



Spektrum  
AKADEMISCHER VERLAG  
Sachbuch

Florian Neukirchen

# Bewegte Bergwelt

Gebirge und wie sie entstehen



---

# Bewegte Bergwelt



---

Florian Neukirchen

# Bewegte Bergwelt

Gebirge und wie sie entstehen

**Spektrum**  
AKADEMISCHER VERLAG

---



**Autor**  
**Florian Neukirchen**  
mail@riannek.de  
www.riannek.de

### **Wichtiger Hinweis für den Benutzer**

Der Verlag und der Autor haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media  
[springer.de](http://springer.de)

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2011  
Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

11 12 13 14 15            5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Merlet Behncke-Braunbeck, Dr. Meike Barth  
Redaktion: Dr. Peter Wittmann  
Satz: klartext, Heidelberg  
Umschlaggestaltung: wsp design Werbeagentur GmbH, Heidelberg  
Umschlagfotografien: Bromo, Batok und Semeru (Indonesien). Kleine Bilder: Alpamayo (Peru), Oldoinyo Lengai (Tansania), Weiße Kordillere vom Nevado Pisco (Peru), Kappadokien (Türkei), Monte Rosa und Breithorn (Schweiz).  
Titelfotografie: Schneewittchen: Der Alpamayo (5947 m) in der Weißen Kordillere in Peru (Abschnitt 4.3) wird oft als schönster Berg der Welt bezeichnet.

ISBN 978-3-8274-2753-3

# Vorwort

Die Bergdörfer auf der Nordseite des Annapurna-Massivs in Nepal haben ein tibetisches Flair: Bunte Gebetsfahnen flattern im Wind, Gebetsmühlen und weiß getünchte Chörten säumen den Weg, und durch den Regenschatten der Berge herrscht Trockenheit. Als ich mich bei der Umwanderung des Annapurna-Gebietes Manang näherte, dem angeblich trockensten Ort der Gegend, begann es allerdings zu regnen. Aus dem Regen wurde gegen Abend Schnee, und der starke Schneefall hielt ohne Unterbrechung die folgenden drei Tage an, was den Aufstieg zum 5416 m hohen Thorung-La-Pass vorerst unmöglich machte. Unter den Wanderern in Manang kursierten wilde Gerüchte über die Situation weiter oben, und viele machten sich frustriert auf den Rückweg. Andere blieben wie ich am warmen Ofen sitzen, warteten auf besseres Wetter und fragten mich, den Geowissenschaftler, über Gebirgsbildung im Allgemeinen und den Himalaja im Besonderen aus. Nicht alle Fragen konnte ich beantworten, zu Hause begann ich daher, in wissenschaftlichen Zeitschriften weitere Details nachzuschlagen.

Ähnliche Situationen wiederholten sich bei anderen Trekkingtouren in aller Welt. Verwundert stellte ich bald

fest, dass es kein leicht verständliches Buch gibt, das all die erstaunlichen Phänomene und geologischen Besonderheiten der Gebirge der Welt zusammenträgt und das ich all den interessierten Bergsteigern, Wanderern und Naturfreunden empfehlen könnte: Ich fand nur Bücher, die entweder zu allgemein gehalten waren, um regionale Besonderheiten zu verstehen, oder sie beschränkten sich auf eine einzige Region wie etwa die Alpen. Dabei sind es gerade die Gemeinsamkeiten, die auch ein kompliziertes Gebirge wie die Alpen verständlicher machen. Die Prozesse, die dort nacheinander und nebeneinander ablaufen, können wir uns zunächst an einfacheren Beispielen vor Augen führen. Die Idee, dieses Buch zu schreiben, nahm so immer konkretere Gestalt an. Hinzu kam, dass ich mein Hobby der Reisefotografie immer ernsthafter betrieb. Mit jeder Reise sammelten sich weitere Fotos aus aller Welt an, die nun die Mehrzahl der Abbildungen dieses Buches ausmachen.

Spannender als jede Bestandsaufnahme von Gesteinsformationen finde ich, wenn man sich die Vorgänge, die zur Entstehung eines Gebirges beigetragen haben, bildlich vorstellen kann. Da ich in erster Linie erklären will, wie etwas passiert und warum, habe ich



Der Autor beim Aufstieg zum Thorung-La-Pass in Nepal, im Hintergrund Annapurna III.

mich entschlossen, das Buch nach den wichtigsten Prozessen und nicht regional zu gliedern. Das ist nicht immer einfach, da in jedem Gebirge verschiedene Prozesse neben- und nacheinander ablaufen. Ganz ohne Sprünge und Rückgriffe komme ich daher nicht aus. Die Reihenfolge des Buches ist jedoch so angelegt, dass die Kapitel logisch aufeinander aufbauen. Gleichzeitig habe ich aber auch auf beliebte Reiseziele besonders Wert gelegt, was das Buch zugleich zu einer Art Reiseführer für Naturfreunde macht.

Während ich die Idee zu diesem Buch den zahlreichen interessierten Wanderern verdanke, wäre das Buch kaum ohne das spannende Studium und meine anschließende Forschung bei Herrn Prof. Dr. Gregor Markl (Universität Tübingen), Herrn Prof. Dr. Jörg Keller (Universität Freiburg) und Herrn Prof. Dr. Kurt Bucher (Universität Freiburg) entstanden.

Herzlich danke ich allen, die zu diesem Buch beigetragen haben. Sehr hilfreich waren Kommentare und Anregungen von Herrn Prof. Dr. Wolfgang Frisch (Uni-

versität Tübingen), Herrn Prof. Dr. Thomas Glade (Universität Wien), Herrn Dr. Felix Keller (Academia Engiadina) und Herrn Prof. Dr. Stefan M. Schmid (Universität Basel).

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts danke ich Herrn Dipl.-Geol. Jurgis Klaudius, Herrn Dipl.-Geol. Michael Neubauer sowie Carola, Hans und Randi Neukirchen.

Für die engagierte Umsetzung des Buches danke ich Frau Merlet Behncke-Braunbeck und Frau Dr. Meike Barth (Spektrum Akademischer Verlag) sowie für das sorgfältige Lektorat Herrn Dr. Peter Wittmann (Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig).

Des Weiteren danke ich Frau Dipl.-Min. Wibke Kowalski für die Unterstützung bei der Literaturrecherche und allen Fotografen, die ihre hervorragenden Bilder aus Regionen, die ich nicht selbst besucht habe, zur Verfügung gestellt haben.

Leipzig, November 2010



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Der Bau der Berge</b> . . . . .	3
1.1	Das Rätsel der Glarner Hauptüberschiebung . . . . .	6
1.2	Gestein und Knete . . . . .	10
1.3	Verwerfungen und Klüfte . . . . .	14
1.4	Der Faltenjura . . . . .	18
1.5	Feldspat, Quarz und Glimmer . . . . .	21
1.6	Die Schalen der Erde . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Der Kreislauf der Gesteine</b> . . . . .	27
2.1	Magma und Magma . . . . .	27
2.2	Metamorphose . . . . .	32
2.3	Verwitterung und Erosion . . . . .	35
2.4	Karst . . . . .	40
2.5	Die Kraft des Eises . . . . .	44
2.6	Berge und der Klimawandel . . . . .	47
2.7	Sandstein, Tonstein und Geröll . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Bewegte Platten</b> . . . . .	57
3.1	Alfred Wegener und seine Kontinentalverschiebung . . . . .	57
3.2	Von der Kontinentalverschiebung zur Plattentektonik . . . . .	61
3.3	Hebung und Absenkung: das Spiel mit dem Auftrieb . . . . .	63
3.4	Wie Vulkane funktionieren . . . . .	65
3.5	Mittelozeanische Rücken und die ozeanische Kruste . . . . .	73
3.6	Nackter Mantel ohne Schale . . . . .	76



<b>4</b>	<b>Berge über abtauchenden Platten: Subduktionszonen</b>	81
4.1	Die Anden	84
4.2	Zentrale Anden und das Altiplano	87
4.3	Schneewittchen hinter den 30 Bergriesen	94
4.4	Vorberge der Anden	97
4.5	Am Ende der Anden: Patagonien	98
4.6	Ecuador und Kolumbien	102
4.7	Kollision von Inselbögen	104
<b>5</b>	<b>Seitenverschiebungen mit Komplikationen</b>	109
5.1	Die Südlichen Alpen Neuseelands	109
5.2	Alaska	112
<b>6</b>	<b>Das Dach der Welt: Hochgebirge Asiens</b>	117
6.1	Himalaja	117
6.2	Ausweichende Krustenblöcke	128
6.3	Tibet	131
6.4	Exkurs: Hochdruckgesteine – in die Tiefe und zurück	133
6.5	Karakorum und Hindukusch, Pamir und Tian Shan	137
6.6	Der Zagros: Musterfalten und ein junges Deckengebirge	140
6.7	Ein Flickenteppich im Nahen Osten	144
<b>7</b>	<b>Große Gräben und heiße Flecken</b>	151
7.1	Hotspots und die höchsten Berge der Welt	151
7.2	Grabenbrüche	155
7.3	Der Ostafrikanische Graben	156
7.4	Atlas	163
7.5	Schwarzwald, Harz und Co	166
7.6	Skandinavien	169
7.7	Kollision und Kollaps im Wilden Westen	172



<b>8</b>	<b>Die Alpen und ihre Geschwister</b> . . . . .	181
8.1	Ein Überblick über die Alpen . . . . .	181
8.2	Die Geschichte der Alpen: Ein Ozean entsteht . . . . .	186
8.3	Die Kollision in den Alpen . . . . .	191
8.4	Pyrenäen und Karpaten, Apenninen und das Mittelmeer . . . . .	199
	<b>Epilog</b> . . . . .	205
	<b>Glossar</b> . . . . .	207
	<b>Überblick über die Erdgeschichte</b> . . . . .	213
	<b>Bildnachweis</b> . . . . .	215
	<b>Literatur</b> . . . . .	217
	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	223



Die Tschingelhörner (2849 m) mit dem Martinsloch. Hier wurde der Deckenbau der Alpen zuerst erkannt: Entlang der Glarner Hauptüberschiebung wurden ältere Sedimente als Gesteinsdecke über den mehr oder weniger unbewegten Rand Europas geschoben.

# 1 Der Bau der Berge

„Weil er da ist.“ Das war die Antwort von George Mallory auf die Frage, warum er den höchsten Berg der Welt besteigen wolle. Der Pionier unter den Everestbergsteigern verunglückte 1924 bei seiner dritten Expedition ein paar Hundert Meter unterhalb des Gipfels. Auch wenn er den Gipfel nicht bezwang, sein legendärer Ausspruch machte ihn unsterblich.

Seit jeher üben Berge eine Faszination auf den Menschen aus: groß und mächtig, schon von Weitem zu sehen und dennoch unnahbar, eine andere Welt, vor der man sich klein und unbedeutend und dennoch dem Himmel nah fühlt. Kein Wunder, dass sich unzählige Mythen um sie ranken, dass sich auf den Gipfeln die Götter tummeln, dass dort Riesen und Trolle wohnen oder Hexen tanzen. Keine Religion kommt ohne ihre heiligen Berge aus. Die Gipfel üben aber auch eine magische Anziehungskraft auf den Menschen aus, der in diese mythische Welt eindringen und die Götter herausfordern will. Die Mythen wurden dadurch nicht weniger. Im Gegenteil, mit jeder Erstbesteigung und jedem Unglück kamen neue hinzu.

Weil er da ist. Warum gibt es sie überhaupt, die Berge? Auch um ihre Entstehung ranken sich Mythen, und selbst heute sind trotz intensiver Forschung längst nicht alle Fragen beantwortet. Dennoch haben wir ein relativ gutes Bild der Prozesse, die bei der Gebirgsbildung ablaufen. Es ist das Bild einer dynamischen Erde, die sich ständig verändert. Eine Erde, deren Kontinente „wandern“, deren Berge sich heben und wieder abgetragen werden, deren Ozeane immer breiter werden und auch wieder verschwinden.

Ein Gebirge wie der Himalaja oder die Alpen wird aufgefaltet, wenn zwei Kontinente zusammenstoßen. Das klingt in unseren Ohren fast banal und selbstverständlich. Aber wir müssen uns in Erinnerung rufen, dass sich vor gerade einmal einem halben Jahrhundert die Kontinente noch gar nicht bewegt haben, zumindest in der Vorstellung der meisten Menschen.

Berge entstehen auch dann, wenn ozeanische Kruste unter einem Kontinentalrand versenkt wird. Unter den Anden mit ihren rauchenden Vulkanen taucht die pazifische Krustenplatte ab, der Ozean wird langsam immer kleiner (Kapitel 4). Berge entstehen aber nicht nur durch Kollision und Einengung, sondern auch durch das Ge-

genteil, durch Dehnung (Abschnitt 7.2). Wieder andere ragen ausgerechnet dort in den Himmel, wo selbst nach geologischen Maßstäben über lange Zeiträume tektonische Ruhe herrschte. Bei den Tafelbergen in Venezuela (Abschnitt 2.7) liegt die letzte Gebirgsbildung schon länger zurück als die Entwicklung von komplexeren Lebensformen als Seeanemonen.

Manche Berge sind Teil einer aus unzähligen Gipfeln zusammengesetzten Bergkette, andere ragen einsam aus einer Ebene heraus. Sie können sehr hoch sein und dennoch wie ein Hügel aussehen, andere sind zwar niedrig, beeindruckend aber durch ihre steilen Felsen. Es gibt Rücken und Tafeln, Kegel und Kuppen, Zinnen, Nadeln, Spitzen und Grate, dann wieder Türme, Hörner und Pyramiden. Berge sind so unterschiedlich, dass es gar nicht einfach ist, einen Berg allgemeingültig zu definieren. Die Einträge in den Lexika sagen weniger aus als das, was jeder von uns bereits als Vorstellung im Kopf hat. So unterschiedlich wie die Bergformen sind auch die Prozesse, bei denen Berge entstehen und in ihre Form gebracht werden.

Eine hohe Topografie hängt nicht immer mit einer Gebirgsbildung zusammen, und nicht immer führt eine Gebirgsbildung zu einer hohen Topografie. Das klingt verwirrend, aber für Geologen ist Gebirgsbildung (Orogenese) nicht die Entstehung der Bergketten selbst, sondern die Entstehung der Strukturen, die den Bau des



Abb. 1.1 Die Nordwand des Mount Everest (8848 m).



**Abb. 1.2** Sonnenaufgang mit Annapurna I (8091 m), Annapurna South, Hiunchuli und Machapuchare (Nepal).

Gebirges ausmachen: tektonische Bewegungen zum Beispiel, die Gesteinseinheiten gegeneinander versetzen; geschmolzenes Gestein, das aus großer Tiefe aufsteigt und als Lava aus einem Vulkankrater spritzt oder im Inneren des Gebirges zu Granit erstarrt; Sedimente, die in der Tiefe zu metamorphen Gesteinen umgewandelt werden. Der Aufstieg setzt erst mit einer Verzögerung ein, und nur, wenn dieser schneller ist als die gleichzeitige Abtragung, macht sich die Gebirgsbildung auch in der Form von Bergen bemerkbar.

Geologen lesen in den Gesteinen wie in einem Buch und versuchen dabei, die Geheimnisse der Erde zu entschlüsseln. Wenn sie an einem Felsen Fossilien wie Korallen, Muscheln und Ammoniten finden, dann ermöglicht das nicht nur Aussagen über zum Teil längst

ausgestorbene Lebensformen, sondern auch über das Meer, in dem das betreffende Sedimentgestein abgelagert wurde. Die Temperatur, bei der ein matter Tonstein zu einem glitzernden Glimmerschiefer umgewandelt wurde, lässt sich aus der chemischen Zusammensetzung der Minerale berechnen. Die Zusammensetzungen eines Basalts oder eines Granits geben Hinweise darauf, wo diese Schmelzen entstanden und was mit ihnen auf dem Weg nach oben passiert ist. Die Wellen eines Erdbebens können Einblicke in das unerreichbare Innere der Erde geben, ähnlich wie ein Arzt mit Ultraschall in einen Körper hineinschauen kann. Aus all diesen Bausteinen ergibt sich ein Bild, das die Entwicklung eines Gebirges nachzeichnet. So einfach, wie es der Satz mit dem Auf Falten suggeriert, ist es natürlich nicht. Wie können zum



**Abb. 1.3** Ein großes abflussloses Becken auf dem Tibetplateau in über 4700 m Höhe mit dem Nam-Tso-See.



**Abb. 1.4** Die von Gletschern geformten Berge auf den Lofoten (Norwegen) ragen wie die Zähne einer Säge direkt aus dem Meer auf. Blick vom Hermansdalstind (1029 m) auf den Reinefjord und Bergseen, im Hintergrund das Festland.

Beispiel Hochdruckgesteine aus 100 km Tiefe nach oben gelangen (Abschnitt 6.4) und schließlich neben Sedimenten liegen, die immer an der Oberfläche geblieben sind? Hat das Klima Auswirkungen (Abschnitt 6.1) auf die Gebirgsbildung? Warum gibt es im sogenannten Feuergürtel der Anden riesige Lücken (Abschnitt 4.3) ohne einen einzigen Vulkan? Und was ist mit dem Wort „aufgefaltet“ überhaupt gemeint?

Tatsächlich ist dieses Wort eher irreführend. Wenn wir eine Tischdecke von zwei Seiten her zur Tischmitte schieben, wird sie in Falten gelegt. So einfach hat man sich die Entstehung von Gebirgen vor langer Zeit vorgestellt. Es braucht aber nicht viel, um einzusehen, dass dieses Modell nicht ohne Weiteres auf die Erdkruste zu

übertragen ist. Ein durchschnittlicher Kontinent ist nämlich 30 km dick. Wer dasselbe Experiment mit einer Matratze versucht, wird ahnen, dass bei einem Kontinent gigantische Falten entstehen müssten, mit einer Wellenlänge von Hunderten von Kilometern. Solche Verformungen wird man in den Alpen vergeblich suchen. Überhaupt sehen dort die Bergzüge gar nicht so sehr nach Falten aus, von kleineren Strukturen einmal abgesehen. Das Wort „aufgefaltet“ weckt also falsche Vorstellungen. Die Geologen rätselten ziemlich lange daran. In den Glarner Alpen fanden sie schon früh eine Struktur, an der sich die Lösung geradezu aufdrängte, aber sie wehrten sich lange dagegen, weil sie ihnen zu abwegig erschien.



**Abb. 1.5** Der Vulkan Parícuta (6348 m) ist einer der unzähligen Vulkane der Anden. Lago Chungará im Lauca-Nationalpark, Chile.

## 1.1 Das Rätsel der Glarner Hauptüberschiebung

In den Schweizer Bergen, im Glarnerland zwischen dem Vorderrheintal bei Chur und dem Walensee, fällt eine markante Linie auf, die messerscharf die Berge in zwei Stockwerke aus offensichtlich völlig unterschiedlichen Gesteinen teilt (Abb. 1.6). Besonders bekannt sind die Tschingelhörner, deren Spitzen aus dunklen Sandsteinen und Konglomeraten bestehen, die über hellem Kalkstein und grauem Flysch liegen. Flysch ist eine Wechsellagerung aus Sandstein und Tonstein, die im Meer abgelagert wurde, als die Alpen im Tertiär sich gerade zu heben begannen. Lange Zeit war diese Linie ein großes Rätsel der Geologie, denn die Sandsteine und Konglomerate sind wesentlich älter als der Flysch: Sie wurden schon im Perm in einer Wüstenlandschaft abgelagert. Das Material der Sandsteine, Konglomerate und Grauwacken im Gipfelbereich stammt von der Abtragung des älteren Variszischen Gebirges, das sich einst durch ganz Europa zog, aber schon damals fast vollständig wieder abgetragen war: Grauwacke ist eine Art Sandstein, der viele Gesteinsbruchstücke und Tonpartikel enthält, Konglomerat ist zu einem Gestein verfestigtes Geröll. Vom Perm bis zum Tertiär ist ziemlich viel Zeit vergangen, nämlich etwa 200 Millionen Jahre. Das ganze Zeitalter der Dinosaurier liegt dazwischen: Aus diesem Zeitabschnitt, aus der späten Jurazeit, stammt der helle Kalkstein, der an den Tschingelhörnern zwischen Flysch und Sandstein liegt.

Es ist selbstverständlich, dass jüngere Gesteine nicht unter älteren abgelagert werden können. Vielmehr müssen die älteren nachträglich über die jüngeren gescho-

ben worden sein. Sie haben dabei eine Strecke von 40 bis 50 km zurückgelegt (Abb. 1.7). Glarner Hauptüberschiebung wird diese Verwerfung genannt, und sie ist nur eine von vielen Überschiebungen der Alpen, die aus einem ganzen Stapel von übereinandergeschobenen Gesteinsdecken bestehen.

Doch so eindeutig diese Überschiebung auch im Gelände zu sehen ist, es dauerte ziemlich lange, bis die Geologen sich mit der Idee anfreundeten, dass so etwas überhaupt möglich sein kann. Das war zu einer Zeit, in der die Theorie der Plattentektonik noch lange nicht erfunden war. Horizontale Bewegungen von solchen Ausmaßen waren noch unvorstellbar, man dachte nur an vertikale Hebungen und Senkungen. Man glaubte früher zum Beispiel, dass die Gebirge durch aus dem Erdinneren aufsteigendes Magma angehoben wurden. Dazu passte, dass man entlang der Zentralachse der Gebirge oft Granite antrifft, also in der Tiefe erstarrtes Magma. Mitte des 19. Jahrhunderts kam dann eine alternative Erklärung auf. Man glaubte, dass die Erde durch Abkühlung schrumpft, und stellte sich die Entstehung der Gebirge ungefähr so vor wie die Runzeln eines verschumpelten Apfels. Die Ozeane sollen durch diese Kontraktion eingebrochene Becken sein.

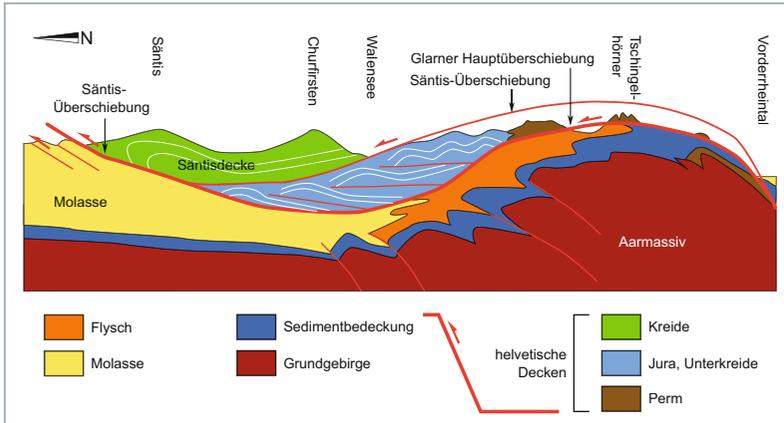


Hans Conrad Escher von der Linth (1767–1823).

Schon vor 200 Jahren malte der Schweizer Universalgelehrte Hans Conrad Escher von der Linth die Tschingelhörner. Wie viele seiner Zeitgenossen beschäftigte sich Escher mit ganz unterschiedlichen Dingen, er arbeitete als Bauingenieur in der Flussbegradigung, war

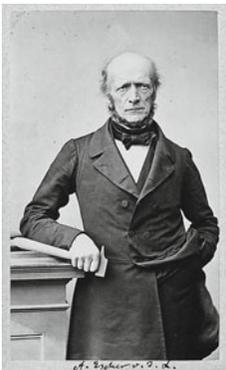


**Abb. 1.6** Der Schnee auf den Spitzen der Tschingelhörner lässt die Glarner Hauptüberschiebung auf diesem Bild deutlich hervortreten.  
Foto: einsiedlerin°acreative.



**Abb. 1.7** In einer späten Phase der Alpenbildung wurden die Sedimente des europäischen Kontinentalrandes von ihrer Basis abgesichert und entlang der Glarner Hauptüberschiebung nach Norden geschoben. Dabei überführten sie tertiären Flysch (der erst während der Gebirgsbildung in der verschwindenden Meeresrinne abgelagert wurde) und die Molasse (den Abtragungsschutt der Alpen). Die Überschiebung wurde durch den anschließenden Aufstieg des Aarmassivs zu einem liegenden S verformt.

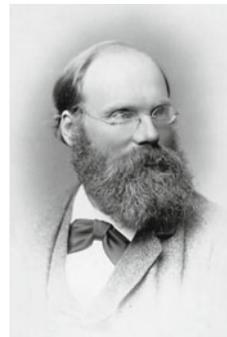
Seidenfabrikant, Kartograf und Maler, Politiker und Geologe in einer Person. Als guter Beobachter wunderte er sich darüber, dass die Grauwacke auch entgegen der damaligen Theorie über Kalkstein liegt. Nach dieser hoben und senkten sich ganze Regionen regelmäßig und wechselten zwischen Meer und Gebirge. Sandsteine, Grauwacken und Konglomerate sind der Abtragungsschutt eines älteren Gebirges, denn aus dem Vorbecken der Alpen können sie schlecht auf die Berggipfel gelangt sein. Escher von der Linth folgerte daraus, dass sie älter sein müssen als die in einem Meer abgelagerten Kalksteine.



Arnold Escher von der Linth (1807-1872).

Hans Conrad Eschers Sohn, Arnold Escher, wurde zum ersten Professor für Geologie in Zürich. Anhand von Fossilien konnte dieser die relativen Alter der Gesteine ermitteln, mit dem eindeutigen Ergebnis, dass an den Tschingelhörnern tatsächlich die älteren Sedimente über den jüngeren liegen. Er ahnte bereits, dass sich die älteren Gesteine über die jüngeren geschoben haben. Er führte seinen britischen Kollegen Sir Roderick Impey Murchison dort hin, und auch dieser war sofort überzeugt, dass es sich um eine enorme Überschiebung handeln musste. Das war 1849. Doch Escher verwarf den revolutionären Gedanken wieder, er hatte Angst, nicht ernst genommen zu werden. Niemand würde ihm abnehmen, dass regelrecht Berge versetzt worden waren, und zwar über enorme Distanzen. Um das Dilemma der verkehrten Altersabfolge zu erklären, dachte er sich eine merkwürdig geformte Doppelfalte aus, die sich jeder Vorstellung

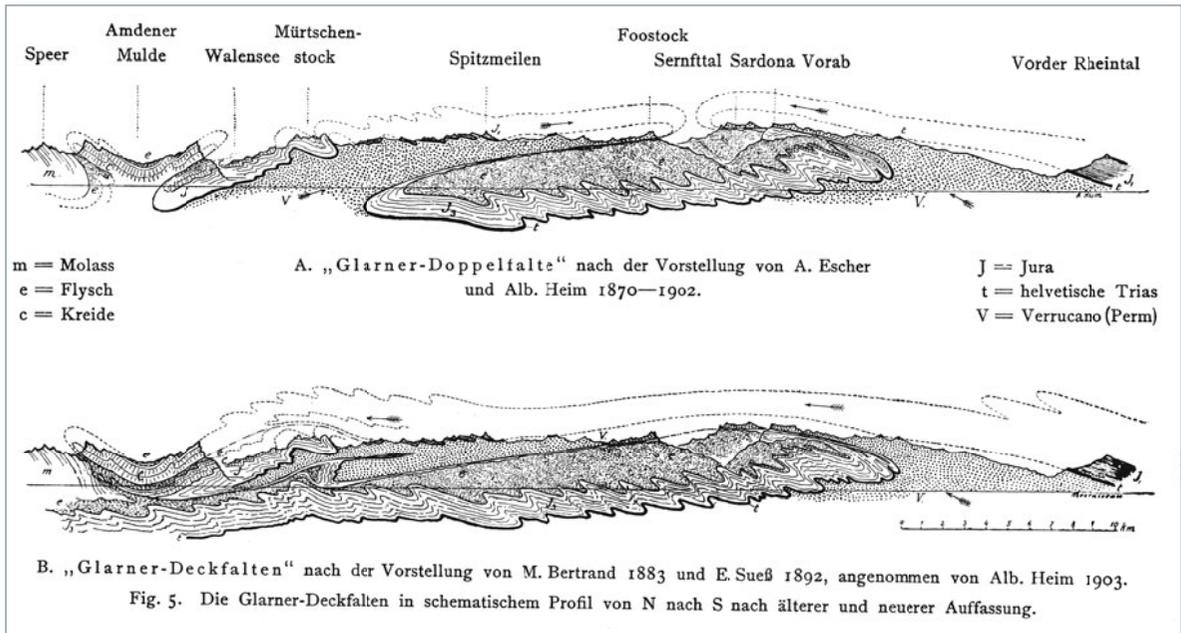
und Mechanik widersetzte. Sein Nachfolger Albert Heim übernahm diese Vorstellung und fertigte hervorragende Zeichnungen davon an (Abb. 1.9). Erst ein halbes Jahrhundert später konnte sich die Idee der Deckenüberschiebungen durchsetzen, die Lorbeer haben sich jedoch andere als die Schweizer verdient. Neben Österreichern, die das Tauernfenster entdeckten, war das vor allem der Franzose Marcel Bertrand, der die Puzzleteile zusammensetzte, den Österreichern ihr Tauernfenster erklärte und die „unerhörte



Albert Heim (1849-1937).



**Abb. 1.8** Das Aquarell mit dem Titel „Das Martinsloch“ von Hans Conrad Escher von der Linth aus dem Jahr 1812 zeigt die Glarner Hauptüberschiebung an den Tschingelhörnern.



**Abb. 1.9** Zeichnung von Albert Heim: Oben die „Glarner Doppelfalte“, wie sie von Arnold Escher vorgeschlagen wurde. Sie sollte das Rätsel der verkehrten Altersabfolge ohne Überschiebung lösen. Unten: Die Neuinterpretation von Marcel Bertrand als Glarner Hauptüberschiebung. Aus Heim (1921).

Träumerei“ entwickelte, dass die Alpen durch übereinandergeschobene Decken aufgebaut sind.



Eduard Suess (1831–1914).

Als geologisches Fenster wird ein Gebiet bezeichnet, in dem in die obere Gesteinsdecke sozusagen ein Loch erodiert worden ist, in dem die tiefer gelegenen Decken an der Oberfläche zutage treten. Die Hohen Tauern und die Zillertaler Alpen bilden zusammen ein derartiges Fenster. Aufgrund seiner rechteckigen Form erinnert es tatsächlich an einen Fensterrahmen, durch den man in die tieferen Decken hineinschauen kann. Diese tieferen Decken bestehen im Tauernfenster aus Gesteinen, die einst im Tiefseebecken des durch die Gebirgsbildung verschwundenen Penninischen Ozeans lagen, während die oberen, darüber geschobenen Decken einmal den Rand des Kontinents südlich des Ozeans gebildet hatten.

Eine Klippe ist in der Geologie das Gegenstück zu einem Fenster. Hier sind die oberen Decken weitgehend weg erodiert, sodass von ihr nur noch einzelne, frei stehende Reste übrig sind. Die ersten Klippen, die als solche erkannt wurden, sind in den Westschweizer Préalpes.

Dort liegen Gesteine aus dem Tiefseebecken über dem ehemaligen Rand der europäischen Kontinentalkruste. Gefunden hat diese Klippen der Schweizer Geologe Hans Schardt, dem auffiel, dass diese Gesteine zu heute nur viel weiter südlich vorkommenden Gesteinen passen. Der Name Klippe rührt daher, dass der Luzerner Geologe Franz Joseph Kaufmann 1876 noch glaubte, dass solche Gesteinsmassen als felsige Inseln, also Klippen, aus dem Meer ragten, in welchem die umliegenden Gesteine abgelagert wurden.



Marcel Bertrand (1847–1907).

Marcel Bertrand schließlich war durch ein wegweisendes Buch des österreichischen Geologen Eduard Suess auf die richtige Spur gekommen. Suess stellte in seinem 1875 erschienenen Werk „Die Entstehung der Alpen“ fest, dass horizontale Bewegungen durch eine seitliche Einengung einen größeren Einfluss bei der Bildung von Gebirgsketten hatten als vertikale Hebungen durch eine aus dem Erdinneren wirkende Kraft. Die Kontraktionstheorie mit dem verschrumpten Apfel war gerade erst angekommen, und sie sollte den Mechanismus dafür liefern.

Suess dachte dabei zunächst eher an Falten. Wenn es horizontale Bewegungen gibt, führte Bertrand den Gedanken weiter, dann sind auch Überschiebungen möglich.

In einem Artikel aus dem Jahr 1884 übertrug Bertrand diese Vorstellung zunächst auf die Glarner Hauptüberschiebung. Ohne jemals im Glarner Land gewesen zu sein, zeigte er, dass eine Überschiebung die dortigen Strukturen viel besser erklärt als die wirre Idee der Doppelfalte, an der Albert Heim, der „Papst“ der Schweizer Geologie, jedoch weiterhin stur festhielt. Bertrand und mehrere Franzosen und Österreicher, unter ihnen Eduard Suess, entwickelten daraus die Theorie, dass die Alpen aus übereinander liegenden Decken aufgebaut sind, aus mächtigen Gesteinspaketen, die sich übereinandergeschoben hatten. Wenig später wurden auch in Schottland und Skandinavien ähnliche Decken des uralten kaledonischen Gebirges beschrieben. Dieselbe Struktur fand man darauf hin auch in anderen Gebirgen immer wieder – Bertrand war dem Aufbau fast aller Hochgebirge auf der Spur.

Stoßen zwei Kontinente zusammen, versucht der eine den anderen zu überfahren. Da aber nicht einfach zwei Kontinente übereinandergeschoben werden können, bildet sich ein ganzes System von Überschiebungen, an denen einzelne Decken abgeschert werden und sich über die unter ihnen liegenden Gesteine bewegen. Die einzelnen Decken können enorme Strecken zurückgelegt haben. Typisch sind Dutzende von Kilometern, manche sind aber sogar um weit über hundert Kilometer verschoben worden. Durch das Übereinanderstapeln wird eine deutliche Verkürzung der betroffenen Kruste erreicht, was natürlich mit einer gleichzeitigen Verdickung einhergeht. Ganz oben liegt nun der in Decken zerlegte Rand des einen Kontinents, in der Mitte die in Decken zerlegten Reste des zwischen beiden Kontinenten verschwundenen Ozeans und darunter die in Decken zerlegten Sedimente des anderen Kontinents. Unter dem Deckenstapel liegt, was vom Rand dieses Kontinents noch mehr oder weniger an Ort und Stelle ist. Die Überschiebungen dieser Decken fanden tief unter der Erdoberfläche statt. Der Aufstieg zu einem Gebirge folgt erst später, er ist ein Effekt des ausgleichenden Auftriebs, den die verdickte Kruste erfährt (Abschnitt 3.3).

Da nicht Falten, sondern der Deckenbau die entscheidende Struktur sind, sprechen viele Geologen heute lieber von „Deckengebirge“ als von „Faltengebirge“. Beim Wort „aufgedeckt“ würde natürlich jeder mit dem Kopf schütteln, anstatt an Deckenüberschiebungen zu denken. Um nicht ausgelacht zu werden, bleiben die Geologen also weiterhin bei der Formulierung, dass ein Gebirge „aufgefaltet“ wurde.

Auch wenn ein Franzose auf die Idee mit dem Deckenstapel gekommen ist, etwas später haben auch Schweizer wie Hans Schardt und Emile Argand zum Verständnis des Deckenbaus der Alpen beigetragen. Nachträglich hat die Schweiz ihre Lorbeeren noch auf eine ganz andere Art bekommen: Die Glarner Hauptüberschiebung wurde von der UNESCO in den Rang eines WeltNaturerbes erhoben. Nicht nur, weil sich hier Generationen von Geologen die Köpfe zerbrachen, sondern auch, weil hier eine Überschiebung so gut zu sehen ist wie kaum an einem anderen Ort: von der „Wurzelzone“ der Decke bis zu ihrer „Stirn“. Grund genug, noch einmal genauer hinzuschauen.

Der junge Flysch liegt noch immer dort, wo er auf dem nahezu unbewegten Teil Europas abgelagert worden ist. Der helle Kalkstein direkt unter der Hauptüberschiebung war vermutlich schon etwas früher von seiner Basis abgeschert worden. Während der Überschiebung wurde dieses Gesteinspaket mitgerissen und rutschte ein Stück weit über den Flysch. Etwas nördlich der Tschingelhörner hört dieses Gesteinspaket aber schon wieder auf, den Kalkstein gibt es dort nur noch als ein bis zwei Meter dünnes, stark deformiertes Band, das die Hauptverwerfung markiert. Auch an den Tschingelhörnern ist der an die Überschiebung grenzende oberste Meter des Kalksteins stark deformiert.

Die permischen Grauwacken über der Verwerfung sind Teil einer Decke von Sedimenten, die einmal als dicker Stapel auf dem europäischen Schelf lagen, dem von einem flachen Meer überfluteten Rand des Kontinents. Sie kommen aus einem Gebiet, das einmal südlich des Vorderrheintales lag und durch die Gebirgsbildung in der Tiefe verschwunden ist. Dort wurden sie von ihrem Untergrund abgeschert und nach Norden überschoben. Über den permischen Sedimenten lagen natürlich auch einmal jüngere Sedimente, ein mächtiger Stapel mit Kalksteinen aus dem Mesozoikum, die wiederum abgeschert und als weitere Decken verschoben wurden. Stellenweise liegen diese Decken noch heute über der Glarner Decke, sie sind vor allem nördlich des Walensees bis zum Alpenrand zu finden. Die Decken aus Sedimenten, die einmal auf dem europäischen Schelf lagen, sind in den Alpen die unterste Einheit des Deckenstapels, sie werden als helvetische Decken zusammengefasst. Über den helvetischen Decken liegen noch andere Deckensysteme, auf die ich später eingehen werde (Kapitel 8).

Die Glarner Hauptüberschiebung trennt also den unbewegten Rand Europas vom helvetischen Deckenstapel. Im Profil sieht sie aus wie ein liegendes S. Sie taucht steil aus dem Vorderrheintal auf, steigt bis auf über 3000 m Höhe an und senkt sich dann wieder, bis sie unter der Erdoberfläche verschwindet. Sie taucht tief

unter dem Walensee hindurch, und kommt erst am Nordrand der Alpen unter dem Säntis noch einmal unter den anderen helvetischen Decken hervor. Die S-Form ist erst eine spätere Struktur, ursprünglich war die Überschiebung eine leicht aufwärts führende Rampe. Während des Transports wird so eine Decke natürlich auch inneren Spannungen ausgesetzt, vor allem ganz vorne, an ihrer Stirn. Dort finden wir die meisten Falten, die es in einem Deckengebirge durchaus auch gibt.

Aber wie können überhaupt diese Decken über solche Entfernungen bewegt werden, entlang einer messerscharfen Linie, ohne dabei zu zerbrechen? Hier spielt der stark deformierte Kalkstein an der Basis der Glarner Hauptüberschiebung eine Rolle. Die gesamte Bewegung war auf diesen Kalkstein beschränkt, der als eine Art Schmiermittel wirkte. Untersuchungen an diesem Kalkstein ergaben, dass dieser unter Temperaturen um 350 °C verformt wurde (Ebert et al. 2007), unter Bedingungen, bei denen er sich plastisch verhielt, also fast wie Knetmasse verformt werden konnte. In der entsprechenden Tiefe von etwas über 10 km bildete sich somit auch die Verwerfung, die wir heute an der Oberfläche sehen können.

Mit den Alpen haben wir uns gleich an ein besonders kompliziert aufgebautes Gebirge gewagt. Wir sollten uns jetzt lieber erst einfachere Beispiele anschauen, bevor wir in Kapitel 8 hierher zurückkommen. Als Erstes brauchen wir aber noch die wichtigsten Grundlagen. Zunächst wollen wir die heiße Spur aufnehmen, dass Gesteine plastisch verformbar sein können. Schließlich widerspricht das unserer alltäglichen Erfahrung.

## 1.2 Gestein und Knete

Wenn es etwas gibt, das fest und steinhart ist, dann doch wohl ein Stein. Wenn wir einen in die Hand nehmen, können wir uns kaum vorstellen, dass dieser verformbar sein soll oder gar als Schmiermittel dienen könnte. Es ist kein Problem, einen Stein mit einem Hammer in zwei Teile zu zerschlagen. Aber verformen, wie ein Stück Knetmasse?

Ganz so weich wie Knetmasse sind sie natürlich nicht, aber der Vergleich ist gar nicht so falsch, wenn es nur heiß genug ist. Wir müssen uns jedenfalls von der Vorstellung von harten und unverformbaren Steinen verabschieden.

Nicht alle Gesteine sind gleich gut verformbar, prinzipiell sind sie jedoch bei höherer Temperatur und damit in größerer Tiefe „weicher“ als an der kühlen Oberfläche. Daher führen oberflächennahe Bewegungen

eher zum Bruch als Bewegungen in der Tiefe. Beispielsweise reicht bei quarzreichen Gesteinen, die typisch für die Erdkruste sind, eine Temperatur von etwa 300 °C aus. Die Gesteine des Erdmantels sind bei Temperaturen über 600 °C immer noch steinhart. Salz ist schon bei niedriger Temperatur so leicht verformbar, dass es zu fließen beginnt und allein wegen des Dichteunterschiedes zum überlagernden Gestein als Salzstock aufsteigt. Wenn dieser Salzstock oder auch ein flüssiger Granit aufsteigt, dann schiebt er mühelos die Gesteine der Umgebung zur Seite. Das bedeutet, dass auch diese elastisch genug sein müssen, um auszuweichen.

Ein weiterer Faktor ist die Geschwindigkeit, mit der die Verformung stattfindet. Eine schnelle Verformung führt eher zum Bruch als eine sehr langsame. Schnelle Verformungen können sehr dramatisch sein, wie es von Erdbeben eindrucksvoll gezeigt wird. Erdbeben beschränken sich weitgehend auf den kühlen und daher starren Teil der Erde. Vor einem Erdbeben haben sich Spannungen aufgebaut, indem die Gesteine elastisch verbogen wurden, soweit dies eben bei Gesteinen möglich ist. Elastisch bedeutet, dass sie sich folgenlos wieder zurückbiegen würden, wenn die Spannung verschwinden sollte: wie bei Gummi. Sobald die Spannung zu groß wird, bilden sich in Sekundenbruchteilen Risse. Plötzlich wird die elastische Verformungsenergie in Bewegung umgesetzt. Bei großen Erdbeben kann es auf einen Schlag zu Versetzungen um einige Meter kommen. Die ausgelösten Schockwellen breiten sich in alle Richtungen aus und können noch weit vom Epizentrum entfernt Häuser einstürzen lassen.

Ob ein Gestein unter einer bestimmten Spannung zerbricht, hängt von seinen mechanischen Eigenschaften ab. Diese ergeben sich zunächst aus den Eigenschaften der Minerale, aus denen es zusammengesetzt ist, aber auch daraus, wie diese Minerale im Gestein angeordnet sind und ob bereits kleine Risse vorhanden sind. Auch der Druck und eventuell in den Gesteinsporen enthaltenes Wasser spielen eine Rolle. All diese Faktoren bestimmen die Scherfestigkeit des Gesteins. Das Gestein hält eine Spannung aus, solange die Scherfestigkeit größer ist als die auf das Gestein wirkende Spannung. Ist die Spannung zu groß, zerbricht das Gestein.

Um zu beobachten, was beim Zerbrechen eines Gesteins passiert, haben Forscher einen Zylinder aus möglichst perfektem, homogenem Gestein in eine hydraulische Presse eingeklemmt. Zunächst wird das Gestein elastisch zusammengedrückt, allerdings so wenig, dass wir es gar nicht sehen können. Sobald der Druck der Presse zu groß ist, zerbricht das Gestein. Mit diesem Experiment lässt sich die Scherfestigkeit eines Gesteins ermitteln. Dabei können wir auch den Einfluss testen, den in den Poren des Gesteins vorhandenes Was-



**Abb. 1.10** Die 1773 von einem Erdbeben zerstörte Barockkirche El Carmen in Antigua (Guatemala). Bis zum Erdbeben war Antigua eine der wichtigsten spanischen Kolonialstädte.

ser hat. Ein wassergesättigter Tonstein hält nur einen winzigen Bruchteil der Spannung aus, den ein trockener Tonstein erträgt. Das liegt daran, dass der Wasserdruck in den Poren gegen das Gestein wirkt und die Bildung von Rissen begünstigt. Aus diesem Grund haben wir Menschen schon versehentlich Erdbeben ausgelöst, wenn wir mit dem Bau eines Staudamms oder bei einer Bohrung den Wasserdruck im Gestein so stark erhöht haben, dass das Gestein die bereits vorhandene Spannung nicht mehr aushalten konnte.

Ob trocken oder nass, das Zerbrechen beginnt mit mikroskopisch kleinen, im Gestein verteilten Rissen, die sich ausdehnen und mit anderen zu durchgehenden Brüchen verbinden. Entlang der Brüche kommt es zu einer Bewegung, sodass der obere und untere Bereich des Zylinders zusammengeschoben werden, während die Seiten nach links und rechts ausweichen. Das Ergebnis sind zwei Bruchsysteme, die sich wie ein X in einem Winkel von ungefähr  $60^\circ$  kreuzen, wobei die Spannung entlang der senkrechten Linie zwischen den beiden Schenkeln gewirkt hat. Es ist erstaunlich, wie oft man in der Natur Brüche findet, die sich in einem Winkel von etwa  $60^\circ$  schneiden (Abb. 1.11). Da die Brüche fast immer als Paar auftreten, spricht man von konjugierten Brüchen.

Bei unserem ersten Experiment haben wir ein Gestein in die Presse gestellt, dessen mechanische Eigenschaften in alle Richtungen gleich waren. Wenn wir stattdessen einen Schiefer oder einen Gneis nehmen, in denen die Minerale in eine bestimmte Richtung eingeregelt sind, dann zerbricht der Steinzylinder entlang der vorhandenen Schieferung oder (wie man bei einem Gneis sagt) Foliation. Die Spannungsrichtungen kann man dann nicht mehr so einfach aus den Bruchstücken

rekonstruieren, wie das im homogenen Gestein der Fall war.

Eine Verwerfung ist nichts anderes, als ein solcher Bruch in einem größeren Maßstab. Die Gleitflächen einer Verwerfung sind oft regelrecht poliert, manchmal fühlen sie sich in die Bewegungsrichtung glatter an. Geologen streicheln gerne einmal eine Verwerfung, da sie dabei mit etwas Glück die Bewegungsrichtung herausfinden können. Manchmal wachsen auf der Gleitfläche auch in Bewegungsrichtung orientierte faserige Minerale. Wenn es bei einem besonders großen Erdbeben zu einer plötzlichen, schnellen Bewegung kommt, kann das Gestein entlang der Verwerfung sogar aufgeschmolzen werden. Es erstarrt dann als ein dünner Streifen aus schwarzem Gesteinsglas. Nahe der Erdoberfläche wird das Gestein auf der Bewegungsbahn mit der Zeit zu Mehl zermahlen. Das zerbrochene Material wird Stö-



**Abb. 1.11** Kluftnetz innerhalb einer aufgebrochenen Falte. Die beiden Kluftscharen schließen einen Winkel von etwa  $60^\circ$  ein. Makhtesh Ramon, Israel.

rungsbrekzie oder Kataklasit genannt, es wirkt in der Verwerfung fast wie ein Kugellager. Je leichter eine vorhandene Verwerfung bewegt werden kann, desto seltener und unbedeutender sind die ausgelösten Erdbeben.

Da heiße Gesteine plastisch verformt werden können, ist der Bewegungsmechanismus in der Tiefe ein anderer als nahe der Erdoberfläche. Manche Geologen beschäftigen sich mit der Rheologie, also dem Fließverhalten von Gesteinen, und behandeln diese wie eine besonders zähe Flüssigkeit. Die Verformbarkeit von Gesteinen geht sogar so weit, dass ganze Gebirge auseinanderfließen können wie eine Sahnetorte in der Sonne. Ob beim Zerfließen eines ganzen Gebirges oder beim Aufstieg eines Salzstocks, ob in der Kalksteinschicht der Glarner Verwerfung oder bei den Konvektionen im Erdmantel, bei all diesen Prozessen passiert im kleinen Maßstab in etwa dasselbe.

Als Erstes wird man vermuten, dass die plastische Verformung entlang der Korngrenzen der gesteinsbildenden Minerale erfolgt. In feinkörnigen Gesteinen funktioniert dies bei hoher Temperatur tatsächlich so gut, dass von Superplastizität gesprochen wird. Aber auch in diesem Fall müssen die Mineralkörner selbst verformt werden können, da sich ihre Ecken und Kanten während des Gleitens gegenseitig in die Quere kommen. In einem grobkörnigen Gestein hat das Korngrenzengleiten nur eine geringe Bedeutung. Blättchenförmige und nadelige Minerale sind eine Ausnahme, sobald sie im Gestein optimal orientiert sind, nämlich parallel zur Bewegungsrichtung liegen. Dabei hilft, dass jede Scherbewegung im Gestein diese Kristalle langsam in die optimale Lage rotiert. In der Regel spielen Verformungen innerhalb der Kristalle die größte Rolle. Zoomen wir also in den atomaren Maßstab hinein.

Kristalle können nicht in beliebige Richtungen zerbrochen oder verformt werden, da sie anisotrop sind: Ihre physikalischen Eigenschaften sind von der Richtung abhängig. Das liegt daran, dass ihre Atome nicht chaotisch verteilt sind, sondern in einem Kristallgitter, das aus verschiedenen Richtungen betrachtet ganz unterschiedlich aussieht. Im Kristallgitter sind die Atome an fixen Positionen angeordnet, an denen nicht zu rütteln ist. Da das Gitter so gut wie unverformbar ist, muss es auf die eine oder andere Weise auf die kleinste Deformation reagieren. Bei Salz ist die Bindungsenergie zwischen den Ionen ( $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$ ) vergleichsweise gering. Innerhalb eines Salzkristalls ist daher ein Gleiten entlang der vom Kristallgitter vorgegebenen Flächen möglich. Für einen Moment muss die Energie aufgebracht werden, die Bindungen auf dieser Ebene zu überwinden, aber im nächsten Moment sieht das Gitter wieder aus wie vorher. Während es im Salzkristall drei Ebenen gibt, auf denen ein solches Gleiten schon mit

geringem Energieaufwand möglich ist, gibt es beispielsweise bei Glimmer nur eine. Dabei handelt es sich um die dunklen oder hellen blättchenförmigen Minerale in einem Granit, Gneis oder Glimmerschiefer. Die Bindungsenergie zwischen den einzelnen Schichten innerhalb der Blättchen ist relativ gering, und sie können gegeneinander verschoben werden. Ein anderer Winkel ist nicht möglich, da die Bindung innerhalb der Schichten sehr stark ist.

Bei anderen Kristallen ist die Bindungsenergie innerhalb des Kristallgitters für eine komplette Verschiebung entlang einer Gitterebene zu groß. Allerdings ist kein Kristall wirklich perfekt, er enthält Fehler wie Fehlstellen (ein Punkt im Gitter ist einfach nicht besetzt), Versetzungen (das Gitter ist verbogen, weil es an einer Stelle mit einem falschen Punkt verbunden ist) und Verunreinigungen. Diese Fehler können durch den Kristall wandern, wenn die Temperatur für diese Festkörperdiffusion hoch genug ist. Dies ist möglich, da die Energie nur dafür ausreichen muss, die Bindungen an einem einzigen Punkt zu überwinden. Dieses Wandern von Fehlern führt ebenfalls zu einem langsamen Gleiten entlang von Gitterebenen, nur dass dies nicht mehr gleichzeitig auf der gesamten Ebene passiert, sondern sich langsam Punkt für Punkt fortpflanzt. Je höher die Temperatur, desto schneller können die Fehler durch das Kristallgitter wandern und damit den Kristall verformen.

Eine weitere Möglichkeit, einen Kristall zu verformen, ist die Bildung von Zwillingen. So werden Bereiche in einem Kristall genannt, in dem das Kristallgitter gedreht oder gespiegelt ist, beispielsweise zeigt eine Kristallachse in einen Bereich schräg nach links, im anderen Bereich schräg nach rechts. Nicht alle Minerale können Zwillinge bilden. Bei Kalzit und Plagioklas passiert das unter Spannung schnell, unter dem Mikroskop sind die Zwillinge als dünne Lamellen sichtbar. Diese können durch den Kristall wandern und diesen dadurch verformen, was als Zwillingsgleiten bezeichnet wird. Kalzit und Plagioklas sind wichtige gesteinsbildende Minerale, Kalkstein besteht fast nur aus Kalzit, während Plagioklas (ein Feldspat) ein Bestandteil vieler magmatischer und metamorpher Gesteine ist.

Grenzen zwei Körner desselben Minerals aneinander, gibt es eine weitere Möglichkeit: Das energetisch günstiger gelegene Korn wächst auf Kosten seines Nachbarn. Kristalle, deren Kristallgitter ungünstig im Spannungsfeld orientiert ist, können dadurch verschwinden, während günstig orientierte Kristalle bevorzugt werden. Bilden sich durch chemische Reaktionen neue Minerale, so wachsen diese von Anfang an in der energetisch günstigsten Orientierung. Sowohl die Verformung eines Gesteins als auch die metamorphe Umwandlung zu einem anderen Gestein (Abschnitt 2.2) führen also zu



**Abb. 1.12** Ein Faltensattel in weichen Schichten aus Salz und Tonstein bei San Pedro de Atacama, Chile. Die Falte taucht in Blickrichtung ab.

einer bevorzugten Anordnung von Mineralen, die der einwirkenden Spannung angepasst ist. In einem Glimmerschiefer sind die Glimmer parallel angeordnet. Ein solches Gestein ist natürlich leichter zu verformen als eines, bei dem die Minerale regellos angeordnet sind, weil die parallel liegenden Glimmer unzählige Gleitebenen bilden. Nicht alle Minerale müssen bei der Verformung mitmachen. Dem harten Granat in einem Glimmerschiefer passiert relativ wenig, weil die Verformung der Glimmer ausreicht. Er wird höchstens durch die Bewegung rotiert.

Die Prozesse innerhalb der Kristalle laufen relativ langsam ab. Viel schneller wird die Verformung, wenn Wasser in den Ritzen zwischen den Kristallen vorhanden ist, das die Kristalle anlösen kann. Die Seiten des Kristalls, auf die unter Spannung gedrückt wird, sind energetisch ungünstig gelegen und werden bevorzugt gelöst. Die gelösten Ionen diffundieren durch das Wasser und werden an den energetisch günstigen Seiten wieder in den Kristall eingebaut. Durch Drucklösung können beispielsweise Quarzkörnchen zu dünnen Scheiben verformt werden, wie in manchen besonders stark beanspruchten Gesteinen zu sehen ist. Ungünstig orientierte Kristalle können auf diese Weise auch schnell verschwinden. Auch dieser Prozess ist abhängig von der Temperatur, da diese einen Einfluss auf die Löslichkeit und die Diffusionsgeschwindigkeit hat.

All diese Prozesse laufen bei der Verformung gleichzeitig ab, je nach den Bedingungen hat der eine oder der andere einen größeren Anteil.

Die Verformung kann in einem großen Gesteinskörper stattfinden oder sich auf eine schmale Zone konzentrieren. Sie kann auch in kleinem Maßstab ihre Rich-

tung ändern, beispielsweise sind Schieferungsflächen innerhalb einer Falte oft fächerförmig angeordnet, weil in den Faltenschenkeln eine andere Spannung herrscht als am Faltenscheitel. Verteilt sich die Verformung auf einen großen Gesteinskörper, muss jedes einzelne Mineralkorn weniger stark reagieren, als es in einer Verwerfung der Fall ist. Da sich ein Gestein durch Verformung den Spannungen anpasst und stark verformte Gesteine leichter zu bewegen sind, konzentriert sich die Bewegung in der Regel trotzdem auf eine schmale Scherzone. Bei einer starken Verformung wird zusätzlich Wärme produziert, was wiederum die Bewegung erleichtert.

Ein Gestein, das in einer Verwerfung unter plastischen Bedingungen extrem zerschert wurde, wird Mylonit genannt. Wir können den Kalkstein der Glarner Hauptüberschiebung so nennen. Ein Mylonit ist ein extrem feinkörniges Gestein mit optimal ausgerichteten Mineralkörnern. Oft sind darin Minerale, die normalerweise gar nicht optimale Formen haben, linsenförmig verformt. In diesem Gestein laufen alle Prozesse gleichzeitig ab: das Gleiten entlang der Korngrenzen, Zwillingsbildung, Diffusion von Gitterfehlern und Drucklösung. Mylonite sind bei niedriger Temperatur oft erstaunlich fest und lassen sich nur schwer erodieren. Sie können ganz verschieden aussehen, je nachdem, aus welchem Ausgangsgestein sie hervorgegangen sind. Manchmal sind sie hell und fein gestreift, manchmal dunkel.

Die Temperatur, ab der sich ein Gestein plastisch verhält, ist von Gestein zu Gestein verschieden. Oder anders herum, bei einer bestimmten Temperatur sind verschiedene Gesteine unterschiedlich plastisch oder unterschiedlich kompetent (wie ihre Festigkeit gegenüber der



**Abb. 1.13** Eine Wechsellagerung unterschiedlich kompetenter Schichten wird unter Einengung verformt. Diese schönen Falten in Flysch (Wechsellagerung von Sand- und Tonstein) finden sich im Engadiner Fenster in Österreich, die Orangefärbung kommt durch auf dem Gestein wachsende Flechten.

Verformung genannt wird). Wenn eine Wechsellagerung unterschiedlicher Sedimente einer Spannung ausgesetzt wird, macht sich dies besonders bemerkbar. Oft ist zu sehen, wie die Schichten eines festeren, kompetenten Gesteins in wilde Falten gelegt wurden (Abb. 1.12, 1.13), während das weniger kompetente Gestein um diese Falten herumgeflossen ist.

Wird dieselbe Abfolge stattdessen gedehnt, zerbricht das kompetente Gestein, das plastische fließt in die entstandenen Lücken und wird ansonsten einfach wie Gummi auseinandergezogen. Das Ergebnis sieht im Anschnitt aus wie eine Kette aneinanderhängender Würstchen. Kreative Geologen haben das Zerreißen der kompetenten Schicht daher Boudinage getauft, was frei übersetzt „verwurstet“ heißt (Abb. 1.14).

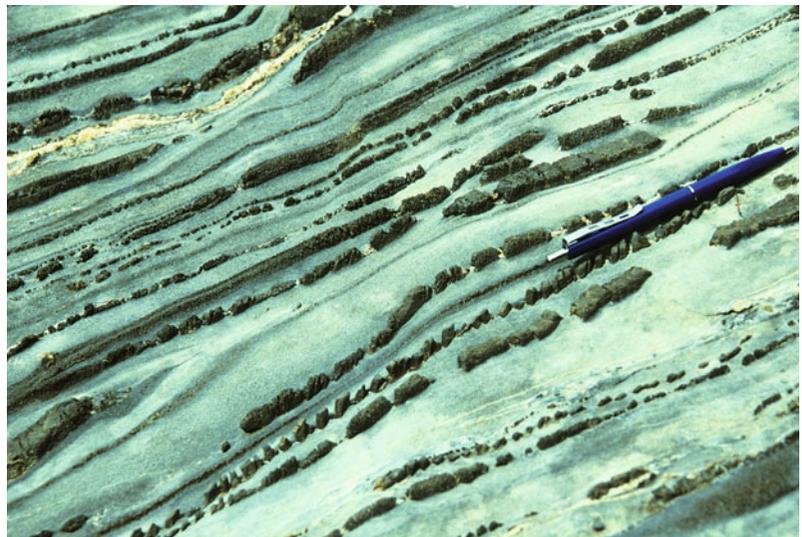
### 1.3 Verwerfungen und Klüfte

Wir haben ohne weitere Erklärung Druck und Spannung unterschieden, obwohl beide natürlich miteinander zu tun haben. Der mit der Tiefe zunehmende Druck des umgebenen Gesteins wirkt von allen Richtungen gleich stark, so wie der Wasserdruck von allen Richtungen auf einen Taucher einwirkt. Dieser Druck führt daher auch nicht zu einer Verformung des Gesteins. Die Spannung ist eine zusätzliche Komponente, die gerichtet ist und zu dem gleichförmig wirkenden Umgebungsdruck hinzukommt.

Was auf einen Punkt im Gestein an Druck und Spannung einwirkt, kann durch drei senkrecht aufeinander stehende Vektoren beschrieben werden, die wir

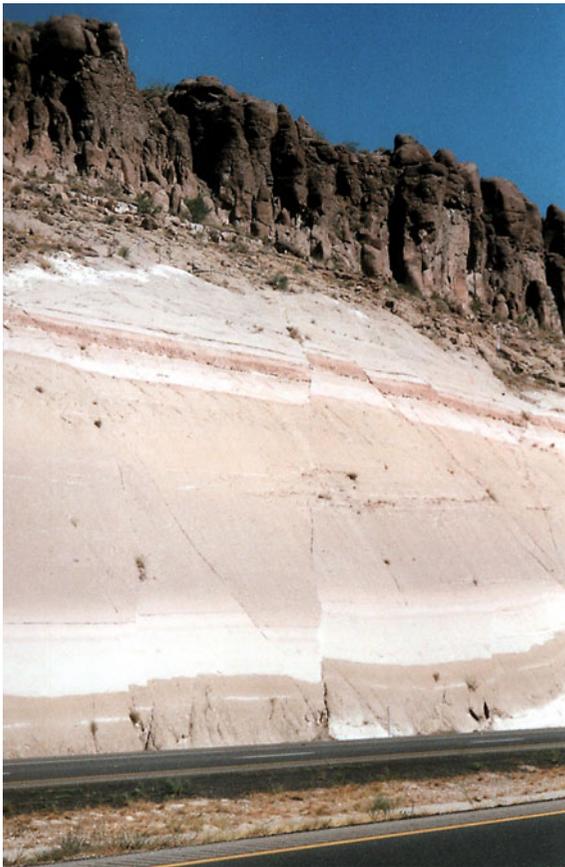
**Abb. 1.14** Boudinage im kleinen Maßstab. Durch die Hitze eines in der Nähe aufsteigenden Granits wurde eine Wechsellagerung von Kalkstein und Tonstein zu Marmor und Hornfels umgewandelt (Kontaktmetamorphose).

Der Hornfels verhielt sich daraufhin kompetenter („fester“) und ist durch leichte Dehnung zu winzigen Boudins zerrissen. Der Marmor ist plastisch in die Lücken geflossen. Adamello, italienische Alpen.



die drei Hauptspannungsrichtungen nennen (Abb. 1.16). In eine Richtung wird das Gestein besonders stark zusammengedrückt, in eine Richtung senkrecht dazu am wenigsten. Der Betrag des dritten Vektors liegt irgendwo dazwischen. Falls alle Vektoren denselben Betrag haben, wirkt nur der Umgebungsdruck, es gibt keine Spannung und daher auch keine Verformung. Je größer der Unterschied zwischen dem größten und dem kleinsten Vektor, desto größer die Spannung, die ein Gestein verformt. Diese Spannung wirkt sich je nach Orientierung und den Vektorbeträgen als Kompression oder Dehnung aus.

Wie unterschiedlich die Beträge sind und in welche Richtung der größte Vektor zeigt, ob er senkrecht zur Erdoberfläche steht, waagrecht liegt, oder einen schrägen Winkel hat, hängt von den Umständen ab – von kollidierenden Platten, in der Tiefe aufsteigendem Magma oder einem aus der Ferne drückenden Gebirge. Ja sogar die Geometrie mehr oder weniger starrer Gesteinsschichten, die Beweglichkeit bereits vorhandener Verwerfungen und selbst die Form der Berghänge wirken



**Abb. 1.15** Verwerfungen mit kleinem Versatz in einem Tuff in einem Straßenanschnitt in Arizona.

sich im kleineren Maßstab darauf aus. Wir können von einem durch all diese Faktoren hervorgerufenen Spannungsfeld sprechen und uns dies so ähnlich wie ein Magnetfeld vorstellen. Dieses Spannungsfeld kann zur Bildung von Verwerfungen führen, wenn die Spannung die Festigkeit der Gesteine überwindet. Je nachdem, welcher der drei Vektoren senkrecht zur Erdoberfläche steht, ist das Ergebnis eine Abschiebung, eine Aufschiebung oder eine Seitenverschiebung.

So wie sich im Experiment im vorherigen Kapitel ein System konjugierter Brüche bildet, bilden sich oft auch konjugierte Verwerfungen. Doch auch wenn sie nicht als Paar auftreten, sobald wir die Bewegungsrichtung der Verwerfung ermitteln konnten, lässt sich leicht ablesen, wie die drei Vektoren zueinanderstanden.

Dazu müssen wir nur das X im Kopf behalten, das sich in dem zusammengepressten Steinzyylinder gebildet hat. Der größte Vektor drückte dabei genau wie die Presse von oben bzw. unten, also entlang einer genau zwischen den Schenkeln des X liegenden senkrechten Linie. Entsprechend wurden die oberen und unteren Bereiche des Zylinders zusammengepresst. Der kleinste Vektor wirkte von rechts bzw. links, der Druck von diesen Seiten war so gering, dass die Seiten des Zylinders in diese Richtung ausweichen konnten. Wir könnten auch sagen, das Gestein wurde in diese Richtung gedehnt. Der dritte Vektor mit mittlerer Länge zeigt senkrecht aus dem X hervor, im Falle des Zylinders hatte dieser etwa denselben Betrag wie der kleinste Vektor.

Die Geometrie eines Grabenbruchs ist ganz ähnlich (vgl. Abschnitt 7.2). Ein Grabenbruch entsteht, wenn die Erdkruste gedehnt wird. Der Graben wird auf beiden Seiten von relativ steilen Abschiebungen begrenzt, entlang derer der mittlere Block absinkt. Diese konjugierten Verwerfungen schließen auch in diesem Fall einen Winkel von etwa  $60^\circ$  ein. Dehnung der Erdkruste bedeutet nichts anderes, als dass der kleinste der drei Vektoren waagrecht liegt und so klein ist, dass die Blöcke zu beiden Seiten gegen diesen ausweichen können. Der größte Vektor wirkt wie bei der Presse senkrecht nach unten. In einem Graben kann es auch zwischen zwei Abschiebungen angehobene Blöcke geben, die als Horst bezeichnet werden (Abb. 1.17).

Bei der Kollision zweier Kontinente (Kapitel 6 und 8) kommt die Einengung von den Seiten, wir müssen das Bild also nur drehen. Diesmal zeigt der kleinste Vektor nach unten. Entsprechend einem um  $90^\circ$  gedrehten X entsteht eine flache Aufschiebung, entlang welcher der obere Block über den unteren Block verschoben wird. Mehrere solche Aufschiebungen können zu einem Deckengebirge wie den Alpen führen. In diesem Fall spricht man häufig von Überschiebungen. Eine in die andere Richtung zeigende konjugierte Verwerfung gibt