- und
Informationszentrum, NIZ Goldenstedt,
Arkeburger Straße 22,
49424 Goldenstedt,
Telefon 0 44 44 / 26 94
[www.niz-goldenstedt.de/
einrichtungen/haus-im-moor/](http://www.niz-goldenstedt.de/einrichtungen/haus-im-moor/)

**Moormuseen im Süden
Deutschlands**

Wurzacher Ried

Bad Wurzach (bei Memmingen),
Am Reischberg 12
88410 Bad Wurzach
Telefon 0 75 64 / 31 67
[www.oberschwaebisches-
torfmuseum.de/torfbahn/](http://www.oberschwaebisches-torfmuseum.de/torfbahn/)

Moor- und Torfmuseum

Chiemsee Rottau, Samerweg 8,
83224 Grassau
Telefon/Fax 0 86 41 / 21 26
www.torfbahnhof-rottau.de/

Ainringer Moos

Adelstetten 44, 83404 Ainring,
Telefon 0 86 56 / 98 99 99
[www.ainringer-moos.de/
museum_ausstellung.php](http://www.ainringer-moos.de/museum_ausstellung.php)

CO₂-Bilanz von Wäldern – Ein Spaziergang durch die Baumkronen im »Urwald« des Nationalparks Hainich

Anfahrt

Der Spaziergang beginnt am Forsthaus Thiemsburg bei Bad Langensalza (Ortsteil Alterstedt). Wer es klimaschonend mag: Die Deutsche Bahn bietet im Regionalverkehr Thüringen ein Kombiticket zum Baumkronenpfad.

Anforderungen

Die Spazierstrecke ist nur 500 Meter lang – aber es gibt viel zu sehen. Wenn man sich Zeit nimmt, ist man etwa eine Stunde unterwegs. Leicht kann man den Spaziergang verlängern; durch den Hainich führen zahlreiche Wanderwege. Für Rollstuhlfahrer – und natürlich auch für Kinderwagen – gibt es Aufzüge, die in den Baumkronenpfad hinauf-

fahren. Der Baumkronenpfad ist barrierefrei. Der Nationalpark Hainich besitzt ein dichtes Netz von Wanderwegen. Manche sind thematisch gestaltet, wie der Feensteig bei Weberstedt oder der Naturpfad Thiemsburg. Andere, wie der Waagebalkenweg oder der Rennstieg, sind für Tagestouren ausgelegt.

Eine interaktive Karte findet sich unter: www.nationalpark-hainich.de/karte/index.php?view=wk.

Informationen

Grundlegende Informationen zum Nationalpark Hainich finden sich unter: www.nationalpark-hainich.de

Wälder spielen in der CO₂-Bilanz der Erde eine zentrale Rolle: Mit der Photosynthese nehmen die Bäume große Mengen an CO₂ aus der Luft auf und verwandeln sie zunächst in Traubenzucker. Ein Teil wird durch Atmung der lebenden Pflanzenteile – vor allem der Wurzeln – schnell wieder freigesetzt. Ein weiterer Teil wird in kurzlebige Biomasse wie Blätter umgewandelt und im folgenden Jahr von den Lebewesen im Boden zersetzt. Ein großer dritter Teil des aufgenommenen CO₂ wird aber langfristig im Holz gebunden und entlastet so unser Klima.

Spaziergang durch die Baumkronen

Ein Urwald ist der Hainich nicht, Urwälder gibt es in Deutschland nicht mehr. Wie fast alle Wälder in Mitteleuropa ist der Hainich über Jahrhunderte für Holzeinschlag, Jagd und Schweinemast genutzt worden. Mindestens

seit dem 16. Jahrhundert – so weit gehen die Quellen zurück – ist hier aber immer Wald gewesen (Abbildung 1).

In den letzten Jahrzehnten vor der Wende war der in Thüringen gelegene Hainich militärisches Sperrgebiet, danach wurde er Nationalpark. Weil er sich deshalb seit mehr als fünfzig Jahren ungestört entwickeln konnte, ist er auf dem Weg zurück zum Urwald schon weit vorangeschritten und gilt als einer der wenigen alten Wälder in Deutschland. Der Hainich Nationalpark ist mit 5.300 Hektar der größte zusammenhängende Laubwald in Mitteleuropa.

Unser Spaziergang beginnt an der Thiemsburg. Den dortigen Restaurationsbetrieb im Stile und Geschmack einer Autobahnraststätte kann man gestrost links liegen lassen, das Ziel ist der Baumkronenpfad. Hier hat man das buchstäblich erhabene Gefühl, einen sonst kaum erreichbaren Lebensraum voller Vielfalt zu betreten.

Auf unserem Spaziergang durch die Baumkronen wollen wir der Rolle der Wälder im CO_2 -Haushalt der Erde näher kommen. Denn die Zahlen, die im Zuge der Klimadebatte diskutiert werden, sind ja unglaublich verwirrend: Wer kann schon etwas mit Petagramm und Gigatonnen anfangen? Und die Einheiten sind noch komplizierter. Mal sind es t (also Tonnen) CO_2 , mal g (also Gramm) C. Im Hainich rechnen wir mit Traubenzuckereinheiten. Das ist eine Einheit, die man sehen, anfassen und sogar aufessen kann – doch dazu später mehr.

Wichtig zu wissen: Die Wissenschaftler verfolgen das Element Kohlenstoff (C), das auf seiner Reise durch das Ökosystem in verschiedenen chemischen Bindungen vorkommen kann. CO_2 , das Gas, das den Treibhauseffekt verursacht, enthält nur zu 27,3 Prozent Kohlenstoff, der Rest ist Sauerstoff. Traubenzucker enthält 40 Prozent Kohlenstoff, Holz etwa 47 Prozent. Deshalb rechnet man die anderen chemischen Elemente oft heraus und bezieht die Flüsse nur auf den Kohlenstoff selbst. Um einen Fluss genau beschreiben zu können, muss man drei Fragen beantworten können: *Wie viel fließt in welcher Zeit durch welche Fläche?*

Zunächst aber werden die Baumkronen erklommen (für Rollstuhlfahrer steht ein Aufzug zur Verfügung). Der etwa 500 Meter lange Rundgang startet in zehn Meter Höhe und schlängelt sich stetig steigend durch die Baumkronen bis zum Aussichtsturm, dann in 24 Meter Höhe (Abbildung 2). Der



1 Der Hainich ist einer der wenigen alten Wälder Deutschlands.



2 Der 500 Meter lange Baumkronenpfad.

Weg führt durch die Kronen von Buche, Esche, Eiche, Ahorn, Linde – sogar die seltene Elsbeere ist von oben zu bewundern. Dabei sind die Wälder Mitteleuropas aus naturgeschichtlichen Gründen eher artenarm. Im Vergleich ist die Artenvielfalt im tropischen Regenwald um ein Vielfaches höher. Dort finden sich bis zu 400 Baumarten in einem Wald.

Klimaschutz durch Artenvielfalt?

Ein Traubenzuckerdragee lutschend kann man sich hier auf dem Baumkronenpfad die Frage stellen: Spielt Artenvielfalt im Klimaschutz eigentlich eine Rolle? Die Antwort ist Ja! Denn jede Baumart hat ihre eigene Strategie mit der Launenhaftigkeit des Wetters umzugehen und die Aufnahme von CO_2 zu optimieren. Der Erhalt von artenreichen Wäldern ist im Klimaschutz von großer Bedeutung.

Zum Beispiel die Buche: In verregneten Sommern wächst sie sehr viel besser als in sonnigen und trockenen. Trockene Sommer sind für die Buche Stress. Sie kann aus dem Boden nicht mehr so viel Wasser aufnehmen, wie die Blätter durch Transpiration verlieren. Deshalb muss sie gegensteuern und ihre Blätter verschließen. Wie alle höheren Pflanzenarten ist sie dazu in der Lage, weil sie winzig kleine Löcher an der Unterseite der Blätter hat – die *Stomata*. Mit ihnen kann sie aktiv die Wasserabgabe regulieren. Sie kann so an heißen Tagen mit trockener Luft die Transpiration stark einschränken. Diese *Stomata* kann man, wenn man ein Buchenblatt abpflückt und ansieht, allenfalls mit der Lupe sehen. Es gibt aber Pflanzen, bei denen sie so groß sind, dass man sie auch mit bloßem Auge erkennen kann – zum Beispiel beim Supermarkt-Basilikum.

Aber auch für die Aufnahme von CO_2 sind die *Stomata* wichtig, denn sie sind auch der Weg, durch den es für die Photosynthese aufgenommen wird. Je stärker sich die Blätter also gegen Austrocknung schützen, umso weniger CO_2 können sie aufnehmen. Die Buche ist konservativ, das heißt: Sie räumt dem Schutz vor zu hoher Wasserabgabe größere Wichtigkeit ein als der Aufnahme von möglichst viel CO_2 .

Die Esche ist risikofreudiger. Sie wurzelt tiefer und ihre Blätter können Wasserverlust besser vertragen. Wenn die Buche schon »zumacht«, kann die Esche das reichliche Sonnenlicht noch gut für die Photosynthese nutzen. Für den Wald insgesamt bedeutet das, dass durch die Vielfalt der Strategien die Aufnahme von CO_2 optimiert ist. Der Erhalt von artenreichen Wäldern ist im Klimaschutz also von großer Bedeutung.

Wälder als CO_2 -Senke

Auf unserem Weg über den Baumkronenpfad entdecken wir einen Bildschirm, den das Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena aufgestellt hat. Traubenzuckerdragees, die in eine Schale fallen, sieht man dort. Sie geben uns Antwort auf die Frage: Wie viel CO_2 nimmt ein Wald wie der Hainich im Jahr auf?

Um diese Frage zu beantworten, benutzen wir die kleine Dose Traubenzucker (Abbildung 3), die wir am gegenüberliegenden Automaten gezogen haben. Denn Traubenzucker ist das erste Produkt der Aufnahme von CO_2 mit der Photosynthese. Aus Traubenzucker stellt die Pflanze alle weiteren Stoffe her, die sie braucht – Blätter, Stengel, Blüten – oder eben Holz, Harz, Saft und so weiter. Ein Traubenzuckerdragee wiegt etwa 0,8 Gramm. Für diese Menge brauchen 50 Blätter der Buche einen sonnigen Sommertag. Fünfzig Blätter – das klingt viel. Aber der Wald im Hainich bildet über einem Quadratmeter Bodenfläche fast 2.000 Blätter. Das sind fünf Quadratmeter Blattfläche. Ihre Photosynthese bildet an einem Tag 30 Gramm Traubenzucker. Ein Drittel davon wird im Laufe desselben Tages schon wieder veratmet. Denn einen Teil des Traubenzuckers braucht der Baum, um seinen Stoffwechsel aufrechtzuerhalten. Dabei entsteht dann wieder CO_2 . Aber ein Teil wird gespeichert: Netto bleiben 20 Gramm, also ein Döschen Traubenzucker pro Quadratmeter Wald.



- 3 Pflanzen nehmen CO_2 auf und verwandeln dieses über die Photosynthese in Traubenzucker. Um die Menge eines Traubenzuckerdragees herzustellen, benötigen fünfzig Buchenblätter einen sonnigen Sommertag.

Da die Photosynthese nur in der belaubten Zeit stattfindet, die Atmung aber im ganzen Jahr, summiert sich die Jahresnettoaufnahme auf etwa 40 Döschchen Traubenzucker pro Quadratmeter. Dieser Traubenzucker wird in Holz umgewandelt und langfristig im Wald gespeichert. Der ganze Hainich mit seinen 5.300 Hektar Fläche nimmt netto im Jahr die sagenhafte Menge von 2,1 Milliarden Traubenzuckerdöschchen auf. Es würden fast 2.500 schwere Lkw mit Anhängern gebraucht, um diese Menge abzutransportieren.

Der Hainich bietet damit eine enorme Ökosystem-Dienstleistung: Er nimmt einen Teil des CO_2 auf, das wir durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen – von Öl, Kohle und Gas – freisetzen. Aber wie viel der Emissionen, die durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen, kann der Wald eigentlich aufnehmen?

Die Antwort ist ernüchternd: Die riesige Menge von 2,1 Milliarden Traubenzuckerdöschchen verschwindet im Tank von gerade mal 25.000 Autos. Allein in den umliegenden Städten Mühlhausen, Bad Langensalza und Eisenach sind mehr Autos zugelassen. Rechnet man die Emissionen aus Stromerzeugung, industriellen Prozessen wie Zementherstellung, Heizung et cetera hinzu wird schnell klar: Die wenigen Wälder, die wir noch haben, sind hoffnungslos überfordert. Um alle Emissionen aus Deutschland mit Wäldern auszugleichen, müsste man das ganze Land aufforsten und eine Fläche von der Größe Frankreichs noch dazu. Hinzu kommt, dass der Wald nicht unendlich lange CO_2 aus der Luft filtern kann. Irgendwann altert der Wald so stark, dass die CO_2 -Aufnahme mit der Photosynthese die Abgabe durch verschiedene Atmungsprozesse nur noch ausgleichen kann. Eine Nettoaufnahme findet dann nicht mehr statt.

Böden als Kohlenstoffspeicher

Wir sind auf einem der Wanderwege jetzt tiefer in den »Urwald Hainich« eingedrungen und gehen ein paar Schritte abseits des Weges. Unter unseren Füßen raschelt das Laub. Das waren die grünen Blätter des letzten Jahres. Wird eigentlich auch im Boden Kohlenstoff gespeichert?

Ein Bodenprofil würde uns zeigen, dass der Boden im Hainich reich an kohlenstoffhaltigen Substanzen ist. Bodenkundler nennen das die organische Bodensubstanz oder den Humus. Das im Herbst gefallene Laub wird von Milliarden von Bodentieren, Bakterien und Pilzen teilweise zu CO_2 zersetzt und teilweise zu komplizierten organischen Molekülen umgebaut, die langfristig im Boden gespeichert werden. Über die Jahrhunderte wird so eine große Menge Kohlenstoff im Boden gespeichert (Abbildung 4).

Der Humus hat eine wichtige Funktion im Boden. Er hilft dem Boden zum Beispiel, das Wasser besser festzuhalten, und reguliert so auch den Wasserhaushalt der Landschaft. Auch die Bodenfruchtbarkeit wird durch den Humus besser.

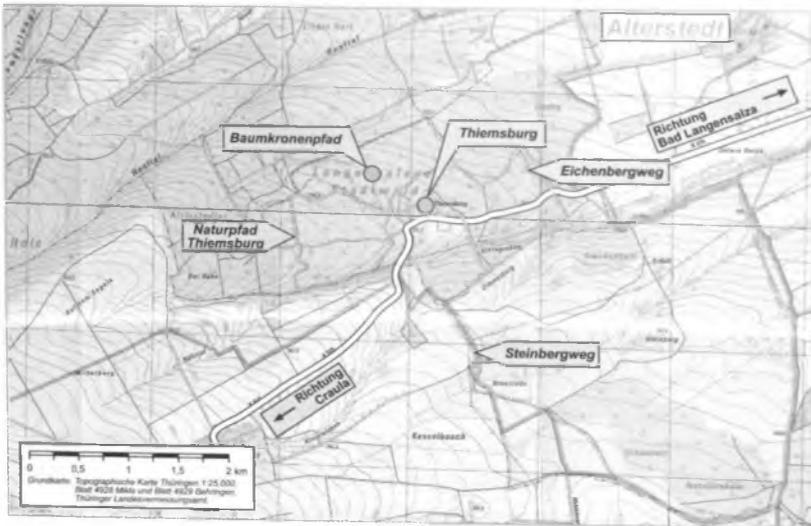


4 Eine große Menge Kohlenstoff wird im Humus des Waldbodens gebunden.

Werden Wälder gerodet, so geht ein großer Teil des Humus verloren. Er wird mit dem Wind weggetragen oder vom Regen weggespült. Gleichzeitig wird der Boden aufgerissen. Solche Störungen regen im Boden die Zersetzung durch Pilze und Bakterien an. Der Humus wird in CO_2 umgewandelt und belastet die Atmosphäre. Die Entwaldung ist zurzeit vor allem in tropischen Ländern ein Problem. Es werden Jahrzehnte bis Jahrhunderte vergehen, ehe der dort verlorene Bodenkohlenstoff wieder regeneriert wird – wenn er überhaupt regeneriert wird.

Bei unserer Wanderung hoch oben zwischen den Baumkronen und unten im raschelnden Laub des Waldes haben wir gelernt, wie bedeutend die Rolle ist, die Wälder im Klimaschutz spielen. Unsere immensen CO_2 -Emissionen können sie aber bei Weitem nicht kompensieren. Um große Klimaveränderungen mit allen ihren negativen Folgen zu verhindern, müssen wir alle bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe sparen. Jeder von uns ist gefragt.

Werner Leo Kutsch



5 Übersichtskarte Umfeld der Thiemsburg im Nationalpark Hainich.

Alpiner Klimawandel - Ein Spaziergang in den Bergen Garmisch-Partenkirchens

Anfahrt

Auf der A 95 ab München Richtung Garmisch-Partenkirchen. Beschilderung »Wankbahn« im Ort folgen.

Anforderungen

Dauer: vier bis fünf Stunden, nur für geübte Wanderer mit entsprechender Ausrüstung, Wege sind teilweise schmal und steil.

Informationen

Wankbahn: www.zugspitze.de
(Link »Wank«)
Garmisch-Partenkirchen:
www.garmisch-partenkirchen.de
Tourist-Information
Richard-Strauss-Platz 2
82467 Garmisch-Partenkirchen
Telefon: 0 88 21 / 18 07 00
E-Mail: tourist-info@gapa.de

Nirgendwo – wenn man von bestimmten Küstenregionen absieht – ist der Klimawandel so deutlich und unmittelbar zu beobachten wie in den Alpen. Hier hat er direkte wirtschaftliche Auswirkungen: Wenn Gegenden, die zuvor schneesicher waren, nunmehr künstlich beschneit werden müssen, so schwindet nach und nach eine für die Region unverzichtbare Einnahmequelle. Und das Beschneien ist teuer: Um einen Hektar (= 100 mal 100 Meter) mit einer Schneedecke von 30 Zentimetern auszustatten, benötigt man 3.700 Kubikmeter Wasser, 25.000 Kilowattstunden Energie und kommt, wenn man das Equipment einrechnet, auf Kosten von um die 110.000 Euro.

Doch nicht nur für die Pistenbetreiber, auch für die Forstwirtschaft in den hoch gelegenen Regionen der Alpen hat der Klimawandel schon jetzt spürbare Auswirkungen, da bestimmte Baumarten mit dem wärmeren Klima nicht mehr gut zurechtkommen.

Garmisch-Partenkirchen: Erdgeschichte und Ortsgeschichte

Der Markt Garmisch-Partenkirchen (26.000 Einwohner), auf 708 Meter Höhe gelegen, liegt am Fuße des Zugspitzmassivs mit der Zugspitze (2.962 Meter) als höchstem Berg Deutschlands (Abbildung 1). Seine letzten noch erhalte-



1 Das Zugspitzmassiv mit der Zugspitze (rechts) und der Alpspitze (links). Die Schneereste bilden den »Höllentalferner«.

nen Gletscherreste liegen in einem Kessel zwischen Ammergauer Alpen (Kramer), Estergebirge (Wank) im Norden und Wettersteingebirge im Süden.

Entstanden ist dieses Gebiet, als mächtige Meeresablagerungen der Trias-, Jura- und Kreidezeit zum Ende der Kreidezeit und im Tertiär gepresst, gefaltet und übereinander geschoben wurden. So kann man den hellen Kalk, aus dem die Gipfel, Grate und schroffen Felswände des Wettersteinmassivs bestehen, und den dunklen Hauptdolomit sehen, der überwiegend Kramer und Wank aufgebaut hat. Die Täler wurden während der Eiszeiten vor allem durch den Loisach- und Ammergletscher geformt.

Durch die vielen verschiedenen Höhenlagen rund um Garmisch-Partenkirchen und die damit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, kann die Region einem breiten Spektrum an Pflanzen und Tieren Heimat bieten. In den Waldregionen kann man neben vielfältigen Orchideenarten auf den Almen auch Enzian, Alpenanemonen sowie Zirbelkiefern, Lärchen und Bergahorne finden.

Die Besiedlungsgeschichte geht bis in die vorchristliche Zeit zurück, als die Gletscher nach der Eiszeit abschmolzen und erste Siedlungen in den Tälern möglich waren. Durch die Entstehung von Handelsbeziehungen zwischen Italien und den nördlichen Ländern entstand Partanum (das spätere Partenkirchen) als Wegesiedlung um die Zeitenwende an der Strecke Richtung Italien über die Alpen. Nach dem Niedergang des römischen Reiches begann die Einwanderung der Bajuwaren, und Garmisch wurde 802 erstmals als »Germareskavve« urkundlich erwähnt.

Im Hochmittelalter erlebte die Region einen wirtschaftlichen Aufschwung, weil durch die Handelsbeziehungen von Augsburger Kaufleuten nach Italien der Ort als Station vor beziehungsweise nach der Alpenüberque-



2 Blick über Garmisch-Partenkirchen.

rung an Bedeutung gewann. Eine Haupteinnahmequelle war die Flößerei auf der Loisach. Durch den Dreißigjährigen Krieg und die Napoleonischen Kriege wurden jedoch die Handelsbeziehungen unterbrochen und das Gebiet verarmte.

Erst als 1889 die Eisenbahnverbindung von München her (1912 nach Innsbruck) entstand, gab es einen neuen Aufschwung, der vor allem durch den Fremdenverkehr (Bau der Zugspitzbahn 1927/1928) möglich war. 1935 wurden die beiden Gemeinden Garmisch und Partenkirchen auf Druck der Reichsregierung vereinigt und präsentierten sich 1936 als Austragungsort der 4. Olympischen Winterspiele.

Heute ist Garmisch-Partenkirchen der meistbesuchte Fremdenverkehrsort in den deutschen Alpen (Abbildung 2) und bietet neben einer außergewöhnlichen Landschaft und Natur auch ein breites kulturelles und sportliches Angebot. Besonderheiten sind das Neujahrsspringen im Rahmen der Vierschanzentournee, das traditionelle Kandahar-Skirennen oder die bayerische Meisterschaft im Hornschlittenfahren. Im Jahr 2011 wird außerdem zum zweiten Mal die Alpine Skiweltmeisterschaft in Garmisch-Partenkirchen durchgeführt.

Wanderung zum Thema »Klima«

Will man sich in Garmisch-Partenkirchen auf die Suche nach Auswirkungen des Klimawandels machen, bietet sich eine Wanderung am Wank (1.780 Meter), dem Aussichts- und Sonnenberg an. Von hier aus eröffnet sich ein herrlicher Blick auf die verschiedenen Gebirge rund um Garmisch-Partenkirchen, wie Esterberg, Ammer, Karwendel und Wettersteingebirge mit der Zugspitze, aber auch hinunter nach Garmisch-Partenkirchen und über das Loisachtal. Dieser Blick und eine Wanderung rund um den Wank zeigen viele sichtbare Auswirkungen des Klimawandels auf die Region. Davon betroffen sind der Skitourismus, der Wald, die Vogelwelt und die Landwirtschaft.

Die Wanderung beginnt an der Wank-Talstation im Ortsteil Partenkirchen. Von hier können Sie bis auf die Mittelstation fahren. Die Wanderung wird rund um den Wank über den Hüttelsteig zum Almgasthof »Esterberg« verlaufen, von dort zur Gaststätte »Gschwandtnerbauer« und wieder hinab nach Partenkirchen. Alternativ lohnt es sich auch, auf den Wank hinaufzufahren, um von dort einen eigenen gewählten Wanderweg zu finden. Für ganz Mutige findet sich hier auch ein Drachenflugstartplatz. Zur Nutzung

dieser Plattform und zur Übernachtung im Wank-Haus auf 1.780 Meter Höhe finden Sie nähere Informationen unter: www.becker-stoll.de.

Bei der Mittelstation angekommen, können Sie zunächst einen Rundumblick machen – und schon die ersten Auswirkungen des stattfindenden Klimawandels beobachten: Bei gutem Wetter können Sie direkt bis zur Zugspitze und den unterhalb liegenden Gletscher »Höllentalferner« sehen (Abbildung 1), der Zugspitzgletscher geht nach Süden.

Auch diese Gletscher unterliegen dem weltweiten Trend der massiven Gletscherschmelze, sodass der Zugspitzgletscher, wie auch andere Gletscher in Österreich und der Schweiz, über den Sommer mit Kunststoffplanen in einer Größe von circa 9.000 Quadratmetern abgedeckt wird – 2007 wegen des warmen Winters sogar noch früher als sonst. Durch die Planen sollen das einfallende Sonnenlicht reflektiert und der Schmelzvorgang des Gletschereises verzögert werden. Trotz dieser Maßnahmen wird geschätzt, dass der Gletscher nur noch circa 15 Jahre für den Wintersport nutzbar sein wird.

Weiter sehen Sie geradeaus den Hausberg (1.340 Meter) und das Kreuzeck (1.652 Meter) mit den Skipisten, die durch den Wald führen. Seit 1900 wird das Gebiet für den Skisport genutzt. 1926 wurde als erste Seilschwebebahn Bayerns die Kreuzeckbahn gebaut, 1938 der damals längste Schlepplift Europas auf den Hausberg. Die anspruchsvollste Strecke ist die »Kandahar«, auf welcher der Skifahrer auf 3.455 Meter Länge einen Höhenunterschied von 960 Metern zurücklegt. Der Streckenrekord dabei liegt unter zwei Minuten!

Mit hohem finanziellem Aufwand wird derzeit das Skigebiet aufgewertet. Die neue Seilbahn am Hausberg wurde bereits mit einem Aufwand von 8,6 Millionen Euro errichtet. Die Kandahar muss für die anstehende Ski-Weltmeisterschaft im Jahr 2011 für neun Millionen Euro ausgebaut werden, um den neuen Bestimmungen des internationalen Skiverbandes für die Austragung einer Weltmeisterschaft gerecht zu werden.

Der Klimawandel ist sicherlich der wichtigste Grund dafür, dass in diesem Gebiet die Abfahrten in Zukunft noch stärker künstlich beschneit werden müssen und sich damit die Kosten für eine Beschneigung stark erhöhen. Mit einer möglichen beschneibaren Fläche von etwa 55 Hektar der Dreh-, Horn- und Kandaharabfahrten entsteht dann die bei Weitem größte Anlage in Deutschland. Am Hausberg wird derzeit dafür ein Speichersee gebaut, der 62.000 Kubikmeter Wasser fasst.



3 Der »Hüttelsteig« führt vom Wank zum Esterberg.



4 Alpensalamander («Bergmandl»).

Von diesem Standort aus können Sie auch die neue Skischanze für das Neujahrsspringen sehen. Die alte Schanze mit einer Gesamthöhe von 119 Metern (Turmhöhe 38 Meter) wurde am 14. April 2007 gesprengt und machte der neuen Schanze Platz, die mit dem Neujahrsspringen 2008 eingeweiht wurde. Ob die beschriebenen Investitionen in den Wintersport bei weiteren schneearmen und kurzen Wintern, die es bei immer wärmeren Temperaturen geben wird, rentabel sind, bleibt fraglich.

Von der Mittelstation und dem Aussichtspunkt aus wenden Sie sich bitte nach rechts und starten die Wanderung. Halten Sie sich an die Beschilderung »Hüttelsteig« (Abbildung 3) zum Esterberg, die nach wenigen Metern rechts vom Weg abzweigt.

Auf dieser Wegstrecke laufen Sie zunächst an der Westseite des Wanks entlang. Der schmale Weg des Hüttelsteigs führt durch den Wald und über manche Stufen in die Höhe und wieder ein Stück hinab. Passen Sie gut auf, wohin Sie treten, da es nicht nur links steil den Berg hinabgeht, sondern weil es sich oft die vielen hier heimischen Alpensalamander («Bergmandl») auf den Wegen gemütlich machen (Abbildung 4).

Hochwasser in Garmisch-Partenkirchen

Eines der Probleme Garmisch-Partenkirchens ist, dass drei Flüsse in der Mitte der Stadt zusammenfließen: die Loisach, die Partnach und der Kankerbach (Abbildung 5). Bei starken regionalen Regenfällen innerhalb kurzer Zeit sind diese



5 Drei Flüsse fließen in Garmisch-Partenkirchen zusammen. Dadurch erhöht sich die Hochwassergefahr.

drei Flüsse mit ihren jeweiligen Zuläufen für den Ort ein großes Problem. Die Flussbette und Gräben, welche durch die Stadt führen, laufen schnell voll und überfluten die Umgebung. 2005 standen so Teile des Ortes unter Wasser und der Fluss musste durch die Hauptstraße von Partenkirchen geleitet werden, um größere Schäden in den Wohngebieten zu verhindern. Die Folge davon war, dass nach Abfließen des Wassers und trotz mehrfacher Reinigung der Straßen die Feinstaubbelastung durch den feinen Schlamm, der sich zwischen den Steinen abgelagert hatte, sehr hoch war.

Diese Probleme werden sich voraussichtlich aufgrund des Klimawandels noch weiter verschärfen. Die Niederschläge werden sich von einer ausgeglichenen Niederschlagsmenge über einen längeren Zeitraum zu kurzen und heftigen Schauern mit großen Wassermengen verändern.

Der Markt Garmisch-Partenkirchen arbeitet seit einigen Jahren an einem Projekt zum Hochwasserschutz. Dieses umfasst neben der Verstärkung der Damme und dem Ausbau der Uferstrecken an der Partnach ein bereits errichtetes Hochwasserrückhaltebecken für die Kanker beim Klinikum, das circa 220 000 Kubikmeter Stauffläche für das Wasser des Flusses bereithält. Die Gesamtbauzeit des Projektes umfasst rund zehn Jahre und ist mit derzeit circa 25 Millionen Euro veranschlagt.

Auf Ihrem Weg durch den Wald können Sie zwischen den Bäumen ins Loisachtal hinabblicken, das von Garmisch-Partenkirchen über Farchant Richtung Murnau führt, wobei vor allem der Fluss mit seinen bei den Hochwassern der vergangenen Jahre ausgeschwemmten Uferbereichen nicht zu übersehen ist.

Nach circa einer halben Stunde überquert der Weg einen Wasserlauf, welcher den Berg hinabführt (Abbildung 6). Bei den ausgewaschenen Seiten kann man sich nur in etwa vorstellen, wie viel Wasser bei starkem Regen den Berg hinabstürzt: Hier können sich Pflanzen nicht halten. Jedoch hat man auch an dieser Stelle die Möglichkeit, die typischen Schichtformationen des Plattenkalks und die Bankung des Hauptdolomits zu sehen, aus denen der Wank überwiegend besteht.



6 Flussbett am Hang.

In der Nähe des Ortes Farchant unten im Tal sieht man die Schäden des Hochwassers von 2005 ganz deutlich am Loisachufer: Das Flussbett des Kuhfluchtwasserfalls gräbt sich vom Berg zur Loisach hin. Direkt am Zufluss zur Loisach sieht man noch heute die gewaltigen Kräfte, welche die Wassermassen mit sich brachten: Hier sieht man eine große

Fläche junger Bäume, die gepflanzt wurden, nachdem ihre Vorgänger von den Fluten entwurzelt und weggerissen worden waren. Es wird prognostiziert, dass solche Hochwasserereignisse als Folge des Klimawandels in Zukunft vermehrt auftreten werden.

Der Wanderweg führt uns weiter zur 1.265 Meter hohen Esterbergalm, die in einem Hochtal zur Pause einlädt. Ringsumher können Sie die Vielfalt der Almenfauna bewundern, die sich im Frühling und Sommer durch mehrere Orchideenarten und seltene Bergpflanzen auszeichnet. Neben Tollkirschen und Teufelskralle finden Sie Akeleien und Enzian (Abbildung 7).



7 Bergflora auf der Esterbergalm.

Bei einer Rast können Sie hier von Norden aus zur Wankspitze hinaufblicken – und damit die Ausweichstrecke der Ski-Weltmeisterschaft 1976 sehen, die als Alternative bei zu wenig Schnee zwar vorbereitet, jedoch nie genutzt wurde. Heute ist dieses Gebiet ein Problembereich, da bei starkem Regenfall das Erdreich wegen fehlender Bepflanzung vor allem an den Wegen abgetragen wird. Es ist geplant, dieses Areal im Rahmen der Ausweichflächenbepflanzung für die Ski-Weltmeisterschaft 2011 aufzuforsten.

Auf dem Weg um die Ostseite des Wank wird eine weitere Auswirkung des Klimawandels sichtbar: das Fichtensterben. Das trockenere und zunehmend wärmere Klima, welchem die Fichte nicht gewachsen ist, fördert deren Schädlingsbefall und schließlich ihr Sterben. Während der Wanderung kann man so immer wieder befallene oder auch abgestorbene Bäume sehen. Die Fichte ist jedoch in dieser Region der sogenannte »Brotbaum«, da vor allem diese Sorte für die wirtschaftliche Holznutzung geschlagen wird. Eine Veränderung in diesem Wirtschaftszweig wird notwendig. Die Aufforstung geschieht mittlerweile vor allem durch Lärchen, Ahorn und Tannen.

Das Waldgebiet um den Wank hat neben holzwirtschaftlichem noch einen weiteren Nutzen: 50 bis 60 Hektar der Süd- und Osthänge sind Weidflächen für die Bauern. Somit ist es nicht ungewöhnlich, dass vor dem Wanderer plötzlich nach einer Kurve ein Schaf auf dem Weg steht oder das Läuten der Kuhglocken das Klettern am Berghang begleitet (Abbildung 8).

Auf dem Weg zurück ins Tal kommt man dann an der Windbruchstelle vorbei, die man schon von der Mittelstation aus als freie Fläche sehen konnte: Über weites Gebiet wurden hier alle Bäume während eines Sturmes abgebrochen oder sogar entwurzelt (Abbildung 9). Da solche Stürme jedoch durch den Klimawandel an Quantität und Stärke noch weiter zunehmen werden, könnte dieses Bild in Zukunft möglicherweise noch öfter sichtbar werden.

Bevor der Weg uns zurück nach Garmisch-Partenkirchen führt, ist ein Abstecher zur Berggaststätte »Zur schönen Aussicht« möglich. Direkt dahinter befindet sich die Vogelschutzwarte des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU) – und damit noch ein weiterer Bezug zum Klimawandel. Da hier seit 40 Jahren täglich Vögel, aber auch Pflanzen und Tiere aufgefangen und gezählt werden, sind im Vergleich von langen Zeiträumen Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf das Vogelreich in dieser Region möglich.

Grundsätzlich sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Vogelwelt schwierig zu erfassen, da Veränderungen immer verschiedene Gründe haben können. Besonders deshalb ist das Monitoring (das Verzeichnen und Verfolgen einzelner Trends über lange Zeiträume) so wichtig, um kurzfristige oder auch regional begrenzte Abweichungen aufzudecken. Es gibt aber bisher vier gesicherte Fakten: 1. Die Mittelstreckenzieher wie zum Beispiel die Mönchsgrasmücke kommen fünf Tage früher nach Garmisch-Partenkirchen, 2. die Mittelstreckenzieher fliegen fünf Tage später weg, 3. Vogelarten aus dem Mittelmeerraum werden in Garmisch-Partenkirchen heimisch, wie der Bienenfresser, die Felsenschwalbe und Zwerggäulen, und 4. einige Vogelarten überwintern in der Region und ziehen gar nicht mehr.



8 Weidefläche am Wank.



9 Windbruch in den Hochlagen des Gebirges.

Außerdem hängt die Vogelwelt sehr eng mit der Welt der Insekten zusammen: Wo viele Insekten sind, haben Vögel bessere Bedingungen. So können sich Insekten durch den Klimawandel, das heißt wärmere Winter und langes Frühjahr, stärker ausbreiten. Ihre Larven schlüpfen teilweise früher und zahlreicher, was für die Vögel vor Ort ein großer Vorteil ist. Theoretisch sind

Zugvögel, die zu ihrer gewohnten Zeit in der Region ankommen, im Nachteil, da viele Insekten bereits gefressen oder schon in einem anderen Entwicklungsstadium sind.

Obwohl eine Vielzahl von Veränderungen weiter überwacht und gesichert werden müssen, ist es bereits heute Fakt, dass die Klimaveränderung das Artenspektrum der Vogelwelt in der gesamten süddeutschen Region verändern wird. Insgesamt jedoch scheint es für die Vögel eher positiv zu sein, dass es wärmer wird.

Garmisch-Partenkirchen reagiert auf die Veränderungen, welche sich durch den Klimawandel ergeben. Neben hohen Investitionen in Hochwasserschutz und Aufforstung freier Waldgebiete werden vor allem energie- und kostenintensive Maßnahmen zur Präparierung von Skipisten bei schneearmen Wintern durchgeführt. Die »Kosten des Klimawandels«, von denen viele Studien sprechen, sind also für Garmisch-Partenkirchen, wie für viele andere Alpenorte, heute schon eine schmerzliche Realität.

Claudia Schmidt

Weitere interessante Links

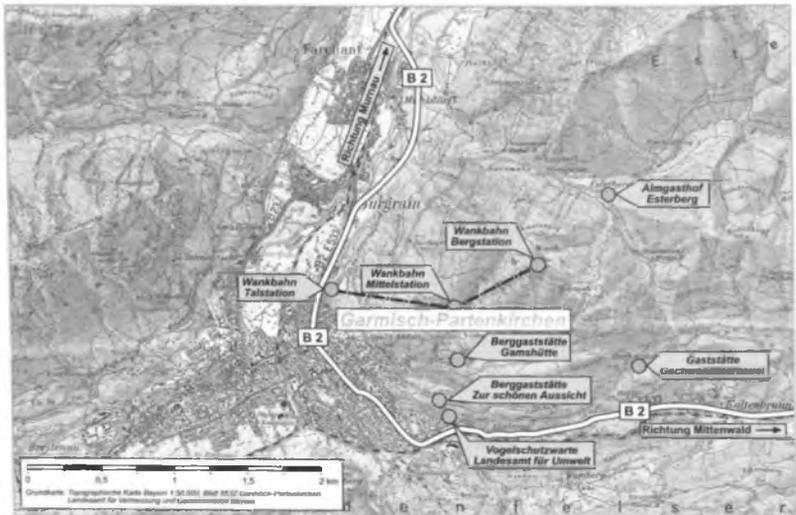
www.zugspitze.de/main.php Internetadresse Bayerische Zugspitzbahn

www.wanderung-gap.de/ Wanderungen um Garmisch-Partenkirchen

www.zugspitze.de/livecams/index.php# WebCams

www.alpenverein-ga-pa.de/ Alpenverein Garmisch-Partenkirchen

www.agenda21-garmisch-partenkirchen.de Agenda 21 in Garmisch-Partenkirchen



10 Übersichtskarte für das Exkursionsgebiet in den Bergen Garmisch-Partenkirchens.

CO₂-Hotspot Flughafen – Ein Spaziergang und eine Rundfahrt auf dem Frankfurter Flughafen

Anfahrt

Über die Autobahnen A3, A 67 und A 5 der Beschilderung »Flughafen« folgen.

Anforderungen

Leichte Tour, die individuell nach Interessen gestaltet werden kann. Man kann sich eine Stunde am Flughafen aufhalten oder auch einen ganzen Tag – je nach Neigung.

Informationen

www.airportcity-frankfurt.de

Flughafenrundfahrten:

Stündlich von 13.00–16.00 Uhr, an Wochenenden, Feiertagen und innerhalb der hessischen Schulferien zusätzlich bereits um 11.00–12.00 Uhr.

Information und Buchung:

Telefon 069 / 690-70 291

Ein Besuch des Frankfurter Flughafens ist nicht nur für Flugbegeisterte ein außergewöhnliches Erlebnis. Er fasziniert durch seine Größe, die ablaufenden Prozesse und das einmalige Flair vom Zusammentreffen der unterschiedlichsten Weltbürger und lockt bis zu 150.000 Fluggäste und Besucher täglich an.

Der Frankfurter Flughafen ist ein Sinnbild für die zunehmende globale Vernetzung und als einer der wichtigsten Verkehrsknotenpunkte Deutschlands für einen erheblichen CO₂-Ausstoß verantwortlich. Andererseits bietet der 1924 gegründete Flughafen mittlerweile 70.000 Beschäftigten Arbeit und er bietet auf wenigen Quadratkilometern alles, was man zum Leben braucht (vom Krankenhaus über Anwaltskanzlei und Casino bis hin zu Supermärkten und Hundestation) und spiegelt damit unseren westlichen Lebensstil mit allen seinen inneren Widersprüchen wider.

Tor zur Welt

Den Frankfurter Flughafen kann man mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln erreichen. Neben der Ankunft über den eigenen Autobahnanschluss ist es aber wohl leichter, über den Fernbahnhof anzureisen. Dieser wurde in seiner jetzigen Form zwar erst 1999 in Betrieb genommen, wird nun aber auf neun Stock-

werke und 660 Meter Länge erweitert und wird neben zwei neuen Hotels und einer Klinik auch ein Kino und 50 neue Einkaufsmöglichkeiten bieten. Von hier aus ist man in 15 Minuten in der Frankfurter Innenstadt und bei der Messe, sodass sogar viele Frankfurter hierher zum Einkaufen kommen. Wer trotzdem mit dem Auto kommt, dem stehen 14.500 Parkplätze zur Verfügung (das entspricht einer Fläche von über zwanzig Fußballfeldern), die auch von Flugreisenden während ihrer Abwesenheit gemietet werden können.

Auf dem Weg vom Fernbahnhof in das Terminal 1 (eröffnet 1972) findet sich das Airport Forum, in welchem man sich über Grundlagen des Fliegens, die Geschichte des Flughafens und weitere Ausbaupläne informieren kann. Hier kann man auch erfahren, was an einem Tag am Frankfurter Flughafen passiert:

- 140.000 Passagiere reisen an oder ab,
- 112.000 Gepäckstücke werden befördert,
- 120.000 Fahrzeuge kommen an und fahren ab,
- 4.800 Tonnen Fracht werden umgeschlagen,
- 1.300 Flugzeuge starten und landen,
- 365 Züge halten an den Flughafen-Bahnhöfen,
- 4 neue Arbeitsplätze entstehen.

Über das Jahr treffen hier also über 54.000.000 Passagiere (2007) ein oder fliegen ab, wovon 53 Prozent nur umsteigen. Besonders in Ferienzeiten werden Spitzenwerte erreicht, zum Beispiel am 28. September 2007 mit 181.515 Passagieren. Durch den Bau einer weiteren Landebahn und eines neuen Terminals sollen diese Zahlen bis 2018 auf circa 83.000.000 pro Jahr gesteigert werden – als Vergleich: Alle Einwohner Deutschlands würden über dieses kleine Areal geschleust.

Einen Eindruck davon, wie die Passagiere und ihr Gepäck koordiniert und verteilt werden, kann man sich mit einer Flughafenrundfahrt verschaffen. Sie gibt einen beeindruckenden Überblick über das Areal, die wichtigsten logistischen Punkte und Abläufe sowie interessante Zahlen und Fakten und erlaubt es dem Besucher, mittels Shuttlebus zwischen den unzähligen Passagier- und Frachtmaschinen hindurch zu fahren und das Starten und Landen der Flugzeuge aus nächster Nähe zu sehen.

Vor Beginn der Rundfahrt reicht die Zeit noch für einen Abstecher in die Abfertigungshalle, in der neben großen Werbebannern für Reisen und Konsum die riesige Anzeigetafel der ankommenden und abfliegenden Maschinen einen Eindruck von den 109 Ländern bzw. weltweit 307 Zielflughäfen gibt, die von Frankfurt aus angefliegen werden. Ein Tor zur Welt (Abbildung 1).

Streng getrennt nach First-, Business- und Economy-Class reihen sich hier die Abreisenden vor den Schaltern. Auf der einen Seite die Geschäftsleute in den dunklen Anzügen, die kleine schwarze Rollkoffer hinter sich

herziehen, auf der anderen Seite einzelne Reisende mit und ohne Kinder oder auch Gruppen und Großfamilien, manchmal mit indischer oder afrikanischer Kleidung, beladen mit riesigen Taschen und Koffern in allen Farben und Formen. Hier liegt Spannung und Vorfreude auf den Flug in die Heimat oder in den Urlaub in der Luft, wobei bei der Business-Class eher gelangweiltes Blättern in Zeitungen oder Geschäftspapieren oder noch ein wichtiges Telefonat zu beobachten ist.



1 Check-in-Schalter.

Auch einige Meter weiter in der Ankunftshalle sind die Emotionen spürbar. Menschen recken vorfreudig ihre Hälsen, um über die Trennwand einen Blick in den Sicherheitsbereich zu wagen, um den ersten Blick auf die Heimkehrenden werfen zu können. Was sie wohl zu erzählen haben und welche Mitbringsel haben sie dabei?

Konsum und Kerosin – eine Rundfahrt

Doch nun zurück zum Meeting-Point »Flughafen Erlebnisfahrten« auf der Brücke zwischen Terminal 1 und Airport Center, um an der Rundfahrt teilzunehmen. Diese beginnt mit einem Halt an der ersten Kontrollstelle des Sicherheitsbereichs. Hier müssen alle Besucher aus dem Bus, ihre Taschen abgeben und sich durch Abtasten und mithilfe von Metalldetektoren überprüfen lassen. Erst dann darf der Bus – nach Passieren drei weiterer Sicherheitsbereiche – auf das Rollfeld. Die Sicherheitsvorkehrungen wurden nach dem 11. September 2001 drastisch verstärkt und das Sicherheitspersonal auf 8.000 Personen aufgestockt. Damit gelten nicht nur für die Mitarbeiter, sondern auch für die Flugreisenden erhöhte Vorschriften, was die Mitnahme von Flüssigkeiten oder persönlichen Dingen im Handgepäck angeht. Die Folge: Täglich wandern zwischen 3,5 und 5 Tonnen von Passagieren zurückgelassene Flüssigkeiten in den Müll.

Auf dem Rollfeld herrscht reges Treiben und dichter Verkehr. Zwischen Feldern von zu verladenden Frachtcontainern fahren Busse mit Passagieren

und unzählige Autos, welche jeweils eine Reihe von Anhängern, mit bunten Koffern oder eingeschweißten Waren hinter sich herziehen. Daneben Fahrzeuge des Sicherheitsbereichs und weitere Lieferwagen, welche die Flugzeuge mit Menschen oder Materialien versorgen. Dazwischen sieht man immer mal wieder einzelne Personen in neongelben Westen um die Flugzeuge herumlaufen, welche die Maschinen warten oder mit Fracht beladen.

Auf dem Boden sind überall gelbe Linien, die in unüberschaubarer Weise auseinander- und wieder zusammenführen. Plötzlich hält der Bus, weil ein Flugzeug das vor ihm liegende Rollfeld passiert. Der Blick richtet sich auf die 18 Reifen des Jumbos (ein Reifen kostet übrigens rund 16.000 Euro und hält etwa 200 Starts und Landungen).

Weiter geht es mit dem Blick nach rechts auf die vielen Flugzeuge, die mit dem Terminal 1 durch die schwebenden Gateways verbunden sind. Direkt neben der indischen Maschine, die sich auf den Flug nach Delhi vorbereitet, stehen Flugzeuge nach Rio oder China. Fern gelegene Reiseziele – nur durch einige Schritte voneinander entfernt.

Plötzlich donnert es auf der linken Seite des Busses: Ein riesiger Jumbo mit circa 396 Tonnen Gewicht ist gelandet. Dahinter hebt gerade ein anderer ab (Abbildung 2). 120.000 PS helfen diesem Jumbo, sein Gewicht auf 200 bis 250 Stundenkilometer zu beschleunigen, damit er abheben kann. Dabei setzt er bei Vollgas etwa 400 Kilogramm CO_2 frei – *pro Minute!*

Der Bus fährt weiter und schon sieht man auf der rechten Seite die zehn Silos, welche die 186.000.000 Liter Kerosin enthalten, mit denen die Flugzeuge betankt werden. Täglich werden zwischen 15 und 19 Millionen Liter verbraucht, indem sie durch das unterirdische, 40 Kilometer lange Rohrsystem gepumpt werden, um die Maschinen an ihren Stellplätzen zu betanken. Damit enthalten die Silos gerade einmal Kerosin für zehn bis zwölf



2 Start und Landung von Jumbos.

Tage, bevor sie neu betankt werden müssen. Wenn die Silos voll sind, enthalten sie 472.000 Tonnen Kerosin; das heißt, es werden am Tag ungefähr 40.000 Tonnen CO₂ durch den Verbrauch des Kerosins freigesetzt (Abbildung 3).

Weiter geht die Fahrt zu den Frachtmaschinen in den Cargo-Bereich des Flughafens, wo eine Gesamtmenge von 2.095.293 Tonnen Fracht im Jahr 2007 umgeschlagen und befördert wurde. So kommen die Maschinen morgens mit Handyteilen aus Asien und fliegen am Nachmittag mit Autoteilen zurück. Auch ganze Autos werden hier verladen (Abbildung 4).

Hier wird das globale Einzugsgebiet unserer Lebensmittel und Konsumgüter deutlich: Nicht nur Elektronikartikel und technische Geräte sowie Kleidung finden ihren Weg aus Asien hierher, sondern auch viele Lebensmittel und Luxusgüter, die wir in den Auslagen unserer Geschäfte wiederfinden.

Unser Lebensstil ist ein globaler, was unsere Kleidung und Nahrung, unser Handy und unsere Reiseziele beispielhaft belegen. Dies wird sich in Zukunft wohl noch verstärken, blickt man auf die Märkte und deren Angebot und Nachfrage, und zeigt sich in der Zunahme des Flugverkehrs und den Ausbauplänen, die an vielen Flughäfen aktuell diskutiert werden.

Doch was heißt das für uns und in Bezug auf den CO₂-Ausstoß, der Auswirkungen auf globale Temperaturveränderungen hat? Kann der Einsatz des neuen Airbus 380, der uns als umweltfreundliches Transportmittel verkauft wird, weil er »nur« 3,3 Liter Kerosin pro Passagier auf 100 Kilometer verbraucht, anstelle von 3,9 Litern die ein Jumbo benötigt, wirklich ein Fortschritt sein? In welchem Verhältnis steht die Nutzung von Energiesparlampen als CO₂-Einsparung mit der Urlaubsreise nach Fernost? Warum spielt das Thema CO₂ am Flughafen überhaupt keine Rolle und ist die Ausgleichszahlung für Flugreisen an Atmosfair (www.atmosfair.de) und andere Anbieter eine Chance für das Klima oder nur ein »Ablasshandel«?

Claudia Schmidt



3 Treibstofftanks voller Kerosin.



4 Verladen eines Autos.

Eine Welt aus CO₂, Staub und Eis - Virtuelle Exkursion auf dem Mars

Anfahrt

Folgen Sie 260 Tage lang der halbparabelförmigen Hohmann-Bahn über eine Strecke von 586,7 Millionen Kilometern.

Anforderungen und Voraussetzungen

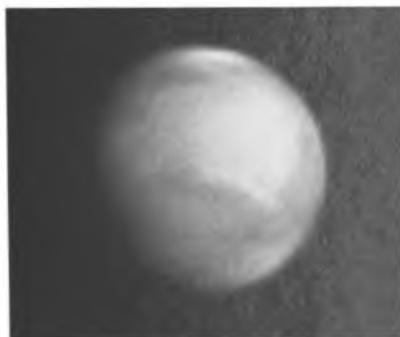
Erfolgreich absolvierte Astronautenausbildung. Körperlich und mental äußerst belastungsfähig (ärztliches Attest erforderlich). Für Familienausflüge nur bedingt geeignet. Die Tour vor Ort kann individuell nach Interesse gestaltet werden.

»Auf lange Sicht wird gar kein Weg daran vorbei führen, dass der Homo sapiens die Erde verlässt und zum Beispiel auf dem Mars eine neue Heimat findet. Der erste Schritt dorthin ... entspricht ungefähr dem Auszug der ersten Menschen aus Afrika vor 150.000 Jahren.«

Harrison Schmitt, Astronaut von Apollo 17

Der Mars ist der vierte Planet von der Sonne aus gesehen und somit direkter Nachbar der Erde. Seine Entfernung zu uns ist jedoch von der jeweiligen Stellung der beiden Planeten in ihren Umlaufbahnen um die Sonne abhängig und variiert zwischen 55,8 und 399,9 Millionen Kilometern (vgl. Zimmermann/Weigert 1999). Aber trotz seiner teilweise sehr nahen Nachbarschaft stellt der Mars nur ein relativ »lichtschwaches« Objekt am Firmament dar, da er nur etwa halb so groß wie die Erde ist. Dass man ihn trotzdem schon frühzeitig als Wandelstern erkannte, liegt vor allem an seiner intensiven orangeroten Farbe. Und diese Farbe ist eine Folge seiner außergewöhnlichen Oberflächenbeschaffenheit, denn der Marsboden ist überwiegend mit Eisenoxid, also rötlich braunem Rost, überzogen. Das Rot ist schon mit bloßem Auge zu erkennen und war wohl der Hauptgrund dafür, dass die antiken Griechen den Planeten nach ihrem Kriegsgott *Ares* benannten. Die Römer gaben ihm später in Anlehnung an ihren Kriegsgott den Namen *Mars* (vgl. Benson 2004).

Der Mars kann schon mit einfachen Amateurteleskopen von heimischen Gefilden aus sehr gut beobachtet werden. Bereits bei einer 200- bis 300-fachen Vergrößerung sind deutlich die weißen Polkappen zu sehen und auf der Oberfläche des Mars lassen sich dunkle und helle Bereiche unterscheiden (Abbildung 1).



1 Unser Nachbarplanet Mars, so wie man ihn durch ein Amateurteleskop sehen kann (aufgenommen mit einem 11" Schmidt-Cassegrain-Teleskop).

Unser Nachbarplanet ähnelt der Erde in vielerlei Hinsicht. So weist der Rote Planet eine ähnliche Neigung der Rotationsachse und damit ausgeprägte Jahreszeiten auf.

Auch der Marstag dauert nur unwesentlich länger als ein Erdtag. Also auf den ersten Blick ähnliche Bedingungen wie auf der Erde. Trotzdem haben sich die Träume, dass der Mars mit menschenähnlichen Lebewesen bevölkert sein könnte, nicht erfüllt (vgl. von Puttkamer 1997; Reichert 2004). Denn seine sehr dünne Atmosphäre weist nur *äußerst* geringe Mengen an Sauerstoff auf – dafür aber sehr viel CO_2 . Der Mars ist eine Welt aus CO_2 , Staub und Eis. Aber welche Rolle spielt die überaus hohe CO_2 -Konzentration in der Marsatmosphäre für das dortige Klima? Besitzt der Mars ebenfalls eine Art Kohlenstoffkreislauf, in dem das CO_2 ein wichtiges Transformations-element darstellt? Spannende Fragen, deren Antworten auf unserem Nachbarplaneten auf uns warten und die allemal die weite Reise wert sind!

Plänen der NASA zufolge sollen allerdings erst um das Jahr 2030 die ersten Menschen den Mars betreten und die Antworten auf all diese Fragen finden. Aber so lange wollen wir natürlich nicht warten und begeben uns derweil auf eine virtuelle Reise zum Mars. Doch bevor wir aufbrechen, haben wir noch umfangreiche Reisevorbereitungen zu treffen, die aufgrund ihres Aufwands und der immensen Kosten durchaus einen längeren Aufenthalt und damit einen umfangreichen Exkursionsbericht rechtfertigen. Denn wer nimmt schon einen über 20 Milliarden Euro teuren Hin- und Rückflug über eine Milliarde Kilometer auf sich, um dann nur einen Tag auf dem Mars mit *Sightseeing* zu verbringen?

Die Reise zum Mars wird inklusive Hinflug, Aufenthalt und anschließendem Rückflug voraussichtlich drei Jahre in Anspruch nehmen. In dieser Zeit müssen wir uns mit erheblichen Anstrengungen und bisher ungeahnten Strapazen für Geist und Körper auseinandersetzen, denn während des Fluges verändert sich der Körper des Menschen in der Schwerelosigkeit gravierend: Das Gehirn, dem die Information über Oben und Unten fehlt, erzeugt

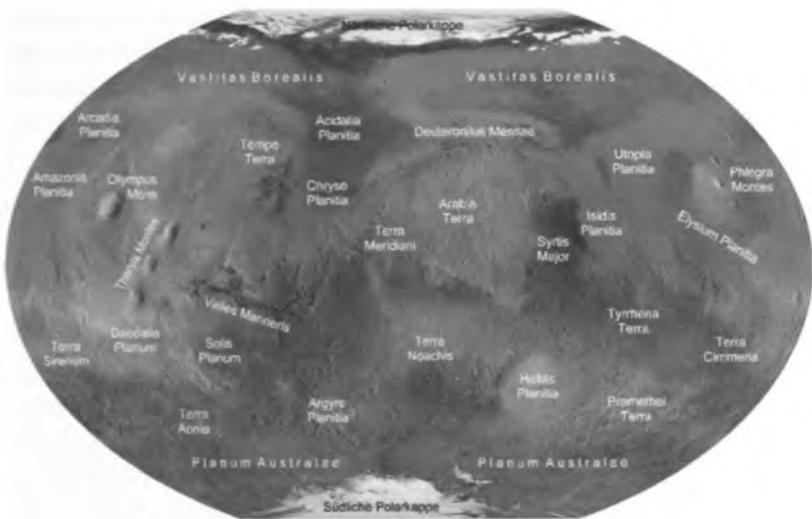
visuelle Illusionen. Körperflüssigkeit aus den unteren Gliedmaßen sammelt sich vor allem in der Brust und im Kopf, demzufolge schwillt das Gesicht deutlich an! Aber auch das Herz und andere Organe weiten sich. Die ungewohnte Umverteilung signalisiert dem Körper ein Zuviel an Flüssigkeit, sodass er beginnt, verstärkt auszuschcheiden, wodurch wiederum vermehrt Mineralien, Elektrolyte und Plasma verloren gehen. Die Produktion der roten Blutkörperchen nimmt ab. Die Bandscheiben in der Wirbelsäule dehnen sich aus: Ein Mann mit einer Körpergröße von 1,80 Metern misst schon bald 1,86 Meter und wird von intensiven Rückenschmerzen geplagt (vgl. Miles 1988; Walter 1997; Long 2001). Doch die Vorfreude, den Mars und seine faszinierende Landschaft als erster Mensch betreten zu können, lässt uns derartige Unannehmlichkeiten relativ leicht ertragen.

Der lange Weg zum Mars

Die Reise zum Mars wird nicht auf direktem und kürzestem Weg erfolgen, sondern auf der sogenannten *Hohmann-Bahn*, einer speziellen elliptischen Anflugroute über eine Strecke von 586,7 Millionen Kilometern. Trotz dieser gewaltigen Strecke ist dies der sparsamste und energieeffizienteste Flug, allerdings beträgt die Reisedauer rund 260 Tage. Ein schwerwiegender Nachteil dieser energiesparendsten aber auch »preiswertesten« Reiseroute, die immerhin noch mit etwa 20 Milliarden Euro zu Buche schlägt, ist die Unmöglichkeit einer baldigen Rückkehr. Zumindest wenn die Heimreise zwecks Energieeinsparung ebenfalls auf einer *Hohmann-Bahn* durchgeführt werden soll. Denn wenn unser Raumschiff auf dem Mars angekommen ist, stehen die beiden Planeten für einen halbelliptischen Rückflug denkbar ungünstig. Je nach Konstellation müssen weitere 460 Tage vergehen, bis die Stellung der Planeten wieder für einen Rückflug geeignet ist (vgl. Musser/Alpert 2004). Unser Rundtrip zum Mars inklusive Exkursion zu den bekanntesten Sehenswürdigkeiten wird also 980 Tage oder anders gesprochen 2,7 Jahre in Anspruch nehmen. So lange hat ungefähr die Weltumsegelung des berühmten Ferdinand Magellan (1519–1522) gedauert, deren Vollendung der Portugiese selbst bekanntlich nicht mehr miterlebte.

Als Grundlage für unsere Exkursion auf dem Mars soll uns eine Übersichtskarte dienen, wie Sie die NASA in den letzten Jahren mithilfe ihrer Marssonden erstellt hat (Abbildung 2).

Dort sind die für uns wichtigsten und markantesten Gebiete detailgetreu wiedergegeben und ermöglichen uns eine bestmögliche Orientierung vor Ort. Viele der dort abgebildeten Regionen und Geländeformationen erhielten ihre Namen bereits im 19. Jahrhundert vom berühmten Mailänder Astronomen Giovanni V. Schiaparelli (1835–1910) und stammen vorwiegend aus der Kosmographie des Altertums und ihren Mythen, wie etwa den Fahrten des Odysseus (vgl. von Puttkamer 1997; Blunck 1977; Schiaparelli 1877).



2 Marskarte mit den markantesten und wichtigsten Großregionen.

Nachdem nun alle Startvorbereitungen gewissenhaft durchgeführt wurden und wir uns mit geeignetem Kartenmaterial ausgestattet haben, steht unserem Flug zum Mars nichts mehr im Wege.

Die Atmosphäre des Mars

Nach rund 260 Tagen erreicht unser Raumschiff wie geplant und ohne große Zwischenfälle den Roten Planeten. Als Landestelle haben wir uns das Gebiet *Chryse Planitia* ausgewählt. Eine weite und flache Ebene in der Nähe des Äquators, bedeckt von rötlichem Sand und dunklen basaltischen Steinen und Felsen. Die klimatischen Bedingungen sind in diesen Breitengraden noch am erträglichsten. Nahe der Marsoberfläche herrscht zwar im Mittel eine Temperatur von etwa minus 40 Grad Celsius, aber in Äquatornähe steigen die Mittagstemperaturen örtlich sogar bis auf angenehme plus 15 Grad (vgl. Zimmermann/Weigert 1999).

Zudem befinden wir uns in guter Nachbarschaft, denn in unmittelbarer Nähe liegen die Landstellen der amerikanischen Marssonden *Viking 1*, die bereits 1976 dem Mars einen Besuch abstattete, sowie *Pathfinder* und *Opportunity*, die im Jahre 1996 und 2003 viele faszinierende Bilder vom Mars zur Erde funkten.

Für die bevorstehenden 460 Tage, die wir bis zum nächsten geeigneten Zeitfenster für eine Rückkehr zur Erde auf dem Mars verbringen werden, haben wir uns ein umfangreiches Programm vorgenommen: Unsere Exkursion wird uns über die *Valles Marineris*, einem gigantischen Grabensystem zum bekannten Vulkangebiet der *Tharsis Region* mit den *Tharsis Montes* füh-

ren, in der wir den größten aller Vulkane *Olympus Mons* besuchen werden. Anschließend werden wir die bitter kalte Nordregion mit ihrer Eiskappe ansteuern (Abbildung 2). Schließlich geht es zurück zu unserer Landestelle, um uns wieder auf die Heimreise vorzubereiten. Alles in allem ist dies eine Strecke von über 26.000 Kilometern, auf der wir den Mars einmal komplett umrunden werden! Um diese gewaltige Strecke auch in der begrenzten Zeit bewältigen zu können, steht uns ein solar- und batteriebetriebener Rover zur Verfügung, der für die hiesigen Geländebedingungen hervorragend ausgestattet ist. Zudem können wir mit Stolz behaupten, dass wir mit unserem klimaneutralen Fahrzeuguntersatz die CO₂-Bilanz des Roten Planeten in keinsten Weise verändern werden!

Nach einer kurzen Phase der Akklimatisierung zwingen wir uns in einen robusten, aber doch bequemen, weil maßgeschneiderten Raumanzug und verlassen unser Raumschiff. Die ersten Schritte auf dem Mars sind ganz anders als auf der Erde. Die vergleichsweise geringe Schwerkraft bedingt, dass ein Schritt nur etwa halb so viel Energie kostet wie auf unserem Heimatplaneten. Trotzdem können wir uns nur mit etwa 60 Prozent der Schrittgeschwindigkeit fortbewegen (vgl. Musser/Alpert 2004). Die verringerte Schwerkraft und die vielen sperrigen Geräte an unserem Raumanzug fordern eben doch ihren Tribut.

Nachdem wir die ersten Schritte gemeistert haben, halten wir einen kurzen Moment inne und lassen unseren Blick über die faszinierende Umgebung schweifen: Weite, ausgedehnte geröll- und wüstenartige Landschaften, die sich bis zum Horizont erstrecken (Abbildung 3).

Der Himmel erstrahlt in zarten karamellfarbenen Tönen, während er in der Nähe des Horizonts durch die Streuung des Sonnenlichts am feinen Staub in der Atmosphäre eher rötlich erscheint. Allerdings wird sich die Farbe des Himmels während des Tages und je nach Blickrichtung kontinuierlich ändern. Vor allem während der Mittagszeit und speziell bei Windstille werden wir im Zenit ungewohnt bläuliche Farben zu sehen bekommen (vgl. Musser/Alpert 2004), da dann nur geringe Mengen an Staub in der Luft sind, die die Sonnenstrahlen ablenken können. Zudem muss das Licht im Vergleich zum Sonnenstand nahe des Horizonts nur eine geringe Distanz durch die Atmosphäre zurücklegen, sodass der blaue Lichtanteil kaum verändert wird. Aufgrund der dünnen Atmosphäre sind diese Blautöne jedoch sehr viel dunkler als auf der Erde und erscheinen in etwa so, wie wir den irdischen blauen Himmel bei Sonnenuntergang von einem Passagierflugzeug aus betrachten würden, das in einer Höhe von 10.000 bis 12.000 Metern über dem Erdboden fliegt.

In der dünnen Marsatmosphäre beobachten wir weit über uns sogar vereinzelt Wolken, die sich zum Teil als helle Flecken oder nur aufgrund ihrer spärlichen Schattenwirkung bemerkbar machen. Im Wesentlichen handelt

es sich um zarte Dunstschleier oder Nebelschwaden, die aus Wassereiskristallen und Kohlendioxideis bestehen. Denn in höheren Abschnitten der Atmosphäre sinken selbst in Äquatornähe die Temperaturen bis auf minus 120 Grad Celsius und lassen sogar das Kohlendioxid in der Luft gefrieren.



3 Panoramaaufnahme von der Marsoberfläche, aufgenommen von der amerikanischen Sonde *Pathfinder*. Im Hintergrund sind die etwa 50 Meter hohen »Twin Peaks« zu sehen.

Die Marsatmosphäre ist verglichen mit der Atmosphäre der Erde sehr dünn. An der Oberfläche beträgt der Druck nur etwa fünf bis zehn Hektopascal, also rund 0,6 Prozent des Atmosphärendrucks an der Erdoberfläche. Dies entspricht etwa dem Druck der Erdatmosphäre in einer Höhe von 35 bis 40 Kilometern. Kohlendioxid ist mit 95 Prozent der Hauptbestandteil der unteren Marsatmosphäre, gefolgt von Stickstoff mit 2,7 Prozent und Argon mit 1,6 Prozent. Außerdem wurden geringe Mengen Sauerstoff und Wasserdampf gefunden, dessen Anteil sehr variabel ist und zwischen 0,01 und 0,1 Prozent schwankt (vgl. Zimmermann/Weigert 1999; Read/Lewis 2004).

Die heutige Zusammensetzung der Marsatmosphäre ist die Folge der Entgasung ehemals heißer magmatischer Schmelzen aus der früheren Entwicklungsphase des Planeten. Diese intensive Phase der Vulkanaktivitäten auf dem Mars begann wahrscheinlich vor etwa 3,5 Milliarden Jahren und dauerte einige 100 Millionen bis 1,5 Milliarden Jahre an. Anschließend gab es immer wieder vereinzelt vulkanische Tätigkeiten, die allerdings eher lokal anzutreffen waren. Im Gegensatz zur Erdatmosphäre wurde die Atmosphäre des Mars später nicht mehr wesentlich verändert (vgl. Zimmermann/Weigert 1999). Die Vulkane spielten auf dem Mars eine ähnliche Rolle wie auf der Erde: Auch auf unserem Heimatplaneten war der Vulk-

nismus die treibende Kraft, die die Atmosphäre stetig mit Treibhausgasen und vor allem CO_2 angereichert hat. Während die Vulkane der Erde jährlich noch bis zu 30 Millionen Tonnen CO_2 in die Atmosphäre entlassen, sind die Vulkane des Mars mittlerweile gänzlich erloschen, zumindest nach heutigem Wissensstand.

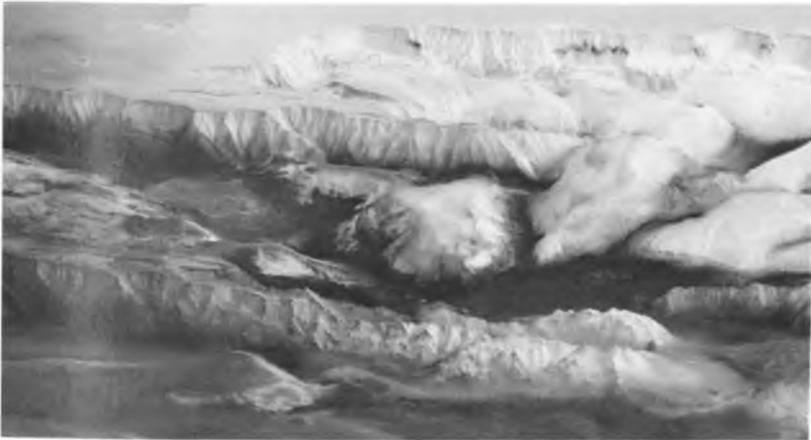
Trotz des hohen Anteils an Kohlendioxid und damit eines effektiven Treibhausgases in der Marsatmosphäre, stellt sich jedoch nur ein sehr geringer Treibhauseffekt ein. Ursache hierfür sind vor allem die dünne Atmosphäre und der Abstand des Mars zur Sonne. Dieser ist etwa 1,4-mal größer als der irdische, sodass der Rote Planet von unserem Zentralgestirn rund 40 Prozent weniger Wärmeenergie als die Erde empfängt. Hätte der Mars allerdings bei gleicher CO_2 -Menge eine ebenso dichte und mit Stickstoff und Sauerstoff angereicherte Atmosphäre wie die Erde, so würde dies vermutlich trotz des größeren Abstands zur Sonne zu einem enormen Treibhauseffekt führen. Denn verglichen mit der Erdatmosphäre, deren CO_2 -Anteil derzeit bei etwa 0,038 Prozent oder 380 ppm (parts per million) liegt, betrüge der Anteil auf dem Mars dann umgerechnet 5,7 Prozent oder 5.700 ppm. Das heißt: In einem Kubikmeter Marsluft befänden sich etwa 15-mal mehr CO_2 -Moleküle als in einem Kubikmeter Luft von der Erde. Somit ist die Dichte der Atmosphäre von enormer Bedeutung für die Ausprägung eines planetenweiten Treibhauseffektes und die Speicherung von Wärmeenergie. Aufgrund des äußerst geringen Treibhauseffektes besitzt der Mars somit von vornherein eine erheblich kältere Oberfläche. Dementsprechend sind auch die Temperaturen auf dem Mars im Wesentlichen von der tageszeitlichen Ein- und Ausstrahlung der Sonne und damit extremen Schwankungen gekennzeichnet.

Die tiefsten Temperaturen herrschen mit etwa minus 140 Grad Celsius an den vereisten Polregionen. Sie können allerdings während des Marssommers auf bis zu minus 15 Grad ansteigen. In Äquatornähe betragen die Mittagstemperaturen fast angenehme plus 15 Grad, bei Einbruch der Nacht fallen sie jedoch rapide auf bis zu minus 80 Grad (vgl. Zimmermann/Weigert 1999). Bei diesen extremen Temperaturen gefriert sogar das CO_2 aus der Atmosphäre. Im Winter, zu Beginn des Frühlings und im Spätherbst bildet sich somit im Verlauf der Nacht häufig eine spärliche Frostschrift, die als Raureif zu beobachten ist und im Laufe des Tages mit steigenden Temperaturen wieder verschwindet.

Unter den gegenwärtigen Temperatur- und Druckverhältnissen ist zudem flüssiges Wasser instabil, das heißt, Niederschläge wie auf der Erde gibt es auf dem Mars nicht. Dennoch kann Wassereis in einer gewissen Tiefe des Marsbodens nahezu das ganze Jahr über existieren, wie mittlerweile durch Sonden nachgewiesen wurde (vgl. Albee 2004).

Die *Valles Marineris* und das Vulkangebiet *Tharsis*

Nach mehrtägiger Fahrt Richtung Südwesten erreichen wir die ersten Ausläufer der *Valles Marineris*. Die *Valles Marineris* sind riesige canyonähnliche Gebilde, die sich in Ost-West-Richtung über 2.500 Kilometer und in Nord-Süd-Richtung über 150 bis 700 Kilometer erstrecken. Die Tiefe dieser Canyons erreicht teilweise bis zu sieben Kilometer (vgl. Gaede 2007) (Abbildung 4).



4 Zentralabschnitt der *Valles Marineris*, die in ihren Dimensionen den *Grand Canyon* weit übertreffen.

Damit sind die *Valles Marineris* wesentlich größer als der vergleichsweise winzige »Grand« Canyon. Das Grabensystem liegt relativ genau im Bereich des Äquators und kann als geologische Trennlinie des Planeten gesehen werden. Denn im Ganzen betrachtet erscheint der Mars sehr asymmetrisch aufgebaut: Seine südliche Halbkugel ist im Gegensatz zur nördlichen sehr dicht gekraterter und gleicht in vielem den Hochlandgebieten des Mondes. Die beträchtliche Menge an Meteoritenkratern stammt vor allem aus der Frühzeit des Planeten und lässt auf ein relativ hohes Alter der dortigen Kruste schließen.

Nach einer 2.500 Kilometer langen Fahrt durch die zum Teil sehr verwinkelten *Valles Marineris* führen uns deren Endausläufer nun in eine flache Hochebene, die sich grundlegend von vielen anderen Gebieten des Mars unterscheidet. Vor allem im Gegensatz zu den Einschlagformationen der Südhemisphäre ist dieses Gebiet, wie die nördliche Marshemisphäre insgesamt, in erster Linie durch weite Basaltebenen geprägt, die durch einen gewaltigen Vulkanismus vor Urzeiten entstanden sind. Dementsprechend ist dieses Gebiet größtenteils glatt und relativ kraterfrei, was unser Vorankommen mit dem Rover im Gegensatz zu den schwer zu überwindenden Tälern

der *Valles Marineris* wesentlich erleichtert. Nach einiger Zeit tauchen auch schon drei der vier größten Vulkane des Mars am Horizont auf, die von Nordost nach Südwest entlang einer Geraden von 1.600 Kilometern aufgereit sind: *Ascraeus Mons*, *Pavonis Mons* und *Arsia Mons*. Jeder dieser Vulkane ragt über 15 Kilometer in die Höhe und übertrifft damit alle irdischen Vulkane bei Weitem. Sie gehören zu den eindrucksvollsten Gebilden der Nordhalbkugel und ihre Entdeckung war eine der aufsehenerregendsten Sensationen in der Erforschung des Roten Planeten.

Nachdem wir die drei *Tharsis Montes* hinter uns gelassen haben, kommt einige Tage später im Nordwesten schließlich der größte Vulkan auf dem Mars, ja sogar des gesamten Sonnensystems ins Blickfeld: *Olympus Mons*.

Der Berg der Berge - *Olympus Mons*

Auf unserem Weg in Richtung des Vulkans müssen wir zunächst eine weite und meist flache Ebene aus gefrorenem und staubigem Boden überqueren. Wie die Marsoberfläche generell, so ist auch diese Vulkanebene mit einer dicken Staub- und Sandschicht bedeckt, in der unser Rover zum Teil tiefe Spuren hinterlässt. Wir fahren über rötlich braune Sanddünen und durch ausgetrocknete Rinnsale, die auf ursprüngliche Flusssysteme hindeuten. Flüssiges Wasser gibt es in diesem Gebiet allerdings lange nicht mehr.

Wir erreichen in den frühen Morgenstunden die ersten Ausläufer des gewaltigen Schildvulkans. Sein Durchmesser beträgt rund 600 Kilometer und sein Gipfel ragt über 27 Kilometer über die Marsoberfläche empor (Abbildung 5).

Allein seine Krateröffnung ist ein über 80 Kilometer weites und teilweise drei Kilometer tiefes Caldera-Becken, einst ein gewaltiger kochender, turbulenter See aus flüssigem Basalt, aus dem sich die Lava in riesigen Strömen sprudelnd über die Flanken in die Tiefe ergoss. Verglichen mit *Olympus Mons* besitzt der größte Schildvulkan der Erde, der *Mauna Loa* auf *Hawaii*, nur ein Fünftel der Fläche und weniger als ein Zwanzigstel des Volumens. Auch der *Mount Everest* ist verglichen mit dem Vulkaniganten ein regelrechter Winzling. Trotz seiner Größe gehört der Vulkan zu den relativ jungen Gebilden auf dem Mars. Aufgrund seiner Größe wurde der *Olympus Mons* (lat. »Berg Olymp«) nach dem Sitz der antiken griechischen Götter benannt.



5 3D-Abbildung von *Olympus Mons*, der mit rund 27 Kilometern Höhe der größte Vulkan des Sonnensystems ist.

Nach einiger Zeit finden wir eine geeignete Passage, die uns die zum Teil drei bis sechs Kilometer hohen Bergflanken überwinden lässt. Anschließend geht es mit unserem motorisierten Geländewagen einen sanften Böschungswinkel von maximal sechs Grad bergauf. Während der eintägigen Auffahrt entdecken wir immer wieder Aufhellungen am Boden, die durch Nebel und Reifbedeckung aus gefrorenem Kohlendioxid während der Nacht entstanden sind und im Laufe des Vormittags durch die Erwärmung allmählich wieder verschwinden.

Als wir schließlich den Gipfel erreichen, erwartet uns aus etwa 27 Kilometer Höhe ein atemberaubender Ausblick, denn aufgrund der dünnen Atmosphäre und des geringen Staubanteils in dieser Höhe reicht unser Blick bis zum Horizont. Tief zu unseren Füßen erstreckt sich die rotbraune Trockenlandschaft dieser wundersamen Welt soweit das Auge reicht. Vom Fuße des Vulkanschildes erstrecken sich zudem gewaltige Flutebenen aus erstarrten Lavaströmen, welche die Umgebung vollständig überflutet und zugedeckt haben. Im Südosten entdecken wir nochmals die anderen drei großen Tharsisvulkane, dem Aussehen nach allesamt kleinere Ausgaben des *Olympus Mons*. Die Gipfel sind zudem von einigen Kohlendioxidwolken umgeben. In der Tharsisregion unter uns wehen mittlerweile riesige Staubwolken über den Marsboden in Richtung Südost. Dort hat sich während unserer Gipfelfahrt ein beträchtlicher Staubsturm entwickelt.

Nach einiger Zeit machen wir uns aber wieder an die Abfahrt, denn vor uns liegt mit etwa 3.800 Kilometern die bislang längste Strecke, die uns über die nördliche Tiefebene bis in die vereiste Nordpolregion des Mars führen wird.

Ein ehemaliges Meer auf dem Mars?

Auf unserem Weg in das nördliche Tiefland durchfahren wir unter anderem Täler, deren Aussehen ehemaligen Flusssystemen gleicht. Plötzlich entdecken wir entlang der Ränder Strukturen, die nur durch flüssiges Wasser entstanden sein können. Als wären die Hänge von »frischen« Rinnen übersät, die aussehen, als seien sie durch ablaufendes Wasser entstanden. Diese Erscheinungen legen nahe, dass es trotz des geringen atmosphärischen Drucks unter bestimmten Umständen doch flüssiges Wasser auf dem Mars geben könnte. Es wird vermutet, dass diese Rinnen mit Klimazyklen in Verbindung stehen. Beispielsweise können sich die Hänge in Kälteperioden mit einer dünnen Schicht aus Wassereis und Staub überziehen. Sonnenlicht durchdringt diese isolierende Schicht teilweise und erwärmt sie, sodass an ihrer Unterseite Wassereis schmilzt und als Rinnsal den Hang hinabfließt, bevor es endgültig versickert oder in der dünnen Atmosphäre verdampft (vgl. Albec 2004).

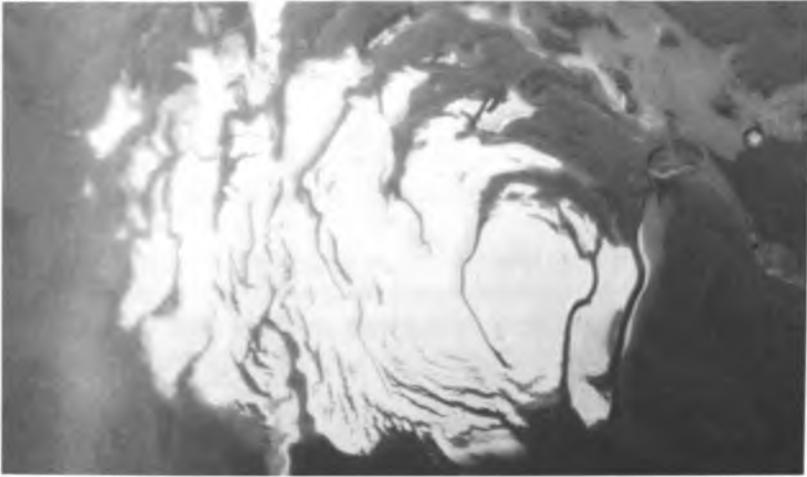
Über eines der »Flusstäler« erreichen wir schließlich die nördliche Tiefebene. Auf dem Weg zum Nordpol durchqueren wir nun ein landschaftlich zwar sehr ödes und eintöniges, aber geologisch sehr interessantes Gebiet. Denn eine Hypothese der Marsforscher besagt, dass die Marsatmosphäre früher sehr viel dichter war und der Planet demzufolge eisfreie Seen und sogar Meere gehabt haben könnte. Da das nördliche Tiefland bemerkenswert flach ist, liegt die Vermutung nahe, dass es während einer längeren Epoche der Marsgeschichte der Boden eines großen Meeres war. Der Boden scheint zudem aus mehreren Schichten Sedimentgestein zu bestehen (vgl. Albee 2004). Sollte es in der Frühzeit des Mars tatsächlich einen Ozean gegeben haben, so hatte dieser mit Sicherheit einen großen Einfluss auf das damalige Klima und auf die Zusammensetzung der Marsatmosphäre. Denn mit der großflächigen Verdunstung von Wasser hätte sich die Atmosphäre kontinuierlich mit Wasserdampf angereichert, einem noch vor Kohlendioxid effektiveren Treibhausgas. Zudem könnten die damaligen Meere wie auf der Erde ein wichtiger Einflussfaktor auf die CO₂-Bilanz des Planeten gewesen sein, indem das Kohlendioxid der Atmosphäre je nach Temperatur des Meerwassers als Kohlensäure gelöst beziehungsweise wieder als CO₂ in die Atmosphäre entlassen wurde. Aber wenn der Mars einst eine dichtere Atmosphäre besaß und es auf seiner Oberfläche so warm war, dass sogar Wasser floss, wo sind dann das Wasser und die ursprüngliche Atmosphäre geblieben? Außer einiger Hypothesen und Vermutungen liegt die Frühzeit des Mars nach wie vor im Dunkeln!

Die Nordpolregion

Nach einigen Wochen der mühsamen Fahrt kommen schließlich die ersten Ausläufer der nördlichen Polkappe in Sicht. Die weißen Polkappen gehören zu den von der Erde aus am deutlichsten erkennbaren Details der Marsoberfläche und bestehen vor allem aus einer permanenten Wasserschnee- oder Wassereisdecke (Abbildung 6).

Allerdings gibt es hinsichtlich der Größe einen erheblichen Unterschied zwischen Nord- und Südpolkappe. Während die nördliche Polkappe während des nördlichen Marssommers einen Durchmesser von rund 1.000 Kilometern und eine Dicke von etwa drei bis vier Kilometern besitzt, zeichnet sich die südliche Polkappe während des Südsommers lediglich durch einen Durchmesser von etwa 350 Kilometern und einer Dicke von ein bis zwei Kilometern aus. Damit entspricht die Größe der Nordkappe in etwa der Hälfte des Grönlandeispansers auf der Erde (vgl. Read/Lewis 2004). Sie ist demnach der größte Wasserspeicher auf unserem Nachbarplaneten.

Diesen beiden Eispanzern kommt eine Schlüsselrolle im atmosphärischen Kreislauf zu, denn während des Marswinters der jeweiligen Hemisphäre sinken dort die Temperaturen dauerhaft so weit ab, dass auch Kohlen-



6 Die südliche Polkappe des Mars im Sommer 2000.
Die oberste Schicht besteht aus Kohlendioxydeis.

dioxid kondensiert und als fester Niederschlag auf den Eiskappen nieder-
geht. Im Laufe eines Winters werden die dicken Eispanzer mit einer bis zu
acht Meter dicken Schicht aus Kohlendioxydeis überzogen. Zudem vergrößern
sich die Polkappen durch die zusätzliche Menge an Trockeneis so weit,
dass sie zum Teil bis in die Gegend des 60. Breitengrades vorstoßen. Bei der
Ausfällung von CO_2 während der Winterzeiten wird der Atmosphäre eine
derart große Gasmenge entzogen, dass der Atmosphärendruck insgesamt
deutlich sinkt. Dieser Effekt ist vor allem bei kalten Wintern auf der Süd-
hemisphäre am deutlichsten zu spüren, da die Südkappe trotz ihrer geringeren
Ausdehnung wesentlich stärkeren jahreszeitlichen Schwankungen
unterliegt als die Nordkappe. Während das Kohlendioxid im Wechsel der
Jahreszeiten periodisch kondensiert und wieder sublimiert, das heißt vom
festen direkt in den gasförmigen Aggregatzustand überwechselt, bleibt das
Wasser das ganze Jahr über fast vollständig als Eis gebunden (vgl. Read/Lewis
2004). Die periodische Verteilung des Kohlendioxids zwischen Atmosphäre
und Polkappen kann somit als jahreszeitlich bedingter Kohlenstoffkreislauf
auf dem Mars bezeichnet werden, wenngleich er bei Weitem nicht so komplex
aufgebaut ist wie auf der Erde und sich durch das komplette Fehlen
einer biologischen Komponente auszeichnet.

Rückreise und Landung auf der heimatlichen Erde

Nach einer über 26.000 Kilometer langen und fast ein Jahr andauernden
Exkursion kehren wir schließlich zu unserer Landestelle im Gebiet *Chryse
Planitia* zurück, um die Heimreise zur Erde anzutreten. Unser Raumfahr-
zeug ist kaum mehr wiederzuerkennen. Die lackierte Oberfläche wurde

durch Wind und Sand fast vollständig abgeschmirgelt. Trotz allem befinden sich alle technischen Geräte in gutem und funktionsfähigem Zustand. Und dies ist auch äußerst wichtig, denn für den Rückflug stehen uns nochmals 260 Tage und 586,3 Millionen Kilometer bevor. Mit allen Strapazen für Mensch und Maschine, die wir bereits auf der Hinreise ertragen mussten.

Die Abreise fällt uns aufgrund der geringen Schwerkraft zunächst relativ leicht. Statt der 11,2 Kilometer pro Sekunde auf der Erde sind hier lediglich 5,03 Kilometer pro Sekunde aufzubringen, um dem Schwerefeld des Roten Planeten auf einer Parabelbahn zu entkommen. Nach dem Start lässt uns ein kurzer Blick zurück auf den Mars nochmals klar werden, welch gigantische Strecke wir auf der Oberfläche des Roten Planeten hinter uns gebracht haben.

Der Rückflug verläuft ohne große Zwischenfälle und nach der turbulenten Landung stehen wir schließlich auf wackeligen Beinen wieder auf der Erde. Blass im Gesicht und aufgrund der ungewohnt hohen Schwerkraft unfähig, aufrecht zu stehen, ohne ohnmächtig zu werden. Aber das ist auch kein Wunder angesichts der Strapazen, die wir hinter uns gebracht haben: Seit unserem Start von der Erde im Jahr 2009 sind mittlerweile drei Jahre vergangen und wir haben insgesamt 1,173 Milliarden Kilometer zurückgelegt. Aber es hat sich gelohnt, denn uns ist vor allem bewusst geworden, dass unser kosmischer Nachbar in mancherlei Hinsicht vieles mit der Erde gemeinsam hat. Aber trotz dieser Gemeinsamkeiten bleibt der Rote Planet doch eine Welt für sich.

Auch Leben haben wir dort keines gefunden. Und es stellt sich die Frage, wie die Erde wohl heute aussehen würde, wenn es auch hier über Milliarden von Jahren kein pflanzliches Leben gegeben hätte, das durch die Erfindung der Photosynthese, also der Umwandlung von Kohlendioxid und Wasser mithilfe von Sonnenlicht zu Sauerstoff und Zucker, den CO_2 -Gehalt auf der Erde von ursprünglich etwa 30 Prozent vor 3,5 Milliarden Jahren auf den heutigen Wert von 0,038 Prozent verringert hätte. Würde die Erde dann wie der Mars überwiegend aus einer steinigen und staubigen Wüstenlandschaft bestehen, mit einem Treibhausklima, das durch den extremen CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre »hitzige« Temperaturverhältnisse wie auf der Venus schaffen würde? Neben vielen Antworten haben wir also auch viele Fragen von unserer Reise mitgebracht. Die Beantwortung dieser Fragen überlassen wir aber gerne auch unseren Nachfolgern ...

Simon Meissner

Literatur

- Albee, Arden L. (2004): Die unirdischen Landschaften des Mars. In: *Spektrum der Wissenschaft – Dossier: Der Mars*. Ausgabe 3/2004, S. 58–67.
- Benson, Michael (2004): *Jenseits des Blauen Planeten*. München: Knesebeck Verlag.
- Blunck, Jürgen (1977): *Mars and Its Satellites. A Detailed Commentary on the Nomenclature*. Hicksville, New York.
- Gaede, Peter-Matthias (Hrsg.): *GEO-Themenlexikon. Band 4 – Astronomie*. Mannheim 2007.
- Long, Michael E. (2001): Überleben im Weltall. In: *National Geographic*. Ausgabe 1/2001.
- Miles, Frank; Booth, Nicolas (Hrsg.) (1988): *Aufbruch zum Mars. Die Erkundung des roten Planeten*. Stuttgart: Kosmos Verlag.
- Musser, George.; Alpert, Mark (2004): Die Reise zum Mars – Visionen und Konzepte. In: *Spektrum der Wissenschaft – Dossier: Der Mars*. Ausgabe 3/2004, S. 44–51.
- Read, Peter L.; Lewis, Stephen R. (2004): *The Martian Climate Revisited. Atmosphere and Environment of a Desert Planet*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Reichert, Uwe (2004): Karten, Krater und Kanäle. In: *Spektrum der Wissenschaft – Dossier: Der Mars*. Ausgabe 3/2004, S. 16-20.
- Schiaparelli, Giovanni Virginio (1878): *Osservazioni astronomiche e fisiche sull'asse di rotatione e sulla topografia del pianeta Marte: fatte nella Reale Specola di Brera in Milano coll'equatoriale di Merz durante l'opposizione del 1877*. In: *Atti Della R. Accademia Dei Lincei Anno CCLXXV (Hrsg.): Memorie Della Classe Di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali*. Roma 1878, S. 308–439.
- von Puttkamer, Jesco (1997): *Jahrtausendprojekt Mars. Chance und Schicksal der Menschheit*. Überarbeitete und aktualisierte Auflage. München: Langen-Müller.
- Walter, Ulrich (1997): *In 90 Minuten um die Erde*. Würzburg: Stürtz Verlag.
- Zimmermann, Helmut; Weigert, Alfred (1999): *Lexikon der Astronomie*. 8. Auflage. Heidelberg, Berlin: Spektrum Verlag.