

IG - LEHM

GEOLOGISCHE WANDERUNG

---

# Zu den Ursprüngen des Lehms

---



## **Greina Hochebene, GR-TI**

Begleitinformationen zur Exkursion

ROY FREEMAN

25.-26. Juli, 2014

Menschen können vielen wunderbare Dinge herstellen, Ton aber nicht!

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung: der Ton des Lehms</b>	<b>2</b>
1.1 Themen . . . . .	2
1.2 Das Wichtigste in Kürze . . . . .	2
<b>2 Ton und Tonminerale</b>	<b>3</b>
2.1 Das Wichtigste in Kürze . . . . .	3
2.2 Struktur der Tonminerale . . . . .	3
2.3 Tonminerale Gruppen . . . . .	8
<b>3 Mergel und Ton, Mergelstein und Tongestein</b>	<b>9</b>
3.1 Entstehung von Mergel und Ton . . . . .	9
3.2 Mergel und Mergelstein . . . . .	10
3.3 Ton und Tonstein . . . . .	10
3.4 Lehm und Lehmstein . . . . .	11
<b>4 Schiefer-Gesteine und Schieferung</b>	<b>11</b>
4.1 Schieferung («cleavage» auf Englisch) . . . . .	13
4.2 Schiefergesteine . . . . .	13
4.3 Transport . . . . .	14
4.4 Ionenradii . . . . .	15
<b>5 Der alpine Gebirgsaufbau</b>	<b>17</b>
5.1 Orogenese, plattentektonischer Ozean- und Gebirgsbau . . . . .	18
<b>6 Profile - Querschnitte</b>	<b>21</b>
6.1 Alpenbau . . . . .	21
<b>7 Ein kleiner Gesteins- und Mineralienführer</b>	<b>24</b>
7.1 Granit . . . . .	24
7.2 Granit und Wärme – Radioaktivität . . . . .	25
7.3 Fraktionierte Kristallisation = Erstarrungs (Auskrystallisations) Reihe . . . . .	25
7.4 Gneis . . . . .	27
7.4.1 Augengneis . . . . .	27
7.5 Amphibolit . . . . .	27
7.6 Der «Altkristallin» (Erstfelder Gneis) . . . . .	27
7.7 Zirkon . . . . .	28
7.8 Rauhacke . . . . .	29
7.9 Pegmatit . . . . .	29
<b>8 Greina - Wasser, Energiepolitik, und das Volk</b>	<b>30</b>
8.1 Prolog . . . . .	30
8.2 Szene 1: Energiebedarf und Geldgier . . . . .	31
8.3 Szene 2: Kunst und die Menschen . . . . .	31
8.4 Szene 3: Rauhacke als Retter . . . . .	32
<b>9 Glossar einiger geologischer Begriffe</b>	<b>33</b>
<b>10 Literatur</b>	<b>36</b>

### «Weich schlägt hart»<sup>1</sup>

Der Fluss «Rein da Somvitg» fliesst durch die Rauhacke (siehe Glossar 9 und 7.8), ein weiches Gestein das als Trennschicht zweier Decken eine wichtige Rolle beim Bau der Alpen gespielt hat. Der Erhalt der Hochebene gegenüber den Plänen, sie für Stromproduktion aufzustauen, ist verschiedenen Faktoren zu verdanken, dem Engagement einiger Leute, vor allem der Künstler Bryan Thurston und der Fotograf Herbert Maeder, der Schweizerischen Greina-Stiftung, den Gesetzen über internationale Wasserscheiden, dem Schweizer Volk,<sup>2</sup> aber vielleicht am Ende vor allem der Rauhacke, dem Gestein das uns durch die Greina begleiten wird. Mehr dazu während einer Pause beim Passo della Greina! (siehe auch Kap. 8.4).

## 1 Einführung: der Ton des Lehms

### 1.1 Themen

1. Tonmineralien und deren Entstehung
2. Eine kleine Gesteinslehre
3. Die Entstehung der Zentralalpen
4. Die Greina Hochebene

### 1.2 Das Wichtigste in Kürze

1. Lehm ist eine sehr feinkörnig Sediment, der viel Ton enthält.<sup>3</sup>
2. Ton ist eine Familie von Mineralien, eine «Schicht-Silikat».
3. Ton entsteht hauptsächlich als Verwitterung und Umwandlungsprodukt von Granit und vulkanische Asch.

---

<sup>1</sup>Diese Version des Skriptes ist dank der fließigen Korrekturarbeit von Christian Schreiber erheblich lesbarer geworden, befreit von vielen deutschen Grammatikfehler! Selbstverständlich bin ich für alle restlich noch bestehenden und neueingeschlichenen Fehlern allein verantwortlich!

<sup>2</sup>In einer Fakultative Referendum «Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer» vom 17.05.1992 66% des Schweizer Volks haben «Ja» gestimmt.

<sup>3</sup>Ich werde hier Lehm als Ton betrachte. Wenn ich ein Wort, die etwas anders bedeutet als bei der gewöhnliche IG Lehm Gebrauch, bitte mich darüber aufmerksam machen!

## 2 Ton und Tonminerale

### 2.1 Das Wichtigste in Kürze

1. Einzelne Tonteilchen sind extrem klein (Korngrösse  $< 2\mu$ ) d.h. kleiner als ein tausendstel Millimeter und nur mit Röntgenstrahl oder Rasterelektronenmikroskopen (SEM) zu erkennen.
2. Ton ist eine Familie von Mineralien. Tonminerale sind «Phyllosilikate», d. h. sie bestehen aus Schichten von Silizium und Sauerstoff Atomen. Andere positiv geladenen Ionen (Kationen), zum Beispiel Aluminium, Magnesium und Eisen können sich für Si substituieren.<sup>4</sup>
3. Ton entsteht als Verwitterungs- und Umwandlungs-Produkt von anderen Schichtsilikaten, vor allem von Feldspäten in Granit (siehe Kap. 7.1 und das Glossar) und vulkanischer Asche unter Vorhandensein von Wasser. Diese Tonminerale sind werden dann meistens von Bächen und Flüssen ins Meer als detritische (d. h. sedimentäre) Teilchen transportiert.
4. Es gibt vier Hauptgruppen der Tonminerale: Illit (häufigste Tonminerale), Kaolin, Chlorit und Montmorillonite+Smektit+Saponit. Die ersten drei Gruppen entstehen hauptsächlich aus der Verwitterung (chemisch und mechanisch) von granitischen Gesteinen. Die Häufigkeit dieser Tongruppe widerspiegelt die Art von Verwitterungsprozesse und herrschende Klima beim Muttergestein (siehe Kap. 4.3). Die vierte Gruppe entsteht aus vulkanischer Asche oder Lava (Basalt), die letzten meistens unter dem Meeresspiegel.
  - (a) Feldspat und Glimmer (aus Granit und Gneis), mechanische Verwitterungsprozesse, grosse Höhen, gemässigt Klima → Illit
  - (b) Feldspat (aus Granit und Gneis) + chemische Verwitterungsprozesse, tropische Klima, mittel Breiten → Kaolin
  - (c) Serpentin (aus Basalt) physische Verwitterungsprozesse, hohe Breiten → Chlorit
  - (d) Asche (subarisch) und Basalte (tiefsee) → Montmorillonite, Smektit, Saponit
5. Die Fähigkeit, Wassermoleküle in der Zwischenschicht (siehe Abb. 2.6b und Abb. 2.7) aufzunehmen, gibt Tonminerale die Eigenschaft von Quellung, das heisst, Wasser aufzunehmen und zu expandieren, und wenn trocken, reversibel Wasser zu verlieren und sich dann zusammenzuziehen.

### 2.2 Struktur der Tonminerale

Tonminerale bestehen aus zwei charakteristischen Bauelementen:

- Tetraederschicht: eckenverknüpfte  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder, zum Teil Si substituiert durch Al
- Oktaederschicht: kantenverknüpfte  $\text{AlO}_6$ -Oktaeder, zum Teil Al substituiert durch Mg.

---

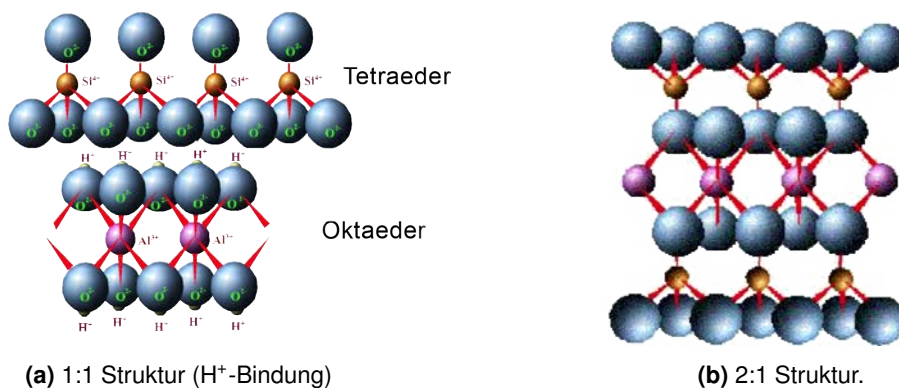
<sup>4</sup>Die Möglichkeit substituieren zu können, hängt von der Ionenradien ab. Siehe 4.4.



**Abbildung 2.1** Oktaedrische und Tetraedrische Kristallformen

- Jeder Silizium Tetraeder teilt 3 seiner Sauerstoff-Ecke-Atomen mit anderen Tetraedern. Das vierten Eck-Atom ist nicht mit anderen Tetraedern geteilt. Alle Tetraeder «zeigen sich» in der gleichen Richtung; das heisst, alle nicht geteilten Ecken liegen auf der gleichen Seite der Schicht.

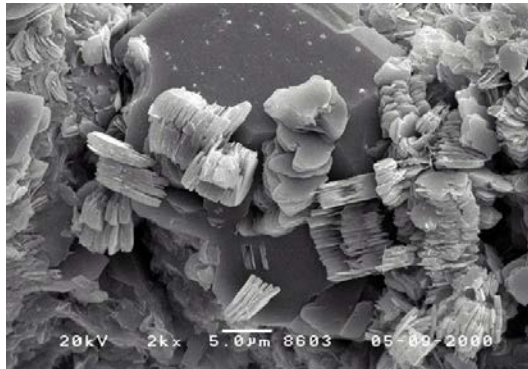
Die zwei Schichten verknüpfen sich zusammen und bauen ein hexagonales Gitter (Muster, Anordnung) in zweidimensionalen Schichten auf.<sup>5</sup> Durch die Substitution von Kationen (positiv geladenen Ionen, zum Beispiel von  $\text{Si}^{4+}$  durch  $\text{Al}^{3+}$  in der Tetraederschicht oder von  $\text{Al}^{3+}$  durch  $\text{Mg}^{2+}$  in der Oktaederschicht) entsteht eine negative Schichtladung, die durch die Einlagerung von Kationen<sup>6</sup> in der Zwischenschicht neutralisiert wird. Die Schichtladung der 1:1-Tonmineralien ist stets Null.



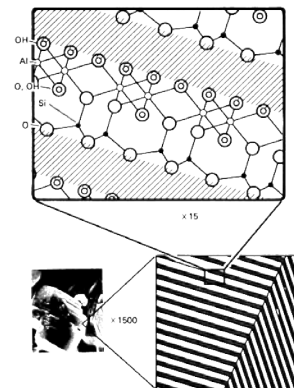
**Abbildung 2.2** 1:1 und 2:1 Tonmineralstruktur. (Figuren modifiziert von Washington State University, *Clay Minerals - Classes*)

<sup>5</sup>(Diese Struktur ist sehr ähnlich der grösseren Schichtsilikate: Dunkelglimmer (Biotit), und Hellglimmer (Muskovit), die wir in Granit finden.)

<sup>6</sup>Kationen sind positiv geladene Ionen wie Silizium ( $\text{Si}^{4+}$ ). Anionen sind negativ geladene Ionen wie Sauerstoff ( $\text{O}^{2-}$ ).

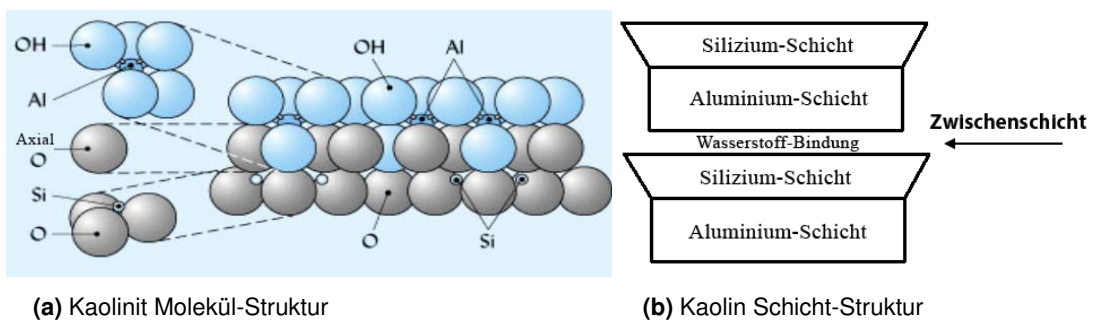


(a) Kaolinit, Raster-Elektronen-Mikroskop Bild ( $\mu\text{m}$  = Mikrometer).



(b) Kaolin Struktur

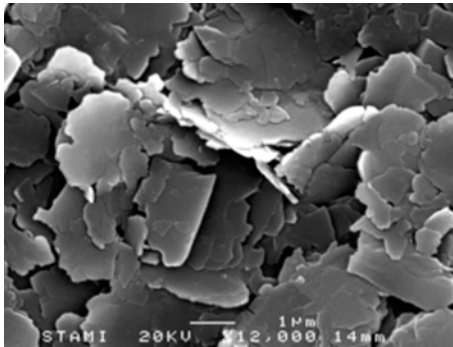
**Abbildung 2.3** Struktur von Kaolinit, ein 1:1 Tonmineral



(a) Kaolinit Molekül-Struktur

(b) Kaolin Schicht-Struktur

**Abbildung 2.4** Kristallstruktur von Kaolinit, ein 1:1 Tonmineral. Die Schichtladung von Kaolin ist neutral. Kaolinit expandiert (quellt) nicht wenn nass.

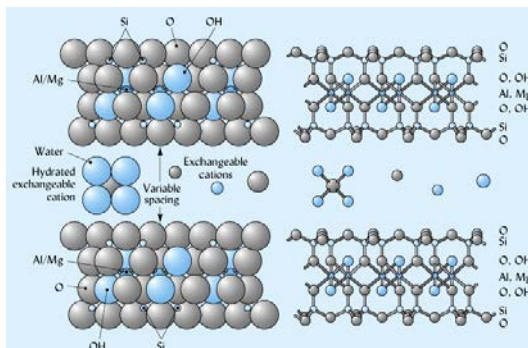


(a) Illit, Raster-Elektronen-Mikroskop Bild ( $\mu\text{m}$  = Mikrometer).

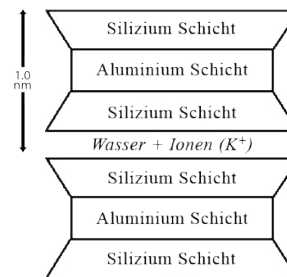


(b) Montmorillonit, Raster-Elektronen-Mikroskop Bild ( $\mu\text{m}$  = Mikrometer).

**Abbildung 2.5** Illit und Montmorillonite, 2:1 Tonminerale



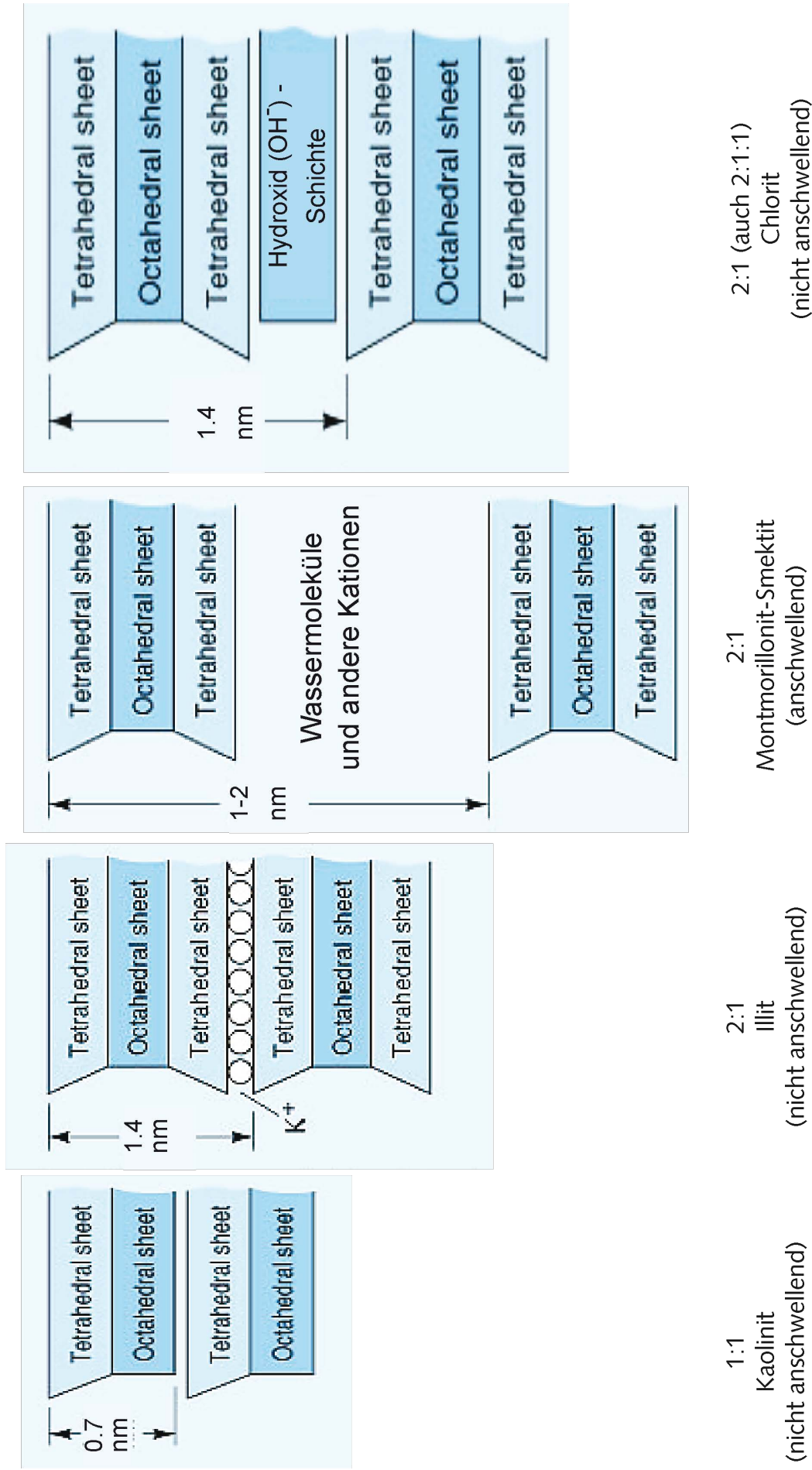
(a) Illit Molekül-Struktur



(b) Kaolin Schicht-Struktur

**Abbildung 2.6** Kristallstruktur von Illit, ein 2:1 Tonmineral.

# Ton-Familie



**Abbildung 2.7** Es gibt noch andere Tongruppe, zum Beispiel, Vermikulit, eine 2:1 (:1) Gruppe, einige Mitglieder aufquellend, andere nicht aufquellend. Die «Zwischenschicht» ist jeweils die variablen Schicht zwischen den TO oder TOT «Sandwichen». Ähnlich bei der Montmorillonit-Smektit-Gruppe ist die Zwischenschicht 1.0 – 1.5 nm breit und mit  $Mg^{2+}$  und andere Ionen belegt. Quelle dieser Abbildung: «Clay Minerals - Classes» (Washington State University).



## 2.3 Tonminerale Gruppen

**Kaolinit Gruppe (1:1, Zweischicht-Tonminerale)** Tetraederschicht-Oktaederschicht (TO), zum Beispiel Kaolinit, Dickit, Nakrit, and Halloysit, auch oder Chrysotil, Serpentin.

Entsteht aus Verwitterung und Umwandlung von Orthoklas (ein Feldspat Mineral, wichtige Komponente in Granit, siehe Kapitel 7.1). Es gibt kein Zwischenschichtmaterial ausser  $H_2O$ . (Kaolin ist das Tonmineral in Porzellankeramik.)

Kaolin entsteht meistens in warmen, tropischen, und mittleren Breitengraden, da mehr Silizium aus den Kristallchen ausgelaugt werden als bei kalten Temperaturen.

**Illit Gruppe (2:1, Dreischicht-Tonminerale)** Tetraeder-Oktaeder-Tetraederschicht (TOT).

Die Zwischenschicht ist oft mit  $K^+$ -Ionen belegt. Illit ist das häufigste Tonmineral (mehr als 50%). Illit ist stabiler als die Glimmer-Mineralien und entsteht meistens durch mechanische (statt chemische) Verwitterungsprozesse.

Bemerkung zu Wasser: Wasser ist ein stark polares Molekül, das heisst, obwohl das Molekül keine Ladung hat ( $O^{2-} + H^{1+} + H^{1+} = \text{Ladung } 0$ ) besteht die Geometrie der Protonen (Wasserstoffionen) aus einer positiv geladenen Seite und einer negativ geladenen Seite, so dass die Wassermoleküle von der Zwischenschicht angezogen werden und dann dort fest sitzen bleiben.

**Montmorillonit-Smektit-Gruppe (2:1)** inklusiv Bentonit (siehe 3.3, von NAGRA als Endlager für radioaktives Material bevorzugt) und Saponit. Die Zwischenschicht ist hier meistens von  $Na^+$  und/oder  $Ca^+$  Kationen belegt. Saponit enthält  $Mg_2^+$  oder  $Fe_3^+$ .

Tonminerale aus der Smektit-Gruppe haben oft einen Ursprung als Umwandlungsprodukte von basaltischen (mafischen) vulkanischen (eruptiven) Gesteinen, reich in Ca und Mg. Diese können oberirdischen Ursprungs sein oder von Vulkanen tief unter dem Meeresspiegel stammen. Die Zwischenschichten dieser Tonminerale enthalten ein- und zweiwertige Kationen wie  $Na^+$  und  $Ca^{++}$  (schwacher Bindungskraft) und haben hohes Quell- (Anschwellungs-) Potential.

**Chlorit-Gruppe (2:1:1, Vierschicht-Tonminerale)** Tetraederschicht-Oktaederschicht-

Tetraederschicht-Oktaederschicht (TOTO), zum Beispiel Chlorit. Diese Gruppe umfasst ein breites Spektrum von ähnlichen Mineralien mit viele verschiedenen chemischen Zusammensetzungen.

Chlorit ist ein häufiges Mineral in schwach-metamorphen Gesteinen. Es kann auch als Umwandlung von Illit durch kontaktmetamorphe Prozesse oder – wie die Smektit-Gruppe – aus ozeanischer Kruste entstehen. Chlorit wird meistens in höheren Breitengraden gefunden, von Wind, Eis oder kaltem Wasser ins Meer getragen.

Chlorit gibt Schiefergestein eine leichte grünliche Färbung, zu finden als Chlorit-Serizit-Schiefer (siehe 4.2 in der «Quarten-Serie» oberhalb des Passweges östlich von Passo della Greina (schw. Koordinaten 717'720 / 163'545), und auch auf der östlichen Seitenflanke der Alpe di Motterascio.

**Vermikulit-Gruppe (2:1)** entsteht durch Verwitterung oder hydrothermische Umwandlungen von Biotit (schwarzer Glimmer) oder Phlogopit (siehe Glossar 9) wobei Fe oder Mg-Ionen für die K-Ionen im Glimmer substituieren. Es kommt oft vor als ein Verwitterungs und/oder Umwandlungsprodukt beim Kontakt zwischen Feldspat-Quarz-reichen oder Magnesium-Eisen-reichen ultramafischen Gesteinen wie Pyroxenite and Duniten. Vermikulit hat eine begrenzte Fähigkeit zum Quellen (Anschwellen) und sich Zusammenziehen.

Diese Gruppe umfasst auch die wasserhaltigen Glimmer-Mineralien, wie die grünliche gefärbte Phengit und Glaukonit.



**Abbildung 2.8** Vermikulit gehört zu den Tonmineralen, die durch ihre (Kat)Ionenaustauschfähigkeit massgeblich zur Bodenfruchtbarkeit beitragen. Sie ähneln sowohl strukturell als auch von der Erscheinungsform den Glimmer Mineralen (Biotit, Muskovit) und bilden wie diese flockige Kristalle. Bild von Leon Hupperichs [CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons.

### 3 Mergel und Ton, Mergelstein und Tongestein

[Dieses Unterkapitel basiert auf Texten aus Schumann, *Mineralien*, 276-278]  
Tonstein

#### 3.1 Entstehung von Mergel und Ton

Nach deren Ablagerung und zum Teil Entwässerung heissen plastische Schlamm (Feinklastite) «Ton». Wenn ausgetrocknet und verfestigt heissen diese Sedimente «Tongestein» (hier synonym mit «Tonstein»). Wenn dieser Tongestein zum grössten Teil aus nur einen Tonmineral besteht, trägt er den Name dieses Tonminerals, zum Beispiel, Kaolinit und Bentonit (siehe unten). Vorkommen in Schwemmlandebenen, einstigen Seebecken und in Flusstälern. Durch die Vielzahl feinsten Poren wird Wasser im Ton festgehalten. Dadurch ist er für anderes Wasser undurchdringlich und wirkt als Grundwasserstauer.

Tone und Tongesteine bestehen aus feinstkörnigen, nur röntgenografisch zu erfassenden Tonmineralien mit geringen Teilen von sehr feinem Quarz, Feldspat und Glimmer. Wenn dieser Sediment im Meer abgelagert ist, dann kommen Reste von kalkigen Organismen und organischer Substanz dazu. Wenn diese Karbonate (Kalke) 5-20% ausmachen, heissen diese Sedimente Tonmergel (nur zum Teil verfestigt) oder Mergelstein (noch etwas weich aber verfestigt).

Beimengungen verursachen die Farbe. Limonit färbt gelb bis braun, Hämatit rötlich, Bitumen und Sulfide grau, bläulich bis schwarz.

Tongesteine sind immer geschichtet. Ihre Festigkeit wird durch Überlagerungsdruck (Kompaktion) und durch verschiedene Bindemittel (Karbonate, Silikate) bewirkt. Tongesteine mit hohem Anteil an Tone, die sich besonders plastisch anfühlen, werden als fett, die anderen als mager bezeichnet.

### 3.2 Mergel und Mergelstein

Lockere bzw. zum Teil verfestigte Ton-/Tongestein-Varietät. Enthält viel Karbonat, entweder als Calcit oder Dolomit. Rohstoff für Zementherstellung. Toneisenstein Mergelstein mit hohem Karbonatanteil in Form von Siderit. Geschiebemergel Von zahlreichen Geschieben durchsetzter Mergel. Entstanden als glaziale Ablagerung, besonders im Bereich der Grundmoräne. Als marinen Sediment weit verbreitet in alle Ozeane.

### 3.3 Ton und Tonstein

Von allen Sedimente und Sedimentgesteinen sind Ton und Tonstein am weitesten verbreitet. Der schwarze Schiefer, die wir in der Greina um die Piz Coroi treffen war ursprünglich ein Tiefsee Tonsediment mit wenig Karbonat (Kalk). Unterhalb von etwa 2000 m (2 km) Wassertiefe, mit zunehmendem Druck und zunehmender Kälte, lösen sich Karbonatkristalle (Skelette von Meeresorganismen) auf. Die Reste von Sediment bestehen überwiegen aus Ton und aus sehr feinen Quarzkristallen (die unter diesen Tiefsee Druck- und Temperaturbedingungen stabil sind). Wenn verfestigt, heisst diese Gesteine, Tongestein. In Lauf der Alpinbildung, wird dieses Tongestein aber nochmals zerdrückt und verformt, (schwach) metamorphisiert, und wird zu Tonschiefer (siehe unten).

Wenn der Tongestein vorwiegend aus nur ein Tonmineral besteht, dann bestimmt diesen Mineral der Name des Tongestein:

**Bentonit** Grauweisse Tonstein-Varietät, durch Umbildung aus vulkanischer Asche entstanden. Wegen des hohen Gehalts an Montmorillonit grosse Quellfähigkeit, Ionenaustausch- und Adsorptionsvermögen. Einsatz zur Dickspülung bei Erdölbohrung, im Schlitzwandverfahren, als Filter, zum Entfetten.

**Kaolin (Porzellanerde)** Kaolin (nach Berg in China) ist ein Tongestein mit vorherrschendem Kaolinit, daneben Quarz und Glimmer. Er entsteht als Rückstandsgestein durch Verwitterung feldspatreicher Gesteine (Granit, Rhyolith, Arkose). Durch Umlagerung des Rohkaolins erfolgt natürliche Schlämmung zu Kaolinton mit den Gemengteilen Kaolinit und Quarz. Farbe von schneeweiss bis graugelblich. Fundorte: Oberpfalz/Bayern, Sachsen, Cornwall/England, China. Kaolin ist Rohstoff für Porzellanherstellung und Füllmaterial für Papier.

Durch gleichgerichtete Ablagerung der plattigen Tonminerale entsteht Tongesteinen mit einem schieferähnlichen Parallelgefüge (aber keine Schieferung!).

**Schieferton – nicht Tonschiefer, siehe unten, Kapitel 4.2!** Diagenetisch verfestigter Tonstein. Es gibt keine klare Begriffsdefinition. Sedimentärer Tonschiefer ist stark diagenetisch bis schwach metamorph veränderter Tongestein – dem Schieferton als Sedimentit zuzuordnen. Der echte Tonschiefer ist stärker metamorph beeinflusst, ein Metamorphit.

**Ölschiefer (gibt es nur an einer Stelle in der Greina, hier für Vollständigkeit,)** Oberbegriff für bitumenhaltige, dunkle Schiefertone. Dienen teilweise der Erdölproduktion. Kann nach faulen Eiern (Sulfide) riechen.

### 3.4 Lehm und Lehmstein

Lockere bzw. verfestigte Ton-/Tonstein-Varietät. Enthält ganz wenig oder gar keinen Kalk, dagegen übermässig Sand. Durch Eisenhydroxide charakteristisch gelb gefärbt. Wichtigster Rohstoff für die Ziegelindustrie.

**Löss** Verfestigte, gelbliche Staubsedimente. Meist ungeschichtet, porös, wandbildend, wasser- und luftdurchlässig. Quarzanteil bis 50%, daneben Feldspäte, Glimmer, Tonminerale, reichlich Kalk. Löss entsteht durch Windanwehung, vor allem in steppenartigen Trockenzonen wo Pflanzen den Staub festhalten und mit einem kalkigen Haarröhrenggefüge verfestigen. Vorkommen in allen Kontinenten, insbesondere am Rande der pleistozänen Vereisungen.

## 4 Schiefer-Gesteine und Schieferung

«Der Ursprung des Wortes Schiefer (slate) stammt aus dem Bergbau, in dem damit feinkörniges Gestein bezeichnet wurde, das so schiefrig-schuppig war, dass es in dünne, planare Plättchen aufgespalten werden konnte, mit denen Dächer gedeckt und Schiefertafeln hergestellt werden konnten.»<sup>7</sup> Nomenklatur: **Schiefer** ist eine Gesteine, **Schieferung** ist einen metamorphen Prozess.

---

<sup>7</sup>Jean-Pierre Burg, *Einführung in die Strukturgeologie*, ETH Zürich, 2001.

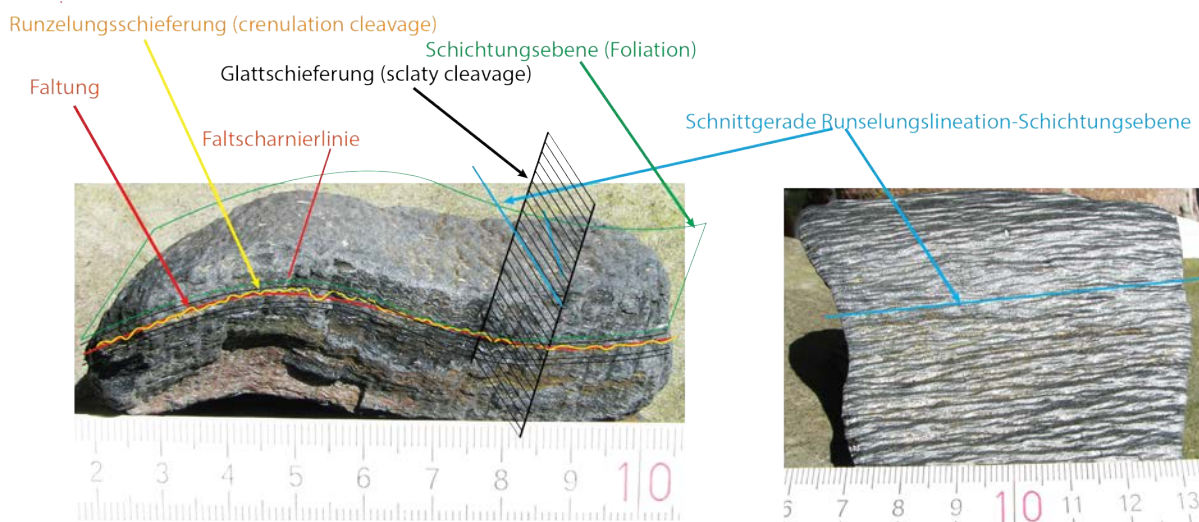
Oft entsteht die Umwandlung von einem Sedimentgestein zu einem Schiefergestein bei der Subduktion ozeanischer Platten. Der ozeanische Teil der europäischen Platte ist während der Alpen Orogenese nach Süden unter die adriatische Platte (mit Afrika zusammengeschweisst) subduziert (untergetaucht: siehe Abb. 5.4).<sup>8</sup>

Das Gemeinsame der Schiefergesteine sind ein fein- bis mittelkörniges Gefüge, sehr deutliche Schieferung und ein Feldspatgehalt von unter 20%.

Deutsch	Englisch	Grösse der einzelnen Mineralien
Feinkörniger Schiefer	slate	nur mit dem Mikroskop sichtbar
Phyllit	phyllite	mit dem Handlinse sichtbar
Grobkörniger Schiefer	schist	mit dem Auge sichtbar

**Tabelle 4.1** Schieferartigen Gesteinsname nach zunehmenden Metamorphosengrad

In der Greina treffen wir einige Gesteine aus der Schiefer-Familie. Sehr oft verwandeln sich Tongesteine zu Tonschiefer mittels schwach bis mittel-druck, tiefemperatur Metamorphoseprozessen.



**Abbildung 4.1** Handstück (Gesteinsprobe) von Tonschiefer (Coroi-Serie), Beide Bilder sind vom selben Handstück. Links: Seitenblick, rechts, Aufblick. Es sind die ausgerichteten Tonminerale (vor allem Chlorit) und die Glimmerminerale (Serizit) welche die strahlende Glanz wiedergibt. Fundort: Greina Passweg, Bilder: RF.

<sup>8</sup>Solche subduzierenden Platten sind für grosse rezente Erdbeben verantwortlich, zum Beispiel, der 11 März Tōhoku-Erdbeben (Fukushima Tsunami) und starke Erdbeben vor der Küste Perus.

## 4.1 Schieferung («cleavage» auf Englisch)

(Aus Wikipedia:)

Die Schieferung ist ein Merkmal, das viele metamorphe Gesteine aufweisen. Ähnlich der Schichtung der Sedimentite ist die Schieferung eine lagige (planare) Textur des Gesteins. Im Gegensatz zur Schichtung ist die Schieferung jedoch kein Ergebnis eines Ablagerungsprozesses, sondern wird vielmehr durch tektonische Vorgänge hervorgerufen, die das Gestein mit hohem Druck und Temperatur beeinflussen. Schieferungsflächen müssen nicht zwangsläufig parallel zu vorhandenen Sedimentationsebenen verlaufen. Minerale, die sehr stark zur Ausbildung von flächigen Strukturen neigen (zum Beispiel Glimmer, Tonminerale, Vertreter der Chloritgruppe), regeln sich unter dem gerichteten Druck des Metamorphoseprozesses so ein, dass die Bereiche grössten Kristallwachstums, nämlich die Kanten, dem geringsten Druck ausgesetzt sind, da dieser für das Kristallwachstum energetisch am günstigsten ist. Die grössten Flächen dieser Minerale stehen daher senkrecht zur Richtung des gerichteten Drucks. Die auf diese Weise entstandenen Schieferungsflächen bilden in vielen Gesteinen infolge weiterer mechanischer Einwirkungen ein System von Klufflächen, das die Stabilität des betroffenen Gesteinskörpers erheblich beeinflussen kann. Dieser Umstand besitzt geotechnische und technische Bedeutung. Gesteine, bei denen diese Merkmale typischerweise auftreten, sind primär die Tonschiefer.

## 4.2 Schiefergesteine

Ein Schiefergestein ist ein plattenartiges Gestein, erkennbar durch ein deutliches Parallelgefüge, das an die sedimentäre Schichtung erinnert. Im Volksmund werden auch dünnplattige Sedimentgesteine häufig als Schiefer bezeichnet. Geologen verwendet den Begriff Schiefer nur für metamorphe Gesteine, das heisst Gesteine die durch hohen Druck und Gebirgsbildung «geplattet,» zerdrückt, und/oder ausgezogen sind. Während aber bei einer Schichtung durchgehende Schichtgrenzen zu erkennen und die Schichtflächen immer eben sind, gibt es bei geschieferten Gesteinen niemals ebene Bruchflächen, weil die plattigen «Schieferminerale» nicht hintereinander, sondern nebeneinander liegen. Die Anzahl der Schieferarten ist sehr gross. Die Bezeichnung der Gesteine erfolgt nach hervorstechenden Eigenschaften, nach bemerkenswerten Mineralien oder nach der Farbe. Die für uns in der Greina wichtigsten Arten sind:

**Phyllit** Phyllit (griech. «Blatt») ist ein feinschuppiger Schiefer mit deutlichem Seidenglanz auf den Schieferungsflächen. Hauptgemengteile sind Serizit (eine Muskovit Varietät mit maximal 0.2 mm Durchmesser) und Quarz, Nebengemengteile Biotit, Feldspäte, Chlorit, Pyrophyllit, Graphit, Granate, Epidot.

In Platten bis zu 0.1 mm spaltbar. Einzelne Kristalle (sog. Porphyroblasten) sind merklich grösser als die mineralische Grundmasse. Dadurch werden die Glimmerplättchen bogenförmig gelagert, so dass der Phyllit im Querbruch ein wellenförmiges Gefüge zeigt. Farbe gewöhnlich silbergrau und grünlich.

**Quarzphyllit** Quarz überwiegt als einer der Hauptgemengteile gegenüber den Glimmern oder den anderen blättrigen Mineralien.

**Serizitphyllit (Serizitschiefer)** Überwiegend aus Serizit und Quarz bestehende Phyllit-Varietät, ohne wesentliche Nebengemengteile. Gelegentlich auch allgemein als Synonym zu Phyllit verstanden.

**Glimmerschiefer** Glimmerschiefer ist geradezu der Inbegriff für Schiefergesteine. Gefüge grobschuppiger als bei Phyllit. Die Glimmerteilchen sind grösser als 0,2 mm und daher mit blossem Auge zu erkennen. Spaltet gewöhnlich im Millimeter- bis Zentimeterbereich, bei grossem Glimmeranteil mit fast ebenen Flächen.

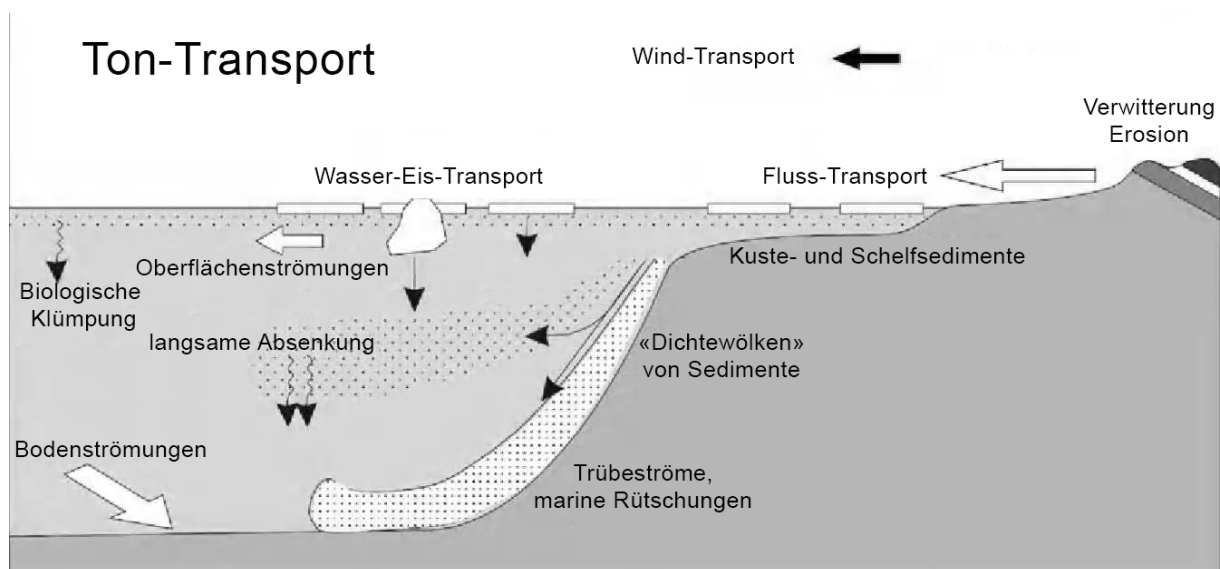
Hauptgemengteile Quarz und Muskovit, Nebengemengteile Biotit, Kyanit, Chlorit, Graphit. Granate, Staurolith und Sillimanit sind häufig porphyroblastisch ausgebildet. Farbe normalerweise hell und leicht grünlich.

**Tonschiefer** Tonschiefer steht genetisch zwischen Schiefertone und Phyllit. Von einigen Autoren wird er zum Sedimentgestein gestellt, obwohl der echte, kristalline Tonschiefer zweifelsfrei metamorph geprägt ist. Deutlich an Schieferung und Schichtung, die im Winkel zueinander laufen (wie beim Griffelschiefer extrem ausgebildet), zu erkennen. Die Grenze zwischen dem sedimentären und dem metamorphen Tongestein liegt dort, wo die Quellfähigkeit im Wasser aufhört. Schiefertone quellen, die metamorphen Tonschiefer nicht. Letztere sind auch härter, haben keine oder stark deformierte Fossilien und vermitteln im feuchten Zustand keinen erdigen Geruch wie die Schiefertone.

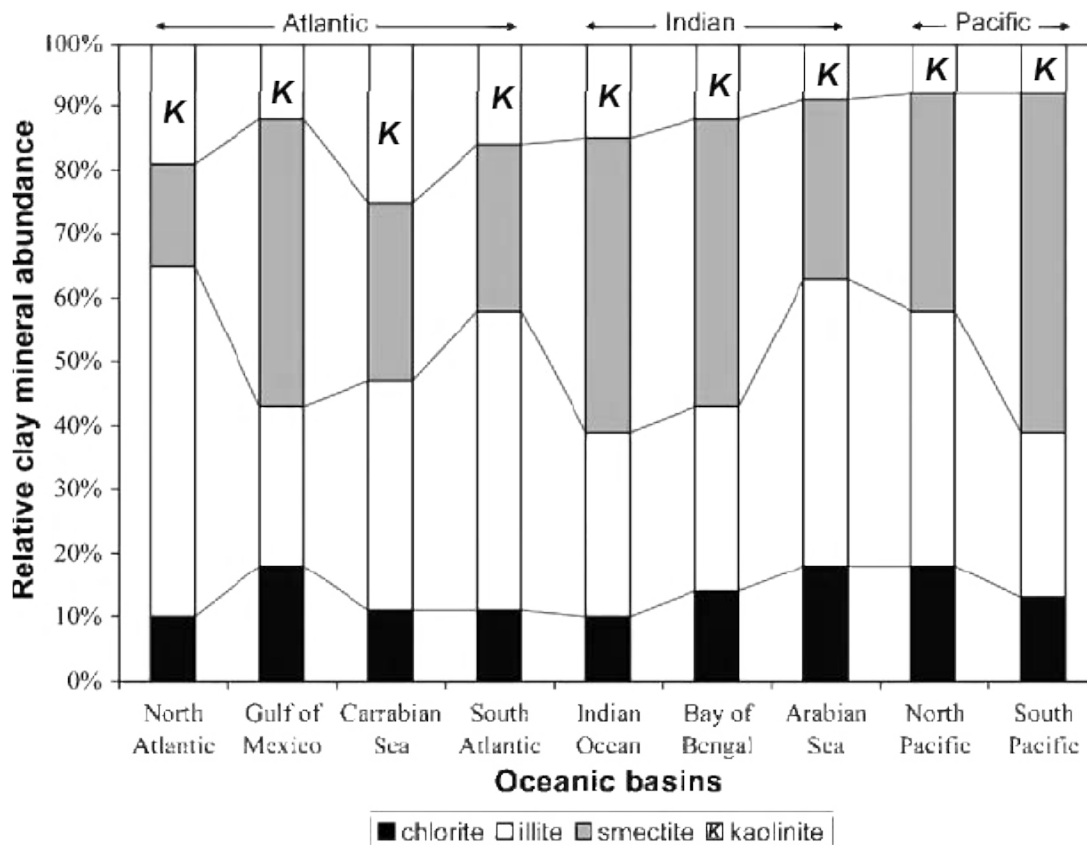
Gefüge feinkörnig bis dicht, ausgezeichnete Schieferung mit flachen Abgliederungsflächen. Entlang von Schichtgrenzen auch ebene Spaltung möglich. Hauptgemengteile sind Tonminerale, Quarz und aus Tonmineralien umgebildete Glimmer, insbesondere Muskovit. Graue und schwarze Farben werden durch Bitumen- und Graphitbeimengung, braune durch Limonit, rote durch Hämatit und grünliche Farbtöne durch Chlorit bewirkt. Es gibt auch mehrfarbige, gestreifte oder gefleckte Typen.

### 4.3 Transport

Meistens wird Ton von Regen in die Flüsse und dann ins Meer transportiert. Diese Art Sediment abzulagern (zu sedimentieren) heisst «detritisch». Die schwebend vom Fluss transportierten Gesteinsmehle nennt man Flusstrübe oder Schweb. Nach ihrer Ablagerung sprechen wir von Schlamm oder Schlick, solange sie wassergesättigt sind.



**Abbildung 4.2** Verschiedene Arten des Transports detritischer Tonpartikel in die Tiefsee. Nach FAGEL (2007), Stow (1994) und Wahsner et al. (1999) (zitiert in Fagel (2007)).



**Abbildung 4.3** Durchschnittliche Ansammlungen von Tonmineralien in der  $< 2\mu$  m Fraktion der oberflächennahen Sedimente der Ozeane kompiliert von Windom, *Lithogenous*, Tabelle 1. Illit und Smektit sind die zwei Tonarten mit den grössten Variationen. Illit kommt häufig vor in kontinentalen, eher kühlen Landmassen und wenig in südlichen Breitengrade. Diese Verteilung ist mit den asymmetrischen Verteilung der globalen Landmasse konsistent. Das heisst, die klimabedingte, temperaturbeeinflusste breitengradparallele Verteilung von Smektit ist durch das Vorhandensein zusätzlicher authigener (am Ort entstandener) Tonmineralien verdeckt, welche durch die Umwandlung von vulkanischem Material (inkl. basaltische ozeanische Kruste) und/oder durch hydrothermale Prozesse am Ort entstanden sind. Zusätzliche, grosse fluviatile (Fluss) Einspeisungen verdünnen die Tonablagerungen in der Tiefsee (zum Beispiel smektitreiche Einspeisung vom Mississippi in die Bucht von Mexiko, Illit- und chloritreiche Einspeisung vom Indus ins Arabische Meer). Abb. 3 von FAGEL (2007).

#### 4.4 Ionenradii

Ionenradien und Atomradien stehen in Zusammenhang: bei Kationen, also positiv geladenen Ionen, ist der Ionenradius kleiner als der Atomradius. Je grösser die positive Ladung ist, desto kleiner wird der Ionenradius. Bei Anionen, also negativ geladenen Ionen, ist der Ionenradius grösser als der Atomradius. Je grösser die negative Ladung ist, desto grösser wird der Ionenradius.

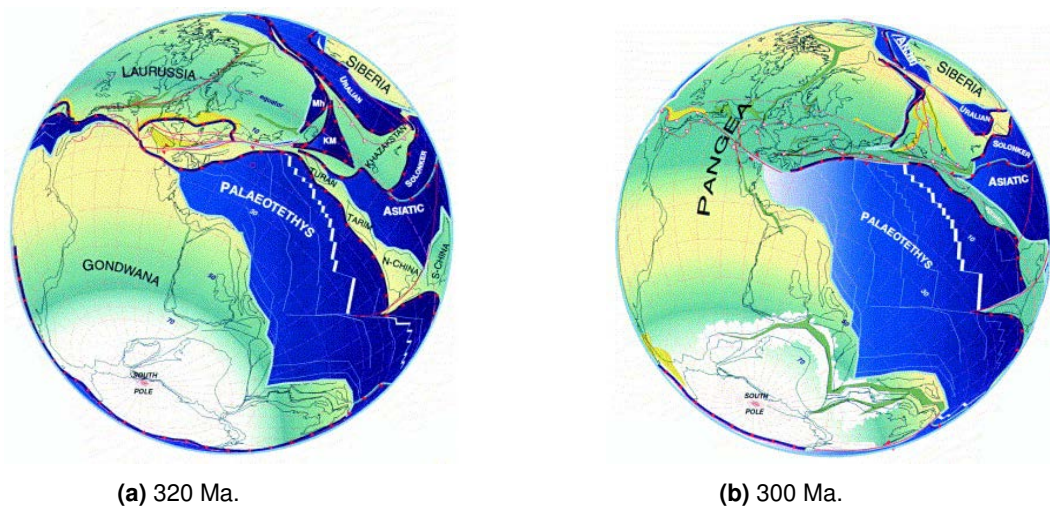


Element	Atomzahl	Ladung	Ionenradius [picometer]
Sauerstoff	8	2-	126
Natrium	11	1+	.99-1.39
Magnesium	12	2+	86
Aluminium	13	3+	67.5
Silizium	14	4+	54
Calzium	20	2+	1.0-1.34
Eisen(II)	26	2+	75 (ls), 92 (hs)
Eisen (III)	26	3+	69 (ls), 78.5 (hs)

**Tabelle 4.2** Ionenradii. Bei Eisen, ls= low (tief) Spin; hs = hoch Spin. 1 picometer =  $10^{-12}$  m oder ein Hundertstel Ångström.

## 5 Der alpine Gebirgsaufbau

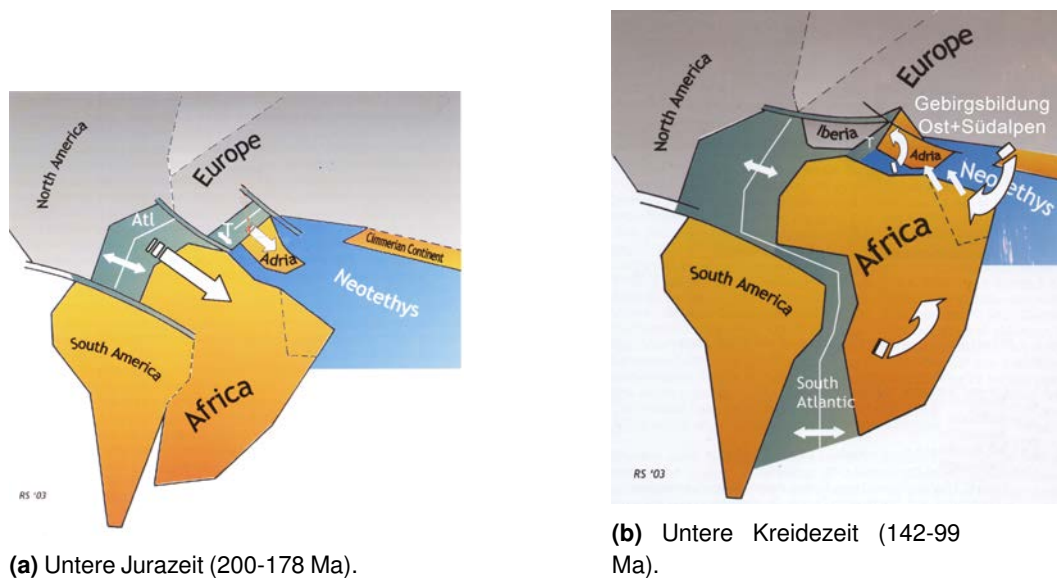
Ein Superkontinent «Pangaea» existierte als zusammenhängende Landmasse vor etwa 300 bis 250 Ma (geologisches Zeitalter Karbon bis Jura), in dem Abschnitt der Erdgeschichte, in dem sich das allergrösste Massensterben in der Erdgeschichte am Ende des Perm (ca. 251.4 Ma) abspielte. Nachher haben sich die Dinosaurier stark entwickelt. Pangaea war der letzte globale Superkontinent der Erdgeschichte.



**Abbildung 5.1** Die Entstehung des Superkontinents Pangaea aus der Kollision zwischen Laurussia (Nordamerika und Europa) und Gondwana (Südamerika und Afrika).

(a) Die rote Linie in Laurussia ist die Gebirgsnarbe der Schliessung des «Iapetus-Ozean (Proto-Atlantik) in der kaledonischen Orogenese (480-440 Ma). Uralte Granite und basaltische (ozeanische) Gesteine der Gotthard Decke wurden zu dieser Zeit zum Gneis umgewandelt.

(b) (Die Kollision von Laurussia mit Gondwana produziert die variskische (herzynische) Gebirgen. Kaledonischer Gneis wurde in dieser Orogenese von variskische Granit als geschmolzenen Ganggesteinen intrudiert. (Und später nochmals in der alpinen Orogenese zu Gneis gepresst.) Rekonstruktionen von Stämpfli und Borel, *Plate Tectonic Model*, Abb. 3.



**Abbildung 5.2** Paläogeographie des Alpenraumes zur Zeit der Unteren Jura (200-178 Ma) und der Unteren Kreidezeit (142-99 Ma). Die Spreizungs- (Öffnungs-) Geschwindigkeit des Nord-Atlantiks beträgt etwa 2.0-2.5 cm/J (20-25 km/Ma), und etwa 3.5 cm/J (35 km/Ma) im Süd-Atlantik. Dies führt zu einer relativen Drehung von Afrika im Gegenuhrzeigersinn. In der Folge gibt es Erdbeben in der Türkei, Griechenland und Basel. Diese Bilder sind sehr vereinfacht aber anschaulich, aus STOCKAR, Breggia entnommen. Ich habe (b) ergänzt, um die Süd- und Ostalpinen Gebirgsbildung auf den adriatischen Kontinentalrands schematisch zu zeigen. Diese ist in den späten Jurazeit erfolgt, lange vor der alpinen Orogenese.

Der alpine Gebirgsbau beginnt mit dem Auseinanderdriften des südlichen Pangaeas in der Trias (250-200 Ma). Afrika «wanderte» auf der Erdkugel südostwärts. In der mittleren Kreidezeit (um 120 Ma) schliessen sich die Alpinen Paratethys und Neotethys und die adriatische Mikroplatte wird zur afrikanischen Platte (von Ost nach West) zusammengeschweisst («akkreditiert»). (Siehe Abb. 5.2b.) Afrika + Adria (auch Apulia genannt) wandert im Tertiär (nach wieder einem grossen Aussterben<sup>9</sup> am Ende der Kreidezeit (65.5 Ma) mit dem Briançonnais Mikrokontinent (ein östlicher Arm von Iberia, getrennt von Europa durch den Walliser Trog) nach Norden. Die adriatische Platte schuf vor sich einen immer mächtiger werdenden Deckenstapel aus dem akkumulierten Tiefseebecken, kontinentalen Teilen (den «penninischen» und «helvetischen» Decken) und am Schluss auch aus dem ozeanischen Sediment des südlichen europäischen Kontinentalrandes zu einem mächtigen Akkretionsprisma («accretionary wedge»). (Siehe Abb. 5.4).

## 5.1 Orogenese, plattentektonischer Ozean- und Gebirgsbau

In der Geschichte der Alpen der letzten 500 Ma sind drei gesamteuropäische Phasen der Gebirgsbildung (Orogenese) wichtig.

**Ordovizium, 480-440 Ma** Die kaledonische Gebirgsbildung [Iapetus (Proto-Atlantik) Ozean unter Nordamerika subduziert → Appalachian, schottisches Hochland und norwegisches Gebirge, Laurussia und Nordamerika sind in dieser Zeit zusammengeschweisst worden.

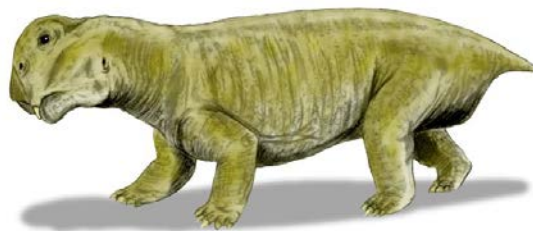
<sup>9</sup>Diesmal nicht so katastrophal wie der an der Perm-Trias Wende, vor 251 Ma, aber für die Dinosaurier fatal.

**SpätKarbon, 335-294 Ma** Gondwana und Laurussia kollidieren, das variskische (auch herzynische genannte) Gebirge entsteht.

**350-300 Ma** Pangea war ein «Megakontinent» bestehend aus Laurussia (inkl. Nordamerika) + Gondwana (Afrika und Südamerika). Hier sind die die Granite des Aarmassifs und der Gotthard-Decken entstanden und die älteren, kaledonischen Granite wurden zu Gneis metamorphisiert (zusammengedrückt). Auch ist die vulkanische Aktivität intensiv, es gibt Gänge (siehe Unterkapitel 7.9 welche die älteren kaledonischen und auch die älteren variskischen Gesteine durchgedrungen (intrudiert) haben.

**300-252 Ma** In der Perm sind alle diese Gebirge flach erodiert, ein arides, trockenes und heisses Klima herrscht. Dann fängt dieser riesige Kontinent an, auseinanderzudriften.

**275 Ma** Erster Vorfahre der Säugetiere geht aufs Land.



**Abbildung 5.3** Lystrosaurus war das am weitesten verbreitete Landwirbeltier und überlebte sogar das «Grosse Sterben». (Lystrosaurus BW von Nobu Tamura (<http://spinops.blogspot.com>) - Eigenes Werk. Lizenziert unter Creative Commons Attribution 3.0 über Wikimedia Commons - [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lystrosaurus\\_BW.jpg#mediaviewer/Datei:Lystrosaurus\\_BW.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lystrosaurus_BW.jpg#mediaviewer/Datei:Lystrosaurus_BW.jpg)).

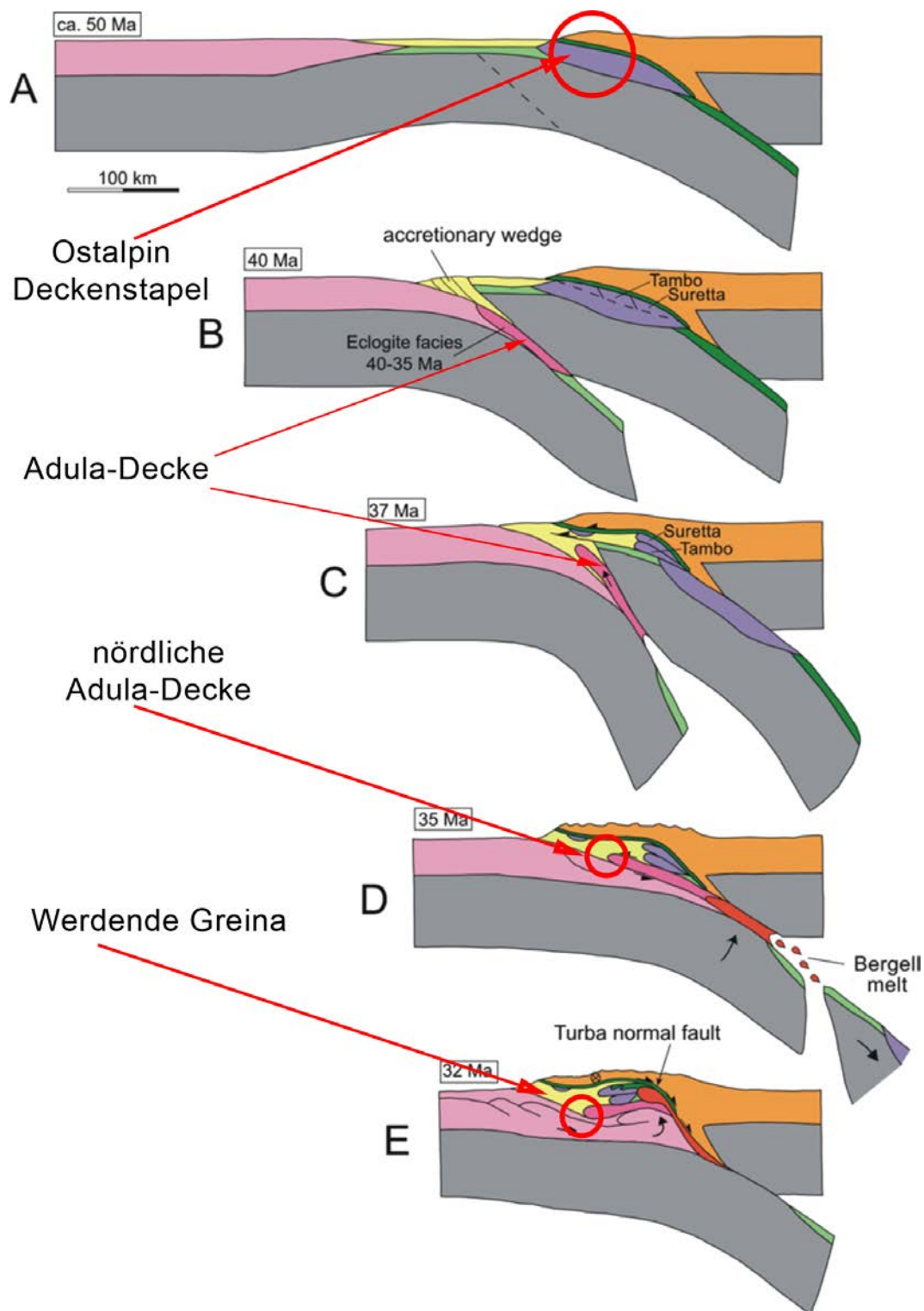
**251.4 Ma** An der Wende von Perm zu Trias, erfährt unsere Erde das schlimmste Massensterben aller Zeiten. Etwa 75% der an Land lebenden Arten sowie etwa 95% der marinen Invertebraten starben aus (Grossforaminiferen, paläozoische Korallen, Trilobiten, Eurypteriden und weitere); stark dezimiert wurden Bryozoen, Brachiopoden, Crinoiden und Ammonoideen. Mollusken waren von dem Artensterben weniger betroffen. Es braucht bis 30 Ma bis wieder komplexere Lebensweisen etabliert sind.

**Beginnend ca. 220 Ma** In der Trias Zeit (250-200 Ma) bricht Pangaea auseinander. Zuerst Gondwana von Laurussia und dann mit der Öffnung des Südatlantiks, Südamerika von Afrika.

**200 Ma** Östliche Pangaea öffnet sich, es entsteht ein grosser Ozean, Tethys genannt.

**180-150 Ma** Mikrokontinent (Cimmeria in Abb. 5.2a als Vertreter von vielen) kollidiert mit der adriatisch-apulischen Mikroplatte und wird zu Nord-Afrika geschweisst.

**35-25 Ma** Hauptphase der alpinen Gebirgsbildung, Kollision des adriatisch-apulischen Teils von Nordafrika mit Europa.



**Abbildung 5.4** Modell für die tektonische Entwicklung der östlichen Zentralalpen (Froitzheim et al. 2003). Die für uns wichtige Adula-Decke ist Violettrot gefärbt und in B markiert als «eclogite facies 40-35 Ma». Zwei Subduktionszonen; das Versinken der Mittelplatte bei 37 bis 35 Ma erlaubt der Adula-Decke, aus der nördlichen Subduktionszone aufzusteigen. Dabei geht die Annäherung zwischen der adriatischen und der europäischen Platte weiter und die tieferen «Lepontinischen» Decken werden im folgenden unter die exhumierte Adula-Decke geschoben. Quelle: Nikolaus Froitzheim, Geologie der Alpen Teil 2: Das Penninikum, (<http://www.steinmann.uni-bonn.de/arbeitsgruppen/strukturgeologie/lehre/wissen-gratis/geologie-der-alpen-teil-2>).

# 6 Profile - Querschnitte

## 6.1 Alpenbau

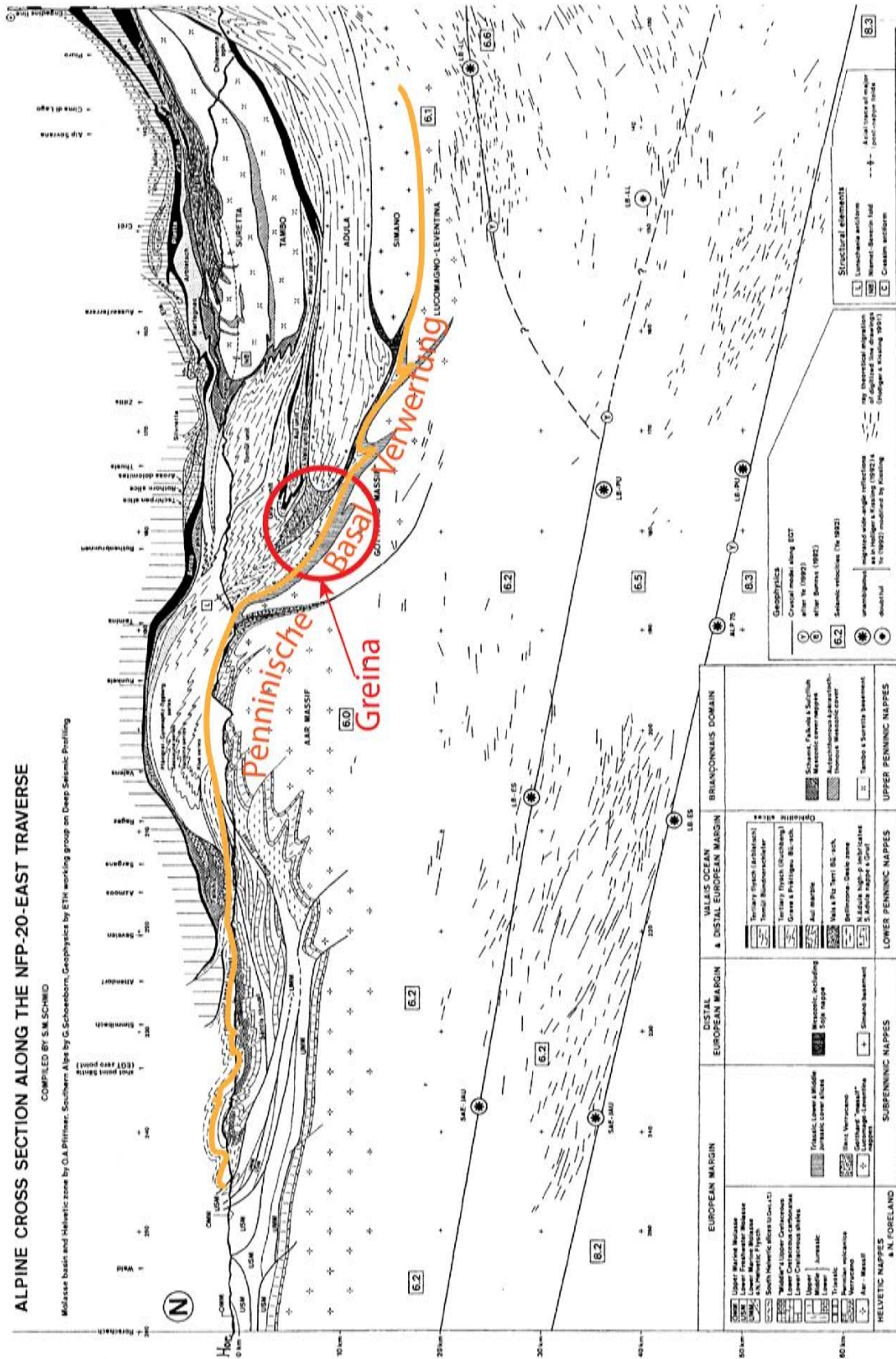
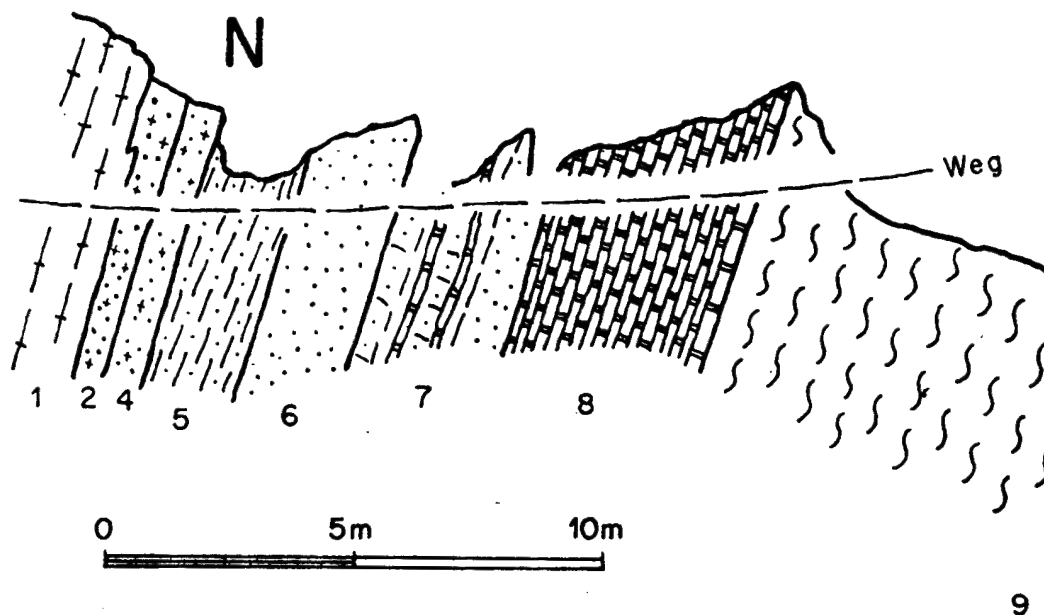


Abbildung 6.1 NFP20/EGT Alpen Querschnitt (SCHMID et al. (2004))



**Abbildung 6.2** Profil durch die Trias am Greina Passweg bei der Scaletta (FREY (1967).

Beginn: Koord. 715110 / 163125, 2245 m. Das Profil folgt vorerst dem Weg von Norden nach Süden.

**(1) x m** Gotthard-«Massiv», Gneise, mit stratigraphischer Diskordanz überlagert durch die **Trias, Melser Serie (8-9 m), Trias-Basisarkose**

**(2) 0,8 m** dicke Bank einer massigen Arkose, grobkörnig.

**(3) 0,1 m** verschieferte Zone innerhalb der Arkose, mit feinen Serizithäutchen.

**(4) 0,7 m** feinkörnige Arkose.

#### **Melser Quarzit**

**(5) ca. 2 m** feine, grünliche, quarzitische Schiefer.

**(6) 2 m** weisser bis grünlicher, dunkelgrau angewitterter Quarzit.

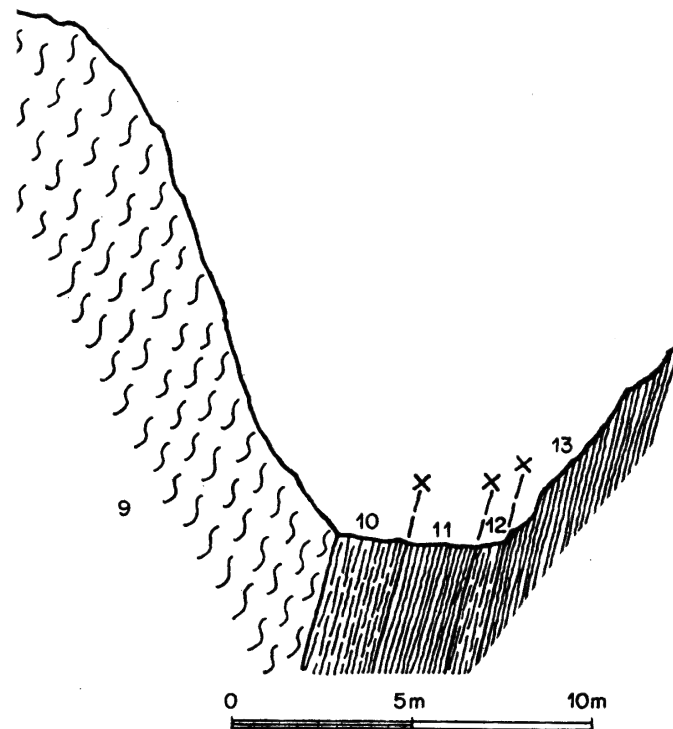
**(7) 3 m** poröse, kalkige Quarzite, unten fein verschiefert, oben dickbankig, braun angewittert, mit phyllitischen Einlagerungen und gelben Dolomitlagen.

#### **Röti-Serie (28 m), untere Dolomite**

**(8) 5 m** gelbe, plattige bis schiefrige Dolomit.

#### **Rauhacke**

**(9) 23 m** hellgelb angewitterter Rauhacke.



**Abbildung 6.3** Fortsetzung des Profils durch die Trias am Greina Passweg bei der Scaletta (FREY (1967).

Fortsetzung des Profils rechts vom Weg, am oberen Rand des Absturzes.

#### **Rauhacke**

(9) 23 m hellgelb angewitterter Rauhacke.

#### **Quarten-Serie, eingeschuppt**

(10) 2 m grünliche, rostig angewitterter Serizitphyllite.

#### **Scopi-Zone, Coroi-Serie**

(11) 2 m schwarze Tonschiefer, mit Schieferung parallel zum Kontakt.

#### **Quarten-Serie, eingeschuppt**

(12) 1 m grünliche, rostig angewitterter Serizitphyllite.

#### **Coroi-Serie**

(13) x m schwarzer Tonschiefer, mit nach Norden einfallendem Schieferung.

Ende des Profils: Koord. 715'110 / 163'080, 2225 müM.



## 7 Ein kleiner Gesteins- und Mineralienführer

### 7.1 Granit

«**Feldspat, Quarz, und Glimmer, die drei vergiss' ich nimmer!**»

Granite bestehen hauptsächlich aus Quarz, Feldspäten und dunklen, mafischen Mineralen, die etwa 20–40 % der Masse einnehmen. Meistens handelt es sich dabei um Biotit (Dunkelglimmer), seltener um Amphibol oder andere mafische Minerale wie Hornblende und Pyroxene.<sup>10</sup> Daneben kommt Muskovit vor, der Hellglimmer. Bei den Feldspäten überwiegt der (Al)Kalifeldspat über die Plagioklase. Als Akzessorien (Nebenbestandteile) führen sie Zirkon, Apatit, Titanit, auch Magnetit, Rutil, Ilmenit oder auch andere Erzminerale, die z. T. aus überprägten Zonen stammen können.

#### Helle Mineralien:

**Feldspat** ein bisschen härter als Stahl (Taschenmesser-Test!). Davon gibt es verschiedene Arten, vor allem:

- **Orthoklas (Kalifeldspat)** grobkörnig, oft pink und rosarot,
- **Plagioklas** meist weiss, zersetzt blassblau, selten grünlich, oft Zwillinge,

**Quarz** speckiger fettiger Glanz, auch transparent oder grau, deutlich härter als Stahl, (Quarz kratzt Stahl, nicht umgekehrt).

#### Dunkle Mineralien:

**Glimmer (Biotit)** schwarz, kleine blättrige Stricke,

**Hornblend** dunkelgrün, stängelig,

**Pyroxen (Diopsid)** dunkelgrün, stängelig.

Das Farbspektrum reicht bei Graniten von hellem Grau bis bläulich, rot und gelblich. Dabei spielen die Art der Erstarrung (Kristallisation) und Umwelteinflüsse, denen das Gestein ausgesetzt war, ebenso eine Rolle wie der Mineralgehalt. Die gelbe Farbe angewitterter Granite kommt von Eisenhydroxidverbindungen (Limonit), die infolge von Verwitterungseinflüssen aus Eisen. Diesen Eisen ist vor allem in den dunklen, mafischen Mineralen im Granit zu finden.

---

<sup>10</sup>«Mafisch» bezeichnet Mineralien mit einem grossen Anteil an Magnesium (Mg) und Eisen (Fe)-reiche Mineralien, «Felsisch»: grosse Anteil an Feldspäte-Mineralen und Quarz.

Mineral	%-Anteil in Granit	Färbung
Orthoklas- oder Kalifeldspat	40–60%	meist kräftig rot bis rötlich oder rosa, selten bläulich, grün oder blau
Plagioklas-Feldspat	0–30%	meist weiss bis weissgrau und nur selten farbig
Quarz	20–40%	meist farblos transparent, selten grau, blaugrau oder rosa
Biotit	0–15%	verleiht vielen Graniten einen dunklen Kontrast

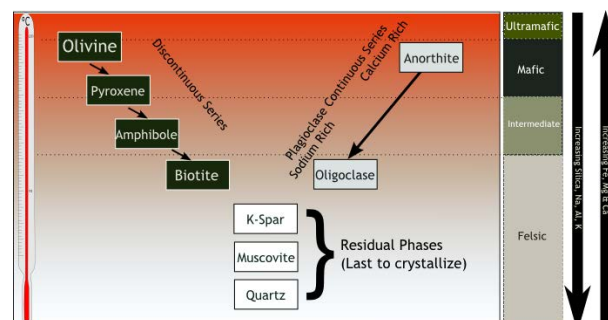
**Tabelle 7.1** Farbtabelle für Mineralien in Granit

## 7.2 Granit und Wärme – Radioaktivität

Granite weisen oft eine natürliche Radioaktivität auf, da sie Spuren von Uran, Rubidium und anderen radioaktiven Elementen enthalten können. Ein weiterer möglicher Träger der Radioaktivität sind die in den Feldspäten und Glimmern vorkommenden radioaktiven Isotope verschiedenster Elemente, vor allem Kalium. Die Stärke der Radioaktivität kann selbst innerhalb eines geologischen Aufschlusses sehr stark schwanken.

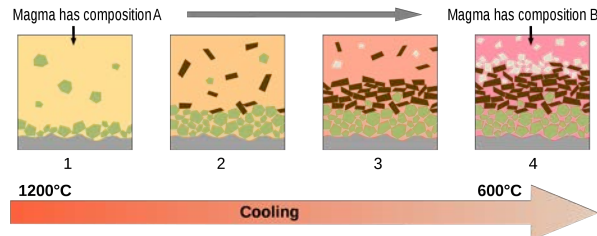
## 7.3 Fraktionierte Kristallisation = Erstarrungs (Auskristallisations) Reihe

Wie alle Plutonite erstarrt auch Granit sehr langsam in grösseren Tiefen von mehreren Kilometern. Entsprechend den Schmelztemperaturen beginnen sich die ersten Kristalle zu bilden. Dabei werden (während der magmatischen Differentiation) kristallisierte Minerale wie Olivin und Pyroxen ausgesondert und bleiben somit erhalten. Ohne die fraktionierte Kristallisation würde z. B. der kristallisierte (also feste) Olivin bei einer bestimmten Temperatur durch eine Reaktion mit der magmatischen Schmelze in Pyroxen übergehen.



**Abbildung 7.1** Aus Public Domain, Wikipedia, Autor: Covran

Der Druck bestimmt die maximale Wassermenge einer granitischen Magma. Die höhere Temperatur einer relativ wasser-armen granitischen Magma ergibt eher einen alkalifeldspatischen<sup>11</sup> Granit. Andererseits ergibt sich aus einer relativ wasser-reichen granitischen Magma und einer vergleichsweise tieferen Temperatur bei der Kristallisation ein Granit mit beidem Feldspäte: Orthoklas und Plagioklas. Zuerst aus der Schmelz kristallisieren (erstarren) die



**Abbildung 7.2** Vereinfachte Darstellung der fraktionierten Kristallisation einer Magma. Während dem Abkühlen der Magma verändert sich ihre Zusammensetzung. Siehe Text. (Creative Commons, Wikipedia, Autor: Woudloper

dunklen Minerale, die auch meistens eine hohe Dichte haben und den höchsten Schmelzpunkt. Das heißt, bei der Abkühlung kristallisiert zuerst

1. Olivin, dann
2. Pyroxen, Amphibol, Hornblende, Biotit, dann
3. Plagioklas Feldspat, und am Schluss
4. Quarz.

- Die zuerst gebildeten schweren Mineralien, wie Hornblende oder Pyroxen, die auf Grund ihres höheren spezifischen Gewichts und ihres höheren Schmelzpunktes bei dem Abkühlungsprozess früher ausgeschieden werden, sinken in der noch flüssigen Restschmelze ab und sammeln sich im unteren Bereich einer erstarrenden Magmakammer.
- Quarz oder Kalifeldspat hingegen reichern sich auf Grund ihrer geringeren Dichte in der Schmelze an und haben im Dachbereich der Magmenkammer oft deutlich erhöhte Gehalte. Diesen Prozess nennt man magmatische Differentiation.

Klassisch werden drei Granit-Typen nach Chapell & White (1974) unterschieden:

- I-Typ-Granite (igneous source, d.h. aus Magmatiten erschmolzen) sind vorwiegend bei Ozean-Kontinent-Kollisionen zu finden, seltener an Mittelozeanischen Rücken oder Hotspots. Mineralogisch zeichnen sie sich häufig durch einen hohen Bestandteil an Biotit und Amphibol (va. Hornblende) aus.

<sup>11</sup> Alkalifeldspate sind Mischkristalle der Ab-Or-Mischkristallreihe mit den Endgliedern Albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) und Kalifeldspat ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) bzw. Orthoklas/Mikroclin. Sie bilden die Mischkristalle Anorthoklas, Na-Sanidin und Sanidin und haben einen hohen Anteil an Kalium und Natrium.

- S-Typ-Granite (sedimentary source, d.h. aus Sedimentiten erschmolzen) sind das Ergebnis einer Aufschmelzung von Sedimentgesteinen. Diese Gesteine sind peraluminisch, weshalb vor allem Al-Silikate wie Muskovit (weswegen sie den Beinamen Zweiglimmergranit innehaben), Cordierit oder Minerale der  $Al_2SiO_5$ -Gruppe hierin vorkommen. Sie treten vor allem dann auf, wenn es zur Druckentlastung von kontinentaler Kruste beispielsweise durch Erosion und isostatischen Aufstieg nach dem Zusammenbruch eines Gebirges kommt, wie es zum Teil in den deutschen Mittelgebirgen der Fall war. Durch die erneute Kristallisation dieser Gesteine erhalten diese ein neues Alter.
- A-Typ-Granite (anorogenic source, d.h. ausserhalb von gebirgsbildenden Ereignissen entstanden) treten oft bei beginnendem Aufreissen kontinentaler Kruste in Erscheinung.

## 7.4 Gneis

Gneis ist ein metamorphisches Gestein, unter zunehmendem Druck «zerquetschter» Granit. Wenn beide Glimmerminerale, Biotit und Muskovit dabei sind, heisst dieser Gneis «Zweiglimmer Gneis». Der silbrig glänzende Heliglimmer (Muskovit) im Greina Zweiglimmer Gneis lässt auf ein Kristallisationsalter zwischen 35 und 22 Ma schliessen, das heisst, dieser Gneis ist entstanden während der Hauptphase der Alpenbildung (nach Rb-Str Datierung von Hunziker, 1997).

### 7.4.1 Augengneis

Augengneis ist ein Gneis mit runden und/oder lang ausgezogenen grossen weissen Kristallen (Kalifeldspat=Orthoklas). In den Alpen hat dieser meist variskischen (335-294 Ma) oder kaledonischen (480-440Ma) Alters.

## 7.5 Amphibolit

Ein sehr feinkörniger, sehr dunkler Gneis ohne Quarz mit vielen dunklen, grünen stängeligen Mineralien (Hornblende, Pyroxen) ergibt Amphibolit. Die dunkel Farbe weist auf mafische Mineralien und einen basaltische Herkunft (zum Beispiel ozeanische Kruste). Wir finden einige Exemplare von Amphibolit beim Aufstieg zum Capanna Scaletta und auf der Carpet la Greina entlang des Sattelwegs zwischen der Terrihütte und der Brücke über den Rein da Somvitg.

## 7.6 Der «Altkristallin» (Erstfelder Gneis)

Ein Beispiel wie komplex diese Gesteine sind:

1. Kalk und Flysch Ablagerung im frühen Paläozoikum (600-478 Ma).
2. Kontinent-Streckung, Ozeanbildung, Intrusion von Mantelgesteinen (Basalt, Peridotit) z.T. serpentinisiert. (Wenn metamorphisiert werden diese basaltischen Gesteine zu Amphibolit).

3. Intrusion von Gabbro (echte Meeresspreizung) um 479 Ma.
4. Subduktion mit HP-MT bis zum Granulit-Fazies an einem aktiven Kontinentalrand.
5. Kontinent-Kontinent Kollision mit Metamorphose, Verfaltung, Migmatitbildung um 450 Ma (Entstehung des Erstfelder-Gneis).
6. Heraushebung und Teilaufschmelzung um 445 Ma (Entstehung des Innererkrichner Kristallins).

(Quelle: Schaltegger 1993, Abrecht et al 1995, Schaltegger et al 2003, siehe , 31)

## 7.7 Zirkon

Der Zirkon ist ein sehr hartes Mineral,  $ZrSiO_4$  (auf der Mohrskala 7.5), fast wie Diamant (Mohrskala 10.0), der mehrere Orogenesen überstehen kann. Jedesmal, wenn er bei hohe Temperatur schmilzt, baut er eine neue Schale bzw. eine Zone («Ring» in Querschnitt). Mittels Ion-Mikroskopie konnte ein Forscher in der Schweiz, Dieter Gebauer (ETH Zürich) kleinste Blasen verdunsten und die chemische Zusammensetzung sowie radioaktive Zerfallsprodukte messen und dadurch das Alter jeder Zone (Ringe) bestimmen. Er hat herausgefunden, dass die Zirkone – und demzufolge der Gneis der Gotthard-Decke – bis zu sieben Orogenesen durchgemacht haben.



**Abbildung 7.3** Zonierter Zirkon (aus Public Domain, Wikipedia, Autor: Bernabè Egon, Universität Innsbruck).

Die Daten dieser sieben Orogenesen (von der ältesten bis zur jüngsten) sind:

1. ~3400 Ma
2. 2800-2600 Ma
3. 2300-2200 Ma
4. 1700 Ma
5. 600 Ma frühes Paläozoikum (600-478 Ma, Kaledonisch / Appalchian Orogenese)
6. 300 Ma (Variskische Alter)
7. 40 Ma (Alpen)

## 7.8 Rauhwacke

Rauhwacke (nicht zu verwechseln mit Grauwacke, ein Art Gneis) ist ein poröses gelblich-cremeweisses Gestein aus Dolomit ( $\text{CaMgO}_3$ ) und Anhydrit (Calciumsulfat  $\text{CaSO}_4$ ) / Gips (= Wasser + Anhydrit =  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Das ursprüngliche Sediment hat wahrscheinlich auch Karbonate (Kalke) und Salz enthalten, die jetzt herausgewaschen sind (die «Löcher»). Rauhwacke ist entstanden in seichtem Meer, wo Salz mit Ebbe und Flut aus dem Meerwasser ausfällt (wie heute in Süd-Sardinien). Bei der chemischen Zersetzung der Rauhwacke wird der Gips gelöst und ausgeschwemmt. Ein löchriges, poröses Gestein bleibt zurück. Während Gipsstein eher eine weisse bis braun-graue Farbe hat, erkennt man Anhydritgestein an der weiss-grauen, auch bläulichen oder rötlichen Färbung. Im Gegensatz zu Anhydrit ist Gips mit dem Fingernagel ritzbar.



**Abbildung 7.4** Rauhwacke, vor der capanna Scaletta, Brenno della Greina. Photo RF.

## 7.9 Pegmatit

Pegmatite sind magmatische Ganggesteine, granitischer oder alkaligranitischer Zusammensetzung. Sie bestehen hauptsächlich aus den Mineralen Quarz, Feldspäten (Orthoklas, Mikroklin und natriumreicher Plagioklas) und Glimmern wie Biotit, Muskovit oder Lepidolith.



**Abbildung 7.5** Leukokratischer (dies fast nur aus Quarz bestehender) Pegmatitgang, der durch den Gotthard Gneis, durchdringt (intrudiert). Der Gang ist also jünger als die variskische Vergneisung aber älter als die triassische Rauhwacke. Brenno della Greina. Photo RF.

## 8 Greina - Wasser, Energiepolitik, und das Volk

Da so gut beschrieben, zitiere ich hier aus SCHMUTZ (2005), «Der Kampf um die Greina» (leicht editiert).

### 8.1 Prolog

Wie an vielen Stellen der Alpen wollte man auch in der Greina das herabfließende Wasser nutzen und in Elektrizität umwandeln. In einem 1984 erschienenen Bericht des Eidgenössische Departements des Innern mit dem Titel «Beurteilung von Wasserkraftwerksprojekten aus der Sicht des Natur- und Heimatschutzes» stehen über die Greina unter anderem folgende Sätze

«Ausgedehnte, natürliche von der Zivilisation unberührte Greinahochebene. Rumpftal, das von allen Seiten nur über felsige Steilstufen oder über Gebirgszüge zu erreichen ist.»

«Unverdorbene Gebirgslandschaft mit formenreicher Alluvialebene, Landschaft ohne Masstab. In der Schweiz einzigartiger Landschaftstyp, allenfalls noch mit Tundrenverhältnissen in Lappland zu vergleichen.»

«Die Greina gehört zu den noch naturhaften und zusammenhängenden extensiv oder gar nicht genutzten Gegenden der Schweiz.» (Broggi und Reith 1984)

## 8.2 Szene 1: Energiebedarf und Geldgier

Aus diesen Zitaten ahnt man schon den sich abzeichnenden Konflikt (Greina 1995). Schon währen des Zweiten Weltkrieges entstanden Pläne, am unteren Ende der Plaun La Greina den Somvixerrhein aufzustauen und das Wasser des Stausees nach Süden ins steile Bleniotal zu leiten. So hätte man auf kurze Distanz grosse Höhenunterschied nutzen und dadurch viel Bewegungsenergie in Elektrizität umwandeln können.

Durch die Annahme der so genannten «Wasserrechtsinitiative» mittels einer Volksabstimmung im Kanton Graubünde im Jahre 1949 war dieses Projekt vom Tisch, denn das neue Gesetz verbot die künstlich Veränderung von Wasserscheiden [Crap la Grusch]. Die Elektrizitätswerk lancierten 1957 ein neues Projekt, das eine Überflutung der Greinahochebene mit einer achtzig Meter hohen Staumauer vorsah. Das Wasser sollte anschliessend ins Rheintal hinunter genutzt werden. Die beiden betroffenen Gemeinden Vrin und Sumvitg erteilten die Konzession, weil sie aus finanziellen Gründe auf die Wasserzinsen angewiesen waren.

Der Bau wurde nicht in Angriff genommen, nicht zuletzt wegen der Schwierigkeit der Abdichtung des geplanten Seebeckens da, wo der Rauhwackenzug dem Talboden entlangführt. 1981 wurde das Projekt zu einer Pumpspeichieranlage erweitert. So wollte man mit überzähligem Nachtstrom aus Atomkraftwerken Rheinwasser von Sumvitg im Vorderrheintal in die Greina hochpumpen und zu Spitzenzeiten des Strombedarfs wieder durch die Turbinen in den Rhein zurückgeben. Der Pumpenverlust von 30 Prozent wäre nicht ins Gewicht gefallen, denn der Preisunterschied zwischen Überschussnachtstrom aus Atomkraftwerken und Spitzenstrom zu starken Energiebedarfszeiten ist mindestens der achtfache! So wäre also physikalisch das Greinaprojekt nicht zu einer «Energieerzeugungsanlage» geworden, sondern wegen der Pumpverluste zu einer «Energievernichtungsanlage». Rein finanziell hätte eine «Goldgrube» entstehen können.

## 8.3 Szene 2: Kunst und die Menschen

Schon in den frühen siebziger Jahren waren einige wenige Menschen tätig, um dem Widerstand gegen dieses Kraftwerksprojekt ein Fundament zu geben. Es waren vor allem Bryan Thurston und Herbert Maeder. Thurston, ein Architekt und Kunstmaler, hatte oft die Greina erwandert, und so entstanden zu verschiedenen Jahreszeiten eine Vielzahl von Gemälden, Zeichnungen und Radierungen. Mittels Ausstellungen machte Thurston viele Menschen auf die Besonderheit der Greinalandschaft aufmerksam. Schon bald gesellte sich der Bergfotograf Herbert Maeder dazu. Maeder als passionierter Bergsteiger konnte mit seinem Apparat die Urtümlichkeit der Greina einfangen und trug mit Fotokalendern dazu bei, die Schutzwürdigkeit der Greina in die Öffentlichkeit zu tragen. Als weitere Kämpfer der ersten Stunde traten Menschen hinzu, die die Alternativenergie, vorab die Solarenergie, tätig förderten. Es waren dies Pater und Gymnasiallehrer Flurin Maissen aus Disentis und der junge Jurist Gallus Gadenau aus Waltensburg. Auch sie waren selbstverständlich oft in der Greina anzutreffen.



## 8.4 Szene 3: Rauhucke als Retter

In den achtziger Jahren bemühte sich verschiedene Naturschutzgruppen um die Rettung der Greina. Als besondere Gruppe sei die Schweizerische Greina-Stiftung genannt. Dort wurde versucht, nicht nur das Kraftwerksprojekt zu verhindern, sondern auch die verarmten Gemeinden Vrin und Sumvitg finanziell zu unterstützen, gerade wenn sie durch die Verhinderung des Kraftwerkes auf die Wasserzinsen hätte verzichten müssen. Auf juristischer und parlamentarischer Ebene wurde gegen die Konzession angegangen, die bei Betrieb der Anlage eine Restwassermenge Null vorsah. Das hätte bedeutet, dass der Somvixerrhein nach der Staustufe kein Wasser mehr geführt hätte.

Die stetig wachsende Opposition und die Veränderung der ökonomischen Verhältnisse in der Stromwirtschaft führten 1986 dazu, dass die Projektbetreiber die geplante Anlage als unrentabel einstufen und auf die Baukonzession verzichteten. Ein «geheimer Helfer» für die Opposition war die Rauhucke, die wegen der Abdichtungsprobleme das Projekt sehr verteuert hatte.

Als Alternative zur Geldbeschaffung mittels Wasserzinsen erarbeitete die Greina-Stiftung die Idee des Landschaftsrappens. Gemeint ist die staatliche Leistung von Ausgleichsbeiträgen zur Erhaltung und Unterschutzstellung von schützenswerten Landschaften von nationaler und überregionaler Bedeutung sowie zur Sicherung angemessener Restwassermengen, sofern es sich nicht um finanzstarke Kantone und Gemeinden handelt. Diese Ausgleichskasse würde durch Abgabe von einem Rappen pro Kilowattstunde der in der Schweiz erzeugten Hydroelektrizität gefüllt. Dieser politische Vorstoss bekam nach einem längeren parlamentarischen Hin und Her durch die abschliessende Volksabstimmung Gesetzescharakter. Da der Bundesrat die Handhabung des Volksentscheides verwässern wollte und längere Zeit erfolgreich hinauszögerte, griff die Stiftung auch so zur Tat, indem sie einen Millionenbetrag aus dem Stiftungskapital den auf Geld wartenden Gemeinden Vrin und Somvix ausbezahlte.

Unterdessen ist das Verfahren der Ausgleichszahlungen in Gang gekommen und kommt weiteren Gemeinden zugute. Dies betrifft insbesondere auch Gemeinden im Avers und Schams, weil die Pumpspeicherprojekte Madris im Avers und Curciosa im Hinterrhein auch fallen gelassen wurden.

Dieses Beispiel zeigt, wie ein letztlich politisch gefällter Entscheid zum angemessenen Umgang mit einer Landschaft auf dem unermüdliche Kämpfen einer oder einiger weniger Persönlichkeiten beruht. Ohne die lang gereifte Einsichtshandlung eines Bryan Thurston wäre die Greinahochebene heute wahrscheinlich eine der vielen Landschaftsverschandelungen.

(Quelle: Schmutz, *Exkursionen*, 61-63, «Der Kampf um die Greina», leicht editiert.)

## 9 Glossar einiger geologischer Begriffe

(Viele der folgenden Texte sind aus SCHUMANN (2007), ergänzt und/oder leicht editiert.)

### **Amphibolit**

Eine sehr feinkörnig, dunkel Gneis ohne Quarz mit vielen dunklen, grünen Stängel (Hornblende) ergibt Amphibolit. Die dunkel Farbe weist auf mafische Mineralien und eine basaltische (zum Beispiel ozeanische Kruste) Ursprungs. Wir finden einige Exemplar von Amphibolit bei der Aufstieg zum Capanna Scaletta und auf der Carpet la Greina entlang der Sattelweg zwischen die Terrihütte und die Brücke über Rein da Somvitg.

### **Anhydrit**

Mineral und auch sedimentäres Gestein. Anhydritstein (griech. ohne Wasser») ist ein Gestein aus vor allem ein Mineral: Anhydrit. Anhydrit baut Wasser in den Kristallstur hinein und diese neuen Mineral heisst Gips. Anhydrit (+/- Gips) mit Calcit, Dolomit und Tonmineralien ergibt Rauhwacke. Anhydritgestein entsteht such Fällung aus dem Meereswasser oder diagenetisch aus Gipsten infolge hoher Temperaturen und grosser Decklast während dem Gebirgsbau. Gefüge feinschichtig oder homogen, dicht oder körnig, Farbe weisslich, grau, bläulich, rot.

### **Arkose**

Gestein, sedimentär: Ein Ein Feldspatreicher, meist rötlicher Sandstein. Anteil von Feldspat-Mineralien mehr als 25%.Gewöhnlich grobkörnig, schlecht Korngrossensortierung, viele eckige Gesteinstrümmer. Entstehung vorwiegend im Trockenklima, sonst wären die Feldspäte verwittert. Deswegen ist Arkose ein Merkmal von eine schnell subaral-verwitterndem Granit in Küstennähe (Trocken, warmes Klima).

### **Brekzie (Breccie)**

Gestein, sedimentär: verfestigtes Trümmergestein mit oft bunten eckigen Komponenten. Je nach Abtragungsgebiet sind die eingelagerten Brocken aus gleicher oder verschiedener Gesteinsart. Gewöhnlich keine Korngrossensortierung, keine Einregelung, keinerlei Schichtung. Häufig eckige Hohlräume als Folge herausgefallener Brocken. Bindemittel kann Ton, Kalk, oder Kiesel sein. Entstanden aus Gehängeschutt oder Bergsturzmaterial.

- **Tektonische Brekzie** Neben der sedimentären Nreckzie gibt es auch pyroklastischen (vulkanischen Ausdrücke) und tektonisch gebildet Brekzie. Tektonische Brekzie entstehen dadurch, dass das Muttergestein infolge gebirgsbildendener oder seismischer (Erdbeben) Vorgänge zerrtrümmert, aber als Gesteinsverband nicht völlig aufgelöst wird. In den Alpen (vor allem und Gesteinen der Ostalpinen und Südalpinen Decken) oft unter der Meeresspiegel entstandenen in Zusammenhang mit Brücke zwischen differenzielle Bewegung ozeanischer Plattenteilen. Ein Hinweis von spröde Tektonik (Verwerfungen) in der Nähe des Ablagerungs-ort.

**Bündnerschiefer («schistes lustrés»)**

Schwachmetamorph Gesteine. Ursprünglich ein sehr feinkörniger Tiefsee-Sediment aus Ton, feinem Quarz, mit wenig Kalk. Die meisten dieser Sedimente wurden als «Flysch» (siehe 9) abgelagert: ein Trübestromsediment. Dieses entsteht aus einer wiederkehrenden Abfolge von Sandsteine, Mergel und Ton in Tiefseebecken. Jetzt sind diese Sedimente gepresst während der Subduktionsphase des Valais-Ozeans (Walliser-Trog) und denn leicht erwärmt und ausgezogen während der Exhumierung in der alpinen kontinent-kontinent Kollision. Jetzt eine Art Schiefergesteine. Die Schiefergestalt (Spaltigkeit) entsteht aus den durch Druck angeordneten Tonmineralien.

**Dolomit**

Gestein, sedimentär und Mineral: aus magnesiumreichem Kalkstein ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), Meeresediment. Ist stabiler gegen Erosion durch Verwitterung (säure Regen) als Kalk, kann brüchig werden. Es gibt ein schwach metamorph Variante «Zuckerdolomit» welche zerfällt wie Sand. Kommt auf den Passweg (Passo della Greina) vor.

**Feldspate**

Mineral, magmatisch: Eine Gruppe von Mineralien aus Aluminium und Silikaten mit einem wechselnden Anteil von Kalium (Kalifeldspat, Orthoklas), Natrium und Calcium (Plagioklas mit Albit (viele Na) bis Anorthit (viel Ca)). Eine wichtige Komponente von Granit.

**«Flysch», Trübestromsedimente**

Serien von Ablagerungen aus Sandstein-Mergel-Tone. Sie wurden in Tiefsee durch wiederholte Untermeeresrutschungen («turbidity currents», Suspensionsströme oder Trübestrome) verursacht.

- **Trübestrome** Ein Suspensionsstrom oder Trübestrom ist ein Strom von schnellfließenden, stark sedimenthaltigen Wassermassen an unterseeischen Hängen. Die in Suspension befindlichen Sedimente erhöhen dabei die Dichte des Stroms im Vergleich zum umgebenden Wasser und beschleunigen ihn so. Suspensionsströme treten vor allem an den Hängen der Kontinentalsockel sowie in Tiefseerinnen auf und führen dort zu canyonartigen Vertiefungen. Ausgelöst werden sie durch Erd- oder Seebeben. Dabei geraten Sedimentschichten an Abhängen ins Rutschen. Zunehmendes Gefälle erhöht die Geschwindigkeit des Stroms. Das wiederum führt zu einer Zunahme der Turbulenzen und einer weiteren Aufnahme von lockeren Sedimenten. Der Effekt gleicht einer sich selbst verstärkenden Lawine. Suspensionsströme können Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h erreichen. Zur Ruhe kommen sie für gewöhnlich erst in der Tiefsee bei flachem oder nahezu flachem Boden. Die hierbei entstehenden Sedimente werden Turbidite genannt.



**Abbildung 9.1** Ein computer-gezeichnetes Bild einer Trübestrom.

## Glimmer

Mineral, Schichtsilikate, wichtige Bestandteile der Granit und Gneis. Alle Glimmer zeigen aufgrund ihrer ausgezeichneten Spaltbreite ein Glitzern, ein Glimmern (daher die Name) auf glatten Flächen.

**Biotit:** dunkler, schwarz-braun Farbe, taflige Kristalle, ein- und aufgewachsen, hexagonaler Umriss. Aggregate blättrig, schuppig, dicht-körnig,  $K(Mg,Fe_3^{2+})(Al,Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH,F)_2$

- **Katzengold** Volkstümlich Bezeichnung sowohl für ausgebleichten, bronzefarbenen Biotit als auch für Pyrit.

**Muskovit:** heller, weisser Farbe, taflig plattige Kristalle, ein- und aufgewachsen, selten gut ausgebildet. Aggregate blättrig, dicht,  $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ . Vorkommen in metamorphen Gesteinen, auch da säurefest und verwitterungsbeständig, auch in Sanden.

- **Katzensilber** Volkstümlich Bezeichnung für silbrige glänzende Muskovit.

- **Glaukonit** ist ein grünliches Tonmineral das sehr langsam in marinen Sedimenten entsteht, zum Beispiel in Kalkstein wie er heute auf dem Pilatus<sup>12</sup> oder bei Illgau (Muotathal) zu finden ist.

**Serizit, Phlogopit, Phengit** sind auch Mineralien der Glimmergruppe, oft in Schiefergesteinen zu finden.

## Gneis

Gestein, Metamorph: gepresster und verzerrter Granit. Durch die plattenähnlich angeordneten Glimmermineralien wie Biotit in Ebenen spaltbar.

## Granit

Gestein, magmatisch: Geschmolzenes Sandstein oder Sedimentgestein, Hauptmineralien: Quarz, Feldspat (Kalifeldspat und Plagioklas) und Glimmer (Biotit). Neben (dunkel-) Mineralien: Hornblende, Pyroxen, Ilmenit).

## Kalk

Gestein, sedimentär: aus Calciumcarbonat ( $CaCO_3$ ), gebildet von Meerestieren als Gehäuse und Skelette. Verfestigtes Meeressediment.

## Rauhacke

Poröses gelblich-cremeweisses Gestein aus Dolomit ( $CaMg(CO_3)_2$ ), Anhydrit (Calciumsulfat  $CaSO_4$ ) / Gips (= Anhydrit+Wasser,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Ursprünglich wahrscheinlich auch mit Kalk und Salz (die «Löcher», die jetzt herausgewaschen sind). Entstanden in seichtem Meer, wo Salz mit Ebbe und Flut aus dem Meerwasser ausfällt (wie heute in Süd-Sardinien). Während Gipsstein eher eine weisse bis braun-graue Farbe hat, erkennt man Anhydritstein an der weiss-grauen, auch bläulichen oder rötlichen Färbung. Im Gegensatz zu Anhydrit ist Gips mit dem Fingernagel ritzbar.

---

<sup>12</sup>Zu besuchen auf der Chriesilochweg Richtung Klimsenhorn, Geowanderung «Pilatus-Klima», siehe [www.naturprozesse.com](http://www.naturprozesse.com).

## 10 Literatur

### Literatur

- FAGEL, Nathalie (2007): Clay minerals, deep circulation and climate. In: *Developments in Marine Geology*, 1, S. 139–184.
- FREY, Johann Dietrich (1967): *Geologie des Greinagebietes*. Dissertation, ETH Zürich.
- SCHMID, S. M. et al. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. In: *Eclogae geol. Helv.* 97, S. 93–117.
- SCHMUTZ, Hans-Ulrich (2005): *Acht geologische Exkursionen durch die Alpen*. Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben.
- SCHUMANN, Walter (2007): *Der große BLV Steine- und Mineralien-Führer*. 7. Auflage. München: BLV Buchverlag GmbH und Co. KG.
- SPILLMAN, Peter et al. (2011): *Geologie des Kantons Uri*. Altdorf: Naturforschende Gesellschaft Uri – Technischer Bericht.
- STÄMPFLI, G. M. und G. D. BOREL (2002): A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. In: *Earth and Planetary Science Letters*, 196, Nr. 1-2, S. 17–33.
- STOCKAR, R. (2007): *Geological Guide to the Breggia Gorge Park*. Breggia.
- WINDOM, H. L. (1976): Lithogenous material in marine sediments. In: J. P. RILEY und R. CHESTER (Hrsg.): *Chemical oceanography*. Band 5, New York: Academic Press, S. 103–135.