

Grundlagen der Sprache der Gesteine

5 Sedimentgesteine

Den Gesteinen dieser Gruppe ist gemeinsam, dass sie in Schichten von einigen Millimetern bis zu mehreren Metern Dicke auftreten, welche sich in der Horizontalen oft über grosse Distanzen verfolgen lassen. Der Schluss liegt deshalb nahe, dass sie unter oder über Wasser auf der Erdoberfläche abgelagert, also sedimentiert wurden. Deshalb werden sie Sedimentgesteine genannt.



5.1 Die wichtigsten Prozesse

Im Gegensatz zur Sprache der magmatischen Gesteine, zu deren Entschlüsselung aufwändige Experimente und Analysen notwendig sind, verraten Sedimentgesteine durch Beobachtung in der Natur schon sehr viel über die Prozesse, welche an ihrer Entstehung beteiligt sind. Viele dieser Prozesse können auch heute auf der Erdoberfläche beobachtet werden. Dies hilft, jene Vorgänge zu verstehen, die in der Vergangenheit abliefen. Die Sedimentgesteine tragen jedoch auch zum Verständnis aktueller Prozesse bei, denn sie gewähren Einblick in viele Millionen Jahre der geologischen Entwicklung und sind damit im Gegensatz zu den aktuell beobachtbaren Zeiträumen weit mehr als nur Momentaufnahmen. Bevor wir uns den Sedimentgesteinen zuwenden, lohnt es sich deshalb, diese Prozesse etwas genauer zu betrachten.

An der Entstehung der Sedimentgesteine sind verschiedene Prozesse beteiligt: Verwitterung, Abtragung, Transport, Ablagerung und Verfestigung (Diagenese).

5.1.1 Verwitterung

Unter dem Einfluss von Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre verwittern die Gesteine an der Erdoberfläche. Dabei wird zwischen physikalischer und chemischer Verwitterung unterschieden.

Physikalische Verwitterung

Bei physikalischer Verwitterung werden Gesteine mechanisch zerlegt und zerkleinert. Häufige Prozesse sind:

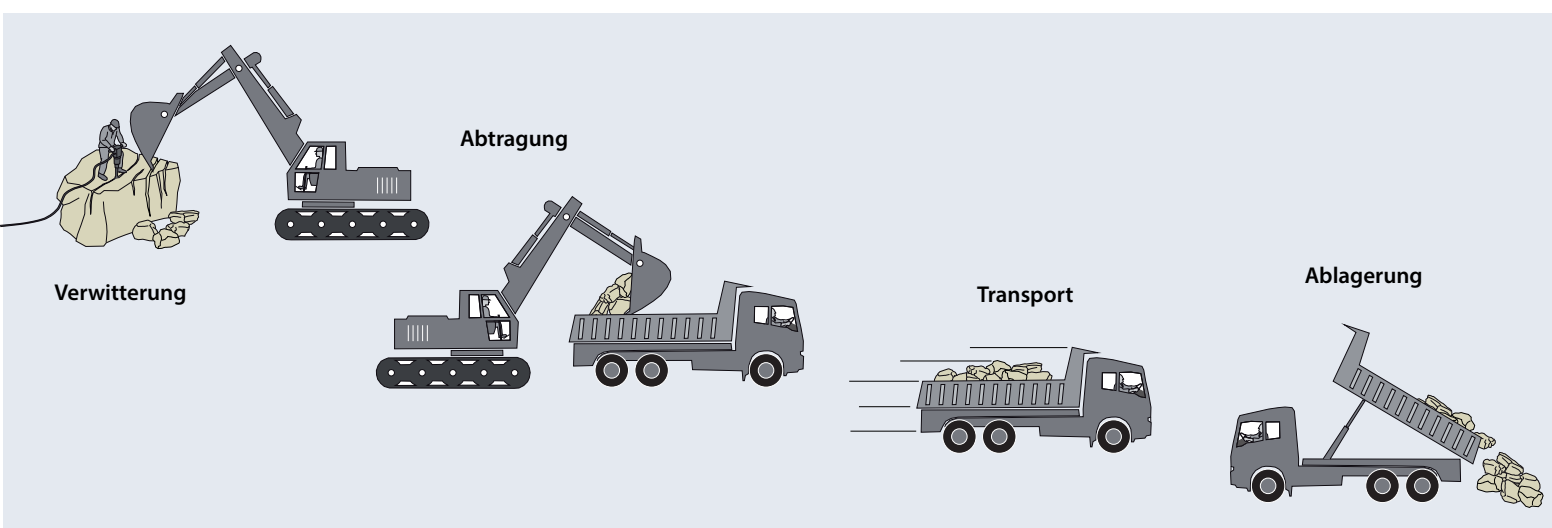
- **Frostverwitterung:** Gefriert Wasser in feinen Spalten, dehnt es sich aus, wobei ein Druck von bis zu 200 MPa entstehen kann (800 x normaler Reifendruck). Wiederholtes Gefrieren und Auftauen im Tages- oder Jahreszeitenrhythmus führt zur Aufweitung der Spalten und schliesslich zur Zerlegung des Gesteins. Frostverwitterung ist auf Klimate mit genügend kalten Wintern und/oder Nächten beschränkt.

- **Salzverwitterung:** Während langer Trockenperioden in ariden Gebieten wird Wasser, das sich in feinsten Rissen im Inneren der Gesteine angesammelt hat, durch Kapillarkräfte an deren Oberfläche gesogen. Dieses Wasser enthält gelöste Salze, die bei der Verdunstung des Wassers unter der Gesteinsoberfläche auskristallisieren. Der Druck, den diese Kristalle ausüben, ist imstande, einzelne Körner aus dem Gestein herauszulösen, wodurch dieses langsam zerbröckelt.
- **Insolationsverwitterung:** Jedes Mineral dehnt sich bei Erwärmung anders aus, das eine stärker, das andere weniger stark. Bei grossen Temperaturunterschieden zwischen Tag und Nacht von 50°C und mehr, wie sie in Wüstengebieten vorkommen, dehnen sich die Minerale einmal pro Tag aus und ziehen sich wieder zusammen. Dadurch lockern sie sich allmählich aus dem Gesteinsverband, wodurch das Gestein oberflächlich zerfällt.
- **Abrasion:** Durch Aneinanderschlagen und -reiben in Fließgewässern oder im Bereich der Meeresbrandung wird Sand, Kies und Geröll abgerundet und allmählich immer kleiner. Auch steinerne Flussbetten werden dadurch ausgeschliffen.

Chemische Verwitterung

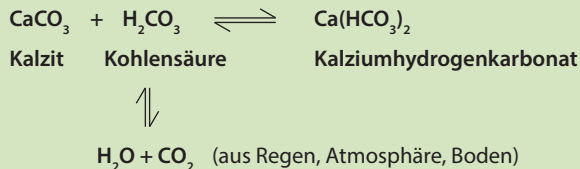
Bei chemischer Verwitterung werden Minerale durch chemische Reaktionen mit ihrer Umgebung umgewandelt oder vollständig aufgelöst. An diesen Reaktionen sind oft Säuren beteiligt, welche aus der Atmosphäre stammen oder durch biologische Prozesse in Pflanzen und Mikroorganismen entstehen. Häufige Prozesse sind:

- Umwandlung von Glimmern, Feldspäten, Olivin und Obsidian in Tonminerale (< 0.002 mm) durch komplexe chemische Reaktionen hauptsächlich unter feuchten, warmen Bedingungen in den mittleren Breiten, Subtropen und Tropen.
- Lösung von Mineralen wie z. B. Kalzit durch Kohlensäure aus Regenwasser und Boden: Die Minerale



reagieren mit der Kohlensäure zu wasserlöslichem Hydrogenkarbonat (im Fall von Kalzit zu Kalziumhydrogenkarbonat), welches mit dem Regenwasser weggespült wird. Gesteine, die ausschliesslich aus Kalzit bestehen, wie die Kalksteine, lösen sich dabei im Lauf der Zeit vollständig auf.

Kohlensäureverwitterung von Kalzit:



5.1.2 Abtragung

Nachdem das Gestein durch Verwitterung in einzelne Partikel aufgelockert ist, müssen diese aus dem Gesteinsverband herausgelöst, also abgetragen werden, bevor sie schliesslich abtransportiert werden können. Abtragung geschieht durch die Schwerkraft, fließendes Wasser, Eis oder in geringem Masse auch durch Wind. Zwischen Verwitterung, Abtragung und Transport sind die Grenzen oft fließend. Verwitterung und Abtragung werden unter dem Begriff **Erosion** zusammengefasst.

5.1.3 Transport

Die Produkte der physikalischen Verwitterung sind Feststoffe und werden durch die Schwerkraft (z. B. Felssturz, Murgang), im fließenden Wasser (Bäche, Flüsse, Meeresströmungen), im Gletschereis oder mit der Luft (Wind) transportiert. Oft sind mehrere Transportprozesse beteiligt. So kann ein Sandkorn zuerst mit einem Felssturz zu Tal stürzen, danach wird es von einem Fluss an eine Küste transportiert, um dort mit einer Meeresströmung weiter getragen und schliesslich vom Wind zu einer Stranddüne geweht zu werden.

Im fließenden Wasser hängt die Grösse der transportierten Partikel von der Menge und der Geschwindigkeit des Transportmediums ab. Je schneller Wasser fliesst und je grösser die Wassermassen sind, desto grössere Partikel können transportiert werden (Abb. 1). Wasser kann vom kleinen Tonpartikelchen bis hin zu grossen Felsblöcken von vielen m³ Volumen alles transportieren. Gletschereis kann ebenfalls Partikel jeder Grösse mittragen, währenddem der Wind nur feine Partikel bis zur Grösse von Sandkörnern transportieren kann.

Der Transport übt eine Selektion aus: Nicht jedes Verwitterungsprodukt ist dazu geeignet, mit jedem beliebigen Transportmedium über jede beliebige Distanz transportiert zu werden. Auf dem Transportweg sind die Verwitterungsprodukte weiteren Umwandlungen ausgesetzt. Sie können physikalisch weiter zerkleinert sowie chemisch verändert oder aufgelöst werden. Besonders brüchige Minerale wie Glimmer, Feldspäte oder Pyroxene werden in Bächen und Flüssen oft bis zur Unkenntlichkeit zerrieben.

5.1.4 Ablagerung

Sedimentpartikel werden durch drei verschiedene Mechanismen abgelagert:

Biogene Ablagerung

In stehenden Gewässern wie Seen oder Meeren sinken die Überreste von Organismen - es handelt sich dabei meist um deren Schalen - in der Regel in jenem Bereich zu Boden, wo sie gelebt haben, wobei sie kaum beschädigt werden. Durch Strömungen, z. B. durch Meeresströmungen oder bei starken Stürmen, können sie jedoch auch verfrachtet und beschädigt werden.

In fließenden Gewässern findet die Ablagerung meist in weiter Entfernung vom ursprünglichen Lebensraum statt. Tierschalen oder -knochen werden beim Transport zusammen mit Kies und Steinen häufig bis zur Unkenntlichkeit zermahlen, sodass kaum mehr Überreste zu finden sind. In Mooren und Sümpfen können sich grosse Mengen abgestorbener Pflanzen ansammeln, da der biologische Abbau in sauerstoffarmer Umgebung verlangsamt ist.

Mechanische Ablagerung

Durch Schwerkraft, Wasser, Eis oder Wind transportierte Sedimentpartikel werden mechanisch abgelagert. Bei Felsstürzen, Murgängen, Wasser- und Windtransport geschieht dies im Falle einer Verringerung der Transportgeschwindigkeit. Bei grossen Partikeln genügt schon eine kleine Verringerung der Transportgeschwindigkeit, bei sehr feinen Partikeln wie Ton muss die Transportgeschwindigkeit sehr stark reduziert werden, damit Ablagerung möglich ist (Abb. 1). Für die Ablagerung im Wasser ist das z. B. dann der Fall, wenn das Gefälle eines Baches oder Flusses geringer wird oder wenn fließendes Wasser beim Eintritt in ein stehendes Gewässer (See, Meer) abgebremst wird. Gletschereis lagert eingeschlossene Sedimentpartikel unabhängig von ihrer Grösse durch Ausschmelzen ab.

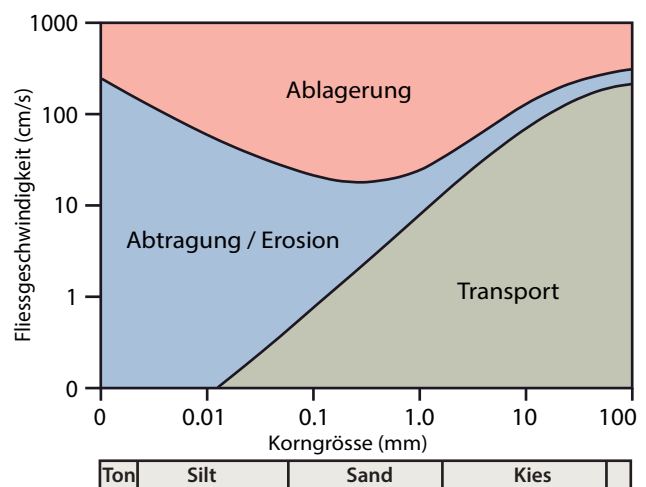


Abb. 1: Das Hjulströmdiagramm (benannt nach dem schwedischen Geographen Filip Hjulström, 1902–1982) zeigt den Zusammenhang zwischen Erosion, Transport und Ablagerung sowie der Fließgeschwindigkeit von Wasser. Unterhalb von ca. 0.01 mm Korngrösse haften die Partikel oft sehr stark aneinander, sodass höhere Fließgeschwindigkeiten notwendig sind, um sie vom Untergrund zu lösen und zu bewegen.

Chemische Ablagerung

Bei der chemischen Verwitterung von Gesteinen werden gewisse Minerale ganz oder teilweise in wasserlösliche Verbindungen umgewandelt. Diese werden von den Fließgewässern in die Meere transportiert oder sie sammeln sich in abflusslosen Senken, wo sie sich über Jahrmillionen anreichern. Bei der Verwitterung von Kalzit z. B. werden grosse Mengen an Kalzium (Ca) frei, bei der Verwitterung von Feldspäten und Glimmern in Granit werden Ca, Natrium (Na) und Kalium (K) herausgelöst, die sich mit anderen Substanzen im Wasser zu gelösten Salzen wie z. B. Kalziumhydrogencarbonat (siehe Kohlensäureverwitterung) verbinden. Der durchschnittliche Salzgehalt der Ozeane liegt bei ca. 3,5%. In der Ostsee beträgt er nur 0,9%, im Mittelmeer 3,74% und im Persischen Golf sogar 4%. Im Toten Meer sind es rekordverdächtige 28%. Tritt bei der Verdunstung solch salzhaltigen Wassers Übersättigung ein, werden die Salze ausgefällt. Dabei entstehen feinste Kristalle, die zu Boden sinken und sich dort in Schichten ablagern.

5.1.5 Verfestigung (Diagenese)

Sedimente werden in lockerer Form abgelagert und enthalten viel Porenraum, der meist mit Wasser gefüllt ist. Durch die Überlast später abgelagerter, darüber liegender Sedimente werden tiefer liegende, ältere Schichten kompaktiert (Abb. 2). Dabei wird der Porenraum verkleinert. Zusätzlich werden die Sedimentpartikel durch das Wachstum neuer Minerale in den verbleibenden Porenräumen verklebt, man spricht von 'zementiert'.

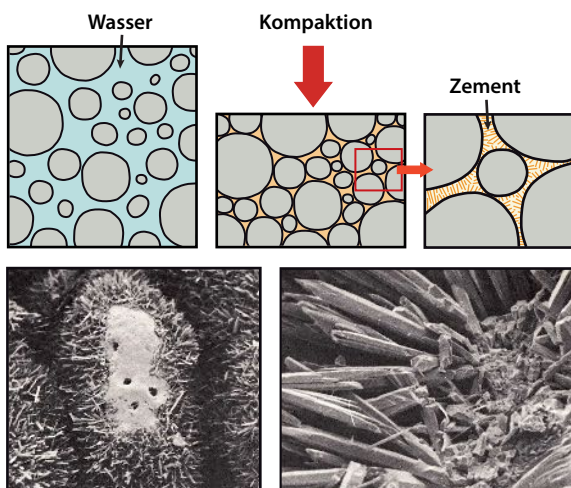


Abb. 2 oben: Schematische Darstellung von Kompaktion und Zementation eines Sedimentes. Unten: rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Zement zwischen Sandkörnern.

5.2 Drei Gruppen von Sedimentgesteinen

Aufgrund ihrer Zusammensetzung werden die Sedimentgesteine in die drei Untergruppen biogene, klastische und chemische Sedimentgesteine unterteilt. Die biogenen und klastischen Sedimentgesteine sind häufig, die chemischen eher selten.

Biogene Sedimentgesteine: Die Gesteine dieser Gruppe bestehen überwiegend aus Überresten tierischer und

pflanzlicher Organismen jeder Grösse, von einzelligen Mikroorganismen im Submillimeterbereich über Schalen zum Beispiel von Muscheln bis hin zu Saurierskeletten, von Blütenpollen bis zu ganzen Baumstämmen. Sie werden demnach in zoogene (tierische) und phytogene (pflanzliche) Sedimentgesteine unterteilt.

Klastische Sedimentgesteine: Klasten (griech. kláo = zerbrechen) sind feste Gesteinsbruchstücke, die durch mechanische Zerstörung von Gesteinen entstehen. Ihre Grösse reicht von Blöcken im Meterbereich bis zu Ton, dessen Partikel kleiner als 0,002 mm sind. Ablagerungen, die aus den zerbrochenen Überresten anderer Gesteine bestehen, heissen deshalb klastische Sedimente. Da die Klasten nicht nur durch mechanische Prozesse entstehen, sondern auch durch solche transportiert und abgelagert werden (z. B. Schwerkraft, Wasser, Wind), werden sie auch als mechanische Sedimente bezeichnet.

Chemische Sedimentgesteine: Diese Gruppe umfasst Gesteine, die aus Mineralen bestehen, welche in stehenden Gewässern in Form feiner Kristalle infolge von Verdunstung aus übersättigten Lösungen ausfallen, zu Boden sinken und sich dort in Schichten ablagern. Der Begriff 'chemisch' ist jedoch etwas unglücklich gewählt, da das Ausfällen von Kristallen aus wässrigen Lösungen eher ein physikalischer Vorgang ist.

5.3 Sprachelemente der Sedimentgesteine

5.3.1 Schichtung

Das wichtigste gemeinsame Sprachelement aller Sedimentgesteine ist ihre konsequente, meist sehr gut sichtbare Schichtung. Parallele, horizontale Schichten deuten auf eine Ablagerung in stehendem Wasser hin, also in Seen oder Ozeanen (Abb. 3, Abb. 6C1). In bewegtem Wasser wie in Bächen und Flüssen, in Deltas oder an Stränden hingegen entstehen meist schräge, nicht parallele Schichten (Abb. 4, Abb. 6C2,D). Dasselbe gilt auch für die Schichtung bei Windtransport, z. B. in Sanddünen, oder durch die Schwerkraft, z. B. bei einem Bergsturz.

Sedimentgestein, das in einem Ozean entstanden ist, nennt man **marin** ('M' in Abb. 6), ist es in einem See entstanden, nennt man es **limnisch** und ist es auf dem Land entstanden, wird es **terrestrisch** genannt ('T' in Abb. 6). In der Abfolge der Schichten sind Wechsel der Sedimentationsräume (marin/limnisch/terrestrisch) und der Sedimentationsmechanismen (biogen/klastisch/chemisch) aufgezeichnet.

Die Art der Schichtung gibt also bereits grobe Hinweise auf Entstehungsgebiete und -prozesse der Sedimentgesteine. Zusätzliche, wesentliche Sprachelemente ergeben sich aus der Zusammensetzung der Gesteine. Dabei können Komponenten wie Fossilien und Klasten in allen Grössen, Formen und Kombinationen sehr detailliert Auskunft über Herkunft und Entstehung eines Sedimentgesteins geben.



Abb. 3: Horizontale Schichten, die in stehendem Wasser entstanden sind.

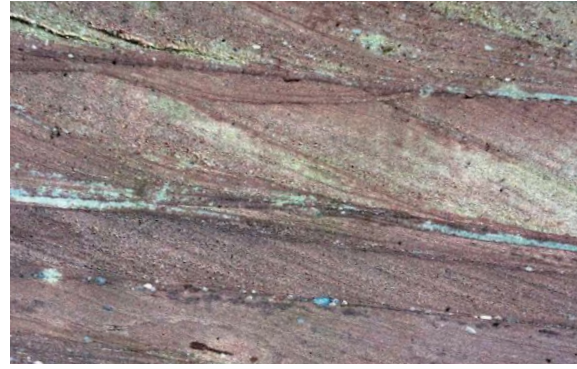


Abb. 4: Schräge Schichten, die in fließendem Wasser entstanden sind (Fließrichtung von links nach rechts).

5.3.2 Fossilien

Die auffälligsten und vielfältigsten Bestandteile von Sedimentgesteinen sind Überreste von Organismen, die unter dem Begriff **Fossilien** zusammengefasst werden (Abb. 5, 7). Überreste mariner Organismen – dabei handelt es sich meist um Schalen von Tieren oder Teile davon – weisen auf Ablagerung im Ozean hin. Diese Organismen sind heute so gut erforscht, dass es möglich ist, ihre Lebensräume bezüglich Klima, Salzgehalt und Wassertiefe einzugrenzen und zu verstehen, unter welchen Bedingungen sie einst lebten. Dies ist unter anderem durch Vergleiche mit heute lebenden Organismen möglich. Dadurch kann die Entwicklung der ozeanischen Lebensräume im Verlauf der Erdgeschichte rekonstruiert werden. So weiss man zum Beispiel, wo früher flache Lagunen oder Riffe lagen und wo sich die tiefen Bereiche der Meere befanden. Vergleiche der Organismen durch alle Erdzeiten hindurch ermöglichen es auch, deren Evolution zu verstehen.

Schichten mit aussergewöhnlich hohen Konzentrationen an Fossilien, die grossenteils zerschlagen sind, weisen auf Sturmereignisse hin, bei welchen grosse Mengen von Organismenschalen durch heftigen Wellenschlag aufgehäuft wurden (Abb. 8).

Während die Überreste mariner Organismen mehrheitlich aus Schalen von Tieren bestehen, die mineralischen Ursprungs sind, blieben auf dem Land hauptsächlich Pflanzenreste erhalten. Diese sind jedoch viel seltener zu finden, da sie meist zersetzt wurden, noch bevor sie von der nächsten Sedimentschicht überdeckt und dadurch konserviert werden konnten. Ausnahmen bilden mächtige Schichten aus Kohle, die aus Pflanzenresten entstanden.

Schon früh fiel den Naturforschern auf, dass gewisse Fossilien immer wieder in denselben Schichten vorkommen. Sie begannen deshalb, die Entwicklung der Erde in Abschnitte, sogenannte **Erdzeiten** zu unterteilen, die durch das erste Auftreten bzw. das Aussterben bestimmter, 'ty-

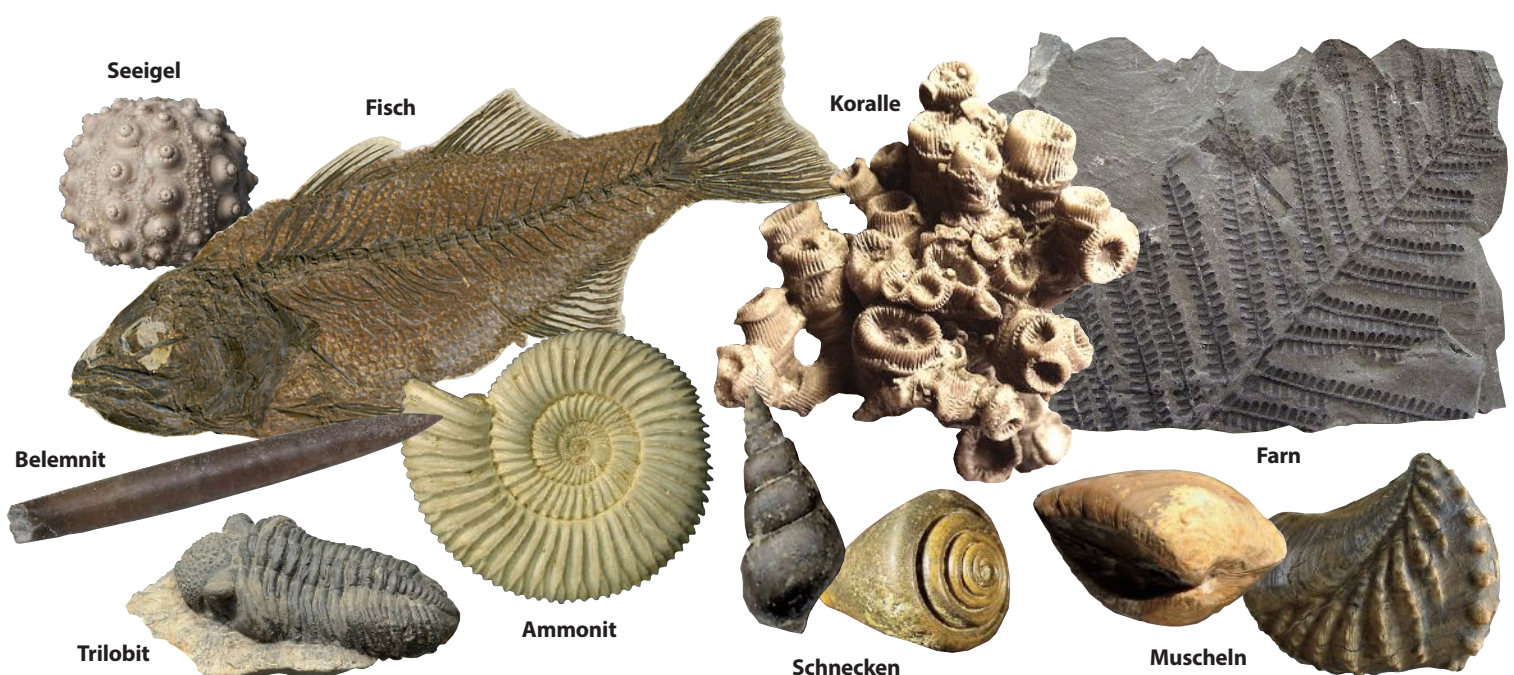


Abb. 5: Auffällige, von Auge gut sichtbare Fossilien (Makrofossilien).

A Erosionsresistenz:

Je weicher ein Gestein ist, desto stärker wird es durch die Verwitterung angegriffen. Dies gilt für alle Gesteine, bei den Sedimentgesteinen lässt sich dies jedoch besonders deutlich beobachten. Schichten, die reich an weichem Ton sind, wittern zurück, währenddem harte Schichten, z. B. aus Kalkstein, hervorstehen.

B Vegetationsbewuchs:

Kalkstein ist vegetationsarm, währenddem tonhaltige Gesteine dichter bewachsen sind. Ton bildet bei der Verwitterung fruchtbaren Boden. Kalkstein hingegen wandelt sich bei der Verwitterung in wasserlösliches $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (Kalziumhydrogenkarbonat) um, das weggespült wird.

C Schichtgrenzen:

- C1** Werden die Sedimente in stehenden Gewässern wie Seen oder Meeren abgelagert, sinken sie langsam ab. Dabei entstehen fast perfekt horizontale Schichten.
- C2** In fließendem Wasser hingegen werden die Sedimentpartikel in schrägem Winkel abgelagert, wodurch die Schichtgrenzen geneigt sind. Dadurch kann die Strömungs- bzw. Schüttungsrichtung festgelegt werden. Oft entstehen dabei auf und innerhalb der Schichten feine Rippeln.
- C3** Besonders raue, unregelmässige Schichtgrenzen mit Löchern sind das Resultat von Erosion oberhalb des Wasserspiegels.

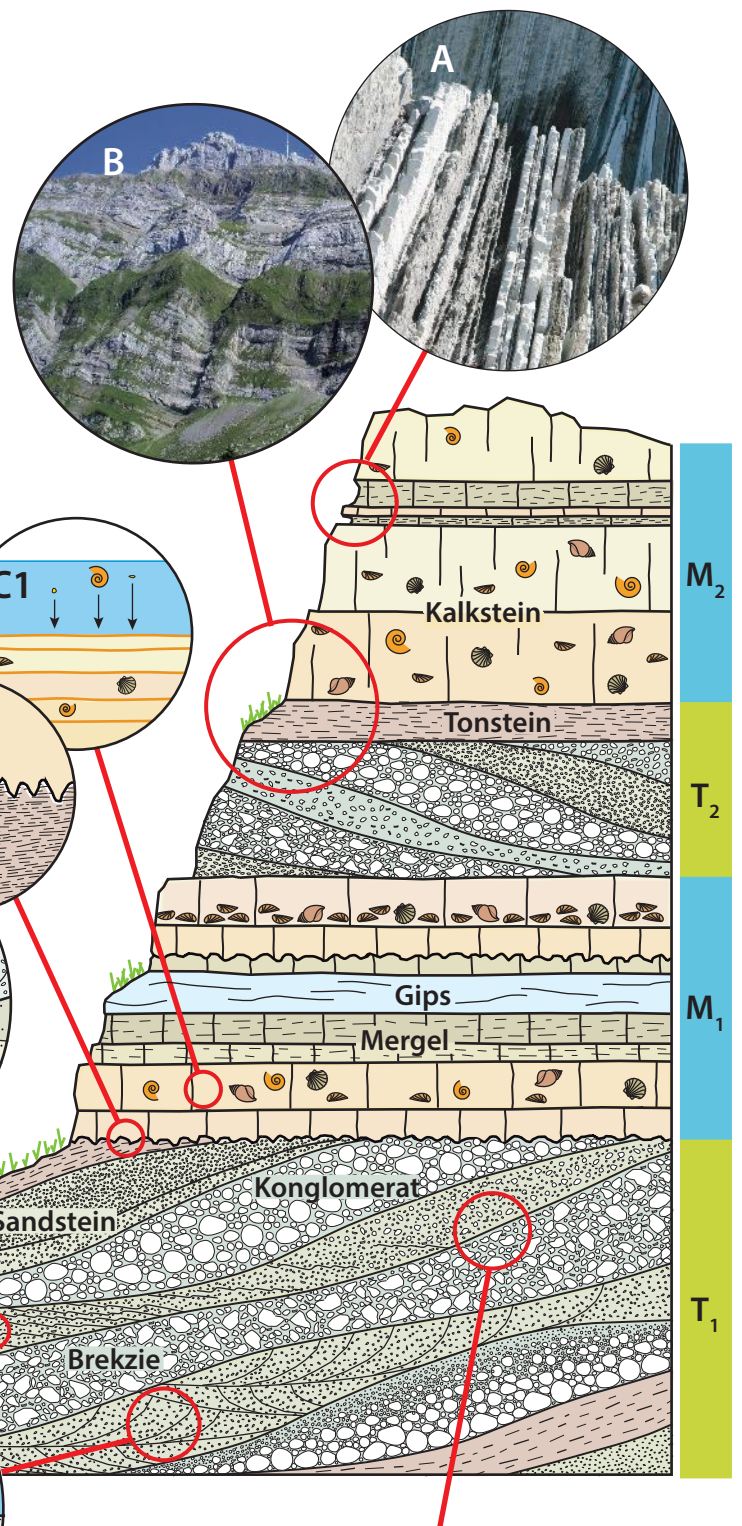
Schnitt durch Rippeln

Schichtoberfläche mit Rippeln

D Wechselnde Schüttungsrichtung:

Wechselt die Schüttungsrichtung mehrfach, änderte das Transportmedium seine Strömungsrichtung. Bei feiner Schichtung (cm bis dm) deutet dies auf Ablagerung unter starkem Einfluss von Ebbe und Flut hin (Wattenmeer). Sind die Schichten mächtig (Meter bis Dekameter) handelt es sich um Sanddünen, die bei wechselnden Windrichtungen abgelagert wurden.

Kreuzschichtung



E

Rundung

Grösse und Sortierung

Varianz

Zusammensetzung

Zunehmende Transportdistanz



E Form, Grösse und Zusammensetzung der Klasten:

- Mit zunehmender Transportdistanz werden die Klasten durch mechanische Einwirkung (Aneinanderschlagen und -reiben) abgerundeter und kleiner.
- Grosse Klasten werden weniger weit transportiert als kleine.
- Gut nach der Grösse sortierte Sedimente haben eine grössere Transportdistanz hinter sich als unsortierte.
- Je geringer die Varianz der Klasten, desto weniger weit wurden sie transportiert, denn mit zunehmender Transportdistanz vermischen sich Klasten aus den verschiedensten Herkunftsgebieten.
- Mit zunehmender Transportdistanz reichern sich die chemisch und mechanisch stabilsten Klasten an, wie z.B. Quarzkörner.
- Oft ist es möglich, anhand der Gesteinstypen, aus welchen die Klasten bestehen, auf deren Herkunftsgebiete zu schliessen.

Abb. 6: Sprachelemente mariner (M) und terrestrischer (T) Sedimentgesteine und dazugehörige Prozesse.



Coccolithophoriden

Foraminiferen

Diatomeen

Radiolarien

Abb. 7: Selbst da, wo von Auge keine Fossilien zu sehen sind, sind die Gesteine nicht so langweilig, wie es auf den ersten Blick erscheinen mag. Unter dem Mikroskop erschliesst sich eine Welt aus Mikrofossilien in der Grösse von 2 µm bis zu ein paar Millimetern.

pischer' Fossilien definiert sind. Daraus entwickelte sich das Konzept der **Leitfossilien**, das es erlaubt, Sedimentschichten über grosse Distanzen hinweg miteinander zu verbinden. Dies macht es möglich, die zeitliche Abfolge von Sedimentschichten selbst über Kontinente hinweg miteinander in Einklang zu bringen, sodass man heute genau weiss, welche Schicht z. B. in den Alpen, den Anden oder dem Himalaja einer bestimmten Erdzeit zugehörig ist.

Damit ein Fossil als Leitfossil taugt, muss es auf der Erde weit verbreitet, also kein Lebensraumspezialist gewesen sein, es darf nur während kurzer Dauer in der Erdgeschichte gelebt haben und es muss in grosser Anzahl vorgekommen sein, so dass es heute leicht zu finden ist.



Abb. 8: Sturmschichten mit Fossiltrümmern.

5.3.3 Klasten

Bestehen die Sedimentgesteine aus Klasten, also aus Ton (<0.002 mm), Silt (0.002-0.063 mm), Sand (0.063-2 mm), Kies (2-63 mm) oder Geröll (> 63 mm), deutet dies zunächst darauf hin, dass bestehendes Gestein durch Verwitterungsprozesse zerkleinert wurde. Die Verwitterungsprodukte, also die Klasten, wurden anschliessend abgetragen, transportiert und an einem anderen Ort abgelagert.

Verwitterung ist nur unter atmosphärischen Bedingungen möglich, wie sie oberhalb des Meeresspiegels herrschen. Werden die Klasten durch Felsstürze, Bäche, Flüsse oder Gletscher zu ihrem Ablagerungsort transportiert, setzt dies

ein Relief mit Höhenunterschieden voraus. Klasten belegen demnach die Existenz ehemaliger Gebirge, die ganz oder teilweise abgetragen wurden.

Transportmedium und Transportdistanz

Form, Grösse und Sortierung der Klasten erlauben Rückschlüsse auf Transportmedium und Transportdistanz (Abb. 6E, 9, 10, 11).

Sind Klasten kantig, waren sie zwischen Abtragung und Ablagerung keiner wesentlichen Abrundung unterworfen.



Abb. 9: Gletscherablagerungen (Moräne) mit kantigen Klasten und auffallend schlechter Sortierung.

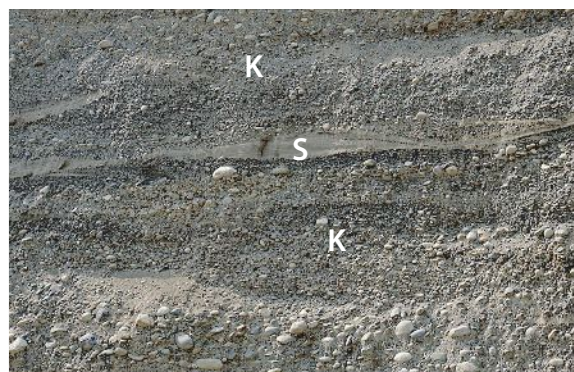
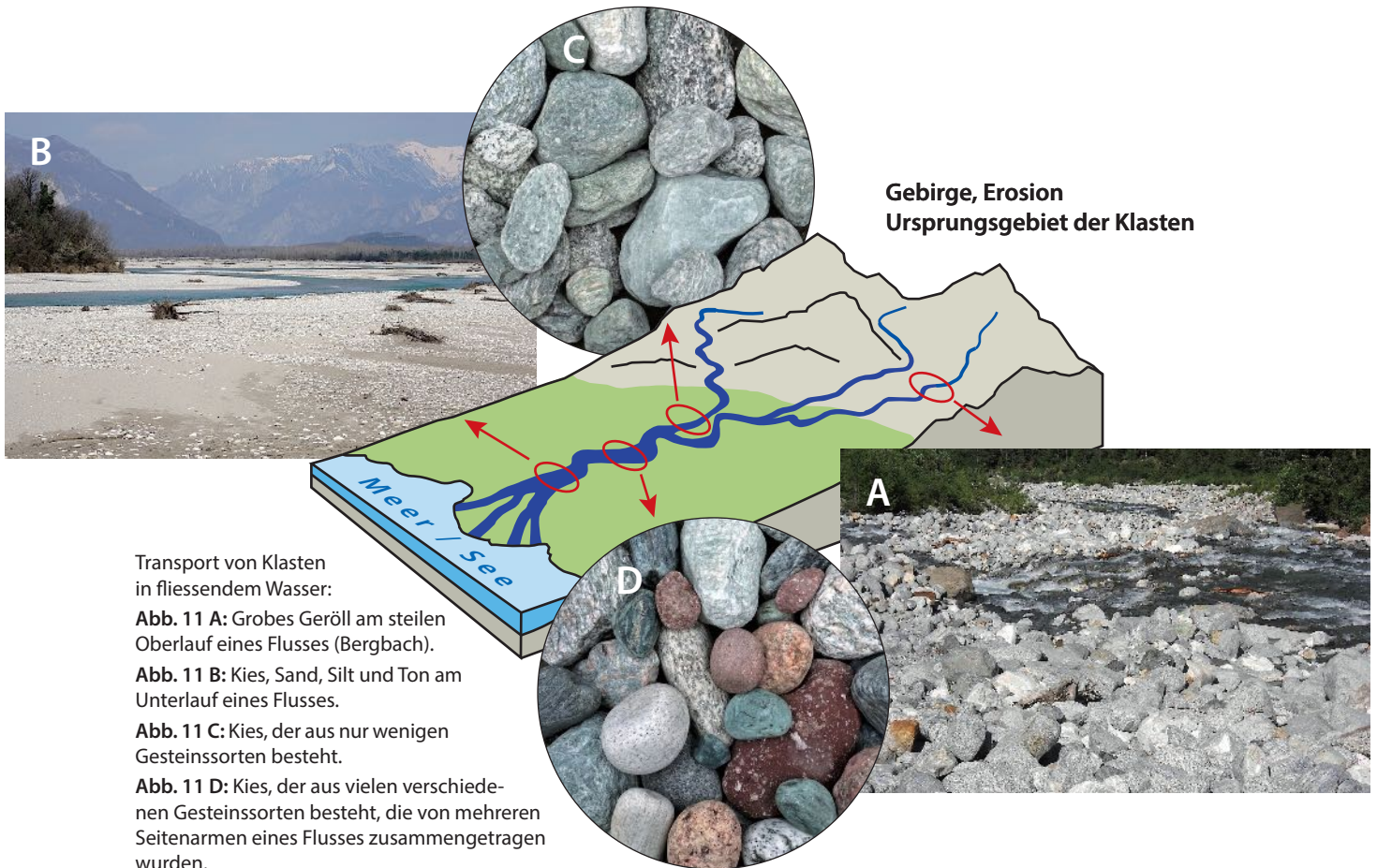


Abb. 10: Gut sortierte, gerundete Klasten einer Flussablagerung. Schichten mit Kies (K) deuten auf grössere Fließgeschwindigkeit hin, Schichten mit Sand (S) auf geringe Fließgeschwindigkeit.



fen. Sie wurden demnach entweder in einem Felssturz oder mit dem Gletschereis transportiert (Abb. 9). Die Ab-
rundung von Klasten hingegen, die in Fließgewässern transportiert werden, nimmt durch Abrasion, also Anein-
anderreiben und -schlagen mit zunehmender Transportdistanz zu (Abb. 10).

Je grösser und schwerer Klasten sind, desto mehr Energie ist für deren Transport im Wasser notwendig (Abb. 1). Ton-
partikel, Sand und Kies werden bereits bei geringer Fließ-
geschwindigkeit mitgetragen, Geröll und grössere Stein-
blöcke hingegen benötigen eine grössere Fließgeschwin-
digkeit. Diese werden deshalb tendenziell nur im steilen,
schnell fließenden Oberlauf von Flüssen transportiert und
abgelagert, währenddem Sand, Ton und Kies weit ins fla-
che Land hinaus getragen werden, wo Flüsse sehr träge
dahinfließen (Abb. 11 A,B). Diese Sortierung nach Korn-
grössen erlaubt es, abzuschätzen, in welcher Art von Ge-
wässer Klasten transportiert wurden und ob sie nahe oder
weit entfernt von ihrem Ursprungsort abgelagert wurden.
Besonders gut sortiert sind die Sandkörner in Sanddünen.
Was gröber ist als ca. 1.5 mm kann vom Wind nur schwer
transportiert werden. Alles, was feiner ist als ca. 0.2 mm
wird vom Wind in höhere Luftschichten getragen, sodass
es sich nicht auf Dünen ablagert.

Bestehen Klasten, die von einem Fließgewässer abgelagert wurden, nur aus wenigen Gesteinssorten, deutet dies

darauf hin, dass sie nicht sehr weit transportiert wurden.
Je weiter ein Fluss fließt, desto mehr Klasten unterschied-
licher Gesteinssorten, die von Nebenarmen hinzu trans-
portiert werden, vermischen sich, wodurch die Anzahl Ge-
steinssorten zunimmt (Abb. 11 C,D). Existieren deren Ur-
sprungsgesteine noch heute, ist es ein leichtes, durch Ver-
gleiche den Ursprung der Klasten herauszufinden.

Mit zunehmender Transportdistanz reichern sich speziell
jene Klasten an, die mechanisch und chemisch besonders
stabil sind.

Ton entsteht entweder durch Zerreiben von Gestein zu ex-
trem feinen Partikeln ($<0.002\text{mm}$) oder durch chemische
Verwitterung. Rötliche Tone sind fast ausschliesslich das
Resultat tropischer Verwitterung und geben damit einen
Hinweis auf das Klima während ihrer Entstehung.

Schüttungsrichtung

Ist das Ursprungsgebiet der Klasten nicht bekannt, zeigt
die Neigung der Schichten zumindest die Schüttungs-
richtung an (Abb. 6 C2). Wechseln sich entgegengesetzte
Schüttungsrichtungen regelmässig ab, sind die Sedi-
mente an einem Strand mit starken Gezeitenströmungen
abgelagert worden (Abb. 6 D).

5.3.4 Spezielle Sprachelemente

Auch feine Rippeln im Sand, Trockenrisse in austrocknen-
dem Lehm, die Einschlüsse von Regentropfen oder Grab-

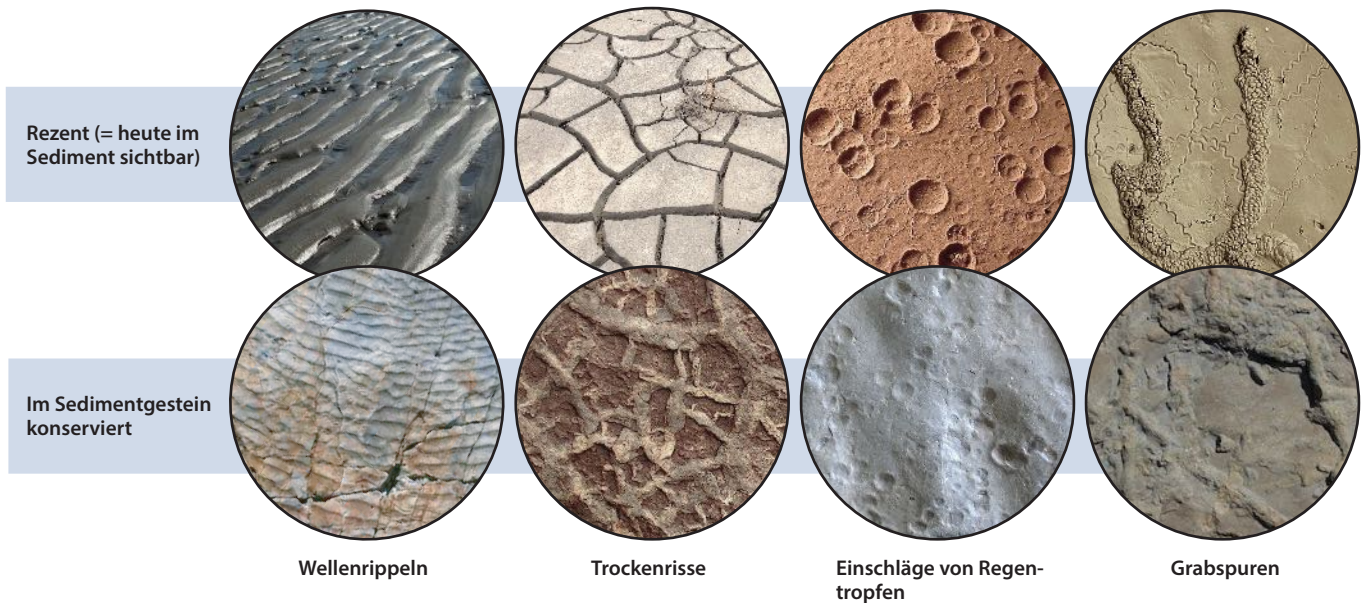


Abb. 12: Rezente (aktuelle) Spuren von Wasser, Trockenheit und Tieren in Sand und Schlick (obere Reihe) und deren zu Stein gewordene Zeugen (untere Reihe).

Spuren von Organismen im Schlamm können auf Schichtoberflächen erhalten bleiben (Abb. 12).

5.3.5 Selbst stumme Gesteine verraten etwas durch ihre Anwesenheit

Die chemischen Sedimente verraten im Detail wenig über die Umstände ihrer Entstehung. In einer gesättigten Salzlösung können kaum Organismen leben, diese Gesteine sind deshalb weitestgehend frei von Fossilien. Sie geben hingegen Hinweise auf wichtige großräumige Prozesse. Verdunstet in einem stehenden Gewässer wie einem See oder Meer so viel Wasser, dass der Gehalt an gelösten Substanzen die Sättigungsgrenze überschreitet und Salze auskristallisieren, deutet dies auf Ursachen hin, die weit über den Ort der Ablagerung hinausreichen:

- Das Gewässer kann höheren Temperaturen ausgesetzt gewesen sein, wodurch die Verdunstungsrate erhöht wurde. Dies kann auf Klimaänderungen hindeuten.
- Über die Zuflüsse des Gewässers kann weniger oder gar kein Süßwasser mehr zugeflossen sein. Dies ist z. B. der Fall, wenn Flüsse ihren Lauf ändern oder neu entstandene Gebirge diesen blockieren. Aktuell trägt auch der Mensch zu solchen Entwicklungen bei, wie im Fall der zunehmenden Austrocknung des Aralsees und des Toten Meeres.
- Ein Teil des Gewässers kann vom Rest abgetrennt worden sein und erhielt dadurch zu wenig Nachschub an frischem Wasser. Vor ca. 6 Millionen Jahren z. B. trocknete das Mittelmeer beinahe vollständig aus, weil sich die Meerenge von Gibraltar schloss und die Wasserzufuhr aus dem Atlantik unterbunden war.

5.4 Die häufigsten Sedimentgesteine

5.4.1 Biogene Sedimentgesteine

Kalkstein

Kalksteine oder vereinfacht Kalke bestehen zu einem großen Teil aus Schalen oder Schalenfragmenten von aquatischen Organismen jeder Größe, von kleinen, einzelligen Mikroorganismen im Submillimeterbereich bis zu großen Schalen z. B. von Muscheln, Schnecken oder Ammoniten. Diese Schalen waren ursprünglich aus chemisch wenig stabilen Formen von Kalziumkarbonat (CaCO_3) aufgebaut. Im Lauf der Diagenese haben sie sich jedoch mehrheitlich in ihre stabilste Form, den Kalzit umgewandelt.

Neben Fossilien bestehen Kalkgesteine auch weit verbreitet aus rundlichen Körnern im Submillimeter- bis Millimeterbereich, sogenannten Ooiden. Dies ist vom altgriechischen Wort 'oon' für 'Ei' abgeleitet, wobei jedes 'O' einzeln ausgesprochen wird, also 'O-o-id'. Gesteine aus Ooiden heißen entsprechend **Oolithe**. 'Lithos' ist das altgriechische Wort für Stein. Ooide entstehen auch heute noch in der Brandung warmer, tropischer Meere durch das Anwachsen konzentrischer Kalzitsäume um kleinste Sandkörner und Schalenfragmente herum (Abb. 13). Dementsprechend werden Oolithe als Indikatoren für warme, tropische Klimate interpretiert. Daneben können Kalksteine auch vielfältige Ausscheidungen im oder auf dem Sediment lebender Organismen enthalten.

Die Schalen größerer Organismen sind von Auge im Gestein gut sichtbar. Die Schalen der Mikroorganismen, die Ooide und die Räume dazwischen sind jedoch aus sehr feinen Kalzitkristallen aufgebaut ($4\text{ }\mu\text{m}$ bis ca. 0.1 mm), die man von Auge nicht einzeln sehen kann. Die große Masse der Kalksteine wirkt deshalb stumpf und glanzlos. Kalksteine sind meist beige, gelblich oder grau. Enthalten sie

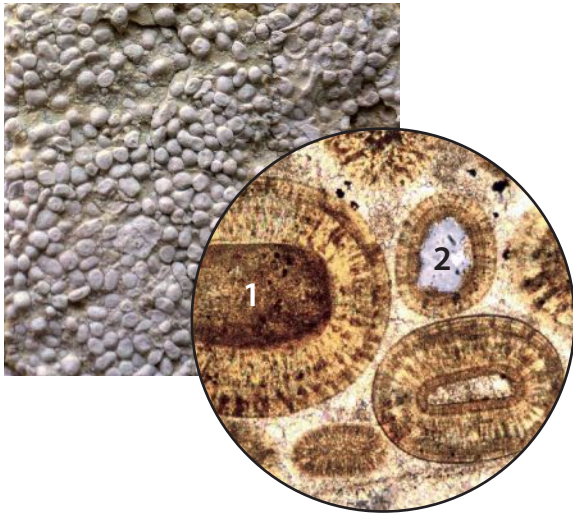


Abb. 13: Ooide von ca. 2 mm Durchmesser. In der Vergrößerung sind die Anwachsäume aus Kalzit zu sehen. 1: Schalentrümmer, 2: Sandkorn im Zentrum des Ooides.

Einlagerungen von Eisenverbindungen, können sie auch braun oder rötlich sein. Die Kalkalpen von Nizza bis Wien und der Jura sind mehrheitlich aus Kalkstein aufgebaut.

Im Ozeanwasser ist die Konzentration von Kalzium (Ca^{2+}) und Karbonat (CO_3^{2-}) so hoch, dass es für die Meeresorganismen in den oberen Wasserschichten ein leichtes ist, Schalen aus Kalziumkarbonat (CaCO_3) zu bilden. In der Tiefe hingegen lösen sich die Schalen wieder auf, da bei hohem Druck und tiefer Temperatur sehr viel Kohlensäure im Wasser gelöst ist, welche die Schalen angreift. Unterhalb der sogenannten **CCD (Carbonate Compensation Depth)** wird alles Kalziumkarbonat aufgelöst. Diese liegt – in Abhängigkeit von den lokalen Bedingungen – zwischen einigen 100 Metern und einigen 1000 Metern Tiefe. Unterhalb der CCD kann kein Kalkstein entstehen (Abb. 14).

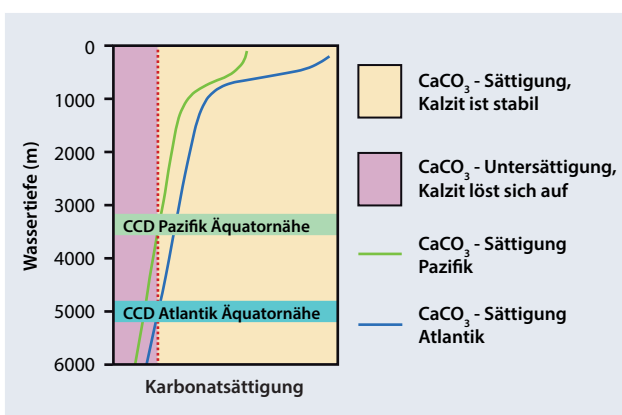


Abb. 14: Karbonatsättigung im Atlantik und im Pazifik in Abhängigkeit von der Wassertiefe. Wo die Sättigungskurven die Grenze zur Untersättigung schneiden (rot gestrichelte Linie), liegt die CCD.

Dolomit

Dolomite können von Auge nicht von Kalksteinen unterschieden werden, sie bestehen jedoch statt aus Kalzit mehrheitlich aus dem Mineral Dolomit. In diesem ist jedes

zweite Kalzium-Atom durch ein Magnesium-Atom ersetzt, seine Formel lautet somit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Die einzige Möglichkeit, Dolomit und Kalkstein auf die Schnelle zu unterscheiden, ist der Salzsäuretest: Ein Tropfen 10%-ige Salzsäure führt auf Kalk zu sofortigem, heftigem Aufschäumen, auf Dolomit jedoch nicht.

Weltweit existieren grosse Mengen von Dolomitgestein. Alleine in den Dolomiten, einem Gebirgsmassiv in den italienischen Alpen, erreichen die Dolomitschichten viele hundert Meter Dicke. Auch im Schweizerischen Nationalpark gibt es viel Dolomit. Die Entstehung von Dolomit ist bisher nicht eindeutig geklärt. Man geht davon aus, dass der überwiegenden Teil davon ehemalige Kalksteine sind, die im Lauf der Diagenese in Dolomit umgewandelt wurden. Neuere Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass Dolomit unter eng begrenzten Bedingungen und unter dem Einfluss von Bakterien auch schon direkt während der Sedimentation entstehen kann.

Radiolarit

Es gibt auch Organismen, welche Hartteile aus Opal bilden (Opal ist amorphes SiO_2 , hat also die gleiche chemische Zusammensetzung wie das Mineral Quarz). Dazu gehören planktonische Mikroorganismen wie Radiolarien (Abb. 7), die hauptsächlich in tropischen Gewässern leben, sowie ein Teil der Schwämme. Diese bildeten in der Vergangenheit Riffe, die vergleichbar sind mit Korallenriffen. Heute gibt es keine grossen Schwammriffe mehr.

Gestein, das mehrheitlich aus Radiolarien und Tonmineralen besteht, wird Radiolarit genannt. In Abhängigkeit der Farbe der Tonminerale ist seine Farbe meist grau bis rotbraun. Da die Löslichkeit von Opal auch in tiefen Wasserschichten gering ist, können Radiolarite überall entstehen, auch unterhalb der CCD. Grosse Mengen von Radiolarit bei gleichzeitiger Abwesenheit von Kalkstein deuten deshalb generell auf Sedimentation in grösseren Wassertiefen hin. Aufgrund lokal unterschiedlich tiefer und auch im Lauf der Erdgeschichte schwankender CCD lässt sich jedoch keine genaue Tiefenangabe machen (Abb. 14, 15).

Feuerstein (Flint, Chert)

Feuersteinknollen treten in Kalkstein auf und bestehen aus reinem amorphem SiO_2 . Die Farben variieren von schwarz, über grau, braun, rötlich bis gelblich. Man geht davon aus, dass das SiO_2 von fossilen Schwämmen und Radiolarien stammt und sich im Lauf der Diagenese in knolligen Gebilden anreicherte.

Feuerstein war neben Obsidian (Kap. 4.5) einer der wichtigsten Rohstoffe in der frühen Entwicklung der Menschheit. Bearbeitete Splitter von Feuersteinen dienten in der Steinzeit als Werkzeuge. Bis ins 19. Jahrhundert wurde Feuerstein zusammen mit Pyrit (Kap. 2, Abb. 8) zum Schlagen von Funken verwendet, daher auch sein Name.

Kohle

Die Kohlelagerstätten, die noch heute zur Produktion von Energie ausgebeutet werden, sind Überbleibsel grosser

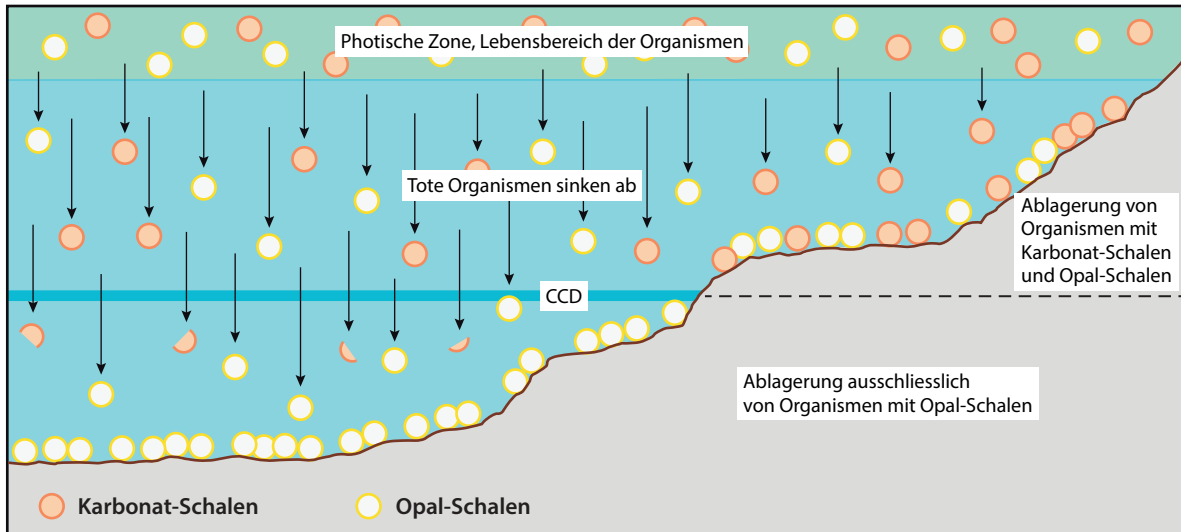


Abb. 15: Modell der Sedimentation von Organismen mit Karbonat- und Opalschalen ober- und unterhalb der CCD (siehe auch Abb. 14).

Mengen pflanzlichen Materials, das sich vorwiegend in Mooren und Sümpfen abgelagerte. Der Prozess der Kohlebildung heisst **Inkohlung**. Dabei reichert sich aus pflanzlichen Überresten reiner mineralischer Kohlenstoff an, währenddem die anderen Bestandteile wie Wasserstoff und Sauerstoff in Form von Wasser, CH_4 (Methangas) und CO_2 (Kohlenstoffdioxid) freigesetzt wurden. Der Inkohlungsprozess läuft in mehreren Stufen ab. Zuerst entsteht Torf durch die Aktivität von Mikroorganismen unter weitgehendem Ausschluss von Sauerstoff. Dieser Prozess kann auch heute in Mooren beobachtet werden. Durch die Überlast immer neuer, darüber abgelagerter Schichten war der Torf zunehmendem Druck und zunehmender Temperatur ausgesetzt, wodurch komplexe, bisher nicht vollständig verstandene geochemische Prozesse einsetzten. Dadurch entstanden in einer nächsten Stufe Braunkohle, danach Steinkohle und zum Schluss Anthrazit, der aus nahezu 100% Kohlenstoff besteht.

5.4.2 Klastische Sedimentgesteine

Sandstein

Gesteine, die mehrheitlich aus Sandkörnern bestehen, sind Sandsteine. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Körner gerundet oder kantig sind. Sandsteine können sowohl in fließendem Wasser als auch durch Wind abgelagert werden. Ein grosser Teil der Sandkörner besteht in der Regel aus Quarz. Als sehr häufiges und physikalisch sowie chemisch äusserst stabiles Mineral hat Quarz die besten Chancen, Verwitterung und Transport in grosser Menge zu überstehen. Es kommen aber auch verschiedene andere Minerale vor, dies hängt hauptsächlich von Herkunftsgebiet und Transportdistanz ab. Die Körner sind durch verschiedene Minerale, die während der Diagenese in ihren Zwischenräumen wachsen, miteinander verbunden. Man spricht dabei von 'zementieren' bzw. 'Zementation' (Abb. 2). Sandsteine können grau, grünlich, gelblich, bläulich, braun oder rot sein. Da sie zu einem grossen Teil aus farblosem

oder weissem Quarz bestehen, wird ihre Farbe hauptsächlich von jenen Mineralen bestimmt, welche die Sandkörner zementieren. Eisenhaltige Minerale z. B. führen zu einer intensiven Rot- oder Braunfärbung des Sandsteins.

Konglomerat

Bestehen Sedimentgesteine mehrheitlich aus gerundetem Kies und Geröll mit einem Durchmesser von 1 bis ca. 20 cm, werden sie Konglomerate oder in der Schweiz auch Nagelfluh genannt. Die Räume zwischen den Geröllen sind mit feinerem, meist sandigem Material aufgefüllt.

Brekzie

Gesteine, die mehrheitlich kantige Klasten mit einer Korngrösse von über 1 cm Durchmesser enthalten, heissen Brekzien. Auch bei den Brekzien besteht die Matrix meist aus feinerem, sandigem Material. Die kantigen Komponenten deuten auf eine geringe Transportdistanz der Klasten hin.

Tongestein

Besteht ein Gestein zum grössten Teil aus Tonmineralen, wird es Tongestein oder vereinfacht Ton genannt. Tonminerale sind extrem klein ($< 0.002\text{mm}$) und von Auge nicht erkennbar, die Gesteine wirken deshalb monoton. Reine Tone sind hellgrau oder bräunlich. Durch die Einlagerung von Fremdstoffen können sie jedoch auch schwarz, rot oder grünlich sein. Auch die Härte von Tongesteinen ist sehr unterschiedlich. Wenig verfestigte Tone sind sehr weich und können leicht mit den Fingernägeln abgekratzt werden, stark verfestigte Tone können jedoch sehr widerstandsfähig sein. Da Tonminerale plättchenförmig sind und sich schon nur bei Kompression durch darüber liegende Schichten parallel einregeln, entstehen Gesteine mit schiefbrigem Aussehen, die sich leicht in dünne Platten spalten lassen, woran man sie auch gut erkennt. Früher nannte man solche Gesteine Tonschiefer. In den Schulen wurde noch zu Beginn des 20. Jh. mit Kreide auf solche

Schiefertafeln geschrieben. Der Begriff 'Schiefer' sollte jedoch aus wissenschaftlicher Sicht nur für metamorphe Gesteine verwendet werden (Kap. 6).

Tongesteine bilden kaum Felswände, sondern vielmehr sanfte Hügel. Da aus Ton sehr fruchtbarer Boden entsteht, wächst darauf oft dichte Vegetation, sodass man ihn im Gelände kaum erkennt. Tone und tonreiche Gesteine machen jedoch weltweit ca. 80% aller Sedimentgesteine aus.

Mergel

Mergel sind Mischgesteine aus Ton und Kalk, die sich optisch kaum von den Kalksteinen unterscheiden. Sie sind jedoch weicher als Kalksteine, und nicht sehr erosionsresistent. Ton kann Wasser aufnehmen, dadurch quillt das Gestein auf und bildet beim Trocknen Risse. Im Winter gefriert das Wasser im Ton und dehnt sich aus, wobei der Mergel zerbricht. In einer Felswand aus Mergel und Kalkstein stehen die harten Kalkschichten deshalb hervor, während die Mergelschichten tief hinein wittern.

5.4.3 Chemische Sedimentgesteine

Gesteine, die bei der Verdunstung, also der Evaporation von Wasser entstehen, heißen **Evaporite** (engl. evaporation = Verdunstung). Verdunstet Meerwasser, kristallisieren nicht alle gelösten Salze gleichzeitig aus, es bildet sich eine charakteristische Abfolge. Ist 70% des Wassers verdunstet, wird **Gips** (Kalziumsulfat, CaSO_4) ausgefällt und bei 89% folgt **Steinsalz** (Natriumchlorid, NaCl). Diese beiden Salze sind in grosser Menge gelöst im Wasser vorhanden und können deshalb mächtige Schichten bilden. Zuletzt folgen Kalium- und Magnesiumsalze in geringeren Mengen. Besteht eine Evaporitschicht nur aus Gips, deutet dies auf eine unvollständige Verdunstung des vorhandenen Wassers hin, eine komplette Abfolge aller Salze hingegen zeigt, dass ein Gewässer vollständig ausgetrocknet gewesen sein muss. Gips und Steinsalz sind weiss, können durch Beimengungen von Eisenoxid jedoch auch rötlich gefärbt sein.



Abb. 16: Eine Auswahl an Sedimentgesteinen.

5.5 Schichtabfolgen sind wie offene Bücher

In einer Abfolge von Schichten sind die Wechsel der Sedimentationsmechanismen und Sedimentationsräume aufgezeichnet. Nachdem wir nun einige wichtige Sedimentgesteine sowie die Prozesse kennen, die an ihrer Entstehung beteiligt sind, ist es möglich, eine ganze Schichtabfolge wie ein Buch zu lesen.

Die Schichtabfolge in Abb. 17 zeigt einen Wechsel zwischen terrestrischen Sedimenten (T) und marinen Sedimenten (M). Die unterste terrestrische Schichtserie T_1 besteht wechselweise aus Tongesteinen, Sandsteinen, Konglomeraten und Brekzien. Die schräge Schichtung und die vorwiegend gute Rundung der Klasten deuten auf Sedimentation im Unterlauf eines Fließgewässers hin, vermutlich in einem Flussdelta. Speziell charakteristisch dafür ist eine Schicht mit entgegengesetzten Schüttungsrichtungen, welche durch Ebbe- und Flutstömungen am Übergang zum Meer entstand (vgl. Abb. 6D). Die Ablagerung von Ton, Sand und Kies zeigt, dass die Fließgeschwindigkeit des Flusses variabel gewesen sein muss. Langsames Fließen mit der Ablagerung von Ton und Sand fand in Perioden mit Niedrigwasser statt. Kies hingegen wurde während Hochwasserperioden abgelagert, wobei eine Schicht von einem Meter Mächtigkeit innerhalb von Stunden sedimentiert werden kann. Eine Schicht mit Brekzien weist darauf hin, dass eine Gerölllawine mit eckigen Klasten in den Fluss gelangte, die nicht weit genug transportiert wurden, um vollständig abgerundet zu werden.

Die darauf folgende marine Schichtserie M_1 weist auf einen radikalen Wechsel der Ablagerungsmechanismen hin: Der Meeresspiegel stieg an und das vormalige Flussdelta wurde zu einer wenig tiefen Lagune. Darin lebten marine Organismen, deren Schalen im Laufe der Zeit Schichten aus Kalkstein bildeten. Man geht davon aus, dass die Ablagerung eines Meters Kalkstein etwa eine Million Jahre benötigt. Das sind also ganz andere Zeiträume als bei den terrestrischen Sedimenten. Die Basis der obersten Kalksteinschicht von M_1 weist eine aussergewöhnlich hohe Konzentration an Fossilien auf, die vermutlich bei hohem Wellengang angehäuft wurden.

Der Fluss existierte während M_1 immer noch. Seine groben Klasten lagerte er nun weiter im Landesinneren ab, wo vielleicht ein neues Flussdelta entstanden war. Tonminerale aber gelangten bei Hochwasser bis ins Meer, wo sie sich mit den Kalkablagerungen mischten und Mergel bildeten. Eine Gipsschicht weist darauf hin, dass das Meer danach kurzzeitig austrocknete. Eine raue, löchrige Schichtgrenze (C3 in Abb. 6) ist das Resultat von Erosion. Das Meer hat sich demnach für unbestimmte Zeit vollständig zurückgezogen, die Sedimente wurden zu einer neuen Landoberfläche und verwitterten. Wie viele Schichten dadurch zerstört und für immer aus dem geologischen Archiv entfernt wurden, ist in solchen Fällen meist ungewiss.

Die terrestrische Schichtserie T_2 zeigt ähnliche Charakteristiken wie T_1 , aber mit entgegengesetzter Schüttungsrichtung.

Es zog sich nicht nur das Meer von Neuem zurück und machte Platz für ein Flussdelta, es lagerte auch ein neuer Fluss aus einer anderen Richtung seine Sedimente ab. Vermutlich hatte sich in der Zwischenzeit das Relief der Erdoberfläche verändert, weil ein neues Gebirge mit neuen Flüssen entstanden war. Die marine Schichtserie M_2 schliesslich ist Zeuge eines weiteren Meeresspiegelanstiegs mit der Sedimentation von Kalksteinen und Mergeln.

5.6 Meeresspiegelschwankungen

Gewisse Sedimente können nur unter Wasser entstehen, andere nur auf dem Land. Meeresspiegelanstiege und -absenkungen von einigen Metern bis weit über 100 Meter spielen deshalb eine zentrale Rolle bei der Entstehung von Schichtstapeln aus Sedimentgesteinen.

Meeresspiegelschwankungen können absolut sein, d. h. der Meeresspiegel hebt oder senkt sich auf der ganzen Erde, oder sie können relativ sein. Absolute Meeresspiegelschwankungen werden unter anderem durch Eiszeiten ausgelöst. Ist viel Wasser als Eis auf der Erdoberfläche gespeichert, fehlt es in den Meeren. Auch Änderungen des Ozeanbeckenvolumens infolge tektonischer Aktivitäten (Kap. 4) führen zu absoluten Meeresspiegelschwankungen. Relative Meeresspiegelschwankungen hingegen sind das Resultat lokaler Hebungen oder Senkungen einzelner Kontinente oder von Teilen davon.

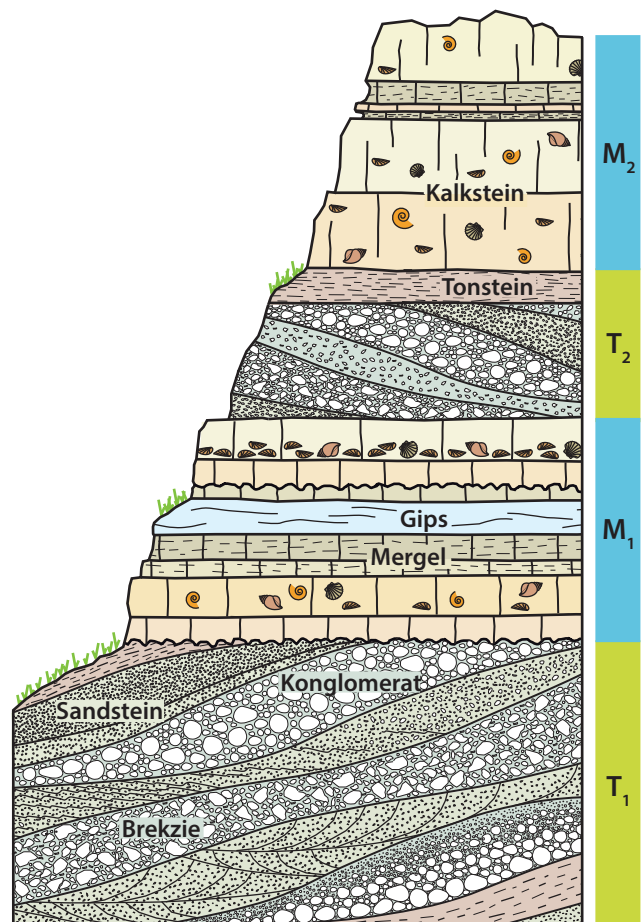


Abb. 17: Sedimentäre Schichtabfolge (entspr. Abb. 6).