

Michael Urbat

# Magnetismus der Gesteine

Konzepte,  
geologische, und  
alltägliche  
Anwendungen



**SACHBUCH**

 Springer

---

# Magnetismus der Gesteine

---

Michael Urbat

# Magnetismus der Gesteine

Konzepte, geologische, und alltägliche  
Anwendungen

Michael Urvat  
Rhos on Sea, Wales

ISBN 978-3-662-68939-4      ISBN 978-3-662-68940-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68940-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber\*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor\*innen und die Herausgeber\*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor\*innen oder die Herausgeber\*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Simon Shah-Rohlf

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b> .....	1
<b>2 Das Erdmagnetfeld aus geologischer Sicht</b> .....	13
2.1 Die Erde als dynamisches System .....	13
2.2 Das Erdmagnetfeld über die Zeit .....	35
<b>3 Magnetismus</b> .....	63
3.1 Unterschiedliche Arten von Magnetismus .....	71
3.2 Gesteinsart bestimmt Erwerbsmechanismus .....	75
3.3 Größe und Zeit .....	83
3.4 Selbstumkehr, Bezugssysteme und Pfeile .....	89
3.5 Magnetische Suszeptibilität von Gesteinen und Mineralen .....	96
<b>4 Paläomagnetik – Anwendungen</b> .....	103
4.1 Magnetostratigraphie .....	109
4.2 Mit gespeicherten Erdmagnetfeldern Kontinente verschieben .....	140
<b>5 Gesteinsmagnetik</b> .....	159
5.1 Abgrenzung zur Paläomagnetik .....	159
5.2 Anwendungen der Gesteinsmagnetik in den Geowissenschaften .....	172
<b>6 Schlusswort und Ausblick</b> .....	211



Auf der Rückfahrt vom Buchklub meiner Frau spricht mich ihre Bekannte an, sie habe von meiner Idee zu einem Manuskript gehört – ein Sachbuch speziell für Laien, aha! –, und erkundigt sich, um welches Thema es denn geht und ob ich schon einen Titel wüsste. Meine bereitwillige Auskunft, es solle im weitesten Sinne um das Erdmagnetfeld in den letzten 500 Mio. Jahren und allgemein die Magnetisierung von Gesteinen gehen, wird mit einem „Es wird dir schon noch etwas mit einem tatsächlichen geowissenschaftlichen Hintergrund einfallen“ quittiert. Immerhin sei ich doch so eine Art Geologe.

Nach vielen Jahren der Beschäftigung mit einem Thema, egal ob als Hobby oder im Beruf, mögen einem manche Sachverhalte als landläufig bekannt erscheinen. Wie in diesem Fall mit (geo-)wissenschaftlicher Forschung. Und so vergisst man zu leicht, dass vermeintlich gängige Begriffe wie „Erdmagnetfeld“ eben nicht zum aktiven Wortschatz der meisten Menschen gehören. So passiert es, dass Themen, welche einem am Herzen liegen und, wie im genannten Gespräch, mit purem Enthusiasmus kommuniziert werden, als vorgeschobene Fantasterei aufgefasst werden. Nur um vermutlich ein unausgereiftes Konzept zu maskieren.

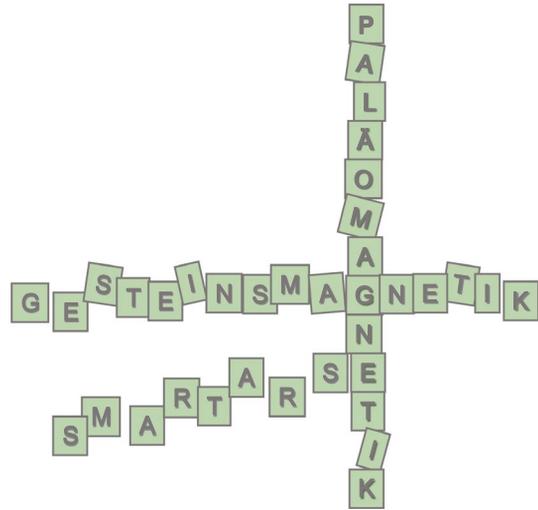
Ende der 1990er-Jahre haben Werbeschaffende in London mit dem Nimbus des Nischenwissens gespielt. Es wurde eine Anzeige in mehreren Lifestyle-Magazinen geschaltet, um eine Spirituose zu bewerben. Dabei wurden in einem Wortpuzzle im Hintergrund der beworbenen Flasche die Begriffe „Paläomagnetiker“<sup>1</sup> und „Klugschwätzer“ kombiniert (Abb. 1.1). Also los.

Das Erdmagnetfeld – es gibt es wirklich.

---

<sup>1</sup> Menschen, welche sich mit dem Magnetismus der Gesteine in der geologischen Vergangenheit beschäftigen.

**Abb. 1.1** In Anlehnung an eine Werbung in einem Londoner Magazin vor vielen Jahren



Warum man ein Sachbuch über etwas schreiben möchte, das sich ausdrücklich an Laien richtet und nicht an gleichgesinnte Forscher, wäre vermutlich das weitere Thema einer nicht vorzeitig beendeten Unterhaltung gewesen. Ein Buch über Magnetismus und dann noch über Magnetismus von Gesteinen. Magnetismus, für den uns Menschen bekanntlich die Sinne fehlen – nicht zu sehen, nicht zu hören, nicht zu riechen und nicht zu schmecken. Etwas, dessen Vorhandensein im täglichen Leben so gar nicht in die Kategorie des Immer-schon-mal-Erfahren-Wollen fällt, weil der Magnetismus der Erde im täglichen Leben ohne sinnliche Attraktion in der Regel unbemerkt bleiben wird. Der Hinweis auf Magnetismus im täglichen Leben nimmt sogar eher ab. Manchmal lohnt es sich jedoch, genauer hinzusehen. Vielleicht zufällig eine Spur zu finden, einen Hinweis noch, und weiter zu schauen, überrascht zu werden, was sich finden lässt. Genau das will dieses Buch.

Für die meisten Menschen ist der Wanderkompass mit seiner Magnetonadel dem Smartphone und der GPS-Anwendung gewichen. So tritt auch beim Wandern durch die Natur einer der wenigen direkten Hinweise auf den Magnetismus der Erde immer mehr in den Hintergrund. Das Erdmagnetfeld arbeitet sozusagen im Hintergrund. Es verrichtet eher unbemerkt, aber effektiv seinen Dienst. Nicht zuletzt, indem das Erdmagnetfeld als eine Art Schild gegen Sonnenwinde (kosmische Strahlung) wirkt und so unsere Atmosphäre schützt, also unter anderem einen für Lebewesen angenehmen Sauerstoffgehalt aufrecht- und intakt hält.



**Abb. 1.2** Zur Bedeutung von Richtung und Stärke eines Magnetfeldes. In der Magnetik gilt, dass die Kombination aus Stärke und Richtung entscheidend für zu erwartende Auswirkungen ist. Das gilt sowohl für die abschirmende Wirkung des Erdmagnetfeldes gegenüber kosmischer Strahlung als auch allgemein für die Speicherung der Magnetisierung in Gesteinen. Im letzteren Fall ist es für viele Anwendungen der Paläomagnetik gerade die Magnetisierungsrichtung, welche uns vorrangig interessiert (s. Polaritätswechsel des Erdmagnetfeldes in Kap. 2)

Wahr nimmt man auch diese Schutzwirkung in der Regel nicht. Es sei denn, Forschungsergebnisse zur Stabilität des Erdmagnetfeldes<sup>2</sup> und zum möglichen Zusammenbruch machen ihren Weg aus der Fachliteratur in die Schlagzeilen der Tagespresse. Dann wird vor den Konsequenzen einer ungeschützten Erde gewarnt, sollte das Erdmagnetfeld zusammenbrechen.

<sup>2</sup>Zwei Dinge bemerken wir an schon dieser Stelle: Magnetische Felder – gerne zunächst in der Vorstellung eines domartigen Schutzschildes – sowie das Erdmagnetfeld haben eine Stärke und eine Richtung (Abb. 1.2).

Stärke lässt sich leicht mit der Vorstellung der Wirksamkeit eines Schutzschildes gegen angreifende Kräfte verstehen. Sei es zum Schutz der Atmosphäre gegen kosmische Strahlung oder im Fall eines Superhelden (s. unten) gegen Widersacher jeder Couleur.

Richtung wird gut mit der Anwendung einer Kompassnadel, welche nach Norden weist, veranschaulicht. Oder stellen wir uns vor, unser Superheld verwechselt beim Aufbau seines magnetischen Kraftfeldes die Richtung – sagen wir, Nordpol und Südpol für ein bisschen magnetischen Jargon. Etwa mit der Auswirkung, welche es hat, wenn man zwei kleine Stabmagnete gegeneinander verdreht und Abstoßung zur Anziehung wird. Dazu später mehr.

Das Erdmagnetfeld ist in den letzten 500 Mio. Jahren tatsächlich unzählige Male „umgeklappt“. Wir werden verschiedene Möglichkeiten kennenlernen und uns diese Eigenheit des Erdmagnetfeldes zunutze zu machen, statt sie zu „fürchten“. Über die näheren Auswirkungen, sollte das Erdmagnetfeld zusammenbrechen, wollen wir in diesem Buch jedoch nicht spekulieren. Es sei lediglich angemerkt, dass keine Korrelation von größeren Aussterbeereignissen in der Erdgeschichte mit bekannten Umklappungen des Erdmagnetfeldes besteht. Und Aussterbeereignisse sind zahlreich in der Erdgeschichte – weit über das viel zitierte Aussterben der Dinosaurier am Ende der Kreidezeit vor rund 65 Mio. Jahren hinaus.

Wenn wir über die Vergangenheit des Erdmagnetfeldes sprechen wollen, kommen wir an Geologie allerdings nicht vorbei. Zumindest nicht an einem Blick (oder zwei Blicken) auf verschiedene Zusammenhänge in der „Arbeitsweise“ unserer Erde. Auch solche Betrachtungen wird uns dieses Buch liefern.

In Vorlesungen zur Paläo- und Gesteinsmagnetik<sup>3</sup> wird in einem Grundlagenkapitel über sogenannte magnetische Momente gesprochen. In den 1990er-Jahren wurde einmal ein Parfum gleichen Namens von einer bekannten Tennisspielerin beworben. Vermutlich hat ein solch fachspezifischer Begriff damit, wenn auch zusammenhanglos und mit völlig anderer Bedeutung, die weiteste Verbreitung im allgemeinen Sprachgebrauch erfahren, die man sich wünschen kann. Wie viel mehr sich hinter einem solchen Begriff im naturwissenschaftlichen Sinne verbirgt und was man im täglichen Leben damit anfangen kann, auch das wollen wir in diesem Buch näher ergründen.

Zahlen, Formeln und andere Schönheiten der Mathematik und Physik sollen nach Möglichkeit in diesem Buch vermieden werden. Schon allein um meine derzeit einzige zugesagte Leserin, meine Tochter, nicht schon direkt auf der Startlinie zu verlieren. Insgesamt soll fachlich korrekt berichtet werden, aber eben mehr im Hinblick auf übergreifenden Verständnisgewinn für Geowissenschaften denn als Faktenansammlung und Aufzählung bzw. Erläuterung für Fachvertraute. Einige Beispiele wie dieser Ansatz zu verstehen ist, werden wir schon in diesem Einleitungskapitel kennenlernen.

Wir können in allgemeiner Form über eine Vielzahl von Aspekten unserer Umwelt und unserer Erde insbesondere in der Erdvergangenheit sprechen. Vielleicht um die (geologische) Gegenwart besser zu verstehen oder einfach mit anderen Augen zu sehen. Wir werden über Dinge reden, welche uns täglich umgeben und vielleicht gewöhnlich erscheinen. Oder auch gar nicht bemerkt werden, aber bei etwas genauerer Betrachtung ein

---

<sup>3</sup>In der Regel im Rahmen eines Universitätsstudiums der Geophysik und/oder der Geologie. Die Forschungsrichtungen Paläomagnetik (Kap. 4) und Gesteinsmagnetik (Kap. 5) werden an zahlreichen namhaften Universitäten und Forschungsinstituten weltweit gelehrt und vorangetrieben. Einige solcher Institutionen exemplarisch mit Namen zu nennen, wäre gegenüber den dann nicht genannten unfair – und an dieser Stelle eine Liste mit weit über 100 Einträgen aktiver Forschungsgruppen von Europa über Amerika bis nach Australien aufzulisten, nicht zweckdienlich. Praktische Anwendungen finden zunehmend ihren Weg in die Marktwirtschaft.

Staunen hervorrufen können. Oder einfach nur eine verborgene Schönheit zeigen und Interesse wecken mögen.

Woher wissen wir beispielsweise, wie sich das Erdmagnetfeld in der geologischen Vergangenheit verhalten, sich verändert oder ob es überhaupt existiert hat? Wie können wir wissen, welche Stärke und Richtung das Erdmagnetfeld in der Erdvergangenheit hatte?

Zur Frage nach dem Warum für solche Fragen sei hier eine historische Anmerkung gemacht: Vor einigen Hundert Jahren haben seefahrende Kaufleute bemerkt, dass Schiffe, die mithilfe eines Kompasses navigiert werden, schneller an ihrem Zielhafen anlanden können. Der Kompass versprach eine bessere Orientierung und damit die Möglichkeit einer kürzeren Reiseroute. In der Folge wurden während der zahlreichen Seereisen systematisch Messungen der Richtung des Erdmagnetfeldes aufgezeichnet. Insbesondere wo die Kompassnadel nach Norden zeigt, wurde dies in Karten der sogenannten magnetischen Deklination dargestellt. Im Resultat entstand so eine Art mittelalterliches Navi, vielleicht sogar ein rechtmäßiger Urahn heutiger Satellitennavigation. Inklusiv der Notwendigkeit für Updates, da sich die Richtung des Erdmagnetfeldes nicht sprunghaft, aber doch stetig und erstaunlich schnell verändert und die Karten entsprechend angepasst werden mussten. Auf die schnelle zeitliche und räumliche Veränderung des Erdmagnetfeldes werden wir noch weiter eingehen.

Heutzutage gibt es eine Vielzahl von ausgefeilteren Möglichkeiten, das aktuelle Erdmagnetfeld global zu erfassen. Die entsprechenden Messwerte werden in Karten, Tabellen und Grafiken erfasst und analysiert. Aber beispielsweise vor 100 Mio. Jahren, in der Kreidezeit, vor 4 Mrd. Jahren gar, in der Erdfrühzeit? Offensichtlich brauchen wir dafür im Idealfall einen stabilen Rekorder. Und was liegt in Anbetracht der genannten Zeitspannen näher, als sich Gesteine näher anzusehen?

Steine?

Hier die Behauptung: Gesteine speichern Richtung und Stärke des Erdmagnetfeldes. Je nach Entstehungsart eines Gesteines ist eine solche Aufzeichnung unterschiedlich gut, aber doch dauerhaft über geologische Zeiträume<sup>4</sup> hinweg. Nein, in der Regel sind Steine keine Magnete im landläufigen Sinne. Niemand käme auf die Idee zu versuchen, die gesammelten Kieselsteine vom Flussufer an den Kühlschrank zu heften. Dennoch finden sich weltweit Tausende kreisrunde, münzgroße Bohrlöcher in gänzlich ordinären Gesteinsformationen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben dort Gesteinsproben erbohrt, um aus diesen Gesteinsproben im Labor herauszufinden, wie das Magnetfeld der Erde vor Hunderten Millionen Jahren einmal ausgesehen hat. Also sind Steine doch Magnete?

„Es kommt darauf an“ wäre eine naheliegende Antwort auf diese Frage. Im Laufe dieses Buches wird deutlich, dass eine solche Antwort – zumal im Dunstkreis der exakten

---

<sup>4</sup>Den Begriff „geologischer Zeitraum“ verwenden wir im Folgenden, um „lange Zeit“ zu umschreiben. Lange bedeutet in der Geologie mehrere Millionen bis zu (eher) Milliarden von Jahren.

Naturwissenschaften – keinesfalls vorschnell als zu vage ausgelegt werden sollte. Es kommt darauf an, was wir unter dem Begriff „magnetisch“ verstehen (Kap. 3). Es kommt darauf an, wie gut wir unser geologisches Umfeld und damit unsere Umwelt und ihre Zusammenhänge verstehen. Es kommt darauf an, wie genau wir hinsehen möchten. Einen kleinen zusätzlichen Blick unternehmen wir mit diesem Buch. Wo sind unsere Betrachtungen einzuordnen?

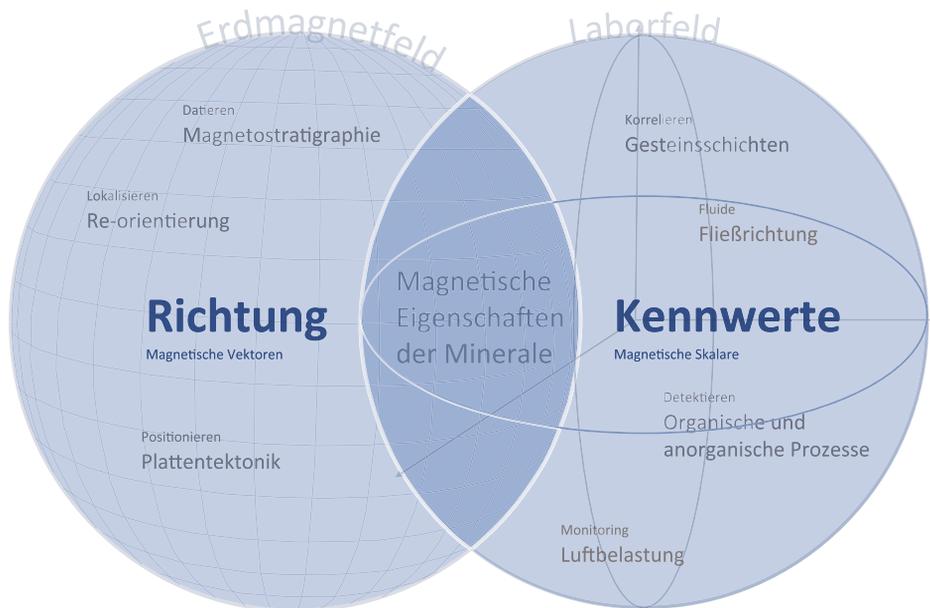
Der Planet Erde ist ein kompliziertes, seit und über Millionen von Jahren ständigen, oft dramatischen Veränderungen unterliegendes Gebilde. Ein wesentlicher Aspekt – ganz allgemein gesprochen geowissenschaftlicher Forschung – ist es, vergangene Zustände des Systems Erde über die Millionen von Jahren der Erdgeschichte zu beleuchten. Nur vor diesem Hintergrund kann die *heutige* Dynamik unseres Planeten besser beurteilt werden. Wo auf der Erde sind Erdbeben wahrscheinlicher als an anderer Stelle? Wo suchen wir sinnvollerweise nach Rohstoffen von Wasser bis Lithium? Wie sind klimatische Veränderungen der Gegenwart vor dem Hintergrund natürlicher Schwankungen in der Erdgeschichte zu bewerten? Die Liste solcher übergeordneten Fragen ist lang.

Keine geowissenschaftliche Fachdisziplin kann solche übergeordneten Fragen allein beantworten. Oft sind zunächst einmal weniger komplexe Fragen mit der Forschung spezialisierter Fachbereiche zu beantworten, beispielsweise: Wie alt ist ein Gestein? Wie ist es entstanden? Warum ist es später tektonisch deformiert worden? Was passiert mit einem Gestein unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur? In welcher Richtung ist vor Millionen von Jahren ein heute längst ausgetrockneter Fluss geflossen? Auch diese Liste ist lang.

Wir wollen einige Beispiele sowie etwas Hintergrund beleuchten, welchen Beitrag Gesteine und Magnetismus letztendlich zu den übergeordneten Fragen liefern können (Abb. 1.3).

Der Weg führt uns dem Thema des Buches folgend entlang der unterschiedlichsten Aspekte der Magnetisierung von Gesteinen. An geeigneter Stelle werden immer wieder kleinere Schnipsel geologischen Hintergrundwissens eingestreut. Gerade so viel, hoffentlich, um wertschätzen zu können, warum beispielsweise das Datieren von Steinen für Geologen ein aufregendes Thema ist und Magnetostratigraphie dabei helfen kann.

Geologie, besser gesagt das geowissenschaftliche Verständnis unserer Erde seit ihrer Entstehung, beruht auf der Zusammenführung einer Vielzahl von unterschiedlichsten Fachdisziplinen. Geowissenschaften verwenden physikalisch und mathematisch geprägte Untersuchungen wie beispielsweise in der Kristallphysik, oder mit den technisch hochspezialisierten Verfahren dreidimensionaler seismischer Aufzeichnungen in den Tiefen der Erdkruste. Geodynamische Untersuchungen reichen vom komplex aufgebauten Erdinneren bis zu spürbaren Auswirkungen des Erdinneren an der Oberfläche wie Erdbeben und Vulkanausbrüchen. Geowissenschaften dienen zur Analyse vergangener Umweltbedingungen in den Milliarden Jahren seit der Entstehung der Erde. Das Thema dieses Buches – Paläo- und Gesteinsmagnetik – bildet ein Puzzleteil auf der Suche nach einem möglichst detaillierten Bild unseres Planeten. Ganz im Sinne des eingangs zitierten „Klugschwätzer“ Nimbus finden sich tatsächlich auf allen Skalen der Beschäftigung mit dem „System Erde“ Möglichkeiten, die Magnetisierung der Gesteine zurate zu ziehen.



**Abb. 1.3** Der Magnetismus der Gesteine verbirgt sich in den unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen gesteinsbildenden Minerale der Gesteine. Magnetisierung entsteht auf kleinster, subatomarer Ebene und resultiert in charakteristischen Kennwerten aller Minerale bei der Untersuchung im Labor (rechte Kugel). Wenige der Minerale ähneln eher der klassischen Vorstellung eines Magneten und werden in der Natur schon durch das Erdmagnetfeld magnetisiert. Auf diese Weise lassen sich Richtungen (etwa vom Nordpol zum Südpol) festlegen (linke Kugel). In dieser Spannweite (subatomar bis globales Erdmagnetfeld) sind auch typische Anwendungen der Paläo- und Gesteinsmagnetik in den Geowissenschaften angesiedelt

Die auf den folgenden Seiten diskutierten Anwendungsbeispiele sind bewusst divers gewählt – aus den unterschiedlichsten Bereichen und in Zusammenspiel mit unterschiedlichsten geowissenschaftlichen Disziplinen und Fragestellungen. Dies, um vielleicht etwas eitel die Bandbreite der Paläo- und Gesteinsmagnetik zu unterstreichen. Wir verwenden in Kapitelüberschriften die beiden Fachbegriffe „Paläomagnetik“ und „Gesteinsmagnetik“. Beide sind sozusagen über ihre naturwissenschaftlichen Wurzeln miteinander verbunden, repräsentieren aber dennoch zwei gänzlich andere Arten, sich Magnetismus in Gesteinen zunutze zu machen.

In Kap. 4 beschäftigen wir uns mit vergangenen Zuständen des Erdmagnetfeldes und was wir dazu aus Gesteinen herauslesen können. Wir werden sehen und verstehen, wir betrachten Vektoren und nur eine verschwindend geringe Anzahl winzigster, aber besonderer Minerale der Erdkruste.

In Kap. 5 brauchen wir das Erdmagnetfeld nicht mehr, um geowissenschaftlich relevante Beiträge zur Klärung unserer Fragen zu leisten. Wir setzen uns mit der Tatsache auseinander, dass alles magnetisch reagiert, beispielsweise auch ein Quarzkorn. Es ist

nicht nötig, sich dauerhaft alles zu merken, auch nicht ein Erdmagnetfeld, um magnetische Beachtung zu finden.

Um dieses Buch zu lesen und die Implikationen der Thematik zu verstehen, ist vermutlich ein gewisses geologisches oder, allgemeiner, geowissenschaftliches Grundverständnis nötig. Weil ein solches Verständnis jedoch nicht vorausgesetzt werden soll (meine Tochter darf nicht vergrault werden), werden wir an geeigneter Stelle immer wieder kleine geologische Exkursionen unternehmen. Im Hinblick auf den geologischen Hintergrund können wir in diesem Buch nicht allzu sehr vom magnetischen Weg dieses Buches abweichen, aber doch immerhin und gerade so weit, um auch als geowissenschaftliche Laien nicht aus dem Tritt zu geraten. Wer kann schon die Schilderungen zu einem neuen Kletterwerkzeug zu schätzen wissen, wenn die Existenz von Bergen und Klippen gänzlich unbekannt ist? Aber vielleicht gelingt es uns, die Berge mit einigen Gedankenstützen, auch ohne auf sie zu klettern, zu erkennen. Und vielleicht gar einmal mehr Zeit dort zu verbringen.

Neben der Geologie werden wir nicht umhinkommen, uns uns einige Gedanken zu machen, wie Magnetisierung von Gesteinen funktioniert und was Magnetismus eigentlich ist. Aber wer wollte nicht schon immer wissen, was auf kleinster, atomarer Ebene in Gesteinen vor sich geht?

Wie wir sehen werden, speichert nicht das gesamte Gestein die Magnetisierung, sondern nur eine kleine Gruppe enthaltener Minerale mit besonderen magnetischen Eigenschaften (Kap. 3). Diese „magnetischen“ Minerale sind oft submikroskopisch klein und in der Regel nur als Spurenbestandteile der Gesteine aufzufinden. Für Menschen mit entsprechendem Forschungsinteresse sind sie aber doch durchgängig in *jedem* Gestein enthalten. Ein Quarzkorn in einem Sandstein<sup>5</sup>, also das, was wir mit bloßem Auge als Hauptbestandteil des Sandsteines wahrnehmen, trägt per se keine Erinnerung an vergangene Erdmagnetfelder. Man muss genauer hinsehen, um die magnetisch relevanten Körnchen neben den Quarzkörnern zu bemerken.

Das Thema, auf das wir uns hier einlassen, bedeutet ebenfalls, sich mit Millionen und Millionsteln, Milliarden and Milliardsteln zu beschäftigen. Wir wollen Dinge – sprich Bestandteile der Gesteine – betrachten, welche zu klein sind, um sie ohne Weiteres sehen zu können, und Prozesse – sprich Magnetisierung –, welche in der Regel so lange (an) gedauert haben oder so weit zurückliegen, dass man doch dreimal schlucken muss bei der Realisierung der Größenordnung dieser Zeiträume.

Milliarden bezieht sich in diesem Zusammenhang auf Jahre. Typische „magnetische“ Minerale sind kleiner als ein Millionstel eines Meters (oder ein Tausendstel eines Menschenhaares).

Den meisten von uns mögen die Pyramiden mit ihren rund 4000 Jahren sehr alt erscheinen. In der Geologie sind plus oder minus 40 Mio. Jahre nicht sonderlich

---

<sup>5</sup>Ein Gestein, welches aus zuvor losen Sandkörnern durch Auflast jüngerer Ablagerungen entstanden ist, indem sich die Körner über die Zeit ineinander verkeilt und verbacken haben.

beeindruckend. Im täglichen Leben sind einige der finanzkräftigsten Menschen im Jahr 2022 bei 40 Mrd. (Dollar in diesem Fall) vermutlich nicht übermäßig aufgeregt. Verzeihung für das Mischen von Alter und Währung, aber es geht lediglich um den übergeordneten Punkt der Dimension. Für den Normalverdiener sind diese Summen so hoch, dass sie sich ob der mangelnden Erfahrung sowohl der Vorstellung als auch der täglichen Relevanz auch zur Deckung eines gehobenen Lebensstandards in der westlichen Welt entziehen. 40 Mrd. können aber gerade einmal so ausreichen, um ein Projekt durchzuführen, mit dem Ziel den menschlichen Horizont zu erweitern. Vielleicht im Weltraum, dessen Größe auch nicht eben leicht zu realisieren ist. Zurück zur Dimension Zeit sind 40 Mio. Jahre (ein Hundertstel von 40 Mrd.!) lang genug, um ein Gebirge wie die Alpen zu formen. Viel zu lang für den Erhalt der Pyramiden, welche dann vermutlich längst verwittert wären. Wir werden an späterer Stelle ein paar Überlegungen anstellen, um die immense Dauer eines „geologischen Zeitraums“ besser verstehen zu können.

Wie gesagt, jeder Stein, jedes Gestein in der Natur enthält magnetische Partikel. Man muss genau hinschauen, angefangen mit einem Blick auf das jeweilige Gestein selbst, um einordnen zu können, welche Frage denn überhaupt beantwortet werden kann. Das Alter von Gesteinen zu kennen, ist in vielerlei Hinsicht interessant, beispielsweise um zu rekonstruieren, wie sich eine Landschaft oder gar die Position eines Kontinentes auf der Erdkugel über die Jahrtausende der Erdgeschichte verändert hat. Ganze Kontinente haben sich über viele Tausend Kilometer relativ zueinander bewegt, sind miteinander kollidiert und haben Gebirge wie die Alpen oder den Himalaya aufgetürmt. Andere Kontinente sind auf immer verschwunden, subduziert worden. Geowissenschaftler möchten die Erdvergangenheit verstehen, um idealerweise unsere heutige Umwelt und deren kritische Faktoren besser beurteilen und damit auch unser Verhalten der Natur gegenüber steuern zu können.

„Umkloppungen“ des Erdmagnetfeldes, in denen der jeweilige Nordpol zum Südpol wird und umgekehrt, haben in Gesteinen eine Art magnetischen Barcode hinterlassen. In den schwarzen und weißen Streifen sind Dauer und relative Aufeinanderfolge der jeweiligen Konfiguration des Erdmagnetfeldes für lange Bereiche der Erdgeschichte dokumentiert. Diese Altersinformation lässt sich nun nicht, vielleicht ähnlich dem Zählen von Baumringen in der Dendrochronologie, mit bloßem Auge oder unter dem Mikroskop sehen, aber dennoch mithilfe wissenschaftlicher Messungen und Analysen auslesen – wie immer, wenn man weiß, wie, meist recht leicht sogar. Dazu mehr in Kap. 4.

In Kap. 5 widmen wir uns der gar nicht so falschen Behauptung „Alles reagiert magnetisch“. Gemeint sind damit Materialien, welche uns täglich umgeben – beispielsweise Gesteine, Holz, Plastik, ja sogar Wasser. Die Behauptung wird zunächst ganz zu Recht bei den meisten Menschen aufgrund der scheinbaren Absurdität eher ein Kopfschütteln und Abwenden als ein gesteigertes Interesse an den weiteren Ausführungen zum Thema hervorrufen.

Wie also ist das zu verstehen: Alles ist magnetisch?

Zurück zu unserem Sandstein<sup>6</sup>. Schieben wir kurz das Erdmagnetfeld sowie Steine, von denen ein winziger, mit den Augen nicht erkennbarer Bestandteil dieses Magnetfeld zu speichern vermag, beiseite. Ein Sandstein besteht typischerweise fast zu 100 % aus zusammengepressten Quarzkörnern. Man mag nicht grundsätzlich auf die Idee kommen, Quarz und Magnetismus in Verbindung zu bringen. Wiederum ist es allerdings eine Frage, was wir unter Magnetismus verstehen. Fest steht, dass jedes Material, jede Mineralart eine messbare magnetische Reaktion zeigt, wenn dieses Mineral einem magnetischen Feld ausgesetzt wird. Das bedeutet nicht, dass eine solche Magnetisierung auch dauerhaft erhalten bleiben muss. Bei den meisten Mineralen schwindet die magnetische Reaktion in der Tat, sobald das magnetisierende Feld<sup>7</sup> entfernt wird. In der Gesteinsmagnetik sind Quarze, wie alle übrigen Minerale der Erdkruste, somit überaus interessante Studienobjekte. Tatsächlich sind gerade die „nichtmagnetischen“ Minerale als hauptsächliche Bausteine der Gesteine für eine Vielzahl magnetischer Anwendungen und Erkenntnisse verantwortlich. Schließlich halten die Bauteile am ehesten die Entstehungsgeschichte des Gesteines bereit.

Warum wollen wir das alles wissen?

Magnetische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen können auf vielfältige Art und Weise zur Klärung geowissenschaftlicher Fragen beitragen. Ein Hauptgrund dafür ist, dass viele der Minerale aus magnetischer Sicht sehr sensitiv auf alle möglichen Veränderungen in ihrer geologischen Umgebung reagieren. Oder einfach ihre geologische Umgebung widerspiegeln. Dies kann bedeuten, dass wir auf die eine oder andere Art und Weise mit magnetischen Messungen relative Veränderungen in der Zusammensetzung eines Gesteines bestimmen können. Wir werden mithilfe der ungewöhnlichen Anwendung eine zerstörte riesenhafte Buddha-Statue im Hindukusch wieder zusammensetzen und verstehen, warum die relative Zusammensetzung eines Gesteines interessant ist.

In einer Weiterführung dieser Idee werden wir erfahren, dass es sich lohnt, sich die oft kleinsten Bestandteile eines Gesteines genauer anzuschauen. Einigen magnetischen Mineralen ist in gewisser Weise anzusehen, was mit ihnen im Laufe ihrer Existenz geschehen ist. War die Temperatur in der Erdkruste ungewöhnlich hoch, sind Fluide durch das Gestein geflossen, oder haben Bakterien versucht, die Minerale in ihre Nahrungskette einzubauen? Einige Minerale spiegeln in ihrem magnetischen Antlitz wider, aus welcher Richtung weniger sensitive Hauptbestandteile eines Gesteines angeliefert wurden.

Manchmal liefern magnetische Untersuchungen sogar den entscheidenden Hinweis zur letztendlichen Lösung eines geowissenschaftlichen Problems. Übergeordnete geowissenschaftliche Fragestellungen sind in der Regel komplexer Natur, da sie sich

---

<sup>6</sup>Wer nicht sicher ist, was bei solchen geologischen Begriffen anzunehmen ist, wird im Laufe dieses Buches einige erklärende Hinweise finden und sich dabei hoffentlich an solcher Stelle am geschriebenen Wort entlang hangeln können.

<sup>7</sup>Ein solches Feld wird oft durch ein magnetisches Messgerät bei einer entsprechenden Untersuchung verursacht. Aber natürlich gilt dies auch für das Erdmagnetfeld.

naturgemäß mit komplexen natürlichen Systemen beschäftigen. Insofern ist es in der Regel nicht zu erwarten, dass eine einzelne Methode, eine einzelne Disziplin innerhalb der Geowissenschaften oder allgemein ein anderweitig eingeschränkter Blickwinkel zu einem befriedigenden Ergebnis führen kann. Paläomagnetik und Gesteinsmagnetik haben in nahezu allen Bereichen der Geowissenschaften einen Beitrag zu liefern. Aber dazu im Laufe des Buches mehr.

Hier sei noch eine Referenz zur allgemeineren Wahrnehmung von Magnetismus gemacht. Es ist spannend zu sehen und zu lesen, wie sich Magneto<sup>8</sup> vom vermeintlichen Bösewicht zum Superhelden entwickelt. Dies geschieht meist kraftvoll und laut unter Zuhilfenahme diverser magnetischer Fähigkeiten, beispielsweise dem Einsatz magnetischer Kraftfelder. Aber wir wollen uns in diesem Buch, wie gesagt, eher mit den unauffälligen und stillen Auswirkungen der Magnetik in eher alltäglichen Situationen befassen. Es gibt schließlich mehr stille Superhelden, als man denkt.

Also los in der Vorstellung einer Reise durch die Welt des Erdmagnetismus.

---

<sup>8</sup>Ein Protagonist aus dem Umfeld der X-Men der Marvel-Comics-Serie. Seit den 1960er-Jahren.



# Das Erdmagnetfeld aus geologischer Sicht

# 2

## 2.1 Die Erde als dynamisches System

Ein wichtiger Ansatz beim Lesen dieses Buches wird es sein, die Erdkruste in der Gedankenwelt der Geologie als dynamisches, sich ständig wandelndes, sich bewegendes, zerstörendes und erschaffendes Kleid dieser Erde zu verstehen. Unaufhörlich seit Milliarden von Jahren entstehen Gesteine, werden verändert, deformiert und oft in diesem Kreislauf wieder zerstört. Auch wenn dies meist Millionen von Jahren dauert.

Mit diesem Ansatz lässt sich die gesamte Erdkruste in wenige größere Bruchstücke (Erdplatten) unterteilen, welche sich ständig relativ zueinander bewegen. Dabei kollidieren sie, werden verformt und entlang der kollidierenden Plattenränder zu Gebirgen aufgetürmt. Alle Gebirgsketten, welche Ihnen in den Sinn kommen mögen, sind im Prinzip so entstanden, wenn auch in unterschiedlichen Phasen der Erdgeschichte. Nicht von ungefähr liegen die höchsten Berge, wie der Mount Everest, im Bereich einer aktuell andauernden geologischen Kollision zwischen Indien und Asien.

Gebirge hingegen, bei denen die Kollision abgeschlossen ist, werden im Laufe der Zeit dann wieder erodiert, also durch Wind und Wetter nach und nach abgetragen. Die deutschen Mittelgebirge waren früher in der Erdgeschichte deutlich höher, als sie es sind, seit wir Menschen sie bewundern. Heute sind sozusagen nur noch die abgerundeten Sockel dieser Berge erhalten. Der Vergleich stimmt für das Prinzip der Entstehung von Gebirgen und den späteren unvermeidlichen Zerfall. Nicht alle Gebirge haben einmal gleich ausgesehen, beispielsweise gleiche Höhen und Anzahl der Bergketten erreicht. Dafür sind die bestimmenden Faktoren<sup>1</sup> im weltweiten und erdgeschichtlichen Vergleich zu unterschiedlich.

---

<sup>1</sup> Dazu zählen neben der Art und Beschaffenheit der aufgetürmten Gesteine auch Intensität, Winkel, Zeitraum und Art der Plattenkollisionen.

Ohne uns kurz den Aufbau der Erde und in diesem Zusammenhang insbesondere die Bedeutung und die Dynamik der Erdkruste bewusst zu machen, kommen wir an dieser Stelle nicht weiter.<sup>2</sup> Ohne Kenntnis früher Abläufe der dynamischen Entwicklung der Erdkruste wären viele Bereiche der menschlichen Rohstoffsuche (Wasser, Erze, Minerale, Kohlenwasserstoffe etc.) völlig dem Zufall überlassen. Die Kenntnis ähnlicher geologischer Konfigurationen in der Erdgeschichte hilft enorm, an der richtigen Stelle zu suchen und zu verstehen, was wo zu erwarten ist und was nicht.

Von den Geowissenschaften lernen wir, dass die Erde in erster Näherung einen schalenartigen Aufbau bestehend aus Kruste, Mantel und Kern hat. Die sogenannte Erdkruste – also die erkaltete Oberfläche, auf der wir wandeln – weist im Vergleich zum Durchmesser der Erde etwa die Dicke einer Eierschale auf (wahlweise auch Pfirsich- oder Apfelschale; Abb. 2.1). Keiner besonders gleichmäßigen Schale allerdings. Es bestehen deutliche Unterschiede in der Dicke<sup>3</sup>, Zusammensetzung<sup>4</sup> und ihrer Stabilität. Wie gesagt, alle Krustenteile bewegen sich kontinuierlich.

Das alles ist stark vereinfachend; andere Faktoren spielen eine Rolle. Es ist beispielsweise wichtig, wie die kollidierenden Platten aufgebaut sind. Geologisch werden ozeanische und kontinentale Kruste unterschieden, welche jeweils aus anderen Gesteinsarten mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften aufgebaut sind und sich insbesondere in ihren Mächtigkeiten um etwa eine Zehnerpotenz unterscheiden. Kilometer gegenüber Zehnerkilometer Mächtigkeit.

Der vielleicht vorschnell ins Auge springende Vergleich aus dem täglichen Leben: Schwerer Lastwagen kollidiert mit leichtem Kleinwagen. Lastwagen trifft Lastwagen etc. Unter welchem Winkel, mit welcher Geschwindigkeit geschieht die Kollision der eher gleichen oder ungleichen Partner? Die Kombinationsmöglichkeiten sowie die jeweiligen Umweltbedingungen<sup>5</sup> sind ebenso vielfältig wie die jeweiligen Resultate. Der Vergleich mit einer Autokollision hinkt stark – im Wesentlichen ist es im geologischen Szenario keine spontane Energieumwandlung, sondern ein langes, beharrliches, aber immens kraftvolles Gegeneinanderdrücken.

Aber auch in der Erdkruste wird das Szenario deutlich anders sein, je nachdem, ob zwei Kontinente miteinander kollidieren, ein Kontinent auf ozeanische Kruste oder ozeanische Kruste unterschiedlichen Alters und damit unterschiedlicher Schwere auf-

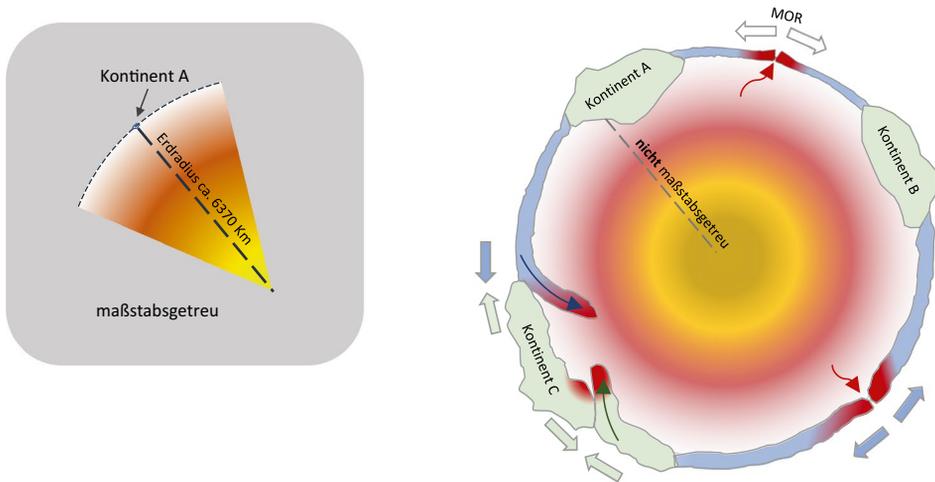
---

<sup>2</sup>Mit anderen Worten: Der sichere Standort einer neuen Gartenhütte lässt sich wahrscheinlich durch eine kurze lokale Inspektion der Beschaffenheit des Untergrundes und ohne weitere Kenntnis der Geologie festlegen. Ein Wolkenkratzer bedarf schon, im wahrsten Sinne des Wortes, einer tiefergehenden Betrachtung der Geologie, um dessen Standsicherheit zu gewährleisten. Sonst wird vielleicht auf Sand gebaut. Und wir wollen ja hoch hinaus mit unseren neuen Erkenntnissen zum Magnetismus von Gesteinen.

<sup>3</sup>Mächtigkeit heißt das in der Geologie, wenn es sich um Gesteinsabfolgen handelt.

<sup>4</sup>Kontinentale gegenüber ozeanischer Kruste und deren jeweils typischer Gestein (s. auch Kap. 3).

<sup>5</sup>Nasse Straße, Eisglätte, trockene Kreuzung, Kurve, Autobahn etc.



**Abb. 2.1** Stark schematisierter und nicht maßstablicher Querschnitt der Erde. Um sich auf das Thema „Magnetisierung von Gesteinen“ einzulassen, hilft es, die Erdkruste als dynamisches, sich ständig veränderndes Kleid unserer Erde zu verstehen. Links ist eine realistische Proportion von Mächtigkeit der Erdkruste zum Erdradius gezeigt. So lässt sich die ständige Bewegung innerhalb dieser dünnen Erdkruste besser einordnen. Insbesondere kann uns die Abbildung als grobes Gerüst für den Kreislauf der Gesteine dienen. Gesteine entstehen beispielsweise an Mittelozeanischen Rücken (MOR; divergierende Pfeile rechts), werden zu Gebirgen aufgefaltet (konvergierende Pfeile) oder wieder aufgeschmolzen (im Zuge ihrer Subduktion). Im Verlauf des Kapitels gehen wir näher auf die Bedeutung der Dynamik für die Magnetisierung der Erdkruste, aber auch auf die Bedeutung des hier vage angedeuteten Schalenbaus der Erde für die Erzeugung der Erdmagnetfeldes ein (s. auch Abb. 2.12)

einandertrifft. Platten an unterschiedlicher Stelle der Erde bewegen sich sehr langsam, nur wenige Zentimeter pro Jahr, dennoch bewegt sich die Erdkruste an manchen Stellen doppelt oder dreimal so schnell wie an anderer Stelle. Das hat viele Gründe. Wer beispielsweise außen auf dem Karussell sitzt, legt in gleicher mehr Strecke zurück als diejenigen nahe der Drehachse. Die Geschwindigkeit als Verhältnis von Strecke pro Zeit (km/h) ist höher, auch wenn die Winkelgeschwindigkeit<sup>6</sup> gleich ist. Auch dieser Vergleich hinkt etwas für die Erdkruste und ihre einzelnen Platten. Diese bewegen sich jeweils in erster Näherung auf der Kugeloberfläche der Erde um sogenannte Euler-Pole. Das ist jeweils die Achse des Karussells<sup>7</sup>. Dennoch mag das Bild einer eher alltäglichen Kollision zum Verständnis der Vielzahl bei einer Plattenkollision mitwirkenden Faktoren helfen, insbesondere im Hinblick auf das vorliegende Buch, um die Vielzahl der

<sup>6</sup>Wie schnell das Karussell gedreht wird.

<sup>7</sup>Der indische Kontinent ist seit etwas mehr als 50 Mio. Jahren ungewöhnlich schnell und auf direkter Linie mit Asien kollidiert. Der Himalaya und benachbarte Gebirgsketten bis nach Pakistan und Afghanistan sind das Resultat.

möglichen Verformungen einer ehemals horizontal abgelagerten und magnetisierten (!) Gesteinsschicht aufgrund plattentektonischer Bewegungen zu verstehen.

Oft wird ein Teil der Kruste bei der Kollision zweier Platten in die Tiefe gedrückt und in der Folge aufgeschmolzen. An anderer Stelle entsteht neue Kruste durch Abkühlen und Erstarren, wenn Magma aus dem Erdmantel nach oben dringt. Dies geschieht vornehmlich entlang Hunderte Kilometer langer sogenannter Mittelozeanischer Rücken (MOR) in der Tiefe der Ozeane. Wie wir im Laufe des Kapitels noch näher besprechen werden, entsteht ein MOR somit aus der Bruchlinie entlang zweier auseinanderbrechender Platten. Wenn die Erdkugel über Jahrmillionen weder expandieren oder schrumpfen soll, muss ein gewisses Gleichgewicht zwischen neu entstehender (MOR), verschwindender (Subduktionszonen) und aufgefalteter (Gebirge) Erdkruste eingehalten werden. Bewegt sich ein Bereich, müssen alle anderen Krustenteile mitziehen.

So sind ständig alle vier Ecken unseres Gartens in Bewegung. Natürlich sehr langsam. Sehr, sehr langsam, aber wenn ich mich jede Woche nur 1 mm weiterbewege, komme ich doch voran, und nach 100 Mio. Jahren (!) wäre ich schon etwa von Köln zum Äquator gewandert. Wie gesagt, für einen Geologen sind 100 Mio. Jahre nicht einmal ein sonderlich beeindruckend langer Zeitraum. Von heute aus rückwärts gezählt bringt uns das gerade mal in die Mitte der Kreidezeit, also in das jüngste Erdmittelalter. Seit der Entstehung der Erde könnte man viel weitere Strecken zurückgelegt haben.

Die ältesten Gesteine der Erde sind über vier Milliarden Jahre alt, wenn auch aufgrund der genannten Bewegungen und Recyclingtendenzen der Erdkruste nicht mehr allzu häufig zu finden. Meist wird das Alter der Erde mit 4,6 Mrd. Jahren vermerkt. In unserem Beispiel mit einer Geschwindigkeit von 0,5 cm pro Jahr könnten wir am Äquator in 4 Mrd. Jahren einmal die halbe Erde umrunden (ca. 20.000 km). Einige Millionen Jahre sind bereits genug Zeit, um Kontinente um die Welt zu schicken, Gebirge aufzufalten, Gebirge wieder abzutragen und den Abtragungsschutt immer weiter ins Tal zu tragen, über Flüsse bis ins Meer. Dort werden diese abgelagerten Sedimente dann bei einer möglichen nächsten Kollision der Erdplatten erneut zu einem Gebirge aufgetürmt, gefaltet und geschert.

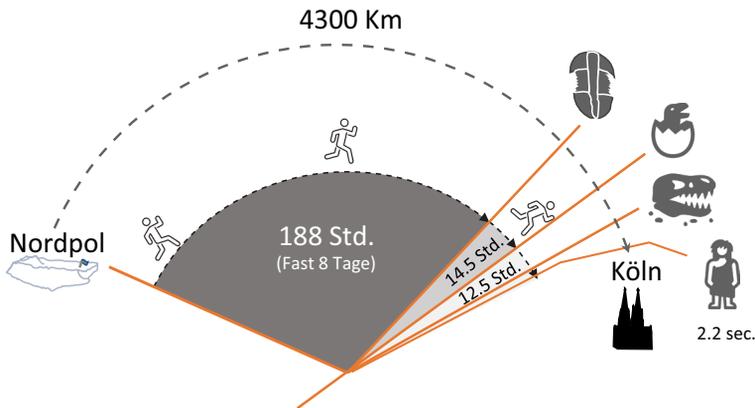
Anderes Beispiel (Abb. 2.2): Wenn man eine Reise vom Nordpol zum Kölner Dom unternimmt und etwas nonchalant *Zeit mit Strecke gleichsetzt*,<sup>8</sup> beginnt das Kambrium<sup>9</sup> in der Nordsee etwa auf der Höhe von Edinburgh. Das Mesozoikum beginnt etwa an der niederländischen Küste, die Kreide endet an der deutsch-holländischen Grenze. Der erste moderne Mensch (Holozän) begegnet uns ca. 12 m vor dem Domportal.

Je nachdem, wie, wann, in welcher Reihenfolge und unter welchen Klima- und Umweltbedingungen Gesteine in der geologischen Vergangenheit entstanden sind oder eventuell später durch sehr hohe Temperaturen und Drucke verändert wurden, sind Ge-

---

<sup>8</sup>Nur ein Gedankenspiel.

<sup>9</sup>Siehe insbesondere die folgenden Erläuterungen zur geologischen Zeitskala im Vergleich zur geomagnetischen Zeitskala in Abschn. 2.2.



**Abb. 2.2** In diesem Buch sprechen wir auch über extreme Dimensionen im Sinne von Zeit und Größe. Die Abbildung zeigt eine der vielen möglichen Analogien, um das geologische Alter der Erde zu realisieren. Hier wird eine Zeitdauer von 4300 Mio. Jahren mit der Zeitdauer eines „Ultramarathons“ vom Nordpol nach Köln verglichen (ca. 4300 km). Etwa acht Tage liefen wir durch leblose Ödnis (Präkambrium), bis uns die ersten primitiven Lebensformen zu Beginn des Kambriums begegneten. Der neunte Tag der Reise beinhaltet alle Perioden der Entwicklung von Flora und Fauna der Erdgeschichte, inklusive Auftreten (Trias) und Aussterben (Kreide) der Dinosaurier. Der erste Mensch (*Homo sapiens*) begegnete uns erst Sekunden vor dem Eintreffen am Domportal. Die meisten geologischen Untersuchungen, inklusive der hier im Mittelpunkt stehenden gesteinsmagnetischen Untersuchungen, beziehen sich auf die letzten 12 h der Reise. Für die Vorstellung geologischer Zeiträume ist hier allerdings weniger der absolute Wert von 12 h maßgeblich<sup>10</sup> als vielmehr die relative Zeitdauer zur Gesamtdauer der Reise von rund neun Tagen

steinsschichten für uns Menschen heute unterschiedlich interessant. Die genannten Faktoren bei der Gesteinsentstehung spielen beispielsweise eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Bildung von Lagerstätten sowie deren mögliche Nutzung. Dies schließt auch die Möglichkeiten der Speicherung von Grundwasser und dessen Fließverhalten ein – oder die Beschaffenheit des Baugrundes für neue Gebäude, Tunnel oder Straßen. Manchmal dient das Interesse auch rein der erdgeschichtlichen Grundlagenforschung. Wie gesagt, man kann sehr wenig über den heutigen Zustand der Erde aussagen, wenn die Vergangenheit nicht bekannt und zumindest im Ansatz verstanden wird.

Ein weitere geologische Einordnung soll hier in Erinnerung gerufen werden: der sogenannte Gesteinskreislauf. Das ist kein weiterer Hinweis darauf, wie lebendig unsere

<sup>10</sup>Resultierend aus einer beliebigen Annahme einer Laufgeschwindigkeit von 20 km/h bei einer Distanz von 4300 km.