



# Modul 3

## Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte

### Begleittext für Lehrkräfte

**Sylke Hlawatsch, Sabine Venke, Andreas Wenzel, Nils Reimann, Horst Bayrhuber, Volker Schenk, Reinhard Fischer und Karin Griewatsch**

Dieser Text steht zusammen mit den Texten der 10 weiteren Module des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ auf der CD-ROM „System Erde“ zur Verfügung. Der Begleittext liegt als Hypertext vor. Bei den Materialien handelt es sich unter anderem um pdf-Dateien, Videos, Interaktionen oder Animationen. Die CD-ROM enthält ein komfortables Navigationssystem mit Suchfunktion.

Mit der CD-ROM können auch eigene Materialien erstellt werden. Außerdem kann aus der CD-ROM eine Schülerversion, die für das selbst organisierte Lernen vorgesehen ist - und keine didaktischen Informationen enthält - erstellt werden.



Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) ist eine interdisziplinär arbeitende Forschungseinrichtung mit überregionaler, gesamtstaatlicher Aufgabenstellung. Auftrag des Instituts ist es, durch seine Forschungen die Pädagogik der Naturwissenschaften weiter zu entwickeln und zu fördern. Das IPN gliedert sich in die vier Fachabteilungen Biologie-, Chemie-, Physikdidaktik und Erziehungswissenschaften (mit Pädagogisch-Psychologischer Methodenlehre). Das IPN ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft. Enge Beziehungen bestehen zur Kieler Universität.

Weitere Informationen: <http://www.ipn.uni-kiel.de>

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte IPN-Projekt „Forschungsdialog: System Erde“ dient dem Ziel, das Verständnis des Planeten Erde zu fördern. Auf der Basis soliden Wissens soll die Beschäftigung und Auseinandersetzung mit der nachhaltigen Entwicklung der Erde angeregt werden. Die Materialien zum Thema „System Erde“ wurden vom IPN in enger Kooperation mit Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern sowie Lehrkräften entwickelt und anschließend im Schulunterricht erprobt und evaluiert. Für den Unterricht in der Sekundarstufe II steht eine umfangreiche CD-ROM zur Verfügung, die u. a. Animationen, Simulationen, Informationstexte und Arbeitsblätter zu insgesamt 11 Modulen des Themas System Erde enthält. Der vorliegende Text ist Teil dieser CD-ROM, die beim IPN erhältlich ist. Für den Unterricht in der Grundschule wurde ein Sachbuch und eine beiliegende CD-ROM mit Computerspielen entwickelt. Unterrichtsmaterialien für die Hand der Lehrkräfte sind im Internet erhältlich (<http://Systemerde.ipn.uni-kiel.de>).

© 2005  
Alle Rechte beim  
Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)  
Olshausenstraße 62, D-24098 Kiel.



### **Forschungsdialog: System Erde**

#### **Kontakt:**

Ulrike Gessner  
Leibniz-Institut für die Pädagogik der  
Naturwissenschaften an der Universität Kiel  
Olshausenstr. 62  
24098 Kiel

Tel: ++49 (0431) 880-3121  
E-Mail: [gessner@ipn.uni-kiel.de](mailto:gessner@ipn.uni-kiel.de)  
<http://systemerde.ipn.uni-kiel.de>

Auf verschiedenen Seiten befinden sich Verweise (Links) auf Internet-Adressen. Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Sollten Sie bei dem angegebenen Inhalt des Anbieters dieser Seite auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

#### **Autoren dieses Moduls:**

Dr. Sylke Hlawatsch (Gesamtkonzeption, Sachanalyse, didaktische Informationen, Bausteine 3 - 10), Sabine Venke (Bausteine 1 - 3, 11, 12), Andreas Wenzel (Baustein 9 mit Sachanalyse), Dr. Nils Reimann (Baustein 5), Prof. Dr. Horst Bayrhuber (Sachanalyse), Prof. Dr. Volker Schenk (Sachanalyse 2.2.4), Dr. Reinhard Fischer (Baustein 10) und Dr. Karin Griewatsch (Baustein 8, Sachanalyse 2.1.4)

#### **Beratung:**

Geowissenschaften: Prof. Dr. Depmeier, IfG Kiel (2.2), Dr. Rainer Milke, GFZ Potsdam (Baustein 11), Dr. Thomas Stachel, University Alberta, USA (Baustein 12)

Schulpraxis: Dr. Hans Dimpfl, Erlangen, Dieter Zielinsky, Toni-Jensen-Gesamtschule, Kiel (Baustein 6 und 7)

#### **Multimediaumsetzung, Grafik und Layout:**

CD-ROM, Rahmenlayout, Grafiken: MMCD GmbH interactive in science (Düsseldorf)

Texte: Anke Heidrich und Päivi Taskinen (IPN)

#### **Herausgeber:**

Prof. Dr. Horst Bayrhuber, Dr. Sylke Hlawatsch



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Zielsetzung und Begründung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Sachinformation</b> .....	<b>4</b>
2.1	Der Kreislauf der Gesteine .....	4
2.1.1	Begriffsklärung: Gestein, Mineral und Kristall .....	5
2.1.2	Die drei Gesteinsgruppen.....	5
2.1.3	Der Kreislauf der Gesteine .....	9
2.1.4	Industrielle Anwendung von Mineralen, Gesteinen und anderen Festkörpern - vom Faustkeil zur Solarzelle .....	10
2.2	Stein unter Druck.....	11
2.2.1	Aus Sand wird Stein .....	13
2.2.2	Umwandlung.....	14
2.2.3	Schmelzende Steine .....	17
2.2.4	Die Schalen der Erde: Mineralogie eines chemisch differenzierten Planeten. ....	19
<b>3</b>	<b>Didaktische Information</b> .....	<b>22</b>
3.1	Lernziele .....	22
3.2	Hinweise zu den Lernvoraussetzungen .....	24
3.3	Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen .....	24
3.4	Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien.....	26
<b>4</b>	<b>Vorschläge für den Unterrichtsverlauf</b> .....	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>Unterrichtsmaterialien</b> .....	<b>311</b>

### Anhang:

#### Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Einstieg in das Thema „Steine“

Baustein 2: Unterscheidung Gestein - Mineral

Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen

Baustein 4: Erarbeitung des Kreislaufkonzeptes am Computer

Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

Baustein 6: Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf (Bausteine 3 bis 5)

Baustein 7: Experteninterviews (inkl. Erläuterungen zum Anlegen einer Gesteinssammlung)

Baustein 8: Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen - Gruppenpuzzle

Baustein 9: Stein unter Druck – Kreislauf des Glimmerminerals Biotit

Baustein 10: Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Kruste – Kristallisation von Schmelzen

Baustein 11: Metamorphose – Thermochromie und isochemische Umwandlung unter Druck

Baustein 12: Diamanten erzählen eine heiße Geschichte

## 1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung

Jedes Gestein weist eine typische Anordnung und Zusammensetzung der Minerale, Gesteinsbruchstücke oder organischen Komponenten auf. Die sorgfältige Betrachtung und Interpretation der Gesteine lässt Rückschlüsse auf die Geschichte des Teiles der Erdkruste zu, in der sie gefunden wurden. Die Materialien des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ zielen darauf ab, ein interdisziplinäres Verständnis von der Erde als systemisches Ganzes zu entwickeln. In diesem Zusammenhang kommt dem Thema Gesteinskreislauf eine wichtige Rolle zu, da dieser durch Prozesse aller vier Sphären (Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre) angetrieben wird.

Die **grundlegenden Informationen** des Moduls „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ umfassen Basiswissen überwiegend auf dem Niveau der Sekundarstufe I (Klassen 9 – 10). Die Schüler/innen sollen sich die Bedeutung von Gesteinen für das tägliche Leben bewusst machen und darüber hinaus das Potenzial von Gesteinen als Archive für die Erdgeschichte kennen lernen. Sie können dabei auch anhand von Texten und einfachen Versuchen das selbst organisierte Lernen einüben und die Methode der Systemanalyse anwenden, indem sie ein Stoffflussdiagramm zum Thema „Gesteinskreislauf“ entwickeln. Diese Materialien sind jedoch auch für höhere Klassen/Kurse geeignet, um das für ein umfassendes Verständnis des Systems Erde notwendige Basiswissen zum Themenbereich Gesteinskreislauf zu erarbeiten. Für diese Klassen besteht die Möglichkeit, sich die Inhalte anhand eines Gruppenpuzzles (Baustein 6, Material 1) selbstständig zu erarbeiten.

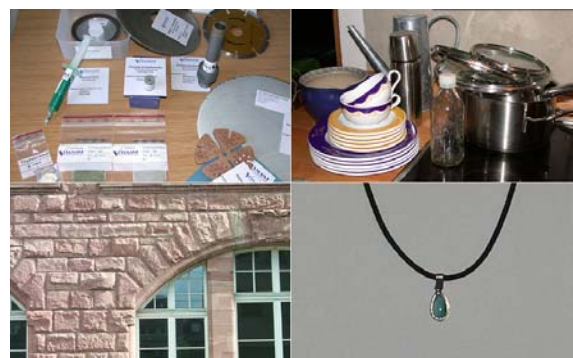
Die Bildung von Mineralen und Gesteinen wird durch die Wechselwirkungen von Druck, Temperatur, den vorhandenen Stoffen und dem Faktor Zeit bestimmt. Diese Zusammenhänge werden in den **vertiefenden Informationen** anhand chemischer und physikalischer Konzepte problemorientiert bearbeitet.

## 2 Sachinformation

Ob als Rohstoffe für industrielle Produkte, Kantstein oder Kopfsteinpflaster im Straßenbau, als Verblendung von Gebäuden, als Schmuckstein in Kettenanhängern oder Ohrringen, Gesteine begegnen uns täglich im Leben (s. Abb. 1). Für Geowissenschaftler/innen sind sie der Schlüssel zur Vergangenheit der Erde. Ihnen erschließen sie die Vorgänge im Erdinneren, deren Abläufe wir nicht direkt beobachten können. So stammt vieles, was wir heute über die Geschichte der Erde wissen, aus der Erforschung von Gesteinen.

### 2.1 Der Kreislauf der Gesteine

Gesteine und Minerale sind Produkte unseres dynamischen Systems Erde. In einer ständigen Wechselwirkung zwischen Materie und Energie werden Kontinente und Ozeane gebildet. Die Energie dafür stammt aus der Wärmeproduktion im Erdinneren, die die Plattentektonik antreibt (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“), und aus der Sonneneinstrahlung, die die Atmosphäre und die Ozeane in Bewegung setzt und damit auch die Verwitterungsprozesse unterstützt (s. Modul „Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre“).



**Abbildung 1:** Produkte, für deren Herstellung Gesteine bzw. Minerale verwendet werden (oben links Schleifscheiben und -pasten mit Diamanten; oben rechts Blumengießkanne aus Zinkblech, Kochtöpfe aus Edelstahl, Töpfereiprodukte aus Ton und Porzellan sowie Glas; unten Steine als Baumaterial für Gebäude und ein Mineral als Schmuckstein).



### 2.1.1 Begriffsklärung: Gestein, Mineral und Kristall

Die meisten Gesteine sind ein natürliches Gemenge von verschiedenen Mineralen. So enthält das Gestein Granit die Minerale Quarz, Feldspat und Glimmer (s. Abb. 2). Es gibt auch Gesteine, die aus nur einer Mineralart aufgebaut sind. Quarzit besteht zum Beispiel nur aus dem Mineral Quarz und Kalkstein nur aus Calcit. Andere - wie z. B. Breccien - können auch Bruchstücke verschiedener Gesteine enthalten oder - wie Kohle - aus Pflanzenresten aufgebaut sein. Minerale sind natürlich entstandene, physikalisch und chemisch homogene anorganische Bestandteile der Erde und des Kosmos. Sie weisen eine typische Kristallstruktur auf. Ein Kristall ist ein Festkörper mit dreidimensional regelmäßiger Anordnung der atomaren Bausteine: Er weist ein Kristallgitter auf.



Abbildung 2: Dieses Gestein mit dem Namen Granit besteht aus den Mineralen Feldspat, Quarz und Glimmer.

### 2.1.2 Die drei Gesteinsgruppen

Alle Gesteine der Erde lassen sich drei Gruppen zuordnen: den Erstarrungsgesteinen (magmatischen Gesteinen), den Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteinen) und den Umwandlungsgesteinen (metamorphen Gesteinen) (s. Abb. 3). Die Namen weisen auf die Entstehung der Gesteinsgruppen hin: Erstarrungsgesteine entstehen aus Magma durch Abkühlung und Ablagerungsgesteine aus Lockersediment durch Ablagerung. Umwandlungsgesteine entstehen aus Erstarrungsgesteinen oder Ablagerungsgesteinen durch Umwandlung (Metamorphose).

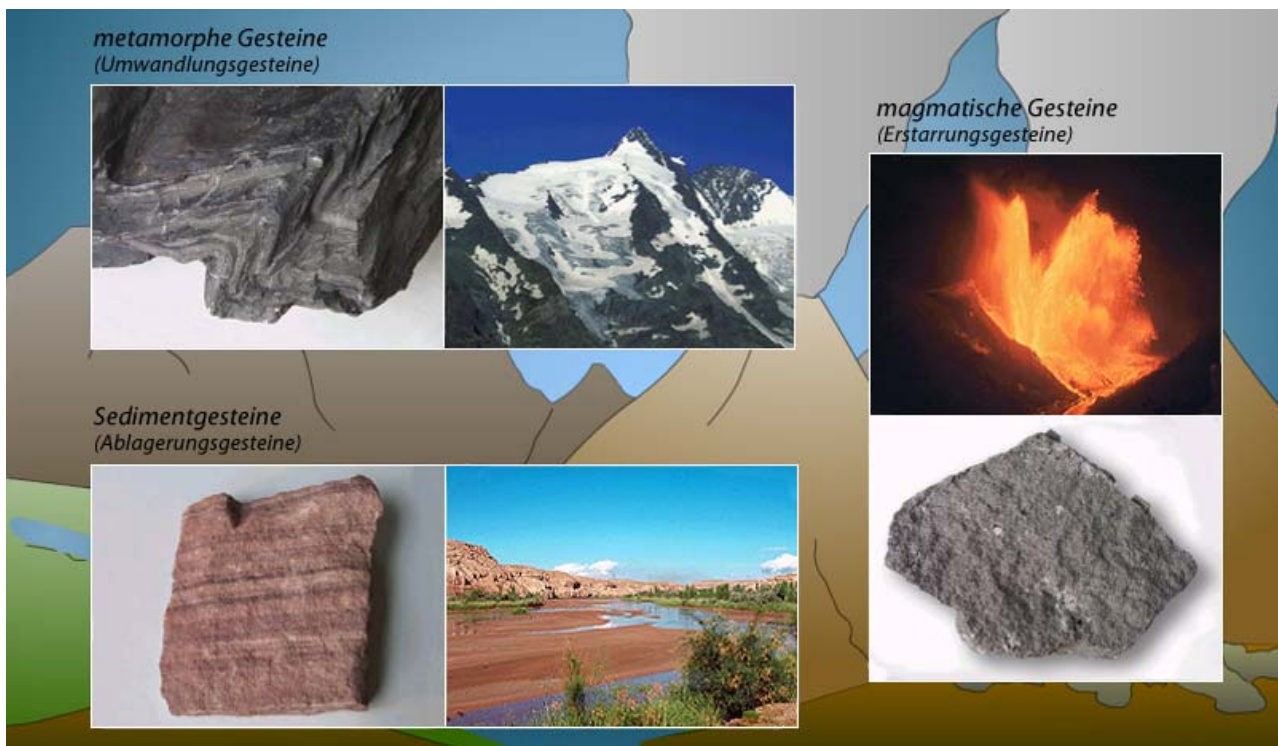




Abbildung 3: Vertreter der drei Gesteinsgruppen mit typischen Entstehungsszenarien.

## Erstarrungsgesteine (magmatische Gesteine)

Erstarrungsgesteine entstehen aus heißer, flüssiger Gesteinsschmelze. Gesteine schmelzen im Erdinneren, wo es heißer als 1.000 °C ist und sehr hohe Drücke von vielen tausend Bar herrschen. Diese Gesteinsschmelze (das Magma) steigt in die kältere Erdkruste auf, kühlt dort ab und erstarrt. Auf diese Weise entstehen die Erstarrungsgesteine, welche auch magmatische Gesteine genannt werden. Je nach Entstehungsart können Tiefen- und Vulkangesteine unterschieden werden (s. Tab. 1):

- **Tiefengesteine (Plutonite)** entstehen, wenn Magma tief im Erdinneren langsam abkühlt. Die Minerale haben viel Zeit zum Wachsen und es entstehen mittel- bis grobkörnige Kristalle, die unter der Lupe gut zu erkennen sind.
- **Vulkangesteine (Vulkanite)** entstehen in der Nähe der Erdoberfläche. Reißt eine Gesteinsspalte plötzlich auf, bahnt sich das Magma sehr schnell seinen Weg an die Erdoberfläche. Dort kühlt es schneller ab als im Erdinneren. Deshalb entstehen kleinere Kristalle. Oftmals sind im Erdinneren schon größere Kristalle entstanden, die dadurch von sehr vielen kleineren Kristallen umgeben werden. Nicht alle Kristalle sind unter der Lupe gut zu erkennen. Das entstehende Erscheinungsbild ist typisch für Gesteine, die auf Vulkanismus zurückzuführen sind. Man spricht von porphyrischem Gefüge. Vulkanische Gesteine können aber auch nur aus kleinen Kristallen bestehen.

**Tabelle 1: Ausgewählte Vertreter der Gesteinsgruppe der Erstarrungsgesteine.**

	<p><b>Typ:</b> Tiefengestein (Plutonit)  <b>Name:</b> Granit  <b>Bestandteile:</b> Quarz (grünlich), Glimmer (schwarz), Feldspat (weiß)  <b>Gefüge:</b> körnig, Minerale von gleichmäßiger Größe, unregelmäßig  <b>Entstehung:</b> Magma kühlte im Erdinneren vollständig und gleichmäßig ab, sodass alle Minerale eine einheitliche Größe erreichten.</p>
	<p><b>Typ:</b> Vulkangestein (Vulkanit)  <b>Name:</b> Rhyolith (Rhombenporphyr)  <b>Bestandteile:</b> Deutlich sichtbare rötliche und gelbliche Minerale (Feldspäte) umgeben von einer scheinbar homogenen Grundmasse, in der Kristalle mit dem bloßen Auge nicht identifiziert werden können.  <b>Gefüge:</b> porphyrisch (größere Kristalle umgeben von kleineren Kristallen)  <b>Entstehung:</b> Zunächst kühlte das Magma im Erdinneren relativ langsam ab, stieg mit den bereits kristallisierten Feldspäten in die Nähe der Erdoberfläche auf und kristallisierte dort so schnell, dass nur noch sehr kleine Minerale entstanden.</p>

## Ablagerungsgesteine (Sedimentgesteine)

Für die Entstehung von Ablagerungsgesteinen ist die Verwitterung von großer Bedeutung. In den kalten Zonen der Erde und in den Hochgebirgen geschieht die Verwitterung vor allem durch Frostsprengung, in den feuchten Tropen durch chemische Zersetzung. Die entstehenden Verwitterungsprodukte werden durch Wasser, Wind oder Eis abgetragen und an Land oder im Meer abgelagert. Sie sind zunächst unverfestigt und werden deshalb als Lockersedimente bezeichnet. Lockersedimente können auch aus Ausfällungsprodukten von im Wasser gelösten Stoffen (z. B. Kalk) und aus Überresten von Organismen (z. B. Schalen oder Panzer von Tieren) bestehen. Durch die schwere Auflast nachfolgender Lockersedimente werden sie zusammengedrückt (kompaktiert). Gleichzeitig wachsen Minerale in den Hohlräumen und zementieren die lockeren Bestandteile. Kompaktion und Zementation führen zur Verfestigung der Lockersedimente. Der Prozess wird als Diagenese bezeichnet. So können alle Gesteinstypen der Erde durch Verwit-



terung, Abtragung und Transport zu Lockersedimenten und durch anschließende Diagenese zu Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteinen) werden (s. Abb. 4).

Ablagerungsgesteine stellen Archive der Erdgeschichte dar, weil sie meistens über Zeiträume von Tausenden oder gar Millionen von Jahren abgelagert wurden. Oftmals enthalten die einzelnen Schichten heute ausgestorbene versteinerte Tiere und Pflanzen sowie Gesteinsbruchstücke. Beide Komponenten liefern Informationen über die Erde zu längst vergangenen Zeiten. So lässt sich zum Beispiel das Aussehen der Erde im Erdzeitalter Karbon von vor ca. 359 - 299 Millionen Jahren rekonstruieren. Damals wurden besonders viele Pflanzen abgelagert. Nach der Diagenese entstand daraus Kohle, die heute als fossiler Rohstoff gefördert wird.

Entsprechend der Ablagerungsart werden biogene, chemische und klastische Ablagerungsgesteine unterschieden (s. Tab. 2):

- **Biogene Ablagerungsgesteine** entstehen, wenn Überreste von Lebewesen nach dem Absterben abgelagert werden und versteinern. Dies kann an Land und im Meer geschehen. So leben z. B. Mikroorganismen wie Diatomeen, Coccolithoforiden und Foraminiferen im Ozeanwasser. Diatomeen bauen ihre Schalen aus Kieselsäure, Foraminiferen dagegen aus Kalk. Die Coccolithoforiden panzern ihre Zellen mit Kalkplättchen, den Coccolithen. Nach dem Absterben sinken die meisten Organismen zu Boden und werden zersetzt. Ein geringer Teil, nur etwa 1 % der kieseligen und kalkigen Gehäuse, landet schließlich am Meeresboden. Dort werden sie durch Diagenese zu Gestein, die kalkigen Skelette zu Kalkstein und die kieseligen Skelette zu Kieselschiefer. Während des Erdzeitalters Kreide von vor etwa 145 Millionen Jahren bis vor etwa 65 Millionen Jahren haben sich aus den damals lebenden Coccolithoforiden und Diatomeen mächtige Lockersedimentschichten am Meeresgrund gebildet. Aus ihnen sind zum Beispiel die Kreidefelsen auf Rügen entstanden. Deutlich heben sich von der weißen kalkigen Kreide dunkle Schlieren aus kieseligem Chert [sprich: schört] ab. Im Volksmund wird Chert auch als **Feuerstein** bezeichnet, weil er früher zum Feuermachen verwendet wurde.
- **Chemische Ablagerungsgesteine:** Gelöste Stoffe wie Karbonate, Natriumchlorid oder Schwermetalloxide können aus Gewässern ausfallen, wenn der Sauerstoffgehalt im Wasser, die Temperatur oder der Druck sich ändern. So kristallisieren die im Meerwasser gelösten Salze aus, wenn ein Meer in tropischen Breiten - aufgrund der dort herrschenden hohen Temperaturen - verdunstet. Sie scheiden sich entsprechend ihrer Löslichkeit ab: zuerst der schwer lösliche Kalk, dann Gips, danach Steinsalz und zuletzt die am leichtesten löslichen Kalisalze. Die ausgefallenen Stoffe bilden zunächst Partikel in der Wassersäule und schließlich - nach dem Absinken - neue Schichten auf dem Lockersediment. Einen Spezialfall von Ablagerungsgesteinen stellen die aus Wasser und Methan bestehenden Gashydrate dar. Sie sehen so ähnlich aus wie Eis und entstehen in Regionen mit großen Mengen an Methan und Wasser bei niedrigen Temperaturen oder hohen Drücken (z. B. Permafrostgebiete, Ozeanboden ab einer Wassertiefe von ca. 400 m). Relativ geringe Druckverringerungen bzw. Temperaturerhöhungen können dazu führen, dass die Gashydrate zerfallen und das Methan wieder freisetzen. Das kann geschehen, wenn gashydrathaltiger Ozeanboden durch Plattentektonik in geringere Wassertiefen mit niedrigeren Drücken gehoben wird. Das Freisetzen großer Mengen von Methan trägt zum natürlichen Treibhauseffekt bei.
- **Klastische Ablagerungsgesteine** entstehen durch Verwitterung. Ihre Bildung erfolgt in mehreren Teilschritten:
  - Verwitterung durch mechanische, chemische und biologische Gesteinszerstörung;



- Abtragung und Verfrachtung durch Wind, Wasser, Eis oder auch Schwerkraft (während des Transportes kann eine Sortierung des Materials nach Größe bzw. Gewicht stattfinden);
- Ablagerung;
- Diagenese.

**Tabelle 2: Ausgewählte Vertreter der Gesteinsgruppe der Ablagerungsgesteine.**

	<p><b>Typ:</b> biogenes Ablagerungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Korallenriffkalk</p> <p><b>Bestandteile:</b> Calcit (versteinerte Korallenskelette)</p> <p><b>Gefüge:</b> Korallen sind noch zu erkennen</p> <p><b>Entstehung:</b> Korallenskelette werden durch Lockersedimente bedeckt und im Zuge der Diagenese Teil einer Gesteinsschicht.</p>
	<p><b>Typ:</b> chemisches Ablagerungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Gashydrat</p> <p><b>Bestandteile:</b> Methan, Schwefelwasserstoff und andere Gase sind in Wassermolekülen käfigartig eingeschlossen.</p> <p><b>Gefüge:</b> Die Gashydrate treten als Lagen in Lockersedimenten auf.</p> <p><b>Entstehung:</b> Unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen werden die Bestandteile fest.</p>
	<p><b>Typ:</b> chemisches Ablagerungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Manganknolle (s. HLAWATSCH und VENKE 2005)</p> <p><b>Bestandteile:</b> Mangan- und Eisenoxide bzw. -hydroxide</p> <p><b>Gefüge:</b> wechselnde mangan- und eisenreiche Lagen</p> <p><b>Entstehung:</b> Ausfällung aus dem Wasser</p>
	<p><b>Typ:</b> klastisches Ablagerungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Sandstein</p> <p><b>Bestandteile:</b> Quarzkörner, rötliche Färbung durch ausgefällte oxidierte Eisenverbindungen</p> <p><b>Gefüge:</b> einzelne Sandschichten unterschiedlicher Färbung bzw. Korngröße</p> <p><b>Entstehung:</b> durch die Verfestigung von weit transportiertem feinkörnigem Verwitterungsschutt</p>

### Umwandlungsgesteine (metamorphe Gesteine)

Gelangen Gesteine von der Erdoberfläche in Erdzonen mit höheren Drücken und Temperaturen oder werden sie von heißem Magma in ihrer Nachbarschaft erwärmt, wandeln sich die in den Gesteinen enthaltenen Minerale durch chemische Reaktionen um. Der Prozess wird als Metamorphose und die entstehenden Gesteine werden als Umwandlungsgesteine oder metamorphe Gesteine bezeichnet (s. Tab. 3). Auch Sedimentgesteine werden durch erhöhte Drücke und Temperaturen umgewandelt. Aus Kalkstein entsteht dabei Marmor.

Gesteine gelangen vor allem durch Plattentektonik in große Tiefen: Die Lithosphäre ist in eine Anzahl von Platten zerbrochen, die auf dem plastischen Erdinneren driften. Es lassen sich ozeanische und kontinentale Lithosphärenplatten unterscheiden. Die ozeanischen Lithosphärenplatten sind spezifisch schwerer als die kontinentalen Platten und tauchen deshalb in das Erdinnere ab, sobald sie auf kontinentale Erdkruste tref-



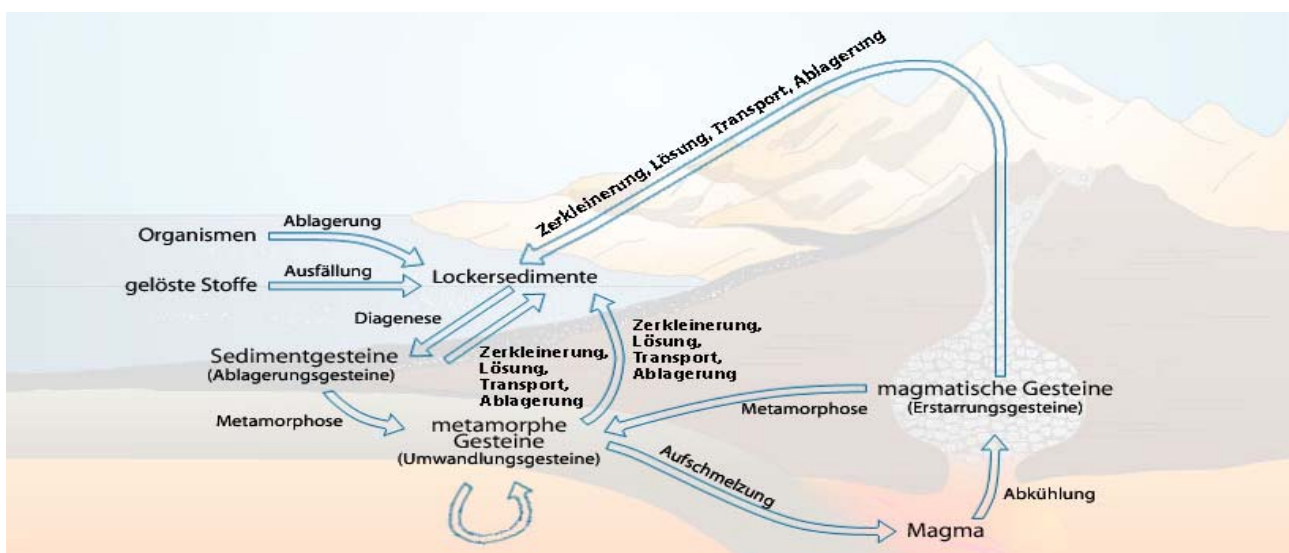
fen. Dieses Abtauchen wird als Subduktion bezeichnet. Angetrieben werden diese Lithosphärenplatten unter anderem durch Konvektionsströme<sup>1</sup> im Erdinneren. Bei der Versenkung steigt die Temperatur, was zur unvollständigen Aufschmelzung der ozeanischen Kruste und der mitgeführten Lockersedimente vom Meeresgrund führen kann. Es entstehen so genannte Fluide, die aufsteigen. Die Gesteine, die von den heißen Fluiden durchströmt werden, schmelzen teilweise auf oder werden stark erhitzt und dadurch zu metamorphen Gesteinen. Die entstehenden Gesteinsschmelzen (Magmen) können bis an die Erdoberfläche aufsteigen und dort Vulkane bilden.

Metamorphe Gesteine sind im Erdinneren oft hohen Drücken ausgesetzt und weisen deshalb nicht selten eine geschieferte Struktur auf. Diese kommt zustande, wenn plättchenförmige Minerale sich mit ihrer größten Oberfläche senkrecht zur Druckrichtung einregeln (s. Tab. 3). Während der Metamorphose können schön ausgebildete Minerale wie Granat oder Diamant wachsen.

**Tabelle 3: Beispiel für Vertreter der Gesteinsgruppe der Umwandlungsgesteine.**

	<p><b>Typ:</b> Umwandlungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Gneis</p> <p><b>Bestandteile:</b> Glimmer (schwarz), Feldspäte (rötlich), Quarz (weiß), manchmal Granat (rot)</p> <p><b>Gefüge:</b> grobkörnig, deutlich geschiefert</p> <p><b>Entstehung:</b> durch Umwandlung (Metamorphose) z. B. aus Erstarrungs- oder Ablagerungsgesteinen</p>
	<p><b>Typ:</b> Umwandlungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Marmor</p> <p><b>Bestandteile:</b> Calcit</p> <p><b>Gefüge:</b> gleichmäßige Kristallgröße, fein bis grobkörnig</p> <p><b>Entstehung:</b> durch Umwandlung (Metamorphose) aus Kalkstein</p>

### 2.1.3 Der Kreislauf der Gesteine



**Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung des Gesteinskreislaufs.**

<sup>1</sup> Insgesamt werden heute drei Prozesse als Ursache für die Plattentektonik angenommen, die im Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“ ausführlich erläutert werden.



Gesteine unterliegen einem ständigen Wandlungsprozess (s. Abb. 4). Erstarrungsgesteine (Tiefen- oder Vulkangesteine) bilden sich durch Erstarrung von Magmen aus geschmolzenen Umwandlungsgesteinen. Die Umwandlungsgesteine wiederum können aus Ablagerungsgesteinen, Erstarrungsgesteinen oder anderen Umwandlungsgesteinen entstanden sein. Alle drei Gesteinsgruppen verwittern und werden damit zu Ablagerungsgesteinen und durch die Verfrachtung ins Erdinnere an Orte mit höheren Temperaturen und Drücken schließlich wieder zu Umwandlungsgesteinen. Deshalb spricht man auch vom Kreislauf der Gesteine (s. Abb. 4).

#### 2.1.4 Industrielle Anwendung von Mineralen, Gesteinen und anderen Festkörpern - vom Faustkeil zur Solarzelle

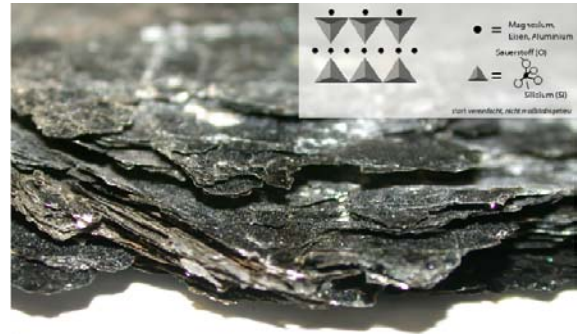
Es liegt eine lange Entwicklung zwischen der Herstellung von Faustkeilen in der Steinzeit und von heutigen Solarzellen oder Computerchips: Zunächst wurden nur natürliche Materialien als Werkzeuge verwendet. Später erfand der Mensch durch Ausprobieren Verfahren zur Herstellung von künstlichen Werkstoffen wie z. B. Bronze oder Eisen. Heute verwendet man gezielt naturwissenschaftliche Erkenntnisse, um Werkstoffe mit bestimmten Eigenschaften zu entwickeln (s. Tab. 4).

**Tabelle 4: Historischer Abriss der Entwicklung von Werkstoffen (nach HORNBÖGEN 2002)**

	Beginn der technischen Verwendung in größerem Umfang Jahr
<b>Natürliche Werkstoffe</b>	
Holz	
Keramische Minerale	> -2500
Gold, Kupfer, Meteoriteisen	
<b>durch Ausprobieren entwickelte Werkstoffe</b>	
Bronze	-2500
Stahl	-1500
Gusseisen	1500
Zement/Beton (Portlandzement)	1850
<b>durch Anwendung qualitativer wissenschaftlicher Erkenntnisse entwickelte Werkstoffe</b>	
Aluminiumlegierungen	1910
chemisch beständiger Stahl	1930
organische Kunststoffe	1940
Titanlegierungen	1960
mikrolegierte Baustähle	1965
<b>durch Anwendung quantitativer wissenschaftlicher Erkenntnisse entwickelte Werkstoffe</b>	
Halbleiter	1950
Reaktorwerkstoffe	1950
faserverstärkte Werkstoffe	1965
metallische Gläser	1970
Schneidkeramiken	1980
Halbleiter-Heterostrukturen	1990

Auch bei der Suche nach Rohstoffen ermöglicht ein tieferes Verständnis der natürlichen Prozesse ein gezieltes Vorgehen. So weiß man heute, in welchen Gegenden man wahrscheinlich Erdöl finden kann, weil

man die Bedingungen, unter denen Erdöl entsteht, und die geologischen Strukturen, in denen es sich ansammelt, kennt. Ein Wechselspiel zwischen Forschung aus reiner Neugier und gezielter Entwicklung zeichnet diesen technischen Fortschritt aus. Auch heute beeinflussen sich Grundlagenforschung und technische Entwicklung nach wie vor gegenseitig. So waren Geowissenschaften und Technik schon immer miteinander verbunden - nicht ganz zufällig feiern Geolog/innen heute noch den Tag der Heiligen Barbara, der Schutzheiligen der Bergleute.



**Abbildung 5:** Das Mineral Biotit mit der Summenformel „ $K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH)_2]$ “ ist ein Schichtsilicat. Tetraeder aus Siliciumoxid ( $SiO_4$ ) sind in einer Ebene mit drei Sauerstoffatomen verknüpft.

## 2.2 Stein unter Druck

Am Beispiel des besonders auffälligen und weit verbreiteten Glimmerminerals Biotit (s. Abb. 5 und 6) werden in diesem Kapitel die wesentlichen Prozesse der Um- und Neubildung von Stoffen der Lithosphäre (Gesteine und Minerale sowie Gase und Flüssigkeiten) veranschaulicht. Dabei dient die Region Kalabrien in Italien als Beispiel (s. Abb. 8).

### Wie kommt das Glimmermineral Biotit in Kalabriens Strandsand?

In Kalabrien kann man im Strandsand Biotitschuppen umgeben von Sandkörnern aus Quarz finden (s. Abb. 6).



**Abbildung 6:** Bei genauerem Hinsehen lassen sich auch im Strandsand interessante Entdeckungen machen. Dort liegen Biotitschuppen umgeben von Sandkörnern aus Quarz (Durchmesser = 1 - 2 mm).

Will man wissen, woher die Biotitschuppen kommen, muss man die nähere Umgebung des Fundorts erkunden. Nur wenige hundert Meter weiter - an einer Flussmündung - findet man verschiedene Gesteinstypen, die als Gerölle durch den Fluss aus dem Gebirge an den Strand transportiert wurden. Darunter ist auch ein Gesteinstyp, der aus weißen, grauen und schwarzen Mineralen aufgebaut ist. Es handelt sich um Granit (s. Abb. 7). Die enthaltenen schwarzen Minerale glänzen, sind aus dünnen Lagen aufgebaut und damit dem Glimmermineral Biotit im Strandsand sehr ähnlich. Dieser Granit kann deshalb das Ursprungsgestein für die Biotitschuppen im Strandsand sein.



Im Granit ist das Glimmermineral Biotit mit den anderen Bestandteilen (Feldspat und Quarz) fest verbunden. Erst die Verwitterung setzt einzelne Biotitschuppen frei. Das Glimmermineral Biotit ist sehr empfindlich und wird deshalb während des Transportes durch das Aneinanderreiben mit anderen Verwitterungsschutt-Bestandteilen oft vollständig zerstört, während das Mineral Quarz sehr stabil ist und auch über lange Transportdistanzen noch erhalten bleibt. Allerdings wird auch Quarz dabei ständig kleiner.

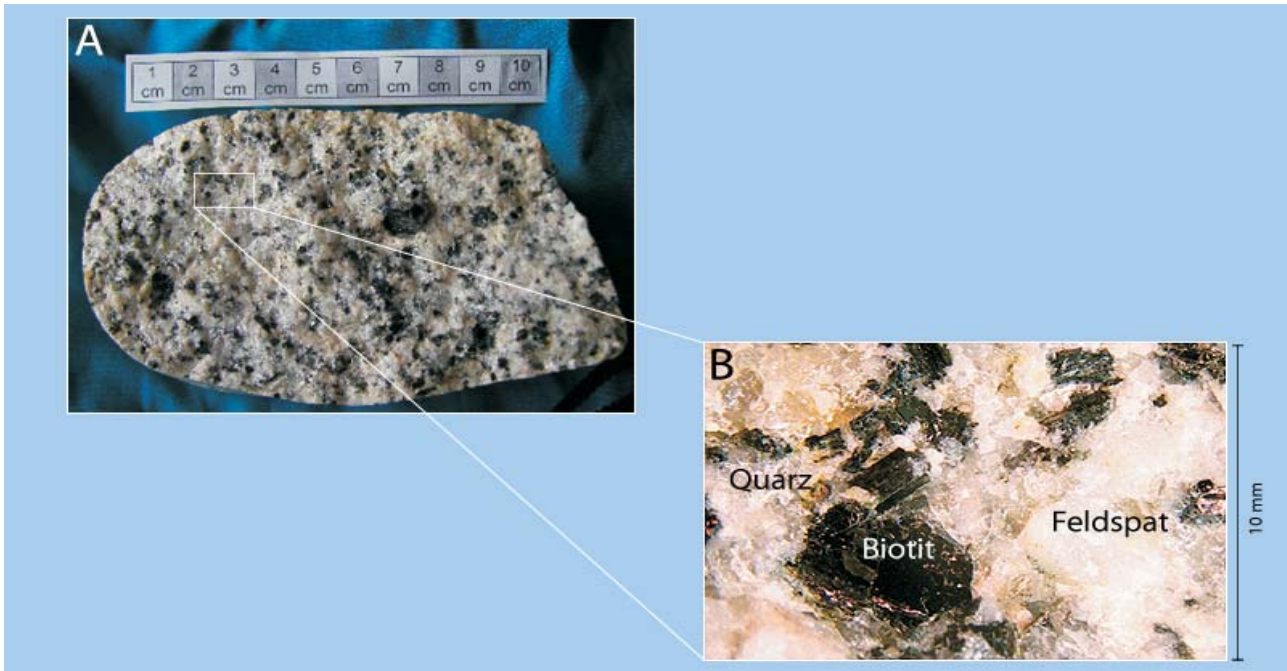


Abbildung 7: Granit kann das Ursprungsgestein der Biotitschuppen im Strandsand sein. Er enthält die Minerale Quarz, Feldspat und Glimmer (schwarz = Biotit, weiß bis hellgrau = Quarz und Feldspäte). A zeigt den Granit als Handstück. Der markierte Ausschnitt zeigt ungefähr die Position der Abbildung B.

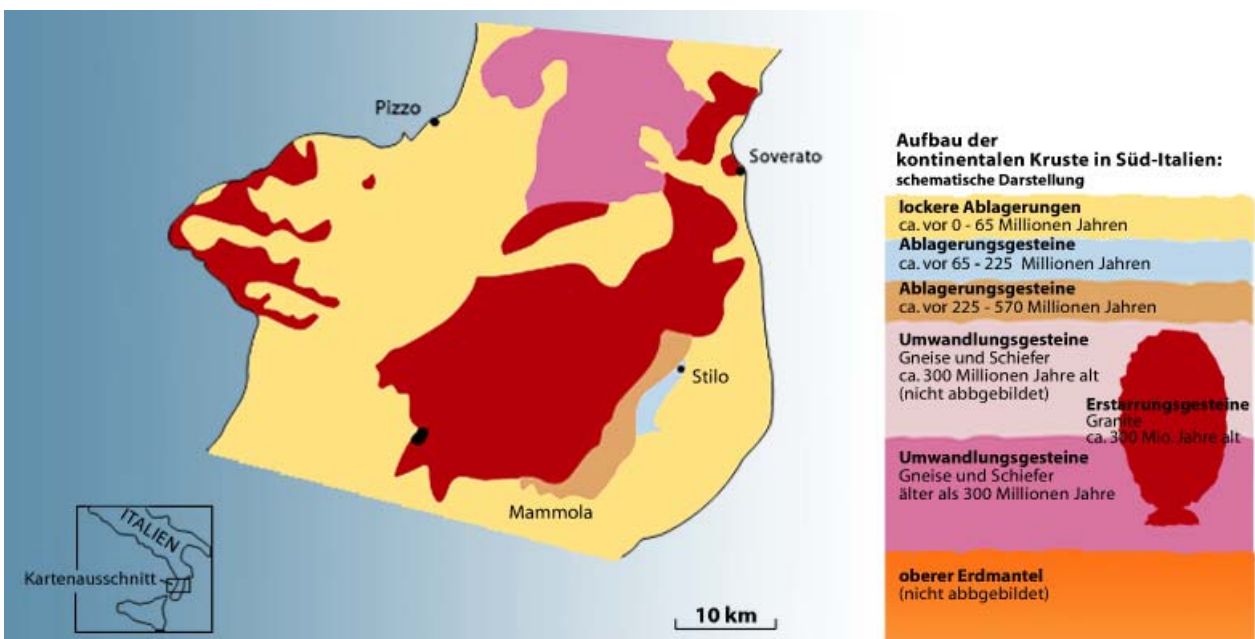


Abbildung 8: Diese geologische Karte von Kalabrien in Süditalien zeigt, welche Gesteinstypen an der Erdoberfläche gefunden wurden.



Eine geologische Karte (s. Abb. 8) zeigt die Verbreitung von lockeren Ablagerungen (Lockersedimenten) sowie Ablagerungs-, Umwandlungs- und Erstarrungsgesteinen in der Region Kalabriens. Den Granit - ein Erstarrungsgestein - findet man im Landesinneren. Dort ist er noch fest mit anderen Gesteinen der Erdkruste verbunden (anstehend). Wenn man Näheres über die Herkunft des Granits wissen möchte, sucht man nach so genannten Aufschlüssen, das sind Stellen, an denen Gesteine frei von Boden und Vegetation gut untersucht werden können (s. Abb. 9). Die Lagerung in solchen Aufschlüssen und der Verbund mit anderen Gesteinstypen liefern Hinweise auf die Entstehungsgeschichte einer Region.

In Kalabrien sind im Zuge der Plattentektonik zwei Kontinente aufeinander geprallt (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“). Dabei hat sich über einen Zeitraum von ca. 65 Millionen Jahren ein Gebirge von etwa 2000 m Höhe über dem Meeresspiegel aufgefaltet, das langsam durch Verwitterung abgetragen wird. Der entstehende Verwitterungsschutt bildet im Westen und im Osten des Gebirges mächtige Lockersedimentschichten.

Auch heute noch stellt Kalabrien die Nahtstelle von zwei Kontinenten dar, die aufeinander zu driften. Das Gebirge hebt sich heute etwa 1 mm/Jahr.



**Abbildung 9:** Links: Roter Sandstein auf der Insel Helgoland (Schleswig-Holstein, geologische Periode Trias). Rechts: Kalkstein in Münchehagen (Niedersachsen, geologische Periode Kreide). Gesteinsschichten, die nicht von Boden oder Vegetation bedeckt sind, werden als Aufschluss bezeichnet.

Im Folgenden wird erläutert, was als nächstes aus den Biotitschuppen werden könnte.

### 2.2.1 Aus Sand wird Stein

Das Glimmermineral Biotit aus dem Verwitterungsschutt Kalabriens kann durch Wind und Wasser zusammen mit anderem Verwitterungsschutt ins Meer gelangen.

Die zuerst abgelagerten Schichten werden in der Tiefe durch die immer schwerer werdende Last der nachfolgenden Schichten zusammengedrückt (Kompaktion). Die Hohlräume zwischen den einzelnen Bestandteilen werden unter dem zunehmenden Auflastdruck mit kleineren Körnern verfüllt und das Lockersediment wird durch die Kristallisation von neuen Mineralen zementiert (Zementation). Diesen Prozess der Gesteinsverfestigung nennt man Diagenese. Das Lockersediment wird dadurch zu einem Sandstein und die Biotitschuppen, die ursprünglich am Strand lagen, werden ein Teil davon.

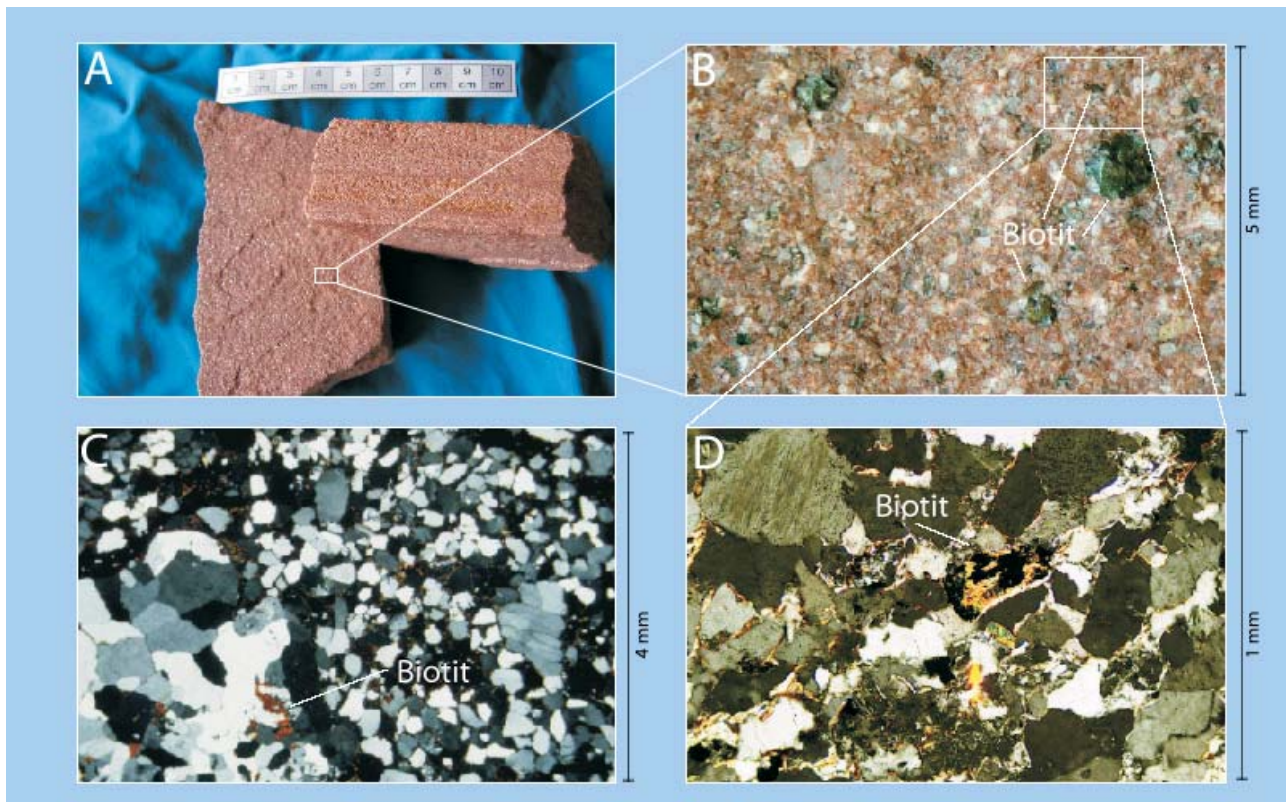


Abbildung 10: Beispiel für einen Sandstein mit Biotit vom Straßenrand im Sensbachtal, nördlich vom Katzenbuckel in der Nähe von Eberbach im Odenwald. (A) Handstück je einmal mit Blick parallel und senkrecht zur Schichtung. (B) Biotit ist erkennbar als schwarze Schuppen. Der markierte Bereich zeigt den Ausschnitt von (D), der durch ein Polarisationsmikroskop mit gekreuzten Polarisatoren aufgenommen wurde, weswegen die Biotitschuppen hier gelblich erscheinen. Aufnahme (C) zeigt am Beispiel einer anderen Probe im unteren, linken Bereich Quarzkörner (grau, weiß und schwarz), die aufgrund von Drucklösung gewachsen sind (Aufnahme durch ein Polarisationsmikroskop mit gekreuzten Polarisatoren), die bunten Flecken sind Biotit.

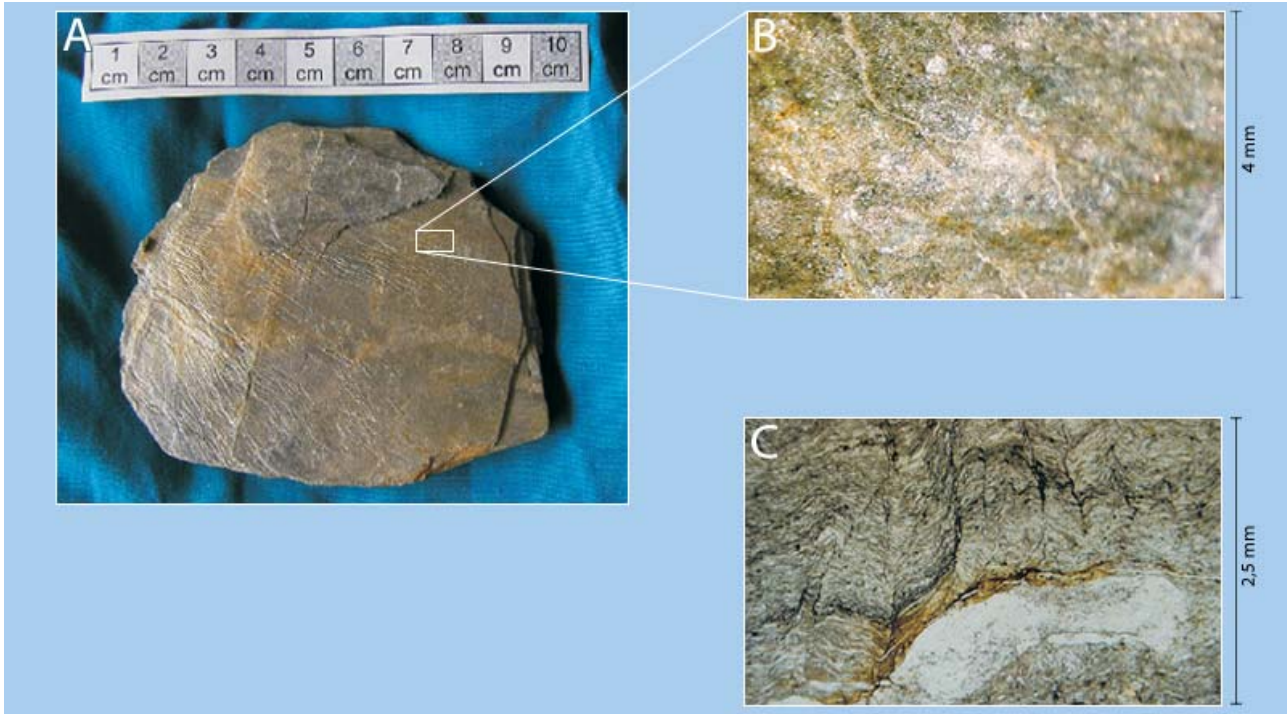
Neben der Kompaktion und der Zementation laufen weitere chemische Prozesse im Rahmen der Diagenese ab. Hierzu gehört z. B. die chemische Reaktion mit Wasser (Hydratation), die zur Auflösung der Minerale führt. Auch führen chemische Umwandlungen zum Austausch von Elementen in den Mineralen (Verdrängungsprozesse). Die Biotitschuppen lösen sich auf. Dieser Prozess wird beendet, sobald das Wasser zwischen den Bestandteilen des Lockersediments (Porenwasser) vollständig ausgepresst ist. Die in den Zwischenräumen sitzenden Biotitschuppen sind dann geschützt. Steigt der Druck der Auflast weiter, werden die Sandkörner (Quarz) so stark aneinander gepresst, dass sie sich an ihren Korngrenzen lösen (Drucklösung). Dabei verschieben sich die Korngrenzen, bis im günstigsten Fall nur noch ein einziges Korn vorliegt: ein Einkristall (s. Abb. 10, Bild C, unten links). Der Druck der Auflast kann in Tiefen von ca. 5.000 m bereits auf 1 bis 2 Kilobar ansteigen.

## 2.2.2 Umwandlung

Liegt ein Teil des Meeresbodens in der Nähe einer Subduktionszone, wird er im Laufe der Zeit durch den Prozess der Plattentektonik in die Tiefe verfrachtet. Dies nimmt man z. B. für den Meeresboden vor Kalabrien und damit auch für den Verwitterungsschutt, der von Kalabrien ins Meer gelangt an. Dadurch erhöhen sich Druck ( $p$ ) und Temperatur ( $T$ ) und die Minerale werden umgewandelt (Metamorphose), neue Gesteine



entstehen. Dies erfolgt weitgehend im festen Zustand, ohne dass die chemische Zusammensetzung des Gesteins verändert wird.



**Abbildung 11:** Ein geschiefertes Gestein aus Nordost-Sardinien mit dem Namen Phyllit. (A) Handstück (Blick auf die Schieferungsfläche). (B) Biotitschuppen als schwarze dunkle Flecken neben einer hellen Glimmerart (Blick auf die Schieferungsfläche). (C) Aufnahme durch ein Polarisationsmikroskop im einfach polarisierten Licht: Phyllit im Querschnitt mit Quarz, in wechselnden Lagen mit einer hellen Glimmervariante und Biotit (schwarz).

Bei der Metamorphose entwickeln Gesteine häufig ein typisches Gefüge, die Schieferung: Minerale (häufig Schichtsilikate wie das Glimmermineral Biotit) richten sich mit ihrer größten Fläche senkrecht zum Druck aus. Ein Gestein, das sich in einer frühen Phase der Metamorphose bildet, ist der Phyllit. Er besteht aus Quarz und verschiedenen Glimmerarten (s. Abb. 11). Steigt die Temperatur weiter auf 400 bis 500 °C, setzen optimale Bedingungen für das „Wachstum“ von Glimmermineralen ein. Typischerweise entsteht dann das Gestein Glimmerschiefer (s. Abb. 12).

Bei steigenden Temperaturen und Drücken bilden sich Gneise, die ebenfalls Biotit enthalten. Sie sind gegenüber den Glimmerschiefern deutlich grobkörniger und weisen einen höheren Feldspatgehalt (> 20 %) auf (s. Abb. 13).

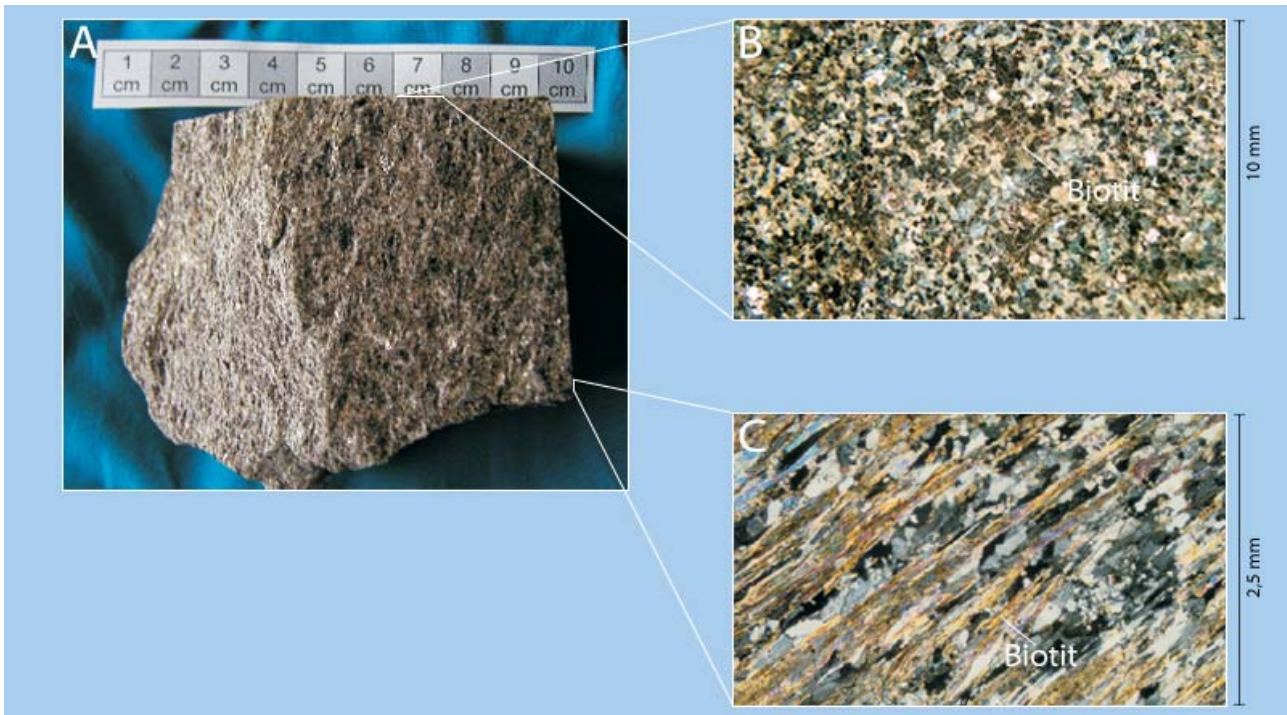


Abbildung 12: Biotit in einem Glimmerschiefer mit Quarz und Feldspäten aus Erlenbach im Odenwald. (A) Handstück (Blick auf die Schieferungsfläche). (B) Aufnahme durch eine Stereolupe: Biotit (schwarz) ist in seiner schuppig-blättrigen Ausbildung zu erkennen (Blick auf die Schieferungsfläche). (C) Aufnahme durch ein Polarisationsmikroskop: Die Glimmer Biotit und Muskowit erscheinen mit gekreuzten Polarisatoren bunt. Quarz erscheint hell- und dunkelgrau (Schnitt senkrecht zur Einregelungsfläche).

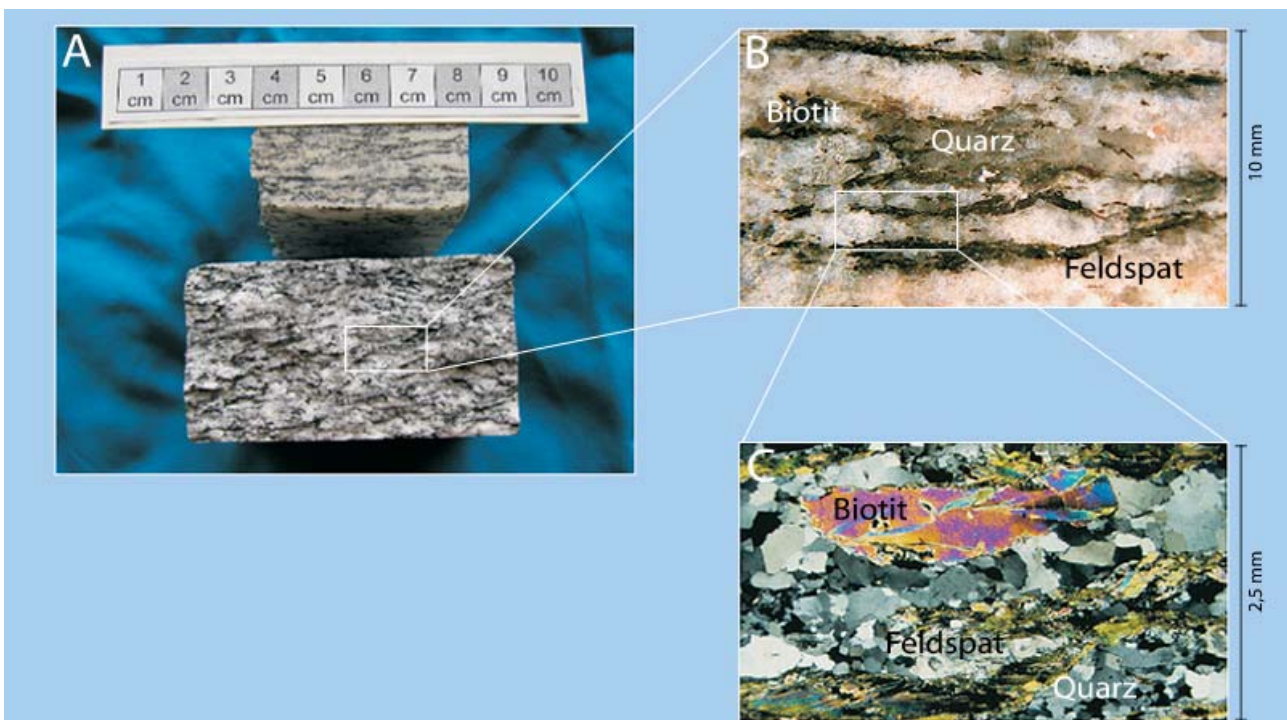


Abbildung 13: Gneis aus dem Schwarzwald. (A) Handstück von Gneis mit Feldspat, Quarz (beide weißgrau) und Glimmer (schwarz). (B) Biotitschuppen im Gneis mit Quarz und Feldspat (Schnitt senkrecht zur Schieferungsfläche). (C) Aufnahme durch Polarisationsmikroskop mit gekreuzten Polarisatoren: gut ausgebildete Glimmerschuppen (Biotit; bunt).



### 2.2.3 Schmelzende Steine

Mit weiter steigenden Drücken und Temperaturen erreichen die Biotitschuppen aus dem Verwitterungsschutt Kalabriens ihren Schmelzpunkt und gehen in den flüssigen Aggregatzustand über. Sie werden Bestandteile einer Gesteinsschmelze. Der Vorgang der Aufschmelzung vollzieht sich über sehr lange Zeiträume von Millionen von Jahren schrittweise über einen weiten Temperatur- und Druckbereich. Dabei werden nach und nach alle Komponenten erfasst, die sich in den Gesteinen befinden. Die Anatexis, so wird dieser Prozess auch bezeichnet, reicht von der teilweisen Aufschmelzung einzelner Komponenten (Minerale) des Gesteins (partielle Anatexis), bis zur vollständigen Aufschmelzung aller Minerale (vollständige Anatexis).

Die Bedingungen für diese anatektischen Prozesse wurden in Laborexperimenten untersucht. Die niedrigsten Schmelztemperaturen ergaben sich für Gesteine mit einer durchschnittlichen Zusammensetzung von Verwitterungsschutt (z. B. Sandsteine) in einer Tiefe von ca. 25 - 30 km. Diese lagen im Bereich von 650 – 700 °C (WINKLER 1967). Das Diagramm in der Abbildung 14 zeigt die Druck- und Temperaturbedingungen, unter denen die Metamorphose einsetzt, und diejenigen, unter denen sich Gesteinsschmelze bildet.

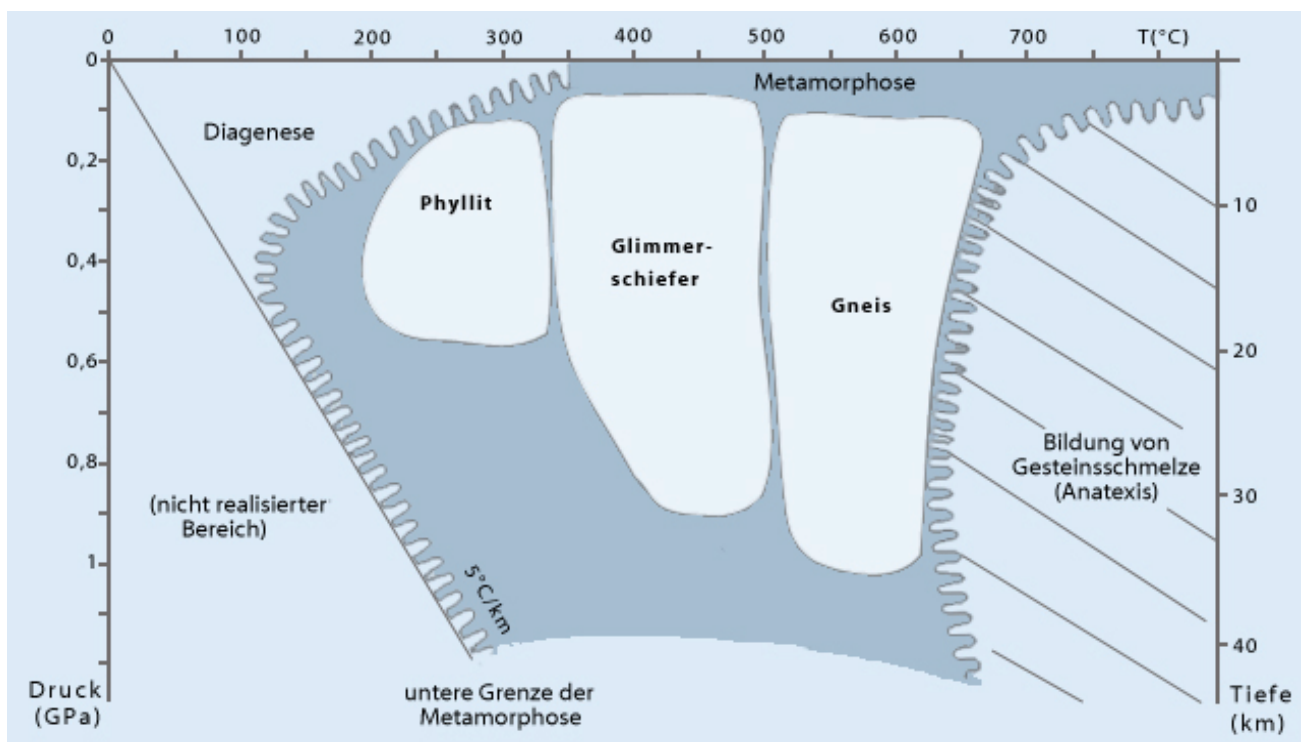


Abbildung 14: In einem Druck- und Temperaturdiagramm können die Bereiche dargestellt werden, in denen Diagenese, Gesteinsumwandlung (Metamorphose) und Gesteinsaufschmelzung (Anatexis) stattfinden.

In jeder Phase der Anatexis werden Gesteinsschmelzen neben den verbleibenden Festmaterialien gebildet. Diese Schmelzen stellen jeweils das Ausgangsmaterial für eine Kristallisation neuer Minerale und damit eine Neubildung von Gesteinen dar, die dann neben dem noch nicht geschmolzenen Restbestand existieren. Die Produkte werden als Mischgesteine bezeichnet, sie enthalten neben den neu gebildeten Mineralen Anteile der ursprünglichen Gesteine (s. Abb. 15).

In der Tiefe kristallisieren Gesteinsschmelzen durch langsame Abkühlung zu Tiefengesteinen (Plutoniten). Abbildung 16 zeigt einen Granit mit Restbestand des ursprünglichen Gesteins aus dem Fichtelgebirge, der auch Biotit enthält.



Abbildung 15: Mischgestein aus Reichenbach-Sonderbach im Odenwald. (A) Handstück: Markierung zeigt etwa das Bild B. (B) Aufnahme mit Stereolupe: Granit und Restbestand; die Markierung zeigt etwa Bild C. (C) Aufnahme durch ein Polarisationsmikroskop mit gekreuzten Polarisatoren: Die linke Bildhälfte zeigt neu gebildeten Granit und die rechte Bildhälfte das ursprüngliche Umwandlungsgestein. Die Grenze ist durch einen Filzstiftstrich markiert.

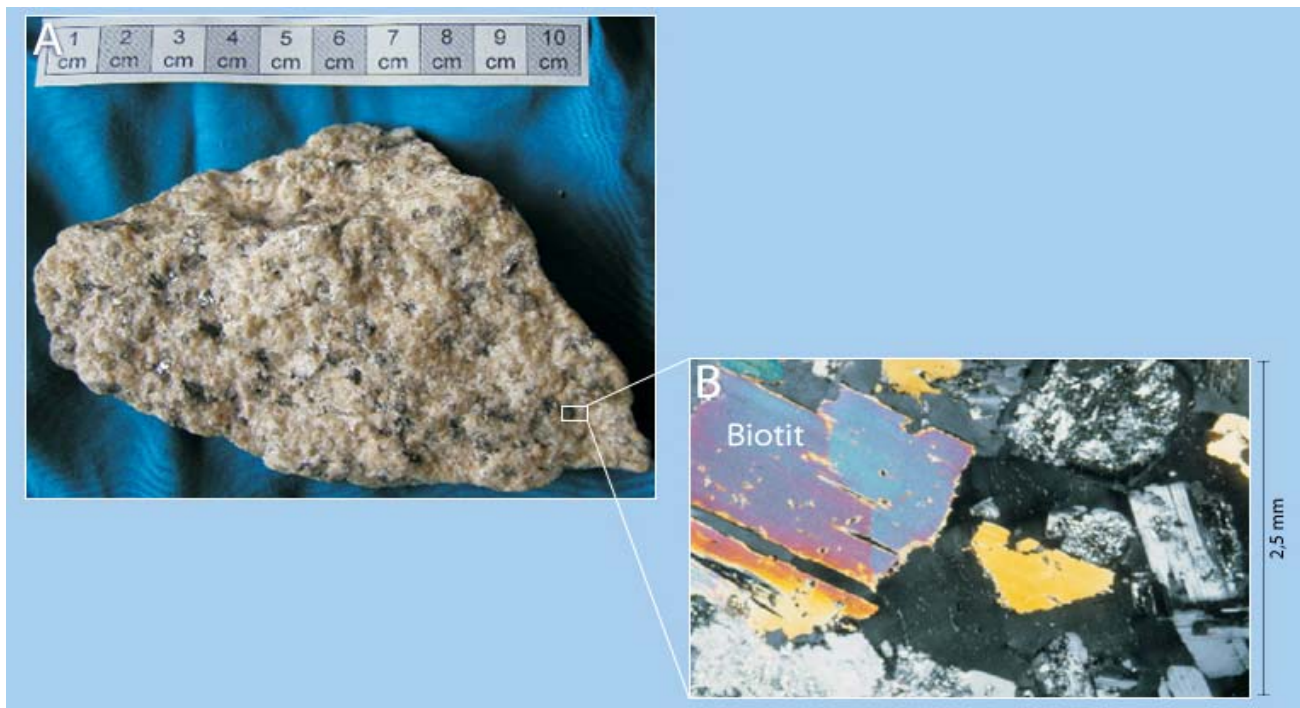


Abbildung 16: Granit aus dem Steinbruch der Firma Scharf nördlich vom Silberhaus im Fichtelgebirge in der Nähe von Bischofsgrün. (A) Handstück: Granit mit Biotit (schwarz), Muskowit (weißlich), Quarz (weiß-grau) und Feldspäten (beige-weiß). (B) Aufnahme durch ein Polarisationsmikroskop mit gekreuzten Polarisatoren: Biotit erscheint bunt.



Granit kann durch die Plattentektonik wieder in höhere Erdkrustenstockwerke gehoben und durch Verwitterungsprozesse freigelegt werden. Möglicherweise werden Bruchstücke davon wieder an den Strand von Kalabrien transportiert. Der Kreislauf hätte sich geschlossen.

#### 2.2.4 Die Schalen der Erde: Mineralogie eines chemisch differenzierten Planeten

Die Geowissenschaftler/innen stimmen darin überein, dass die Erde aus verschiedenen Schichten besteht. Aber woher wissen sie das? Diese Frage soll im folgenden Kapitel beantwortet werden (s. VENKE und HLAWATSCH 2005).

Das Bild, das die Geowissenschaften heute vom Planeten Erde haben, setzt sich wie ein Puzzle aus den Ergebnissen ganz verschiedenartiger Untersuchungen zusammen. Einige wurden bereits im 18. Jahrhundert durchgeführt, und deren Ergebnisse sind immer noch aktuell, andere sind erst durch den technologischen Fortschritt der letzten Dekaden möglich geworden. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt, um zu erfahren, wie die Erde im Inneren aufgebaut ist:

- Beobachtungen an der Erdoberfläche. Hierbei werden gezielt Aufschlüsse gesucht. Die Gesteine und ihre Lagerung werden beschrieben und mit denen verglichen, die in der unmittelbaren Umgebung zu finden sind. Von diesen Gesteinen werden Proben für spezielle mineralogische und geochemische Untersuchungen entnommen. Die Ergebnisse werden in geologischen Karten dargestellt. An der Erdoberfläche befinden sich manchmal auch Gesteine, die durch gebirgsbildende Prozesse und vulkanische Vorgänge tief aus dem Erdinneren an die Oberfläche gelangt sind (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“). Sie sind in bis zu 100 km Tiefe im Erdinneren entstanden und liefern Hinweise auf die Bedingungen dort.
- Beobachtungen an Gesteinen, die durch Bohrungen in die Erdkruste gewonnen werden. Im Rahmen von internationalen Bohrprogrammen haben sich Geowissenschaftler/innen verschiedener Nationalitäten zusammengeschlossen, um gemeinsam Bohrprojekte durchzuführen. In Deutschland gibt es z. B. eine Bohrstelle des Kontinentalen Tiefbohrprogrammes (KTB) in Windischeschenbach (Bayern). Deutsche Wissenschaftler sind auch am Ocean Drilling Program (ODP) beteiligt, das sich in erster Linie mit der Erdkruste unter den Ozeanen befasst (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“).
- Geophysikalische Untersuchungen in Form von seismischen Messungen liefern Hinweise über den Aufbau der Erde (s. Modul „Erdbeben und Wellen: Nachrichten über das Erdinnere“). Sie basieren auf der Kenntnis der Durchlässigkeit verschiedener Materialien für seismische Wellen.
- Experimente, bei denen Gesteine hohen Drücken und Temperaturen ausgesetzt werden: Aus neuester Zeit sind z. B. Untersuchungen von Diamanten bekannt, die Aussagen über die geologischen Verhältnisse bis in etwa 700 km Tiefe gestatten (STACHEL und BREY 2001). Solche Hochdruckexperimente erlauben in Kombination mit geophysikalischen Messdaten Aussagen über die geologischen Verhältnisse in Bereichen unserer Erde, die auf andere Weise nicht zugänglich sind. Mit den Ergebnissen der Hochdruckexperimente werden Phasendiagramme entwickelt, aus denen die Entstehungsbedingungen bestimmter Gesteine abgelesen werden können.

Aufgrund dieser Untersuchungen wissen wir heute, dass die Erde aus verschiedenen Schalen besteht und kennen auch die stoffliche Zusammensetzung dieser Schichten. Die innersten Schalen werden als Erdkern, die mittleren als Erdmantel und die obersten als Erdkruste zusammengefasst:

- Die Bildung des Eisenkerns ist schon sehr früh, nur etwa 100 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde (s. Modul „System Erde – Die Grundlagen“), also vor etwa 4,6 Milliarden Jahren erfolgt.





- Die Bildung der Erdkruste fand während der ganzen Erdgeschichte statt und läuft auch heute noch ab.
- Die Schichten des Erdmantels bestehen aus mehreren Schichten von Mineralien unterschiedlicher Phasendichte.

### Bildung von Erdkruste und Erdkern

Man vermutet, dass die Erde bei ihrer Entstehung die gleichen chemischen Elemente wie die Sonne erhalten hat (s. Modul „System Erde – Die Grundlagen“). Eine bestimmte Gesteinsschmelze (kimberlitische Schmelze), die durch Vulkane an die Erdoberfläche transportiert wird, enthält die verschiedenen Elemente noch in kosmischer Häufigkeit. Das ursprüngliche Material der Erde dürfte ähnlich zusammengesetzt gewesen sein. Bei der Aufschmelzung eines Bruchstückes von erstarrter kimberlitischer Schmelze unter hohen Drücken (entsprechend ca. 700 km Erdtiefe) entstehen zwei nicht mischbare Schmelzen. Die eine ist eisenreich und die andere silicatreich. Man vermutet deshalb, dass sich das Eisen des Erdkerns am Boden eines erdumspannenden Magma-Ozeans in etwa 700 km Tiefe aus dem ursprünglichen Erdmantelgestein abgetrennt hat, bevor es wegen seiner relativ hohen Dichte in den Erdkern gesunken ist. Der einstmalige flüssige Eisenkern der Erde kristallisiert seitdem allmählich aus, sodass heute nur noch sein äußerer Teil flüssig ist.

Die Erdkruste wurde im Laufe der Erdgeschichte ebenfalls durch das Aufschmelzen und Abwandern von Teilen des ursprünglichen Erdmantels gebildet. Dieser Prozess ist immer noch nicht abgeschlossen: Die silicatischen Schmelzen sind im Unterschied zu den eisenreichen Schmelzen des Erdkerns spezifisch leichter als die Gesteine des oberen Erdmantels. Sie steigen daher auf und bilden die Erdkruste. Dies geschieht beispielsweise an den mittelozeanischen Rücken, wo permanent neue Erdkruste erstarrt (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“). So entsteht die ozeanische Kruste.

Die kontinentale Kruste ist reicher an  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Alkalien als die ozeanische Erdkruste. Hieraus lässt sich schließen, dass sie nicht direkt aus den Schmelzen des oberen Mantels gebildet wurde. Ihre Bildung erfolgt heute wie schon in der Vergangenheit in mehreren Schritten. Sie schließt komplexe Vorgänge an Subduktionszonen ein (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“). Dort wird die ozeanische Erdkruste wieder in das Erdinnere transportiert. Mit zunehmender Tiefe wird die ozeanische Erdkruste immer stärker aufgeheizt. Das im Gestein enthaltene sehr heiße Wasser wird mit den darin gelösten chemischen Verbindungen ausgepresst und den überlagernden Gesteinen (Erdmantel) zugeführt. Das überlagernde Gestein schmilzt dadurch wie die abtauchende ozeanische Erdkruste teilweise auf. Aus diesen neuen Schmelzen kristallisieren die Gesteine, die die Kontinente mit ihrer typischen Zusammensetzung ausbilden.

Die Anreicherung der Elemente und ihrer Verbindungen in der Erdkruste erfolgte also in einem iterativen Prozess wobei die ozeanische Kruste auf andere Weise gebildet wird als die kontinentale Kruste. Im Ergebnis ist die kontinentale Kruste dadurch auch weniger dicht ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) als die ozeanische Kruste ( $3,0 \text{ g/cm}^3$ ). Deshalb taucht die ozeanische Kruste unter die kontinentale Kruste ab.

### Bildung des Erdmantels

Die Zusammensetzung des Erdmantels wird durch die anderen Schichten der Erde beeinflusst: Der Erdmantel ist zum einen verarmt an Eisen, das nach dem Aufschmelzen ins Erdzentrum abgesunken ist und zum anderen an Silicaten, die nach dem Aufschmelzen an die Erdoberfläche aufgestiegen sind. Um nun die weitere Untergliederung des Erdmantels zu verstehen, muss man die physikalischen Eigenschaften der Erdmantelgesteine im Einzelnen betrachten.



Der Erdmantel ist im Wesentlichen aus folgenden Verbindungen aufgebaut:  $\text{SiO}_2$  (45%),  $\text{MgO}$  (38%),  $\text{FeO}$  (8%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4%),  $\text{CaO}$  (3%). Zu welchen Mineralen sich diese Oxide zusammenschließen, hängt von den Druck- und Temperaturbedingungen ab, die in den verschiedenen Tiefenzonen der Erde herrschen. Die Minerale wandeln sich unter dem Einfluss des Druckes in dichtere Mineralphasen um. Diese Umwandlung erfolgt teilweise relativ abrupt in einer bestimmten Tiefe, sodass ein scharfer mineralogischer Lagenbau im Erdmantel entsteht. Dieser Lagenbau wurde zunächst aus geophysikalischen Experimenten abgebildet, als Diskontinuitäten in den Geschwindigkeiten seismischer Wellen auftraten (s. Abb. 17 und Modul „Erdbeben und Wellen: Nachrichten über das Erdinnere“). Eine solche Unterbrechung im Geschwindigkeitsverlauf einer seismischen Welle lässt sich nur durch eine plötzliche Dichtezunahme erklären. Die schrittweise Verdichtung des Erdmantels erfolgt durch isochemische Phasenumwandlungen und Mineralreaktionen.

Die wesentlichen Mineralumwandlungen im Erdmantel finden in den so genannten Übergangszonen statt, bei 410 km und bei 670 km Tiefe. In noch größerer Tiefe erfahren die Minerale weitere Umwandlungen. Diese Zone ist der deutlich dichtere untere Erdmantel.

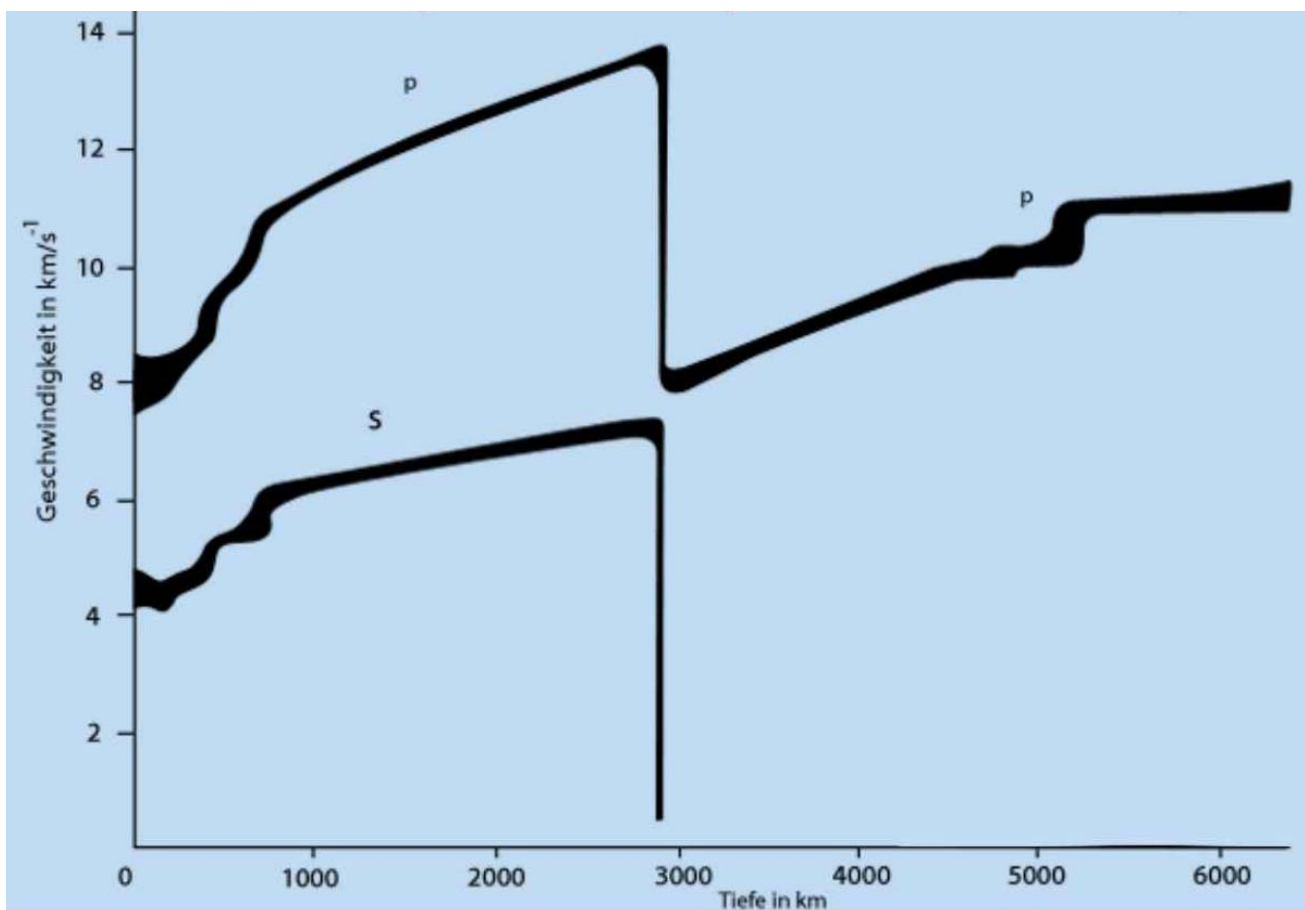
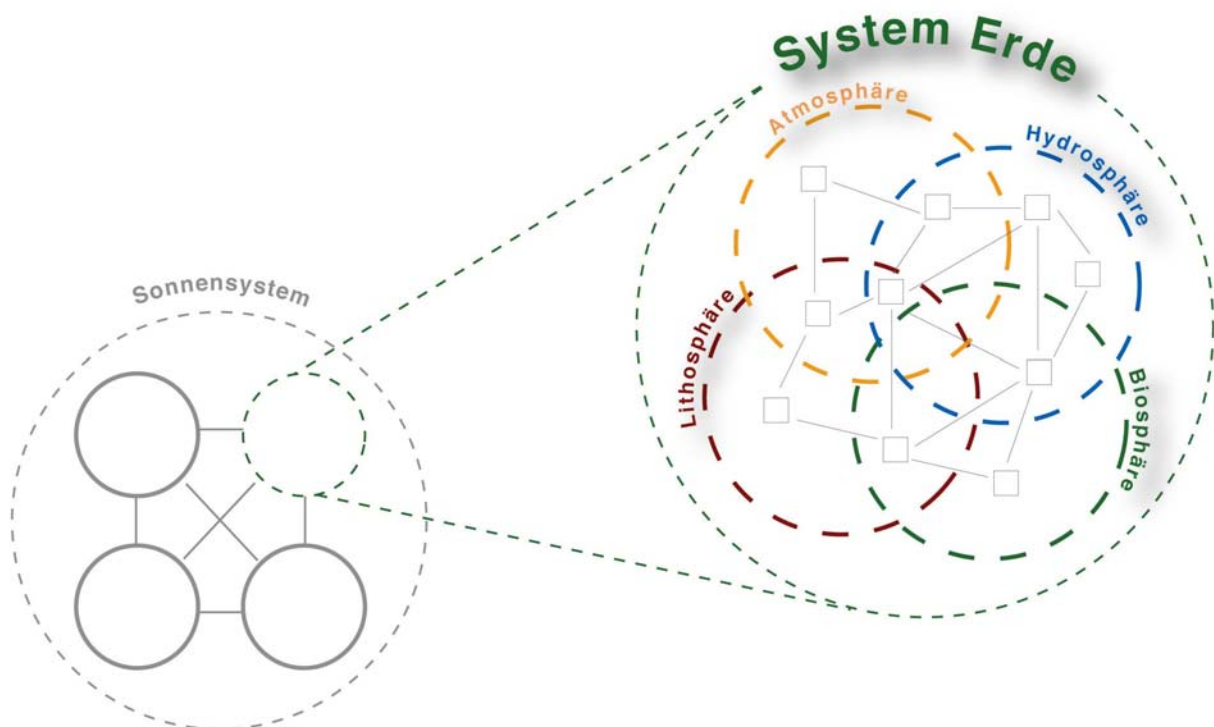


Abbildung 17: Die seismischen Wellen durchwandern das Erdinnere nicht mit gleich bleibender Geschwindigkeit. Die Sprünge in der Wellengeschwindigkeit deuten darauf hin, dass die Erde aus verschiedenen Schichten mit jeweils unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung besteht (nach BOLT 1995).

### 3 Didaktische Information

#### 3.1 Lernziele

Mit den Materialien der **Bausteine 1 bis 6** befassen sich die Klassen 9 - 10 mit **grundlegenden Konzepten der Themen „Steine“, „Minerale“ und „Gesteinskreislauf“**, und zwar überwiegend auf dem Niveau der Sekundarstufe I. Mit Hilfe von Stoffproben, computergestützten Materialien und Schülerversuchen entwickeln die Schüler/innen einen einfachen Kreislauf der Gesteine, der als Stoffflussdiagramm dargestellt wird. Dabei wird die Vernetzung der übergeordneten Teilsysteme des Planeten Erde (Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre) deutlich (s. Abb. 18). Spezielle methodische Kompetenzen in Bezug auf das selbst organisierte Lernen können durch das „Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf“ (Baustein 6, Material 1) erworben werden. Dafür wurden Inhalte der Bausteine 3 - 5 aufgearbeitet (Gruppenpuzzle, s. FREY-EILING und FREY 2005). Übergeordnetes Ziel ist die Vertiefung des in dem Modul „System Erde - Die Grundlagen“ (Baustein 2, Material 1) gewonnenen Wissens zum Systemkonzept und zur Systemanalyse.



**Abbildung 18:** Das Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ im Kontext System Erde. Für die Entstehung der Gesteine der Lithosphäre sind Prozesse aller vier Sphären verantwortlich.

Im Einzelnen sollen die Schüler/innen erkennen, dass

- Gesteine durch Aufschmelzen, Auskristallisieren, Verwittern, Absetzen und Umformen vielfältige Erscheinungsformen ausbilden;
- Gesteine Strukturen enthalten, die Rückschlüsse auf ihre Entstehungsbedingungen zulassen (Zuordnung von Gesteinen zu Erstarrungsgesteinen (magmatische Gesteine), Umwandlungsgesteinen (metamorphe Gesteine) und Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteine));
- Gesteine aus anderen Gesteinen hervorgehen können (Kreislauf der Gesteine);



- der Gesteinskreislauf durch die Prozesse „Verwitterung“ und „Plattentektonik“ angetrieben wird;
- Gesteine Archive der Erdgeschichte darstellen;
- Gesteine Rohstoffe sind (Kohle, Erze, Kies, Gashydrate etc.).

Zur Festigung und Vertiefung der inhaltlichen und methodischen Aspekte kann mit den Schüler/innen der Sekundarstufe II ein geowissenschaftliches Institut als außerschulischer Lernort aufgesucht werden (HLAWATSCH und HANSEN 2005). Die am Ende des Unterrichts noch offenen Fragen werden gesammelt und zu Leitfäden für ein Experteninterview zusammengestellt (Baustein 7 „Experteninterviews“, Material 1). Hierfür bietet sich ein fächerverbindender Geographie- bzw. Chemieunterricht mit dem Fach Deutsch an.

Die Schüler/innen sollen in diesem Unterricht

- üben, eigene Fragen zu formulieren und zunächst mithilfe des Internets und von Fach- und Sachbüchern Informationen zu recherchieren, ihre Fragen selbstständig zu beantworten;
- ein Interview durchführen, dokumentieren und auswerten (Ziel: Die eigenen Rechercheergebnisse auf Korrektheit zu überprüfen und weitere noch offene Fragen klären);
- an einem Forschungsinstitut professionelle Methoden der Gesteinsbestimmung und -interpretation kennen lernen.

Der Baustein 8 „Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen“ (Material 1) ermöglicht einen Einblick in die Bedeutung bestimmter Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen für Industriegesellschaften. Hierdurch sollen die Schüler/innen lernen, dass

- Minerale und Gesteine industriell nutzbar sind und für bestimmte Zwecke synthetisch hergestellt werden können.

Die Bildung von Mineralen und Gesteinen wird durch die Wechselwirkungen von Druck, Temperatur und vorhandenen Stoffen unter Einbeziehung des Faktors Zeit bestimmt. Die **vertiefenden Informationen** bieten für den fächerverbindenden bzw. fachübergreifenden Unterricht vorzugsweise in der 12. bzw. 13. Jahrgangsstufe deshalb die Möglichkeit chemische und physikalische Konzepte problemorientiert zu bearbeiten. Die Schüler/innen sollen erkennen, dass

- Stoffe Umwandlungen unterliegen, die z. B. durch Phasenübergänge oder Verwitterungsprozesse gekennzeichnet sind;
- Informationen über diese Umwandlungen durch die Analyse des Mineralbestandes von Gesteinen zu erhalten sind;
- die Erde aufgrund von Differenzierungsprozessen einen schaligen Aufbau entwickelt hat;
- die Erdkruste in kontinentale Kruste und ozeanische Kruste unterteilt werden kann und dass diese jeweils eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung und verschiedene Dichte aufweisen;
- aus Schmelzversuchen und aus Laborexperimenten, bei denen Gesteine unterschiedlichen Drücken ausgesetzt werden und die Temperatur variiert wird, Phasendiagramme erstellt werden können;
- aufgrund von einem Druck- und Temperaturphasendiagramm des Kohlenstoffs in Kombination mit geowissenschaftlichen Erkenntnissen Bildungsorte für Diamanten im Erdinneren abgeleitet werden können;





- die Kristallstruktur und die Dichte von Mineralen Aufschluss über Druck- und Temperaturbedingungen am Entstehungsort geben;
- die gesteinsbildenden und -verändernden Prozesse in den unterschiedlichen Bildungsbereichen das Ergebnis des Zusammenwirkens geologischer, chemischer und physikalischer Prozesse sind;
- Laborexperimente (z. B. die Analyse von Diamanten mit Einschlüssen) Indizien für die Prozesse der Gesteinsmetamorphose (z. B. Thermochromie und isochemische Umwandlung) liefern und Rückschlüsse auf Ereignisse in der Erdgeschichte ermöglichen. (Am Beispiel des Kohlenstoffs sollen sie exemplarisch ein Phasendiagramm kennen und interpretieren lernen sowie eine vergleichende tabellarische Übersicht zu den beiden Modifikationen Grafit und Diamant erstellen können).

### 3.2 Hinweise zu den Lernvoraussetzungen

Es wird empfohlen, dieses Modul erst nach dem Modul „System Erde – Die Grundlagen“ einzusetzen. Die geowissenschaftlichen und physikalischen Grundlagen für das Verständnis eines Gesteinskreislaufes werden dort gelegt und können durch den Einsatz des Moduls „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ gefestigt und vertieft werden.

Geowissenschaftliche Vorkenntnisse insbesondere zu den Themenbereichen Minerale und Gesteine werden nicht vorausgesetzt. Die Lernenden sollten mit Zeichentechniken (Bleistiftzeichnungen) vertraut sein und schlüssige Objektbeschreibungen vornehmen können. Sie sollten Texte exzerpieren und die gewonnenen Informationen in ein anderes Medium übertragen können.

### 3.3 Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen

#### Vertikale Verknüpfungen

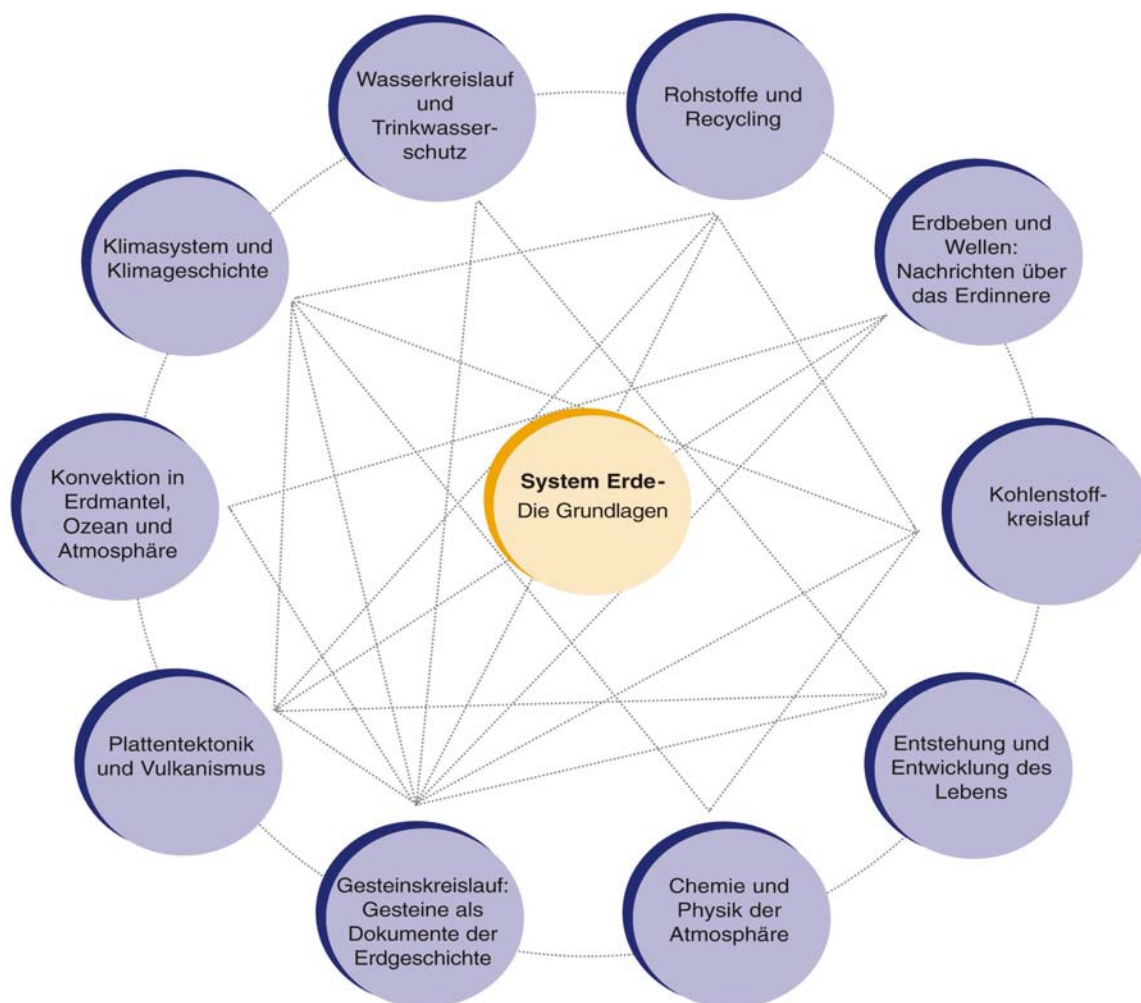
Notwendiges Basiswissen liefert das Modul „System Erde – Die Grundlagen“. Das vorliegende Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ (insbesondere die Bausteine 1 bis 6) stellt für nahezu alle weiteren Module der CD-ROM „System Erde“ eine sinnvolle Grundlage dar:

- Das Element Kohlenstoff ist ein wichtiger Bestandteil des Gesteinskreislaufes (s. Modul „Kohlenstoffkreislauf“). So wurde im Erdzeitalter Karbon sehr viel Kohlenstoff langfristig gespeichert, indem sich Kohlelagerstätten bildeten. In Kalksteinen sind mehr als 99 % des Kohlenstoffs gebunden. Dieser Kohlenstoff kann für mehrere Millionen Jahre im Erdinneren lagern. Durch plattentektonische Prozesse können kohlenstoffhaltige Gesteine an die Erdoberfläche gelangen, wo sie der Verwitterung ausgesetzt sind. Dieser Prozess der Freigabe und Zersetzung wird durch die menschliche Nutzung kohlenstoffhaltiger Rohstoffe (Kohle, Erdöl usw.) stark beschleunigt. Durch das vorliegende Modul erarbeiten die Schüler/innen ein Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf. Diese Kenntnisse können am Beispiel des Kohlenstoffkreislaufes mit Blick auf ein einzelnes Element vertieft werden. Darüber hinaus lernen die Schüler/innen am Beispiel des Kohlenstoffkreislaufes, dass Stoffe in den verschiedenen Sphären unterschiedliche Wirkungen entfalten können. Dies ist von besonderer Bedeutung für das Thema Klimasystem, das durch das Modul „Klimasystem und Klimageschichte“ aufgegriffen und vertieft werden kann.
- Das Modul „Entstehung und Entwicklung des Lebens“ bietet nach der umfassenden Betrachtung des Gesteinskreislaufes die Möglichkeit, sich detailliert mit dem Teilsystem Biosphäre zu befassen. Die Biosphäre der Vergangenheit ist in den Gesteinen archiviert, sodass sich interessante Unterrichtsgänge zu

den Themenbereichen Evolution und Ökologie auf der Basis des Wissens zum Gesteinskreislauf entwickeln lassen.

- Im Zusammenhang mit den Prozessen des Gesteinskreislaufs kommt es zur Bildung von Rohstofflagerstätten. Hierzu gehören Sand- oder Kiesgruben und Basalt als Straßenschotter genauso wie Erzlagerstätten von z. B. Eisen, Kupfer oder gar Gold. Das Modul „Rohstoffe und Recycling“ befasst sich mit der nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen. Durch einen Unterricht mit dem vorliegenden Modul machen die Schüler/innen sich bewusst, dass einige Rohstoffe (z. B. Kohle) bereits vor mehreren hundert Millionen Jahren entstanden sind und auch extrem lange Zeiträume brauchen, um neu gebildet zu werden.

### Horizontale Verknüpfungen



**Abbildung 19:** Das Modul „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ ist mit den anderen Modulen des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ anhand von Hypertexten verlinkt. Dies soll den fächerverbindenden Charakter geowissenschaftlicher Themen aufzeigen und die Planung eines fächerverbindenden Unterrichts erleichtern. Eine Sonderstellung nimmt das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ ein. Es legt die Basis für die Methode der Systemanalyse, die in fast allen weiteren Modulen vertieft wird. Das Modul „Klimasystem und Klimageschichte“ enthält anhand von Baustein 9 einen Vorschlag für einen fächerverbindenden Kurs nach dem Konzept „Forschungsdialog: System Erde“. In diesem Kurs trainieren die Schüler/innen selbst organisiertes Lernen und führen schließlich ein Projekt durch, das sich mit der nachhaltigen Entwicklung des Planeten Erde (Schwerpunkt Klimasystem) befasst.



Das vorliegende Modul ist mit den anderen Modulen des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ vernetzt. Es befasst sich überwiegend mit den stofflichen Eigenschaften des Planeten Erde, während bei dem Modul „Erdbeben und Wellen: Nachrichten über das Erdinnere“ die geophysikalische Erforschung im Zentrum steht. Der physikalische Schwerpunkt des einen Moduls und der chemische des anderen liefern gemeinsam das notwendige Verständnis für den schaligen Aufbau der Erde. Der Gesteinskreislauf wird durch Plattentektonik und durch Verwitterungsprozesse angetrieben. Das Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“ ermöglicht es den Schüler/innen, sich vertiefend mit der Theorie der Plattentektonik zu befassen. Ein weiterer Schwerpunkt des Moduls „Plattentektonik und Vulkanismus“ ist die Bildung von Gesteinsschmelzen im Erdinneren und des Vulkanismus, der ebenfalls eng mit der Plattentektonik verknüpft ist. Mit den physikalischen Grundlagen des Konzeptes der Konvektion, die als eine treibende Kraft der Plattentektonik angesehen wird, befasst sich das Modul „Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre“. Die Bedeutung des Wasserkreislaufes für den Gesteinskreislauf wird im Modul „Wasserkreislauf und Trinkwasserschutz“ thematisiert.

### 3.4 Erläuterung und Nutzungshinweise zu den Materialien

Den **grundlegenden Materialien** sind sieben Bausteine zugeordnet, die im Folgenden kurz erläutert werden. Weiterführende Informationen für Lehrkräfte liefert jeweils das Material 1 der Bausteine. Die Schüler/innen sollen anhand von ästhetischen Gesteins- und Mineralproben phänomenologisch in das komplexe System „Gesteinskreislauf“ eingeführt werden. Falls Ihre Schule keine eigene Gesteinssammlung besitzt, können Sie bei Steinmetzen nach Proben fragen oder Gesteins- und Mineralproben bestellen. Mögliche Bezugsadressen:

- Versandhandel Krantz, Rheinisches Mineralien-Kontor GmbH & Co KG, Fraunhoferstraße 7, 53121 Bonn; Tel.: 0228 / 988 65-0 oder Fax –20; E-Mail: info@Krantz-online.de.

Bei der Firma Krantz ist der speziell für dieses Modul entwickelte „Kieler Kasten“ für ca. 115,- Euro erhältlich (Kasteninhalte: jeweils **einfach** Erstarrungsgesteine (Erdmantelgestein, Granit, Gabbro, Vulkangestein), Umwandlungsgesteine (Gneis, Marmor), Ablagerungsgesteine (Kohle, Sandstein, Kalkstein), Minerale (Pyrit, Calcit, Quarz), Fossilien (Trilobit, Ammonit) im Holzkasten).

- Fair Handeln GmbH, Kirchhofallee 14, 24103 Kiel; Tel.: 0431 / 671008, Fax.: 0431 / 61123.

Unter dem Stichwort „Geoschulbedarf“ ist das ebenfalls speziell für dieses Modul entwickelte „Einsteiger-set - Gesteine“ für 90 € inklusive MwSt. und Versandkosten erhältlich (Kasteninhalte: jeweils **vierfach**: Ablagerungsgesteine (Sandstein, Kalkstein und Feuerstein), Erstarrungsgesteine (Tiefengesteine (roter und weißer Granit) und ein Vulkangestein) sowie Umwandlungsgesteine (Gneis und Marmor). Es handelt sich hauptsächlich um norddeutsche Geschiebe mit jeweils einer durch das Eis glatt geschliffenen Fläche und frischen Bruchflächen. Die Proben sind nummeriert und den drei Gesteinsgruppen zugeordnet.

Der **Baustein 1 „Einstieg in das Thema Steine“** (Material 1) soll die Vielschichtigkeit des auch im Alltag der Lernenden häufig benutzten Begriffes „Stein“ aufzeigen und bewusst machen. Die Schüler/innen sollen eigene Sammelstücke beschreiben, zeichnen und sortieren.

**Baustein 2 „Unterscheidung von Mineral und Gestein“** (Material 1) soll an das erfahrungsgemäß diffuse Vorwissen der Lernenden anknüpfen und den Blick für die beiden Fachbegriffe schärfen.





Durch **Baustein 3 „Klassifizierung von Gesteinen“**<sup>2</sup> (Material 1) sollen die Lernenden ihr erworbenes Wissen festigen, selbst überprüfen und in einen größeren Zusammenhang stellen, indem sie ein Schema des Gesteinskreislaufs entwickeln (Stoffflussdiagramm)). Die verwendeten Gesteins- und Mineralproben sollen die charakteristischen Zuordnungsmerkmale zweifelsfrei und „überdeutlich“ aufweisen. Jeder Arbeitsgruppe sollten gleichzeitig alle benötigten Proben zur Verfügung gestellt werden, da nur so vergleichendes Betrachten gewährleistet ist.

Für den Unterricht mit Materialien **des Bausteins 4 „Erarbeitung des Kreislaufkonzeptes am Computer“** (Material 1) sollte möglichst jeder Schülerin und jedem Schüler ein eigener Computer mit Kopfhörern und CD-ROM Laufwerk zur Verfügung stehen. Die Interaktion „Gesteinskreislauf“ (Material 2) enthält die Sachinformationen zum Gesteinskreislauf in animierter Form, sowie drei interaktive Übungen, die die Schüler/innen selbstständig ausführen können. Die Übungen dienen der Festigung und Vertiefung des zuvor erarbeiteten Wissens. Im Zusammenhang mit der Arbeit am Computer können die Schüler/innen die Aufgabe erhalten, einen Steckbrief anzufertigen. Hierfür steht der Arbeitsbogen „Gesteinssteckbrief“ (Material 3) zur Verfügung.

**Baustein 5 „Versuche zum Gesteinskreislauf“**<sup>2</sup> (Material 1) bietet mit einer Serie von Versuchen die Möglichkeit, sich intensiv mit den Prozessen und Produkten des Gesteinskreislaufs zu befassen und das theoretisch Erlernte auf natürliche Phänomene zu übertragen. Es wird vorgeschlagen, die Versuche nach der Unterrichtsmethode des Stationenlernens durchzuführen. Die Versuche werden hierfür jeweils an Stationen aufgebaut und von den Schüler/innen selbstständig bearbeitet. Die Schüler/innen sollen die Versuche den einzelnen Produkten und Prozessen des Gesteinskreislaufes zuordnen. Ausgewählte Versuche stehen für Demonstrationszwecke als Kurzfilme zur Verfügung („Sedimentation“ Material 15, „Verformung von Fossilien“ Material 16 und „Auffalten von Sedimentschichten“ Material 17).

**Baustein 6 „Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf“** (Material 1) enthält Materialien der Bausteine 3 bis 5, die so aufgearbeitet wurden, dass sie für ein Gruppenpuzzle genutzt werden können. Es handelt sich um 16 Seiten („Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf“ Material 2), die für jede Gruppe (7 Personen) nur einmal ausgedruckt werden müssen. Außerdem steht ein Arbeitsbogen („Arbeitsbericht für Gruppen“ Material 3) zur Verfügung, der ebenfalls nur einmal für jede Gruppe bereitgestellt werden muss. Die Gruppenarbeit kann abschließend anhand des Arbeitsbogens „Beurteilungsbogen“ (Material 4) bewertet werden. Damit kann der Beitrag jeder Schülerin und jedes Schülers in Abstimmung mit der Gruppe eingeschätzt werden, während die Produkte (Poster „Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf“) durch die Lehrkraft bewertet werden. Diese Materialien eignen sich in besonderem Maße für **Projektwochen** oder andere Formen des fächerverbindenden Unterrichts.

Die Schüler/innen werden in Gruppen (Stammgruppen) eingeteilt. Nach einer Einstiegsphase, in der sie verschiedene Gesteine beschreiben und kategorisieren, wählen sie einen Teilaspekt des Gesteinskreislaufs, mit dem sie sich im Selbststudium näher befassen. Hierfür stehen für jedes Gruppenmitglied ein Text und eine Versuchsanleitung zur Verfügung („Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf“ Material 2). Die Schüler/innen der einzelnen Stammgruppen, die den gleichen Text ausgewählt haben, bilden jeweils gemeinsam eine Expertengruppe. Die Experten bearbeiten ihren Text nach einem vorgegebenen Schema. Zurück in den Stammgruppen unterrichten sie ihre Mitschüler/innen. Danach lösen die Stammgruppen gemeinsam Aufgaben, für die das Wissen aller Teilaspekte notwendig ist: Zunächst sollen sie Gesteine mit einem Bestimmungsschlüs-

---

<sup>2</sup> Hinweis: Die Themen der Bausteine 3 bis 5 können nacheinander oder gemeinsam nach der Gruppenpuzzlemethode (Baustein 6) bearbeitet werden.



sel klassifizieren („Einfache Gesteinsbestimmungshilfe“ Baustein 3, Material 6, „Bestimmungsschlüssel Baustein 3, Material 7 oder mit dem interaktiven Gesteinsbestimmungsschlüssel, der von dem Auswahlscreen der Interaktion Gesteinskreislauf“ (Baustein 4, Material 2) gestartet werden kann) und danach ein Poster mit einem Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf erstellen. Dieses soll alle Gesteinsgruppen enthalten, die in den Materialien vorkommen. Für jede Gesteinsgruppe soll eine Zeichnung angefertigt werden, die die typische Struktur zeigt.

**Baustein 7 „Experteninterviews“** (Material 1) dient der Vorbereitung der Schüler/innen auf den Besuch eines Geoinstitutes als außerschulischen Lernort. Sie sollen einen Leitfaden für ein Experteninterview erstellen. Der Leitfaden sollte bereits im Vorfeld an die Experten geschickt werden.

**Baustein 8 „Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen - Gruppenpuzzle“** (Material 1) bietet den Schüler/innen die Möglichkeit sich durch ein weiteres Gruppenpuzzle mit der industriellen Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen zu befassen.

Die **vertiefenden Informationen** folgen dem Konzept der fachlichen Vertiefung und bieten für den fächerverbindenden bzw. fachübergreifenden Unterricht vorzugsweise im 12. bzw. 13. Jahrgang die Möglichkeit, chemische und physikalische Konzepte problemorientiert zu bearbeiten. Am Beispiel des Glimmerminerals Biotit werden die einzelnen Stationen des Gesteinskreislaufes vertieft betrachtet.

Die übergreifende Struktur liefert der **Baustein 9 „Stein unter Druck - Kreislauf des Glimmerminerals Biotit“** (Material 1). Die einzelnen Abschnitte des Gesteinskreislaufs werden kurz und anschaulich u. a. durch Fotos von Gesteinshandstücken, mikroskopischen Aufnahmen mit dem Binokular und dem Polarisationsmikroskop sowie Schemadarstellungen erläutert. Ausgehend vom Baustein 9 sind an verschiedenen Stellen weitergehende Vertiefungen möglich (s. Tab. 6).

Die weiteren Bausteine 10 - 12 bieten Materialien zur naturwissenschaftlichen Detailbehandlung unter fachspezifischen Gesichtspunkten, z. B. für die Bearbeitung im Chemie- oder Physikunterricht:

- **Baustein 10 „Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste - Kristallisation von Schmelzen“** (Material 1) greift eine Beobachtung auf, die auf der Insel Island gemacht werden kann. Dort ragt der mittelozeanische Rücken über den Meeresspiegel hinaus und Magma erstarrt zu ozeanischer Kruste. Die Schüler/innen können durch einen Schülerversuch den Sachverhalt nachvollziehen, dass Mischungen eine niedrigere Schmelztemperatur haben können als reine Stoffe. Sie ermitteln die Kristallisationstemperaturen von zwei Mischungsverhältnissen zweier Minerale, die im festen Zustand nicht mischbar sind („Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste – Kristallisation von Schmelzen: Entstehung der ozeanische Erdkruste“ Material 2). Anschließend können die Schüler/innen anhand eines Arbeitsbogens („Entstehung von Erdkruste - Kristallisation von Schmelzen - Phasendiagramme“ Material 4) in die Darstellungsform „Phasendiagramm“ eingeführt werden. In einem weiteren Schritt sollen Schüler/innen ableiten, wie die kontinentale Erdkruste entstanden sein könnte. Dabei lernen sie die Darstellungsform Dreiecksdiagramm kennen („Entstehung von Erdkruste - Kristallisation von Schmelzen - Entstehung der kontinentalen Kruste“ Material 6).
- **Baustein 11 „Metamorphose - Thermochromie und isochemische Umwandlung“** (Material 1) umfasst eine Videosequenz und eine Folie, die den Prozess Thermochromie veranschaulichen. Außerdem können die Schüler/innen sich anhand des Arbeitsbogens „Metamorphose – Isochemische Umwandlung (Stempel-Zylinder-Pressen)“ (Material 4) mit einer Vorrichtung für Experimente vertraut machen, die die Druck- und Temperaturbedingungen im Erdmantel simuliert. Es handelt sich um die Stempel-Zylinder-Pressen. Am Beispiel der Bildung des Minerals Wollastonit wird anhand eines Arbeitsbogens ein experi-



mentelles Ergebnis anschaulich dargestellt („Metamorphose – Isochemische Umwandlung (Bildung von Wollastonit) Material 5).

**Tabelle 5: Arbeitsformen des Moduls „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“.**

Arbeitsformen	Baustein											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mind Mapping												
Concept Mapping												
Systemanalyse durchführen			•		•	•						
Stoffflussdiagramm entwickeln			•		•	•						
Wirkungsdiagramm entwickeln												
beschreibendes Beobachten		•	•		•	•		•		•		
kriterienbezogenes Vergleichen	•	•	•	•	•	•			•	•		•
Demonstrationsexperiment											•	
Schülerexperiment					•	•				•		
Recherche/ Informationsbeschaffung						•	•	•				•
Texte erfassen und bearbeiten			•	•	•	•	•	•		•	•	•
Interviews mit Expert/innen							•					
an Exkursionen teilnehmen							•					
Gruppenarbeit		•			•		•		•	•		
Stationsarbeit					•							
Gruppenpuzzle (Expertensystem)						•		•				
Projektarbeit							•					
Filme/ Animationen ansehen				•	•	•					•	
Computerinteraktionen bearbeiten			•	•	•	•			•			
Modellsimulationen bearbeiten												
Internet nutzen						•	•					•
Texte verfassen							•					
Referate halten					•	•	•	•				
Poster erstellen			•		•	•		•				
Tabelle, Diagramm, Grafik etc. aus Daten erstellen bzw. interpretieren						•				•		•
bewerten						•	•	•		•		

Der **Baustein 12 „Diamanten erzählen eine heiße Geschichte“** (Material 1) befasst sich aus verschiedenen Blickwinkeln mit dem Thema Diamant. Ein Arbeitsbogen („Diamanten erzählen eine heiße Geschichte – Vergleich Grafit und Diamant“ Material 2) erläutert Eigenschaften von Grafit und Diamant und enthält den Arbeitsauftrag, eine vergleichende tabellarische Übersicht zu Eigenschaften und Verwendung von Grafit und Diamant zu erstellen. Ein weiterer Arbeitsbogen („Diamanten erzählen eine heiße Geschichte





– Phasendiagramm“ Material 3) führt in ein Phasendiagramm für das Reinsystem Kohlenstoff ein und verdeutlicht die Stabilitätsbedingungen für Grafit und Diamant. Hieraus lässt sich ableiten, unter welchen natürlichen Bedingungen Diamant entsteht. Mit einem dritten Arbeitsbogen („Diamanten erzählen eine heiße Geschichte – Diamanten im Erdinneren“ Material 4) wird die Frage beantwortet, auf welche Weise Diamanten Informationen über Bedingungen im Erdinneren archivieren. Daran schließt sich ein umfangreicher Arbeitsauftrag an: Die Schüler/innen sollen anhand eines Phasendiagramms (Modul 3, Baustein 11, Material 3) erläutern, warum Diamanten besonders häufig unter der Oberfläche der ganz alten (besonders mächtigen) Kontinente zu finden sind.

Eine Übersicht der Arbeitsformen in den Bausteinen des Moduls „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ gibt die Tabelle 5 wieder.

## 4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf

**Tabelle 6: Überblick über den Unterrichtsverlauf im Modul Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte. Für jeden Baustein stehen Sachinformationen als Hypertexte zur Verfügung.**

<b>Einstieg</b>	Baustein 1: Ein Einstieg zum Thema Stein		
	Baustein 2: Unterscheidung Gestein-Mineral		
<b>Erarbeitung</b>	Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen	Baustein 6: Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf	
	Baustein 4: Erarbeitung des Kreislaufkonzeptes am Computer Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf		
<b>Vertiefung</b>	Baustein 7: Experteninterviews		
	Baustein 8: Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen – Gruppenpuzzle		
	Baustein 9: Stein unter Druck – Kreislauf des Glimmerminerals Biotit		
	Baustein 10: Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste – Kristallisation von Schmelzen	Baustein 11: Metamorphose – Thermochromie und isochemische Umwandlung	Baustein 12: Diamanten erzählen eine heiße Geschichte

## 5 Literatur

BOLT, B. A. (1995): Erdbeben, Schlüssel zur Geodynamik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT (2003): Teaching the Dynamic Rock Cycle. In: <http://www.earthscienceeducation.com> (letzter Abruf 01.07. 2005)

FREY, K. und FREY-EILING, A. (2005): Das Gruppenpuzzle. System Erde, CD-ROM für die Sekundarstufe II. Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN), Kiel

HLAWATSCH, S. und HANSEN, H. (angenommen): Geoinstitute als außerschulische Lernorte für den Geographieunterricht: Empfehlungen für eine didaktische Gestaltung aus der Evaluation des ersten Kieler Geotages. In: Geographie und ihre Didaktik

HLAWATSCH, S. und VENKE, S. (2005): Schwermetalle in der Ostsee: Kupfer und Zink. In: Unterricht Chemie, Jg. 16, Nr. 86, S. 41 - 43



- HORNBOGEN, E. (2002): Werkstoffe, Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. Springer, Berlin
- JOHANNES, W. und HOLTZ, F. (1996): Petrogenesis an Experimental Petrology of Granitic Rocks. Springer, Berlin
- KING, C., FORDHAM, M. und SMITH, R. (1993): Magma – introducing igneous processes. M3: Crystallising magma. PS2. In: Earth Science Teachers' Association (Hrsg): Science of the earth 11 - 14
- KLIKORKA, J. et. al. (1963): Einführung in die präparative anorganische Chemie. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest und Portig KG
- LEE, P. (2001): Pack 7. Hidden changes in the earth. HC2 Under pressure. PS1 - PS2. In: Earth Science Teachers' Association (Hrsg): Science of the Earth 11 - 14
- LINDEMANN, H. (1999): Salzhydrate als Latentwärmespeicher. In: Indian Chemical Engineering Congress (CHEMCON) 1999, Vol. 1
- MARESC, W. und MEDENBACH, O. (1986): Gesteine. Mosaik Verlag, München
- MATTHEß, S. (1987): Mineralogie. Springer, Berlin
- PAPE, H. (1975): Leitfaden zur Gesteinsbestimmung. Enke, Stuttgart
- PRESS, F. und SIEVER, R. (1995): Allgemeine Geologie - Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg
- STACHEL, T. und BREY, G. (2001): Reise zum Mittelpunkt der Erde. Naturwissenschaftliche Rundschau, 54. Jahrgang, Heft 4
- STANLEY, St. M. (1994): Historische Geologie, Eine Einführung in die Geschichte der Erde und des Lebens. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg
- VENKE, S und HLAWATSCH, S. (2005): Reise ins Erdinnere: Erforschung eines chemisch differenzierten Planeten. Das Gespräch mit dem Kieler Gesteinsforscher Volker Schenk. In: Unterricht Chemie, Jg. 16, Nr. 86, S. 20 - 21
- WINKLER, H.G.F. (1965): Die Genese der metamorphen Gesteine. Springer, Berlin

## 6 Unterrichtsmaterialien

### Baustein 1: Einstieg in das Thema „Steine“



Material 1: Einstieg in das Thema „Steine“ (Information)

### Baustein 2: Unterscheidung von Mineral und Gestein



Material 1: Unterscheidung von Mineral und Gestein (Information)



Material 2: Unterscheidung von Mineral und Gestein (Arbeitsbogen)



### **Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen**



Material 1: Klassifizierung von Gesteinen (Information)



Material 2: Erstarrungsgesteine (Information)



Material 3: Ablagerungsgesteine (Information)



Material 4: Umwandlungsgesteine (Information)



Material 5: Betrachten, Beschreiben und Klassifizieren von Gesteinsproben (Arbeitsbogen)



Material 6: Einfache Gesteinsbestimmungshilfe (Information)



Material 7: Bestimmungsschlüssel (Arbeitsbogen)

### **Baustein 4: Erarbeitung des Kreislaufkonzeptes am Computer**



Material 1: Erarbeitung des Kreislaufkonzeptes am Computer (Information)



Material 2: Gesteinskreislauf (Interaktion, s. CD-ROM „System Erde“)



Material 3: Gesteinssteckbrief (Arbeitsbogen)

### **Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf**



Material 1: Versuche zum Gesteinskreislauf (Information)



Material 2: Versuche zum Gesteinskreislauf (Foliensatz)



Material 3: Gneis vom Kieler Strand (Folie)



Material 4: Frostsprengung (Arbeitsbogen)



Material 5: Chemische Verwitterung (Arbeitsbogen)



Material 6: Sandrippelbildung (Arbeitsbogen)



Material 7: Sedimentation (Arbeitsbogen)





Material 8: Kompaktion und Zementierung von Lockersedimenten (Arbeitsbogen)



Material 9: Auffaltung von Sedimentschichten (Arbeitsbogen)



Material 10: Verformung von Fossilien (Arbeitsbogen)



Material 11: Temperaturabhängige Kristallisation von Schmelzen (Arbeitsbogen)



Material 12: Temperaturabhängige Kristallisation von Schmelzen (Folie)



Material 13: Einregelung (Arbeitsbogen)



Material 14: Alle Versuche: Materialien 4 – 11, 13 (Arbeitsbogen)



Material 15: Sedimentation (Film, s. CD-ROM „System Erde“)



Material 16: Verformung von Fossilien (Film, s. CD-ROM „System Erde“)



Material 17: Auffalten von Sedimentschichten (Film, s. CD-ROM „System Erde“)

#### **Baustein 6:** Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf



Material 1: Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf (Bausteine 3 - 5) (Information)



Material 2: Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf (Arbeitsbogen)



Material 3: Arbeitsbericht für Gruppen (Arbeitsbogen)



Material 4: Beurteilungsbogen (Arbeitsbogen)



Material 5: Gruppenpuzzle (Information)

#### **Baustein 7:** Experteninterviews



Material 1: Experteninterviews (Information)



Material 2: Experteninterviews (Arbeitsbogen)



**Baustein 8:** Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen - Gruppenpuzzle



Material 1: Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen - Gruppenpuzzle (Information)



Material 2: Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen - Gruppenpuzzle (Arbeitsbogen)

**Baustein 9:** Stein unter Druck – Kreislauf des Glimmerminerales Biotit



Material 1: Biotit - Kreislauf (Information)



Material 2: Biotit - Kreislauf (Arbeitsbogen)

**Baustein 10:** Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste – Kristallisation von Schmelzen



Material 1: Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste – Kristallisation von Schmelzen (Information)



Material 2: Entstehung der ozeanischen Erdkruste (Arbeitsbogen)



Material 3: Zustände der Schmelze im Versuch (Folie)



Material 4: Phasendiagramme (Arbeitsbogen)



Material 5: Phasendiagramm (Folie)



Material 6: Entstehung der kontinentalen Erdkruste (Arbeitsbogen)

**Baustein 11:** Metamorphose – Thermochromie und isochemische Umwandlung



Material 1: Metamorphose – Thermochromie und isochemische Umwandlung (Information)



Material 2: Thermochromie bei Quecksilber(II)-iodid (Folie)



Material 3: Thermochromie bei Quecksilber(II)-iodid (Film, s. CD-ROM „System Erde“)



Material 4: Isochemische Umwandlung (Stempel-Zylinder-Pressen) (Arbeitsbogen)



Material 5: Isochemische Umwandlung (Bildung von Wollastonit) (Arbeitsbogen)



## **Baustein 12:** Diamanten erzählen eine heiße Geschichte



Material 1: Diamanten erzählen eine heiße Geschichte (Information)



Material 2: Vergleich Grafit und Diamant (Arbeitsbogen)



Material 3: Phasendiagramm (Arbeitsbogen)



Material 4: Diamanten im Erdinneren (Arbeitsbogen)

### **Weitere Materialien:**

EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT (2003): Resources for Schools. Unterrichtsmaterialien in englischer Sprache zum Beispiel zum Thema Teaching the Dynamic Rock Cycle.

Bezugsquelle: <http://www.earthscienceeducation.com> (letzter Abruf 01.07. 2005)





## Baustein 2: Unterscheidung von Mineral und Gestein

### ❶ Materialien:

- pro Arbeitsgruppe je drei Gesteinsproben (Sandstein, Vulkangestein, Marmor)
- pro Arbeitsgruppe je 3 Kristalle (Pyrit, Quarz und Calcit)
- Lupen, Bleistifte zum Zeichnen

### ❷ Zeichnen Sie wesentliche Merkmale der Proben!

Sandstein	Vulkangestein	Marmor
Pyrit	Quarz	Calcit



**③ Beschreiben Sie wesentliche Merkmale der Proben!**

Sandstein
Vulkangestein
Marmor
Pyrit
Quarz
Calcit

**④ Versuchen Sie anhand Ihrer Beobachtungen und Aufzeichnungen Definitionen für die Begriffe Mineral und Gestein aufzustellen und ordnen Sie die Proben entsprechend zu!**

Mineral:	Gestein:
Proben:	Proben:



## Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen

### Erstarrungsgesteine

Erstarrungsgesteine entstehen aus heißer, flüssiger Gesteinsschmelze. Gesteine schmelzen im Erdinneren, wo es heißer als 1.000 °C ist und sehr hohe Drücke von vielen Tausend Bar herrschen. Diese Gesteinsschmelze (das Magma) steigt in die kältere Erdkruste auf, kühlt dort ab und erstarrt. Auf diese Weise entstehen die Erstarrungsgesteine, welche auch magmatische Gesteine genannt werden. Je nach Entstehungsart können Tiefen- und Vulkangesteine unterschieden werden:

- **Tiefengesteine (Plutonite)** entstehen, wenn Magma tief im Erdinneren langsam abkühlt. Die Minerale haben viel Zeit zum Wachsen und es entstehen mittel- bis grobkörnige Kristalle, die unter der Lupe gut zu erkennen sind.
- **Vulkangesteine (Vulkanite)** entstehen in der Nähe der Erdoberfläche. Reißt eine Gesteinsspalte plötzlich auf, bahnt sich das Magma sehr schnell seinen Weg an die Erdoberfläche. Dort kühlt es schneller ab als im Erdinneren. Deshalb entstehen kleinere Kristalle. Oftmals sind im Erdinneren schon größere Kristalle entstanden, die dadurch von sehr vielen kleineren Kristallen umgeben werden. Nicht alle Kristalle sind unter der Lupe gut zu erkennen. Das entstehende Erscheinungsbild ist typisch für Gesteine, die auf Vulkanismus zurückzuführen sind. Man spricht von porphyrischem Gefüge. Vulkanische Gesteine können auch ausschließlich aus kleinen Kristallen bestehen.

### Ausgewählte Vertreter der Gesteinsgruppe der Erstarrungsgesteine

	<p><b>Typ:</b> Tiefengestein (Plutonit)</p> <p><b>Name:</b> Granit</p> <p><b>Bestandteile:</b> Quarz (gräulich), Glimmer (schwarz), Feldspat (weiß)</p> <p><b>Gefüge:</b> körnig, Minerale von gleichmäßiger Größe, unregelmäßig</p> <p><b>Entstehung:</b> Magma kühlte im Erdinneren vollständig und gleichmäßig ab, sodass alle Minerale eine einheitliche Größe erzielten.</p>
	<p><b>Typ:</b> Vulkangestein (Vulkanit)</p> <p><b>Name:</b> Rhyolith (Rhombenporphyr)</p> <p><b>Bestandteile:</b> Deutlich sichtbare rötliche und gelbliche Minerale (Feldspäte) umgeben von einer scheinbar homogenen Grundmasse in der Kristalle enthalten sind, die mit dem bloßen Auge nicht identifiziert werden können.</p> <p><b>Gefüge:</b> porphyrisch (größere Kristalle umgeben von kleineren Kristallen)</p> <p><b>Entstehung:</b> Zunächst kühlte das Magma im Erdinneren relativ langsam ab, stieg mit den bereits kristallisierten Feldspäten in die Nähe der Erdoberfläche auf und kristallisierte dort so schnell, dass nur noch sehr kleine Minerale entstanden.</p>



## Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen

### Ablagerungsgesteine (Sedimentgesteine)

Für die Entstehung von Ablagerungsgesteinen ist die Verwitterung von großer Bedeutung. In den kalten Zonen der Erde und in den Hochgebirgen geschieht die Verwitterung vor allem durch Frostsprengung, in den feuchten Tropen durch chemische Zersetzung. Die entstehenden Verwitterungsprodukte werden durch Wasser, Wind oder Eis abgetragen und an Land oder im Meer abgelagert. Sie sind zunächst unverfestigt und werden deshalb als Lockersedimente bezeichnet. Lockersedimente können auch aus Ausfällungsprodukten von im Wasser gelösten Stoffen und aus Überresten von Organismen bestehen. Durch die schwere Auflast nachfolgender Lockersedimente werden sie kompaktiert. Minerale wachsen in den Hohlräumen und zementieren die lockeren Bestandteile. Kompaktion und Zementation führen zur Verfestigung der Lockersedimente. Der Prozess wird als Diagenese bezeichnet. So können alle Gesteinstypen der Erde durch Verwitterung, Abtragung und Transport zu Lockersedimenten und anschließender Diagenese zu Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteine) werden.

Ablagerungsgesteine stellen Archive der Erdgeschichte dar, weil sie meist über Zeiträume Tausenden oder gar Millionen von Jahren abgelagert wurden. Oftmals enthalten die einzelnen Schichten heute ausgestorbene versteinerte Tiere und Pflanzen sowie Gesteinsbruchstücke. Beide Komponenten liefern Informationen über die Erde zu längst vergangenen Zeiten. So lässt sich zum Beispiel das Aussehen der Erde im Erdzeitalter Karbon von vor ca. 359 - 299 Millionen Jahren rekonstruieren. Damals wurden besonders viele Pflanzen abgelagert. Nach der Diagenese entstand daraus Kohle, die heute als fossiler Rohstoff gefördert wird (s. Tab. 1).

Entsprechend der Ablagerungsart werden biogene, chemische und klastische Ablagerungsgesteine unterschieden:



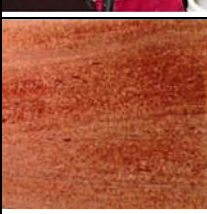

- **Biogene Ablagerungsgesteine** entstehen, wenn Überreste von Lebewesen nach dem Absterben abgelagert werden und versteinern. Dies kann an Land und im Meer geschehen. So leben z. B. Mikroorganismen wie Diatomeen, Coccolithoforiden und Foraminiferen im Ozeanwasser. Diatomeen bauen ihre Schalen aus Kieselsäure, Foraminiferen dagegen aus Kalk. Die Coccolithoforiden haben ihre Zellen mit Kalkplättchen gepanzert, den Coccolithen. Nach dem Absterben sinken die meisten Organismen zu Boden und werden zersetzt. Ein geringer Teil, nur etwa 1 % der kieseligen und kalkigen Gehäuse, landet schließlich am Meeresboden. Dort werden sie durch Diagenese zu Gestein, die kalkigen Skelette zu Kalkstein und die kieseligen Skelette zu Kieselschiefer. Während des Erdzeitalters Kreide von vor etwa 145 Millionen Jahren bis vor etwa 65 Millionen Jahren haben sich aus den damals lebenden Coccolithen und Diatomeen mächtige Lockersedimentschichten am Meeresgrund gebildet. Aus ihnen sind zum Beispiel die Kreidefelsen auf Rügen entstanden. Deutlich heben sich von der weißen kalkigen Kreide dunkle Schlieren aus kieseligem Chert [sprich: schört] ab. Im Volksmund werden diese Steine auch als Feuersteine bezeichnet, weil sie früher zum Feuermachen verwendet wurden.
- **Chemische Ablagerungsgesteine:** Gelöste Stoffe wie Karbonate, Natriumchlorid oder Schwermetalloxide können aus Gewässern ausfallen, wenn der Sauerstoffgehalt im Wasser, die Temperatur oder der Druck sich ändern. So kristallisieren die im Meerwasser gelösten Salze aus, wenn ein Meer in tropischen Breiten - aufgrund der dort herrschenden hohen Temperaturen - verdunstet. Sie scheiden sich entsprechend ihrer Löslichkeit ab: zuerst der schwer lösliche Kalk, dann Gips, danach Steinsalz und zuletzt die am leichtesten löslichen Kalisalze. Die ausgefallenen Stoffe bilden zunächst Partikel in der Wassersäule und schließlich - nach dem Absinken - neue Schichten auf dem



Lockersediment. Einen Spezialfall von Ablagerungsgesteinen stellen die aus Wasser und Methan bestehenden Gashydrate dar. Sie sehen so ähnlich aus wie Eis und entstehen in Regionen mit großen Mengen an Methan und Wasser bei niedrigen Temperaturen oder hohen Drücken (z. B. Permafrostgebiete, Ozeanboden ab einer Wassertiefe von ca. 400 m). Relativ geringe Druckverringerungen bzw. Temperaturerhöhungen können dazu führen, dass die Gashydrate zerfallen und das Methan wieder freisetzen. Das kann geschehen, wenn gashydrathaltiger Ozeanboden durch Plattentektonik in geringere Wassertiefen mit niedrigeren Drücken gehoben wird. Das Freisetzen großer Mengen von Methan trägt zum natürlichen Treibhauseffekt bei.

- **Klastische Ablagerungsgesteine** entstehen durch Verwitterung. Ihre Bildung erfolgt in mehreren Teilschritten: Verwitterung durch mechanische, chemische und biologische Gesteinszerstörung; Abtragung und Verfrachtung durch Wasser, Wind, Eis und/oder Schwerkraft, wobei während des Transports eine Sortierung des Materials nach Größe bzw. Gewicht stattfinden kann; Ablagerung und Diagenese.

**Tabelle 1: Ausgewählte Vertreter der Gesteinsgruppe der Ablagerungsgesteine.**



	<p><b>Typ:</b> biogenes Ablagerungsgestein  <b>Name:</b> Korallenriffkalk  <b>Bestandteile:</b> Calcit (versteinerte Korallenskelette)  <b>Gefüge:</b> Korallen sind noch zu erkennen  <b>Entstehung:</b> Korallenskelette werden durch Lockersedimente bedeckt und im Zuge der Diagenese Teil einer Gesteinschicht</p>
	<p><b>Typ:</b> chemisches Ablagerungsgestein  <b>Name:</b> Gashydrat  <b>Bestandteile:</b> Methan, Schwefelwasserstoff und andere Gase, die in Wassermoleküle käfigartig eingeschlossen werden  <b>Gefüge:</b> Die Gashydrate treten als Lagen in Lockersedimenten auf.  <b>Entstehung:</b> unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen werden die Bestandteile fest</p>
	<p><b>Typ:</b> klastisches Ablagerungsgestein  <b>Name:</b> Sandstein  <b>Bestandteile:</b> Quarzkörner, rötliche Färbung durch ausgefällte oxidierte Eisenverbindungen  <b>Gefüge:</b> einzelne Sandschichten unterschiedlicher Färbung bzw. Korngröße  <b>Entstehung:</b> durch die Verfestigung von weit transportiertem feinkörnigem Verwitterungsschutt</p>
	<p><b>Typ:</b> chemisches Ablagerungsgestein  <b>Name:</b> Manganknolle  <b>Bestandteile:</b> Mangan- und Eisenoxide bzw. -hydroxide  <b>Gefüge:</b> wechselnde mangan- und eisenreiche Lagen  <b>Entstehung:</b> Ausfällung aus dem Wasser</p>

## Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen

### Umwandlungsgesteine

Gelangen Gesteine von der Erdoberfläche in Erdzonen mit höheren Drücken und Temperaturen oder werden sie von heißem Magma in ihrer Nachbarschaft erwärmt, wandeln sich die in den Gesteinen enthaltenen Minerale durch chemische Reaktionen um. Der Prozess wird als Metamorphose und die entstehenden Gesteine werden als Umwandlungsgesteine oder metamorphe Gesteine bezeichnet. Auch Sedimentgesteine werden durch erhöhte Drücke und Temperaturen umgewandelt. Aus Kalkstein entsteht dabei Marmor.

**Tabelle 1: Beispiel für Vertreter der Gesteinsgruppe der Umwandlungsgesteine.**

	<p><b>Typ:</b> Umwandlungsgesteine</p> <p><b>Name:</b> Gneis</p> <p><b>Bestandteile:</b> Glimmer (schwarz), Feldspäte (weiß), Quarz (weiß), manchmal Granat (rot)</p> <p><b>Gefüge:</b> grobkörnig, deutlich geschiefert, geregelt</p> <p><b>Entstehung:</b> durch Methamorphose z. B. aus Erstarrungs- oder Ablagerungsgesteinen</p>
	<p><b>Typ:</b> Umwandlungsgesteine</p> <p><b>Name:</b> Marmor</p> <p><b>Bestandteile:</b> Calcit</p> <p><b>Gefüge:</b> gleichmäßige Kristallgröße, fein bis grobkörnig</p> <p><b>Entstehung:</b> durch Metamorphose (Umwandlung) aus Kalkstein</p>

Gesteine gelangen vor allem durch Plattentektonik in große Tiefen: Die Lithosphäre ist in eine Anzahl von Platten zerbrochen, die auf dem plastischen Erdinneren driften. Es lassen sich ozeanische und in kontinentale Lithosphärenplatten unterscheiden. Die ozeanischen Lithosphärenplatten sind spezifisch schwerer als die kontinentalen Platten und können deshalb in das Erdinnere abtauchen, sobald sie auf kontinentale Erdkruste treffen. Dieses Abtauchen wird als Subduktion bezeichnet. Angetrieben wird die Bewegung der Lithosphärenplatten unter anderem durch Konvektionsströme<sup>1</sup> im Erdinneren. Bei der Versenkung steigt die Temperatur, was zur teilweisen Aufschmelzung der ozeanischen Kruste und der mitgeführten Lockersedimente vom Meeresgrund führen kann. Es entstehen so genannte Fluide, die aufsteigen. Die Gesteine, die von den heißen Fluiden durchströmt werden, schmelzen teilweise auf oder werden stark erhitzt und dadurch zu metamorphen Gesteinen. Die entstehenden Gesteinsschmelzen (Magma) können bis an die Erdoberfläche aufsteigt und dort Vulkane bilden.

Metamorphe Gesteine sind im Erdinneren oft hohen Drücken ausgesetzt und weisen deshalb nicht selten eine geschieferte Struktur auf. Diese kommt zustande, wenn plättchenförmige Minerale sich mit ihrer größten Oberfläche senkrecht zur Druckrichtung einregeln. Während der Metamorphose können schön ausgebildete Minerale wie Granat oder Diamant entstehen (s. Tab. 1).

<sup>1</sup> Insgesamt werden heute drei Prozesse als Ursache für die Plattentektonik angenommen, die im Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“ ausführlich erläutert werden.



## Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen

### Betrachten, Beschreiben und Klassifizieren von Gesteinsproben

#### ❶ Materialien:

- pro Arbeitsgruppe (4 Personen):
  - 4 mal den Arbeitsbogen „Betrachten, Beschreiben und Klassifizieren von Gesteinsproben“ (Modul 3, Baustein 3, Material 5)
  - 4 Gesteinsproben (rauer, geschichteter Sandstein, Basalt, Gneis, Granit)
  - mindestens 1 mal Informationen „Erstarrungsgesteine“, „Ablagerungsgesteine (Sedimentgesteine)“ und „Umwandlungsgesteine“ (Modul 3, Baustein 3, Materialien 2 - 4)
  - 4 Bleistifte, möglichst mehrere Lupen
  - DIN - A0 - Bogen und dicke Faserstifte

#### ❷ Zeichnen Sie wesentliche Merkmale der Proben!

Sandstein	Gneis
Basalt	Granit

**3 Beschreiben Sie wesentliche Merkmale der Proben!**

Sandstein
Basalt
Gneis
Granit

**4 Erläutern Sie, wie die Gesteine entstanden sein könnten und klassifizieren Sie die Proben!**

Die Informationen (Modul 3, Baustein 3, Material 2 – 4) liefern Hinweise auf die Entstehungsbedingungen der häufigsten Gesteinstypen. Verwenden Sie die einfache Bestimmungshilfe (Modul 3, Baustein 3, Material 6) für die Klassifizierung in Erstarrungs-, Umwandlungs- und Ablagerungsgesteine.

Sandstein:
Gneis:
Basalt:
Granit:





### ⑤ Erstellen eines Posters zum Gesteinskreislauf:

Entwickeln Sie anhand der Informationen zum Gesteinskreislauf ein einfaches Schema des Kreislaufs der Gesteine (Stoffflussdiagramm). Stellen sie das Ergebnis als Poster mit der Überschrift „Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf“ dar. Das Diagramm soll die wesentlichen Elemente und Beziehungen berücksichtigen, die für die Entstehung von Gesteinen von Bedeutung sind.

Jede Arbeitsgruppe präsentiert ihr Poster. Im Klassenverband wird eine Fehlerdiskussion durchgeführt.

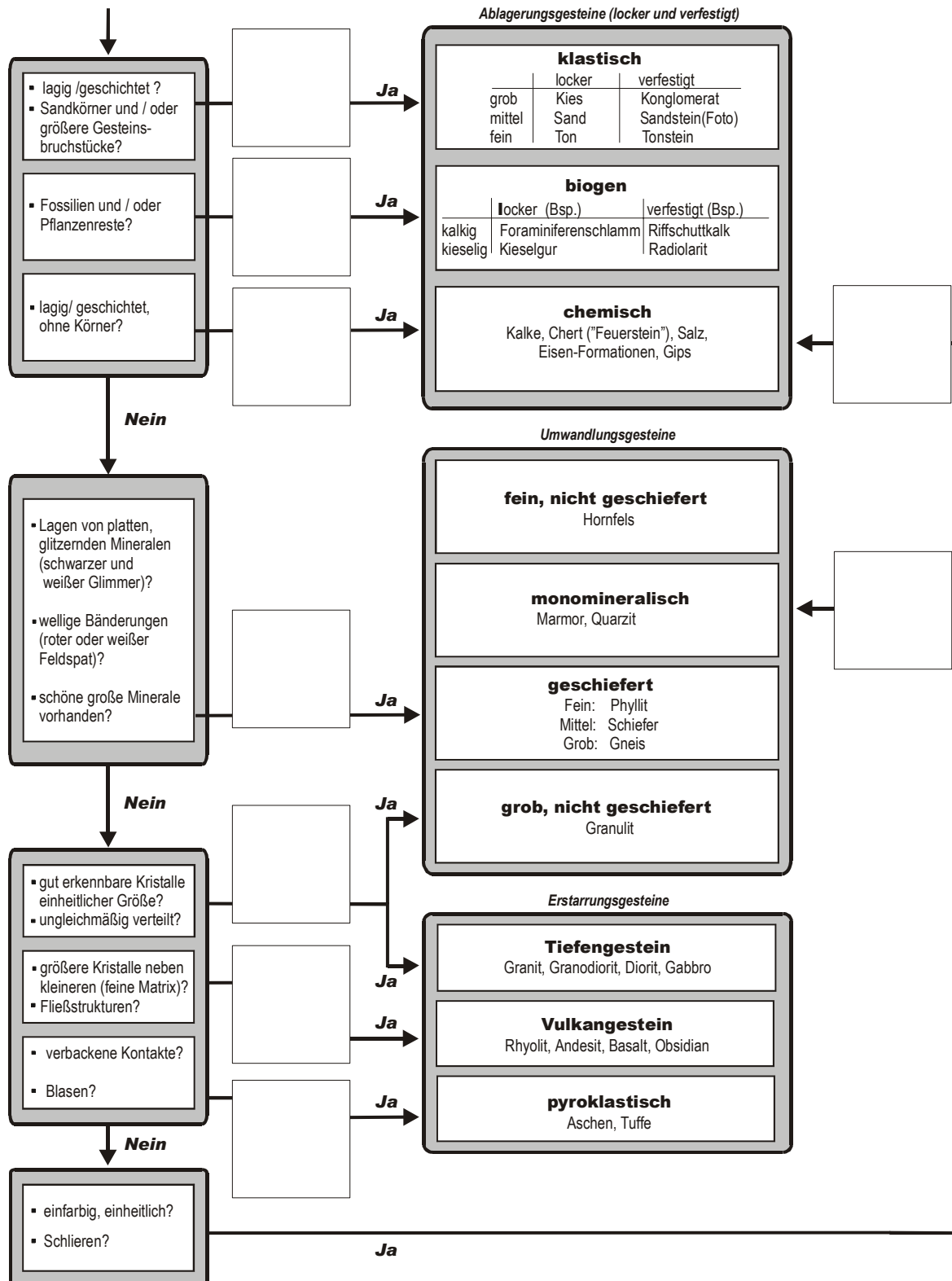
Korrigieren Sie Ihr Stoffflussdiagramm nach der Fehlerdiskussion und tragen Sie hier das Ergebnis Ihrer Gruppe ein:

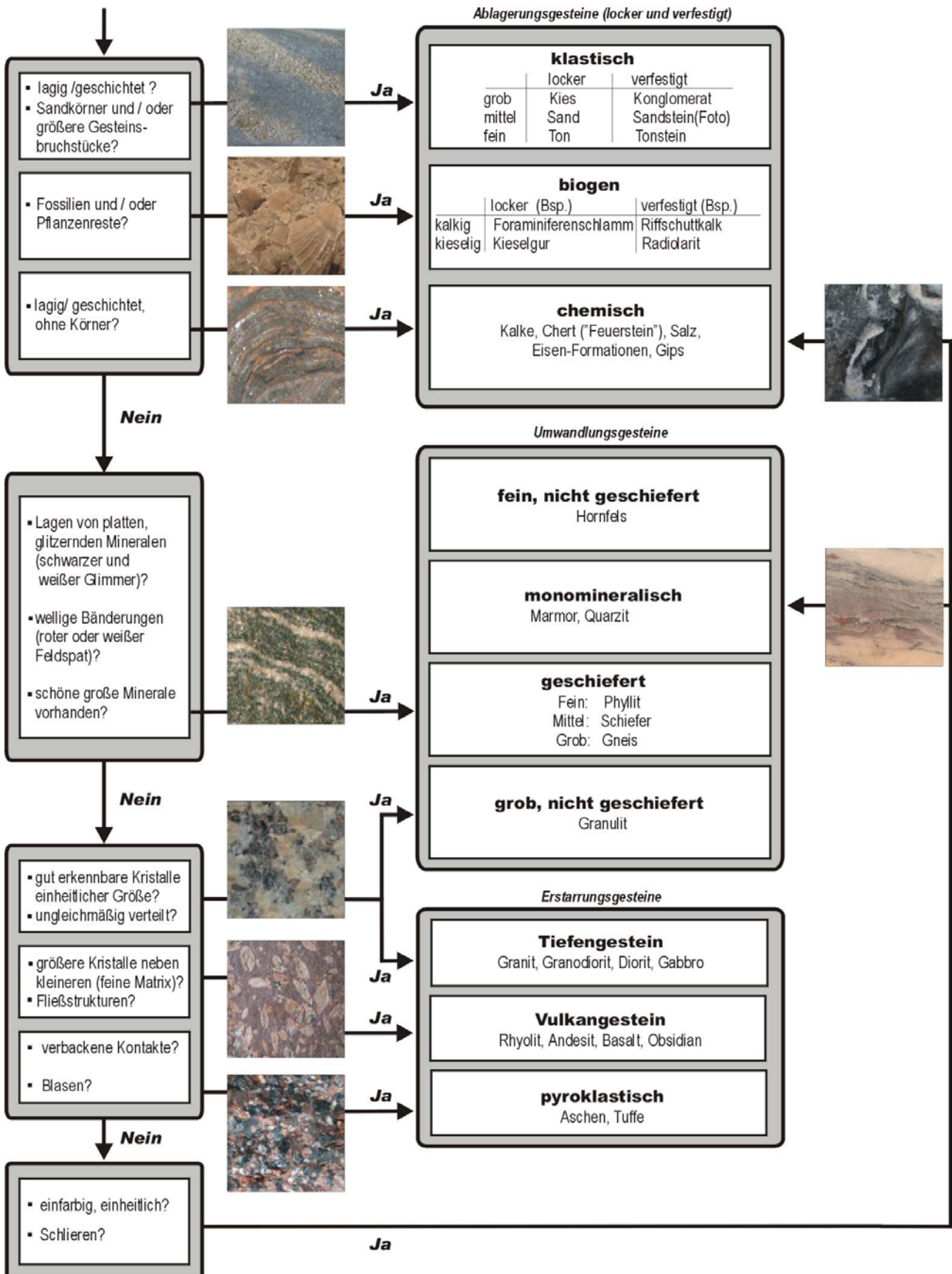
# Einfache Bestimmungshilfe



### Baustein 3: Klassifizierung von Gesteinen

#### Bestimmungsschlüssel









## Baustein 4: Erarbeitung des Kreislaufkonzepts am Computer

### Gesteinskreislauf

Zeit: 10 - 180 Minuten

#### ❶ Materialien:

- 1 Computer/Notebook mit CD-ROM Laufwerk (möglichst mit einem Headset) auf dem die CD-ROM „System Erde“ gespeichert wurde.
- Die Interaktion „Gesteinskreislauf“ (Modul 3, Baustein 4, Material 2)

#### ❷ Vorbemerkung:

Bei dem computergestützten Material „Gesteinskreislauf“ (Modul 3, Baustein 4, Material 2) handelt es sich um eine Interaktion mit verschiedenen Elementen (s. Abb. 1). Nach dem Start öffnet sich zunächst ein Auswahlscreen mit verschiedenen Elementen, die mit einem Pfeil versehen sind, der zum Öffnen angeklickt werden kann. Es handelt sich um

- die Animation „Einführung“ mit grundlegenden Informationen (Dauer: 5 Minuten 30 Sekunden).
- Animationen zu den Begriffen „Diagenese“, „Verwitterung“, „Magma“, „Umwandlungsgesteine“, „Erstarrungsgesteine“ und „Ablagerungsgesteine“
- Steckbriefe für ausgewählte Gesteine, die auf dem Auswahlscreen abgebildet sind und die angeklickt werden können
- eine interaktive „Gesteinsbestimmung“
- die Rubrik „Testen Sie Ihr Wissen“ mit drei kleinen interaktiven Übungen zum Thema Gesteine und Gesteinskreislauf.

#### ❸ Durchführung:

- **Anweisung zum Öffnen der Interaktion „Gesteinskreislauf“:** Starten Sie die CD-ROM des Projektes „Forschungsdilog: System Erde“ (die Intro der CD-ROM kann übersprungen werden), klicken Sie auf der Startseite das Modul 3 „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ an. Wenn Sie im Inhaltsfenster auf „Sachinformation“ klicken, werden unten links sechs kleine Bilder angezeigt. Ganz links finden Sie die Interaktion „Gesteinskreislauf“. Sie wird mit einem Klick ins Vorschauenfenster geladen und mit einem Doppelklick geöffnet.



Abbildung 1: Der Auswahlscreen der Interaktion „Gesteinskreislauf“ (Modul 3, Baustein 4, Material 2).



## Baustein 4: Erarbeitung des Kreislaufkonzeptes am Computer

### Gesteinssteckbrief

Nr. \_\_\_\_\_ Gesteinstyp: \_\_\_\_\_

Bearbeiter/in: \_\_\_\_\_

Bestandteile (mit Erkennungsmerkmal):

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Anordnung der Bestandteile: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Überlegungen zur Entstehung des Gesteines**

Woraus könnte der Stein entstanden sein?

\_\_\_\_\_

Skizze



Ausführliche Beschreibung der vermuteten Entstehungsgeschichte des Gesteins mit Hinweisen zu den Indizien für die Vermutung: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Was könnte aus dem Stein werden? \_\_\_\_\_

Möglicher Gesteinsname: \_\_\_\_\_

Begründung: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Weitere Anmerkungen: \_\_\_\_\_

## Fossile Sandrippel von der Insel Helgoland



20 cm



## Purbeck Beds in Stairhole bei Lulworth in Südengland



Bild: H. WAGNER, CAU zu Kiel

40 m



## Grober geschichteter Sandstein vom Plöner See bei Kiel



Bild: S. HLAWATSCH, IPN (Kiel)

10 cm



# Gneis vom Kieler Strand



A. HEIDRICH, IPN

20 cm



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Frostsprennung

#### ❶ Materialien:

- eine kleine Tetrapak-Verpackung (z. B. 250 ml Kaffeesahne oder Orangensaft)
- einen kleinen Luftballon
- Paketklebeband
- Gips
- Gipsbecher und Spatel
- Becherglas (100ml)
- Leitungswasser

#### ❷ Durchführung:

- I. Vorsichtig Leitungswasser in den Luftballon füllen (etwa 10 - 15 ml).
- II. Den Luftballon verschließen und mit dem Paketklebeband einmal an der breitesten Stelle so umwickeln, dass ein kleiner Spalt frei bleibt. Vorsicht: Es darf keine Luftblase im Inneren des Luftballons bleiben.
- III. In zwei Arbeitsschritten die Verpackung mit angerührtem Gips auffüllen. Zweimal je 15 leicht gehäufte Spatellöffel (entspricht etwa 130 ml trockenem Gips) in einem Becherglas mit je 60 ml Wasser anrühren. Der Gips sollte nicht zu dünnflüssig sein, da sonst das Abbinden zu lange dauert. Ist er zu zähflüssig, lässt er sich nicht gleichmäßig in dem Tetrapak verteilen.
  - Die 1. Portion Gips in die Verpackung einfüllen und warten, bis der Gips leicht abbindet. Den mit Wasser gefüllten Luftballon senkrecht stehend in den Gips leicht hinein drücken (der Ballon sollte zentral positioniert werden und nicht die Wände der Verpackung berühren).
  - Mit der 2. Portion Gips den Luftballon vollständig und gleichmäßig von allen Seiten einzementieren.
- IV. Das Abbinden des Gipses dauert etwa 30 Minuten. Danach wird die Tetrapak-Verpackung aufgerissen und der Gipsblock über Nacht in ein Gefrierfach gestellt. Als Vergleichsprobe kann man einen Gipsblock ohne wassergefüllten Luftballon dazustellen.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben und begründen Sie Ihre Beobachtungen.
- 2) Kennen Sie ähnliche Prozesse in der Natur?
- 3) Welche Bedeutung hat der Prozess im Kreislauf der Gesteine?





## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Chemische Verwitterung

#### ❶ Materialien:

- Kalkstein oder Kalksandstein (z. B. Plattenkalk, Solnhofen, Bayern)
- Petrischale
- Salzsäure (max. 10 %)
- Schutzbrille, Laborkittel und Handschuhe

#### ❷ Sicherheitshinweise:

- Beim Arbeiten mit Salzsäure immer Schutzkleidung und –brille benutzen!
- Nachdem der Stein von der Salzsäure teilweise angelöst wurde, **muss** dieser mit Wasser abgespült werden. Mit ein paar Tropfen Spülmittel (leicht alkalisch!) lassen sich Salzsäurereste auf der Hand neutralisieren.

#### ❸ Durchführung:

Kalk- bzw. Kalksandstein in die Petrischale legen und vorsichtig mit einer Pipette einen kleinen Tropfen Salzsäure daraufträufeln.

#### ❹ Aufgaben:

- 1) Beschreiben und erläutern Sie das Experiment und die Ergebnisse.
- 2) Gibt es ähnliche Prozesse in der Natur?
- 3) Welche Bedeutung hat die chemische Verwitterung für den Kreislauf der Gesteine?

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Sandrippelbildung<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- 1 Plasticaquarium (Größe 20 x 20 x 40 cm)
- ca. 500 g Sand (z. B. Quarzsand, Korndurchmesser 0,1 – 0,4 mm oder Vogelsand, Korndurchmesser 0,25 – 0,8 mm)
- Leitungswasser
- optional: dunkle Unterlage (z. B. schwarzes Tonpapier)

#### ❷ Durchführung:

- I. Das Plasticaquarium etwa 5 cm hoch mit Leitungswasser befüllen.
- II. 1 - 2 Esslöffel Sand in das Aquarium einstreuen und warten, bis der Sand sich abgesetzt hat.
- III. Das Aquarium über eine schmale Seite fortwährend etwa 2 cm anheben und senken (s. Abb. 1). Der Wasserkörper soll dabei leicht und gleichmäßig hin- und herschwingen. Auf einer dunklen Unterlage ist das Versuchsergebnis besonders gut zu erkennen.

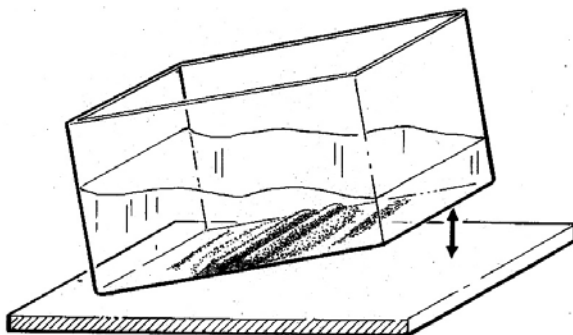


Abbildung 1: Sandrippelbildung; links im Versuch; rechts fossile Rippelmarken in einem Sandstein von der Insel Helgoland

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.
- 2) Wo tritt dieser Prozess in der Natur auf?
- 3) Welche Hinweise liefert dieser Versuch für die Entstehung von Sandrippeln?
- 4) Sie finden einen roten Sandstein auf Helgoland. Er enthält Sandrippelstrukturen (s. Abb. 1). Was lernen Sie daraus über die Geschichte von Helgoland?

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Sedimentation

#### ❶ Materialien:

- durchsichtige Wasserflasche aus Glas oder Plastik, möglichst mit flachem Boden (1,5 oder 2 l Volumen)
- je etwa 100 g grober Sand (Korndurchmesser ca. 1 – 2 mm) und feiner Sand (z. B. Quarz- oder Vogelsand; Korndurchmesser 0,1 – 0,8 mm) sowie etwa 40 g getrockneter Lehm oder Ton
- Leitungswasser
- Optional: großer, möglichst geschichteter Sandstein

#### ❷ Durchführung:

- I. Sand und Lehm bzw. Ton in die Flasche geben, mit Leitungswasser auffüllen und fest verschließen.
- II. Die Flasche kräftig schütteln, sodass sich alle Bestandteile gut vermischen und der Lehm/Ton vollständig aufgeschlämmt wird.

**Hinweis:** Das Schütteln der Sedimentflasche sollte in kreisenden Bewegungen erfolgen. In einem rotierenden Wasserkörper werden leichte Schwebpartikel länger in Bewegungen gehalten.

- III. Die gut durchgeschüttelte Flasche wird zur Beobachtung auf einen Tisch gestellt. Das Endergebnis zeigt sich erst nach mehreren Stunden.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Wo tritt dieses Phänomen in der Natur auf?
- 2) Wo tritt dieses Phänomen in der Natur auf?
- 3) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten (s. Abb. 1)?



Abbildung 1: Gesteinstyp, dessen Entstehungsprozess durch den Versuch veranschaulicht werden soll.

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Kompaktion und Zementierung von Lockersedimenten<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- Plastikspritze (50 ml; Laborbedarf), deren Vorderende abgeschnitten wurde
- etwas Vaseline oder anderes Gleitmittel
- Vogelsand, Lehm/Ton, Gips und Leitungswasser
- Gipsbecher (Behältnis zum Vermengen von Sand, Lehm/Ton und Gips mit dem Wasser)
- Spatel
- saugfähige Unterlage (Küchenpapier) und Trockenschrank (optional)
- großer Sandstein oder Folie (Modul 3, Baustein 5, Material 2, Seite 3)

#### ❷ Durchführung:

- I. Im Gipsbecher werden folgende Mischungen jeweils trocken vermengt, mit etwas Wasser angerührt und in die vorher leicht mit Vaseline eingefettete Plastikspritze gefüllt:
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Gips + 8 ml Wasser
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Lehm/Ton + 10 ml Wasser
  - 6 gehäufte Spatellöffel Sand + 10 ml Wasser
- II. Das offene Ende der Plastikspritze mit der Handfläche leicht verschließen und den Kolben der Spritze so lange kräftig drücken, bis keine Luft und kein Wasser mehr herausgepresst werden können (Abbildung).
- III. Die Mischung vorsichtig aus der Spritze auf das Küchenpapier drücken und zum Trocknen auf die Fensterbank oder in den Trockenschrank stellen.



#### ❸ Aufgaben:

- 1) Reiben Sie mit dem Finger an den getrockneten Mischungen. Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Welche chemischen und physikalischen Vorgänge laufen in diesem Versuch ab?
- 3) Wie nennt man diesen Prozess der Gesteinsbildung?

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Auffaltung von Sedimentschichten<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- Plasticaquarium (Größe etwa 20 x 20 x 40 cm)
- 2 kleine Sperrholzplatten oder feste Pappstücke, die etwas schmaler sind als das Aquarium breit ist, aber etwa um die Hälfte höher
- ca. 500 g trockener Sand und verschiedene Farbstoffe (Lebensmittelfarben)

#### ❷ Durchführung:

- I. Die beiden Sperrholzplatten in einem Abstand von je 1 - 2 cm von den Seitenwänden in das Plasticaquarium stellen.
- II. Mehrere Lagen (Schichthöhe etwa 1 - 2 cm) gefärbten trockenen Sandes gleichmäßig in das Aquarium schütten, sodass eine parallele Schichtung entsteht.
- III. Die beiden Holzplatten senkrecht zueinander vorsichtig zusammendrücken.

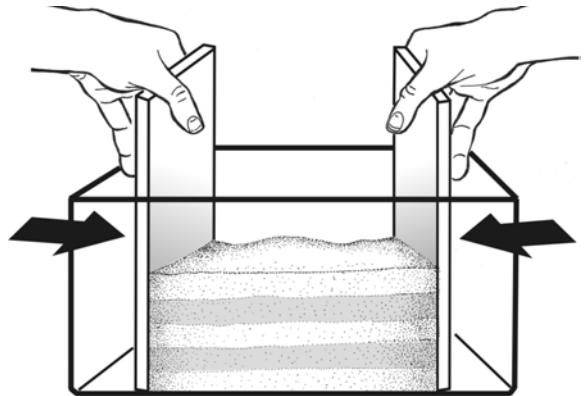


Abbildung 1: Die Sandschichten lassen sich leichter zusammendrücken, wenn die beiden Holzbrettchen in 1 - 2 cm Abstand zu den Außenwänden positioniert werden (Zeichnung: E. KOLASCZINSKI, IPN).

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung und zeichnen Sie das Endergebnis.
- 2) Haben Sie Ähnliches bereits in der Natur beobachtet können?
- 3) Liegen die Lagen, die Sie als erstes eingestreut haben, immer noch unten?
- 4) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten (s. Abb. 2)?



Abbildung 2: Gesteinsformation, deren Faltungsprozess durch diesen Versuch veranschaulicht werden soll. Das Bild zeigt die Purbeck Beds in Stairhole bei Lulworth (County Dorset) in Südengland. Die hellen Kalksteinschichten sind durch Faltung stark zerrüttet. Die dunkleren Zwischenlagen sind tonig. (Bild: H. WAGNER, CAU zu Kiel)

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE TEACHERS' ASSOCIATION 1992

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Verformung von Fossilien<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- etwa 150 g Knetmasse
- Gips, etwas Wasser und ein Gipsbecher
- Holzstäbchen oder Spatel zum Anrühren
- 2 Holzleisten (Stärke etwa 10 mm)
- kurze Stativstange (oder ein Nudelholz bzw. eine Flasche)
- kleine, dickschalige Muschel (z. B. Herzmuschel *Cerastoderma* sp.)

#### ❷ Durchführung:

- I. Die Knetmasse zwischen den beiden Holzleisten gleichmäßig ausrollen (s. Abb. 1).
- II. Die Muschelschale vorsichtig in die Knetmasse drücken (die Innenseite der Schale soll nach oben zeigen).
- III. Die Muschelschale vorsichtig entfernen und den Abdruck mit Gips füllen. Durch kleine Bewegungen eines in den Gips gehaltenen Holzstäbchens oder Spatels verteilt sich der Gips besser.
- IV. In einem zweiten Durchgang wird wieder ein Abdruck der Schale erzeugt, jedoch wird die Knetmasse vor dem Ausgießen der Form mit Gips mit den beiden Holzleisten etwas zusammengedrückt. Dieser Vorgang soll mehrfach wiederholt werden, wobei die Verformungskräfte aus unterschiedlichen Richtungen (horizontal, vertikal, etc.) angreifen sollen.
- V. Nachdem der Gips abgebunden hat, werden alle Gipsmodelle nebeneinander gelegt.



Abbildung 1: Ausrollen der Knetmasse.

<sup>1</sup> nach LEE 2001

**3 Aufgaben:**

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Durch welchen natürlichen Prozess werden Gesteine in der Natur auf ähnliche Weise beansprucht?
- 3) Was passiert mit den Fossilien in der Natur unter entsprechenden Bedingungen?
- 4) Was bedeutet dies für die Interpretation von Fossilfunden bzw. die Bestimmung der fossilisierten Arten?



**Abbildung 2: Links: Dinosauriermodelle im Dinopark Münchehagen. Rechts: Original Abdruck von einem Dinosaurierfuß.**



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Temperaturabhängige Kristallisation von Schmelzen<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- ca. 1 Teelöffel Salol (Salicylsäure-Phenylester), 1 Spatel
- 1 kleines Reagenzglas, 1 kleines Becherglas, etwas Leitungswasser
- Heizplatte
- ein Kühlakku, Eisschrank oder eine mit Eis gefüllte Petrischale
- 2 Objektträger, 2 Deckgläschen
- Lupe oder Binokular zum Betrachten der Kristalle
- optional: Thermometer

#### ❷ Sicherheitshinweis:

Salol (Phenyl-Salicylsäureester) ist minder giftig und leicht reizend. Die Dämpfe von Salol sollten nicht eingeatmet werden.

#### ❸ Durchführung:

- I. Ein Objektträger soll an eine kalte Stelle gelegt werden (z. B. auf die mit Eis gefüllte Petrischale oder einen Kühlakku), der andere wird in die (warme) Nähe der Heizplatte gelegt.
- II. Das Becherglas wird zu etwa einem Viertel mit Leitungswasser gefüllt und auf die Heizplatte gestellt (Schmelzpunkt von Salol 41 – 43 °C).
- III. Das Salol wird in ein Reagenzglas gegeben, das dann in das mit Wasser gefüllte Becherglas gestellt wird. Nach einigen Sekunden schmilzt das Salol.
- IV. Je ein Tropfen des geschmolzenen Salols auf die beiden Objektträger geben und das Deckgläschen vorsichtig auflegen.
- V. Nachdem das Salol kristallisiert ist, können die Kristalle mit einer Lupe oder einem Binokular verglichen werden.

#### ❹ Aufgaben:

- 1) Vergleichen Sie das Ergebnis auf dem gekühlten Objektträger mit dem Ergebnis auf dem angewärmten. Fertigen Sie eine Zeichnung an. **Hinweis:** Verwenden Sie ein Binokular oder eine Lupe.
- 2) Welche Bedeutung hat dieser Versuch für die Interpretation der Entstehung von Tiefen- bzw. Vulkangesteinen? Vergleichen Sie hierzu Ihre Beobachtungen mit den beiden Fotos (s. Abb. 1).

---

<sup>1</sup> nach KING, FORDHAM und SMITH 1993

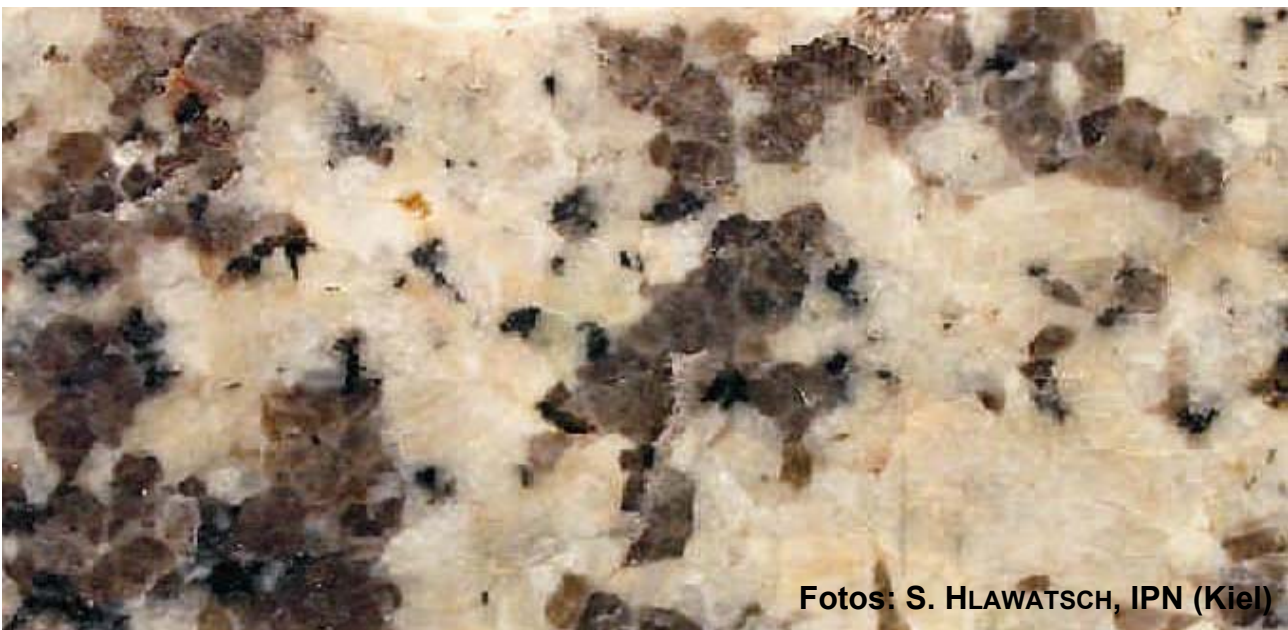




Abbildung 1: Gesteine, deren Entstehungsbedingungen durch diesen Versuch erläutert werden können. Oben: Tiefengestein, unten: Vulkangestein.



# Vulkangestein und Tiefengestein vom Strand in der Nähe von Kiel



Fotos: S. HLAWATSCH, IPN (Kiel)



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Einregelung

#### ❶ Materialien:

- 1 Paket Streichhölzer
- 2 Lineale
- Folie „Einregelung“ (Modul 3, Baustein 5, Material 3)

#### ❷ Durchführung:

- I. Verteilen Sie die Streichhölzer „kreuz und quer“ auf den Tisch.
- II. Halten Sie ein Lineal links von den Streichhölzern längs aufrecht auf den Tisch und ein weiteres auf gegenüberliegenden Seite. Drücken Sie die Lineale langsam und gleichmäßig zusammen.

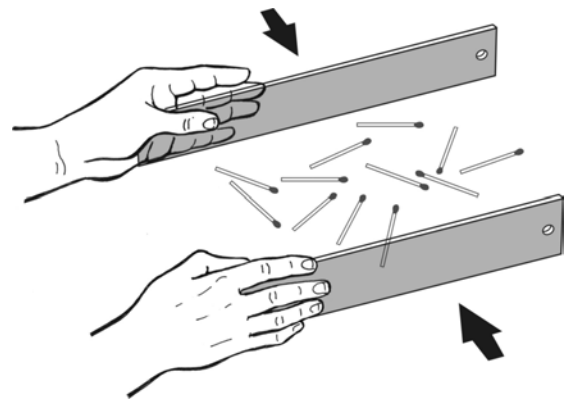


Abbildung 1: Versuchsaufbau (Zeichnung E. KOLASZINSKI, IPN)

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Welche Minerale werden durch die Streichhölzer repräsentiert?
- 3) Die Struktur des Gesteinstyps, der auf Abb. 2 dargestellt ist, ist auf vergleichbare Weise entstanden. Um welches Gestein handelt es sich? Welche Lagen im Gestein entsprechen den Streichhölzern im Versuch?



Abbildung 1: Gesteinstyp, dessen Entstehungsprozess durch den Versuch veranschaulicht werden soll.



## **Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf**

**Alle Versuche Materialien 4 – 11 und 13**





## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Frostsprennung

#### ❶ Materialien:

- eine kleine Tetrapak-Verpackung (z. B. 250 ml Kaffeesahne oder Orangensaft)
- einen kleinen Luftballon
- Paketklebeband
- Gips
- Gipsbecher und Spatel
- Becherglas (100ml)
- Leitungswasser

#### ❷ Durchführung:

- I. Vorsichtig Leitungswasser in den Luftballon füllen (etwa 10 - 15 ml).
- II. Den Luftballon verschließen und mit dem Paketklebeband einmal an der breitesten Stelle so umwickeln, dass ein kleiner Spalt frei bleibt. Vorsicht: Es darf keine Luftblase im Inneren des Luftballons bleiben.
- III. In zwei Arbeitsschritten die Verpackung mit angerührtem Gips auffüllen. Zweimal je 15 leicht gehäufte Spatellöffel (entspricht etwa 130 ml trockenem Gips) in einem Becherglas mit je 60 ml Wasser anrühren. Der Gips sollte nicht zu dünnflüssig sein, da sonst das Abbinden zu lange dauert. Ist er zu zähflüssig, lässt er sich nicht gleichmäßig in dem Tetrapak verteilen.
  - Die 1. Portion Gips in die Verpackung einfüllen und warten, bis der Gips leicht abbindet. Den mit Wasser gefüllten Luftballon senkrecht stehend in den Gips leicht hinein drücken (der Ballon sollte zentral positioniert werden und nicht die Wände der Verpackung berühren).
  - Mit der 2. Portion Gips den Luftballon vollständig und gleichmäßig von allen Seiten einzementieren.
- IV. Das Abbinden des Gipses dauert etwa 30 Minuten. Danach wird die Tetrapak-Verpackung aufgerissen und der Gipsblock über Nacht in ein Gefrierfach gestellt. Als Vergleichsprobe kann man einen Gipsblock ohne wassergefüllten Luftballon dazustellen.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben und begründen Sie Ihre Beobachtungen.
- 2) Kennen Sie ähnliche Prozesse in der Natur?
- 3) Welche Bedeutung hat der Prozess im Kreislauf der Gesteine?



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Chemische Verwitterung

#### ❶ Materialien:

- Kalkstein oder Kalksandstein (z. B. Plattenkalk, Solnhofen, Bayern)
- Petrischale
- Salzsäure (max. 10 %)
- Schutzbrille, Laborkittel und Handschuhe

#### ❷ Sicherheitshinweise:

- Beim Arbeiten mit Salzsäure immer Schutzkleidung und –brille benutzen!
- Nachdem der Stein von der Salzsäure teilweise angelöst wurde, **muss** dieser mit Wasser abgespült werden. Mit ein paar Tropfen Spülmittel (leicht alkalisch!) lassen sich Salzsäurereste auf der Hand neutralisieren.

#### ❸ Durchführung:

Kalk- bzw. Kalksandstein in die Petrischale legen und vorsichtig mit einer Pipette einen kleinen Tropfen Salzsäure daraufträufeln.

#### ❹ Aufgaben:

- 1) Beschreiben und erläutern Sie das Experiment und die Ergebnisse.
- 2) Gibt es ähnliche Prozesse in der Natur?
- 3) Welche Bedeutung hat die chemische Verwitterung für den Kreislauf der Gesteine?

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Sandrippelbildung<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- 1 Plasticaquarium (Größe 20 x 20 x 40 cm)
- ca. 500 g Sand (z. B. Quarzsand, Korndurchmesser 0,1 – 0,4 mm oder Vogelsand, Korndurchmesser 0,25 – 0,8 mm)
- Leitungswasser
- optional: dunkle Unterlage (z. B. schwarzes Tonpapier)

#### ❷ Durchführung:

- I. Das Plasticaquarium etwa 5 cm hoch mit Leitungswasser befüllen.
- II. 1 - 2 Esslöffel Sand in das Aquarium einstreuen und warten, bis der Sand sich abgesetzt hat.
- III. Das Aquarium über eine schmale Seite fortwährend etwa 2 cm anheben und senken (s. Abb. 1). Der Wasserkörper soll dabei leicht und gleichmäßig hin- und herschwingen. Auf einer dunklen Unterlage ist das Versuchsergebnis besonders gut zu erkennen.

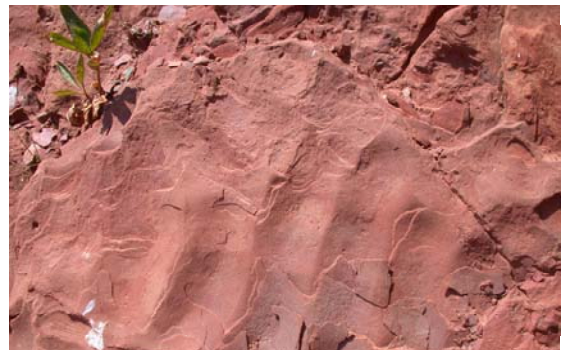
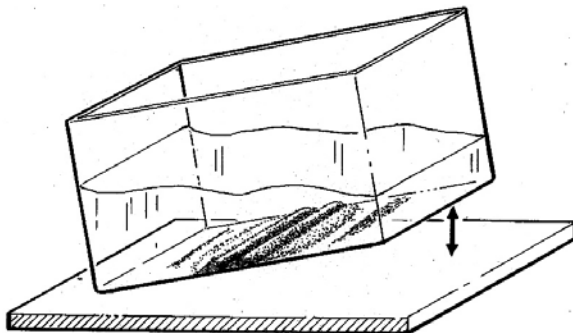


Abbildung 1: Sandrippelbildung; links im Versuch; rechts fossile Rippelmarken in einem Sandstein von der Insel Helgoland

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.
- 2) Wo tritt dieser Prozess in der Natur auf?
- 3) Welche Hinweise liefert dieser Versuch für die Entstehung von Sandrippeln?
- 4) Sie finden einen roten Sandstein auf Helgoland. Er enthält Sandrippelstrukturen (s. Abb. 1). Was lernen Sie daraus über die Geschichte von Helgoland?

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Sedimentation

#### ❶ Materialien:

- durchsichtige Wasserflasche aus Glas oder Plastik, möglichst mit flachem Boden (1,5 oder 2 l Volumen)
- je etwa 100 g grober Sand (Korndurchmesser ca. 1 – 2 mm) und feiner Sand (z. B. Quarz- oder Vogelsand; Korndurchmesser 0,1 – 0,8 mm) sowie etwa 40 g getrockneter Lehm oder Ton
- Leitungswasser
- Optional: großer, möglichst geschichteter Sandstein

#### ❷ Durchführung:

- I. Sand und Lehm bzw. Ton in die Flasche geben, mit Leitungswasser auffüllen und fest verschließen.
- II. Die Flasche kräftig schütteln, sodass sich alle Bestandteile gut vermischen und der Lehm/Ton vollständig aufgeschlämmt wird.

**Hinweis:** Das Schütteln der Sedimentflasche sollte in kreisenden Bewegungen erfolgen. In einem rotierenden Wasserkörper werden leichte Schwebpartikel länger in Bewegungen gehalten.

- III. Die gut durchgeschüttelte Flasche wird zur Beobachtung auf einen Tisch gestellt. Das Endergebnis zeigt sich erst nach mehreren Stunden.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Wo tritt dieses Phänomen in der Natur auf?
- 2) Wo tritt dieses Phänomen in der Natur auf?
- 3) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten (s. Abb. 1)?



Abbildung 1: Gesteinstyp, dessen Entstehungsprozess durch den Versuch veranschaulicht werden soll.



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Kompaktion und Zementierung<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- Plastikspritze (50 ml; Laborbedarf), deren Vorderende abgeschnitten wurde
- etwas Vaseline oder anderes Gleitmittel
- Vogelsand, Lehm/Ton, Gips und Leitungswasser
- Gipsbecher (Behältnis zum Vermengen von Sand, Lehm/Ton und Gips mit dem Wasser)
- Spatel
- saugfähige Unterlage (Küchenpapier) und Trockenschrank (optional)
- großer Sandstein oder Folie (Modul 3, Baustein 5, Material 2, Seite 3)

#### ❷ Durchführung:

- I. Im Gipsbecher werden folgende Mischungen jeweils trocken vermengt, mit etwas Wasser angerührt und in die vorher leicht mit Vaseline eingefettete Plastikspritze gefüllt:
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Gips + 8 ml Wasser
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Lehm/Ton + 10 ml Wasser
  - 6 gehäufte Spatellöffel Sand + 10 ml Wasser
- II. Das offene Ende der Plastikspritze mit der Handfläche leicht verschließen und den Kolben der Spritze so lange kräftig drücken, bis keine Luft und kein Wasser mehr herausgepresst werden können (Abbildung).
- III. Die Mischung vorsichtig aus der Spritze auf das Küchenpapier drücken und zum Trocknen auf die Fensterbank oder in den Trockenschrank stellen.



#### ❸ Aufgaben:

- 1) Reiben Sie mit dem Finger an den getrockneten Mischungen. Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Welche chemischen und physikalischen Vorgänge laufen in diesem Versuch ab?
- 3) Wie nennt man diesen Prozess der Gesteinsbildung?

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Auffaltung von Sedimentschichten<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- Plasticaquarium (Größe etwa 20 x 20 x 40 cm)
- 2 kleine Sperrholzplatten oder feste Pappstücke, die etwas schmaler sind als das Aquarium breit ist, aber etwa um die Hälfte höher
- ca. 500 g trockener Sand und verschiedene Farbstoffe (Lebensmittelfarben)

#### ❷ Durchführung:

- I. Die beiden Sperrholzplatten in einem Abstand von je 1 - 2 cm von den Seitenwänden in das Plasticaquarium stellen.
- II. Mehrere Lagen (Schichthöhe etwa 1 - 2 cm) gefärbten trockenen Sandes gleichmäßig in das Aquarium schütten, sodass eine parallele Schichtung entsteht.
- III. Die beiden Holzplatten senkrecht zueinander vorsichtig zusammendrücken.

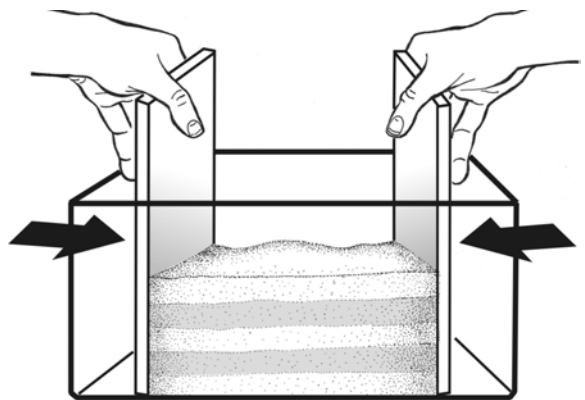


Abbildung 1: Die Sandschichten lassen sich leichter zusammendrücken, wenn die beiden Holzbrettchen in 1 - 2 cm Abstand zu den Außenwänden positioniert werden (Zeichnung: E. KOLASCZINSKI, IPN).

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung und zeichnen Sie das Endergebnis.
- 2) Haben Sie Ähnliches bereits in der Natur beobachtet können?
- 3) Liegen die Lagen, die Sie als erstes eingestreut haben, immer noch unten?
- 4) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten (s. Abb. 2)?



Abbildung 2: Gesteinsformation, deren Faltungsprozess durch diesen Versuch veranschaulicht werden soll. Das Bild zeigt die Purbeck Beds in Stairhole bei Lulworth (County Dorset) in Südengland. Die hellen Kalksteinschichten sind durch Faltung stark zerrüttet. Die dunkleren Zwischenlagen sind tonig. (Bild: H. WAGNER, CAU zu Kiel)

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE TEACHERS' ASSOCIATION 1992



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Verformung von Fossilien<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- etwa 150 g Knetmasse
- Gips, etwas Wasser und ein Gipsbecher
- Holzstäbchen oder Spatel zum Anrühren
- 2 Holzleisten (Stärke etwa 10 mm)
- kurze Stativstange (oder ein Nudelholz bzw. eine Flasche)
- kleine, dickschalige Muschel (z. B. Herzmuschel *Cerastoderma* sp.)

#### ❷ Durchführung:

- I. Die Knetmasse zwischen den beiden Holzleisten gleichmäßig ausrollen (s. Abb. 1).
- II. Die Muschelschale vorsichtig in die Knetmasse drücken (die Innenseite der Schale soll nach oben zeigen).
- III. Die Muschelschale vorsichtig entfernen und den Abdruck mit Gips füllen. Durch kleine Bewegungen eines in den Gips gehaltenen Holzstäbchens oder Spatels verteilt sich der Gips besser.
- IV. In einem zweiten Durchgang wird wieder ein Abdruck der Schale erzeugt, jedoch wird die Knetmasse vor dem Ausgießen der Form mit Gips mit den beiden Holzleisten etwas zusammengedrückt. Dieser Vorgang soll mehrfach wiederholt werden, wobei die Verformungskräfte aus unterschiedlichen Richtungen (horizontal, vertikal, etc.) angreifen sollen.
- V. Nachdem der Gips abgebunden hat, werden alle Gipsmodelle nebeneinander gelegt.

Abbildung 1: Ausrollen der Knetmasse.

---

<sup>1</sup> nach LEE 2001

**3 Aufgaben:**

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Durch welchen natürlichen Prozess werden Gesteine in der Natur auf ähnliche Weise beansprucht?
- 3) Was passiert mit den Fossilien in der Natur unter entsprechenden Bedingungen?
- 4) Was bedeutet dies für die Interpretation von Fossilfunden bzw. die Bestimmung der fossilisierten Arten?



Abbildung 2: Links: Dinosauriermodelle im Dinopark Münchehagen. Rechts: Original Abdruck von einem Dinosaurierfuß.





## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Temperaturabhängige Kristallisation von Schmelzen<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- ca. 1 Teelöffel Salol (Salicylsäure-Phenylester), 1 Spatel
- 1 kleines Reagenzglas, 1 kleines Becherglas, etwas Leitungswasser
- Heizplatte
- ein Kühlakku, Eisschrank oder eine mit Eis gefüllte Petrischale
- 2 Objektträger, 2 Deckgläschen
- Lupe oder Binokular zum Betrachten der Kristalle
- optional: Thermometer

#### ❷ Sicherheitshinweis:

Salol (Phenyl-Salicylsäureester) ist minder giftig und leicht reizend. Die Dämpfe von Salol sollten nicht eingeatmet werden.

#### ❸ Durchführung:

- I. Ein Objektträger soll an eine kalte Stelle gelegt werden (z. B. auf die mit Eis gefüllte Petrischale oder einen Kühlakku), der andere wird in die (warme) Nähe der Heizplatte gelegt.
- II. Das Becherglas wird zu etwa einem Viertel mit Leitungswasser gefüllt und auf die Heizplatte gestellt (Schmelzpunkt von Salol 41 – 43 °C).
- III. Das Salol wird in ein Reagenzglas gegeben, das dann in das mit Wasser gefüllte Becherglas gestellt wird. Nach einigen Sekunden schmilzt das Salol.
- IV. Je ein Tropfen des geschmolzenen Salols auf die beiden Objektträger geben und das Deckgläschen vorsichtig auflegen.
- V. Nachdem das Salol kristallisiert ist, können die Kristalle mit einer Lupe oder einem Binokular verglichen werden.

#### ❹ Aufgaben:

- 1) Vergleichen Sie das Ergebnis auf dem gekühlten Objektträger mit dem Ergebnis auf dem angewärmten. Fertigen Sie eine Zeichnung an. **Hinweis:** Verwenden Sie ein Binokular oder eine Lupe.
- 2) Welche Bedeutung hat dieser Versuch für die Interpretation der Entstehung von Tiefen- bzw. Vulkangesteinen? Vergleichen Sie hierzu Ihre Beobachtungen mit den beiden Fotos (s. Abb. 1).

---

<sup>1</sup> nach KING, FORDHAM und SMITH 1993



Abbildung 1: Gesteine, deren Entstehungsbedingungen durch diesen Versuch erläutert werden können. Oben: Tiefengestein, unten: Vulkangestein.



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Einregelung

#### ❶ Materialien:

- 1 Paket Streichhölzer
- 2 Lineale
- Folie „Einregelung“ (Modul 3, Baustein 5, Material 3)

#### ❷ Durchführung:

- I. Verteilen Sie die Streichhölzer „kreuz und quer“ auf den Tisch.
- II. Halten Sie ein Lineal links von den Streichhölzern längs aufrecht auf den Tisch und ein weiteres auf gegenüberliegenden Seite. Drücken Sie die Lineale langsam und gleichmäßig zusammen.

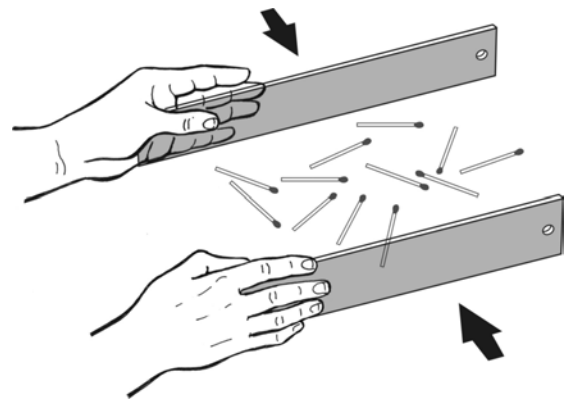


Abbildung 1: Versuchsaufbau (Zeichnung E. KOLASZINSKI, IPN)

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Welche Minerale werden durch die Streichhölzer repräsentiert?
- 3) Die Struktur des Gesteinstyps, der auf Abb. 2 dargestellt ist, ist auf vergleichbare Weise entstanden. Um welches Gestein handelt es sich? Welche Lagen im Gestein entsprechen den Streichhölzern im Versuch?



Abbildung 1: Gesteinstyp, dessen Entstehungsprozess durch den Versuch veranschaulicht werden soll.



## **Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf**

**Alle Versuche Materialien 4 – 11 und 13**





## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Frostsprennung

#### ❶ Materialien:

- eine kleine Tetrapak-Verpackung (z. B. 250 ml Kaffeesahne oder Orangensaft)
- einen kleinen Luftballon
- Paketklebeband
- Gips
- Gipsbecher und Spatel
- Becherglas (100ml)
- Leitungswasser

#### ❷ Durchführung:

- I. Vorsichtig Leitungswasser in den Luftballon füllen (etwa 10 - 15 ml).
- II. Den Luftballon verschließen und mit dem Paketklebeband einmal an der breitesten Stelle so umwickeln, dass ein kleiner Spalt frei bleibt. Vorsicht: Es darf keine Luftblase im Inneren des Luftballons bleiben.
- III. In zwei Arbeitsschritten die Verpackung mit angerührtem Gips auffüllen. Zweimal je 15 leicht gehäufte Spatellöffel (entspricht etwa 130 ml trockenem Gips) in einem Becherglas mit je 60 ml Wasser anrühren. Der Gips sollte nicht zu dünnflüssig sein, da sonst das Abbinden zu lange dauert. Ist er zu zähflüssig, lässt er sich nicht gleichmäßig in dem Tetrapak verteilen.
  - Die 1. Portion Gips in die Verpackung einfüllen und warten, bis der Gips leicht abbindet. Den mit Wasser gefüllten Luftballon senkrecht stehend in den Gips leicht hinein drücken (der Ballon sollte zentral positioniert werden und nicht die Wände der Verpackung berühren).
  - Mit der 2. Portion Gips den Luftballon vollständig und gleichmäßig von allen Seiten einzementieren.
- IV. Das Abbinden des Gipses dauert etwa 30 Minuten. Danach wird die Tetrapak-Verpackung aufgerissen und der Gipsblock über Nacht in ein Gefrierfach gestellt. Als Vergleichsprobe kann man einen Gipsblock ohne wassergefüllten Luftballon dazustellen.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben und begründen Sie Ihre Beobachtungen.
- 2) Kennen Sie ähnliche Prozesse in der Natur?
- 3) Welche Bedeutung hat der Prozess im Kreislauf der Gesteine?



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Chemische Verwitterung

#### ❶ Materialien:

- Kalkstein oder Kalksandstein (z. B. Plattenkalk, Solnhofen, Bayern)
- Petrischale
- Salzsäure (max. 10 %)
- Schutzbrille, Laborkittel und Handschuhe

#### ❷ Sicherheitshinweise:

- Beim Arbeiten mit Salzsäure immer Schutzkleidung und –brille benutzen!
- Nachdem der Stein von der Salzsäure teilweise angelöst wurde, **muss** dieser mit Wasser abgespült werden. Mit ein paar Tropfen Spülmittel (leicht alkalisch!) lassen sich Salzsäurereste auf der Hand neutralisieren.

#### ❸ Durchführung:

Kalk- bzw. Kalksandstein in die Petrischale legen und vorsichtig mit einer Pipette einen kleinen Tropfen Salzsäure daraufträufeln.

#### ❹ Aufgaben:

- 1) Beschreiben und erläutern Sie das Experiment und die Ergebnisse.
- 2) Gibt es ähnliche Prozesse in der Natur?
- 3) Welche Bedeutung hat die chemische Verwitterung für den Kreislauf der Gesteine?

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Sandrippelbildung<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- 1 Plasticaquarium (Größe 20 x 20 x 40 cm)
- ca. 500 g Sand (z. B. Quarzsand, Korndurchmesser 0,1 – 0,4 mm oder Vogelsand, Korndurchmesser 0,25 – 0,8 mm)
- Leitungswasser
- optional: dunkle Unterlage (z. B. schwarzes Tonpapier)

#### ❷ Durchführung:

- I. Das Plasticaquarium etwa 5 cm hoch mit Leitungswasser befüllen.
- II. 1 - 2 Esslöffel Sand in das Aquarium einstreuen und warten, bis der Sand sich abgesetzt hat.
- III. Das Aquarium über eine schmale Seite fortwährend etwa 2 cm anheben und senken (s. Abb. 1). Der Wasserkörper soll dabei leicht und gleichmäßig hin- und herschwingen. Auf einer dunklen Unterlage ist das Versuchsergebnis besonders gut zu erkennen.

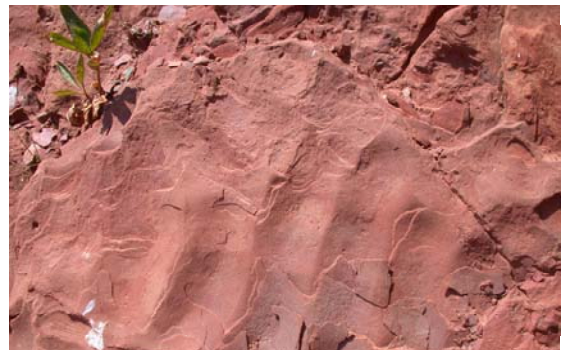
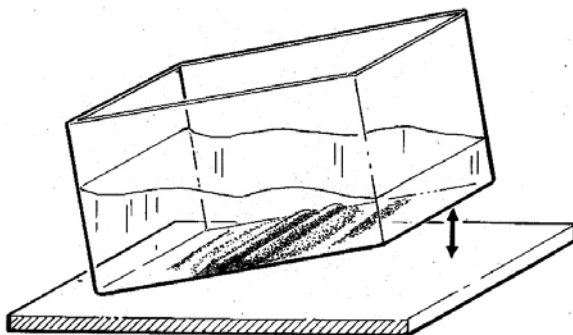


Abbildung 1: Sandrippelbildung; links im Versuch; rechts fossile Rippelmarken in einem Sandstein von der Insel Helgoland

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.
- 2) Wo tritt dieser Prozess in der Natur auf?
- 3) Welche Hinweise liefert dieser Versuch für die Entstehung von Sandrippeln?
- 4) Sie finden einen roten Sandstein auf Helgoland. Er enthält Sandrippelstrukturen (s. Abb. 1). Was lernen Sie daraus über die Geschichte von Helgoland?

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Sedimentation

#### ❶ Materialien:

- durchsichtige Wasserflasche aus Glas oder Plastik, möglichst mit flachem Boden (1,5 oder 2 l Volumen)
- je etwa 100 g grober Sand (Korndurchmesser ca. 1 – 2 mm) und feiner Sand (z. B. Quarz- oder Vogelsand; Korndurchmesser 0,1 – 0,8 mm) sowie etwa 40 g getrockneter Lehm oder Ton
- Leitungswasser
- Optional: großer, möglichst geschichteter Sandstein

#### ❷ Durchführung:

- I. Sand und Lehm bzw. Ton in die Flasche geben, mit Leitungswasser auffüllen und fest verschließen.
- II. Die Flasche kräftig schütteln, sodass sich alle Bestandteile gut vermischen und der Lehm/Ton vollständig aufgeschlämmt wird.

**Hinweis:** Das Schütteln der Sedimentflasche sollte in kreisenden Bewegungen erfolgen. In einem rotierenden Wasserkörper werden leichte Schwebpartikel länger in Bewegungen gehalten.

- III. Die gut durchgeschüttelte Flasche wird zur Beobachtung auf einen Tisch gestellt. Das Endergebnis zeigt sich erst nach mehreren Stunden.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Wo tritt dieses Phänomen in der Natur auf?
- 2) Wo tritt dieses Phänomen in der Natur auf?
- 3) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten (s. Abb. 1)?



Abbildung 1: Gesteinstyp, dessen Entstehungsprozess durch den Versuch veranschaulicht werden soll.



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Kompaktion und Zementierung<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- Plastikspritze (50 ml; Laborbedarf), deren Vorderende abgeschnitten wurde
- etwas Vaseline oder anderes Gleitmittel
- Vogelsand, Lehm/Ton, Gips und Leitungswasser
- Gipsbecher (Behältnis zum Vermengen von Sand, Lehm/Ton und Gips mit dem Wasser)
- Spatel
- saugfähige Unterlage (Küchenpapier) und Trockenschrank (optional)
- großer Sandstein oder Folie (Modul 3, Baustein 5, Material 2, Seite 3)

#### ❷ Durchführung:

- I. Im Gipsbecher werden folgende Mischungen jeweils trocken vermengt, mit etwas Wasser angerührt und in die vorher leicht mit Vaseline eingefettete Plastikspritze gefüllt:
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Gips + 8 ml Wasser
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Lehm/Ton + 10 ml Wasser
  - 6 gehäufte Spatellöffel Sand + 10 ml Wasser
- II. Das offene Ende der Plastikspritze mit der Handfläche leicht verschließen und den Kolben der Spritze so lange kräftig drücken, bis keine Luft und kein Wasser mehr herausgedrückt werden können (Abbildung).
- III. Die Mischung vorsichtig aus der Spritze auf das Küchenpapier drücken und zum Trocknen auf die Fensterbank oder in den Trockenschrank stellen.



#### ❸ Aufgaben:

- 1) Reiben Sie mit dem Finger an den getrockneten Mischungen. Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Welche chemischen und physikalischen Vorgänge laufen in diesem Versuch ab?
- 3) Wie nennt man diesen Prozess der Gesteinsbildung?

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003

## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Auffaltung von Sedimentschichten<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- Plasticaquarium (Größe etwa 20 x 20 x 40 cm)
- 2 kleine Sperrholzplatten oder feste Pappstücke, die etwas schmaler sind als das Aquarium breit ist, aber etwa um die Hälfte höher
- ca. 500 g trockener Sand und verschiedene Farbstoffe (Lebensmittelfarben)

#### ❷ Durchführung:

- I. Die beiden Sperrholzplatten in einem Abstand von je 1 - 2 cm von den Seitenwänden in das Plasticaquarium stellen.
- II. Mehrere Lagen (Schichthöhe etwa 1 - 2 cm) gefärbten trockenen Sandes gleichmäßig in das Aquarium schütten, sodass eine parallele Schichtung entsteht.
- III. Die beiden Holzplatten senkrecht zueinander vorsichtig zusammendrücken.

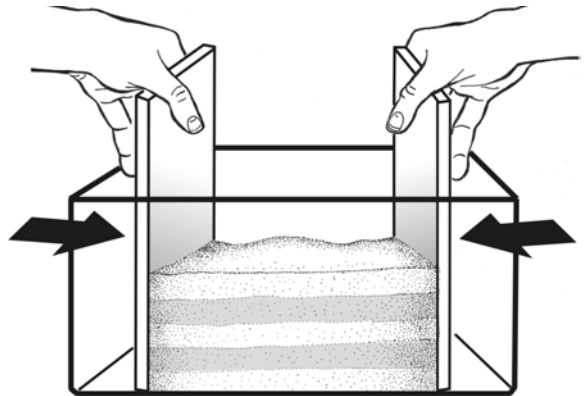


Abbildung 1: Die Sandschichten lassen sich leichter zusammendrücken, wenn die beiden Holzbrettchen in 1 - 2 cm Abstand zu den Außenwänden positioniert werden (Zeichnung: E. KOLASCZINSKI, IPN).

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung und zeichnen Sie das Endergebnis.
- 2) Haben Sie Ähnliches bereits in der Natur beobachtet können?
- 3) Liegen die Lagen, die Sie als erstes eingestreut haben, immer noch unten?
- 4) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten (s. Abb. 2)?



Abbildung 2: Gesteinsformation, deren Faltungsprozess durch diesen Versuch veranschaulicht werden soll. Das Bild zeigt die Purbeck Beds in Stairhole bei Lulworth (County Dorset) in Südengland. Die hellen Kalksteinschichten sind durch Faltung stark zerrüttet. Die dunkleren Zwischenlagen sind tonig. (Bild: H. WAGNER, CAU zu Kiel)

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE TEACHERS' ASSOCIATION 1992



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Verformung von Fossilien<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- etwa 150 g Knetmasse
- Gips, etwas Wasser und ein Gipsbecher
- Holzstäbchen oder Spatel zum Anrühren
- 2 Holzleisten (Stärke etwa 10 mm)
- kurze Stativstange (oder ein Nudelholz bzw. eine Flasche)
- kleine, dickschalige Muschel (z. B. Herzmuschel *Cerastoderma* sp.)

#### ❷ Durchführung:

- I. Die Knetmasse zwischen den beiden Holzleisten gleichmäßig ausrollen (s. Abb. 1).
- II. Die Muschelschale vorsichtig in die Knetmasse drücken (die Innenseite der Schale soll nach oben zeigen).
- III. Die Muschelschale vorsichtig entfernen und den Abdruck mit Gips füllen. Durch kleine Bewegungen eines in den Gips gehaltenen Holzstäbchens oder Spatels verteilt sich der Gips besser.
- IV. In einem zweiten Durchgang wird wieder ein Abdruck der Schale erzeugt, jedoch wird die Knetmasse vor dem Ausgießen der Form mit Gips mit den beiden Holzleisten etwas zusammengedrückt. Dieser Vorgang soll mehrfach wiederholt werden, wobei die Verformungskräfte aus unterschiedlichen Richtungen (horizontal, vertikal, etc.) angreifen sollen.
- V. Nachdem der Gips abgebunden hat, werden alle Gipsmodelle nebeneinander gelegt.

Abbildung 1: Ausrollen der Knetmasse.

---

<sup>1</sup> nach LEE 2001

**3 Aufgaben:**

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Durch welchen natürlichen Prozess werden Gesteine in der Natur auf ähnliche Weise beansprucht?
- 3) Was passiert mit den Fossilien in der Natur unter entsprechenden Bedingungen?
- 4) Was bedeutet dies für die Interpretation von Fossilfunden bzw. die Bestimmung der fossilisierten Arten?



**Abbildung 2: Links: Dinosauriermodelle im Dinopark Münchehagen. Rechts: Original Abdruck von einem Dinosaurierfuß.**





## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Temperaturabhängige Kristallisation von Schmelzen<sup>1</sup>

#### ❶ Materialien:

- ca. 1 Teelöffel Salol (Salicylsäure-Phenylester), 1 Spatel
- 1 kleines Reagenzglas, 1 kleines Becherglas, etwas Leitungswasser
- Heizplatte
- ein Kühlakku, Eisschrank oder eine mit Eis gefüllte Petrischale
- 2 Objektträger, 2 Deckgläschen
- Lupe oder Binokular zum Betrachten der Kristalle
- optional: Thermometer

#### ❷ Sicherheitshinweis:

Salol (Phenyl-Salicylsäureester) ist minder giftig und leicht reizend. Die Dämpfe von Salol sollten nicht eingeatmet werden.

#### ❸ Durchführung:

- I. Ein Objektträger soll an eine kalte Stelle gelegt werden (z. B. auf die mit Eis gefüllte Petrischale oder einen Kühlakku), der andere wird in die (warme) Nähe der Heizplatte gelegt.
- II. Das Becherglas wird zu etwa einem Viertel mit Leitungswasser gefüllt und auf die Heizplatte gestellt (Schmelzpunkt von Salol 41 – 43 °C).
- III. Das Salol wird in ein Reagenzglas gegeben, das dann in das mit Wasser gefüllte Becherglas gestellt wird. Nach einigen Sekunden schmilzt das Salol.
- IV. Je ein Tropfen des geschmolzenen Salols auf die beiden Objektträger geben und das Deckgläschen vorsichtig auflegen.
- V. Nachdem das Salol kristallisiert ist, können die Kristalle mit einer Lupe oder einem Binokular verglichen werden.

#### ❹ Aufgaben:

- 1) Vergleichen Sie das Ergebnis auf dem gekühlten Objektträger mit dem Ergebnis auf dem angewärmten. Fertigen Sie eine Zeichnung an. **Hinweis:** Verwenden Sie ein Binokular oder eine Lupe.
- 2) Welche Bedeutung hat dieser Versuch für die Interpretation der Entstehung von Tiefen- bzw. Vulkangesteinen? Vergleichen Sie hierzu Ihre Beobachtungen mit den beiden Fotos (s. Abb. 1).

---

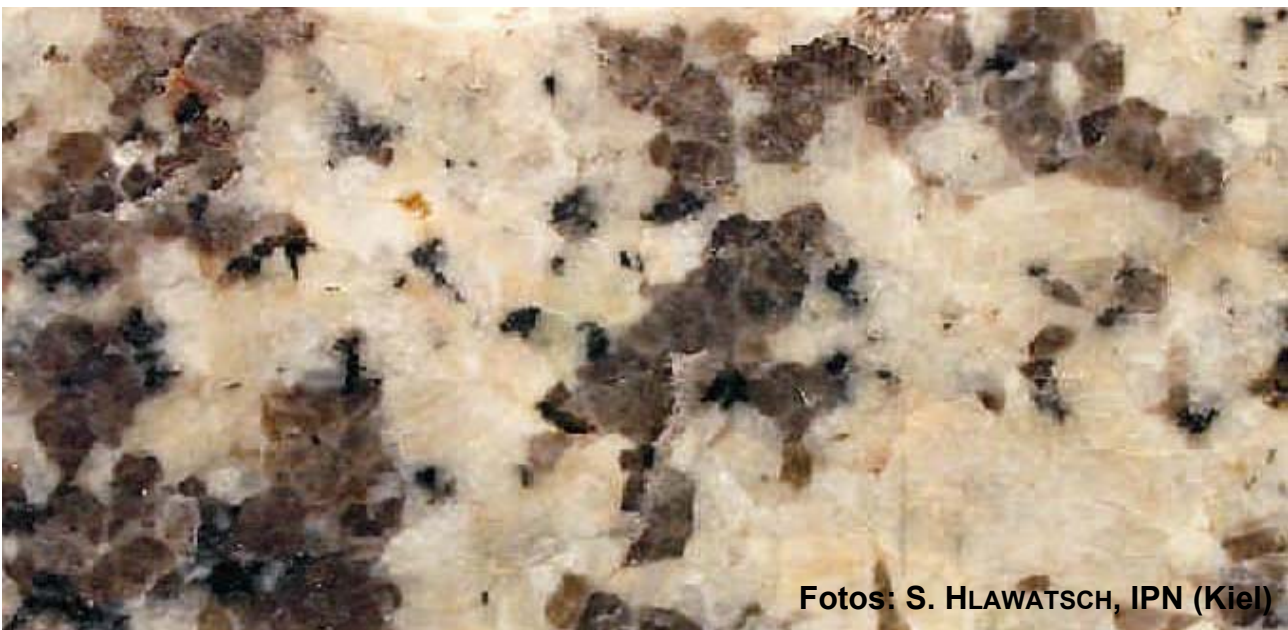
<sup>1</sup> nach KING, FORDHAM und SMITH 1993



Abbildung 1: Gesteine, deren Entstehungsbedingungen durch diesen Versuch erläutert werden können. Oben: Tiefengestein, unten: Vulkangestein.



# Vulkangestein und Tiefengestein vom Strand in der Nähe von Kiel



Fotos: S. HLAWATSCH, IPN (Kiel)



## Baustein 5: Versuche zum Gesteinskreislauf

### Einregelung

#### ❶ Materialien:

- 1 Paket Streichhölzer
- 2 Lineale
- Folie „Einregelung“ (Modul 3, Baustein 5, Material 3)

#### ❷ Durchführung:

- I. Verteilen Sie die Streichhölzer „kreuz und quer“ auf den Tisch.
- II. Halten Sie ein Lineal links von den Streichhölzern längs aufrecht auf den Tisch und ein weiteres auf gegenüberliegenden Seite. Drücken Sie die Lineale langsam und gleichmäßig zusammen.

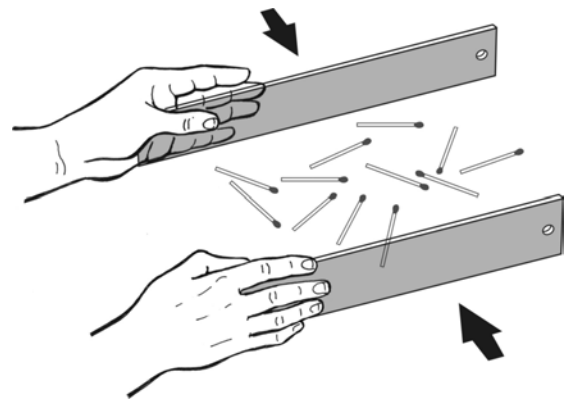


Abbildung 1: Versuchsaufbau (Zeichnung E. KOLASZINSKI, IPN)

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Welche Minerale werden durch die Streichhölzer repräsentiert?
- 3) Die Struktur des Gesteinstyps, der auf Abb. 2 dargestellt ist, ist auf vergleichbare Weise entstanden. Um welches Gestein handelt es sich? Welche Lagen im Gestein entsprechen den Streichhölzern im Versuch?



Abbildung 1: Gesteinstyp, dessen Entstehungsprozess durch den Versuch veranschaulicht werden soll.



## Baustein 6: Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf

### ❶ Materialien:

- Für jede/n Schüler/in
  - Arbeitsbogen „Beurteilungsbogen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 4)
  - optional: Information „Gruppenpuzzle“ (Modul 3, Baustein 6, Material 5)
- Für jede Arbeitsgruppe jeweils á 7 Schüler/innen
  - für die Postererstellung: dicke Faserstifte in verschiedenen Farben und ein Papier etwa in der Größe DIN - A0 (optional: ausrangierte Zeitschriften mit bunten Fotos zu Produkten, die aus Gesteinen und Mineralen hergestellt werden, Digitalkamera, Internetzugang)
  - Arbeitsbogen „Arbeitsbericht für Gruppen“ (Modul 3, Baustein 3, Material 4)
- Materialien für die Versuche der Expertengruppen (sind bei den Versuchen angegeben)

### ❷ Allgemeine Informationen

Die meisten Gesteine sind ein natürliches Gemenge von verschiedenen Mineralarten. So enthält das Gestein Granit die Minerale Quarz, Feldspat und Glimmer. Es gibt auch Gesteine, die aus nur einer Mineralart aufgebaut sind. Quarzit besteht zum Beispiel nur aus dem Mineral Quarz. Andere - wie z. B. Breccien - können auch Bruchstücke verschiedener Gesteine enthalten oder – wie Kohle.

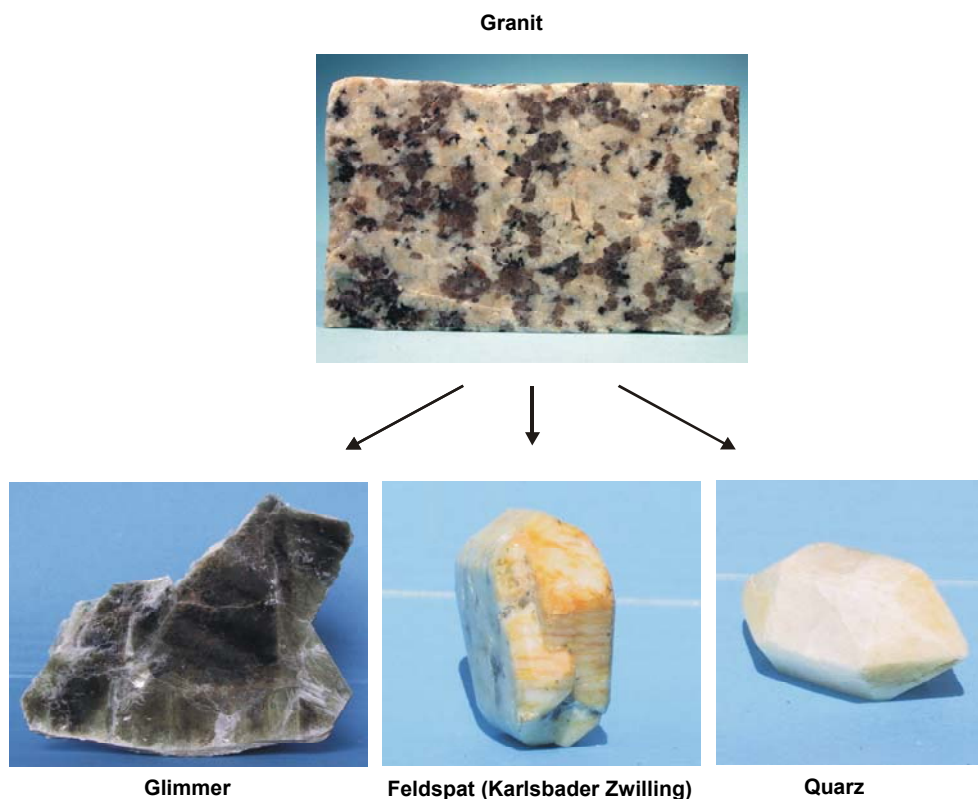


Abbildung 1: Das Gestein oben mit dem Namen Granit besteht aus den Mineralen Feldspat, Quarz und Glimmer (unten).



Übersicht über die Themen und Versuche der **Expertengruppen** für das Gruppenpuzzle zum Gesteinskreislauf:

- Expertengruppe 1: Biogene Ablagerungsgesteine (Versuch „Kompaktion und Zementierung von Sedimenten“)
- Expertengruppe 2: Chemische Ablagerungsgesteine (Versuch „Sedimentation“)
- Expertengruppe 3: Klastische Ablagerungsgesteine (Versuch „Sandrippelbildung“)
- Expertengruppe 4: Erstarrungsgesteine (Versuch „Temperaturabhängige Kristallisation von Schmelzen“)
- Expertengruppe 5: Umwandlungsgesteine (Versuch „Verformung von Fossilien“)
- Expertengruppe 6: Plattentektonik (Versuch „Auffaltung von Sedimentschichten“)
- Expertengruppe 7: Verwitterung (Versuch „Chemische Verwitterung“)

### ③ Aufgaben:

- 1) Bestimmen Sie eine/n Moderator/in, der/die die Erfüllung des Arbeitsauftrages in der vorgegebenen Zeit überwachen soll. Nutzen Sie dafür das Material „Arbeitsbericht für Gruppen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 3).
- 2) Erarbeiten Sie sich Wissen zum Thema Gesteine in **Expertengruppen**. Verteilen Sie hierfür die diesem Material beigefügten Texte in Ihrer Gruppe. (Wenn Sie weniger als 7 Personen in Ihrer Gruppe haben, entfallen die Expertengruppen 7 bzw. 6. Die Texte müssen dann im Rahmen der Stammgruppenarbeit gelesen werden, damit sie in den Postern berücksichtigt werden können.)
- 3) Erstellen Sie mit Ihrer **Stammgruppe** ein Poster mit einem Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf und ergänzen Sie typische Zeichnungen oder Fotos (auch von den Versuchen!) in Ihrem Poster. Veranschaulichen Sie Anwendungsmöglichkeiten von Gesteinen im täglichen Leben z. B. durch Zeitungsausschnitte oder Fotos. Die Poster sollen im Klassenverband vorgestellt und diskutiert werden.
- 4) Abschließend soll die Gruppenarbeit reflektiert werden. Hierfür sollen Sie das Material „Beurteilungsbogen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 3) verwenden.

## Expertengruppe 1: Biogene Ablagerungsgesteine

Alle Gesteine der Erde lassen sich drei Gruppen zuordnen: den Erstarrungsgesteinen (magmatischen Gesteinen), den Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteinen) und den Umwandlungsgesteinen (metamorphen Gesteinen). Die Namen weisen auf die Entstehung der Gesteinsgruppen hin: Erstarrungsgesteine entstehen aus Magma durch Abkühlung und Ablagerungsgesteine aus Lockersediment durch Ablagerung. Umwandlungsgesteine entstehen aus Erstarrungsgesteinen oder Ablagerungsgesteinen durch Umwandlung (Metamorphose).

Ablagerungsgesteine stellen Archive der Erdgeschichte dar, weil sie meistens über Zeiträume von Tausenden oder gar Millionen von Jahren abgelagert wurden. Oftmals enthalten die einzelnen Schichten heute ausgestorbene versteinerte Tiere und Pflanzen sowie Gesteinsbruchstücke. Beide Komponenten liefern Informationen über die Erde zu längst vergangenen Zeiten. So lässt sich zum Beispiel das Aussehen der Erde im Erdzeitalter Karbon von vor ca. 359 - 299 Millionen Jahren rekonstruieren. Damals wurden besonders viele Pflanzen abgelagert. Nach der Diagenese entstand daraus Kohle, die heute als fossiler Rohstoff gefördert wird. Entsprechend der Ablagerungsart werden biogene, chemische und klastische Ablagerungsgesteine unterschieden.

### Biogene Ablagerungsgesteine

Biogene Ablagerungsgesteine entstehen, wenn Überreste von Lebewesen nach dem Absterben abgelagert werden und versteinern. Dies kann an Land und im Meer geschehen. So leben z. B. Mikroorganismen wie Diatomeen, Coccolithoforiden und Foraminiferen im Ozeanwasser. Diatomeen bauen ihre Schalen aus Kieselsäure, Foraminiferen dagegen aus Kalk. Die Coccolithoforiden panzern ihre Zellen mit Kalkplättchen, den Coccolithen. Nach dem Absterben sinken die meisten Organismen zu Boden und werden zersetzt. Ein geringer Teil, nur etwa 1 % der kieseligen und kalkigen Gehäuse, landet schließlich am Meeresboden. Dort werden sie durch Diagenese zu Gestein, die kalkigen Skelette zu Kalkstein und die kieseligen Skelette zu Kieselschiefer. Während des Erdzeitalters Kreide von vor etwa 145 Millionen Jahren bis vor etwa 65 Millionen Jahren haben sich aus den damals lebenden Coccolithoforiden und Diatomeen mächtige Lockersedimentschichten am Meeresgrund gebildet. Aus ihnen sind zum Beispiel die Kreidefelsen auf Rügen entstanden. Deutlich heben sich von der weißen kalkigen Kreide dunkle Schlieren aus kieseligem Chert [sprich: schört] ab. Im Volksmund wird Chert auch als **Feuerstein** bezeichnet, weil er früher zum Feuermachen verwendet wurde.

#### Exemplarischer Vertreter der biogenen Ablagerungsgesteine



**Typ:** biogenes Ablagerungsgestein

**Name:** Korallenriffkalk

**Bestandteile:** Calcit (versteinerte Korallenskelette)

**Gefüge:** Korallen sind noch zu erkennen

**Entstehung:** Korallenskelette werden durch Lockersedimente bedeckt und im Zuge der Diagenese Teil einer Gesteinsschicht

## Versuch "Kompaktion und Zementierung von Lockersedimenten"<sup>1</sup>

### ❶ Materialien:

- Plastikspritze (50 ml; Laborbedarf), deren Vorderende abgeschnitten wurde
- etwas Vaseline oder anderes Gleitmittel
- Vogelsand, Lehm/Ton, Gips und Leitungswasser
- Gipsbecher (Behältnis zum Vermengen von Sand, Lehm/Ton und Gips mit dem Wasser)
- Spatel
- saugfähige Unterlage (Küchenpapier) und Trockenschrank (optional)
- großer Sandstein oder Folie (Modul 3, Baustein 5, Material 2, Seite 3)

### ❷ Durchführung:

- I. Im Gipsbecher werden folgende Mischungen jeweils trocken vermengt, mit etwas Wasser angerührt und in die vorher leicht mit Vaseline eingefettete Plastikspritze gefüllt:
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Gips + 8 ml Wasser
  - 3 gehäufte Spatellöffel Sand + 3 gehäufte Spatellöffel Lehm/Ton + 10 ml Wasser
  - 6 gehäufte Spatellöffel Sand + 10 ml Wasser
- II. Das offene Ende der Plastikspritze mit der Handfläche leicht verschließen und den Kolben der Spritze so lange kräftig drücken, bis keine Luft und kein Wasser mehr herausgepresst werden können (s. Abb. 1).
- III. Die Mischung vorsichtig aus der Spritze auf das Küchenpapier drücken und zum Trocknen auf die Fensterbank oder in den Trockenschrank stellen.



**Abbildung 1:** Hinweise zur Handhaltung beim Auspressen der Flüssigkeit.

### ❸ Aufgaben:

- 1) Reiben Sie mit dem Finger an den getrockneten Versuchsergebnissen. Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Welche chemischen und physikalischen Vorgänge laufen in diesem Versuch ab?
- 3) Wie nennt man diesen Prozess im Zusammenhang mit der Gesteinsbildung?

<sup>1</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003



## Expertengruppe 2: Chemische Ablagerungsgesteine

Alle Gesteine der Erde lassen sich drei Gruppen zuordnen: den Erstarrungsgesteinen (magmatischen Gesteinen), den Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteinen) und den Umwandlungsgesteinen (metamorphen Gesteinen). Die Namen weisen auf die Entstehung der Gesteinsgruppen hin: Erstarrungsgesteine entstehen aus Magma durch Abkühlung und Ablagerungsgesteine aus Lockersediment durch Ablagerung. Umwandlungsgesteine entstehen aus Erstarrungsgesteinen oder Ablagerungsgesteinen durch Umwandlung (Metamorphose). Entsprechend der Ablagerungsart werden biogene, chemische und klastische Ablagerungsgesteine unterschieden.

### Chemische Ablagerungsgesteine

Gelöste Stoffe wie Karbonate, Natriumchlorid oder Schwermetalloxide können aus Gewässern ausfallen, wenn der Sauerstoffgehalt im Wasser, die Temperatur oder der Druck sich ändern. So kristallisieren die im Meerwasser gelösten Salze aus, wenn ein Meer in tropischen Breiten - aufgrund der dort herrschenden hohen Temperaturen - verdunstet. Sie scheiden sich entsprechend ihrer Löslichkeit ab: zuerst der schwer lösliche Kalk, dann Gips, danach Steinsalz und zuletzt die am leichtesten löslichen Kalisalze. Die ausgefallenen Stoffe bilden zunächst Partikel in der Wassersäule und schließlich - nach dem Absinken - neue Schichten auf dem Lockersediment. Einen Spezialfall von Ablagerungsgesteinen stellen die aus Wasser und Methan bestehenden Gashydrate dar. Sie sehen so ähnlich aus wie Eis und entstehen in Regionen mit großen Mengen an Methan und Wasser bei niedrigen Temperaturen oder hohen Drücken (z. B. Permafrostgebiete, Ozeanboden ab einer Wassertiefe von ca. 400 m). Relativ geringe Druckverringerungen bzw. Temperaturerhöhungen können dazu führen, dass die Gashydrate zerfallen und das Methan wieder freisetzen. Das kann geschehen, wenn gashydrathaltiger Ozeanboden durch Plattentektonik in geringere Wassertiefen mit niedrigeren Drücken gehoben wird. Das Freisetzen großer Mengen von Methan trägt zum natürlichen Treibhauseffekt bei.

#### Exemplarische Vertreter



**Typ:** chemisches Ablagerungsgestein  
**Name:** Gashydrat  
**Bestandteile:** Methan, Schwefelwasserstoff und andere Gase sind in Wassermoleküle käfigartig eingeschlossen.  
**Gefüge:** Die Gashydrate treten als Lagen in Lockersedimenten auf.  
**Entstehung:** Unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen werden die Bestandteile fest.



**Typ:** Chemisches Ablagerungsgestein  
**Name:** Manganknolle  
**Bestandteile:** wechselnde mangan- und eisenreiche Lagen  
**Entstehung:** Ausfällung aus der Wassersäule

## Versuch „Sedimentation“

### ❶ Materialien:

- durchsichtige Wasserflasche aus Glas oder Plastik, möglichst mit flachem Boden (1,5 oder 2 l Volumen)
- je etwa 100 g grober Sand (Korndurchmesser ca. 1 – 2 mm) und feiner Sand (z. B. Quarz- oder Vogelsand; Korndurchmesser 0,1 – 0,8 mm) sowie etwa 40 g getrockneter Lehm oder Ton
- Leitungswasser
- optional: großer, möglichst geschichteter Sandstein

### ❷ Durchführung:

- I. Sand und Lehm bzw. Ton in die Flasche geben, mit Leitungswasser auffüllen und fest verschließen.
- II. Die Flasche kräftig schütteln, sodass sich alle Bestandteile gut vermischen und der Lehm/Ton vollständig aufgeschlämmt wird.

Hinweis: Das Schütteln der Sedimentflasche sollte in kreisenden Bewegungen erfolgen. In einem rotierenden Wasserkörper werden leichte Schwebpartikel länger in Bewegungen gehalten.

- III. Die gut durchgeschüttelte Flasche wird zur Beobachtung auf einen Tisch gestellt. Das Endergebnis zeigt sich erst nach mehreren Stunden.

### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Wo tritt dieser Prozess in der Natur auf?
- 3) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten?



**Abbildung 1: Gesteinstyp, dessen Entstehungsprozess durch den Versuch veranschaulicht werden soll**

### Expertengruppe 3: Klastische Ablagerungsgesteine

Alle Gesteine der Erde lassen sich drei Gruppen zuordnen: den Erstarrungsgesteinen (magmatischen Gesteinen), den Ablagerungsgesteinen (Sedimentgesteinen) und den Umwandlungsgesteinen (metamorphen Gesteinen). Die Namen weisen auf die Entstehung der Gesteinsgruppen hin: Erstarrungsgesteine entstehen aus Magma durch Abkühlung und Ablagerungsgesteine aus Lockersediment durch Ablagerung. Umwandlungsgesteine entstehen aus Erstarrungsgesteinen oder Ablagerungsgesteinen durch Umwandlung (Metamorphose). Entsprechend der Ablagerungsart werden biogene, chemische und klastische Ablagerungsgesteine unterschieden.

Für die Entstehung von Ablagerungsgesteinen ist die Verwitterung von großer Bedeutung. In den kalten Zonen der Erde und in den Hochgebirgen geschieht die Verwitterung vor allem durch Frostsprengung, in den feuchten Tropen durch chemische Zersetzung. Die entstehenden Verwitterungsprodukte werden durch Wasser, Wind oder Eis abgetragen und an Land oder im Meer abgelagert. Sie sind zunächst unverfestigt und werden deshalb als Lockersedimente bezeichnet. Lockersedimente können auch aus Ausfällungsprodukten von im Wasser gelösten Stoffen (z. B. Kalk) und aus Überresten von Organismen (z. B. Schalen oder Panzer von Tieren) bestehen. Durch die schwere Auflast nachfolgender Lockersedimente werden sie zusammengedrückt (kompaktiert). Gleichzeitig wachsen Minerale in den Hohlräumen und zementieren die lockeren Bestandteile. Kompaktion und Zementation führen zur Verfestigung der Lockersedimente. Der Prozess wird als Diagenese bezeichnet.

#### Klastische Ablagerungsgesteine

Klastische Ablagerungsgesteine entstehen durch Verwitterung. Ihre Bildung erfolgt in mehreren Teilschritten: Verwitterung durch mechanische, chemische und biologische Gesteinszerstörung; Abtragung und Verfrachtung durch Wind, Wasser, Eis oder auch Schwerkraft (während des Transportes kann eine Sortierung des Materials nach Größe bzw. Gewicht stattfinden); Ablagerung und Diagenese.

Je weiter der Verwitterungsschutt transportiert wurde, desto kleiner sind die Körner. Sandsteine (Durchmesser der Bestandteile 0,02 - 2 mm) findet man weit entfernt vom Entstehungsgebiet, Konglomerate (Durchmesser der Bestandteile 2 mm - 20 cm) in der Nähe vom Liefergebiet (Gebirge). Direkt am Berghang sind sie noch eckig. Durch den Transport in den Gebirgsbächen werden sie zunehmend abgerundet.

#### Exemplarische Vertreter der klastischen Ablagerungsgesteine



<p><b>Typ:</b> Klastisches Ablagerungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Sandstein</p> <p><b>Bestandteile:</b> Quarzkörner, rötliche Färbung durch ausgefallene und oxidierte Eisenverbindungen</p> <p><b>Gefüge:</b> einzelne Sandschichten unterschiedlicher Färbung bzw. Korngröße.</p> <p><b>Entstehung:</b> Entstehen durch die Verfestigung von weit transportiertem Verwitterungsschutt.</p>
--

## Versuch „Sandrippelbildung“<sup>2</sup>

### ❶ Materialien:

- 1 Plasticaquarium (Größe 20 x 20 x 40 cm)
- ca. 500 g Sand (z. B. Quarzsand, Korndurchmesser 0,1 – 0,4 mm oder Vogelsand, Korndurchmesser 0,25 – 0,8 mm)
- Leitungswasser
- optional: dunkle Unterlage (z. B. schwarzes Tonpapier)

### ❷ Durchführung:

- II. Das Plasticaquarium etwa 5 cm hoch mit Leitungswasser befüllen.
- III. 1 - 2 Esslöffel Sand in das Aquarium einstreuen und warten, bis der Sand sich abgesetzt hat.
- IV. Das Aquarium über eine schmale Seite fortwährend etwa 2 cm anheben und senken (s. Abb. 1). Der Wasserkörper soll dabei leicht und gleichmäßig hin- und herschwingen. Auf einer dunklen Unterlage ist das Versuchsergebnis besonders gut zu erkennen.

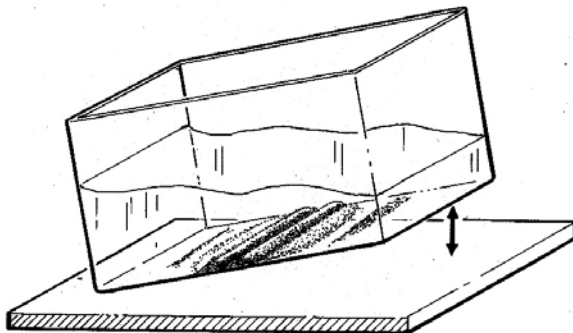


Abbildung 1: Sandrippelbildung; links im Versuch; rechts fossile Rippelmarken in einem Sandstein von der Insel Helgoland

### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.
- 2) Wo tritt dieser Prozess in der Natur auf?
- 3) Welche Bedeutung haben die Versuchsergebnisse für die Interpretation von Gesteinsschichten?
- 4) Sie finden einen roten Sandstein auf Helgoland. Er enthält Sandrippelstrukturen (s. Abb. 1). Was lernen Sie daraus über die Geschichte von Helgoland?

<sup>2</sup> nach EARTH SCIENCE EDUCATION UNIT 2003



## Expertengruppe 4: Erstarrungsgesteine

Erstarrungsgesteine entstehen aus heißer, flüssiger Gesteinsschmelze. Gesteine schmelzen im Erdinneren, wo es heißer als 1000 °C ist und sehr hohe Drücke von vielen tausend Bar herrschen. Diese Gesteinsschmelze (das Magma) steigt in die kältere Erdkruste auf, kühlt dort ab und erstarrt. Auf diese Weise entstehen die Erstarrungsgesteine, welche auch magmatische Gesteine genannt werden. Je nach Entstehungsart können Tiefen- und Vulkangesteine unterschieden werden (s. Abbildung unten):

- **Tiefengesteine (Plutonite)** entstehen, wenn Magma tief im Erdinneren langsam abkühlt. Die Minerale haben viel Zeit zum Wachsen und es entstehen mittel- bis grobkörnige Kristalle, die unter der Lupe gut zu erkennen sind.
- **Vulkangesteine (Vulkanite)** entstehen in der Nähe der Erdoberfläche. Reißt eine Gesteinsspalte plötzlich auf, bahnt sich das Magma sehr schnell seinen Weg an die Erdoberfläche. Dort kühlt es schneller ab als im Erdinneren. Deshalb entstehen kleinere Kristalle. Oftmals sind im Erdinneren schon größere Kristalle entstanden, die dadurch von sehr vielen kleineren Kristallen umgeben werden. Nicht alle Kristalle sind unter der Lupe gut zu erkennen. Das entstehende Erscheinungsbild ist typisch für Gesteine, die auf Vulkanismus zurückzuführen sind. Man spricht von porphyrischem Gefüge. Vulkanische Gesteine können aber auch nur aus kleinen Kristallen bestehen.

### Exemplarische Vertreter der Gesteinsgruppe der Magmatite



**Typ:** Vulkangestein

**Name:** Rhyolith (Rhombenporphyr)

**Bestandteile:** Deutlich sichtbare rötliche und gelbliche Minerale (Feldspäte) umgeben von einer scheinbar homogenen Grundmasse in der Kristalle mit dem bloßen Auge nicht identifiziert werden können.

**Gefüge:** Porphyrisch (größere Kristalle umgeben von kleineren Kristallen).

**Entstehung:** Zunächst kühlte das Magma im Erdinneren relativ langsam ab, stieg mit den bereits kristallisierten Feldspäten in die Nähe der Erdoberfläche auf und kristallisierte dort so schnell, dass nur noch sehr kleine Minerale entstanden.



**Typ:** Tiefengestein (Plutonit)

**Name:** Granit

**Bestandteile:** Quarz (gräulich), Glimmer (schwarz), Feldspäte (weiß)

**Gefüge:** Körnig, Minerale sind von gleichmäßiger Größe.

**Entstehung:** Magma kühlte im Erdinneren vollständig und gleichmäßig ab, sodass alle Minerale eine einheitliche Größe erreichten.

## Versuch „Temperaturabhängige Kristallisation von Schmelzen“<sup>3</sup>

### ❶ Materialien:

- ca. 1 Teelöffel Salol (Salicylsäure-Phenylester), 1 Spatel
- 1 kleines Reagenzglas, 1 kleines Becherglas, etwas Leitungswasser, Heizplatte, optional: Thermometer
- ein Kühlakku, Eisschrank oder eine mit Eis gefüllte Petrischale
- 2 Objektträger, 2 Deckgläschen
- Lupe oder Binokular zum Betrachten der Kristalle

### ❷ Sicherheitshinweis:

Salol (Phenyl-Salicylsäureester) ist minder giftig und leicht reizend. Die Dämpfe von Salol sollten nicht eingeatmet werden.

### ❸ Durchführung:

- I. Ein Objektträger soll an eine kalte Stelle gelegt werden (z. B. auf die mit Eis gefüllte Petrischale oder einen Kühlakku), der andere wird in die (warme) Nähe der Heizplatte gelegt.
- II. Das Becherglas wird zu etwa einem Viertel mit Leitungswasser gefüllt und auf die Heizplatte gestellt (Schmelzpunkt von Salol 41 – 43 °C).
- III. Das Salol wird in ein Reagenzglas gegeben, das dann in das mit Wasser gefüllte Becherglas gestellt. Nach einigen Sekunden schmilzt das Salol.
- IV. Je ein Tropfen des geschmolzenen Salols auf die beiden Objektträger geben und das Deckgläschen vorsichtig auflegen.
- V. Nachdem das Salol kristallisiert ist, können die Kristalle mit einer Lupe oder einem Binokular verglichen werden.

### ❹ Aufgaben:

- 1) Vergleichen Sie das Ergebnis auf dem gekühlten Objektträger mit dem Ergebnis auf dem angewärmten. Fertigen Sie eine Zeichnung an. Hinweis: Verwenden Sie ein Binokular oder eine Lupe.
- 2) Welche Bedeutung hat dieser Versuch für die Interpretation der Entstehung von Tiefen- bzw. Vulkangesteinen? Vergleichen Sie hierzu ihre Beobachtungen mit den beiden Fotos (s. Abb. 1).



Abbildung 1: Gesteinstypen, deren Entstehung durch diesen Versuch erläutert werden kann.

**Hinweis:** Verwenden Sie ein Binokular oder eine Lupe.

<sup>3</sup> nach KING, FORDHAM und SMITH 1993



## Expertengruppe 5: Umwandlungsgesteine

Gelangen Gesteine von der Erdoberfläche in Erdzonen mit höheren Drücken und Temperaturen oder werden sie von heißem Magma in ihrer Nachbarschaft erwärmt, wandeln sich die in den Gesteinen enthaltenen Minerale durch chemische Reaktionen um. Der Prozess wird als Metamorphose und die entstehenden Gesteine werden als Umwandlungsgesteine oder metamorphe Gesteine bezeichnet. Auch Sedimentgesteine werden durch erhöhte Drücke und Temperaturen umgewandelt. Aus Kalkstein entsteht dabei Marmor.

Gesteine gelangen vor allem durch Plattentektonik in große Tiefen: Die Lithosphäre ist in eine Anzahl von Platten zerbrochen, die auf dem plastischen Erdinneren driften. Es lassen sich ozeanische und in kontinentale Lithosphärenplatten unterscheiden. Die ozeanischen Lithosphärenplatten sind spezifisch schwerer als die kontinentalen Platten und tauchen deshalb in das Erdinnere ab, sobald sie auf kontinentale Erdkruste treffen. Dieses Abtauchen wird als Subduktion bezeichnet. Angetrieben werden diese Lithosphärenplatten unter anderem durch Konvektionsströme<sup>4</sup> im Erdinneren. Bei der Versenkung steigt die Temperatur, was zum Aufstieg der in den mitgeführten Lockersedimenten enthaltenen Flüssigkeit führt. Diese sorgt dafür, dass das Erdmantelgestein - in das sie eindringen – teilweise aufschmilzt. Es entsteht Magma, das teilweise bis an die Erdoberfläche aufsteigt und dort Vulkane bildet. Auch die Gesteine, die von dem heißen Magma durchströmt werden, schmelzen teilweise auf oder werden stark erhitzt und dadurch zu metamorphen Gesteinen.

Metamorphe Gesteine sind im Erdinneren oft hohen Drücken ausgesetzt und weisen deshalb nicht selten eine geschieferte Struktur auf. Diese kommt zustande, wenn plättchenförmige Minerale sich mit ihrer größten Oberfläche senkrecht zur Druckrichtung einregeln. Während der Metamorphose können schön ausgebildete Minerale wie Granat oder Diamant wachsen.

### Exemplarische Vertreter der Gesteinsgruppe der Metamorphite

	<p><b>Typ:</b> Umwandlungsgestein</p> <p><b>Name:</b> Gneis</p> <p><b>Bestandteile:</b> Glimmer (schwarz), Feldspäte (rötlich), Quarz (weiß), manchmal Granat (rot)</p> <p><b>Gefüge:</b> grobkörnig, deutlich geschiefert,</p> <p><b>Entstehung:</b> durch Umwandlung (Metamorphose) z. B. aus Erstarrungs- oder Ablagerungsgesteinen</p>
	<p><b>Typ:</b> Umwandlungsgesteine</p> <p><b>Name:</b> Marmor</p> <p><b>Bestandteile:</b> Kalzit</p> <p><b>Gefüge:</b> gleichmäßige Kristallgröße, fein bis grobkörnig</p> <p><b>Entstehung:</b> Entstehung durch Metamorphose (Umwandlung) aus Kalkstein</p>

<sup>4</sup> Insgesamt werden heute drei Prozesse als Ursache für die Plattentektonik angenommen, die im Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“ ausführlich erläutert werden.

## Versuch „Verformung von Fossilien“<sup>5</sup>

### ❶ Materialien:

- etwa 150 g Knetmasse
- Gips, etwas Wasser und ein Gipsbecher
- Holzstäbchen oder Spatel zum Anrühren
- 2 Holzleisten (Stärke etwa 10 mm)
- kurze Stativstange (oder ein Nudelholz bzw. eine Flasche)
- kleine, dickschalige Muschel (z. B. Herzmuschel *Cerastoderma* sp.)

### ❷ Durchführung:

- I. Die Knetmasse zwischen den beiden Holzleisten gleichmäßig ausrollen (s. Abb. 1).
- II. Die Muschelschale vorsichtig hinein drücken (die Innenseite der Schale soll nach oben zeigen).
- III. Die Muschelschale vorsichtig entfernen und den Abdruck mit Gips füllen. Durch kleine Vibrationen eines in den Gips gehaltenen Holzstäbchens oder Spatels verteilt sich der Gips besser.
- IV. In einem zweiten Durchgang wird wieder ein Abdruck der Schale erzeugt, jedoch wird die Knetmasse vor dem Ausgießen der Form mit Gips mit den beiden Holzleisten etwas zusammengedrückt. Dieser Vorgang soll mehrfach wiederholt werden, wobei die Verformungskräfte aus unterschiedlichen Richtungen (horizontal, vertikal, etc.) angreifen sollen.
- V. Nachdem der Gips abgebunden hat, werden alle Gipsmodelle nebeneinander gelegt.

### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung.
- 2) Durch welchen natürlichen Prozess werden Gesteine in der Natur auf ähnliche Weise beansprucht?
- 3) Was passiert mit den Fossilien in der Natur unter entsprechenden Bedingungen?
- 4) Was bedeutet dies für die Interpretation von Fossilfunden bzw. die Bestimmung der fossilisierten Arten (s. Abb. 2)?



Abbildung 2: Natürlicher Abdruck von einem Dinosaurierfuss.

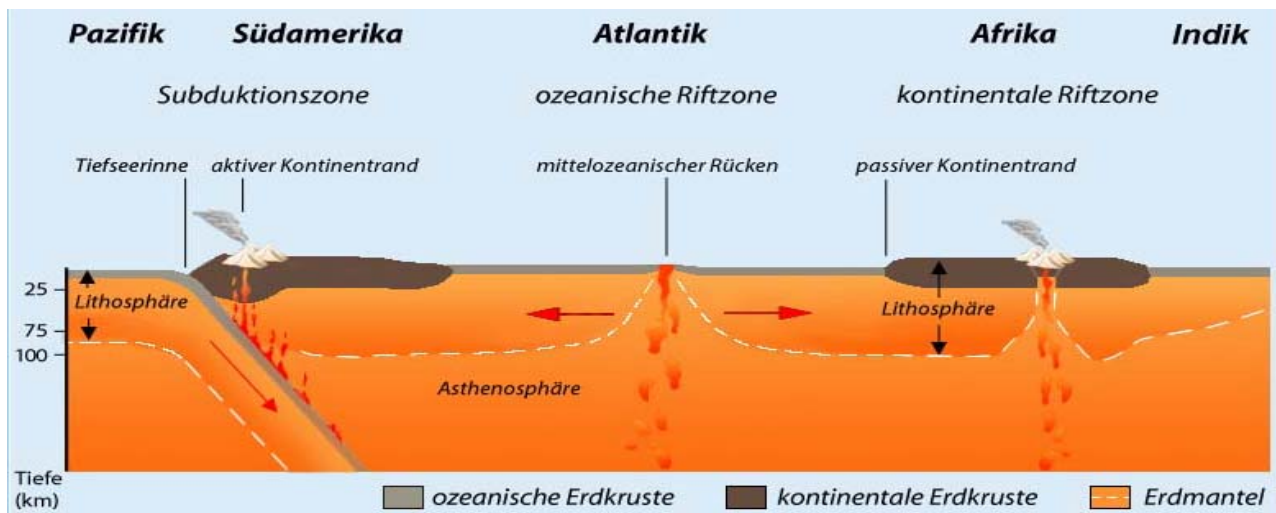
<sup>5</sup> nach LEE 2001



## Expertengruppe 6: Plattentektonik

Im Jahre 1912 stellte Alfred WEGENER seine dynamischen Vorstellungen von auseinander brechenden und wandernden Kontinenten vor. Diese visionäre Sicht (Hypothese) der Erdentwicklung wurde über 50 Jahre lang von den Fachleuten fast einhellig bekämpft. Der umfassende Ausbau der Hypothese Alfred WEGENERS zur Theorie vom Prozess der Plattentektonik erfolgte etwa seit 1967.

Durch geophysikalische Messungen ist heute der schalige Aufbau der Erde bekannt. Die äußerste starre Schicht der Erde wird Lithosphäre genannt und ist in einzelne Schollen zerbrochen. Diese driften auf einem plastischen teilweise aufgeschmolzenem Untergrund - der Asthenosphäre. Man unterscheidet kontinentale und ozeanische Platten. Trifft eine ozeanische auf eine kontinentale Platte taucht die relativ schwerere ozeanische in der Regel unter die kontinentale Platte ab (Subduktionszone). Wenn zwei Platten mit ozeanischer Kruste voneinander wegdriften, strömt Magma an der Bruchkante aus und neue ozeanische Kruste entsteht (mittelozeanische Rücken). Treffen zwei kontinentale Platten aufeinander wird in ihrer Mitte ein Gebirge aufgefaltet.



**Abbildung 1:** Generalisierter Schnitt durch die Lithosphäre und Teile des oberen Erdmantels vom Pazifik bis zum Indik. Im Pazifik bei Südamerika befindet sich eine Subduktionszone, an der Lithosphärenplatten aufeinanderzudriften. Im Atlantik ist dargestellt wie an einer ozeanischen Riftzone Magma aus dem Erdinneren aufsteigt und im Bereich eines mittelozeanischen Rückens zu neuer ozeanischer Kruste erstarrt. An solchen Riftzonen driften Lithosphärenplatten voneinander weg. Die roten Pfeile geben die Richtungen an, in die die Lithosphärenplatten driften.

Der Kreislauf der Gesteine ist eng an die Plattentektonik gekoppelt. Einige Beispiele:

- Lithosphäre mit aufliegendem Lockersediment und enthaltenem Wasser kann an Subduktionszonen ins Erdinnere verfrachtet und dort aufgrund der dort vorherrschenden (anderen) Druck- und Temperaturbedingungen umgewandelt werden. Dadurch können Umwandlungsgesteine entstehen.
- Gesteine können im Erdinneren schmelzen, zu Magma werden, aufsteigen und in der Lithosphäre zu Tiefengesteinen und an der Erdoberfläche zu Vulkangesteinen erstarren (Erstarrungsgesteine).
- Durch die Gebirgsbildung werden Teile der Lithosphäre in große Höhen verfrachtet. Dort sind sie verstärkt der Verwitterung (Wind, Frost, Niederschlag) ausgesetzt. Der Verwitterungsschutt wird in Senken transportiert und zu Ablagerungsgesteinen verfestigt.

## Versuch „Auffaltung von Sedimentschichten“<sup>6</sup>

### ❶ Materialien:

- Plasticaquarium (Größe etwa 20 x 20 x 40 cm)
- 2 kleine Sperrholzplatten oder feste Pappstücke, die etwas schmaler sind als das Aquarium breit ist, aber etwa um die Hälfte höher
- ca. 500 g trockener Sand und verschiedene Farbstoffe (Lebensmittelfarben)

### ❷ Durchführung:

- I. Die beiden Sperrholzplatten in einem Abstand von je 1 - 2 cm von den Seitenwänden in das Plasticaquarium stellen.
- II. Mehrere Lagen (Schichthöhe etwa 1 – 2 cm) gefärbten trockenen Sandes gleichmäßig in das Aquarium schütten, sodass eine parallele Schichtung entsteht.
- III. Die beiden Holzplatten senkrecht zueinander vorsichtig zusammendrücken.

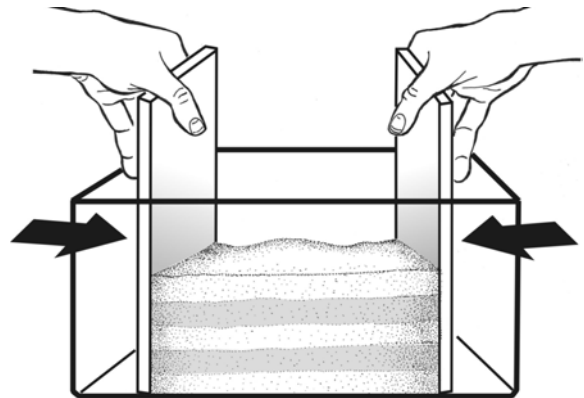


Abbildung 1: Die Sandschichten lassen sich leichter zusammendrücken, wenn die beiden Holzbletchen in 1 - 2 cm Abstand zu den Außenwänden positioniert werden (Zeichnung E. KOLASCZINSKI IPN).

### ❸ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung und zeichnen Sie das Endergebnis.
- 2) Haben Sie das Ergebnis einer vergleichbaren Auffaltung in der Natur beobachten können? Wenn ja, wo?
- 3) Liegen die Lagen, die Sie als erste eingestreut haben (ältere Schichten), nach dem Versuch immer noch unten?



Abbildung 2: Gesteinsformation, deren Faltungsprozess durch diesen Versuch veranschaulicht werden soll. Das Bild zeigt die Purbeck Beds in Stairhole bei Lulworth (County Dorset) in Südengland. Die hellen Kalksteinschichten sind durch Faltung stark zerrüttet. Die dunkleren Zwischenlagen sind tonig. Quelle: H. WAGNER, CAU zu Kiel.

<sup>6</sup> nach EARTH SCIENCE TEACHERS` ASSOCIATION 1992



## Expertengruppe 7: Verwitterung

Verwitterung ist die Summe aller Prozesse, die zu Veränderungen der Gesteine und Minerale im Bereich der Erdoberfläche im Kontakt mit Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre führen. Die Lithosphäre besteht überwiegend aus festem Gestein, das jedoch nur vereinzelt zutage tritt. Meistens ist der Fels durch eine Deckschicht (Verwitterungsschutt und Boden) verhüllt, die durch allmähliche Zermürbung des Ausgangsgesteins entstanden ist. Unter dem Begriff Verwitterung fasst man alle Vorgänge zusammen, die an der Bildung von Verwitterungsschutt und Boden beteiligt sind. Der Begriff Verwitterung bezeichnet im Allgemeinen oberflächennahe Prozesse.

Die Umwandlung des harten Gesteins in den losen Boden vollzieht sich in mehreren ineinander greifenden Vorgängen. Die mechanisch wirkende **physikalische Verwitterung** (Temperaturverwitterung, Frostsprengung, Salzverwitterung) zerlegt das Ausgangsgestein durch die Bildung von Rissen und Spalten in kleinere Blöcke und schließlich in Schutt. Temperatur-, Druck- oder Volumenänderungen von Gesteinen, führen zu mechanischem Ausbrechen von Mineralen oder Gesteinspaketen aus dem festen Gesteinsverbund. Diese Zerlegung des Gesteinsverbandes vergrößert die Oberfläche und erleichtert die Zirkulation chemisch aktiver Substanzen und Lösungen.

Als **chemische Verwitterung** bezeichnet man Veränderungen von Gesteinen, Lockersedimenten und Böden, die durch die Reaktion ihres Mineralbestandes mit zirkulierendem Wasser und mit den in diesen enthaltenen Stoffen verursacht werden. Beide Reaktionen gehen bei der natürlichen Gesteinszersetzung Hand in Hand. Unter feuchtheißen Bedingungen laufen chemische Verwitterungsreaktionen sehr viel rascher ab als in trockenen und kalten Gebieten. Fast alle Minerale werden in Tone und in leicht lösliche Substanzen zerlegt, und die resultierende Landschaft zeigt ein niedriges Relief und mächtige Böden. Die chemische Verwitterung ist am effektivsten bei kleinen Korngrößen, weil dort ein relativ kleines Volumen von einer relativ großen Oberfläche umgeben ist. Die wichtigste Rahmenbedingung ist jedoch die Zeit.

Die dritte Gruppe von Verwitterungsformen bildet die **chemisch-biologische Verwitterung**. Auch die den Boden bewohnenden Organismen beteiligen sich direkt oder indirekt an der Gesteinszersetzung. Die ersten Besiedler kahler Felswände sind Bakterien und niedere Pilze. Ihnen folgen Algen, Flechten und Moose und bereiten durch die Ansammlung von Lockererde den Weg für höhere Pflanzen. Sie alle scheiden  $H^+$ -Ionen ab, welche die Mineralteilchen im Boden angreifen und zerlegen. Flechten, Algen, Pilze und Moose speichern darüber hinaus Wasser, welches länger auf ein Gestein einwirken kann. Die Rhizome von Flechten und Algen dringen in das Gestein ein und öffnen dadurch zusätzliche Einsickerwege. Durch den Entzug von schwer löslichen Mineralien wirken Flechten sogar direkt verwitterungsfördernd. Grabende und bohrende Tiere (z. B. Ameisen, Würmer, Schnecken, Larven) tragen zur Umwälzung und Auflockerung des Bodens bei. Sie verbreitern die Verwitterungsfront und unterstützen die chemische Verwitterung durch die Produktion von organischen Säuren.



## Versuch „Chemische Verwitterung“

### ❶ Materialien:

- Kalkstein oder Kalksandstein (z. B. Plattenkalk, Solnhofen, Bayern)
- Petrischale
- Salzsäure (max. 10 %)
- Schutzbrille, Laborkittel und Handschuhe

### ❷ Sicherheitshinweise:

- Beim Arbeiten mit Salzsäure immer Schutzkleidung und –brille benutzen!
- Nachdem der Stein von der Salzsäure teilweise angelöst wurde, **muss** dieser mit Wasser abgespült werden. Mit ein paar Tropfen Spülmittel (leicht alkalisch!) lassen sich Salzsäurereste auf der Hand neutralisieren.

### ❸ Durchführung:

Kalk- bzw. Kalksandstein in die Petrischale legen und vorsichtig mit einer Pipette einen kleinen Tropfen Salzsäure daraufträufeln.

### ❹ Aufgaben:

- 1) Beschreiben und erläutern Sie das Experiment und die Ergebnisse.
- 2) Gibt es ähnliche Prozesse in der Natur?
- 3) Welche Bedeutung hat die chemische Verwitterung für den Kreislauf der Gesteine?





## Baustein 6: Arbeitsbericht für Gruppen

Gruppe: \_\_\_\_\_ Moderation/Gesprächsleitung: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_

Arbeitsziel der Gruppe:

Zeitnehmer/in:

Zeitplan:

Beginn der Arbeit: \_\_\_\_\_ Ende der Arbeit \_\_\_\_\_

Sonstiges:

Abwesend:

Sonderaufgaben (Wer? Was? Bis wann?):

Arbeitsziel erreicht?

Ja

Nein  Warum nicht?

Konsequenzen:

Bemerkungen:

Unterschrift der Moderation/Gesprächsleitung: \_\_\_\_\_



## Baustein 6: Beurteilungsbogen

Name: \_\_\_\_\_ Gruppe: \_\_\_\_\_ Thema: \_\_\_\_\_

### I. Mein Beitrag zur Gruppenarbeit (Selbsteinschätzung)

- Der gesamten Gruppe stehen zu jedem Bewertungsaspekt je Gruppenmitglied die angegebenen Punkte zur Verteilung zur Verfügung (z. B. zu 1.: bei 7 Gruppenmitgliedern  $7 \times 3$  Punkte = 21 Punkte). Die Verteilung der Punkte auf die einzelnen Gruppenmitglieder geschieht in der Regel im Konsensverfahren. Kann kein Konsens hergestellt werden, wird über strittige Verteilungen abgestimmt.
- Die Gesamtpunktzahl eines Gruppenmitgliedes geteilt durch die durchschnittlich mögliche Punktzahl 9 ergibt den individuellen Bewertungsfaktor (z. B. Gesamtpunktzahl 9 ergibt den Bewertungsfaktor 1 bzw. Gesamtpunktzahl 12 ergibt den Bewertungsfaktor  $12/9 = 1,33$ ).

Bewertungsaspekte	durchschnittliche Punktzahl	Meine Punktzahl
1. Ich habe folgende Fachthemen/Inhalte selbstständig erarbeitet, für meine Mitschüler/innen auf wesentliche Inhalte reduziert und verständlich erklärt:	<b>3</b>	
2. Ich habe von der Gruppe folgende Arbeiten übernommen, bearbeitet und (termingerecht) fertiggestellt:	<b>2</b>	
3. Ich habe das methodische, soziale und zielorientierte Vorgehen der Gruppe vorangetrieben und die anderen Gruppenmitglieder motiviert, indem ich...	<b>2</b>	
4. Ich habe während der Gruppenarbeit nie/ selten/ oft gefehlt (Zutreffendes bitte unterstreichen).	<b>2</b>	
Punkte:	<b>9</b>	

Individueller Bewertungsfaktor: \_\_\_\_\_



<b>II. Meine Einschätzung der Gruppenarbeit</b>	<b>++</b>	<b>+</b>	<b>o</b>	<b>-</b>
Die zur Verfügung stehende Unterrichtszeit wurde optimal für die Gruppenarbeit genutzt (Privatgespräche, Pausen, pünktliches Erscheinen).				
Es wurde über die Mindestanforderungen hinaus gearbeitet.				
Die Gruppe sorgte für ein insgesamt faires und freundliches Arbeitsklima.				
Sinnvolle Absprachen wurden getroffen und eingehalten.				
Die Arbeitsteilung war gerecht und zweckmäßig.				
Die Arbeitsaufgabe konnte erfüllt werden, auch wenn es Konfliktsituationen gab.				
Die Gruppe hat selbstständig und effizient gearbeitet.				

++ : trifft voll zu

+ : trifft eher zu

o : trifft nur teilweise zu

- : trifft nicht zu

 Bemerkungen/ das ist mir sonst noch wichtig: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

↓ Nur von der Lehrkraft auszufüllen ↓

<b>III. Bewertung des Gruppenergebnisses:</b>	<b>Maximale Punkte</b>	<b>Erreichte Punkte</b>
Fachliche Richtigkeit	4	
Vollständigkeit	4	
Verständlichkeit / Strukturierung	4	
Gestaltung/ Kreativität	3	
Gesamtpunkte:	15	

Bemerkungen:

Individueller Bewertungsfaktor: \_\_\_\_\_

Zensur:

Datum:

Unterschrift der Lehrkraft:

## Baustein 6: Gruppenpuzzle

Bei einem Gruppenpuzzle werden die Schüler/innen in Gruppen eingeteilt. In so genannten **Expertengruppen** erarbeiten sie sich einen Teilbereich des Unterrichtsthemas. Anschließend wechseln die Experten in andere Arbeitsgruppen, die **Stammgruppen**, in denen nun jeweils ein/e Experte/in für jeden Themenbereich zuständig ist. Diese Gruppen bearbeiten eine übergeordnete Aufgabe, die sich nur mit dem Wissen aller Experten/innen lösen lässt. Zur Lösung der gemeinsamen Aufgabe muss zunächst jede/r Experte/in sein/ihr Wissen den anderen Schüler/innen der Stammgruppe mitteilen. Da alle Stammgruppenmitglieder danach den gleichen Wissensstand haben, kann jetzt die übergeordnete Aufgabe gemeinsam gelöst werden. Dieses Vorgehen entspricht der Teamarbeit in Wirtschaftsunternehmen und an Universitäten: Jede Person ist für eine Teilaufgabe verantwortlich und muss ihren Beitrag zum Erfolg des ganzen Teams leisten.

Sie gehen folgendermaßen vor:

1. Themenwahl: Jede/r Schüler/in erhält oder wählt einen der Themenbereiche (Zeitbedarf ca. 5 Minuten).
2. Wissenserwerb im Selbststudium: Jede/r Schüler/in erarbeitet sich die gesamten Inhalte seines/ihres Themenbereichs zunächst in Einzelarbeit. Zur Überprüfung dienen die beiliegenden Kontrollaufgaben (Zeitbedarf variiert je nach Material).
3. Vertiefung und Unterrichtsplanung in der **Expertengruppe**: Alle Teilnehmer/innen mit dem selben Thema vertiefen das Gelernte gemeinsam. Sie schreiben die wichtigsten Inhalte stichpunktartig heraus, sodass sie den Inhalt in einem Vortrag darstellen können. Dann werden die Ergebnisse verglichen: Ein Expertengruppenmitglied trägt seine Zusammenfassung mündlich vor, ein von ihm im Anschluss bestimmtes weiteres Mitglied wiederholt und ergänzt. Danach kann jede/r Verbesserungen und Ergänzungen vortragen. Ungeklärte Fragen werden in der Gruppe gelöst. Am Ende soll jede/r Experte/in in der Lage sein, den Inhalt des Textes wiederzugeben. Weiterhin planen die Expert/innen, wie sie den anderen Schüler/innen ihre Inhalte vermitteln können: methodisches Vorgehen, Einsatz von Medien, Zeiteinteilung, Kontrolle des Lernfortschritts (Zeitbedarf ca. 30 Minuten).
4. Wechsel der Gruppen: In neuer Zusammensetzung, in den **Stammgruppen**, informiert jede/r Experte/in die anderen Mitglieder der Gruppe über seinen/ihren jeweiligen Themenbereich. Die Gruppenmitglieder fragen nach, bis sie alles verstanden haben (Zeitbedarf variiert je nach Material).
5. Abschluss: Die Stammgruppe löst gemeinsam die gestellte übergeordnete Aufgabe.
6. Mit Hilfe eines Arbeitsberichtes für Gruppen kann die Arbeit geplant und dokumentiert werden. Ein Beurteilungsbogens ermöglicht die Reflektion und Bewertung des Arbeitsverhaltens der Gruppe.

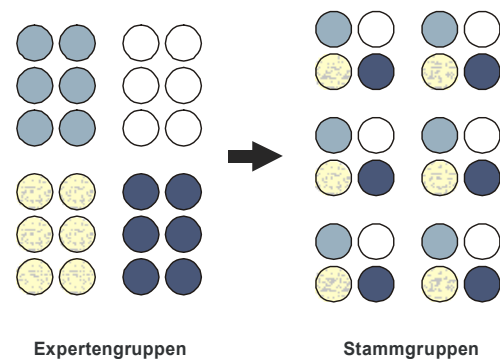


Abbildung 1: Die Organisation im Überblick. Hier werden vier Themenbereiche von 24 Schülern bearbeitet.





## Baustein 7: Experteninterviews

### ❶ Materialien:

- Zettel etwa DIN - A5, Bleistift
- Kassettenrekorder mit Mikrofon oder Videokamera mit Mikrofon
- Zugang zu einem Computer auf den die CD-ROM „System Erde“ gespeichert wurde.

### ❷ Was ist ein Experteninterview?

Ein Interview ist eine Gesprächsform zur Ermittlung von Wissen, Erfahrungen und Meinungen. Die interviewenden Personen steuern das Gespräch durch zielgerichtete Fragen. Experteninterviews sind dazu geeignet, Informationen über einen speziellen Wissensbereich zu erhalten. Es ist daher wichtig, den geeigneten Experten auszuwählen. Für das Thema Gesteinskreislauf eignen sich als Interviewpartner besonders gut Geolog/innen oder Mineralog/innen. Nur wenn die Interviewer/innen selber einen guten Kenntnisstand haben, können sie zielgerichtete Fragen stellen und den Gesprächen die Richtung geben, die sie interessiert.

### ❸ Aufgaben:

- 1) Notieren Sie eine Frage auf einem Zettel, die Sie einem/r Geowissenschaftler/in stellen möchten. Die nachfolgenden Sätze dienen dabei als Orientierungshilfe:
  - Wenn ich noch eine Frage zum Thema Gesteinskreislauf an einen Experten/eine Expertin richten dürfte, würde ich Folgendes fragen:
  - Die ganze Zeit ist mir die folgende Frage unklar geblieben:
- 2) Ordnen Sie alle Fragen der Schüler/innen gemeinsam mit Ihrer Lehrkraft anhand geeigneter Kategorien z. B. an der Tafel.
- 3) Versuchen Sie die Fragen zunächst selber zu beantworten. Über einige Themen wissen Sie sicher schon Bescheid. Hierfür sollen Sie Fachbücher, Zeitschriften, das Internet oder die CD-ROM „System Erde“ nutzen. Die Fragen, die Sie nicht selber beantworten können, sollen in einem Experteninterview geklärt werden, z. B. stellen Sie diese Fragen zusammen.
- 4) Informieren Sie sich über Kriterien für gute Interviews, indem Sie Interviews beispielsweise aus Zeitschriften miteinander vergleichen oder Ihre/n Deutschlehrer/in befragen. Stellen Sie gemeinsam mit Ihrer Lehrkraft eine Liste mit Kriterien auf, die gute Interviews auszeichnen.
- 5) Entwickeln Sie einen Interviewleitfaden unter Berücksichtigung der Kriterienliste.
- 6) Wählen Sie einen/eine Experten/in aus bitten Sie ihn/sie um das Interview.
- 7) Führen Sie das Interview durch und dokumentieren Sie es mit einem Kassettenrekorder oder einer Videokamera.
- 8) Fassen Sie Ihre Arbeitsergebnisse in einem Text zusammen.
- 9) Präsentieren Sie Ihre Arbeitsergebnisse Ihren Mitschüler/innen.



## Baustein 8: Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen - Gruppenpuzzle

### ❶ Materialien:

- Für jede Arbeitsgruppe mit 5 Personen:
  - Arbeitsbogen „Industrielle Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen - Gruppenpuzzle“ (Modul 3, Baustein 8, Material 2)
  - Arbeitsbogen „Arbeitsbericht für Gruppen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 3)
  - CD-ROM „System Erde“ auf einem Notebook bzw. Zugang zu einem Computer (benötigt wird das Glossar)
- optional: für jede/n Schüler/in den Arbeitsbogen „Beurteilungsbogen für Stammgruppenarbeit“ (Modul 3, Baustein 6, Material 4)

### ❷ Allgemeine Informationen:

Übersicht über die Themen der **Expertengruppen** für das Gruppenpuzzle zur industriellen Anwendung von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen:

- Expertengruppe 1: Industrielle Anwendungen von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen
- Expertengruppe 2: Minerale und Gesteine - Beispiele für Verwendungen
- Expertengruppe 3: Festkörper in der Materialwissenschaft: Werkstoffe (Teil 1)
- Expertengruppe 4: Festkörper in der Materialwissenschaft: Werkstoffe (Teil 2)

### ❸ Aufgaben:

- 1) Bestimmen Sie eine/n Moderator/in, der/die die Erfüllung des Arbeitsauftrages in der vorgegebenen Zeit überwachen soll. Nutzen Sie das Material „Arbeitsbericht für Gruppen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 3).
- 2) Verteilen Sie die diesem Material beigefügten Texte in Ihrer **Stammgruppe**, sodass jedes Gruppenmitglied einen anderen Text bekommt. Erarbeiten Sie sich Wissen zum Thema in **Expertengruppen**.
- 3) Begutachten Sie mit Ihrer **Stammgruppe** die Materialien, die für den Bau des Schulgeländes, der Schuleinrichtung, der parkenden Autos oder weiterer interessanter Objekte verwendet wurden oder die natürlich dort vorkommen. Tragen Sie Ihre Beobachtungen in die unten stehende Tabelle ein oder legen Sie eine eigene Tabelle in Ihrem Heft an.
- 4) Abschließend soll die Gruppenarbeit reflektiert werden. Hierfür sollen Sie das Material „Beurteilungsbogen“ (Modul 3, Baustein 6, Material 3) verwenden.

## Expertengruppe 1: Industrielle Anwendungen von Gesteinen, Mineralen und anderen Feststoffen

### Einführung

Die Nutzung von *Gesteinen*<sup>1</sup> und *Mineralen* ist genauso vielfältig wie die Nutzung von organischen oder künstlich erzeugten Feststoffen. Technisch relevant sind dabei für alle Feststoffe ihre Eigenschaften: mechanische, also z. B. hohe Festigkeit, aber auch physikalische oder chemische Eigenschaften, wie z. B. thermisches, magnetisches, elektrisches, optisches, *piezoelektrisches* Verhalten oder eine besondere chemische Resistenz. Sie ergeben sich aus der Zusammensetzung und Struktur der Substanzen.

Im Unterschied zu Gasen und Flüssigkeiten zeichnen sich Festkörper durch ihre Formstabilität aus. Diese ist darauf zurückzuführen, dass ihre Bausteine – Atome, Ionen, Moleküle – gut definierte, ortsfeste strukturelle Anordnungen im Raum einnehmen. Die räumlichen Strukturen bestimmen auch die physikalischen Eigenschaften der Festkörper. Festkörper sind unverzichtbar auf unterschiedlichen Gebieten wie der modernen Kommunikationstechnik oder der Entwicklung wirksamerer Arzneimittel.

Festkörper können homogen, d. h. einheitlich, zusammengesetzt sein, oder heterogen, wenn sich mehrere homogene Körper vereinigt haben. Natürlich vorkommende homogene Festkörper werden als *Minerale* bezeichnet. *Gesteine* sind natürliche heterogene Festkörper, sie sind aus verschiedenen Mineralen aufgebaut.

Die weitaus meisten homogenen Festkörper besitzen einen kristallinen Aufbau, d. h. ihre Bausteine sind periodisch angeordnet, sie liegen auf einem Raumgitter. Kennt man die kleinste Einheit eines solchen Kristalls - man bezeichnet sie auch als Elementarzelle - kann man die Lage aller Bausteine im Kristall angeben, auch der weit von der Ausgangszelle entfernt liegenden Elementarzellen: Kristalle besitzen *Fernordnung*. Salze, *Keramik*, fast alle *Metalle*, aber auch viele organische Substanzen sind kristallin (s. Abb. 1).

Im Unterschied zu den Kristallen besitzen amorphe Festkörper eine *Nahordnung*. Für solche Festkörper kann man nur statistische Aussagen über Anzahl, Anordnung und Abstand der nächsten Nachbarn um einen Baustein machen. Beispiele für amorphe Festkörper sind Gläser. Neben dem allgemein bekannten Material, aus dem man z. B. Fenster, Trinkgläser, Flaschen formt, gibt es auch *metallische* Gläser. Amorphe

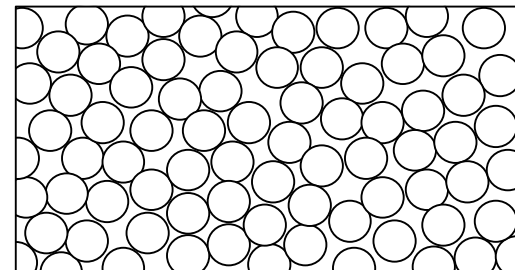
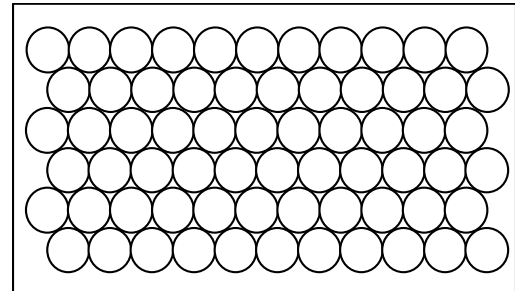


Abbildung 1: Zweidimensionale schematische Darstellung einer kristallinen Struktur mit Fernordnung (oben) und einer amorphen Struktur mit Nahordnung (unten).

<sup>1</sup> Die kursiven Begriffe können im Glossar der CD-ROM „System Erde“ nachgeschlagen werden



Substanzen sind weniger stabil als kristalline, sie wandeln sich deshalb unter bestimmten Bedingungen in kristalline Stoffe um.

Die Eigenschaften vieler Werkstoffe hängen von ihren Bausteinen und deren räumlicher Anordnung ab.

In vielen Organismen werden *Minerale* zur Bildung von Hartteilen genutzt (*Biomineralisation*). Beispiele hierfür sind Muschelschalen und Schneckenhäuser (Aragonit, Calcit), Korallengerüste (Calcit), Zähne (Apatit), Knochen (Apatit), aber auch Gallen- und Nierensteine (Cholesterin, Gallensäure). Die einzelnen Mineralkörner werden meist durch organische Substanzen zusammengehalten. Es handelt sich bei den Biomaterialen um heterogen zusammengesetzte Körper, so genannte Komposite.

### Wer befasst sich mit Festkörpern?

Die wichtigsten Fachrichtungen, die sich mit dem Aufbau, den Eigenschaften und der Verwendung von Festkörpern befassen, sind die Physik, Chemie, Kristallografie und Materialwissenschaften. Dabei werden die Schwerpunkte unterschiedlich gesetzt. Die Physik betrachtet die Beziehungen zwischen der Struktur und den Eigenschaften der Materie. Das gilt auch für die Materialwissenschaft, die allerdings mehr Wert auf Anwendungsmöglichkeiten legt. Die Chemie beschäftigt sich mit der stofflichen Zusammensetzung und die Mineralogie untersucht die atomare Struktur. Die Materialwissenschaft dagegen betrachtet die Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften der Materie vorwiegend unter Anwendungsaspekten.

Natürliche und künstliche Stoffe werden auf verschiedenen Ebenen erforscht und entwickelt. Ziel der Grundlagenforschung, wie sie an Universitäten betrieben wird, ist ein grundlegendes, tief gehendes Verständnis der uns umgebenden Welt. Da diese Untersuchungen nicht auf die Anwendungen ausgerichtet sind wie z. B. auf die Entwicklung eines Werkstoffes mit bestimmten Eigenschaften, sind unerwartete Erkenntnisse, wie die Entdeckung eines völlig neuen Werkstoffes, durch Grundlagenforschung wahrscheinlich. Die technische Entwicklung ist eine wichtige Ergänzung der Grundlagenforschung. Materialwissenschaftler/innen sind heutzutage in der Lage, Stoffe bis in die atomare Größenordnung für bestimmte Anwendungen „maßzuschneidern“ und ihre Eigenschaften gezielt zu verbessern. Dafür lassen sie sich auch von der Natur inspirieren: Bionik ist die Technik, die von der Biologie lernt – Schiffsrümpfe werden Delphinkörpern nachempfunden, Flugzeugtragflächen den Flügeln der Vögel. Auch auf molekularer Ebene wird auf diesem Feld geforscht. So sind z. B. in der Nanotechnik kleinste Partikel und dünnste Schichten von Bedeutung. Für deren Herstellung nutzt man Mechanismen, die von Lebewesen bekannt sind. So scheiden Organismen kristalline Substanzen ab (*Biomineralisation*). Dies geschieht entweder innerhalb oder außerhalb der Zelle. Ein kleiner Teil des entstehenden Biomaterials besteht aus organischen *Polymeren* (z. B. Polysacchariden), die die Funktion eines Klebers übernehmen. Die Wechselwirkungen von biologischen Makromolekülen und Kristallstrukturen sind in den meisten Fällen noch nicht vollständig erforscht.





## Expertengruppe 2: Minerale und Gesteine - Beispiele für Verwendungen

### Das Beispiel Baustoffe: vom Schotter bis zur Küchenarbeitsplatte

Basalt-Kopfsteinpflaster, Granit-Fassaden, Larvikit-Theken, Specksteinöfen, Granit-Schotterstraßen, Betonmauern – in allen Fällen werden Gesteine als Baustoffe verwendet. Grund dafür sind, neben der Verfügbarkeit, Eigenschaften wie Festigkeit (wichtig bei Schotter und Straßenpflaster), Beständigkeit gegen Verwitterung (Fassaden), die Fähigkeit, Wärme zu speichern (Ofenverkleidung) und die Farbvielfalt und Härte (Theken und Küchenplatten).

### Das Beispiel Kohlenstoff: Diamant und Grafit

**Diamant** ist bekanntlich extrem hart, weshalb er für Schleif- und Schneidzwecke verwendet wird. Allerdings ist Diamant auch spröde, und darum wird er meist im Verbund mit anderen, zäheren Werkstoffen oder als Schleifpulver eingesetzt. Synthetischer Diamant kann aus **Grafit** durch Ausübung von Druck und unter Verwendung von *Katalysatoren*<sup>2</sup> hergestellt werden. Dabei entstehen jedoch meist nur sehr kleine Kristalle, die den meisten technischen Anforderungen genügen, aber nicht als Schmucksteine geeignet sind.

Wie alle physikalischen Eigenschaften sind auch die Härte und die Sprödigkeit des Diamants in seiner Struktur begründet. Die Diamantstruktur besteht aus *kovalent* gebundenen Kohlenstoffatomen. Jedes Atom ist dabei an vier weitere Atome gebunden. Die sich ergebende Struktur hat **kubische Symmetrie**. Da sich bei der *kovalenten* Bindung die Atomorbitale überlappen, beträgt die Raumerfüllung über 90 %. Die dreidimensional verknüpften starken *kovalenten* Bindungen, die hohe Packungsdichte und die geringe Größe der Kohlenstoffatome sind Ursachen für die Härte des Diamants. Betrachtet man die Diamantstruktur in einer bestimmten Richtung, so wird deutlich, dass die Kohlenstoffatome gewellte Schichten bilden (s. Abb. 1). Ein Atom ist jeweils an drei Bindungen innerhalb einer solchen Schicht und nur an einer Bindung zwischen den Schichten beteiligt. Deshalb ist die Bindung zwischen den Schichten weniger fest als innerhalb, wodurch sich gute Spaltbarkeit parallel zu diesen Schichten ergibt. Wenn man also diese Richtung kennt, kann man einen Diamanten durch einen gezielten Schlag zerteilen, was sich Juweliere zunutze machen.

**Grafit** besteht ebenfalls ausschließlich aus Kohlenstoffatomen, die aber im Gegensatz zu Diamant nur in einer Ebene *kovalent* miteinander verbunden sind. Es bilden sich perfekt glatte Schichten aus, die untereinander nur durch die schwachen **van-der-Waals-Kräfte** verbunden sind. Wieder bestimmt der schichtenförmige atomare Aufbau die Eigenschaften: Grafit ist weich und spaltet in einer Richtung perfekt. Weil - anders als im Diamant - zwischen den Schichten keine *kovalenten* Bindungen bestehen, ist der Kraftaufwand für die Spaltung extrem gering. Man macht sich das beim Einsatz von Grafit für Bleistiftminen und Hochtemperaturgleitmittel zunutze.

Diamant und Grafit sind Polymorphe des Elements Kohlenstoff. Von Polymorphie spricht man, wenn eine Substanz (hier ein Element) in verschiedenen Kristallstrukturen auftritt. Diamant entsteht unter sehr viel höheren Drücken als Grafit. Unter Bedingungen, wie wir sie an der Erdoberfläche vorfinden, sollte sich Diamant in Grafit umwandeln. Es tut das nicht, sondern bleibt **metastabil** erhalten, weil eine solche Umwandlung ein Aufbrechen der starken Bindungen im Diamant, erfordern würde.

---

<sup>2</sup> Die kursiven Begriffe können im Glossar der CD-ROM „System Erde“ nachgeschlagen werden

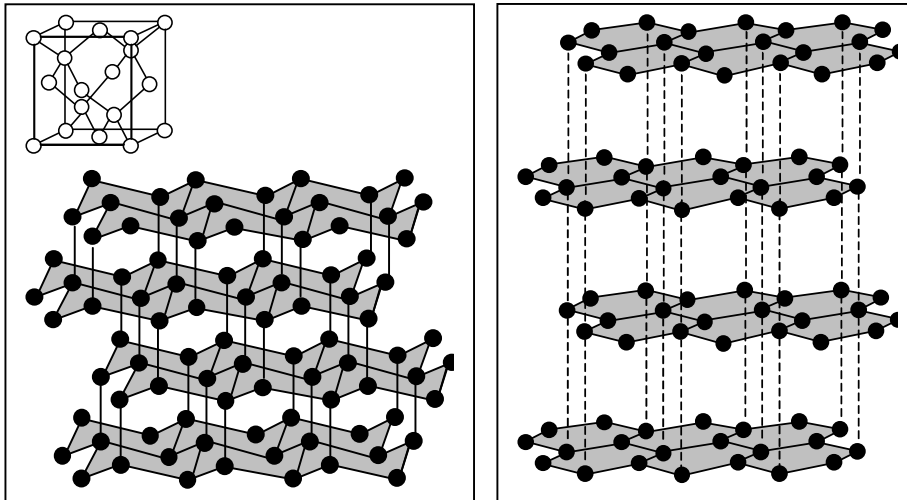


Abbildung 1: Links oben: Eine Elementarzelle der Diamantkristallstruktur. Die Kreise geben die Lage der Kohlenstoffatome an. Links unten: Der Aufbau der Diamantstruktur aus gewellten Schichten, entlang derer der Diamant gut spaltbar ist. Rechts: Die Graphitstruktur.

### Zeolithe für Waschmittel

Waschmittel müssen so genannte Enthärter enthalten, die verhindern, dass im Wasser enthaltene Calcium- und Magnesiumionen (*Kationen*) mit den Seifenanionen schwer lösliche Salze bilden, die das Waschergebn verschlechtern würden. Bis in die 1970er Jahre wurden dazu Phosphate verwendet. Weil Phosphate zu schädlicher Überdüngung in natürlichen Gewässern führen, suchte man nach Ersatzstoffen und entdeckte die Vorteile der Zeolithe. Vor allem weil sie ökologisch unbedenklich sind, haben sie sich als Enthärter in Westeuropa durchgesetzt.

Natürliche Zeolithe kommen weltweit in Gesteinen vor. Technisch genutzte Zeolithe werden vor allem synthetisch hergestellt. Dies geschieht heutzutage in großem Umfang. Allen Zeolithen gemeinsam sind große Hohlräume oder Kanäle, so genannte Mikroporen, in den Strukturen. Die innere Oberfläche der Mikroporen. Diese kann relativ große Werte annehmen. In die Mikroporen können locker gebundene Wassermoleküle und *Kationen*, z. B. Natriumionen, eingelagert sein. Natriumionen können leicht gegen die Calciumionen des Wassers ausgetauscht werden, weil letztere stärker an die innere Oberfläche der Zeolithe gebunden werden. Im Gegensatz zu Calcium bildet Natrium keine schwer löslichen Salze mit den *Anionen* der Seife und ist deshalb unschädlich für den Waschvorgang. Mit Zeolithen als *Ionenaustauscher* kann man also Wasser enthärten.

Auf die mikroporöse Struktur lassen sich auch viele weitere wichtige Anwendungen von Zeolithen zurückführen. So werden entwässerte Zeolithe als Trocknungsmittel verwendet. Auch werden Zeolithe dazu genutzt, Moleküle unterschiedlicher Größe oder Form zu trennen (Molekularsiebe). Wirtschaftlich außerordentlich wichtig ist die Verwendung bestimmter Zeolithe als *Katalysatoren*, z. B. bei der Gewinnung von Benzin aus Rohöl („Cracken“).



### Expertengruppe 3: Festkörper in der Materialwissenschaft: Werkstoffe (Teil 1)

Die Materialwissenschaft erforscht die Beziehungen zwischen der Struktur und den Eigenschaften von Stoffen unter dem Aspekt. Sie interessiert sich dabei häufig für besondere mechanische *Eigenschaften*<sup>3</sup>, z. B. die Festigkeit, aber auch für andere physikalische oder chemische Eigenschaften, wie z. B. thermisches, magnetisches, elektrisches und optisches Verhalten oder chemische Resistenz. Dabei ist es unerheblich, ob die verwendeten Stoffe natürlicher oder synthetischer Herkunft sind. In der Materialwissenschaft werden vier Haupt-Werkstoffgruppen unterschieden, nämlich *Metalle*, *Keramik*, *Polymere* und *Verbundwerkstoffe* (s. Tab. 1). Letztere bestehen aus einer Kombination von mindestens zwei der drei erstgenannten Gruppen. Halbleiter als überaus wichtige Funktionsmaterialien lassen sich diesen Gruppen nicht eindeutig zuordnen. In allen Werkstoffgruppen können sowohl kristalline oder amorphe Phasen, als auch deren Gemenge vorkommen.

Tabelle 1: Die Haupt-Werkstoffgruppen mit typischen Eigenschaften (nach HORNBÖGEN 2002).

Eigenschaften	<i>Metalle</i>	<i>Keramik</i>	<i>Polymere</i>	Halbleiter
Elektrische <i>Eigenschaften</i>	gute elektrische Leiter	schlechte elektrische Leiter	schlechte elektrische Leiter	Eigenleitung bei erhöhter Temperatur; Leitung durch Dotierung
Optische <i>Eigenschaften</i>	reflektieren Licht	unterschiedlich, können auch in großen Volumina durchsichtig sein	unterschiedlich	einige können mit Strom zum Leuchten gebracht werden
Plastizität	plastisch	spröde, jedoch plastisch bei erhöhter Temperatur	spröde, jedoch plastisch bei erhöhter Temperatur	spröde, jedoch plastisch bei erhöhter Temperatur
Chemische Beständigkeit	Edelmetalle sehr beständig	sehr beständig	bei Raumtemperatur an Luft beständig	sehr beständig
Weitere Eigenschaften			geringe Dichte, niedrige Schmelztemperatur	
Bindungstypen	metallische Bindung (Elektronengas)	kovalente oder Ionenbindung	C meist in kovalenter Bindung	kovalente oder metallische Bindung

#### Werkstoff Keramik: hart, aber spröde

Zur *Keramik* gehört gebrannter Ton, wie z. B. Ziegel, Fliesen und Töpferwaren. Weiterhin gehören zur *Keramik* Verbindungen von *Metallen* mit Nichtmetallen, die meist als Oxide, aber auch als Elemente C, Si und Ge vorliegen. Eine weitere wichtige Stoffgruppe der *Keramik* sind die Nitride, z. B. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Dementsprechend findet *Keramik* Anwendung in den verschiedensten Bereichen: als Schleifmittel oder Schneidwerkzeuge, Filter, künstliche Knochen und Zahnfüllungen, elektrische Isolatoren z. B. an Hochspannungsleitungen, Laserkristalle, Kernbrennstoffe und Ofenauskleidungen. Im Allgemeinen werden alle festen Materialien, die weder *Metall* noch *Polymer* sind, als keramische Stoffe bezeichnet. Was haben Dachziegel gemeinsam mit Zahnfüllungen? Sie sind hart und beständig gegen Verwitterung bzw. gegen bakteriell gebildete Säuren. Genau diese Eigenschaften haben keramische Werkstoffe - ähnlich den *Metallen*. Im Gegensatz zu diesen isolieren die meisten keramischen Stoffe gegen elektrischen Strom. Alle diese Eigenschaften beruhen auf den Bindungsformen der keramischen Werkstoffe: Sie haben starke *kovalente* oder Ionenbindungen.

Auch Glas wird heutzutage meistens zu den keramischen Werkstoffen gezählt, es ist nicht kristallin, sondern amorph. Porzellan, ein „klassischer“ keramischer Stoff ist teilweise amorph und viele weitere keramische Werkstoffe bestehen aus Gemischen von amorphen und kristallinen Bestandteilen.

<sup>3</sup> Die kursiven Begriffe können im Glossar der CD-ROM „System Erde“ nachgeschlagen werden



## Werkstoff Polymere (Kunststoffe): vielseitig und billig

Plastiktüten, Kaugummi und (synthetisches) Nähgarn haben eines gemeinsam: Sie bestehen aus **Polymere**n, d. h. Stoffen, die aus kettenförmigen organischen Riesenmolekülen aufgebaut sind. Die Ketten werden von vielen kleinen Molekülen, den **Monomere**n, gebildet. Je nachdem, wie stark die Moleküle miteinander vernetzt sind, sind die **Polymere** bei erhöhter Temperatur plastisch verformbar (so genannte **Thermoplaste** oder Plastomere), stets elastisch (**Elastomere**) oder auch bei hohen Temperaturen hart (Duroplaste oder **Duromere**). Viele **Polymere** („Kunststoffe“) kommen nicht in der Natur vor und fügen sich nicht in den natürlichen Stoffkreislauf ein, da sie nicht verrotten, doch es gibt auch natürliche **Polymere** und Kunststoffe, die von Bakterien abgebaut werden können.

## Plastiktüten: Polyethylen als typischer Thermoplast

Bei **Polymere**n, die nur aus einer Art **Monomer** bestehen, ist dieser meist namensgebend. So ergibt sich die Bedeutung von Polyethylen, aus dem Plastiktüten bestehen, aus „poly“ = viel und „Ethylen“, dem **Monomer**  $H_2C=CH_2$ . Auf Plastiktüten kann man einen Text wie diesen finden: „Unsere Tragetaschen sind umweltschonend aus Recycling-Polyethylen hergestellt, verbrennen ungiftig, sind grundwasserneutral und sind recyclingfähig“. Sie können weiterhin durch „PE-HD“ oder „PE-LD“ gekennzeichnet sein. PE-HD-Tüten knistern und zerknittern, während PE-LD-Tüten glatter und weicher sind. LD und HD stehen für „low density“ und „high density“. Diese beiden PE-Sorten werden unterschiedlich hergestellt und unterscheiden sich deshalb in der Struktur: Das im Hochdruckverfahren durch **Polymerisation** mit Hilfe von **Radikale**n aus Schmelze hergestellte PE-LD besteht aus verzweigten, sperrigen Ketten und weist deswegen eine relativ niedrige Dichte auf. Beim Niederdruckverfahren erfolgt die **Polymerisation** mit Hilfe von **Katalysatoren** und es entsteht dabei ein Pulver mit einem großen Anteil linearer, unverzweigter Ketten. Das PE bildet dadurch sehr regelmäßige Strukturen aus - die Ketten legen sich stellenweise nebeneinander. Man spricht von teilkristalliner Struktur. Sie ist dichter als die ungeordnete Struktur des PE-LD. Daraus ergibt sich auch eine höhere Zugfestigkeit. Polyethylen lässt sich aufschmelzen und ist danach leicht wiederverwertbar. Das liegt daran, dass die Ketten nicht untereinander vernetzt sind. Diese Eigenschaft hat PE mit vielen Kunststoffen, die man im Alltag verwendet, gemeinsam, z. B. Polycarbonat (Kunststofftrinkgläser) und Polypropylen (Frühstücksdosen).

## Werkstoff Metall - fest und gut verformbar

Vom Autoblech bis zur Edelstahlspüle – Stahl ist vielseitig anwendbar. Er ist fest, zäh, formbar, hitzebeständig, lässt sich schweißen und ist korrosionsbeständig. Außerdem kann man Stahlschrott aufschmelzen und wiederverwenden. Stahl wird vor allem wegen seiner mechanischen Eigenschaften genutzt. Diese sind viel besser als die von Roheisen, welches so spröde ist, dass es nicht geschmiedet werden kann. Roheisen wird durch die Reduktion von Eisenerzen (Eisenoxid) mit Koks (Kohlenstoff) im Hochofen hergestellt. Es ist deshalb so spröde, weil es bis 4 % Kohlenstoff enthält. Bei der Herstellung von Baustahl wird ihm der größte Teil des Kohlenstoffs entzogen (Frischen), auch werden dabei andere störende Elemente wie Phosphor, Schwefel, Silicium, Sauerstoff und Mangan entfernt (Raffination). Das geschieht z. B. durch Einblasen von Sauerstoff in flüssiges Eisen bei einem Druck von 7 - 10 bar und darauffolgende Erhitzung auf 1.650 °C. Durch die Erhitzung verändert sich die Struktur des Eisens, sodass in seinem Gitter weniger Kohlenstoff gebunden werden kann. Der Kohlenstoff verbindet sich mit dem Sauerstoff und entweicht als Gas, und die anderen Stoffe bilden durch die Oxidation Schlacke, die aufschwimmt. Bei diesem Fertigungsverfahren ergibt sich herkömmlicher Baustahl.





Durch eine sehr schnelle Abkühlung von kohlenstoffreichem Eisen bildet sich ein spezifisches Kristallgitter. So entsteht kohlenstoffreicher harter Stahl, der z. B. für die Herstellung von Werkzeugen verwendet wird. Zur Herstellung von Edelstahl werden unter Zufuhr elektrischer Energie Stoffe zugesetzt, die dem Stahl besondere Eigenschaften geben. Beispielsweise wird Stahl durch Zusatz von Chrom härter.

**Metalle** sind im Vergleich zu anderen Werkstoffen besonders gut plastisch verformbar, weil sich ein Teil ihrer Elektronen unabhängig von den Atomrümpfen bewegen kann („Elektronengas“). Daraus ergeben sich auch die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, die Reflexion von Licht und die Neigung, in dichtesten Kugelpackungen zu kristallisieren.



## Expertengruppe 4: Festkörper in der Materialwissenschaft: Werkstoffe (Teil 2)

### Verbundwerkstoffe: mehr als nur die Summe ihrer Bestandteile

Holz besteht aus Zellulosefasern, die durch Lignin verbunden werden. Kies in Zement ergibt Beton. Stroh verstärkte bei den Ägyptern, Sumerern und Babyloniern Ziegel. Schichten von härtbarem Stahl eingebettet in weiches, kohlenstoffarmes Eisen ergeben den berühmten harten, zähen Damaszenerstahl. All dies sind Beispiele für so genannte *Verbundwerkstoffe*.

*Verbundwerkstoffe* bestehen aus mindestens zwei unterschiedlichen Materialien und zeichnen sich durch vorteilhafte Eigenschaften aus, die erst durch die Kombination der Bestandteile entstehen. Typische *Verbundwerkstoffe* bestehen aus einer Matrix, die durch Fasern oder Partikel eines anderen Materials verstärkt wird. Es gibt drei Arten von Verbundwerkstoffen: Teilchenverbünde, Faserverbünde, und Schichtverbünde. Beispiele sind Beton (Kies in Zement eingebettet), Glasfaserstoff (Glasfasern in *Polymer* eingebettet) und Sperrholz (Holzschichten unterschiedlicher Faserrichtung).

Feste, beständige Stoffe, wie z. B. Aluminiumoxid und Siliciumcarbid, sind für viele Anwendungen zu spröde. Werden sie als Fasern in eine elastische Matrix eingebettet, wirkt sich dieser Nachteil nicht aus, sodass die Wahrscheinlichkeit für Materialfehler sinkt. Sollte doch einmal ein Riss auftreten, so kann er sich nicht über die betroffene Faser hinaus ausbreiten.

### Werkstoff Halbleiter: Grundlage der Elektronik

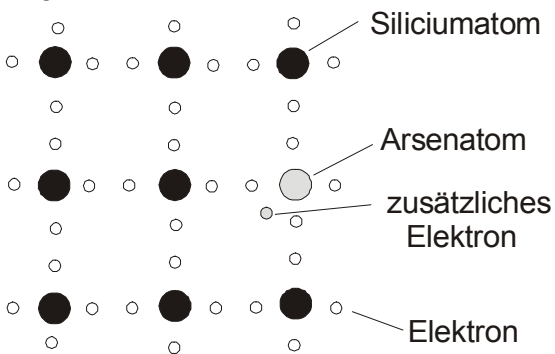
Silicium ist nach Sauerstoff das zweithäufigste Element in der Erdkruste. Es hat als *Halbleiter* besondere *elektrische Eigenschaften*. Die chemische Bindung der Siliciumatome erfolgt im *Kristall* durch vier Elektronen. Durch Energiezufuhr, d. h. durch Erhöhung der Temperatur oder Lichteinfall, können einige dieser so genannten Valenzelektronen in einen höheren Energiezustand übergehen und sich frei bewegen. Darum leiten *Halbleiter* mit einem fehlerfreien *Kristallgitter* nur bei erhöhter Temperatur elektrischen Strom.

Diese Eigenschaft ist Grundlage für die Elektronik. *Halbleiter* ermöglichen z. B. Strom aus Sonnenlicht zu erzeugen (Solarzellen), *Kristalle* zum Leuchten anzuregen (Leuchtdioden) Wechselspannung in Gleichspannung umzuwandeln (Gleichrichter-Dioden) oder Strom aus- oder anzuschalten (Transistoren).

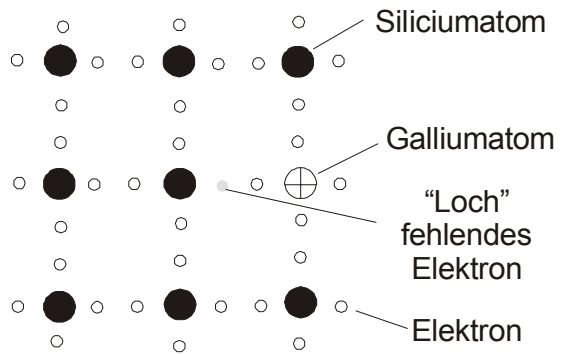
Die Anzahl der wanderungsfähigen Elektronen kann durch den Einbau von Atomen 3- bzw. 5-wertiger Elemente in das im Fall von Si oder Ge vierwertige Halbleitermaterial erhöht werden (*Dotieren*). Beim Einbau von Atomen 5-wertiger Elemente wird jeweils ein überzähliges Valenzelektron eingebracht. Es steht als frei beweglicher Ladungsträger zur Verfügung (s. Abb. 1). Ein solcherart dotierter Halbleiterkristall wird als *n-leitend* bezeichnet. Analog fehlt beim Einbau von Atomen 3-wertiger Elemente ein Valenzelektron. Sein Fehlen wirkt wie ein positiver Ladungsträger. Hier spricht man von einem *p-leitenden Halbleiter*. Die wichtigsten Bauelemente der *Halbleiterelektronik* - Dioden, Transistoren, integrierte Schaltkreise - beruhen auf der Kombination von n- und p-*Halbleitern*. Dort, wo n- und p-*Halbleiter* aneinander grenzen, diffundieren freie Elektronen zu den Stellen, wo Valenzelektronen fehlen, sodass sich ein schmaler Bereich mit wenig freien Ladungsträgern ergibt, der *pn-Übergang* genannt wird. Wird an einen solchen *Kristall* eine Spannung angelegt, so entscheidet die Polung, ob ein Strom fließt oder nicht. Liegt der Pluspol am p-Gebiet, so dringen Elektronen in den Grenzbereich ein und der *pn-Übergang* wird leitend. Bei umgekehrter Polung verbreitert sich der Bereich ohne Ladungsträger und der *Kristall* isoliert. Durch die Grenzschicht eines *pn-Übergangs* kann der Strom also nur in einer Richtung fließen. Man bezeichnet das als *Ventilwirkung*.

**Kristalle** mit pn-Übergängen werden in Dioden verwendet, um Wechselspannung in Gleichspannung umzuwandeln, **Kristalle** zum Leuchten zu bringen oder aus Licht Strom zu erzeugen. Mit Transistoren, die zwei pn-Übergänge enthalten, kann man Strom aus- oder anschalten.

### A) n - Halbleiter



### B) p - Halbleiter



### C) Diode

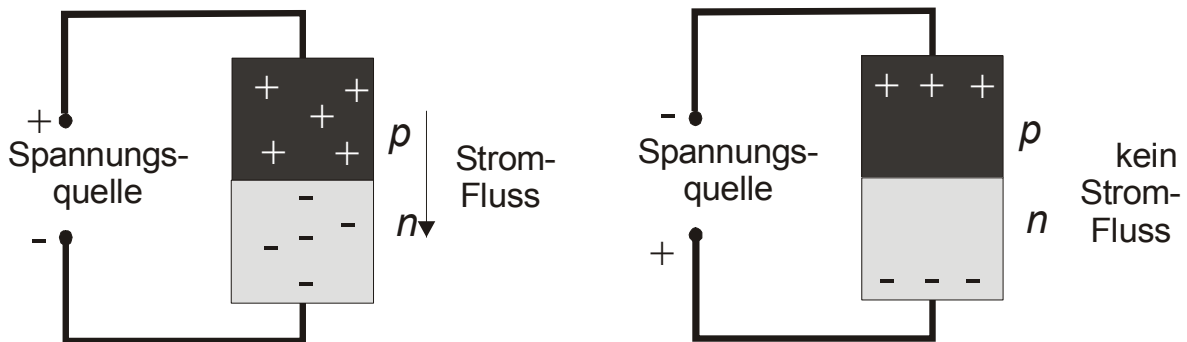


Abbildung 1: Oben: Bei einem Siliciumkristall umgeben vier Valenzelektronen ein Siliciumatom (A) Siliciumkristall, der mit wenigen Arsenatomen dotiert ist. (B) Mit Gallium dotierter Siliziumkristall. Gallium hat nur drei Valenzelektronen, deshalb ergibt sich ein „Loch“ in der Struktur. Elektronen des Siliziums können in das Loch hüpfen, dadurch verlagert sich das Loch (in der Abbildung nach rechts). Unten: Schema einer Halbleiterdiode. Bei aneinandergrenzenden n- und p-Halbleitern entscheidet die Polung, ob Strom fließt oder nicht.

### Flüssigkristalle: vom Taschenrechner bis zum Flachbildschirm

In Taschenrechnern, Mikrowellen und vielen weiteren Geräten mit digitalen Anzeigen bis hin zum Flachbildschirm beim Computer findet man LCD-Anzeigen – LCD steht für „liquid crystal display“. Was versteht man unter einem Flüssigkristall und wie funktionieren die Anzeigen?

Flüssigkristalle werden von verschiedenen organischen Substanzen in bestimmten Temperaturbereichen gebildet. Es sind Flüssigkeiten, deren Moleküle in einer oder zwei Richtungen, aber nicht dreidimensional, geordnet sind. Sie stehen also zwischen kristallinen Festkörpern und Flüssigkeiten. Man unterscheidet drei strukturell unterschiedliche Arten von Flüssigkristallen: smektische (Moleküle in Schichten angeordnet), nematische (Parallelorientierung der Moleküle in kleinen Bereichen) und cholesterische (Schichten mit nematischer Ordnung, jeweils um einen bestimmten Winkelbetrag versetzt). Über die Molekülschichten hinweg ergibt sich so eine schraubenartige Drehung der Vorzugsrichtung). Interessant für LCD-Anzeigen



sind nematische Flüssigkristalle, denn durch elektrische oder magnetische Felder kann die Anordnung der Moleküle und damit ihre Transparenz verändert werden. In LCD-Anzeigen befindet sich eine dünne Schicht nematischen Flüssigkristalls zwischen zwei Glasplatten, die durchsichtige Elektroden oder Transistoren tragen.

### **Piezelektrische Taktgeber: Beispiel Schwingquarz in der Uhr**

Eine Uhr braucht einen Taktgeber und Antriebsenergie. In einer mechanischen Uhr wird die Energie von einer Spiralfeder über Zahnräder auf ein Pendel übertragen, dessen Länge den Takt bestimmt. Wesentlich genauer sind Quarzuhren, in denen eine Batterie die Energie liefert und ein Quarzkristall den Takt.

Ermöglicht wird dies durch den so genannten „*piezelektrischen* Effekt“. Quarz, sowie auch andere Stoffe mit bestimmten Kristallstrukturen, laden sich bei Druck oder Zug auf bestimmten gegenüberliegenden Kristallflächen elektrisch auf. Dieser Effekt lässt sich umkehren, d. h. durch ein elektrisches Feld kann im *Kristall* eine Stauchung oder Ausdehnung bewirkt werden. Dabei treten aber wiederum elektrostatische Oberflächenladungen am *Kristall* auf, die auf das angelegte elektrische Feld rückwirken. So entsteht eine Schwingung mit einer bestimmten Frequenz. Diese wird elektronisch so umgewandelt, dass der Sekundenzeiger zeitgenau angetrieben werden kann.



**4 Tabelle:****Tabelle 1: Beispiele für Materialien, die aus Gesteinen oder Mineralen hergestellt werden.**

Material	Da habe ich es gesehen.	Woraus besteht es hauptsächlich?	Woher kommt der Rohstoff?
Fensterglas	Fenster im Schulgebäude	Quarzsand (Silicium, Sauerstoff)	Kiesgrube

## Baustein 9: Stein unter Druck

### Biotit - Kreislauf

#### ❶ Material:

- pro Arbeitsgruppe:
  - CD-ROM „System Erde“ mit dem Zugang zu einem Computer (von der CD-ROM benötigte Materialien: Interaktion „Gesteinskreislauf“ (Modul 3, Baustein 4, Material 2) und der Text „Stein unter Druck“ aus dem Hypertext)
- optional Handstücke: rauer geschichteter Sandstein, Gneis mit deutlich sichtbaren Lagen aus parallel angeordneten plattigen (Glimmer-)Kristallen (z. B. Biotitgneis), Granit mit unregelmäßig verteilten Kristallen einheitlicher Größe, Glimmerschiefer

#### ❷ Handstücke und Dünnschliffe als Grundlage der Gesteinsbestimmung:

Auf Abbildung 2 finden Sie Fotos von Bruchstücken („Handstücke“) von vier verschiedenen Gesteinen. Von diesen Handstücken wurden jeweils dünne Scheiben abgesägt und so lange geschliffen, bis sie etwas durchsichtig wurden (25/1.000 mm dünn). Diese Dünnschliffe können mit einem Mikroskop untersucht werden. Von den Dünnschliffen sind mikroskopische Aufnahmen abgebildet. Die vier Handstücke sind an unterschiedlichen Stellen in der Erdkruste entstanden.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Ordnen Sie die Handstücke den Dünnschliffen zu, indem Sie die jeweilige Nummer in die erste und zweite Spalte der Tabelle eintragen. Beschreiben Sie dann in der dritten Spalte das Gestein. Orientieren Sie sich dafür an den folgenden Leitfragen: Hat das Gestein eine besondere Struktur? Ergibt sich diese aus der Anordnung der Minerale? Kennen Sie einige der Minerale? Lassen sich im Gestein mögliche Bruchstellen erkennen? Ist etwas anderes auffällig?

Handstück Nr.	Dünnschliff Nr.	Gesteinsbeschreibung	Gesteinstyp und Name des Gesteins
Handstück Nr.	Dünnschliff Nr.	Gesteinsbeschreibung	Gesteinstyp




- 2) Bestimmen Sie die Gesteinstypen (Beispiel: Ablagerungsgestein/ Sedimentgestein) und die Gesteine selbst (Beispiel: Gneis) und tragen Sie die Bezeichnungen in die vierte Spalte ein. Für die Bestimmung steht auf der CD-ROM „System Erde“ ein interaktiver Bestimmungsschlüssel zur Verfügung.
- 3) Interpretieren Sie, unter welchen Bedingungen die vier Handstücke entstanden sein können. Was passierte jeweils mit dem Glimmermineral Biotit? Weiterführende Informationen finden Sie auf der CD-ROM „System Erde“ in den Hypertexten des Moduls „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ unter „Biotit – Kreislauf“.

Gesteins- typ	Entstehungsbedingungen
1:	
2:	

Gesteins- typ	Entstehungsbedingungen
3:	
4:	

4) Ordnen Sie die vier Handstücke gemäß ihrem Entstehungsort in die Abbildung 1 ein.

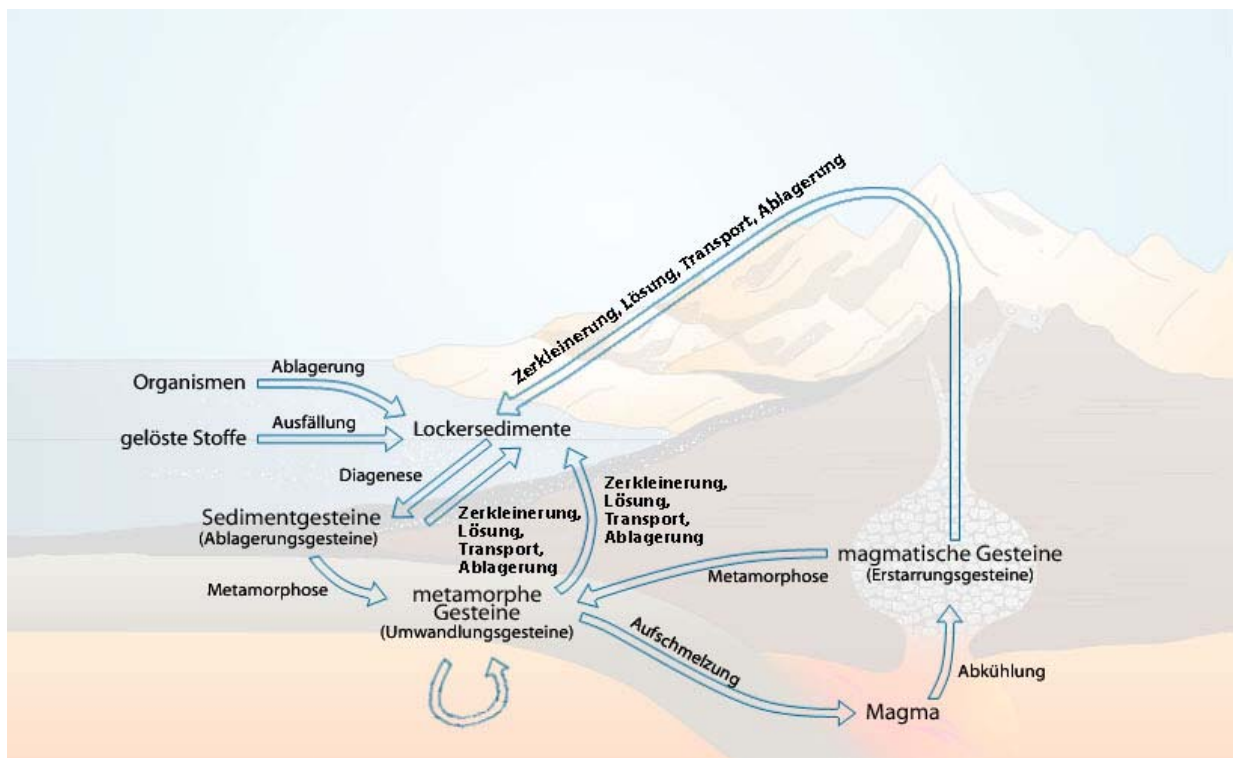


Abbildung 1: Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf.



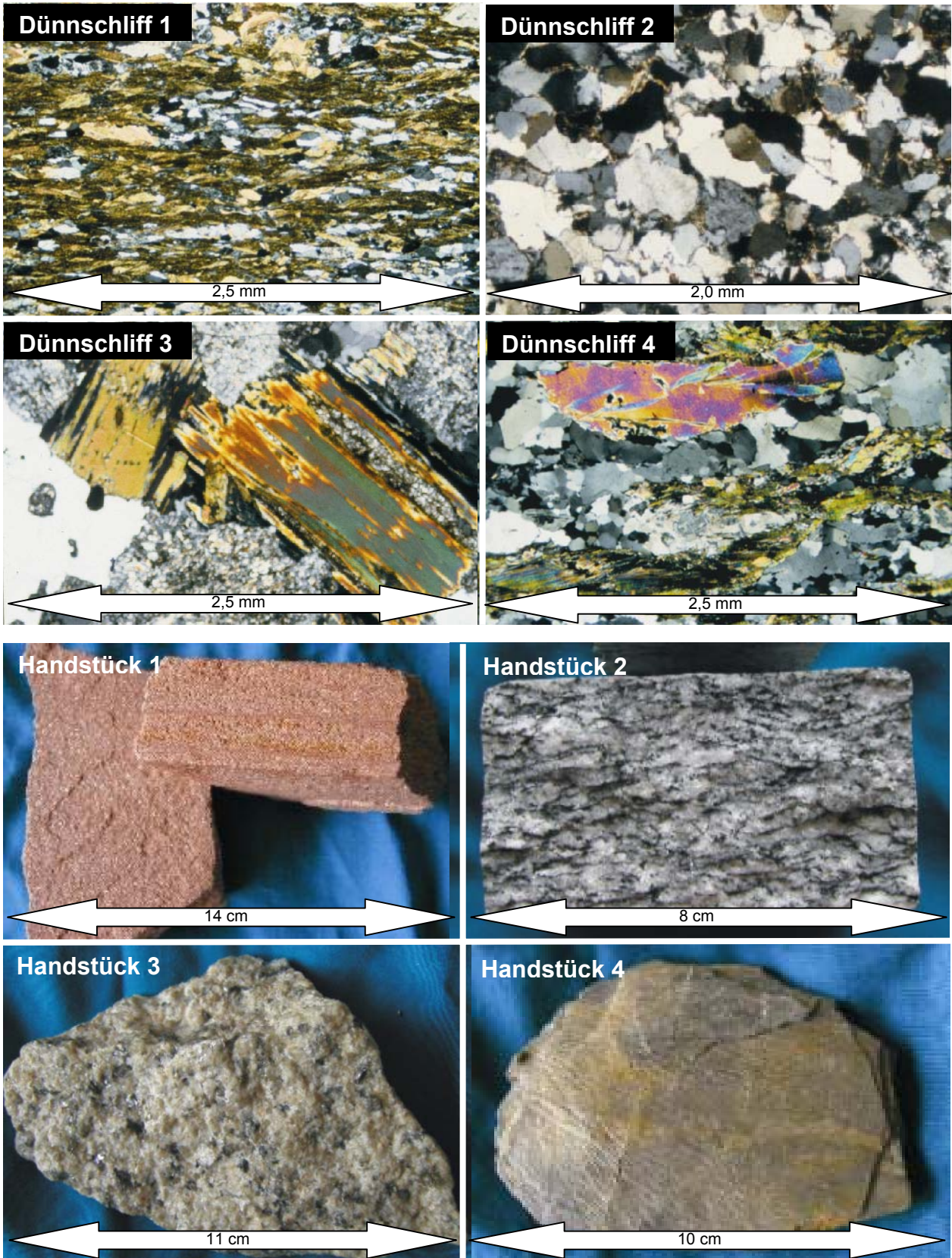


Abbildung 2: Dünnschliffe und Handstücke von vier verschiedenen Gesteinen.

## Baustein 9: Stein unter Druck

### Biotit - Kreislauf

#### ❶ Material:

- pro Arbeitsgruppe:
  - CD-ROM „System Erde“ mit dem Zugang zu einem Computer (von der CD-ROM benötigte Materialien: Interaktion „Gesteinskreislauf“ (Modul 3, Baustein 4, Material 2) und der Text „Stein unter Druck“ aus dem Hypertext)
- optional Handstücke: rauer geschichteter Sandstein, Gneis mit deutlich sichtbaren Lagen aus parallel angeordneten plattigen (Glimmer-)Kristallen (z. B. Biotitgneis), Granit mit unregelmäßig verteilten Kristallen einheitlicher Größe, Glimmerschiefer

#### ❷ Handstücke und Dünnschliffe als Grundlage der Gesteinsbestimmung:

Auf Abbildung 2 finden Sie Fotos von Bruchstücken („Handstücke“) von vier verschiedenen Gesteinen. Von diesen Handstücken wurden jeweils dünne Scheiben abgesägt und so lange geschliffen, bis sie etwas durchsichtig wurden (25/1.000 mm dünn). Diese Dünnschliffe können mit einem Mikroskop untersucht werden. Von den Dünnschliffen sind mikroskopische Aufnahmen abgebildet. Die vier Handstücke sind an unterschiedlichen Stellen in der Erdkruste entstanden.

#### ❸ Aufgaben:

- 1) Ordnen Sie die Handstücke den Dünnschliffen zu, indem Sie die jeweilige Nummer in die erste und zweite Spalte der Tabelle eintragen. Beschreiben Sie dann in der dritten Spalte das Gestein. Orientieren Sie sich dafür an den folgenden Leitfragen: Hat das Gestein eine besondere Struktur? Ergibt sich diese aus der Anordnung der Minerale? Kennen Sie einige der Minerale? Lassen sich im Gestein mögliche Bruchstellen erkennen? Ist etwas anderes auffällig?

Handstück Nr.	Dünnschliff Nr.	Gesteinsbeschreibung	Gesteinstyp und Name des Gesteins
Handstück Nr.	Dünnschliff Nr.	Gesteinsbeschreibung	Gesteinstyp


- 2) Bestimmen Sie die Gesteinstypen (Beispiel: Ablagerungsgestein/ Sedimentgestein) und die Gesteine selbst (Beispiel: Gneis) und tragen Sie die Bezeichnungen in die vierte Spalte ein. Für die Bestimmung steht auf der CD-ROM „System Erde“ ein interaktiver Bestimmungsschlüssel zur Verfügung.
- 3) Interpretieren Sie, unter welchen Bedingungen die vier Handstücke entstanden sein können. Was passierte jeweils mit dem Glimmermineral Biotit? Weiterführende Informationen finden Sie auf der CD-ROM „System Erde“ in den Hypertexten des Moduls „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ unter „Biotit – Kreislauf“.

Gesteins- typ	Entstehungsbedingungen
1:	
2:	

Gesteins- typ	Entstehungsbedingungen
3:	
4:	

4) Ordnen Sie die vier Handstücke gemäß ihrem Entstehungsort in die Abbildung 1 ein.

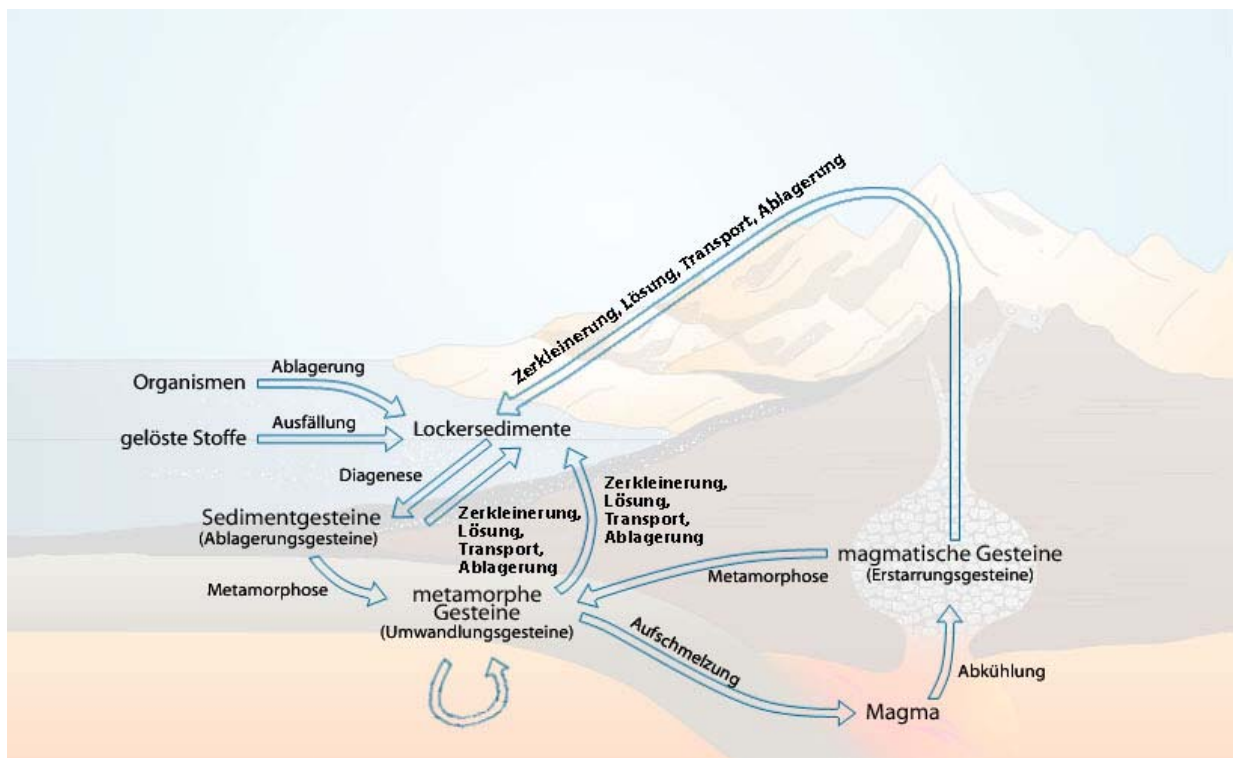


Abbildung 1: Stoffflussdiagramm zum Gesteinskreislauf.



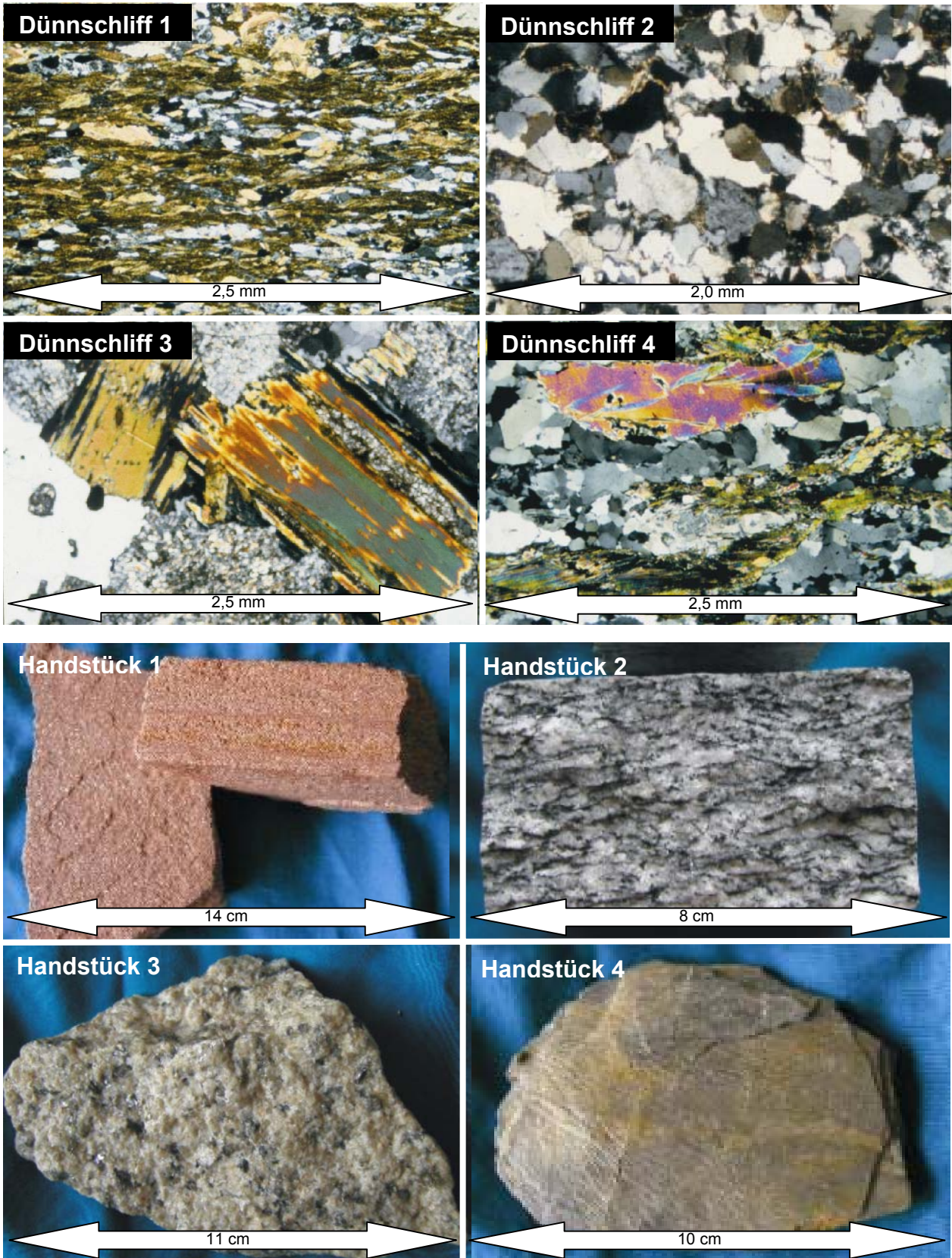


Abbildung 2: Dünnschliffe und Handstücke von vier verschiedenen Gesteinen.

## Baustein 10: Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste - Kristallisation von Schmelzen

### Entstehung der ozeanischen Erdkruste

#### ❶ Materialien:

- Chemikalien:  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  (Merck-Nr.105853),  $\text{LiNO}_3$  (Merck-Nr. 12230)
- Waage (Genauigkeit 0,01 g), 2 Spatel und kleiner Pinsel
- 2 Paraffinbäder (Heizplatte, schmaler Emailletopf (etwa 1 l, 15 cm Durchmesser) mit Uhrglas zum Bedecken, Schutzbrille und ein quecksilberfreies Thermometer (Temperaturbereich bis 250 °C), ca. 250 g Paraffinpastillen (erhältlich z. B. Fa. Walter, Alte Weide 15, 24116 Kiel)).
- pro Schülergruppe:
  - Arbeitsbogen „Entstehung der ozeanischen Kruste“ (Modul 3, Baustein 10, Material 2)
  - Information „Kristallisation von Schmelzen, Phasendiagramme“ (Modul 3, Baustein 10, Material 4)
  - Folie „Phasendiagramme“ (Modul 3, Baustein 10, Material 5)
  - Arbeitsbogen „Entstehung der kontinentalen Kruste“ (Modul 3, Baustein 10, Material 6)
  - Stoppuhr, Bleistift und Papier zur Dokumentation der Versuchsergebnisse
  - 1 Isolierbehälter (2 Bechergläser unterschiedlicher Größe ineinandergestellt mit Vogelsand als Zwischenschicht)
  - 2 Reagenzgläser ohne Bördelrand (z. B. Duran Schott), 1 Reagenzglasständer, 1 Reagenzglaslammer aus Holz und 1 dicker Faserstift zur Reagenzglasbeschriftung
  - 1 Thermometer (Temperaturbereich bis 250 °C) und 1 Kappe für die Reagenzgläser (z. B. von einem Schnapdeckelglas), die für das Thermometer durchlöchert wurde.
  - 2 Blätter Millimeterpapier (Lineal und Bleistift) bzw. Computer (Software z. B. Microsoft Excel)

#### ❷ Entstehung von ozeanischer Kruste:

Die Erdkruste besteht aus kontinentaler und aus ozeanischer Kruste. Diese unterscheiden sich durch ihre chemische Zusammensetzung, die auf unterschiedliche Entstehungsprozesse zurückzuführen ist.

Die ozeanische Kruste wird zum Beispiel an den mittelozeanischen Rücken ständig neu gebildet. Dort steigt Magma aus dem Erdinnern auf. Es erstarrt in der Tiefe zu dem Gestein Gabbro (s. Abbildung 1) und an der Oberfläche zu dem Vulkan-Gestein Basalt. Vereinfacht gesagt bestehen diese Gesteine aus den Mineralen Diopsid ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) und Anorthit ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ). Diopsid schmilzt bei 1392 °C (Atmosphärendruck), Anorthit hat eine Schmelztemperatur von 1553 °C (Atmosphärendruck).



Abbildung 1: Das Gestein Gabbro entsteht an mittelozeanischen Rücken und besteht hauptsächlich aus den Mineralen Diopsid (schwarz,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) und Anorthit (dunkelgrau,  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ).



An wenigen Stellen, beispielsweise auf Island, ragt der mittelozeanische Rücken über den Meeresspiegel hinaus. Dort kann man die Temperatur der austretenden Gesteinsschmelze messen. Sie beträgt etwa 1200 °C. Die Temperatur ist also etwa 200 bis 350 °C niedriger als die Schmelztemperatur von reinem Diopsid und Anorthit. Warum liegen die Minerale trotz der niedrigeren Temperaturen in geschmolzenem Zustand vor? Da die Schmelztemperaturen von Diopsid und Anorthit für Messungen unter Schulbedingungen viel zu hoch sind, kann in der Schule modellhaft mit den Substanzen  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  (Schmelzpunkt 86 °C) und  $\text{LiNO}_3$  (Schmelzpunkt 264 °C) experimentiert werden, um die Frage zu beantworten.

### ③ Durchführung eines Versuchs zur Kristallisation von Schmelzen:

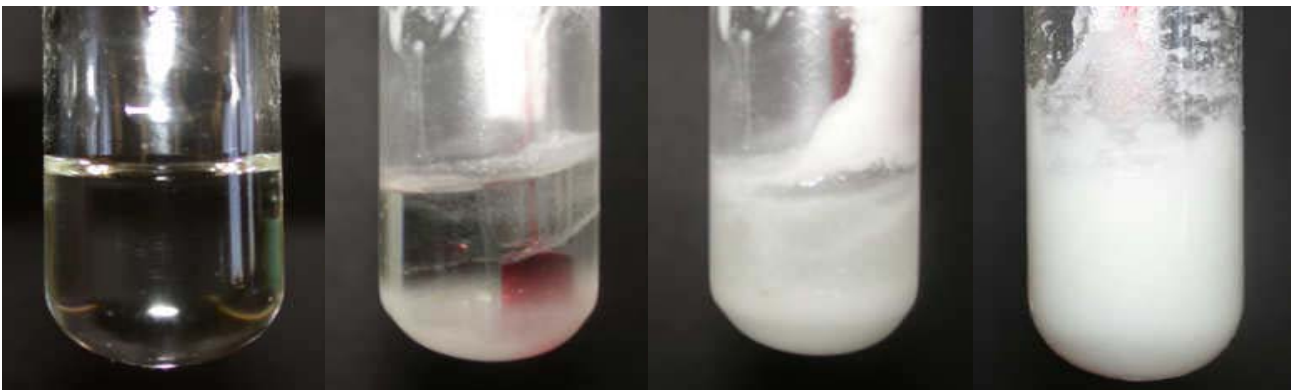


Abbildung 2: Verschiedene Zustände der Schmelze. Von links nach rechts: klar, Flockenbildung, trüb, zähflüssig. Der Zustand „fest“ ist nicht abgebildet. Er zeichnet sich dadurch aus, dass das Thermometer feststeckt.



Abbildung 3: Übersicht über die für den Versuch benötigten Materialien. Rechts: Isoliergefäß, das aus 2 ineinander gestellten Bechergläsern besteht. Die Zwischenschicht wurde mit Sand verfüllt. Die Reagenzgläser müssen zum Ermitteln der Abkühlungskurven zügig in das Isoliergefäß gestellt werden (der Versuch wurde stark vereinfacht nach LINDEMANN 1999).

Stellen Sie in Partnerarbeit eine Mischung mit 20 %  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  und 80 %  $\text{LiNO}_3$  her und eine mit jeweils 50 % der beiden Substanzen. Schmelzen Sie die Mischungen in einem Paraffinbad und ermitteln Sie die Abkühlungskurven (Temperatur/Zeit) beider Mischungen. Verwenden Sie dafür die vorgegebene Tabelle. Verzeichnen Sie in der Spalte „Beobachtung“ den jeweiligen Zustand der untersuchten Schmelzmischung wie in Abbildung 2 angegeben. Notieren Sie auch, bei welcher Temperatur jede Mischung zu schmelzen beginnt und wann der Schmelzvorgang abgeschlossen ist. Die Substanzen  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  und  $\text{LiNO}_3$  repräsentieren im folgenden Versuch die häufigsten Minerale der ozeanischen Erdkruste. Welche Mischung schmilzt wohl zuerst? Formulieren Sie eine begründete Hypothese. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Versuchs näher erläutert.



- I. Berechnen Sie, welche Masse (in g)  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  bzw.  $\text{LiNO}_3$  jeweils eingewogen werden müssen, um die benötigten Mischungsverhältnisse zu erzielen (Tab. 1).
- II. Wiegen Sie die berechneten Massen  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  und  $\text{Li}(\text{NO}_3)$  in ein Reagenzglas ein, das in ein Becherglas gestellt wird. Die Reagenzgläser mit der Mischung werden nacheinander mit einer Reagenzglasklammer in ein Paraffinbad ( $215 \text{ }^\circ\text{C}$ ) getaucht, um die Salze zu schmelzen. **Hinweis:** Stellen Sie beide Mischungen in das Paraffinbad.
- III. Tauchen Sie das Thermometer in die zuerst entstandene Schmelze und warten Sie, bis die Temperatur der Schmelze nicht mehr steigt. Dann wird das heiße Reagenzglas mit dem Thermometer zügig in das Isoliergefäß gestellt und die Temperatur der Schmelze am Thermometer alle 15 Sekunden abgelesen, bis die Mischung sich verfestigt hat, d. h. bis das Thermometer feststeckt. Bei diesen Messungen muss eine Person die Stoppuhr ablesen und die Temperaturen aufschreiben, während eine weitere die Temperaturen abliest und die Mischung vorsichtig rührt. Tragen Sie die Messergebnisse und ihre Beobachtungen des Zustandes der Schmelze (s. Abbildung 2) in den vorbereiteten Arbeitsbogen ein. **Achtung:** Um das Thermometer wieder aus der festen Mischung herausziehen zu können, muss diese wieder geschmolzen werden.
- IV. Wiederholen Sie den unter III. beschriebenen Vorgang mit der anderen Schmelze.

**Tabelle 1: Mengenangaben für den Versuch**

	Mischung 20/80	Mischung 50/50
Mischung % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	20	50
Mischung % $\text{LiNO}_3$	80	50
Mol $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	0,0085 mol	0,0147 mol
Mol $\text{LiNO}_3$	0,034 mol	0,0147 mol
<b>Masse <math>\text{Mg}(\text{NO}_3)_2</math> [g]</b>		
<b>Masse <math>\text{LiNO}_3</math> [g]</b>		

(MG von  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 256,3 \text{ [g/mol]}$ ,  
 von  $\text{LiNO}_3 = 82,9 \text{ [g/mol]}$  )

#### 4 Aufgaben:

- 1) Tragen Sie Ihre Werte in ein Diagramm ein. Auf eine Achse werden die Temperaturen und auf die andere die Zeiten abgetragen. Das Einsetzen der Kristallisation (Kristallisationstemperatur) ist eindeutig durch den Zustand „Flocken“ gekennzeichnet, die vollständige Kristallisation ist mit dem „Feststecken“ des Thermometers beendet. Diese Beobachtungen sollen mit Pfeilen an den entsprechenden Punkten der Abkühlkurven vermerkt werden.
- 2) Beschreiben Sie die Ergebnisse der beiden Versuche im Vergleich. Wird Ihre Hypothese zum Verhältnis der Schmelztemperaturen der beiden Mischungen durch die Versuchsergebnisse berührt?
- 3) Der Schmelzpunkt von  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  liegt bei  $86 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $\text{LiNO}_3$  schmilzt bei  $264 \text{ }^\circ\text{C}$ . Warum liegen die Minerale trotz der zu niedrigen Temperaturen in geschmolzenem Zustand vor?
- 4) Führen Sie eine Fehlerdiskussion durch.




**Probe:**
**Protokollant/innen:**
**Datum:**

Min.	T [°C]	Beobachtung*	Bemerkung	Min.	T [°C]	Beobachtung*	Bemerkung
0				10:15			
0:15				10:30			
0:30				10:45			
0:45				11:00			
1:00				11:15			
1:15				11:30			
1:30				11:45			
1:45				12:00			
2:00				12:15			
2:15				12:30			
2:30				12:45			
2:45				13:00			
3:00				13:15			
3:15				13:30			
3:30				13:45			
3:45				14:00			
4:00				14:15			
4:15				14:30			
4:30				14:45			
4:45				15:00			
5:00				15:15			
5:15				15:30			
5:30				15:45			
5:45				16:00			
6:00				16:15			
6:15				16:30			
6:30				16:45			
6:45				17:00			
7:00				17:15			
7:15				17:30			
7:30				17:45			
7:45				18:00			
8:00				18:15			
8:15				20:30			
8:30				20:45			
8:45				21:00			
9:00				21:15			
9:15				21:30			
9:30				21:45			
9:45				22:00			
10:00				22:15			

\* 0 = klar, + = weiße Flocken, ++ = trüb, +++ = zähflüssig, ++++ = fest



Min.	T [°C]	Beobachtung*	Bemerkung	Min.	T [°C]	Beobachtung*	Bemerkung
22:30				30:30			
22:45				30:45			
23:00				31:00			
23:15				31:15			
23:30				31:30			
23:45				31:45			
24:00				32:00			
24:15				32:15			
24:30				32:30			
24:45				32:45			
25:00				33:00			
25:15				33:15			
25:30				33:30			
25:45				33:45			
26:00				34:00			
26:15				34:15			
26:30				34:30			
26:45				34:45			
27:00				35:00			
27:15				35:15			
27:30				35:30			
27:45				35:45			
28:00				36:00			
28:15				36:15			
28:30				36:30			
28:45				36:45			
29:00				37:00			
29:15				37:15			
29:30				37:30			
29:45				37:45			
30:00				38:00			
30:15				38:15			

\*: 0 = klar, + = weiße Flocken, ++ = trüb, +++ = trüb und zähflüssig, ++++ = fest

**Entnehmen Sie folgende Temperaturen:**

Beginn der Kristallisation (Auftreten der ersten weißen Flocken): \_\_\_\_\_

Ende der Kristallisation (das Thermometer lässt sich nicht mehr bewegen): \_\_\_\_\_

**Bemerkungen:**

---



---

# Zustände der Schmelze im Versuch



## Baustein 10: Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste - Kristallisation von Schmelzen

### Phasendiagramme

#### 1 Erläuterungen zum Erstellen von Phasendiagrammen

Aus Abkühlungskurven können zwei Werte abgelesen werden, die für das Erstellen von Phasendiagrammen notwendig sind

- die Kristallisationstemperatur (Zustand „Flockenbildung“), die für jedes Gemisch unterschiedlich ist.
- die Erstarrungstemperatur („fest“), die für alle Mischungen gleich sein sollte (die so genannte eutektische Zusammensetzung).

Mit Erreichen der Kristallisationstemperatur erstarrt im betrachteten System mit zwei Mineralen (binäres System) zunächst das Mineral, das einen größeren Anteil an der Schmelze hat. Es entsteht eine Mischung aus Schmelze und dem kristallisierten Mineral. Die Schmelze wird entsprechend abgereichert und kristallisiert erst am so genannten Eutektikum vollständig. Der Begriff Eutektikum beschreibt dasjenige Mischungsverhältnis der Minerale, das durch die niedrigste Schmelztemperatur gekennzeichnet ist. Schmilzt ein Gestein von beliebigem Mischungsverhältnis der Minerale, so hat die zuerst entstehende Schmelze die Zusammensetzung des Eutektikums.

Aus Abkühlungskurven von Mischungen zweier Minerale unterschiedlichster Zusammensetzung werden in den Geowissenschaften Phasendiagramme entwickelt, und zwar bei unterschiedlichen Drücken. Abbildung 1 zeigt ein solches Phasendiagramm für das System Diopsid-Anorthit, den Hauptbestandteilen der ozeanischen Kruste. Geowissenschaftler/innen benötigen solche Diagramme, um aus der Zusammensetzung eines Gesteins Rückschlüsse auf die Temperatur bei der Entstehung des Gesteins ziehen zu können.

Die Minerale, aus denen das Gestein besteht, werden zunächst unter dem Mikroskop betrachtet und chemisch untersucht. Kennt man das Mischungsverhältnis der Minerale, so lässt sich aus dem Phasendiagramm die Kristallisationstemperatur ablesen – bei Annahme bestimmter Druckverhältnisse.

Die Phasendiagramme beschreiben, unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen und welchen stofflichen Zusammensetzungen bestimmte Aggregatformen und Phasen von Stoffen vorkommen. Dies gilt nicht nur für die der Lithosphäre, sondern auch für die der Hydrosphäre und die der Atmosphäre.

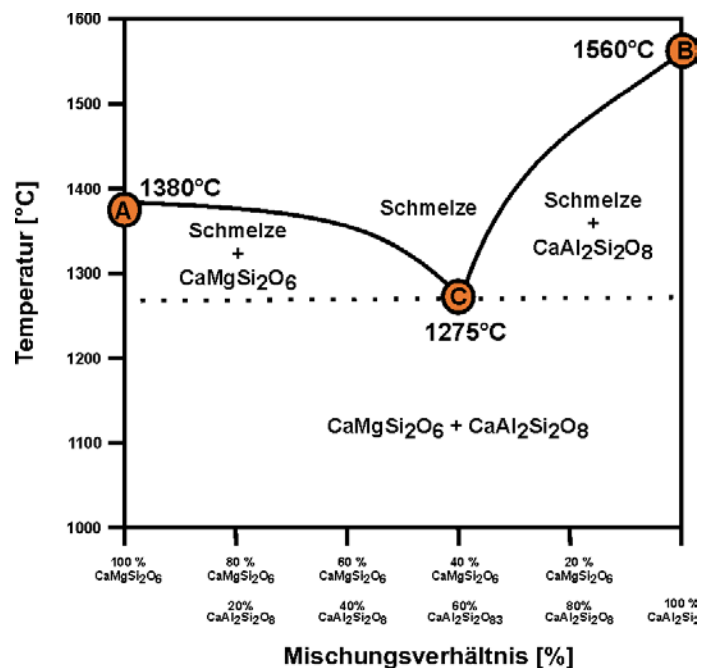
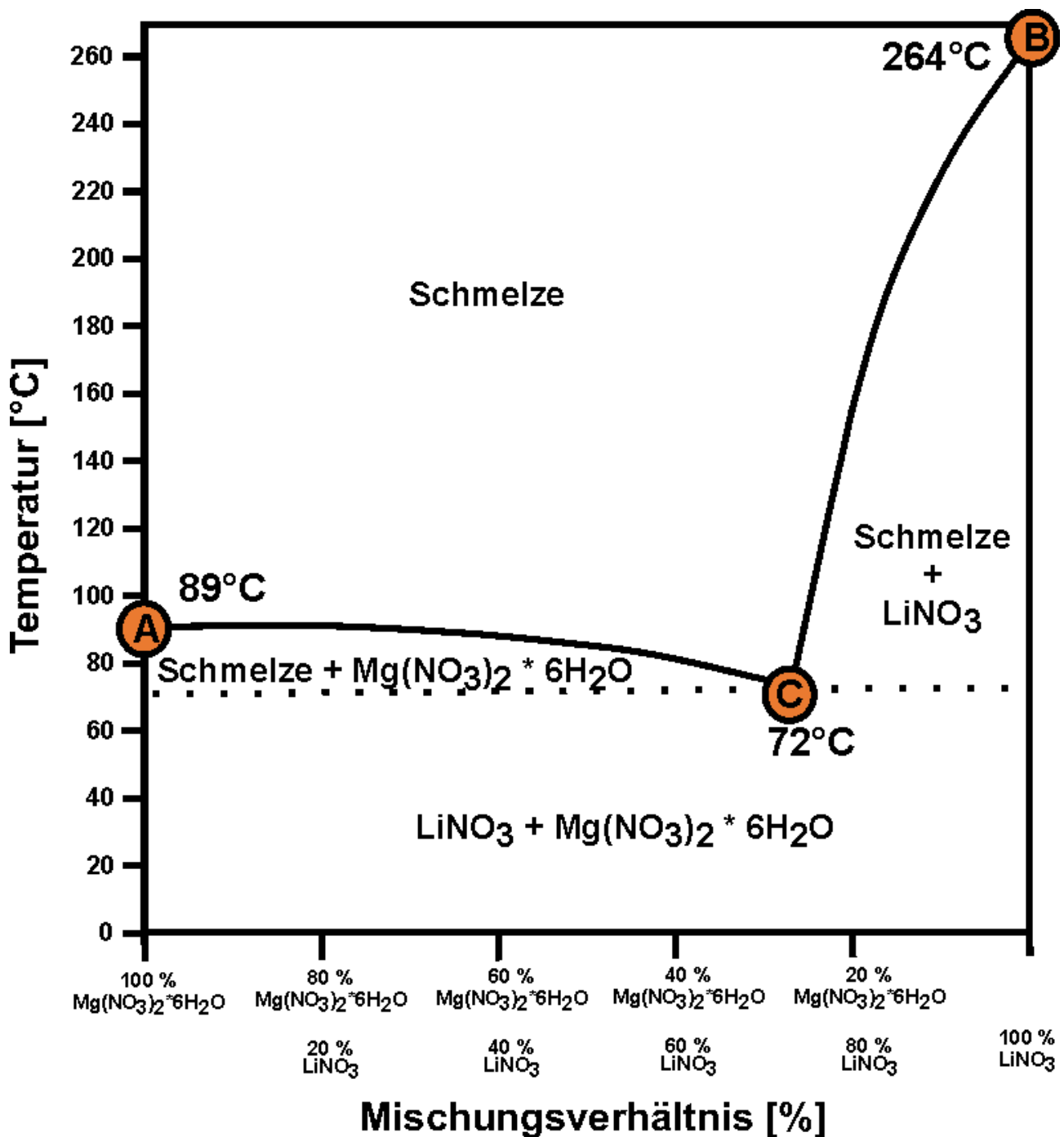


Abbildung 1: Phasendiagramm des Systems Anorthit ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ) und Diopsid ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) (binäres System mit Eutektikum). A, B und C sind Schmelz- bzw. Kristallisationstemperaturen, C ist die Schmelz- bzw. Kristallisationstemperatur des Eutektikums.



# Phasendiagramm



## Baustein 10: Entstehung von kontinentaler und ozeanischer Erdkruste - Kristallisation von Schmelzen

### Entstehung der kontinentalen Erdkruste

#### 1 Überlegungen zur Entstehung der kontinentalen Kruste

Die kontinentale Kruste ist reicher an  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Alkalien ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) als die ozeanische Kruste. Hieraus lässt sich schließen, dass sie nicht direkt aus den Schmelzen des oberen Erdmantels gebildet wird. Ihre Bildung erfolgt in mehreren Schritten, von denen hier derjenige näher betrachtet werden soll, der für die typische Zusammensetzung der oberen Krustenstockwerke verantwortlich ist (s. Abb. 1).

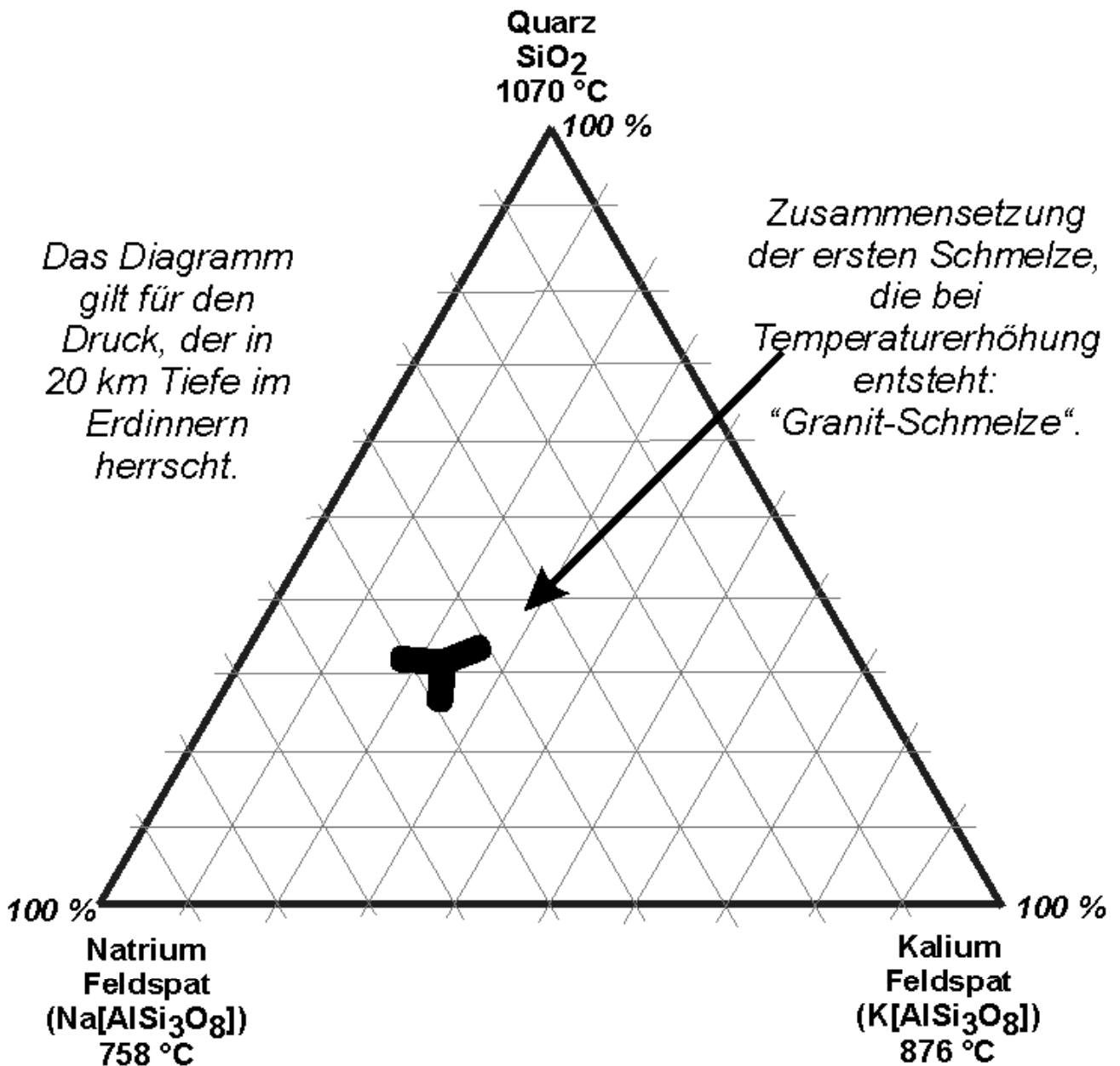


Abbildung 1: Die kontinentale Kruste weist eine granitische Zusammensetzung auf. Das Foto zeigt einen Granit mit den typischen Mineralen Feldspat, (rötlich-weiß) Quarz ( $\text{SiO}_2$ , gräulich) und Glimmer (schwarz).

#### 2 Aufgaben:

- 1) Die obere kontinentale Erdkruste besteht überwiegend aus Graniten. Vereinfacht gesagt bestehen Granite aus den Mineralen Kalium-Feldspat, Natrium-Feldspat und Quarz, die alle eine relativ hohe Schmelztemperatur besitzen (bei Drücken, die im Erdinneren in einer Tiefe von 20 km herrschen: Quarz =  $1.070\text{ }^\circ\text{C}$ , Kalium-Feldspat =  $876\text{ }^\circ\text{C}$ , Natrium-Feldspat =  $758\text{ }^\circ\text{C}$  (JOHANNES und HOLTZ, 1996)). Der Granit schmilzt dagegen in Anwesenheit von Wasser 20 km tief im Erdinneren bei  $650\text{ }^\circ\text{C}$ . Erläutern Sie, warum granitische Schmelzen bei  $660\text{ }^\circ\text{C}$  entstehen können, obwohl die einzelnen Bestandteile eine höhere Schmelztemperatur haben.
- 2) Wenn bestimmte klastische Ablagerungsgesteine (so genannte Grauwacken und Tonsteine) bei der Gebirgsbildung 20 – 30 km tief ins Erdinnere gelangen, werden aus diesen Gesteinen bei Temperaturerhöhung granitische Schmelzen gebildet. Diese Schmelzen steigen aufgrund der im Vergleich zum Umgebungsgestein geringeren Dichte auf, kristallisieren und bilden die obere Erdkruste. Tragen Sie die Zusammensetzung folgender Grauwacken und Tonsteine in das vorbereitete Dreiecksdiagramm ein:
  - (1) 21 % Quarz, 32 % Kalium-Feldspat, 47 % Natrium-Feldspat,
  - (2) 30 % Quarz, 50 % Kalium-Feldspat, 20 % Natrium Feldspat,
  - (3) 41 % Quarz, 47 % Kalium-Feldspat, 12 % Natrium-Feldspat,
  - (4) 50 % Quarz, 40 % Kalium-Feldspat, 10 % Natrium Feldspat,
  - (5) 60 % Quarz, 30 % Kalium-Feldspat, 10 % Natrium Feldspat,
  - (6) 56 % Quarz, 27 % Kalium-Feldspat, 17 % Natrium Feldspat,
  - (7) 54 % Quarz, 24 % Kalium-Feldspat, 22 % Natrium Feldspat.

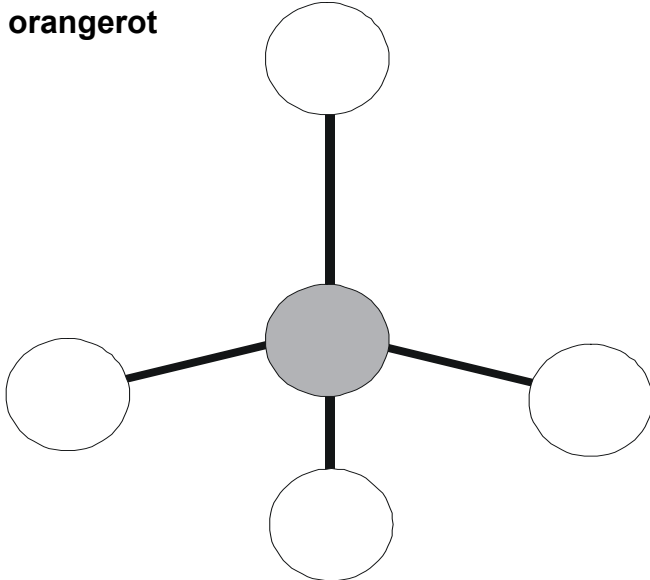
Erläutern Sie, warum aus den Gesteinen Grauwacke und Tonstein granitische Schmelzen entstehen können:



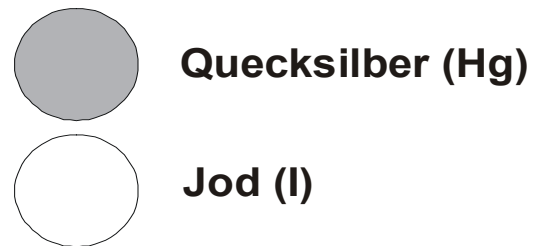

Das Diagramm stellt vereinfacht die Zusammensetzung der Gesteine der kontinentalen Erdkruste dar. Gleichzeitig sind die Schmelztemperaturen der einzelnen Komponenten angegeben, und zwar bei dem Druck, der in 20 km Tiefe im Erdinneren herrscht. Das schwarze Feld zeigt, welche Zusammensetzung die Schmelze hat, wenn das Gestein bei einer Temperaturerhöhung bei etwa 660 °C zu schmelzen beginnt. Die erste Schmelze hat immer diese Zusammensetzung, gleichgültig, in welchem Mischungsverhältnis die Minerale im Gestein vorliegen. Diese Schmelze entspricht dem Eutektikum, sie hat eine so genannte granitische Zusammensetzung (vereinfacht nach JOHANNES und HOLTZ 1996).

## Metamorphose - Thermochromie bei Quecksilber(II)-iodid

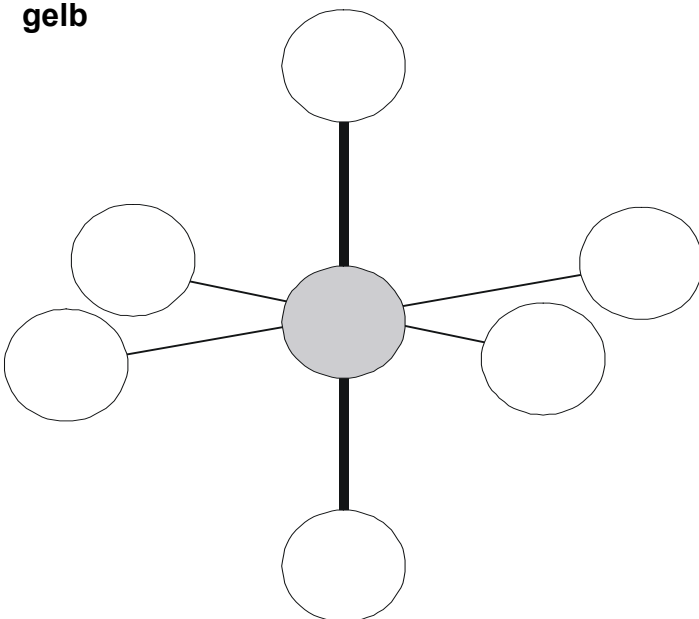
orangerot



Erhitzen  
auf  
127°C



gelb



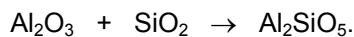


## Baustein 11: Metamorphose – Thermochromie und isochemische Umwandlung

### Isochemischen Umwandlung (Stempel-Zylinder-Pressen)

#### ❶ Stein unter Druck:

Die drei Elemente Silicium, Aluminium und Sauerstoff machen zusammen über 80 Gew. % der Erdkruste aus. Silicium (Si) und Aluminium (Al) kommen in der Natur in vielen Silicaten vor, aber auch in einfachen Oxiden wie z. B. Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) und Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Unter den Druck-Temperatur-Bedingungen der tieferen Erdkruste können Quarz und Korund nicht gemeinsam existieren; sie bilden in einer Umwandlungsreaktion (Metamorphose) nach der folgenden Gleichung so genannte Aluminiumsilicate:



Je nach Druck- und Temperaturbereich bilden sich drei verschiedene Aluminiumsilicate mit gleicher chemischer Zusammensetzung: Andalusit, Sillimanit oder Disthen. Druck verändert den Mineralbestand durch das Zusammendrücken von Atomen und Kristallen. Es entstehen neue Minerale mit dichteren Kristallstrukturen. Durch Wärme können chemische Verbindungen aufbrechen und die bestehenden Kristallstrukturen sich ändern: Ionen und Atome ordnen sich neu.

Treten Andalusit, Sillimanit und Disthen in einem Gestein auf, ist das ein Hinweis auf die Druck- und Temperaturbedingungen, unter denen das Gestein gebildet wurde.

#### ❷ Stempel-Zylinder-Pressen:

Experimentell lassen sich hohe Drücke und Temperaturen in Stempel-Zylinder-Pressen erzeugen (s. Abb. 1, 2 und 3).

#### ❸ Aufgaben:

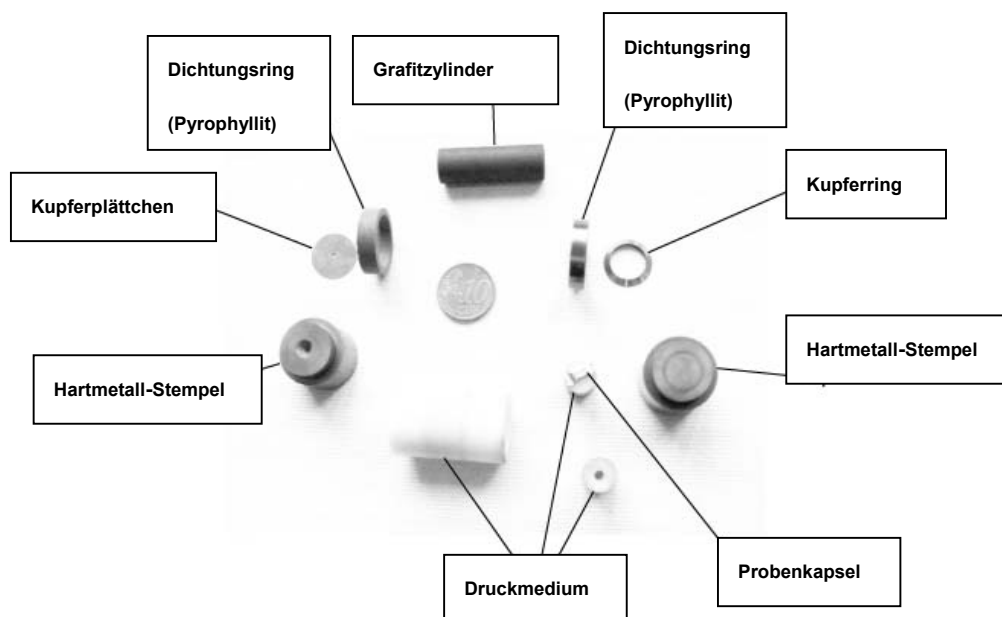
In Experimenten müssen Mineralreaktionen im Vergleich zu den Vorgängen in der Erdkruste sehr schnell ablaufen. Deshalb werden oft hohe Temperaturen gewählt, die die Minerale weit aus ihren Stabilitätsbereichen bringen. Um den Druck zu erhöhen wird Wasser zugegeben. In natürlichen Gesteinen sind oft nach Millionen von Jahren (so genannte „geologischen Zeiträume“) Mineralreaktionen nur



**Abbildung 1:** Eine Stempel-Zylinder-Pressen. In der Mitte die hydraulische Presse. Die Druckübertragung erfolgt von oben und unten über zwei wassergekühlte Druckscheiben auf die ebenfalls wassergekühlte Matrize. Der Einbau mit der Probenkapsel (Abb. 2) befindet sich im Zentrum dieser mittleren Scheibe. Auf der Rückseite erkennt man die Anschlüsse für Kühlwasser und Heizstrom. Auf der Vorderseite das Thermoelement, welches die Proben temperatur misst. Links der Regelschrank für Temperatur und Drucksteuerung, rechts vorne der Kompressor der hydraulischen Presse.

unvollständig abgelaufen. Die Abbildungen 4 – 6 zeigen Ergebnisse von Experimenten mit Stempel-Zylinder-Pressen und ein Phasendiagramm.

- 1) Ergänzen Sie in der schematischen Darstellung (Abb. 3) die Beschriftung! Verwenden Sie dazu die in Abb. 2 genannten Begriffe.
- 2) Die Abbildung 6 zeigt ein Phasendiagramm für die Aluminiumsilicate ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ). Markieren Sie die in Abbildung 5 genannten Experimentierbedingungen mit einem Kreuz (Temperatur: 800 °C, Druck: 1,8 GPa).
- 3) Die drei Aluminiumsilicate weisen die Dichten 3,65 bzw. 3,20 und 3,15 auf. Ordnen Sie die Dichten in dem Phasendiagramm den Mineralen zu! Begründen Sie Ihre Entscheidung!



**Abbildung 2:** Mit diesen Teilen wird die Probenkapsel in die Stempel-Zylinderpresse eingebaut. Alle Einzelteile werden passgenau hergestellt. Als Druckmedium dient hier ein zylinderförmiges Stück Salz (Natriumchlorid).

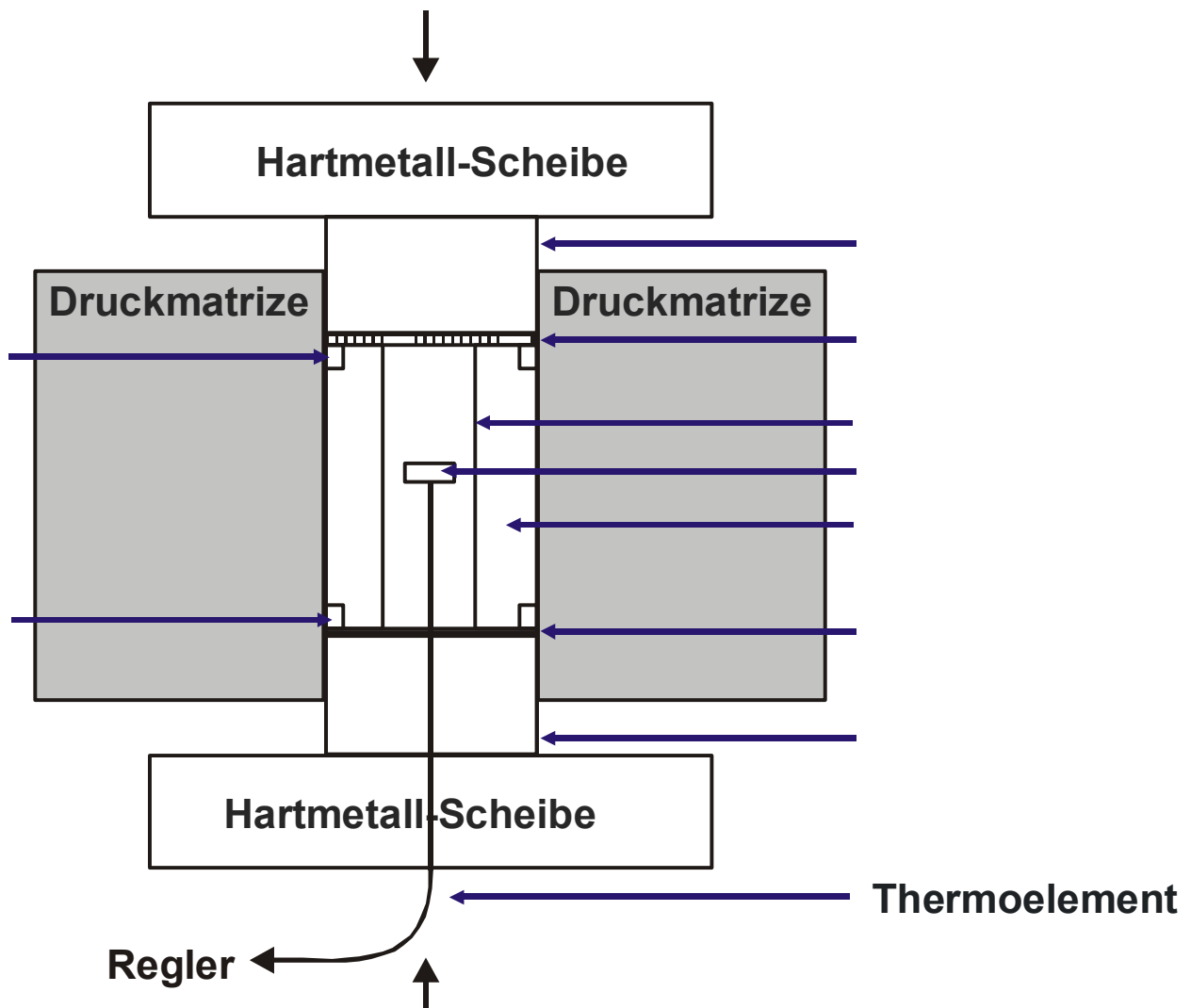


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Experiments in einer Stempel-Zylinder-Press. Ein hydraulisch erzeugter Druck wird über Hartmetallstempel auf ein Druckmedium übertragen. In dessen Innerem befindet sich die Probenkapsel. Als Druckmedien eignen sich verschiedene Festkörper, die sich unter hohem Druck plastisch verhalten, z.B. Natriumchlorid, Calciumfluorid oder Spezialgläser. Die Versuchstemperatur wird in einem Grafitrohr erzeugt, welches die Probenkapsel einschließt und einen Kontakt zwischen den beiden Hartmetallstempeln herstellt. Zum Heizen wird eine elektrische Spannung zwischen den Stempeln angelegt. Gemessen wird die Temperatur mit einem Thermoelement, dessen Spitze der Probenkapsel anliegt und das durch eine Bohrung in einem der Stempel aus der Druckzelle herausführt. Das Temperatur-Signal geht in einen Regler, der über den Stromfluss durch das Grafitrohr die Temperatur konstant hält.

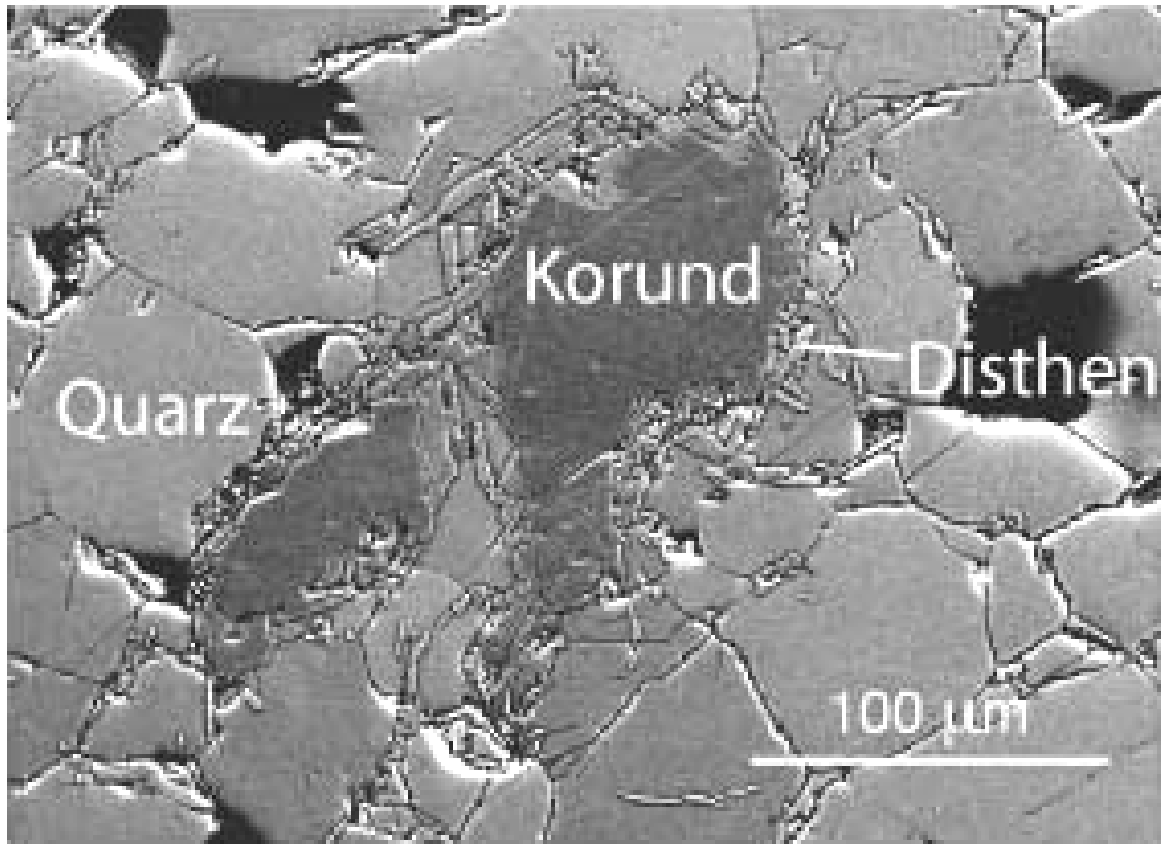


Abbildung 4: Ein von Quarzkörnern umgebenes Korundkorn wurde für einige Tage in Gegenwart von 1 Gew. % Wasser in den Stabilitätsbereich von Disthen gebracht. Auf Korngrenzen zwischen den Quarzkörnern und am Kontakt zwischen Korund und Quarz ist Disthen kristallisiert. Die Reaktion ist noch unvollständig abgelaufen. (Quelle: R. MILKE, GFZ)

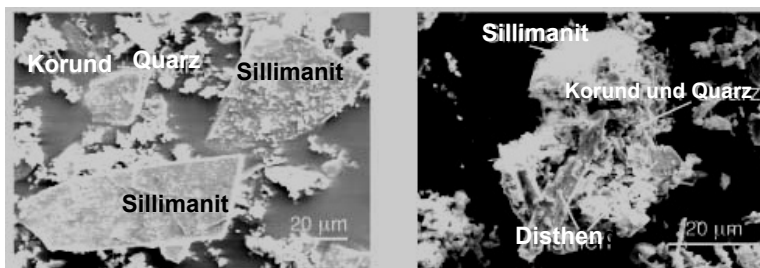


Abbildung 5: Ein Gemisch von Sillimanit, Korund und Quarz (links) wurde in Gegenwart von 1 % Wasser für 24 Stunden in das Stabilitätsfeld von Disthen gebracht (800 °C, 1,8 GPa). Die Anteile der Minerale am Reaktionsgemisch wurden vor und nach dem Experiment mit Röntgenbeugungsmethoden bestimmt. Nach 24 Stunden besteht das Gemisch zu 50 % aus Disthen (rechts). Etwas mehr als 50 % Sillimanit und etwas weniger als 50 % Korund und Quarz haben zu Disthen reagiert. Die Teilreaktion Sillimanit → Disthen ist unter den Versuchsbedingungen also etwas schneller als die Teilreaktion Korund → Disthen und Quarz → Disthen (Quelle: R. MILKE, GFZ).

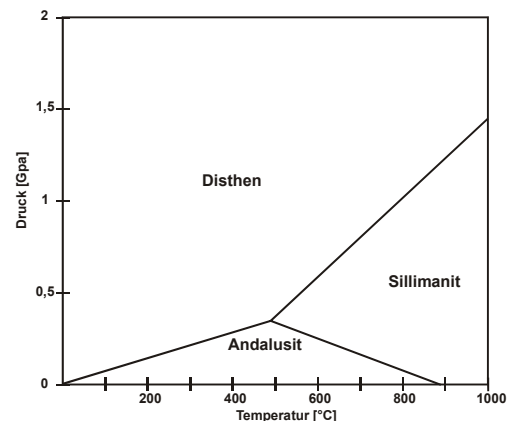


Abbildung 6: Mehrphasendiagramm für  $Al_2SiO_5$ . Es zeigt die Stabilitätsbereiche der Minerale Andalusit, Sillimanit und Disthen. (Quelle: MILKE, GFZ)



## Baustein 11: Metamorphose - Thermochromie und isochemische Umwandlung

### Isochemische Umwandlung (Bildung von Wollastonit)

- ➊ Bildung von Wollastonit\* ( $\text{CaSiO}_3$ ) aus Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) und Quarz ( $\text{SiO}_2$ ):

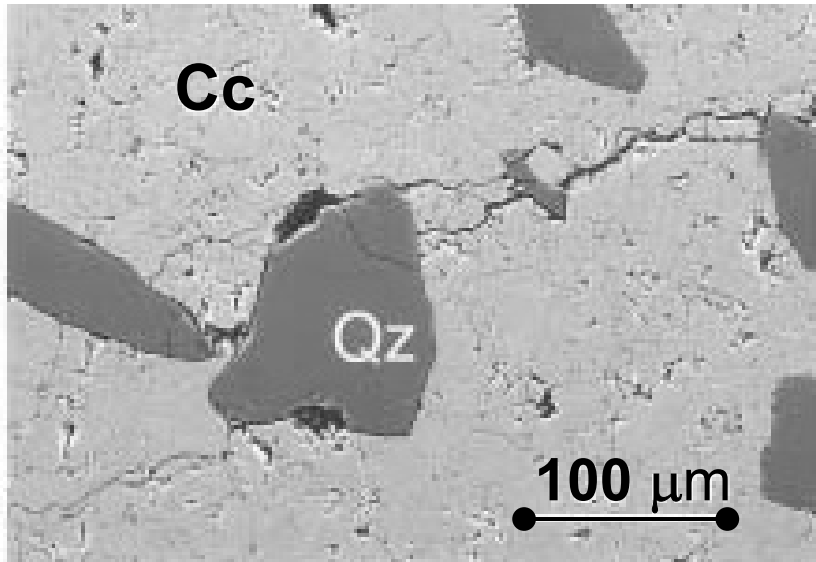


Abbildung 1: Ein durch Heißpressen erzeugtes künstliches Gestein aus Quarzkörnern (Qz),  $\text{SiO}_2$ , die in eine Grundmasse von Calcit (Cc),  $\text{CaCO}_3$  eingebettet sind, entspricht einem sandführenden Kalkstein in der Natur (Quelle: R. MILKE, GFZ).

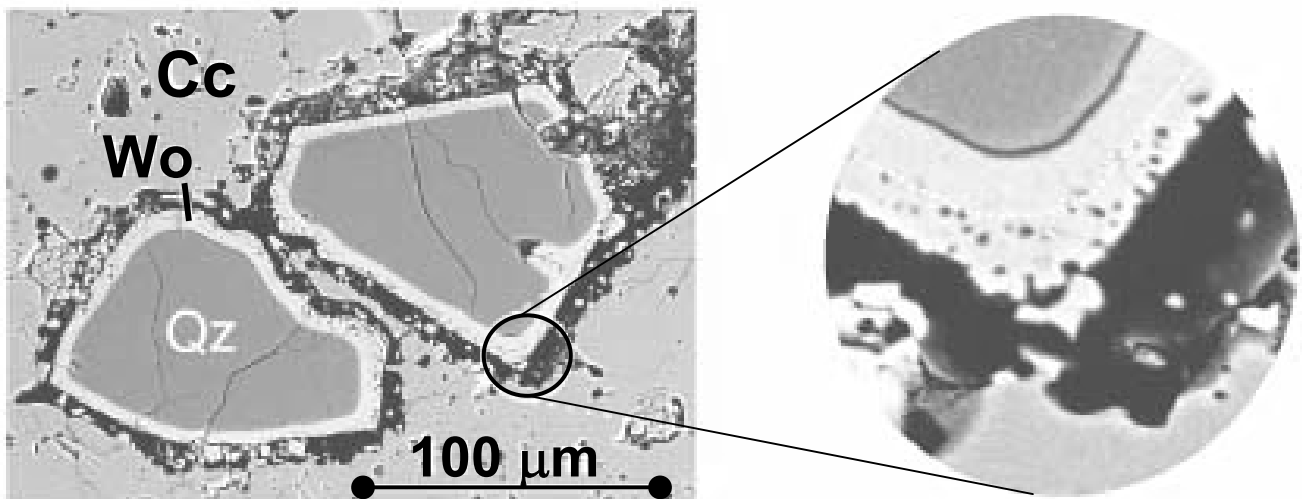
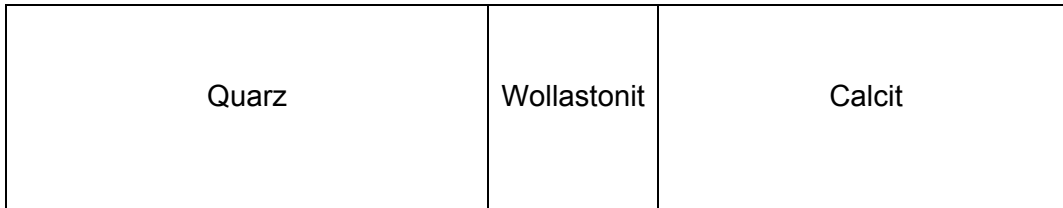


Abbildung 2: Das synthetische Gestein wurde in einer geschlossenen Platin-Kapsel für 5 Tage unter einen Druck von 0,1 GPa gesetzt und auf 1000 °C erhitzt. Diese Bedingungen herrschen in etwa 3,5 km Tiefe im Erdinneren, wenn Basalt-Magma durch tief versenkte Sedimentgesteine aufsteigt. Um die Quarz-Körner hat sich nach den 5 Tagen ein Mantel aus Wollastonit\* (Wo),  $\text{CaSiO}_3$ , gebildet. Der ursprüngliche Rand der Quarzkörner lag innerhalb des neugebildeten Reaktionsraums. Obwohl der Druck auf die Probenkapsel so hoch war, als hätte sie unter einem 3,5 km hohen Stapel von Granitblöcken gelegen, befinden sich zwischen den ummantelten Quarzkörnern und der Grundmasse offene Poren.

\* nach dem englischen Chemiker W. H. WOLLASTON (1766-1829)



**Abbildung 3: Schematisches Bild der Volumenänderung bei der Bildung von Wollastonit aus Calcit und Quarz. Das obere Bild zeigt das Volumen der Ausgangssubstanz, das untere das Volumen nach 5 Tagen.**

**2 Aufgaben:**

1) Geben Sie für die Reaktion von Calcit mit Quarz zu Wollastonit die Reaktionsgleichung an!

2) Begründen Sie die Volumenkontraktion des Gesteins!

## Baustein 12: Diamanten erzählen eine heiße Geschichte

### Eigenschaften von Grafit und Diamant

#### 1 Materialien:

- Optional: Diamant und Grafit als Anschauungsobjekte

#### 2 Eigenschaften von Diamant und Grafit:

**Diamant** ist bekanntlich extrem hart, weshalb er für Schleif- und Schneidzwecke verwendet wird. Allerdings ist Diamant auch spröde, und darum wird er meist im Verbund mit anderen, zäheren Werkstoffen oder als Schleifpulver eingesetzt. Für Schmucksteine kommen beinahe ausschließlich natürliche Diamanten in Frage. Synthetischer Diamant kann aus **Grafit** durch Ausübung von Druck und unter Verwendung von **Katalysatoren** hergestellt werden. Dabei entstehen jedoch meist nur sehr kleine Kristalle, die zwar den meisten technischen Anforderungen genügen, aber nicht als Schmucksteine geeignet sind.

Wie alle physikalischen Eigenschaften sind auch die Härte und die Sprödigkeit des Diamants in seiner Struktur begründet. Die Diamantstruktur besteht aus **kovalent** gebundenen Kohlenstoffatomen. Jedes Atom ist dabei an vier weitere Atome in Form eines Tetraeders gebunden. Die sich ergebende Struktur hat **kubische Symmetrie** (s. Abb. 1). Da sich bei der kovalenten Bindung die **Atomorbitale** überlappen, beträgt die Raumerfüllung über 90 %. Die dreidimensional verknüpften starken kovalenten Bindungen, die hohe Packungsdichte und die geringe Größe der Kohlenstoffatome sind Ursachen für die Härte des Diamants. Betrachtet man die Diamantstruktur in einer bestimmten Richtung, so wird deutlich, dass die Kohlenstoffatome gewellte Schichten bilden (s. Abb. 1). Ein Atom ist jeweils an drei Bindungen innerhalb einer solchen Schicht und nur an einer Bindung zwischen den Schichten beteiligt. Deshalb ist die Bindung zwischen den Schichten weniger fest als innerhalb, wodurch sich gute Spaltbarkeit parallel zu diesen Schichten ergibt. Wenn man also diese Richtung kennt, kann man einen Diamanten durch einen gezielten Schlag zerteilen, was sich Juweliere zunutze machen.

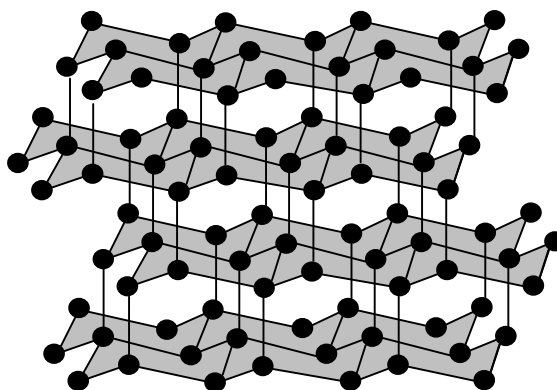
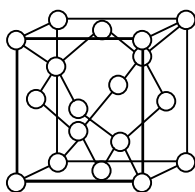


Abbildung 1: Links: Eine Elementarzelle der Kristallstruktur von Diamant. Die Kreise geben die Lage der Kohlenstoffatome an. Rechts: Aufbau der Diamantstruktur aus gewellten Schichten, entlang derer der Diamant gut spaltbar ist.

Grafit besteht ebenfalls ausschließlich aus Kohlenstoffatomen, die aber im Gegensatz zu Diamant nur in einer Ebene kovalent miteinander verbunden sind. Es bilden sich Schichten aus, die untereinander nur durch die schwachen van-der-Waals-Kräfte verbunden sind. Wieder bestimmt der schichtenförmige atomare Aufbau die Eigenschaften: Grafit ist weich und spaltet in einer Richtung perfekt. Weil – anders als der

Diamant – zwischen den Schichten keine kovalenten Bindungen bestehen, ist der Kraftaufwand für die Spaltung extrem gering. Man macht sich das beim Einsatz von Graphit für Bleistiftminen und Hochtemperaturleitmittel zunutze.

Diamant und Graphit sind Polymorphe des Elements Kohlenstoff. Von **Polymorphie** spricht man, wenn eine Substanz (hier ein Element) in verschiedenen Kristallstrukturen auftritt. Diamant entsteht unter sehr viel höheren Drücken als Graphit. Unter Bedingungen, wie wir sie an der Erdoberfläche vorfinden, sollte sich Diamant in Graphit umwandeln. Es tut das nicht, sondern bleibt **metastabil** erhalten, weil eine solche Umwandlung sehr lange Zeiträume in Anspruch nimmt.

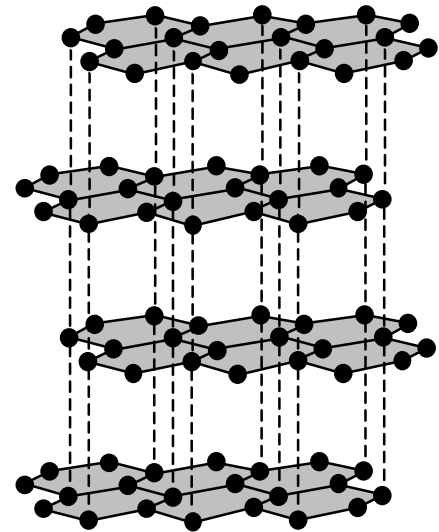


Abbildung 2: Graphitstruktur

### ③ Aufgabe:

- 1) Erstellen Sie anhand von Literatur und einer Internetrecherche eine vergleichende tabellarische Übersicht zu Eigenschaften und Verwendung von Graphit und Diamant! Die Begriffe können im Glossar der CD-ROM „System Erde“ nachgeschaut werden.

	Diamant	Graphit
Symmetrie		
Spaltbarkeit		
Bruch		
Härte (Mohs)		
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )		
Lichtbrechung		
Dispersion		
Farbe		
Strich		
Glanz		
elektrische Leitfähigkeit		
thermische Leitfähigkeit (W/cm) °C		
Verwendung		



## Baustein 12: Diamanten erzählen eine heiße Geschichte

### Phasendiagramm

#### ❶ Materialien:

- Diamant und Grafit (optional)
- Arbeitsbogen „Eigenschaften von Grafit und Diamant“ (Baustein 3, Modul 12, Material 2)

#### ❷ Phasendiagramm für den Übergang Grafit – Diamant:

Grafit und Diamant bestehen aus reinem Kohlenstoff. Die Phasenumwandlung ist ein Beispiel für einen isochemischen Vorgang. Am System Kohlenstoff lassen sich die Reaktionen eines Systems auf Änderungen von Druck und Temperatur gut verdeutlichen: Je höher die Temperatur, desto höher ist auch der für die Phasenumwandlung benötigte Druck.

Dieser Sachverhalt lässt sich in einem Phasendiagramm veranschaulichen (s. Abb. 1). Hierfür werden Drücke von 0 bis 100 kbar auf die eine Achse aufgetragen und Temperaturen von 0 bis 3000 °C auf die andere Achse. Aus Experimenten weiß man, unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen Diamant entsteht und unter welchen Grafit: Bei zunehmendem Druck findet entlang der durchgezogenen Linie der Übergang von Grafit zu Diamant statt. Im Zuge dieser Umwandlung verringert sich das molare Volumen um etwa ein Drittel.

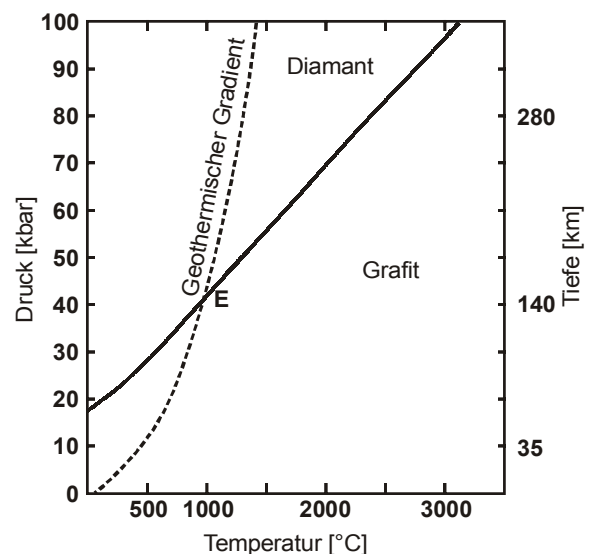


Abbildung 1: Ein Phasendiagramm für den Übergang Graphit-Diamant im Reinsystem Kohlenstoff (nach MATTHES 1983).

In die Abbildung wurde zusätzlich eine Linie eingetragen, die den Verlauf des geothermischen Gradienten im Erdinnern veranschaulicht. Der geothermische Gradient gibt die Zunahme der Temperatur mit der Tiefe an. Am Schnittpunkt **E** (1000 °C, 45 kbar) zwischen diesem Gradienten und der Phasengrenze würde unter natürlichen Bedingungen die Umwandlung von Grafit zu Diamant (oder umgekehrt) stattfinden. Die Umwandlung erfolgt in etwa 140 km Tiefe.

#### ❸ Aufgabe:

- 1) Begründen Sie die positive Steigung der Phasengrenze (durchgezogene Linie)!



## Baustein 12: Diamanten erzählen eine heiße Geschichte

### Diamanten im Erdinneren

#### ❶ Materialien:

- Arbeitsbogen „Eigenschaften von Grafit und Diamant“ (Modul 3, Baustein 12, Material 2)
- Arbeitsbogen „Phasendiagramm“ (Modul 3, Baustein 12, Material 3)
- CD-ROM „System Erde“ mit Zugang für jeden Schüler/in (benötigt werden die Sachanalysen der Module „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“ und „Erdbeben und Wellen: Nachrichten über das Innere der Erde“)
- Material für die Darstellung der Ergebnisse (alternativ Software zur Erstellung einer Grafik mit dem Computer zzgl. Folie für die Präsentation am Overheadprojektor oder dicke Faserstifte und Papier etwa DIN - A0)
- optional: Diamanten

#### ❷ Diamanten im Erdinneren:

Diamanten entstehen im Erdmantel in einer Tiefe von mindestens 140 km. Sie können Einschlüsse enthalten, die Hinweise auf die Gesteinszusammensetzung und die physikalischen Bedingungen bis in Tiefen von über 700 km geben können.

Diamant ist chemisch fast inert, d.h. extrem reaktionsträge und somit ein perfekter Behälter, der seine Einschlüsse gegen alle späteren Einflüsse abschirmt. Da es sich meist um monomineralische Einschlüsse handelt, fehlen auch Reaktionspartner, um beim Aufstieg chemische Gleichgewichte den veränderten Druck- und Temperaturbedingungen anzupassen. Beim Aufstieg kommt es lediglich zu isochemischen Änderungen der Einschlussminerale. Deren ursprünglicher Phasenzustand lässt sich auf Basis experimenteller Daten rekonstruieren. Damit stellen Diamanteinschlüsse direkte Zeugen des chemischen Milieus und der Druck- und Temperaturbedingungen ihres Ursprungsgebietes im Erdinneren dar.

#### ❸ Aufgabe:

- 1) Bei einigen Kontinenten ist die Lithosphäre bis zu 200 km mächtig. Deshalb nimmt die Temperatur dort langsamer zu als an anderen Stellen der Erdkruste. Diese Bereiche der Erdkruste stellen die bei weitem wichtigste Quelle für Diamanten dar.

Erläutern Sie unter Berücksichtigung des Phasendiagramms im Arbeitsbogen „Diamanten erzählen eine heiße Geschichte – Phasendiagramm“, warum das so ist. Hinweis: Man findet die Diamanten nicht erst in 200 km Tiefe.