minærva

GL 2

SKRIPT

Exogene Prozesse und Landschaften

Erklärskript

Die Aufgaben 47–93 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Geographie – Leistungsfach Kursstufe

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe GL · Geographie-Leistungsfach

GL1	GL2	GL3	GL4	GL5	GL6	GL7	GL-K
Endogene Prozesse	Landschaften	Atmosphäre	Wasser, Böden	Klimawandel	Bevölkerung, Stadt	Disparitäten	Kompakt

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Geographie-Leistungsfach: sieben Themenskripte GL1–GL7 mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans er gehört und ob er zum Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung zählt.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.
Kompakt	GL-K: alle Fachbegriffe, Modelle und wichtigen Abbildungen auf wenigen Seiten, zum schnellen Wiederholen.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht 5
1 Verwitterung 6
1.1 Physikalische Verwitterung 6
1.2 Chemische Verwitterung 7
1.3 Biogene Verwitterung 8
1.4 Bedeutung für die Oberflächenformen 8
2 Vulkanismus: Magma und Ausbruchsarten 10
2.1 Wo Magma entsteht 10
2.2 Magma bestimmt den Ausbruch 10
2.3 Ausbruchsarten und Stärke 11
2.4 Vulkanische Förderprodukte 12
2.5 Vulkanismus über einem Hot Spot 12
3 Vulkanformen und Vulkanlandschaften 14
3.1 Schichtvulkan 14
3.2 Schildvulkan 14
3.3 Vulkanische Decke 15
3.4 Caldera 15
3.5 Maar 16
3.6 Vulkanlandschaften und ihre exogene Überprägung 17
4 Gletscher und Eiszeitalter 18
4.1 Das Eiszeitalter: Kalt- und Warmzeiten 18
4.2 Vom Schnee zum Gletschereis 18
4.3 Nährgebiet, Zehrgebiet und Massenbilanz 19
4.4 Wie Gletscher fließen 20
4.5 Gletschertypen 20
4.6 Glaziale Abtragung 21
4.6.1 Kar 21
4.6.2 Trogtal 21
5 Glaziale Serie und Periglazial 23
5.1 Moränen 23
5.2 Die glaziale Serie 23
5.3 Formen der Grundmoränenlandschaft 24
5.4 Jungmoräne und Altmoräne 25
5.5 Periglazial: das Land vor dem Eis 25
5.6 Nach dem Eis: das Postglazial 26
6 Flusslandschaft 27
6.1 Abtragung, Transport und Ablagerung 27
6.2 Talformen 28
6.2.1 Wie Flussterrassen entstehen 28
6.3 Mäander 29
6.4 Durchbruchstäler: Antezedenz und Epigenese 29
6.5 Flussanzapfung 30
6.6 Wasserfälle und Trockentäler 30
6.7 Flussmündungen: Delta und Ästuar 31
7 Küstenlandschaft 32
7.1 Brandung, Gezeiten und Meeresspiegel 32
7.2 Steilküste 32
7.3 Flachküste und Ausgleichsküste 33
7.4 Wattenmeerküste 33
7.5 Sturmflut und Küstenschutz 34
7.6 Glazial geprägte Küsten: Fjord, Förde, Schäre 34
8 Schichtstufenlandschaft 36

8.1 Voraussetzungen ... 36
8.2 Wie eine Schichtstufe entsteht ... 36
8.3 Das Südwestdeutsche Schichtstufenland ... 37
8.4 Reliefumkehr ... 37
9 Karstlandschaft ... 39
9.1 Korrosion: Kalk wird gelöst ... 39
9.2 Oberflächenformen ... 39
9.3 Unterirdischer Karst: Karstwasser und Höhlen ... 40
9.4 Sinterbildung: Kalk wird wieder abgeschieden ... 40
9.5 Karst im Vergleich der Klimazonen ... 40
10 Landschaftsgenese Südwestdeutschlands ... 42
10.1 Die Erdzeitalter ... 42
10.2 Paläozoikum: das Grundgebirge ... 42
10.3 Mesozoikum: das Deckgebirge ... 42
10.4 Känozoikum: Grabenbruch, Hebung, Schichtstufen ... 43
10.5 Quartär: die Glaziallandschaft ... 44

Worum es geht

Die Erdoberfläche sieht aus, als stünde sie still. Tatsächlich arbeiten an ihr ständig zwei Kräfte gegeneinander. Die **endogenen** Kräfte aus dem Erdinneren heben Gebirge, senken Gräben ein und fördern Magma an die Oberfläche; sie schaffen Relief. Die **exogenen** Kräfte – angetrieben von der Sonnenenergie und der Schwerkraft – greifen dieses Relief an: Gestein verwittert, Wasser, Eis und Wind tragen es ab, transportieren es und lagern es an anderer Stelle wieder ab. Jede Landschaft ist eine Momentaufnahme in diesem Wechselspiel.

Dieses Skript beginnt mit der Verwitterung, dem ersten Schritt jeder Abtragung. Danach folgen die sechs Landschaftstypen des Bildungsplans: Vulkan-, Glazial-, Fluss-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft. Für jede wird erklärt, welche Prozesse ihre typischen Oberflächenformen erzeugen, mit Raumbeispielen aus mehreren Erdteilen und immer wieder aus Baden-Württemberg. Das letzte Kapitel setzt das Gelernte zusammen: Wie sind Oberrheingraben, Schwarzwald, Schichtstufenland, Alb und Alpenvorland entstanden?

Der Bildungsplan verlangt nur *zwei* der sechs Landschaften. Das Skript bringt alle sechs, damit jede Auswahl abgedeckt ist. Die Vulkan- und die Glaziallandschaft sind Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung 2027 und deshalb besonders ausführlich. Die Plattentektonik, auf der die Vulkanlandschaft aufbaut, steht im Skript GL1; hier wird nur das Nötigste wiederholt.

> **Exogene Prozesse und Landschaften im Lehrplan.** Bildungsplan Geographie, Leistungsfach: 3.5.2.1 (3), (4), (5). Die Marken unter den Überschriften sagen genau, welcher Abschnitt zu welcher Teilkompetenz gehört.

Lehrplan-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans Geographie (Baden-Württemberg 2016, Leistungsfach, Abschnitt 3.5) der Abschnitt gehört, z. B. `BP 3.5.2.2 (1)` . Die Marke `Abi 2027` zeigt die Schwerpunkte der schriftlichen Abiturprüfung 2027. Sie wechseln von Jahr zu Jahr; alles andere bleibt Stoff des Leistungsfachs und kann mündlich geprüft werden.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jedes Kapitel endet mit den Fachbegriffen des Plans, die darin vorkommen, und mit einem Verweis auf passende Übungen in **noctua**.

1 Verwitterung

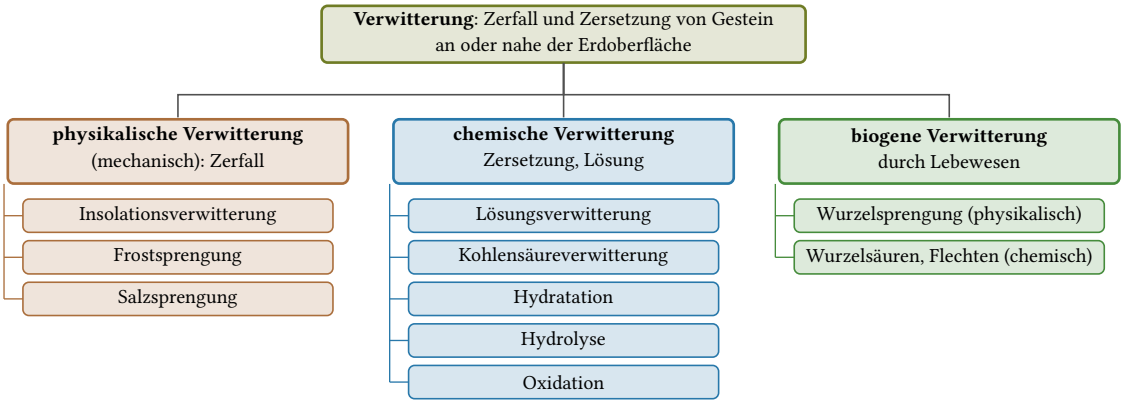
BP 3.5.2.1 (3)

Wer an einem Steinbruch, einem alten Grabstein oder einer Felswand genau hinsieht, findet Spuren des Zerfalls: abgeplatzte Schalen, mürbe Oberflächen, Rostflecken, Risse, in denen Pflanzen wurzeln. Gestein, das an die Erdoberfläche gelangt, ist dort nicht im Gleichgewicht. Es ist unter anderen Druck- und Temperaturbedingungen entstanden und trifft nun auf Luft, Wasser, Temperaturwechsel und Lebewesen.

Definition

Als **Verwitterungsprozess** (kurz Verwitterung) bezeichnet man den Zerfall und die Zersetzung von Gestein an Ort und Stelle, an oder nahe der Erdoberfläche. Die Verwitterung bewegt das Material nicht fort; das geschieht erst bei der Abtragung (Erosion, Denudation) durch Wasser, Eis, Wind oder Schwerkraft.

Die Verwitterung ist damit die Voraussetzung jeder Abtragung: Erst zerkleinertes oder gelockertes Gestein kann ein Fluss, ein Gletscher oder der Wind fortschaffen. Zugleich ist sie der Ausgangspunkt der Bodenbildung. Man unterscheidet drei Arten (Abbildung 28), die in der Natur fast immer zusammenwirken.



Alle Arten wirken meist gleichzeitig; welche überwiegt, hängt von Klima, Gestein und Relief ab.

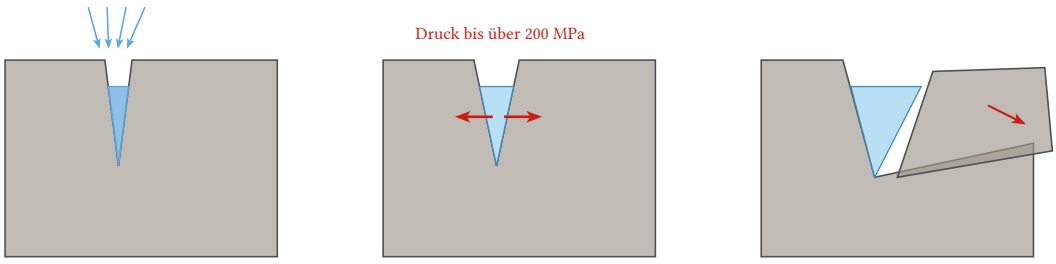
Abbildung 28: Übersicht über die Arten der Verwitterung und ihre Teilprozesse.

1.1 Physikalische Verwitterung

Bei der **physikalischen Verwitterung** (auch mechanische Verwitterung) zerfällt das Gestein in kleinere Stücke, ohne dass sich seine Minerale chemisch verändern. Aus einem Felsblock werden Schutt, Grus und Sand derselben Zusammensetzung. Ursache sind Spannungen im Gestein, die größer werden als sein Zusammenhalt.

Insolationsverwitterung. Die **Insolationsverwitterung** (Temperaturverwitterung) beruht auf dem täglichen Wechsel von Erwärmung und Abkühlung. In Trockengebieten heizt die Sonne Gesteinsoberflächen tagsüber auf über 60 °C auf, nachts kühlen sie unter dem wolkenlosen Himmel stark ab. Gestein leitet Wärme schlecht: Die äußeren Millimeter dehnen sich aus und ziehen sich zusammen, das Innere kaum. Hinzu kommt, dass sich die einzelnen Minerale verschieden stark ausdehnen – dunkle Minerale erwärmen sich stärker als helle. So lockert sich das Mineralgefüge, Gesteinsschalen platzen ab (Abschuppung), Blöcke zerspringen (Kernsprünge). Laborversuche zeigen allerdings, dass reine Temperaturwechsel oft erst nach sehr vielen Zyklen wirken; in der Natur verstärkt Feuchtigkeit (Tau, seltene Niederschläge) den Vorgang deutlich.

Frostsprengung. Gefriert Wasser, nimmt sein Volumen um etwa 9 % zu. Ist das Wasser in einer Kluft oder Pore eingeschlossen, entsteht ein Druck, der theoretisch Werte von über 200 MPa erreichen kann – weit mehr, als Gestein aushält (Abbildung 29). Wirksam ist die **Frostsprengung** vor allem dort, wo die Temperatur häufig um den Gefrierpunkt pendelt und genug Wasser vorhanden ist: im Hochgebirge, in subpolaren Gebieten und während der Kaltzeiten in ganz Mitteleuropa. Entscheidend ist also nicht die tiefste Temperatur, sondern die Zahl der Frostwechsel. Typische Ergebnisse sind kantiger Frostschutt, Schutthalden am Fuß von Felswänden und Blockmeere.



a) Wasser dringt in die Kluft b) Gefrieren: Volumen + 9 % c) Kluft erweitert, Stück bricht ab

Abbildung 29: Frostsprengung (schematisch): Gefrierendes Wasser dehnt sich um etwa 9 % aus und weitet die Kluft, bis ein Stück abbricht.

Salzsprengung. In Trockengebieten und an Küsten verdunstet salzhaltiges Wasser in den Poren des Gesteins. Wachsende Salzkristalle üben einen Kristallisationsdruck aus; nehmen sie Wasser auf, dehnen sie sich zusätzlich aus. Die **Salzsprengung** lockert so Korn um Korn. Es entstehen Wabenverwitterung und Hohlformen (Tafoni) an Felswänden, in Wüsten auch an Felsfüßen. Dass der Vorgang kräftig ist, sieht man an Bauwerken: Streusalz und aufsteigende Bodenfeuchte zerstören Sandsteinsockel alter Kirchen oft schneller als jede Frosteinwirkung.

1.2 Chemische Verwitterung

Bei der **chemischen Verwitterung** werden die Minerale selbst umgewandelt oder gelöst. Das wichtigste Agens ist Wasser, das gelöste Gase (CO_2, O_2) und Säuren mitbringt. Chemische Reaktionen laufen umso schneller ab, je wärmer es ist (als Faustregel etwa zwei- bis dreimal so schnell je 10 K Temperaturerhöhung), und sie brauchen Wasser. Deshalb ist die chemische Verwitterung in den immerfeuchten Tropen am stärksten.

Lösungsverwitterung. Einige Minerale lösen sich direkt in Wasser, vor allem Steinsalz (NaCl) und Gips ($CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$). Die **Lösungsverwitterung** lässt Salzlager im Untergrund schrumpfen; darüber sinkt das Gelände ein (Erdfälle, Senken über ausgelaugtem Gipskeuper).

Kohlensäureverwitterung. Kalkstein ($CaCO_3$) ist in reinem Wasser kaum löslich. Nimmt Wasser aber Kohlenstoffdioxid aus der Luft und vor allem aus der Bodenluft auf, entsteht Kohlensäure, die Kalk in gut lösliches Calciumhydrogencarbonat überführt:

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad \leftrightarrow \quad Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

Die **Kohlensäureverwitterung** ist umkehrbar: Entweicht CO_2 wieder, fällt Kalk aus. Auf diesem Gleichgewicht beruht die gesamte Karstlandschaft (Abschnitt 9). Kaltes Wasser kann zwar mehr CO_2 lösen als warmes, entscheidend ist aber das Angebot: Unter dichter Vegetation reichern Wurzelatmung und Zersetzung die Bodenluft mit CO_2 an, deshalb lösen die Gewässer warm-feuchter Gebiete besonders viel Kalk.

Hydratation. Bei der **Hydratation** lagern Minerale Wasser in ihr Kristallgitter ein und vergrößern dabei ihr Volumen. Das bekannteste Beispiel ist die Umwandlung von Anhydrit ($CaSO_4$) in Gips; das Volumen wächst dabei um rund 60 %. Im Gipskeuper Baden-Württembergs ist das ein Problem für Bauwerke: In Staufen im Breisgau gelangte nach Erdwärmebohrungen im Jahr 2007 Grundwasser an Anhydrit; der Untergrund quoll, Teile der Altstadt hoben sich um mehrere Dezimeter, weit über 200 Häuser bekamen Risse. Hydratation lockert außerdem das Gefüge und bereitet so andere Prozesse vor.

Hydrolyse. Die **Hydrolyse** ist die wichtigste Verwitterung der Silikatgesteine, also von Granit, Gneis oder Basalt. Die Wassermoleküle sind teilweise in H^+- und OH^--Ionen gespalten; die H^+-Ionen verdrängen Kalium-, Natrium- und Calcium-Ionen aus dem Kristallgitter der Feldspäte. Zurück bleiben neu gebildete Tonminerale (z. B. Kaolinit), gelöste Ionen werden fortgeführt. Aus festem Granit wird so ein lockerer Grus und schließlich toniges Material. In den feuchten Tropen reicht diese Zersatzzone viele Zehnermeter tief. In Mitteleuropa zeigt die **Wollsackverwitterung** von Granit und ähnlichen Tiefengesteinen (z. B. im Schwarzwald, im Fichtelgebirge, im Felsenmeer des Odenwalds aus Quarzdiorit) die Wirkung: Die Verwitterung greift entlang der Klüfte an, die Kanten der Blöcke runden sich ab, und nach Abtragung des Gruses bleiben gerundete Blöcke übereinander liegen.

Oxidation. Eisenhaltige Minerale reagieren mit dem Sauerstoff des Wassers und der Luft. Bei der **Oxidation** wird zweiwertiges Eisen zu dreiwertigem; es entstehen Eisenoxide und -hydroxide, die das Gestein rot (Hämatit) oder gelbbraun (Goethit) färben. Die Rotfärbung tropischer Böden und vieler Wüstengesteine geht darauf zurück, ebenso die braune „Verwitterungsrinde“ eisenhaltiger Sandsteine. Weil das Kristallgitter dabei zerfällt, ist Oxidation zugleich ein Angriff auf das Gestein.

1.3 Biogene Verwitterung

Lebewesen verwittern Gestein auf beide Arten. Physikalisch wirkt die **Wurzelsprengung**: Wurzeln wachsen in Klüfte hinein, verdicken sich und weiten die Spalten; ein umgestürzter Baum reißt mit seinem Wurzelteller Gestein heraus. Chemisch wirken Wurzeln, Flechten, Pilze und Mikroorganismen über ausgeschiedene organische Säuren und über das CO_2 ihrer Atmung; Flechten können sogar blanken Fels anätzen. Die **biogene Verwitterung** ist also keine dritte Kraft neben den beiden anderen, sondern beschreibt, *wer* die physikalischen und chemischen Prozesse auslöst.

Merksatz

Physikalische Verwitterung zerkleinert das Gestein (Zerfall), **chemische Verwitterung** wandelt die Minerale um oder löst sie (Zersetzung), **biogene Verwitterung** sind physikalische und chemische Vorgänge, die von Lebewesen ausgehen. Welche Art überwiegt, hängt vor allem vom Klima (Temperatur, Feuchte, Frostwechsel), vom Gestein (Minerale, Klüftung, Porosität) und von der Vegetation ab.

1.4 Bedeutung für die Oberflächenformen

Weil die Verwitterung vom Klima abhängt, unterscheiden sich die Landschaften der Klimazonen schon in ihrem „Rohstoff“ (Abbildung 30):

- In **polaren und subpolaren Gebieten** und im Hochgebirge herrscht die Frostsprengung vor. Es entsteht grober, kantiger Schutt; chemisch verwittert wenig, die Böden bleiben flach.
- In den **feuchten Tropen** reicht die chemische Verwitterung tief. Feste Gesteine verwandeln sich in mächtige, tonreiche Zersatzdecken; Abtragung und Hangrutschungen greifen an weichem Material an.
- In **Wüsten** arbeiten Insolations- und Salzsprengung; sie liefern Sand und Schutt, den der seltene Starkregen und der Wind verlagern.
- In den **mittleren Breiten** wirken beide Arten mäßig zusammen; hier prägen die Spuren der Kaltzeiten (Frostschutt, Löss) das Relief bis heute.

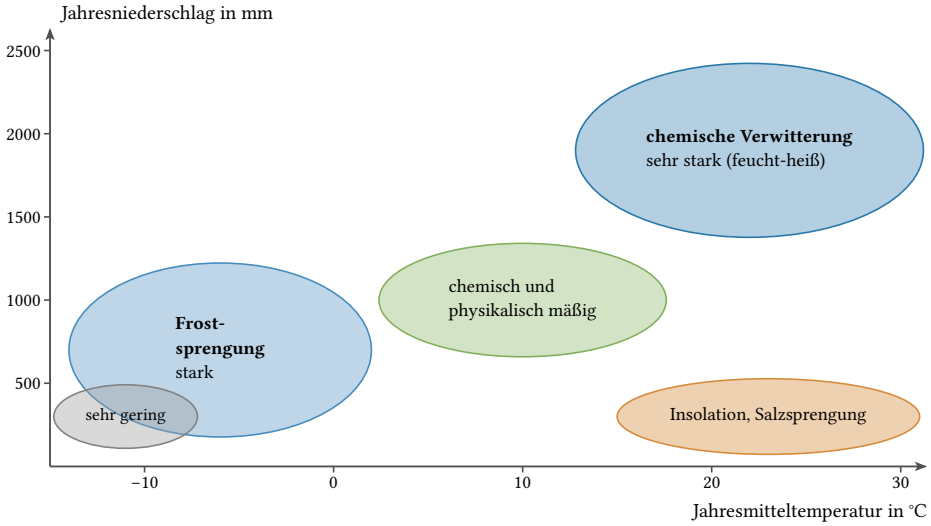


Abbildung 30: Vorherrschende Verwitterung in Abhängigkeit von Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag (schematisch, Idee nach Peltier 1950).

Die zweite große Wirkung ist die **selektive Verwitterung**: Verschiedene Gesteine verwittern verschieden schnell. Widerständige Gesteine bleiben als Härtlinge stehen, weiche werden ausgeräumt. Auf diesem Prinzip beruhen die Schichtstufen (Abschnitt 8), die Härtlinge des Hegaus und die Kegelberge des Karsts. Klüfte und Schichtfugen sind Bahnen, auf denen Wasser eindringt; entlang dieser Schwächezonen setzen Verwitterung und Abtragung an, deshalb zeichnen Täler und Felsformen oft das Kluftnetz nach. Schließlich bestimmt die Verwitterung über das Material, wie Hänge geformt sind: Grober Frostschutt bildet steile Schutthalden, feinkörniger Zersatz flache, zum Rutschen neigende Hänge.

Beispiel 1

Grabsteine und der Kölner Dom. Auf Friedhöfen kann man Verwitterung datieren: Inschriften aus Marmor (Kalk) verlieren in der sauren Stadtluft in wenigen Jahrzehnten ihre Kanten, Inschriften aus Granit bleiben über Jahrhunderte lesbar. Am Kölner Dom ersetzt die Dombauhütte seit Jahrzehnten verwitterte Sandsteine; Schwefeldioxid aus der Luft bildete mit dem Kalk im Bindemittel Gips, der in den Poren auskristallisierte und den Stein von innen sprengte – Lösung, Hydratation und Salzsprengung in einem.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
biogene Verwitterung: physikalische und chemische Verwitterung durch Lebewesen (Wurzeln, Flechten, Mikroorganismen)
chemische Verwitterung: Umwandlung oder Lösung der Minerale durch Wasser und darin gelöste Stoffe
Frostsprengung: Weitung von Klüften durch gefrierendes Wasser (Volumenzunahme etwa 9 %)
Hydratation: Einlagerung von Wasser ins Kristallgitter mit Volumenzunahme, z. B. Anhydrit zu Gips
Hydrolyse: Zersetzung von Silikaten durch H^+- und OH^--Ionen des Wassers, es entstehen Tonminerale
Insolationsverwitterung: Zerfall durch tägliche Temperaturwechsel und ungleiche Ausdehnung der Minerale
Kohlensäureverwitterung: Lösung von Kalk durch kohlensäurehaltiges Wasser, umkehrbar
Lösungsverwitterung: direkte Lösung leicht löslicher Minerale wie Steinsalz und Gips
Oxidation: Reaktion eisenhaltiger Minerale mit Sauerstoff, färbt rot bis braun
physikalische Verwitterung: mechanischer Zerfall ohne chemische Veränderung der Minerale
Salzsprengung: Lockerung durch Kristallisationsdruck wachsender Salzkristalle
Verwitterungsprozess: Zerfall und Zersetzung von Gestein an Ort und Stelle
Wurzelsprengung: Weitung von Klüften durch wachsende Wurzeln

Üben: **noctua** ↗

2 Vulkanismus: Magma und Ausbruchsarten

BP 3.5.2.1 (5) Abi 2027

Wahlpflicht: Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Die **Vulkan- und die Glaziallandschaft** sind Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung 2027.

Vulkane sind die sichtbarste Form endogener Kräfte: Innerhalb von Stunden kann ein Ausbruch eine Landschaft umgestalten, ganze Inseln entstehen lassen oder einen Berggipfel wegsprengen. Ob ein Vulkan ruhig Lava ausfließen lässt oder explosiv ausbricht und welche Form er aufbaut, hängt fast ganz von einer Größe ab: der Beschaffenheit seines Magmas. Dieses Kapitel klärt die Prozesse, das nächste die Formen.

2.1 Wo Magma entsteht

Der Erdmantel ist fest, auch wenn er sich über lange Zeiträume plastisch verformt. Gestein schmilzt dort nur teilweise auf, wenn sich eine von drei Bedingungen ändert (die Plattengrenzen selbst sind Thema in GL1):

- **Druckentlastung:** Steigt heißes Mantelgestein auf, sinkt der Druck schneller als die Temperatur; dadurch sinkt die Schmelztemperatur unter die Gesteinstemperatur. So entsteht Magma an **divergenten Plattengrenzen** (Mittelozeanische Rücken, kontinentale Gräben) und über **Hot Spots**.
- **Wasserzufuhr:** An **Subduktionszonen** taucht eine ozeanische Platte ab. Mit zunehmender Tiefe gibt sie Wasser ab, das in den darüberliegenden Mantelkeil aufsteigt und dessen Schmelztemperatur senkt – wie Salz den Gefrierpunkt von Eis.
- **Temperaturerhöhung:** Aufsteigendes heißes Magma kann die Kruste aufschmelzen, durch die es sich bewegt. Dabei wird das Magma kieselsäurereicher.

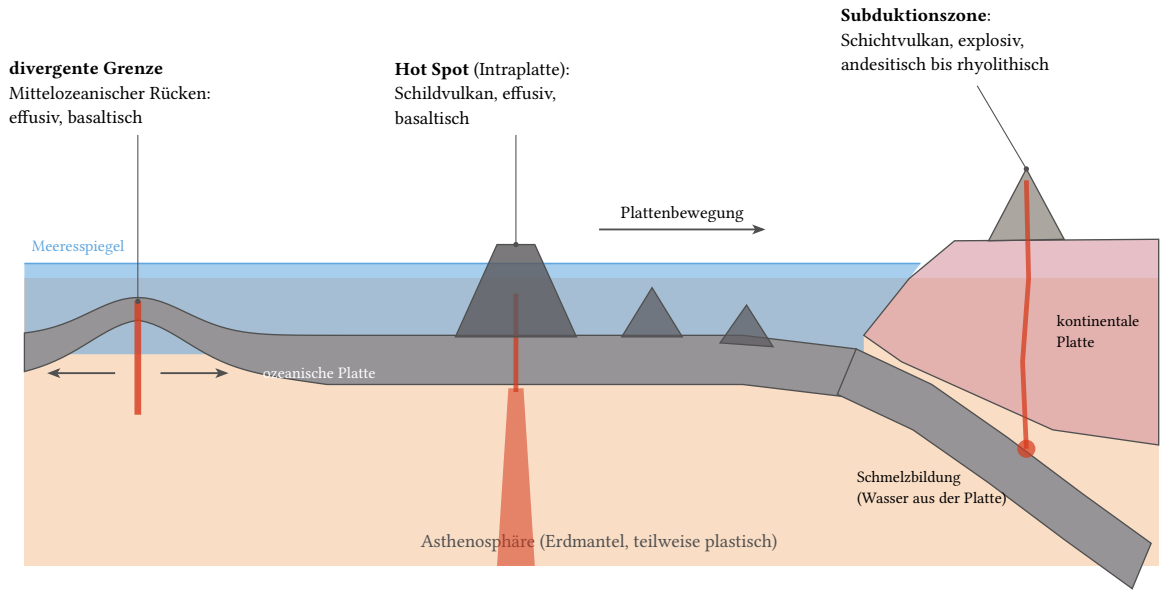


Abbildung 31: Vulkanismus und Plattentektonik im Überblick (schematisch, nicht maßstäblich; ausführlich in GL1).

Rund 1350 Vulkane gelten an Land und auf Inseln als potenziell aktiv, etwa drei Viertel davon liegen am Pazifischen Feuerring, also an Subduktionszonen. Den größten Teil des Magmas fördern jedoch die Mittelozeanischen Rücken – unbemerkt am Meeresboden.

2.2 Magma bestimmt den Ausbruch

Magma ist eine Gesteinsschmelze mit gelösten Gasen und Kristallen. Gelangt es an die Oberfläche, heißt es **Lava**. Seine wichtigste Eigenschaft ist die **Viskosität** (Zähflüssigkeit). Sie hängt vor allem vom Anteil an Kieselsäure (SiO_2) ab: Siliciumdioxid bildet in der Schmelze lange Ketten und Netze, die das Fließen behindern. Außerdem ist kühleres Magma zäher.

	basaltisch	andesitisch	rhyolithisch (dazitisch)
SiO_2-Anteil	etwa 45–52 %	etwa 52–63 %	über 63 %
Temperatur	1100–1200 °C	900–1100 °C	700–900 °C
Viskosität	gering (dünnflüssig)	mittel	hoch (zähflüssig)
Gasgehalt, Entgasung	gering, Gas entweicht leicht	mittel	hoch, Gas bleibt gefangen
typische Lage	Rücken, Hot Spot	Subduktionszone	Subduktion, kontinentale Hot Spots
Ausbruch	effusiv	gemischt	explosiv

Tabelle 6: Magmatypen und ihre Eigenschaften (gerundete Richtwerte).

Der Schlüssel zum Verständnis ist das Gas. Im Magma ist unter hohem Druck Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid gelöst – wie Kohlensäure in einer geschlossenen Sprudelflasche. Steigt das Magma auf, sinkt der Druck, und das Gas bildet Blasen.

Definition

Effusiver Vulkanismus: In dünnflüssigem Magma steigen die Gasblasen leicht auf und entweichen; die Lava fließt ruhig aus (Lavaströme, Lavafontänen, Lavaseen). **Explosiver Vulkanismus:** In zähflüssigem Magma können die Blasen nicht entweichen. Sie dehnen sich aus, bis die Schmelze zerreißt; Magma und Gas schießen als Gemisch aus Gesteinsfetzen, Asche und Gas aus dem Schlot.

Der **effusive Vulkanismus** ist für Menschen meist gut kalkulierbar: Basaltische Lavaströme fließen zwar mit einigen Kilometern pro Stunde, an steilen Hängen auch schneller, man kann ihnen aber ausweichen. Sie zerstören Straßen und Häuser, fordern jedoch selten Todesopfer. Erstarrt dünnflüssige Lava mit glatter, gewundener Oberfläche, spricht man von **Stricklava** (Pāhoehoe); zäher, abkühlender Lava bricht die Kruste zu scharfkantigen Brocken auf (**Brockenlava**, ʻaʻā).

Der **explosive Vulkanismus** ist dagegen die gefährlichste Form. Eine Eruptionssäule kann über 30 km hoch in die Stratosphäre steigen. Bricht sie zusammen oder quillt das Gemisch über den Kraterrand, rasen **pyroklastische Ströme** (Glutwolken) aus Gas, Asche und Gesteinsbrocken mit über 100 km pro Stunde und mehreren hundert Grad die Flanken hinab. Sie haben 79 n. Chr. Pompeji und Herculaneum am Vesuv begraben und 1902 auf Martinique die Stadt Saint-Pierre am Mont Pelée ausgelöscht.

2.3 Ausbruchsarten und Stärke

Zwischen ruhigem Ausfließen und gewaltiger Explosion gibt es Übergänge. Nach typischen Vulkanen benennt man die Ausbruchsarten:

Ausbruchsart	Merkmale	Beispiele
hawaiianisch	dünnflüssige Lava, Lavafontänen und -ströme, kaum Asche	Kīlauea, Mauna Loa (Hawaiʻi), Spalteneruptionen auf Island
strombolianisch	rhythmische, kleine Explosionen, Schlacken und Bomben	Stromboli (Italien), viele Schlackenkegel der Eifel
vulkanianisch	kurze, heftige Explosionen, die einen Pfropfen im Schlot sprengen; viel Asche	Vulcano (Italien), Sakurajima (Japan)
plinianisch	lang anhaltende, sehr hohe Eruptionssäule, Bims, pyroklastische Ströme	Vesuv 79 n. Chr., Pinatubo 1991, Laacher See vor rund 13 000 Jahren

Tabelle 7: Ausbruchsarten, geordnet nach zunehmender Explosivität.

Die Stärke explosiver Ausbrüche misst der **Vulkanexplosivitätsindex** (VEI). Er beruht vor allem auf dem Volumen des ausgeworfenen Materials und ist logarithmisch: Jede Stufe ab VEI 2 bedeutet etwa das Zehnfache an Tephra. Der Ausbruch des Eyjafjallajökull auf Island 2010, der wochenlang den Flugverkehr über Europa störte, erreichte VEI 4, der Mount St. Helens 1980 VEI 5, der Pinatubo 1991 VEI 6. Die stärksten bekannten Ausbrüche der letzten Jahrhunderte waren der Tambora 1815 (VEI 7; das folgende „Jahr ohne Sommer“ 1816 brachte Missernten in Europa und Nordamerika) und, weit zurück, der Yellowstone vor rund 630 000 Jahren (VEI 8).

Beispiel 2

Pinatubo 1991 – ein Vulkan kühlt die Erde. Der Pinatubo auf den Philippinen schleuderte im Juni 1991 rund 15 bis 20 Millionen Tonnen Schwefeldioxid in die Stratosphäre. Daraus bildeten sich winzige Schwefelsäuretröpfchen (Aerosole), die Sonnenlicht zurückstreuten. Die mittlere Temperatur der Nordhalbkugel sank 1992 um etwa 0,5 K. Die Vorwarnung durch Vulkanologen und die rechtzeitige Evakuierung retteten zehntausende Menschenleben.

2.4 Vulkanische Förderprodukte

Ein Vulkan fördert dreierlei: Gase, Lava und Lockermaterial. Diese **vulkanischen Förderprodukte** bestimmen, welche Formen und Gesteine entstehen.

- **Gase:** Mit Abstand am meisten Wasserdampf, dazu Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Chlorwasserstoff. CO_2 ist schwerer als Luft und kann sich in Senken sammeln – 1986 erstickten am Nyos-See in Kamerun rund 1700 Menschen, als eine CO_2-Wolke aus dem Kratersee ins Tal floss.
- **Lava:** Erstarrt sie, entstehen Ergussgesteine (Vulkanite) wie **Basalt**, Andesit oder Rhyolith. Kühlt Basalt langsam und gleichmäßig ab, zieht er sich zusammen und bildet die bekannten sechseckigen **Basaltsäulen**.
- **Pyroklastika (Tephra):** Lockermaterial, das bei explosiven Ausbrüchen in die Luft geschleudert wird. Man ordnet es nach der Korngröße (Abbildung 32). Hochaufgeschäumtes, erstarrtes Magma mit vielen Gasblasen ist **Bims**; er schwimmt auf Wasser. Verfestigt sich Asche, entsteht **Tuff**; Ablagerungen pyroklastischer Ströme nennt man **Ignimbrit**.

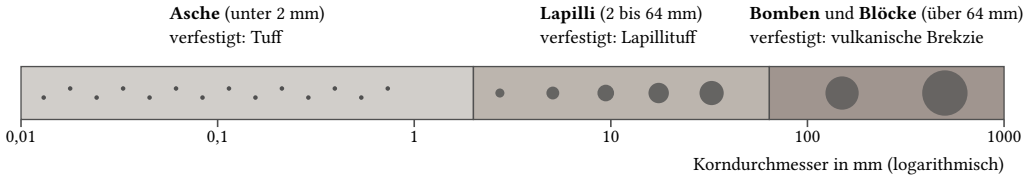


Abbildung 32: Pyroklastika nach ihrer Korngröße.

Lockeres Material an steilen Vulkanhängen ist auch nach dem Ausbruch gefährlich: Starkregen oder geschmolzener Gipfelschnee mobilisieren es zu **Laharen**, Schlammströmen mit der Dichte von nassem Beton. 1985 zerstörte ein Lahar des Nevado del Ruiz in Kolumbien die Stadt Armero; rund 23 000 Menschen starben.

2.5 Vulkanismus über einem Hot Spot

Nicht jeder Vulkan liegt an einer Plattengrenze. Über einem **Hot Spot** steigt ein schlauchförmiger Strom heißen Mantelmaterials (Plume) auf, vermutlich aus großer Tiefe. Der Hot Spot gilt als weitgehend ortsfest, die Lithosphärenplatte darüber bewegt sich. So entsteht eine Kette von Vulkanen, die in Bewegungsrichtung der Platte immer älter werden (Abbildung 33). Die Theorie dazu und ihre Bedeutung für die Plattentektonik stehen in GL1.

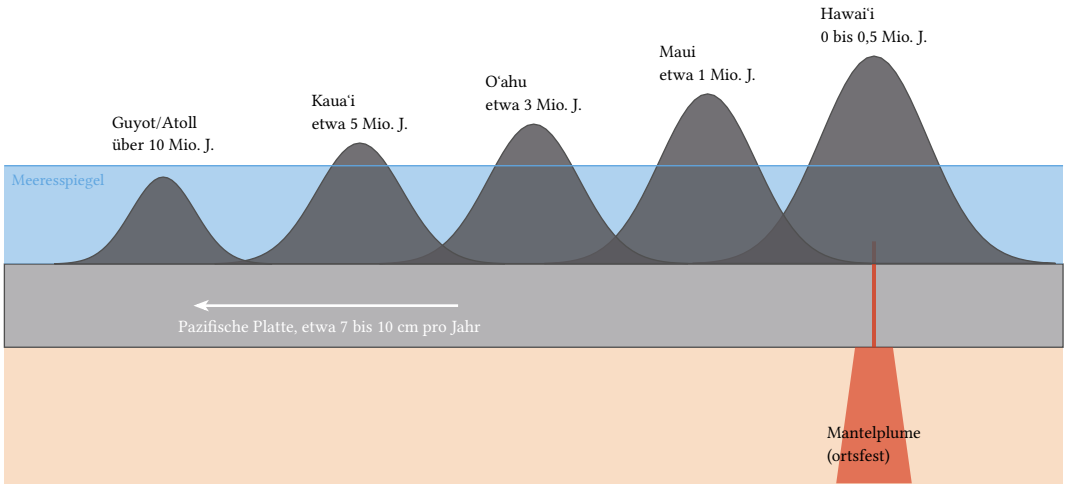


Abbildung 33: Hot-Spot-Kette, Modell nach Hawai'i (schematisch, überhöht; Alter gerundet). Die Platte wandert nach links, der Plume bleibt.

Auf Hawai'i lässt sich die Landschaftsentwicklung an der Kette ablesen: Die Insel Hawai'i über dem Hot Spot wächst noch, ihre Schildvulkane sind kaum zerschnitten. Weiter nordwestlich sind die Inseln älter: Kaua'i ist von tiefen Tälern

und steilen Küstenklippen zerfurcht (Nā Pali, Waimea Canyon). Noch ältere Vulkane sind unter den Meeresspiegel gesunken – die Lithosphäre kühlt ab und sinkt ein, die Brandung kappt die Gipfel. Es bleiben flache Tiefseeberge (Guyots) oder, in tropischen Meeren, Atolle aus Korallenkalk. Endogene Prozesse bauen die Vulkane auf, exogene bauen sie wieder ab – an einer Hot-Spot-Kette sieht man beides nebeneinander.

Hot Spots gibt es auch unter Kontinenten: Unter dem Yellowstone-Nationalpark (USA) liegt eine riesige Magmakammer, deren Ausbrüche Calderen hinterlassen haben (Abschnitt 3). Island ist ein Sonderfall: Hier liegt ein Hot Spot unter dem Mittelatlantischen Rücken, deshalb ragt der Rücken über den Meeresspiegel.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
effusiver Vulkanismus: ruhiges Ausfließen dünnflüssiger, gasarmer Lava
explosiver Vulkanismus: Ausbruch zähflüssigen, gasreichen Magmas, das in Asche und Brocken zerrissen wird
Hot Spot: ortsfeste Aufstiegszone heißen Mantelmaterials unter einer wandernden Platte; Vulkankette mit Altersfolge
vulkanische Förderprodukte: Gase, Lava und Pyroklastika (Asche, Lapilli, Bomben, Bims)

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Vulkantypen: effusiv oder explosiv** ↗

3 Vulkanformen und Vulkanlandschaften

BP 3.5.2.1 (5) Abi 2027

Wahlpflicht: Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Die **Vulkan- und die Glaziallandschaft** sind Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung 2027.

Die **Vulkanform** ist das Ergebnis aus drei Faktoren: der Viskosität des Magmas, der Art der Förderung (aus einem zentralen Schlot oder aus Spalten, ruhig oder explosiv) und der Zahl der Ausbrüche. Ein Vulkan, der nur einmal ausbricht (monogenetisch), bleibt klein; einer, der über Jahrtausende immer wieder aktiv ist (polygenetisch), wächst zu einem Großvulkan. Danach setzt die Abtragung an und formt die Vulkanlandschaft weiter.

3.1 Schichtvulkan

Ein **Schichtvulkan** (Stratovulkan) baut sich aus einem Wechsel von Lavaströmen und Lagen aus Tephra auf (Abbildung 34). Sein zähflüssiges, andesitisches bis dazitisches Magma fließt nicht weit; Asche und Lapilli fallen nahe dem Krater nieder. So entsteht ein steiler, oben bis über 30° geneigter Kegel mit konkav geschwungenen Flanken – die klassische „Vulkanform“ von Fuji (3776 m), Vesuv, Popocatépetl oder Ätna. Die Lavalagen wirken wie ein Gerüst, das die lockeren Tephralagen zusammenhält.

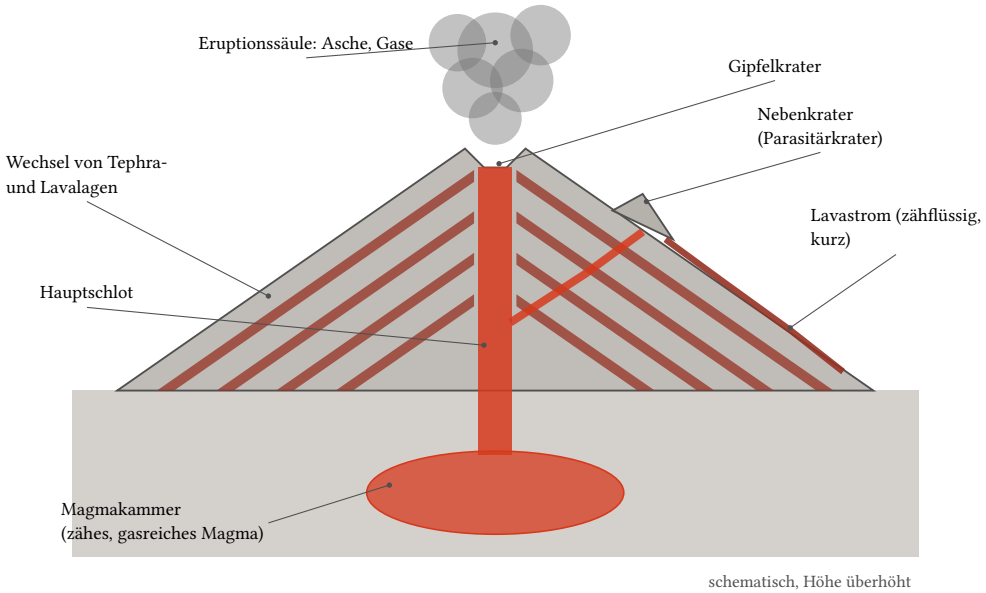


Abbildung 34: Schichtvulkan im Querschnitt (schematisch, überhöht).

Schichtvulkane stehen über Subduktionszonen: an der Westküste Amerikas (Anden, Kaskaden), in Japan, Indonesien, auf den Philippinen und in Italien. Zwischen den Ausbrüchen liegen oft Jahrhunderte. In dieser Zeit verstopft erstarrtes Magma den Schlot, und unter dem Pfropfen sammelt sich Gas. Deshalb sind Schichtvulkane so gefährlich: Ihre Ausbrüche beginnen häufig explosiv, und zwischen den Ausbrüchen siedeln Menschen auf den fruchtbaren Hängen. Wird ein Hang durch aufsteigendes Magma aufgewölbt und instabil, kann er abrutschen – so 1980 am Mount St. Helens (USA): Ein gewaltiger Bergsturz legte die Magmakammer seitlich frei, eine seitliche Explosion verwüstete rund 600 km² Wald, der Gipfel verlor etwa 400 m Höhe.

3.2 Schildvulkan

Ein **Schildvulkan** entsteht aus dünnflüssiger, basaltischer Lava, die weit fließt, bevor sie erstarrt. Tausende übereinanderliegende Lavaströme bauen einen flachen, sehr breiten Vulkan mit Hangneigungen von meist nur wenigen Grad auf – im Profil sieht er aus wie ein liegender Schild. Schildvulkane sind die größten Vulkane der Erde: Der Mauna Loa auf Hawai'i erreicht 4169 m über dem Meer, vom Meeresboden aus gemessen ist er fast 9 km hoch. Weil sein Fuß so breit ist, wirkt er trotzdem unscheinbar (Abbildung 35).

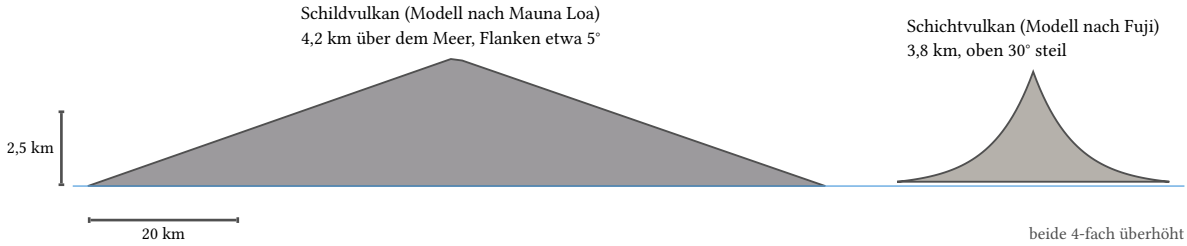


Abbildung 35: Schildvulkan und Schichtvulkan im selben Maßstab (Modellprofile, 4-fach überhöht).

Schildvulkane stehen über Hot Spots (Hawai'i, Galápagos, Réunion) und auf Island. Ihre Ausbrüche sind meist effusiv; auf ihren Flanken öffnen sich Spalten, aus denen Lavavorhänge und Lavaströme austreten.

3.3 Vulkanische Decke

Fördern lange Spalten über Jahrtausende riesige Mengen dünnflüssiger Basaltlava, entstehen keine Berge, sondern **vulkanische Decken** (Plateaubasalte, Trapp). Lavastrom legt sich über Lavastrom, bis Flächen von Hunderttausenden Quadratkilometern bedeckt sind. Die Abtragung schneidet in die Decken Stufen ein, weil die festen inneren Teile der Lavaströme steile Wände, die porösen Grenzlagen dazwischen flache Absätze bilden; daher der schwedische Name „trapp" (Treppe), Abbildung 36.

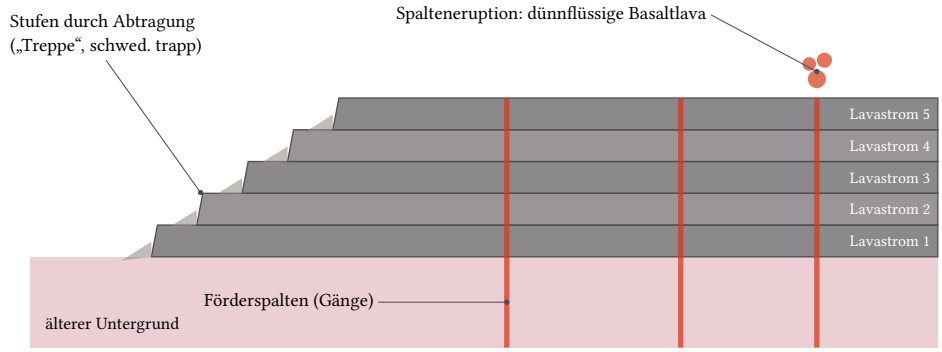


Abbildung 36: Vulkanische Decke aus übereinanderliegenden Lavaströmen (schematisch).

Beispiele sind der Dekkan-Trapp in Indien (am Ende der Kreidezeit vor rund 66 Millionen Jahren), der Sibirische Trapp (an der Grenze von Perm und Trias vor rund 252 Millionen Jahren) und das Columbia-Plateau im Nordwesten der USA. Auf Island entstehen solche Decken noch heute: Bei der Laki-Spalteneruption 1783/84 floss Lava aus einer etwa 27 km langen Spaltenreihe; giftige Gase und Hungersnot töteten etwa ein Fünftel der Bevölkerung Islands. Die beiden großen Trapps fallen zeitlich mit Massenaussterben zusammen – die enormen Gasmengen dürften das Klima der Erde verändert haben.

3.4 Caldera

Eine **Caldera** (spanisch „Kessel") ist eine große, meist kreisrunde Einbruchsform mit steilen Wänden und einem Durchmesser von einem bis über 50 Kilometern. Sie entsteht, wenn ein gewaltiger Ausbruch die Magmakammer so weit entleert, dass ihr Dach nachgibt und einbricht (Abbildung 37). Eine Caldera ist also kein besonders großer Krater: Ein Krater ist die Öffnung des Schlots, eine Caldera ist eingebrochenes Gelände.

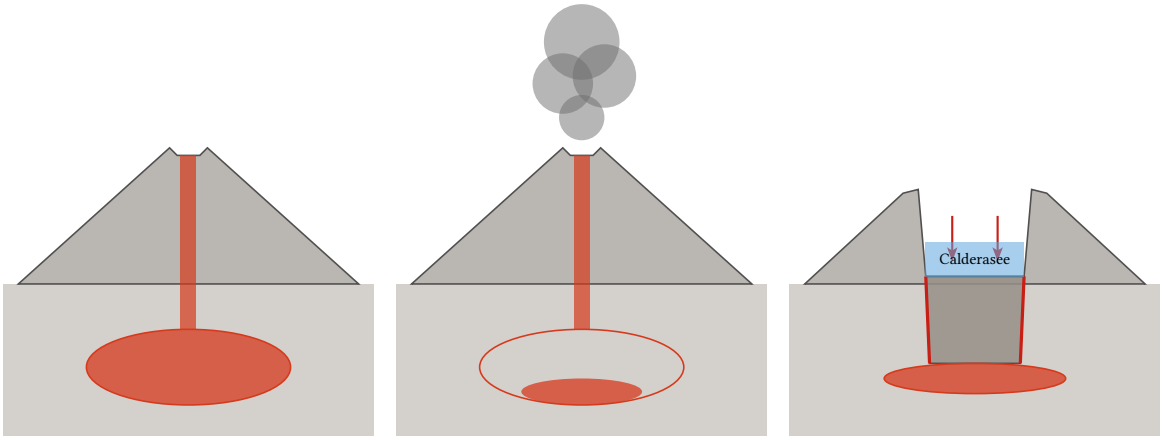


Abbildung 37: Entstehung einer Einsturzcaldera (schematisch).

Häufig füllt sich die Caldera mit Wasser. Der Crater Lake in Oregon (USA) liegt in der Caldera des Mount Mazama, der vor rund 7700 Jahren ausbrach. Die Inselgruppe Santorin in der Ägäis ist der Rand einer teilweise vom Meer überfluteten Caldera; der minoische Ausbruch in der Bronzezeit sprengte die damalige Insel. Wächst in der Caldera ein neuer Vulkan, wie der Vesuv innerhalb des älteren Somma-Rings, zeigt das, dass das Magmasystem weiterlebt. Die größten Calderen haben Supervulkane wie Yellowstone (etwa 50 mal 70 km); kleiner, aber dicht besiedelt sind die Phlegräischen Felder bei Neapel (etwa 12 bis 15 km), in denen sich der Boden seit Jahrzehnten hebt und senkt (Bradyseismos).

3.5 Maar

Ein **Maar** ist eine trichterförmige Hohlform, die tiefer liegt als das umgebende Gelände und von einem niedrigen Wall aus Tuff umgeben ist (Abbildung 38). Es entsteht nicht durch Aufschüttung, sondern durch Explosion: Aufsteigendes Magma trifft auf Grundwasser, das schlagartig verdampft. Diese Wasserdampfexplosionen (phreatomagmatische Explosionen) wiederholen sich, sprengen Nebengestein heraus und fräsen sich trichterförmig in die Tiefe. Unter dem Krater bleibt ein mit Gesteinstrümmern gefüllter Schlot, das **Diatrem**. Füllt sich der Trichter mit Wasser, entsteht ein Maarsee; verlandet er, ein Trockenmaar.

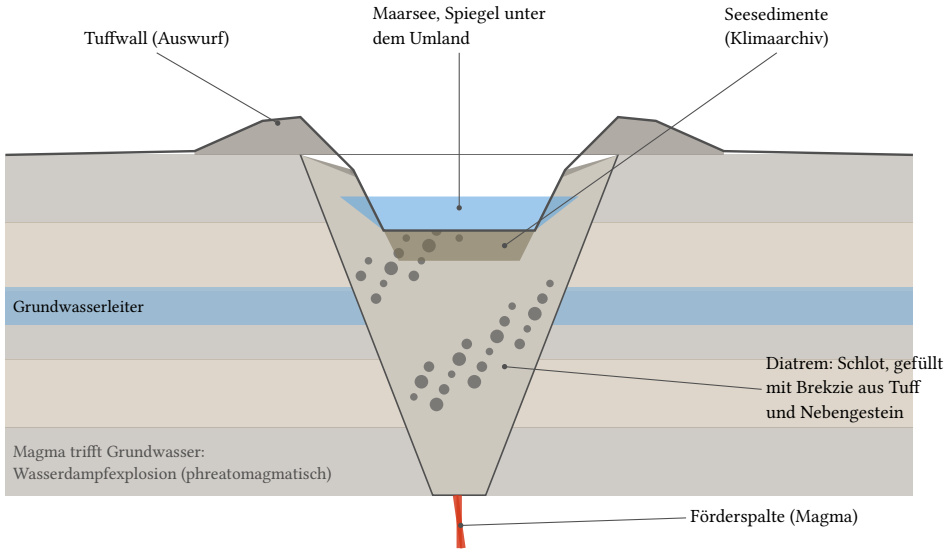


Abbildung 38: Maar im Querschnitt, Modell nach den Eifelmaaren (schematisch, überhöht).

Die Westeifel ist das klassische Maargebiet. Das Pulvermaar, das Weinfelder Maar oder das Meerfelder Maar sind nur wenige zehntausend Jahre alt. In ihren ungestörten, jahreszeitlich geschichteten Seesedimenten (Warven) lesen Forscher das Klima der letzten Kaltzeit ab. In Baden-Württemberg liegt das **Randecker Maar** am Albtrauf bei Kirchheim unter Teck; es gehört zum Schwäbischen Vulkan (Urach-Kirchheimer Vulkangebiet), dessen über 350 Schlote vor etwa 17 bis 11 Millionen Jahren entstanden. Die meisten dieser Schlote sind heute nur noch als Tuffschlote im Untergrund zu erkennen; das Randecker Maar ist heute ein Trockenmaar, dessen Seesedimente reich an Fossilien sind.

3.6 Vulkanlandschaften und ihre exogene Überprägung

Der Bildungsplan fragt nach Oberflächenformen „als Ergebnis endogener und/oder exogener Prozesse“. An Vulkanlandschaften lässt sich das besonders gut zeigen, weil die Abtragung sofort nach dem Ausbruch einsetzt:

- **Junge Vulkanlandschaften** zeigen die ursprünglichen Formen: Kegel, Krater, Lavaströme, Calderen (Island, Hawai‘i, Ätna).
- In **älteren Vulkanlandschaften** hat die Abtragung den lockeren Tuffmantel entfernt. Übrig bleiben die widerständigen Schlotfüllungen und Gänge als **Härtlinge**: Die Kegelberge des **Hegaus** (Hohentwiel, Hohenkrähen, Hohenhewen) sind Schlotfüllungen aus Phonolith und Basalt, die vor etwa 15 bis 7 Millionen Jahren tief unter der damaligen Oberfläche erstarrten; erst die Abtragung – zuletzt durch die Gletscher der Kaltzeiten – hat sie freigelegt.
- Lavaströme, die in Täler flossen, sind härter als die Umgebung; nach langer Abtragung bilden sie Rücken oder Tafelberge – eine **Reliefumkehr** (Abschnitt 8).
- Der **Kaiserstuhl** im Oberrheingraben ist ein Vulkan, der vor etwa 19 bis 15 Millionen Jahren aktiv war. Heute ist er stark abgetragen und von einer mächtigen Lössdecke überzogen, in die Weinbau und Hohlwege ihre eigenen Formen geschnitten haben.

Beispiel 3

Island – eine Insel im Bau. Island liegt dort, wo der Mittelatlantische Rücken über einen Hot Spot verläuft. Mitten durch die Insel zieht eine Zone mit offenen Spalten (Þingvellir), aus denen basaltische Lava aufsteigt; Island weitet sich um rund 2 cm pro Jahr. Zugleich liegen Vulkane unter Gletschern: Bricht ein solcher subglazialer Vulkan aus, schmilzt Eis und es entstehen verheerende Gletscherläufe (Jökulhlaups), die riesige Sanderflächen aufschütten. Auf Island trifft die Vulkanlandschaft also unmittelbar auf die Glaziallandschaft.

Vulkanlandschaften sind trotz der Gefahren dicht besiedelt. Vulkanische Böden aus verwitterter Asche sind mineralreich und fruchtbar (Java, Kampanien, Kaiserstuhl), Basalt, Tuff und Bims sind Baustoffe (in der Eifel seit der Römerzeit), heiße Gesteine im Untergrund liefern Erdwärme (Island deckt den Großteil seines Wärmebedarfs geothermisch), und Vulkane ziehen Touristen an. Wie verwundbar Menschen in Vulkangebieten sind und wie Überwachung und Vorsorge das Risiko senken, behandelt GL1.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
Caldera: großer Einbruchskessel über einer entleerten Magmakammer, Durchmesser bis über 50 km
Maar: in die Umgebung eingetiefter Explosionstrichter mit Tuffwall; Magma trifft auf Grundwasser
Schichtvulkan: steiler Vulkan aus wechselnden Lava- und Tephralagen; zähflüssiges Magma, explosiv
Schildvulkan: flacher, breiter Vulkan aus dünnflüssiger Basaltlava; effusiv
vulkanische Decke: ausgedehnte Basaltlagen aus Spalteneruptionen (Plateaubasalt, Trapp)
Vulkanform: Gestalt eines Vulkans, bestimmt durch Viskosität des Magmas, Förderart und Zahl der Ausbrüche

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Vulkantypen: effusiv oder explosiv** ↗

4 Gletscher und Eiszeitalter

BP 3.5.2.1 (5) Abi 2027

Wahlpflicht: Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Die **Vulkan- und die Glaziallandschaft** sind Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung 2027.

Wer vom Bodensee nach Oberschwaben fährt, durchquert eine Landschaft aus Hügeln, Mooren, Seen und Kiesgruben. Sie ist nicht von Flüssen geformt worden, sondern von Eis: Vor rund 20 000 Jahren lag hier ein Gletscher, der aus den Alpen kam und an der Stelle des Bodensees mehrere hundert Meter dick war. Um die Glaziallandschaft zu verstehen, muss man wissen, wie Gletscher entstehen, wie sie sich bewegen und wie sie arbeiten. Darum geht es in diesem Kapitel; das nächste behandelt die Formen, die Gletscher hinterlassen.

4.1 Das Eiszeitalter: Kalt- und Warmzeiten

Das jüngste Erdzeitalter, das **Quartär**, begann vor rund 2,6 Millionen Jahren. Seitdem wechseln **Kaltzeiten** (Glaziale) und **Warmzeiten** (Interglaziale) einander ab. In den Kaltzeiten lag die globale Mitteltemperatur einige Grad unter der heutigen, Eisschilde bedeckten Nordamerika und Nordeuropa, und der Meeresspiegel lag bis zu etwa 120 m tiefer, weil so viel Wasser im Eis gebunden war. In den Warmzeiten war es ungefähr so warm wie heute. Umgangssprachlich heißt das Quartär „Eiszeitalter“; die einzelnen Kaltzeiten nennt man auch „Eiszeiten“. Seit etwa 11 700 Jahren leben wir in einer Warmzeit, dem **Holozän**.

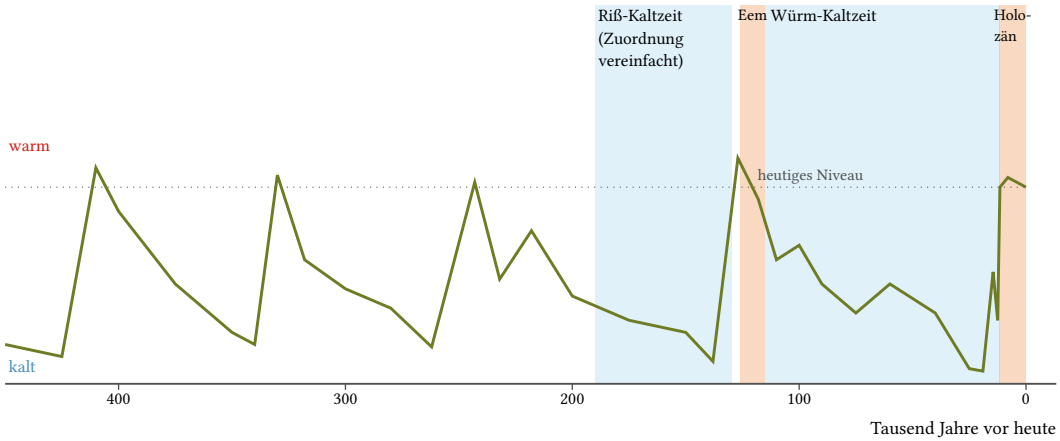


Abbildung 39: Kalt- und Warmzeiten der letzten 450 000 Jahre (schematisch, vereinfacht nach Eiskern- und Tiefseedaten).

Abbildung 39 zeigt das typische Muster der letzten Jahrhunderttausende: Eine Kaltzeit baut sich über rund 100 000 Jahre langsam und mit Schwankungen auf, dann folgt ein rascher Umschwung zu einer kurzen Warmzeit von etwa 10 000 bis 20 000 Jahren. Der Taktgeber sind kleine, regelmäßige Änderungen der Erdbahn (Exzentrizität, Neigung der Erdachse, Präzession; **Milanković-Zyklen**). Sie verändern, wie viel Sonnenstrahlung im Sommer auf die hohen nördlichen Breiten fällt. Verstärkt werden sie durch Rückkopplungen: Wachsende Eisflächen werfen mehr Strahlung zurück (Albedo), und in Kaltzeiten enthielt die Luft weniger CO_2 (rund 180 bis 190 ppm statt rund 280 ppm in vorindustriellen Warmzeiten).

Für das Alpenvorland unterscheidet man klassisch vier große Kaltzeiten, benannt nach Flüssen in Oberschwaben und Bayern: **Günz, Mindel, Riß und Würm**; inzwischen sind weitere, ältere bekannt. Die letzte, die **Würm-Kaltzeit**, dauerte von etwa 115 000 bis 11 700 Jahren vor heute; ihren Höhepunkt erreichte sie vor rund 20 000 Jahren. In Norddeutschland heißen die entsprechenden Kaltzeiten Elster, Saale und Weichsel.

4.2 Vom Schnee zum Gletschereis

Ein Gletscher entsteht dort, wo über viele Jahre mehr Schnee fällt, als im Sommer wieder schmilzt. Die Grenze, oberhalb der Schnee den Sommer überdauert, ist die **Schneegrenze**; in den Alpen liegt sie heute bei etwa 2800 m (je nach Hanglage und Region einige hundert Meter höher oder tiefer), am Äquator bei etwa 4800 m, in den trockenen Subtropen über 6000 m, in Polargebieten auf Meeresniveau (GL3). Oberhalb dieser Grenze wird der Schnee durch Setzen, Antauen und Wiedergefrieren zu körnigem **Firn** und unter dem Druck der auflagernden Massen schließlich zu dichtem, luftarmem **Gletschereis**. Aus einem Meter Neuschnee wird so nach Jahren nur ein Dezimeter Eis.

Ab einer Dicke von einigen Dutzend Metern beginnt das Eis unter seinem eigenen Gewicht zu fließen. Ein Gletscher ist also eine langsam fließende Eismasse, die sich aus Schnee speist und hangabwärts bewegt.

4.3 Nährgebiet, Zehrgebiet und Massenbilanz

Jeder Talgletscher gliedert sich in zwei Teile (Abbildung 40):

- Im **Nährgebiet** oberhalb der Gleichgewichtslinie überwiegt die **Akkumulation**: Im Jahresmittel kommt mehr Masse hinzu (Schneefall, Lawinen, Triebschnee), als verloren geht.
- Im **Zehrgebiet** unterhalb überwiegt die **Ablation**: Schmelzen, Verdunsten (Sublimation) und, wo der Gletscher in einen See oder ins Meer reicht, das Abbrechen von Eis (Kalben).

Die Linie, an der Gewinn und Verlust eines Jahres gleich groß sind, heißt **Gleichgewichtslinie** (englisch Equilibrium Line Altitude, ELA); sie entspricht ungefähr der Schneegrenze auf dem Gletscher. Weil Eis aus dem Nährgebiet ständig ins Zehrgebiet fließt, sind beide Teile verbunden: Die Fließlinien zeigen im Nährgebiet in das Eis hinein, im Zehrgebiet kommen sie wieder an die Oberfläche. Deshalb tauen am Gletscherende Gesteinsbrocken aus, die weit oben auf das Eis gefallen sind.

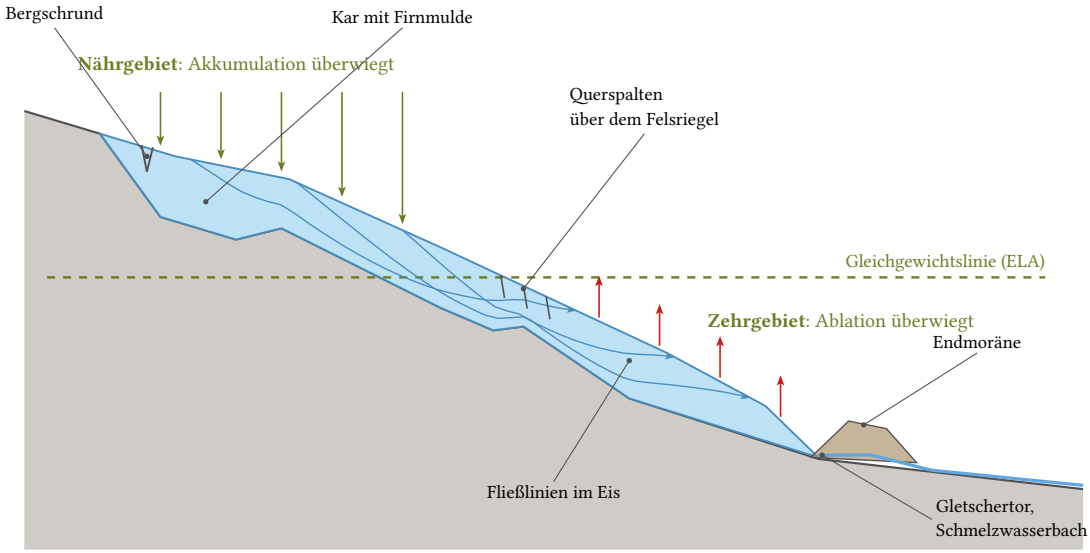


Abbildung 40: Talgletscher im Längsschnitt (schematisch, überhöht).

Definition

Die **Massenbilanz** eines Gletschers ist die Differenz aus Akkumulation und Ablation in einem Haushaltsjahr (Oktober bis September), angegeben als Änderung der Masse oder – auf die Gletscherfläche bezogen – in Metern Wasseräquivalent. Ist sie positiv, nimmt die Masse zu, und der Gletscher stößt nach einigen Jahren bis Jahrzehnten vor; ist sie negativ, schrumpft er und zieht sich zurück.

Abbildung 41 zeigt, wie die Bilanz mit der Höhe zunimmt: Oben fällt mehr Schnee, und es ist kälter. In einem warmen Jahr verschiebt sich die ganze Kurve nach links: Die Gleichgewichtslinie steigt, das Nährgebiet schrumpft, das Zehrgebiet wächst. Liegt die Gleichgewichtslinie dauerhaft über dem höchsten Punkt eines Gletschers, hat er kein Nährgebiet mehr und verschwindet. Genau das geschieht derzeit mit vielen kleinen Alpengletschern.

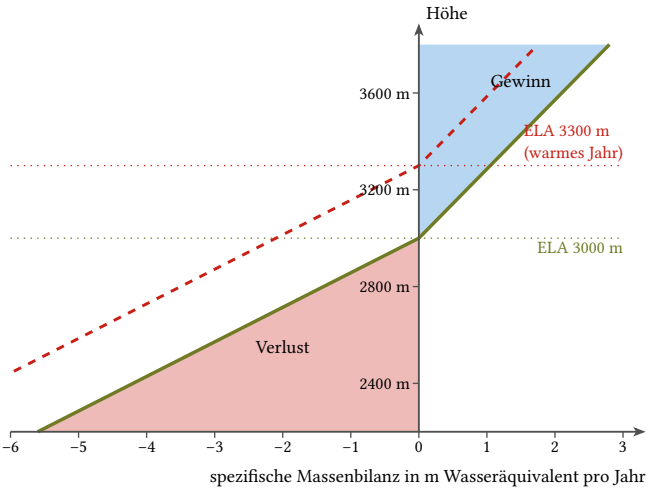


Abbildung 41: Spezifische Massenbilanz in Abhängigkeit von der Höhe für ein normales und ein warmes Jahr (Modellwerte).

Wichtig für das Abitur: Die Lage des Gletscherendes reagiert **verzögert** auf das Klima. Die Massenbilanz eines Jahres zeigt das Klima dieses Jahres, die Länge eines Gletschers dagegen das Klima der vergangenen Jahre bis Jahrzehnte – je größer der Gletscher, desto träger. Seit dem letzten Hochstand um 1850, am Ende der sogenannten Kleinen Eiszeit, gehen die Alpengletscher fast überall zurück. Der Große Aletschgletscher im Wallis, der längste Gletscher der Alpen, ist heute rund 20 km lang und hat seit 1870 etwa 3,5 km an Länge verloren. Nach dem Schweizer Gletschermessnetz (GLAMOS) verloren die Schweizer Gletscher allein von 2015 bis 2025 rund ein Viertel ihres Volumens, im Jahr 2025 etwa 3 %; Ende 2025 lagen noch etwa 45 km³ Eis in der Schweiz.

4.4 Wie Gletscher fließen

Gletscher bewegen sich auf zwei Arten:

- **Inneres Fließen (Deformation):** Unter Druck verformen sich die Eiskristalle plastisch, die Eisschichten gleiten gegeneinander. Am schnellsten fließt das Eis in der Mitte und an der Oberfläche, am langsamsten am Rand und am Grund, wo Reibung bremst.
- **Basales Gleiten:** Ist das Eis am Grund am Druckschmelzpunkt (temperierter Gletscher), bildet sich ein Wasserfilm, auf dem der ganze Gletscher über das Bett rutscht. Gletscher, die am Grund festgefroren sind (kaltbasale Gletscher in Polargebieten), gleiten kaum und tragen deshalb auch wenig ab.

Alpengletscher fließen einige zehn bis wenige hundert Meter pro Jahr. Auslassgletscher des grönländischen Inlandeises erreichen dagegen über zehn Kilometer pro Jahr. Wo sich die Geschwindigkeit ändert, reißt das spröde obere Eis: **Querspalten** über Gefällsstufen (Eisbrüche), **Längsspalten** wo sich das Eis ausbreitet, **Randspalten** am Rand. Zwischen dem Gletscher und der Felswand im obersten Nährgebiet öffnet sich der **Bergschrund**.

4.5 Gletschertypen

Nach Form und Größe unterscheidet man:

- **Inlandeis (Eisschild):** Eine Eismasse, die ein ganzes Gebiet unabhängig vom Relief überdeckt und von ihrem Zentrum nach allen Seiten abfließt. Heute gibt es zwei Inlandeise: die Antarktis (rund 14 Millionen km², bis fast 5 km dick) und Grönland (rund 1,7 Millionen km², bis gut 3 km dick). In den Kaltzeiten reichte das skandinavische Inlandeis bis nach Norddeutschland.
- **Eisstromnetz:** Talgletscher, die so mächtig sind, dass sie über Pässe und Talwasserscheiden hinweg zusammenhängen; nur die höchsten Gipfel ragen als **Nunatakker** heraus. In der Würm-Kaltzeit waren die Alpen von einem solchen Eisstromnetz bedeckt.
- **Talgletscher:** Ein Gletscher, der einem Tal folgt und von einem oder mehreren Firnbecken gespeist wird (Aletsch-, Rhone-, Pasterze). Tritt er aus dem Gebirge ins Vorland und breitet sich fächerförmig aus, wird er zum **Vorlandgletscher** (Piedmontgletscher) – so der Rheingletscher im Alpenvorland während der Kaltzeiten.
- **Kargletscher:** kleine Gletscher in einer Felsnische, dem Kar (siehe unten).

4.6 Glaziale Abtragung

Gletscher sind wirkungsvolle Abtragungskräfte, weil sie Gesteinsschutt an ihrer Unterseite mitführen. Drei Vorgänge greifen ineinander:

- **Detersion (Abschleifen):** Steine im Gletscherboden wirken wie Schmirgelpapier; sie glätten und polieren den Fels (Gletscherschliff) und ritzen **Gletscherschrammen** in Richtung der Eisbewegung. Das dabei entstehende feine Gesteinsmehl färbt die Gletscherbäche milchig trüb (Gletschermilch).
- **Detraktion (Herausbrechen):** Schmelzwasser dringt in Klüfte, friert an und wird mit dem fließenden Eis aus dem Fels gerissen.
- **Exaration (Ausschürfen):** Der Gletscher schiebt und pflügt Lockermaterial vor sich her und räumt Becken aus.

Weil Gletscher auch bergauf schürfen können (das Eis wird von hinten geschoben), entstehen Hohlformen, die ein Fluss nie schaffen könnte: übertiefte Becken mit Felsschwellen.

4.6.1 Kar

Ein **Kar** ist eine sesselartige Felsnische an einem Berghang mit steiler Rückwand (Karwand) und flachem, oft übertieftem Boden, der talwärts von einer Schwelle (Karschwelle, Riegel) abgeschlossen wird (Abbildung 42). Es entsteht, wo sich in einer Mulde oberhalb der Schneegrenze Firn sammelt. An der Karwand lockert Frostsprengung den Fels, vor allem im Bergschrund, wo Schmelzwasser täglich gefriert und taut. Das Eis bewegt sich im Kar drehend und schürft den Boden aus. Nach dem Abschmelzen füllt sich das übertiefte Becken oft mit einem **Karsee**. Der **Feldsee** unter dem Feldberg im Schwarzwald ist ein solcher Karsee; der Mummelsee im Nordschwarzwald liegt ebenfalls in einem Kar.

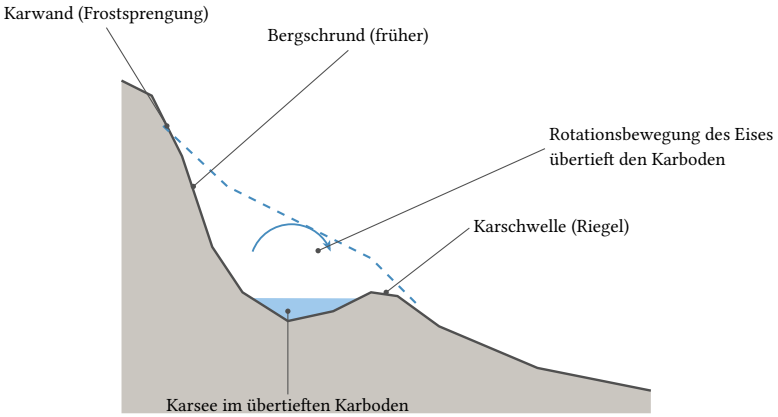
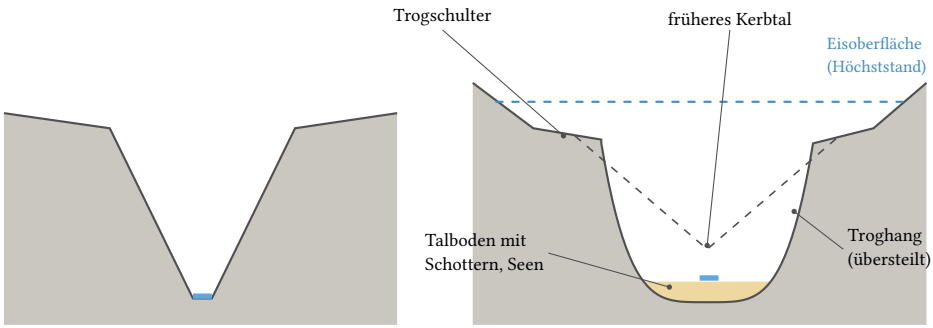


Abbildung 42: Kar mit Karsee; gestrichelt der frühere Kargletscher (schematisch).

4.6.2 Trogtal

Ein Fluss schneidet ein Tal mit V-förmigem Querschnitt ein (Kerbtal). Füllt ein Talgletscher dieses Tal, schürft er es zu einem **Trogtal** (U-Tal) aus: Die Talflanken werden übersteilt (Troghänge), der Talboden verbreitert und vertieft (Abbildung 43). Oberhalb der Troghänge bleibt oft ein flacherer Absatz, die **Trogschulter**. Seitentäler mit kleineren Gletschern wurden weniger tief ausgeschürft; sie münden nach dem Abschmelzen hoch über dem Haupttal als **Hängetäler**, oft mit Wasserfällen. Das Lauterbrunnental im Berner Oberland mit dem knapp 300 m hohen Staubbachfall ist ein Lehrbuchbeispiel. Nach dem Abschmelzen füllen Seen, Schotter und Bergsturzmassen den Talboden; deshalb haben viele Alpentäler einen ebenen, siedlungsgünstigen Boden zwischen steilen Wänden. Reicht ein Trogtal unter den Meeresspiegel und wird überflutet, entsteht ein Fjord (Abschnitt 7).



a) Kerbtal (V-Tal): Fluss schneidet ein b) Trogtal (U-Tal): vom Gletscher ausgeschürft

Abbildung 43: Kerbtal und Trogtal im Querschnitt (schematisch).

Merksatz

Ein Gletscher entsteht oberhalb der Schneegrenze, wo die Akkumulation die Ablation übertrifft. Sein Verhalten bestimmt die **Massenbilanz**: Im **Nährgebiet** überwiegt der Gewinn, im **Zehrgebiet** der Verlust, getrennt durch die **Gleichgewichtslinie**. Gletscher tragen durch Schleifen, Herausbrechen und Ausschürfen ab und formen **Kare** und **Trogtäler**.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
Eisstromnetz: zusammenhängende Talgletscher eines Gebirges, die über Pässe hinweg verbunden sind
Inlandeis: ausgedehnter Eisschild, der das Relief vollständig überdeckt (Antarktis, Grönland)
Kaltzeit: Abschnitt des Eiszeitalters mit deutlich tieferen Temperaturen und großen Eisschilden (Glazial)
Kar: sesselförmige Felsnische mit steiler Rückwand und übertieftem Boden, oft mit Karsee
Nährgebiet: Teil des Gletschers oberhalb der Gleichgewichtslinie, in dem die Akkumulation überwiegt
Talgletscher: Gletscher, der einem Tal folgt und aus einem Firnbecken gespeist wird
Trogtal: vom Gletscher ausgeschürftes Tal mit U-förmigem Querschnitt, Troghängen und Trogschulter
Warmzeit: Abschnitt des Eiszeitalters mit etwa heutigen Temperaturen (Interglazial), z. B. Holozän
Zehrgebiet: Teil des Gletschers unterhalb der Gleichgewichtslinie, in dem die Ablation überwiegt

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Gletscher und Massenbilanz** ↗

5 Glaziale Serie und Periglazial

BP 3.5.2.1 (5) Abi 2027

Wahlpflicht: Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Die **Vulkan- und die Glaziallandschaft** sind Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung 2027.

Gletscher tragen nicht nur ab, sie transportieren auch riesige Mengen Gestein und lagern es wieder ab. Wo das Eis einer Kaltzeit endete, hinterließ es eine typische Abfolge von Formen. Außerhalb des Eises, im eisfreien, aber dauergefrorenen Vorland, wirkten eigene Prozesse. Beides prägt große Teile Mitteleuropas – auch Baden-Württembergs – bis heute.

5.1 Moränen

Alles Gesteinsmaterial, das ein Gletscher transportiert und ablagert, heißt **Moräne**. Es ist unsortiert: Ton, Sand, Kies und große Blöcke liegen durcheinander, weil Eis anders als Wasser keine Korngrößen trennt. Die Geschiebe sind kantengerundet und tragen oft Kritzer. Nach ihrer Lage unterscheidet man:

- **Grundmoräne**: unter dem Gletscher mitgeführtes und abgelagertes Material. Nach dem Abschmelzen bildet sie eine flachwellige Decke aus dichtem, tonreichem **Geschiebemergel**, die das Gelände großflächig überzieht.
- **Seitenmoräne**: Schutt am Rand eines Talgletschers, der vor allem von den Talflanken stammt; nach dem Abschmelzen bleiben Wälle an den Talhängen. Fließen zwei Gletscher zusammen, vereinigen sich zwei Seitenmoränen zu einer **Mittelmoräne**.
- **Endmoräne** (Stirnmoräne): Wall vor dem Gletscherende. Sie entsteht, wenn das Gletscherende längere Zeit an derselben Stelle liegt: Das Eis bringt ständig Material heran und lässt es beim Abschmelzen liegen, schiebt bei kleinen Vorstößen auch Material zusammen.

Ein besonderes Geschiebe ist der **Findling** (erratischer Block): ein großer Gesteinsblock, den das Eis weit von seinem Herkunftsgebiet verfrachtet hat. In Norddeutschland liegen Granitblöcke aus Skandinavien, im Alpenvorland Blöcke aus den Zentralalpen. Findlinge waren im 19. Jahrhundert ein Hauptargument für die Theorie, dass Gletscher einst weite Gebiete bedeckten.

5.2 Die glaziale Serie

Wo der Rand eines Vorlandgletschers oder Inlandeises längere Zeit stillstand, entstand vom Eis zum Vorland eine gesetzmäßige Abfolge von Formen, die **glaziale Serie** (Abbildung 44):

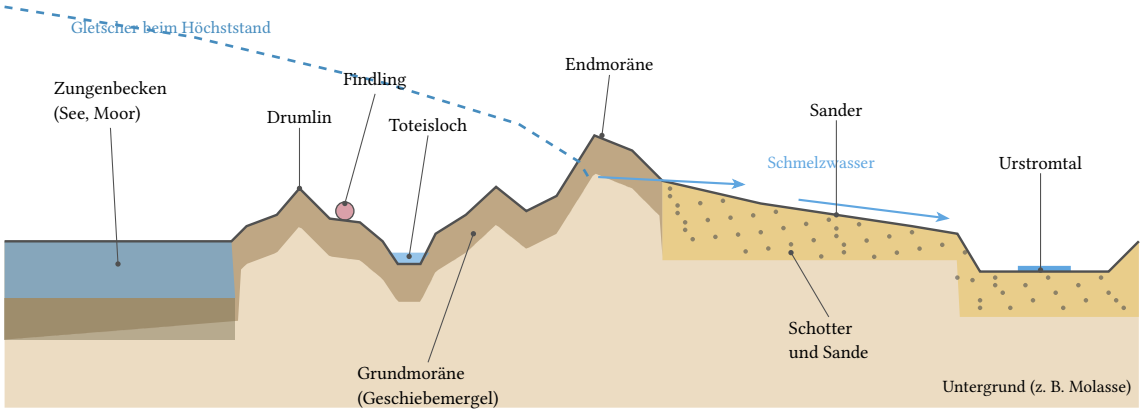


Abbildung 44: Glaziale Serie im Profil nach dem Abschmelzen; gestrichelt der Gletscher beim Höchststand (schematisch, stark überhöht).

a) **Zungenbecken:** Unter der Gletscherzunge schürfte das Eis eine flache, oft übertiefte Wanne aus. Nach dem Abschmelzen füllt sie sich mit einem See oder verlandet zum Moor. Der **Bodensee** liegt im Zungenbecken des Rheingletschers, Starnberger See, Ammersee und Chiemsee in denen bayerischer Vorlandgletscher; die großen oberitalienischen Seen sind Zungenbecken am Alpensüdrand.

b) **Grundmoränenlandschaft:** Um das Zungenbecken liegt eine flachkuppige Landschaft aus Grundmoräne mit vielen kleinen Seen und Mooren, oft mit Drumlins, Toteislöchern und Rundhöckern (siehe unten).

c) **Endmoräne:** Ein bogenförmiger Wall aus Hügeln markiert den Eisrand. Oft liegen mehrere Endmoränen hintereinander – jede steht für einen Stillstand beim Rückzug.
d) **Sander:** Vor der Endmoräne schütteten die Schmelzwasserflüsse aus den Gletschertoren weite, flach geneigte Schwemmfächer aus Kies und Sand auf. Weil Wasser nach Korngrößen sortiert, liegen nahe dem Eisrand grobe Schotter, weiter außen feine Sande. Im Alpenvorland sind die Sander zu ausgedehnten **Schotterfeldern** und Terrassen verschmolzen; sie sind wichtige Grundwasserspeicher und Kiesvorkommen.
e) **Urstromtal:** Die Schmelzwässer sammelten sich in einem breiten Tal parallel zum Eisrand und flossen darin zum Meer. In Norddeutschland flossen sie nach Westen zur Nordsee, weil das Inlandeis den Weg nach Norden versperrte; Berlin liegt im Warschau-Berliner Urstromtal, durch das heute die Spree fließt. Die heutigen Flüsse sind für diese breiten Täler viel zu klein.

Im Alpenvorland ist die Serie abgewandelt: Das Gelände fällt dort vom Gebirge weg ab, die Schmelzwässer flossen deshalb vom Eisrand weg zur Donau. Die Donau übernahm die Rolle des Urstromtals; echte, eisrandparallele Urstromtäler gibt es nur am Rand des nordischen Inlandeises.

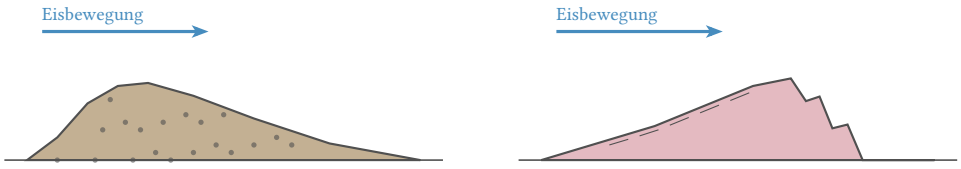
Merksatz

Glaziale Serie vom Eis zum Vorland: Zungenbecken – Grundmoränenlandschaft – Endmoräne – Sander – Urstromtal. Die ersten drei Glieder sind Ablagerungen oder Abtragungsformen des Eises (glazial), Sander und Urstromtal Ablagerungen und Formen des Schmelzwassers (glazifluvial).

5.3 Formen der Grundmoränenlandschaft

Drumlin. Drumlins sind stromlinienförmige, längliche Hügel aus Grundmoräne, wenige hundert Meter bis über einen Kilometer lang und zehn bis dreißig Meter hoch. Ihr steiles, breites Ende zeigt zum Eis, der flache, ausgezogene Schwanz in Fließrichtung (Abbildung 45). Sie entstanden unter fließendem Eis, das Grundmoränenmaterial zusammenschob und überformte. Drumlins treten in Schwärmen auf (Drumlinfelder) und verraten so die Richtung, in der das Eis floss. In Oberschwaben und im Allgäu gibt es ausgedehnte Drumlinfelder.

Rundhöcker. Rundhöcker sind Felsbuckel aus Festgestein, die das Eis überfahren hat. Die eiszugewandte Seite (Luvseite, Stoßseite) ist flach, glatt geschliffen und mit Schrammen bedeckt; die Leeseite ist steil und rau, weil das Eis dort Felsstücke herausgebrochen hat. Rundhöcker und Drumlins sind also beide stromlinienförmig, aber spiegelbildlich: Beim Drumlin ist das steile Ende eiszugewandt, beim Rundhöcker das flache. Rundhöcker sind typisch für Gebiete, in denen das Eis abgetragen hat (Skandinavien, Kanadischer Schild, Alpentäler); in der Schärenküste ragen sie aus dem Meer (Abschnitt 7).

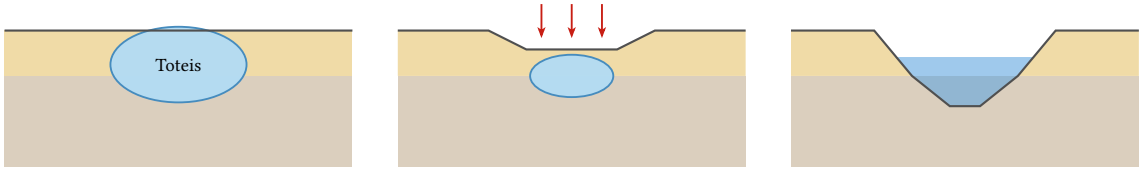


a) Drumlin: steiler Kopf zum Eis, lang ausgezogen, aus Grundmoräne geformt (stromlinienförmig)

b) Rundhöcker: flach und geschliffen zum Eis (Gletscherschrammen), steil und rau auf der Leeseite (herausgebrochen)

Abbildung 45: Drumlin und Rundhöcker im Längsschnitt; das Eis floss jeweils von links (schematisch).

Toteisloch. Beim Rückzug eines Gletschers können Eisblöcke abreißen, liegen bleiben und von Schmelzwassersedimenten begraben werden. Dieses **Toteis** nimmt nicht mehr an der Bewegung teil und taut unter der isolierenden Decke oft erst nach Jahrhunderten. Dann sackt die Oberfläche nach, und es entsteht eine rundliche Hohlform ohne Abfluss, häufig mit einem kleinen See oder Moor (Abbildung 46). In Norddeutschland heißen sie Sölle (Einzahl Soll).



a) Eisblock in Schmelzwassersedimenten begraben

b) Eis taut langsam, Deckschicht sackt nach

c) Hohlform mit See oder Moor (Toteisloch)

Abbildung 46: Entstehung eines Toteislochs (schematisch).

Subglaziale Rinnen. Unter dem Eis fließt Schmelzwasser unter hohem Druck in Tunneln. Weil es unter Druck steht, kann es sogar bergauf fließen und schneidet lange, schmale, oft unregelmäßig tiefe Rinnen in den Untergrund. Nach dem

Abschmelzen bleiben sie als Rinnen mit aufgereihten, langgestreckten **Rinnenseen** erhalten, besonders typisch in Schleswig-Holstein, Mecklenburg und Brandenburg. Manche Ostseeförden sind überflutete subglaziale Rinnen.

5.4 Jungmoräne und Altmoräne

Die Formen der letzten Kaltzeit sind frisch, die der vorletzten stark überprägt. Daher unterscheidet man:

	Jungmoräne (Jungmoränenland)	Altmoräne (Altmoränenland)
Entstehung	letzte Kaltzeit (Würm bzw. Weichsel)	ältere Kaltzeiten (vor allem Riß bzw. Saale)
Relief	kuppig, unruhig, steile Hänge, deutliche Wälle	ausgeglichen, flachwellig, Formen verwaschen
Gewässer	viele Seen, Moore, abflusslose Senken, ungeordnetes Gewässernetz	kaum Seen (verlandet), ausgereiftes Gewässernetz
Überprägung	nur durch das Holozän	in der letzten Kaltzeit periglazial abgetragen (Solifluktion), oft von Löss bedeckt
Beispiele	Oberschwaben südlich der äußeren Würm-Endmoräne, Mecklenburgische Seenplatte	Gebiet um Biberach und Riedlingen, Lüneburger Heide

Tabelle 8: Jungmoräne und Altmoräne im Vergleich.

Der Rheingletscher stieß in der Würm-Kaltzeit bis zu 60 km weit ins nördliche Alpenvorland vor; seine äußeren Endmoränen liegen in Oberschwaben (etwa bei Bad Schussenried) und am Hochrhein bei Schaffhausen. In der Riß-Kaltzeit reichte das Eis noch weiter, bis an die Donau. Wer von Süden nach Norden durch Oberschwaben fährt, wechselt also vom unruhigen Jungmoränenland mit Seen und Mooren in das ruhigere Altmoränenland.

5.5 Periglazial: das Land vor dem Eis

Das **Periglazial** (griechisch peri, um herum) ist der Bereich um die Gletscher, der zwar eisfrei ist, aber von Frost geprägt wird. In den Kaltzeiten lag ganz Mitteleuropa zwischen dem nordischen Inlandeis und dem Alpeneis im Periglazial – auch der Schwarzwald, die Alb und das Neckarland, soweit sie nicht selbst vergletschert waren. Heute gibt es Periglazialgebiete in Sibirien, Nordkanada, Alaska und im Hochgebirge.

Permafrost. Im Periglazial ist der Boden in der Tiefe ganzjährig gefroren (**Dauerfrostboden**, Permafrost). Nur eine oberflächennahe Schicht, der **Auftauboden**, taut im Sommer auf, je nach Klima wenige Dezimeter bis einige Meter tief. Heute liegt auf rund einem Viertel der Landfläche der Nordhalbkugel Permafrost; in den Alpen kommt er vor allem oberhalb von etwa 2500 m vor. Taut er im Klimawandel, verlieren Felswände und Schutthänge ihren „Kitt“, Felsstürze und Murgänge werden häufiger.

Solifluktion. Der Permafrost darunter ist wasserundurchlässig. Taut der Boden im Sommer auf, kann das Schmelzwasser nicht versickern; der Auftauboden wird breiig und fließt schon bei geringer Hangneigung (ab etwa 2°) langsam hangabwärts (Abbildung 47). Dieses **Bodenfließen** hinterlässt Fließerden und Hangschuttdecken, die in Mitteleuropa fast alle Hänge überziehen und auf denen sich die heutigen Böden gebildet haben. Solifluktion hat in den Kaltzeiten Altmoränen eingeebnet und Täler mit Schutt verfüllt.

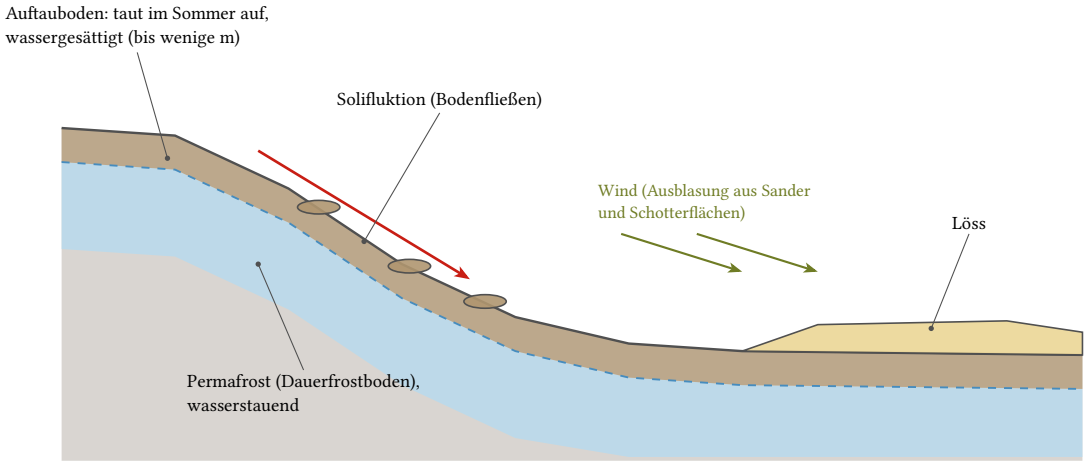


Abbildung 47: Prozesse im Periglazial: Solifluktion über Permafrost und Lössanwehung im Vorland (schematisch).

Löss. In der vegetationsarmen Kältesteppe blies der Wind feinen Staub aus den trockenen Sanderflächen, Schotterfeldern und Flussbetten aus und lagerte ihn an geschützten Stellen wieder ab. Dieser Löss ist ein gelbliches, kalkhaltiges, ungeschichtetes Sediment, das überwiegend aus Schluff (Korngröße 0,002 bis 0,063 mm) besteht. Er ist locker, standfest in senkrechten Wänden (Lösshohlwege am Kaiserstuhl) und speichert Wasser gut. Aus Löss entstehen die fruchtbarsten Ackerböden Mitteleuropas: im Kraichgau, am Rand des Oberrheingrabens, im Kaiserstuhl, in den Börden Norddeutschlands. Weltweit sind die Lössgebiete Nordchinas mit Mächtigkeiten von über 100 m die bekanntesten.

Auch die **Trockentäler** der Schwäbischen Alb sind ein Erbe des Periglazials: Als der Permafrost die Klüfte im Kalk verschloss, floss das Wasser oberirdisch ab und schnitt Täler ein, die heute trocken liegen (Abschnitt 9).

5.6 Nach dem Eis: das Postglazial

Das **Postglazial** ist die Zeit nach dem Ende der letzten Kaltzeit, also das Holozän seit etwa 11 700 Jahren. Mit der Erwärmung schmolzen die Gletscher, Wald breitete sich aus, und die Prozesse der Glaziallandschaft wurden von anderen abgelöst:

- Seen in Zungenbecken und Toteislöchern verlanden, es wachsen Moore (Federsee, Wurzacher Ried).
- Flüsse schneiden sich in die Schotterfelder ein und bilden Terrassen.
- Der Meeresspiegel stieg um rund 120 m an und überflutete Nord- und Ostseeküste (Abschnitt 7).
- Vom Eis befreite Gebiete heben sich isostatisch: Skandinavien hebt sich am nördlichen Bottnischen Meerbusen um knapp einen Zentimeter pro Jahr.

Die Glaziallandschaft, die wir heute sehen, ist also eine **Vorzeitform**: Ihre Formen wurden unter einem anderen Klima geschaffen und werden heute nur noch umgestaltet.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
Altmoräne: Moränenlandschaft älterer Kaltzeiten, periglazial überprägt, flach und seenarm
Drumlin: stromlinienförmiger Hügel aus Grundmoräne, steiles Ende zum Eis
Endmoräne: Wall aus Moränenmaterial vor dem Gletscherende, markiert einen Eisrandstand
Findling: großer, vom Eis weit transportierter Gesteinsblock (erratischer Block)
glaziale Serie: Formenabfolge Zungenbecken – Grundmoränenlandschaft – Endmoräne – Sander – Urstromtal
Grundmoräne: unter dem Gletscher abgelagerter, unsortierter Geschiebemergel
Jungmoräne: frische, kuppige, seenreiche Moränenlandschaft der letzten Kaltzeit
Löss: vom Wind abgelagerter, kalkhaltiger Schluff aus dem Periglazial, Grundlage fruchtbarer Böden
Periglazial: eisfreies, aber frostgeprägtes Gebiet um die Gletscher mit Permafrost
Permafrost: ganzjährig gefrorener Untergrund (Dauerfrostboden)
Postglazial: Nacheiszeit, das Holozän seit etwa 11 700 Jahren
Rundhöcker: vom Eis überschliffener Felsbuckel, flach zum Eis, steil auf der Leeseite
Sander: flacher Schwemmfächer aus Kies und Sand vor der Endmoräne
Seitenmoräne: Moränenwall am Rand eines Talgletschers
Solifluktion: Bodenfließen des sommerlich aufgetauten Bodens über Permafrost
subglaziale Rinnen: von Schmelzwasser unter dem Eis eingeschnittene Rinnen, oft mit Rinnenseen
Toteisloch: abflusslose Hohlform über einem abgeschmolzenen, begrabenen Eisblock
Urstromtal: breites Tal parallel zum Eisrand, in dem die Schmelzwässer abflossen
Zungenbecken: vom Gletscher ausgeschürfte Wanne unter der Zunge, oft mit See

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Gletscher und Massenbilanz** ↗

6 Flusslandschaft

BP 3.5.2.1 (5) Wahllandschaft · 2027 nicht schriftlich

> **Wahlpflicht:** Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Diese Landschaft gehört 2027 nicht zum schriftlichen Schwerpunkt, bleibt aber Stoff des Leistungsfachs (mündliche Prüfung, Klausuren).

Fließendes Wasser ist auf den Festländern die wichtigste Kraft, die Relief formt. Selbst in Wüsten haben seltene Starkregen die meisten Täler geschaffen. Ein Fluss trägt ab, transportiert und lagert ab – oft alles zugleich an verschiedenen Stellen desselben Laufs. Wie ein Tal aussieht, hängt davon ab, welcher dieser Vorgänge überwiegt, wie widerständig das Gestein ist und wie sich das Klima und die Höhenlage über die Zeit verändert haben.

6.1 Abtragung, Transport und Ablagerung

Definition

Erosion: linienhafte Abtragung durch fließendes Wasser (allgemeiner auch durch Eis oder Wind), etwa das Einschneiden eines Flusses. **Denudation:** flächenhafte Abtragung, z. B. durch abfließendes Regenwasser, Bodenfließen oder Rutschungen an den Hängen. **Sedimentation:** Ablagerung von transportiertem Material, sobald die Transportkraft nicht mehr ausreicht. **Akkumulation:** Anhäufung von Sedimenten über längere Zeit, sodass Formen aufgeschüttet werden (Schwemmfächer, Talfüllungen, Deltas).

Ein Fluss erodiert auf drei Arten: Bei der **Tiefenerosion** schneidet er sich in sein Bett ein, bei der **Seitenerosion** verlagert er sein Bett seitwärts, und bei der **rückschreitenden Erosion** wandert die Erosion am Quellast oder an einer Gefällsstufe flussaufwärts. Werkzeug sind die mitgeführten Gerölle, die das Bett ausschleifen (Strudellöcher, Gletschertöpfe). Transportiert wird gelöst (Ionen aus der chemischen Verwitterung), schwebend (Ton, Schluff, feiner Sand: Suspension) und rollend oder springend am Grund (Sand, Kies, Gerölle). Ob ein Korn erodiert, transportiert oder abgelagert wird, hängt von seiner Größe und von der Fließgeschwindigkeit ab (Abbildung 48).

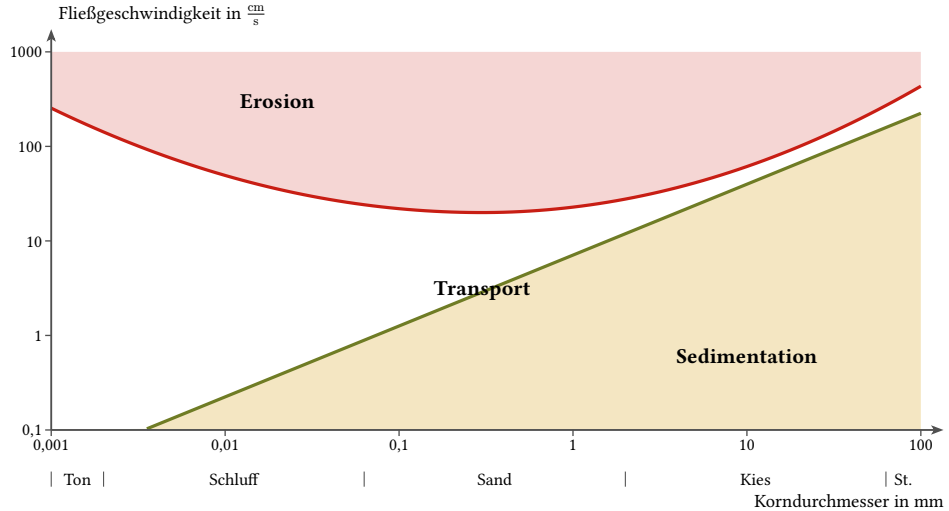


Abbildung 48: Erosion, Transport und Sedimentation in Abhängigkeit von Korngröße und Fließgeschwindigkeit (schematisch, nach Hjulström 1935).

Das Diagramm erklärt eine Überraschung: Am leichtesten wird Sand von etwa 0,1 bis 1 mm aufgenommen. Feinere Körner (Ton, Schluff) haften durch Kohäsion aneinander und brauchen höhere Geschwindigkeiten, bis sie gelöst werden; sind sie aber einmal in der Strömung, bleiben sie bis zu sehr geringen Geschwindigkeiten in Schwebe. Deshalb lagert ein Fluss bei nachlassender Strömung zuerst die groben Gerölle ab, dann Sand, und Ton erst in Stillwasser, Seen oder im Meer: Fließgewässer **sortieren** ihr Material.

Jeder Fluss arbeitet auf seine **Erosionsbasis** hin, die tiefste Stelle, bis zu der er sich eintiefen kann – letztlich den Meeresspiegel. Sinkt die Erosionsbasis (Hebung des Landes, Absenken des Meeresspiegels), schneidet sich der Fluss ein; steigt sie, schüttet er auf. Im Längsprofil ist der Oberlauf steil, hier überwiegt die Tiefenerosion; im Unterlauf ist das Gefälle gering, hier überwiegen Seitenerosion und Sedimentation.

6.2 Talformen

Die **Talform** (der Querschnitt eines Tals) zeigt, wie sich Tiefenerosion des Flusses und Abtragung der Hänge zueinander verhalten (Abbildung 49).

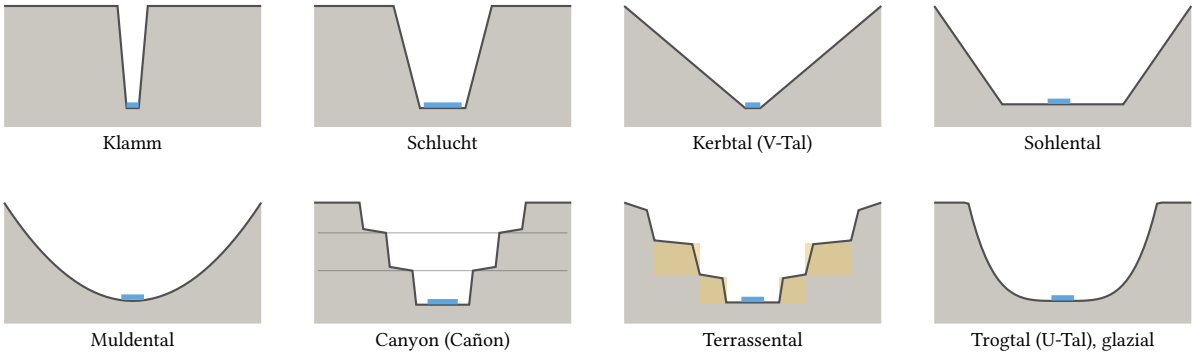


Abbildung 49: Talformen im Querschnitt (schematisch).

- **Klamm:** sehr enges Tal mit senkrechten, teils überhängenden Wänden, das der Fluss ganz ausfüllt. Die Tiefenerosion ist so stark und das Gestein so fest, dass die Hänge kaum zurückweichen. Beispiele: Partnachklamm bei Garmisch-Partenkirchen, Breitachklamm im Allgäu.
- **Schlucht:** etwas weiter als die Klamm, mit sehr steilen, aber nicht senkrechten Wänden; die Talsohle wird vom Fluss eingenommen. Beispiel: die Wutachschlucht im Südschwarzwald.
- **Kerbtal** (V-Tal): Tiefenerosion und Hangabtragung halten sich die Waage; die Hänge laufen V-förmig im Flussbett zusammen. Typisch für Gebirgsbäche und die Oberläufe im Schwarzwald.
- **Sohlental:** Der Fluss hat aufgehört, sich einzutiefen; Seitenerosion und Akkumulation haben eine ebene Talsohle (Aue) geschaffen, die mit deutlichem Knick in die Hänge übergeht. Typisch für Mittel- und Unterläufe (Neckar, Kocher, Jagst).
- **Muldental:** flache, sanft geschwungene Talform ohne Knick, entstanden in weichen Gesteinen oder durch kräftige Hangabtragung (z. B. Solifluktion in den Kaltzeiten).
- **Terrassental:** Tal mit treppenartigen Absätzen an den Hängen. Jede Terrasse ist der Rest einer früheren Talsohle; sie entsteht durch den Wechsel von Aufschüttung und Einschneiden (unten).
- **Canyon** (Cañon): tief eingeschnittenes Tal mit stufenförmigen Wänden in einem Trockengebiet. Weil wenig Niederschlag fällt, ist die Hangabtragung gering, der Fluss aber schneidet sich tief ein; harte Schichten bilden Wände, weiche flachere Absätze. Der Grand Canyon des Colorado in Arizona ist bis etwa 1,8 km tief.
- **Trogtal** (U-Tal): kein Flusstal, sondern vom Gletscher geformt (Abschnitt 4); es gehört aber zu den Talformen, die man unterscheiden muss.

Typischer Fehler
Falsch: „Ein Trogtal ist ein besonders breites Kerbtal."
Richtig: Ein Trogtal ist eine glaziale Form mit übersteilten Hängen, breitem, oft übertieftem Boden und Trogschultern; ein Kerbtal ist eine fluviale Form.

Bei einer Talform immer den Prozess nennen, der sie erzeugt: Tiefenerosion, Seitenerosion, Hangabtragung oder Gletscherschurf.

6.2.1 Wie Flussterrassen entstehen

In den Kaltzeiten lieferten Frostsprengung und Solifluktion riesige Schuttmengen, während die Flüsse wegen des gefrorenen Bodens nur im Sommer viel Wasser führten. Sie konnten den Schutt nicht abtransportieren und schütteten ihre Täler mit Schotter auf (Akkumulation). In den Warmzeiten führten die Flüsse unter dichter Vegetation weniger Schutt, aber gleichmäßig Wasser; sie schnitten sich in die eigenen Schotter ein (Erosion). Jeder Wechsel hinterlässt eine Terrasse, ältere liegen höher. Hebt sich zusätzlich das Land, wird die Treppe noch deutlicher. Im Alpenvorland unterscheidet man so die Niederterrasse der Würm-Kaltzeit, die Hochterrasse der Riß-Kaltzeit und die noch älteren Deckenschotter.

6.3 Mäander

Fließt ein Fluss mit geringem Gefälle durch Lockermaterial, bildet er Schlingen, die **Mäander** (nach dem Fluss Büyük Menderes in der Türkei). Der Grund ist eine Selbstverstärkung: In einer Kurve wird das Wasser durch die Fliehkraft an das Außenufer gedrückt; dort fließt es schneller, und der **Stromstrich** (die Linie der größten Geschwindigkeit) liegt nahe dem Außenufer. Am Außenufer erodiert der Fluss deshalb und bildet einen steilen **Prallhang**. Eine Sekundärströmung am Grund führt Material zum Innenufer, wo das Wasser langsam fließt; dort lagert sich Sand und Kies ab, und es entsteht ein flacher **Gleithang** (Abbildung 50). So wird jede Kurve immer stärker gekrümmt.

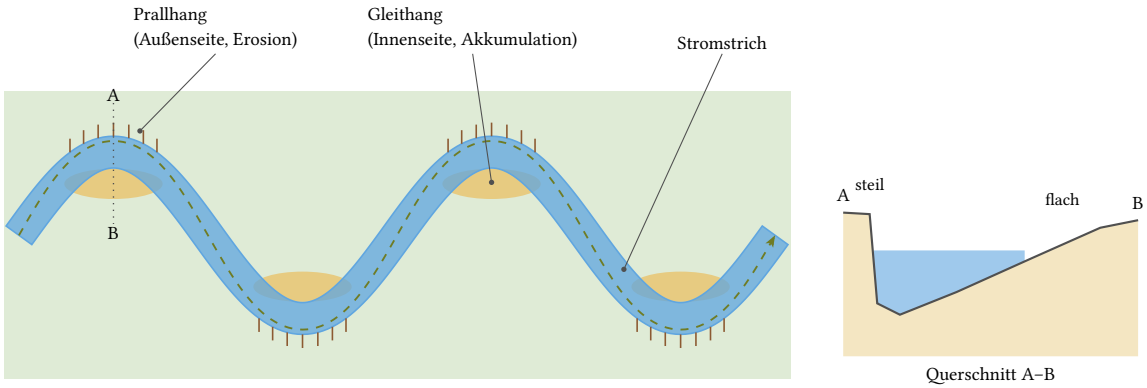


Abbildung 50: Mäander in der Aufsicht und Querschnitt durch eine Flussschlinge (schematisch).

Nähern sich zwei Schlingen so weit, dass der Mäanderhals bei Hochwasser durchbrochen wird, schneidet der Fluss die Schlinge ab; zurück bleibt ein **Altarm** (Altwasser), der allmählich verlandet. **Freie Mäander** pendeln in einer breiten Aue hin und her (Mississippi, Amazonas, früher der Oberrhein). Schneidet sich ein mäandrierender Fluss bei Hebung des Landes ein, entstehen **Talmäander** (Zwangsmäander) mit Prallhang und Gleithang aus festem Gestein: die Saarschleife bei Mettlach, die Moselschlingen, die Neckarschlingen bei Mundelsheim.

Beispiel 4

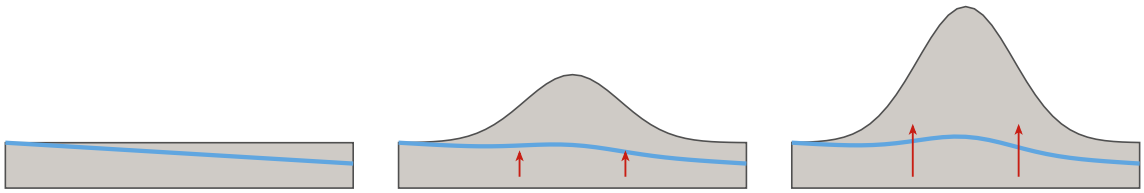
Die Rheinbegradigung durch Tulla. Im 19. Jahrhundert ließ der badische Ingenieur Johann Gottfried Tulla den verwilderten, mäandrierenden und in viele Arme verzweigten Oberrhein in ein einziges Bett zwingen. Zwischen Basel und Worms wurde der Fluss dadurch um rund 80 km kürzer. Das Gefälle nahm zu, der Rhein schnitt sich ein (unterhalb von Basel um mehrere Meter), der Grundwasserspiegel sank, Auenwälder trockneten aus, und Hochwasserwellen laufen seither schneller und höher rheinabwärts. Heute versuchen Rückhalteräume und Renaturierungen einen Teil der Auen zurückzugewinnen.

6.4 Durchbruchstäler: Antezedenz und Epigenese

Manchmal durchquert ein Fluss ein Gebirge, statt es zu umfließen – der Rhein das Rheinische Schiefergebirge, die Donau die Weißjura-Kalke bei Weltenburg. Für solche Durchbruchstäler gibt es zwei Erklärungen (Abbildung 51):

- **Antezedenz:** Der Fluss war zuerst da. Hebt sich quer zu seinem Lauf ein Gebirge, schneidet er sich ebenso schnell ein, wie das Land aufsteigt, und behält seine Richtung. Die Himalaya-Flüsse Indus, Arun und Brahmaputra sind älter als Teile des Gebirges, das sie durchbrechen.
- **Epigenese:** Der Fluss floss ursprünglich auf weichen Deckschichten, unter denen ein widerständiger Gesteinskörper begraben lag. Beim Einschneiden trifft er auf den Härtling, behält aber sein Bett bei und „pausiert“ sich hindurch. Werden später die Deckschichten ringsum abgetragen, durchbricht der Fluss scheinbar unmotiviert einen Bergrücken.

a) Antezedenz: Der Fluss ist älter als die Hebung und hält mit ihr Schritt.



b) Epigenese: Der Fluss schneidet sich von oben durch Deckschichten in einen begrabenen Härtling ein.

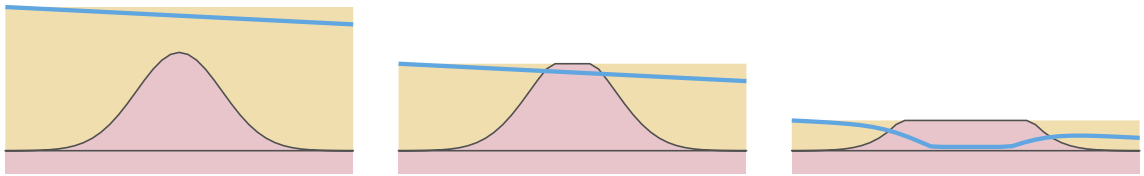


Abbildung 51: Antezedenz und Epigenese, jeweils im Längsschnitt des Flusses (schematisch).

Oft ist schwer zu entscheiden, welche Erklärung zutrifft. Beim Mittelrheintal wirkten vermutlich beide zusammen: Der Rhein floss zunächst auf jüngeren Ablagerungen über dem Schiefergebirge (epigenetisch) und schnitt sich dann während dessen Hebung im Quartär ein (antezedent).

6.5 Flussanzapfung

Bei der **Flussanzapfung** gräbt sich ein Fluss durch rückschreitende Erosion so weit in das Einzugsgebiet eines Nachbarflusses zurück, dass er dessen Oberlauf abzapft (Abbildung 52). Das gelingt dem Fluss mit dem steileren Gefälle, also der tieferen Erosionsbasis. An der Anzapfungsstelle knickt der Lauf scharf ab (Anzapfungsknie); der alte Unterlauf des angezapften Flusses verliert sein Wasser und wird zum Trockental oder zu einem viel zu kleinen Bach in einem viel zu großen Tal.

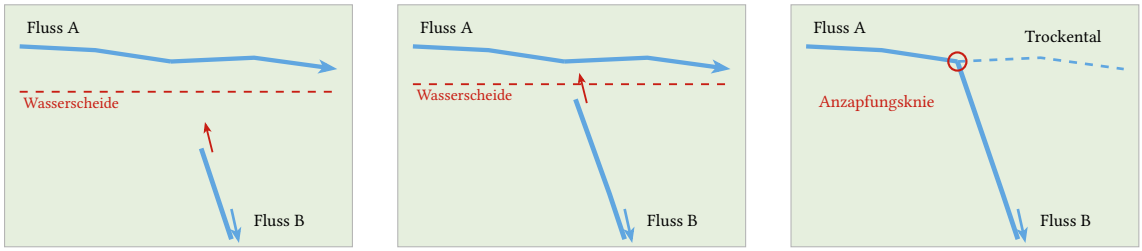


Abbildung 52: Flussanzapfung in der Aufsicht (schematisch).

Das klassische Beispiel liegt in Baden-Württemberg. Bis in die letzte Kaltzeit floss die obere Wutach vom Feldberg als **Feldbergdonau** nach Osten zur Donau. Ein Nebenfluss des Hochrheins (Mündung bei Waldshut auf nur gut 300 m), der damit ein viel steileres Gefälle hatte als die Donau auf ihrem langen Weg zum Schwarzen Meer, tiefte sich rückschreitend ein und zapfte die Feldbergdonau bei Blumberg an. Seitdem biegt die Wutach dort im Wutachknie scharf nach Süden ab und hat sich die tiefe Wutachschlucht gegraben; das alte Tal nach Osten (Aitrachtal) ist für die kleine Aitrach viel zu breit. Der Rhein gewinnt so auf Kosten der Donau Einzugsgebiet – auch unterirdisch bei der Donauversickerung (Abschnitt 9).

6.6 Wasserfälle und Trockentäler

Ein **Wasserfall** entsteht dort, wo ein Fluss über eine Gefällsstufe stürzt: an der Grenze eines harten über einem weichen Gestein, an einer Verwerfung, an der Mündung eines Hängetals oder an einer Kliffkante. Am Fuß strudelt das Wasser einen Kolk aus und unterhöhlt die harte Kante, die schließlich abbricht. So wandert ein Wasserfall durch rückschreitende Erosion flussaufwärts. Die Niagarafälle haben sich seit dem Ende der letzten Kaltzeit rund 11 km zurückverlegt. Der Rheinfall bei Schaffhausen (etwa 23 m hoch) entstand, als der Rhein nach der letzten Kaltzeit in ein neues Bett gedrängt

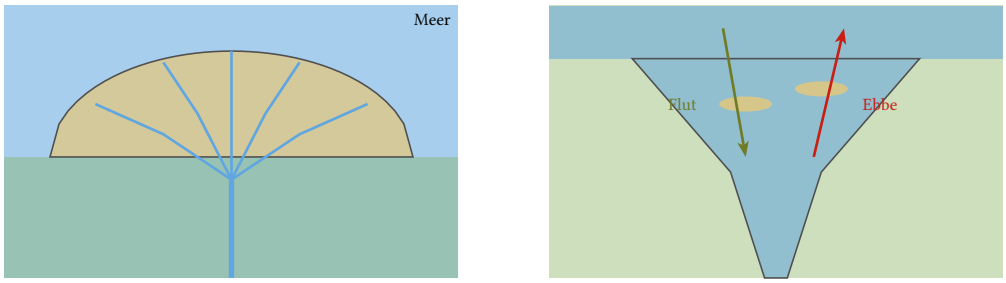
wurde und über eine Kalkstufe in eine alte, mit Schotter gefüllte Rinne stürzt. Die Triberger Wasserfälle im Schwarzwald überwinden in mehreren Stufen über 160 m.

Ein **Trockental** ist ein Tal ohne ständig fließendes Gewässer. Es wurde von einem Fluss geschaffen, der heute fehlt. Ursachen sind: Versickerung in verkarstetem Gestein (Abschnitt 9), ein früher feuchteres Klima oder gefrorener Untergrund in den Kaltzeiten (Periglazial), eine Flussanzapfung oder das Absinken des Grundwassers.

6.7 Flussmündungen: Delta und Ästuar

Wo ein Fluss ins Meer oder in einen See mündet, verliert er schlagartig an Geschwindigkeit. Was dann geschieht, hängt vom Verhältnis zwischen seiner Sedimentfracht und der Kraft der Gezeiten und Wellen ab (Abbildung 53):

- Ein **Delta** entsteht, wenn der Fluss viel Sediment bringt und Gezeiten und Brandung schwach sind. Der Fluss schüttet seine Fracht ins Meer, teilt sich in Mündungsarme und baut neues Land vor (Nil, Po, Mississippi, Ganges-Brahmaputra). Deltas sind fruchtbar und dicht besiedelt, liegen aber nur wenig über dem Meeresspiegel und sinken durch Setzung der Sedimente; sie gehören zu den am stärksten durch Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten bedrohten Räumen der Erde.
- Ein **Ästuar** (Trichtermündung) entsteht bei starkem Tidenhub. Die Gezeitenströmung räumt die Mündung immer wieder aus und weitet sie trichterförmig auf (Elbe, Weser, Themse, Seine). Ästuare sind ideale Standorte für Seehäfen (Hamburg, London), müssen für große Schiffe aber ständig ausgebaggert werden.



a) Delta: Sedimente wachsen ins Meer (geringer Tidenhub, viel Fracht)

b) Ästuar (Trichtermündung): Gezeitenströmung räumt die Mündung aus

Abbildung 53: Delta und Ästuar in der Aufsicht (schematisch).

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
Akkumulation: Anhäufung von Sedimenten über längere Zeit, schüttet Formen auf
Antezedenz: Fluss schneidet sich in ein Gebirge ein, das sich quer zu seinem Lauf hebt
Canyon: tiefes Tal mit Stufenwänden im Trockengebiet (starke Tiefenerosion, geringe Hangabtragung)
Delta: ins Meer vorgebaute Flussmündung mit Mündungsarmen; viel Fracht, schwache Gezeiten
Denudation: flächenhafte Abtragung an den Hängen
Epigenese: Fluss pausiert sich von Deckschichten aus durch einen begrabenen Härtling
Erosion: linienhafte Abtragung, v. a. durch fließendes Wasser
Flussanzapfung: Fluss zapft durch rückschreitende Erosion den Oberlauf eines Nachbarflusses ab
Gleithang: flaches Innenufer einer Flusskurve mit Ablagerung
Kerbtal: V-förmiges Tal, Tiefenerosion und Hangabtragung im Gleichgewicht
Klamm: sehr enges Tal mit senkrechten Wänden, vom Fluss ganz ausgefüllt
Mäander: Flussschlinge; durch Prallhang-Erosion und Gleithang-Ablagerung verstärkt
Muldental: flaches, sanft geschwungenes Tal ohne Hangknick
Prallhang: steiles Außenufer einer Flusskurve mit Erosion
Schlucht: enges Tal mit sehr steilen Hängen, Sohle vom Fluss eingenommen
Sedimentation: Ablagerung, sobald die Transportkraft nachlässt
Sohlental: Tal mit ebener Talsohle und deutlichem Knick zu den Hängen
Talform: Querschnitt eines Tals als Ergebnis von Tiefenerosion, Seitenerosion und Hangabtragung
Terrassental: Tal mit treppenartigen Resten früherer Talböden
Trockental: Tal ohne ständigen Abfluss, von einem früheren Fluss geschaffen
Trogtal: glazial geformtes U-Tal (Kapitel 4)
Wasserfall: Absturz eines Flusses über eine Gefällsstufe, wandert rückschreitend
Ästuar: trichterförmige, von Gezeiten ausgeräumte Flussmündung

Üben: **noctua** ↗

7 Küstenlandschaft

BP 3.5.2.1 (5) Wahllandschaft · 2027 nicht schriftlich

> **Wahlpflicht:** Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Diese Landschaft gehört 2027 nicht zum schriftlichen Schwerpunkt, bleibt aber Stoff des Leistungsfachs (mündliche Prüfung, Klausuren).

Küsten sind Grenzräume zwischen Land und Meer, an denen sich die Formen besonders schnell ändern. Ein Sturm kann einen Strand in einer Nacht abtragen, ein Kliff um Meter zurückversetzen oder eine Insel durchbrechen. Zugleich wohnt ein großer Teil der Menschheit an Küsten. Die Küstenformen hängen von vier Faktoren ab: der Energie der Wellen, dem Tidenhub, dem Gestein und der Geschichte des Meeresspiegels.

7.1 Brandung, Gezeiten und Meeresspiegel

Brandung. Wind erzeugt Wellen. Läuft eine Welle in flaches Wasser, wird sie am Grund abgebremst, steilt sich auf und bricht. Diese Brandung ist die wichtigste formende Kraft an Küsten: Sie schlägt mit großer Wucht gegen Fels, presst Luft in Klüfte und schleudert Steine. Wellen, die schräg auf den Strand laufen, versetzen Sand und Kies in einem Zickzack entlang der Küste (**Strandversetzung**, Küstenlängstransport).

Gezeiten. Die Anziehungskraft von Mond und Sonne hebt und senkt den Meeresspiegel an den meisten Küsten zweimal täglich (Periode etwa 12 Stunden 25 Minuten). Den Unterschied zwischen Hochwasser und Niedrigwasser nennt man **Tidenhub**. Er ist in Randmeeren und Buchten besonders groß: an der deutschen Nordseeküste etwa 2 bis knapp 4 m, in der Bay of Fundy in Kanada bis etwa 16 m. In der Ostsee, die nur durch schmale Meerengen mit der Nordsee verbunden ist, macht er nur wenige Zentimeter aus. Bei Voll- und Neumond (Springtide) ist der Tidenhub größer, bei Halbmond (Nipptide) kleiner.

Meeresspiegel. Am Ende der letzten Kaltzeit lag der Meeresspiegel rund 120 m tiefer als heute. Mit dem Abschmelzen der Eisschilde stieg er, bis vor etwa 6000 bis 7000 Jahren, sehr rasch an und überflutete Täler und Moränenlandschaften. Fast alle heutigen Küsten sind deshalb jung. Seit 1901 ist der Meeresspiegel um etwa 0,20 m gestiegen; der Anstieg beschleunigt sich (2006–2018 etwa 3,7 mm pro Jahr, IPCC 2021).

7.2 Steilküste

An einer **Steilküste** trifft die Brandung auf festes Gestein. Sie wirkt durch **Abrasion**: die abschleifende und zertrümmernde Arbeit der Wellen, die Sand und Gerölle als Werkzeuge gegen den Fels schleudern. Am Fuß der Felswand, im Bereich zwischen Niedrig- und Hochwasser, schlägt die Brandung eine **Brandungshohlkehle** aus. Wird sie zu tief, bricht die überhängende Wand nach; es entsteht eine steile Wand, das **Kliff** (Abbildung 54). Der Schutt am Fuß wird von den Wellen zerkleinert und abtransportiert, dann beginnt der Kreislauf von vorn. So wandert das Kliff landeinwärts, und vor ihm bleibt eine leicht seewärts geneigte Felsfläche zurück, die **Abrasionsplatte** (Schorre), die bei Niedrigwasser trockenfällt.

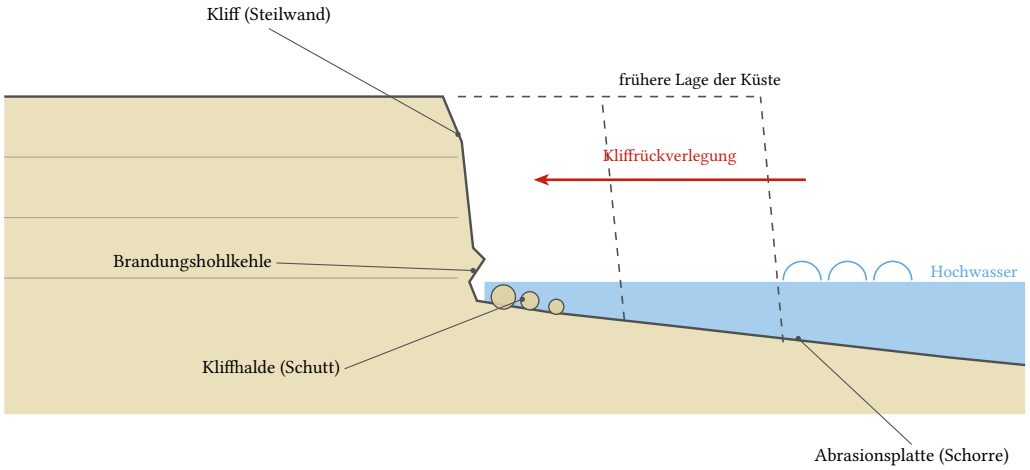


Abbildung 54: Steilküste mit Kliff, Brandungshohlkehle und Abrasionsplatte (schematisch, überhöht).

Beispiele sind die Kreidefelsen auf Rügen (Königsstuhl) und bei Dover, der Buntsandstein von Helgoland, die Kalkküste der Normandie mit Felstoren und Brandungspfeilern (Étretat) oder die Algarve. Kliffe in Lockermaterial – etwa die Moränenkliffe der Ostseeküste – weichen besonders schnell zurück, oft um mehrere Dezimeter pro Jahr, bei Sturm auch um Meter.

7.3 Flachküste und Ausgleichsküste

Eine **Flachküste** fällt sanft zum Meer ab; vor ihr liegen Sand- oder Kiesstrände, oft mit Dünen dahinter. Hier überwiegt nicht die Abtragung, sondern der Transport und die Ablagerung von Sand.

Die Ostseeküste zeigt, wie sich eine buchtenreiche Küste mit der Zeit begradigt. Nach dem Meeresspiegelanstieg drang das Meer in die unregelmäßige Grundmoränenlandschaft ein; die Senken wurden überflutet, die Kuppen blieben als Inseln und Halbinseln stehen. So entstand eine **Boddenküste** mit flachen, verzweigten Buchten (Bodden), wie sie an der Küste Vorpommerns und um Rügen bis heute erhalten ist.

An einer solchen Küste arbeitet die Brandung an den Vorsprüngen, schafft dort Kliffe und liefert Sand. Die Strandversetzung trägt den Sand an der Küste entlang und lagert ihn dort ab, wo die Küste zurückspringt: Von den Vorsprüngen aus wachsen Sandhaken quer über die Buchten. Erreichen sie das nächste Ufer, schnüren sie die Bucht als **Haff** (Lagune) vom Meer ab; der schmale Sandstreifen heißt **Nehrung** (Abbildung 55). Am Ende ist die Küste fast geradlinig: eine **Ausgleichsküste**. Die Kurische Nehrung zwischen Litauen und Russland ist rund 98 km lang und trägt Wanderdünen; dahinter liegt das Kurische Haff. Auch die Halbinsel Fischland-Darß-Zingst ist durch Nehrungen zwischen ehemaligen Inseln entstanden.

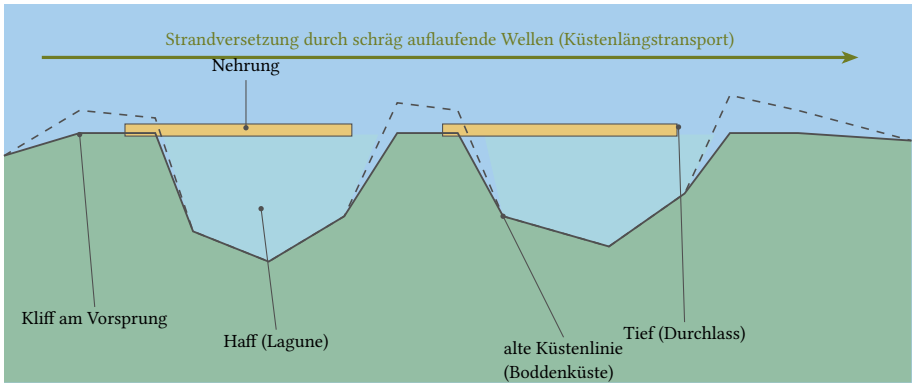


Abbildung 55: Entwicklung von der Boddenküste zur Ausgleichsküste in der Aufsicht (schematisch).

7.4 Wattenmeerküste

An der Nordseeküste ist der Tidenhub groß, das Küstenvorland sehr flach. Hier hat sich eine Gezeitenküste mit eigenen Formen gebildet (Abbildung 56).

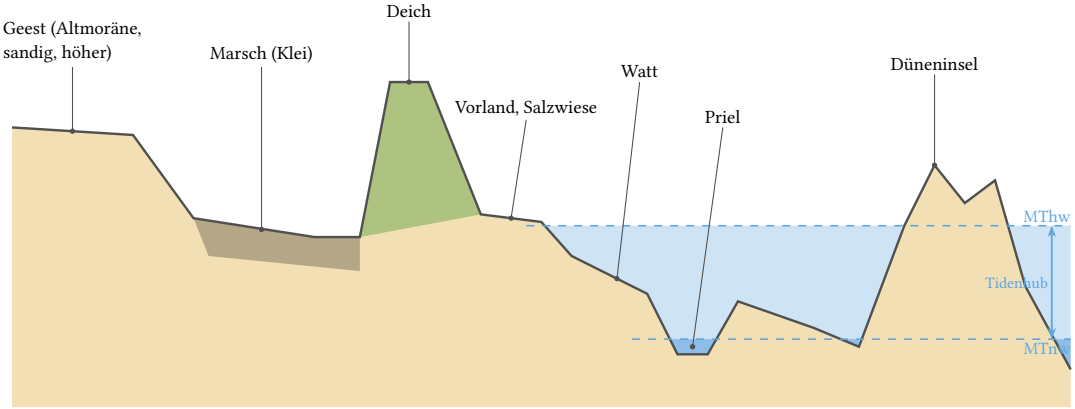


Abbildung 56: Wattenmeerküste im Profil (schematisch, stark überhöht).

- Das **Watt** ist der Meeresboden, der bei Niedrigwasser trockenfällt und bei Hochwasser überflutet wird. Je nach Strömung besteht es aus Sand, Schlick (feinem Ton mit organischem Material) oder einer Mischung. Das Wattenmeer der Nordsee ist das größte zusammenhängende Gezeitengebiet der Erde und seit 2009 Weltnaturerbe der UNESCO.

- **Priele** sind die Rinnen im Watt, durch die das Wasser bei Flut ein- und bei Ebbe ausströmt. Sie verzweigen sich wie ein Flussnetz und verlagern sich ständig.
- Die **Marsch** ist das flache, fruchtbare Land aus Meeresschlick (Klei) hinter der Küste. Sie entsteht, wo bei ruhiger Strömung Schlick abgelagert und von Salzwiesen festgehalten wird, bis das Land über das mittlere Hochwasser hinauswächst. Menschen haben die Marschen eingedeicht (Köge, Polder); viele liegen heute auf Meereshöhe oder darunter, weil der entwässerte Boden sackt.
- Die **Geest** ist das höhere, trockene und sandige Land landeinwärts der Marsch. Sie besteht aus Altmoränen und Sandern der Saale-Kaltzeit (Abschnitt 5) und war wegen ihrer sicheren Lage früh besiedelt, ist aber weniger fruchtbar.
- Vor dem Watt liegen Inseln: die **Ostfriesischen Inseln** sind Düneninseln auf Sandbänken, die mit der Strömung langsam nach Osten wandern; einige **Nordfriesische Inseln** (Sylt, Amrum, Föhr) haben einen Kern aus Geest, die kleinen **Halligen** sind nicht eingedeichte Marschinseln.

7.5 Sturmflut und Küstenschutz

Eine **Sturmflut** entsteht, wenn starker, lang anhaltender auflandiger Wind das Wasser gegen die Küste staut und dieser Windstau mit dem Hochwasser der Gezeiten zusammentrifft, besonders bei Springtide. Der Wasserstand kann dann mehrere Meter über dem normalen Hochwasser liegen. In der Nacht vom 16. auf den 17. Februar 1962 brachen in Hamburg die Deiche; 315 Menschen starben allein in der Stadt. Neun Jahre zuvor war in den Niederlanden die verheerende Flut von 1953 (rund 1800 Tote) Anlass für die Deltawerke. Noch weit verwundbarer sind die dicht besiedelten Deltas Süd- und Südostasiens: Der Zyklon von 1970 tötete im heutigen Bangladesch mehrere hunderttausend Menschen.

Der **Küstenschutz** hat zwei Ziele: Menschen und Land vor Überflutung zu schützen und den Rückgang der Küste zu bremsen.

- **Deiche** schützen das Hinterland; ihre Höhe richtet sich nach dem höchsten zu erwartenden Sturmflutwasserstand. Nach jeder schweren Flut wurden sie erhöht und verstärkt, und heute plant man einen Zuschlag für den Meeresspiegelanstieg ein.
- **Sperrwerke** schließen Flussmündungen bei Sturmflut (Eidersperrwerk, Oosterschelde-Sperrwerk).
- **Sandvorspülungen** ersetzen den Sand, den Stürme abtragen; vor Sylt wird jedes Jahr Sand im Millionen-Kubikmeter-Bereich aufgespült. Buhnen und Wellenbrecher sollen die Strandversetzung bremsen, verlagern das Problem aber oft nur an benachbarte Küstenabschnitte.
- **Lahnungen** (Buschzäune im Watt) beruhigen die Strömung, damit sich Schlick ablagert und Vorland wächst; ein breites Vorland bremst die Wellen vor dem Deich.

Mit dem Meeresspiegelanstieg wird der Küstenschutz teurer. Neben dem Erhöhen von Deichen wird diskutiert, Räume gezielt dem Meer zu überlassen, damit Salzwiesen und Watt mitwachsen können.

7.6 Glazial geprägte Küsten: Fjord, Förde, Schäre

Wo Gletscher die Küste geformt haben, bevor das Meer stieg, entstanden drei besondere Küstentypen:

- Ein **Fjord** ist ein vom Meer überflutetes Trogtal: lang, schmal, mit steilen Wänden und oft sehr tief; an der Mündung liegt häufig eine flachere Felsschwelle. Der Sognefjord in Norwegen ist rund 200 km lang und über 1300 m tief. Fjordküsten gibt es in Norwegen, Grönland, Südchile, Neuseeland und British Columbia.
- Eine **Förde** ist eine lange, schmale Meeresbucht mit flachen Ufern in einer Grundmoränenlandschaft, entstanden aus einer überfluteten subglazialen Rinne oder einem Zungenbecken. Die Kieler und die Flensburger Förde an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins sind Beispiele; ihre geschützte Lage macht sie zu Hafenstandorten.
- **Schären** sind die unzähligen kleinen Felsinseln vor den Küsten Schwedens und Finnlands. Sie sind teilweise überflutete Rundhöcker; das Eis hat den Fels glattgeschliffen, das Meer füllt die Senken dazwischen.

Delta und Ästuar sind ebenfalls Küstenformen; sie wurden schon bei der Flusslandschaft erklärt (Abschnitt 6).

> **Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel**
> **Abrasion:** abschleifende und zertrümmernde Arbeit der Brandung an der Küste
> **Ausgleichsküste:** durch Abtragung der Vorsprünge und Nehrungen vor den Buchten begradigte Küste
> **Boddenküste:** vom Meer überflutete, unregelmäßige Grundmoränenlandschaft mit flachen Buchten
> **Brandung:** brechende Wellen an der Küste, wichtigste formende Kraft
> **Delta:** ins Meer vorgebaute Flussmündung (Kapitel 6)
> **Fjord:** überflutetes glaziales Trogtal, lang, schmal und tief

Flachküste: sanft abfallende Küste mit Strand und Dünen, Transport und Ablagerung überwiegen
Förde: lange, schmale Meeresbucht in Grundmoräne, aus subglazialer Rinne oder Zungenbecken
Geest: höheres, sandiges Altmoränen- und Sanderland hinter der Marsch
Gezeiten: zweimal tägliches Steigen und Fallen des Meeresspiegels durch Mond und Sonne
Haff: durch eine Nehrung vom Meer abgeschnürte Bucht (Lagune)
Küstenschutz: Maßnahmen gegen Überflutung und Küstenrückgang (Deiche, Sperrwerke, Vorspülungen)
Marsch: flaches, fruchtbares Land aus abgelagertem Meeresschlick, meist eingedeicht
Nehrung: schmaler Sandstreifen, der eine Bucht vom Meer trennt
Priel: Rinne im Watt, durch die das Gezeitenwasser strömt
Schäre: kleine, vom Eis überschliffene Felsinsel (überfluteter Rundhöcker)
Steilküste: Küste mit Kliff, an der die Brandung Fels abträgt
Sturmflut: Hochwasser durch Windstau, oft zusammen mit Springtide
Watt: Meeresboden, der bei Niedrigwasser trockenfällt
Ästuar: trichterförmige, von den Gezeiten offen gehaltene Flussmündung (Kapitel 6)

Üben: **noctua** ↗

8 Schichtstufenlandschaft

BP 3.5.2.1 (5) Wahllandschaft · 2027 nicht schriftlich

> **Wahlpflicht:** Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Diese Landschaft gehört 2027 nicht zum schriftlichen Schwerpunkt, bleibt aber Stoff des Leistungsfachs (mündliche Prüfung, Klausuren).

Fährt man von Stuttgart nach Südosten, steigt das Land in Stufen an: Auf die Fildern folgt das Albvorland, dann ragt plötzlich der bewaldete Albtrauf mehrere hundert Meter auf, und oben erstreckt sich die weite, leicht nach Südosten geneigte Albhochfläche. Diese Abfolge von steilen Anstiegen und flachen Ebenen ist kein Zufall. Sie entsteht überall dort, wo flach geneigte Gesteinsschichten unterschiedlicher Härte abgetragen werden.

8.1 Voraussetzungen

Eine Schichtstufenlandschaft braucht drei Dinge:

a) Ein **Deckgebirge** aus Sedimentgesteinen, also Gesteinsschichten, die im Meer, in Seen oder auf dem Festland abgelagert wurden und über dem älteren Grundgebirge liegen.
b) Eine bestimmte **Schichtlagerung**: Die Schichten liegen nicht waagerecht, aber auch nicht steil, sondern sind flach geneigt, meist nur um wenige Grad. Diese Neigung heißt **Schichtfallen**.
c) **Petrovarianz**: einen Wechsel von Gesteinen unterschiedlicher Widerständigkeit gegen Verwitterung und Abtragung. Widerständig sind Kalkstein und gut verkittete Sandsteine; wenig widerständig sind Tone, Mergel und Tonsteine.

Dazu kommt Hebung des Gebiets, damit Flüsse sich einschneiden und die Schichten anschneiden können.

8.2 Wie eine Schichtstufe entsteht

Werden die geneigten Schichten abgetragen, wirken die beiden Gesteinsarten verschieden (Abbildung 57):

- Ein **Stufenbildner** ist eine harte Schicht, z. B. Kalk oder Sandstein. Er verwittert langsam und ist wegen seiner Klüfte wasserdurchlässig: Regenwasser versickert, statt oberflächlich abzufließen und abzutragen. Er bildet den steilen oberen Teil der Stufe und deren Dachfläche.
- Ein **Sockelbildner** ist eine weiche, tonreiche Schicht unter dem Stufenbildner. Er verwittert leicht, wird bei Nässe rutschig und ist wasserstauend. Er bildet den flacheren unteren Teil des Stufenhangs, den Sockel.

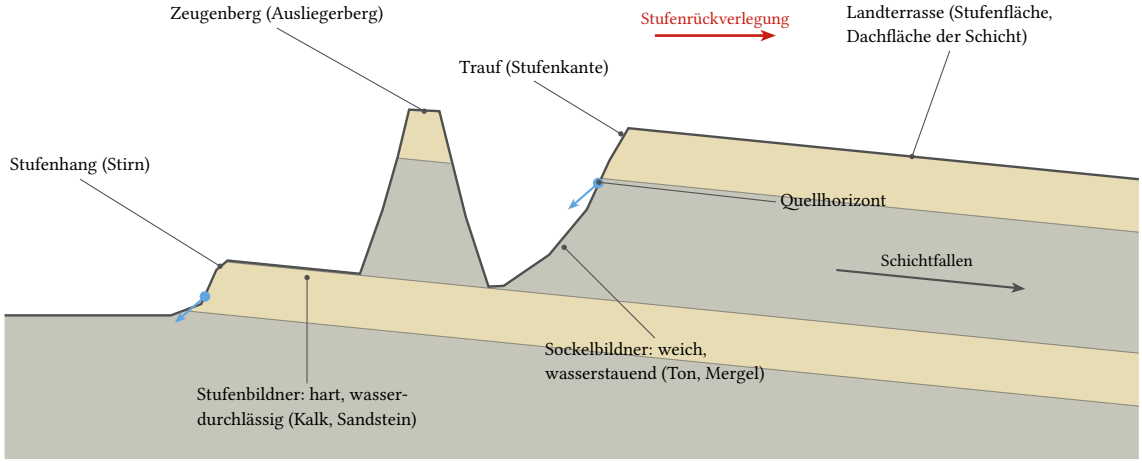


Abbildung 57: Schichtstufenlandschaft im Profil (schematisch, stark überhöht).

Das Sickerwasser im Stufenbildner fließt auf der Oberfläche des wasserstauenden Sockelbildners zur Seite und tritt am Stufenhang in einer Reihe von Quellen aus, dem **Quellhorizont**. Hier setzt die eigentliche Arbeit an: Die Quellen spülen den weichen Sockel aus, Rutschungen und Bergstürze lösen sich, die harte Kante darüber wird unterhöhlt und bricht nach. Bäche, die vom Quellhorizont abfließen, schneiden sich durch **rückschreitende Erosion** in den Stufenhang zurück. Die Stufe wird dadurch nicht abgeflacht, sondern bleibt steil und wandert langsam in Richtung des Schichtfallens zurück: **Stufenrückverlegung**.

Die Teile einer Schichtstufe haben eigene Namen:

- Der **Stufenhang** (Stirn) ist der steile Anstieg; die obere Kante heißt **Trauf** – so wie die Traufe eines Daches, von der das Wasser abtropft.
- Die **Landterrasse** (Stufenfläche, Dachfläche) ist die flach geneigte Oberfläche hinter dem Trauf. Sie folgt ungefähr der Oberfläche des Stufenbildners und fällt mit den Schichten sanft ab, bis die nächste, jüngere Stufe ansetzt.
- Ein **Zeugenberg** (Ausliegerberg) ist ein einzelner Berg vor dem Trauf, der noch eine Kappe aus dem Stufenbildner trägt. Er „bezeugt", dass die Stufe früher weiter reichte; die Abtragung hat ihn von der Stufe abgetrennt.

Merksatz

Schichtstufen entstehen bei flach geneigter Schichtlagerung mit Wechsel harter, durchlässiger **Stufenbildner** und weicher, wasserstauender **Sockelbildner**. Am **Quellhorizont** setzt die Abtragung an; durch Quellerosion, Rutschungen und rückschreitende Erosion wird die Stufe in Richtung des Schichtfallens zurückverlegt. Die Stufen zeigen gegen das Schichtfallen.

8.3 Das Südwestdeutsche Schichtstufenland

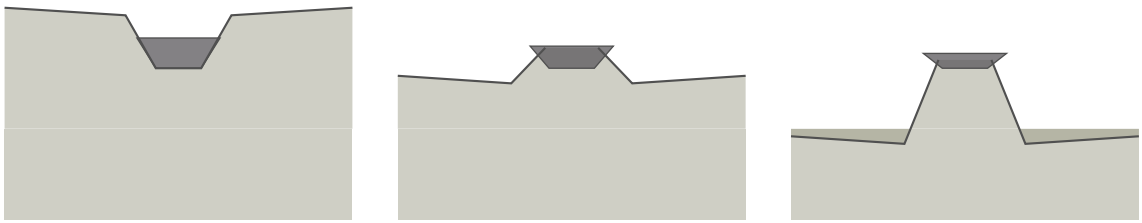
In Baden-Württemberg ist die Schichtstufenlandschaft lehrbuchhaft ausgebildet. Die Schichten des Deckgebirges fallen vom Schwarzwald und Odenwald flach nach Südosten ein; deshalb zeigen die Stufen nach Nordwesten. Von West nach Ost folgen:

- **Buntsandstein:** bildet die Hochflächen des Nordschwarzwalds und des Odenwalds.
- **Muschelkalk:** bildet die fruchtbaren Gäuflächen (Korngäu, Strohgäu, Hohenloher Ebene) und in den Tälern steile Prallhänge mit Weinbergen (Neckar bei Besigheim, Jagst, Kocher).
- **Keuper:** bildet mit seinen Sandsteinen (z. B. Stubensandstein) die Keuperstufe mit Schönbuch, Schurwald, Welzheimer Wald, Löwensteiner Bergen und Stromberg; die bunten Mergel dazwischen sind die Sockelbildner.
- **Schwarzer Jura:** bildet mit harten Kalksandsteinbänken die flachen Liasplatten, auf denen z. B. die Filder liegen.
- **Brauner Jura:** weiche Tone im Albvorland, Sockelbildner der Albstufe.
- **Weißer Jura:** Kalke und Riffkalke bilden die mächtigste Stufe, die Schwäbische Alb mit dem bis zu 400 m hohen Albtrauf.

Die Zeugenberge vor dem Albtrauf zeigen, wie weit die Alb früher nach Nordwesten reichte: die „Kaiserberge" Hohenstaufen, Rechberg und Stuifen, die Achalm bei Reutlingen und der Hohenzollern bei Hechingen. Die Schichtstufenlandschaft Südwestdeutschlands ist Teil eines größeren Gebiets, das sich bis Franken fortsetzt; das bekannteste Gegenstück ist das Pariser Becken mit seinen nach außen gerichteten Stufen (Côtes) in Lothringen und der Champagne. In Trockengebieten sind Schichtstufen besonders scharf ausgebildet, etwa auf dem Colorado-Plateau der USA.

8.4 Reliefumkehr

Die Abtragung arbeitet nicht nach der Höhenlage, sondern nach der Widerständigkeit der Gesteine. Das kann dazu führen, dass frühere Tiefenformen zu Vollformen werden und umgekehrt: **Reliefumkehr**. Das anschaulichste Beispiel liefert der Vulkanismus: Ein Lavastrom fließt in ein Tal und erstarrt zu hartem Basalt. Die weichen Gesteine der früheren Talhänge werden in langer Zeit abgetragen, der Basalt aber bleibt; aus dem ehemaligen Tal wird ein Rücken oder Tafelberg (Abbildung 58).



a) Lavastrom füllt ein Tal b) Umgebung (weich) wird abgetragen c) Lava bildet einen Rücken

Abbildung 58: Reliefumkehr: Ein Lavastrom im Tal wird zum Rücken (schematisch).

Auch im Albvorland gibt es Reliefumkehr: Manche Schlote des Schwäbischen Vulkans sind mit Tuff gefüllt, der widerständiger ist als die umgebenden Mergel und Tone; nach deren Abtragung bilden sie Hügel, etwa die Limburg bei Weilheim an der Teck oder den Jusi bei Kappishäusern. Ebenso können in gefalteten Schichten die Mulden zu Bergen werden, wenn ein harter Muldenkern stehen bleibt, während die weichen Sättel ausgeräumt werden.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
Deckgebirge: Sedimentgesteinsschichten über dem Grundgebirge (in Südwestdeutschland Trias und Jura)
Landterrasse: flach geneigte Dachfläche einer Schichtstufe auf dem Stufenbildner
Petrovarianz: Wechsel von Gesteinen unterschiedlicher Widerständigkeit
Quellhorizont: Quellenreihe an der Grenze von durchlässigem Stufenbildner und stauendem Sockelbildner
Reliefumkehr: frühere Hohlform wird durch selektive Abtragung zur Vollform oder umgekehrt
rückschreitende Erosion: Erosion, die sich von einer Gefällsstufe oder Quelle aus rückwärts ins Gelände frisst
Schichtlagerung: Lage der Gesteinsschichten, bei Schichtstufen flach geneigt
Sockelbildner: weiche, wasserstauende Schicht (Ton, Mergel) unter dem Stufenbildner
Stufenbildner: harte, durchlässige Schicht (Kalk, Sandstein), bildet Trauf und Landterrasse
Trauf: obere Kante des Stufenhangs
Zeugenberg: vom Trauf abgetrennter Berg mit Kappe aus Stufenbildner

Üben: **noctua** ↗

9 Karstlandschaft

BP 3.5.2.1 (5) Wahllandschaft · 2027 nicht schriftlich

> **Wahlpflicht:** Der Bildungsplan verlangt *zwei* der sechs Landschaften (Vulkan-, Fluss-, Glazial-, Küsten-, Schichtstufen- und Karstlandschaft); dieses Skript bringt alle sechs. Diese Landschaft gehört 2027 nicht zum schriftlichen Schwerpunkt, bleibt aber Stoff des Leistungsfachs (mündliche Prüfung, Klausuren).

Auf der Schwäbischen Alb fehlen die Bäche. Täler gibt es reichlich, aber sie sind trocken; das Regenwasser verschwindet in Spalten und Trichtern und tritt erst am Fuß der Alb in großen, blauen Quelltöpfen wieder aus. Unter der Hochfläche liegen Höhlen mit Tropfsteinen. All das sind Merkmale einer Karstlandschaft. Der Name stammt vom Kras (italienisch Carso), einem Kalkplateau im Hinterland von Triest.

9.1 Korrosion: Kalk wird gelöst

Karst entsteht in Gesteinen, die sich in Wasser lösen: vor allem in Kalkstein und Dolomit, außerdem in Gips und Salz. Den Lösungsvorgang nennt man in der Karstkunde **Korrosion**. Bei Kalk ist es die Kohlensäureverwitterung (Abschnitt 1):

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad \leftrightarrow \quad Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

Wie viel Kalk gelöst wird, hängt vom CO_2-Gehalt des Wassers ab, und der stammt weniger aus der Atmosphäre als aus der Bodenluft, in der Wurzelatmung und Zersetzung den CO_2-Gehalt um ein Vielfaches erhöhen. Deshalb verkarsten Gebiete unter Wald und Boden stärker als nackter Fels. Eine Besonderheit ist die **Mischungskorrosion**: Mischen sich zwei Wässer, die beide schon mit Kalk gesättigt sind, aber verschieden viel CO_2 enthalten, ist die Mischung wieder lösungsfähig. So können sich tief im Gestein, wo sich Kluftwässer treffen, noch Hohlräume erweitern.

Kalk ist fest, aber von Klüften und Schichtfugen durchzogen. Entlang dieser Wege dringt das Wasser ein und erweitert sie. Je weiter eine Kluft wird, desto mehr Wasser fließt hindurch und desto schneller wächst sie – ein selbstverstärkender Prozess, an dessen Ende ein unterirdisches Netz von Röhren und Höhlen steht.

9.2 Oberflächenformen

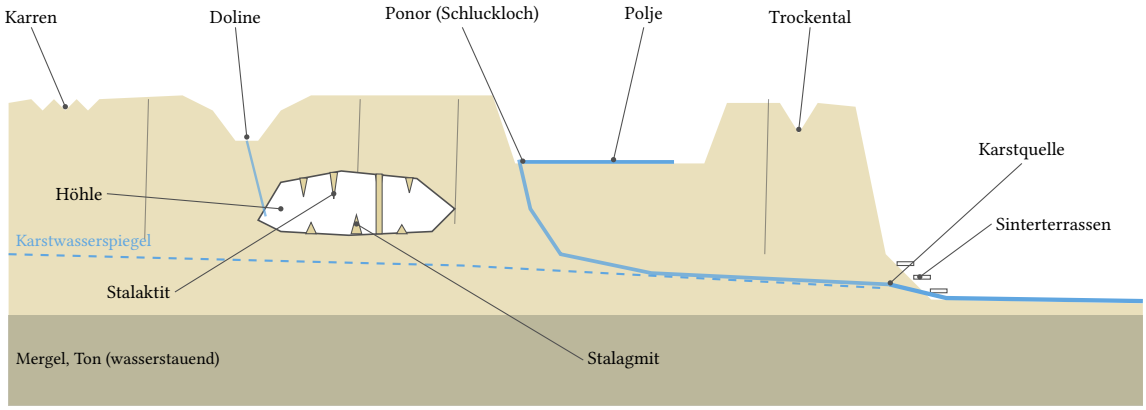


Abbildung 59: Formen einer Karstlandschaft im Profil (schematisch, stark überhöht).

- **Karren** (Schratten): Rillen, Rinnen und Furchen im nackten oder bodenbedeckten Kalk, Zentimeter bis Meter tief, vom ablaufenden Wasser gelöst. Große Karrenfelder gibt es in den Kalkalpen (Gottesackerplateau, Silberen).
- **Doline**: runde, schüssel- oder trichterförmige Senke von wenigen bis mehreren hundert Metern Durchmesser. **Lösungsdolinen** entstehen, wo Wasser an einer Kluftkreuzung bevorzugt versickert und den Kalk von oben löst; **Einsturzdolinen**, wo die Decke einer Höhle einbricht. Auf der Alb sind Dolinen häufig, oft als Reihen entlang von Klüften.
- **Ponor** (Schluckloch, Schwinde): Öffnung, in der ein Bach oder Fluss im Untergrund verschwindet.
- **Polje**: großes, geschlossenes Becken mit flachem, ebenem Boden und steilen Rändern, oft mehrere Kilometer lang. Der Boden ist mit Verwitterungslehm bedeckt und wird landwirtschaftlich genutzt. Bäche fließen über den Poljeboden und verschwinden in Ponoren am Rand. Können die Ponore das Wasser nach Starkregen oder Schneeschmelze nicht fassen, wird das Polje zum See – der Cerkniško jezero in Slowenien ist ein periodischer See, der fast jedes Jahr kommt und geht. Poljen sind typisch für das dinarische Karstgebirge auf dem Balkan.

- **Trockental**: Tal ohne ständig fließendes Wasser (Abschnitt 6). Die vielen Trockentäler der Alb entstanden, als Flüsse noch oberirdisch flossen – bevor die Verkarstung tief genug reichte, oder in den Kaltzeiten, als Permafrost die Klüfte abdichtete.

9.3 Unterirdischer Karst: Karstwasser und Höhlen

Weil das Wasser im Kalk in Klüften und Röhren schnell fließt, gibt es im Karst keinen gleichmäßigen Grundwasserkörper wie in Sand und Kies. Die Fläche, bis zu der die Hohlräume mit Wasser gefüllt sind, heißt **Karstwasserspiegel**. Er liegt oft tief unter der Oberfläche, schwankt nach Regen stark und neigt sich zu den Quellen am Rand des Karstgebiets. Darüber sickert das Wasser in trockenen Hohlräumen nach unten, darunter fließt es in wassergefüllten Röhren.

Eine **Karstquelle** ist der Austritt des Karstwassers, meist dort, wo der Kalk an wasserstauende Schichten oder an das Niveau eines Vorfluters grenzt. Karstquellen sind oft sehr ergiebig, ihre Schüttung schwankt aber stark, und nach Regen werden sie trüb, weil das Wasser im Karst kaum gefiltert wird. Am Südrand der Alb liegen große Quelltöpfe wie der Blautopf in Blaubeuren. Die größte Quelle Deutschlands ist der **Aachtopf** im Hegau mit einer mittleren Schüttung von etwa 8 m^3 pro Sekunde.

Beispiel 5

Die Donauversickerung. Zwischen Immendingen und Fridingen versickert die junge Donau in Spalten des Weißjurakalks. An vielen Tagen im Jahr, vor allem im Sommer und Herbst, fällt das Flussbett bei Immendingen ganz trocken. Ein Färbeversuch bewies 1877, dass das Wasser nach etwa zwei bis drei Tagen im rund 12 km entfernten Aachtopf wieder austritt. Von dort fließt es über die Radolfzeller Aach in den Bodensee und den Rhein. Unterirdisch zapft also der Rhein die Donau an – derselbe Vorgang wie an der Wutach (Abschnitt 6), nur im Karst.

Höhlen sind natürliche unterirdische Hohlräume, die ein Mensch betreten kann. Karsthöhlen entstehen, wenn Wasser Klüfte und Schichtfugen zu Röhren erweitert. Unter dem Karstwasserspiegel wachsen sie ringsum (runde Querschnitte); sinkt der Wasserspiegel, weil sich der Vorfluter eintieft, fallen sie trocken, und fließendes Wasser schneidet Rinnen in ihren Boden. Viele Höhlen haben deshalb mehrere Stockwerke, die frühere Karstwasserspiegel anzeigen. Bekannte Höhlen der Schwäbischen Alb sind die Bärenhöhle, die Nebelhöhle, die Laichinger Tiefenhöhle und das Höhlensystem hinter dem Blautopf, das nur Taucher erreichen. Einige Albhöhlen bergen einige der ältesten Kunstwerke der Menschheit, etwa rund 40 000 Jahre alte Elfenbeinfiguren; die „Höhlen und Eiszeitkunst der Schwäbischen Alb“ sind seit 2017 Welterbe der UNESCO.

9.4 Sinterbildung: Kalk wird wieder abgeschieden

Die Kohlensäureverwitterung ist umkehrbar. Tritt kalkgesättigtes Sickerwasser aus einer Kluft in eine Höhle, deren Luft weniger CO_2 enthält als die Bodenluft, entweicht CO_2 aus dem Wasser, und Kalk fällt aus. Diese **Sinterbildung** baut Kalkablagerungen auf, die **Sinter**.

- **Tropfsteine** entstehen, wo Wasser von der Decke tropft. Ein **Stalaktit** wächst von der Decke nach unten: Am Tropfen scheidet sich ein Kalkring ab, aus dem zunächst ein dünnes Röhrchen wird. Ein **Stalagmit** wächst vom Boden nach oben, wo der Tropfen aufschlägt und weiteres CO_2 abgibt. Treffen sich beide, entsteht eine Säule. Tropfsteine wachsen meist nur um Bruchteile eines Millimeters pro Jahr; ihre Lagen sind wertvolle Klimaarchive.
- **Sinterterrassen** bilden sich, wo kalkreiches Wasser an der Oberfläche über einen Hang fließt. An jeder kleinen Kante wird das Wasser verwirbelt, gibt CO_2 ab, und Kalk lagert sich ab; so wachsen treppenartige Becken mit Sinterrändern. Berühmte Beispiele sind Pamukkale in der Türkei und die Mammoth Hot Springs im Yellowstone-Nationalpark, wo warmes, CO_2-reiches Thermalwasser austritt, und die Plitvicer Seen in Kroatien, deren Seen durch Sinterbarrieren aufgestaut sind. Auch der Uracher Wasserfall fließt über eine selbst aufgebaute Nase aus Kalktuff.

9.5 Karst im Vergleich der Klimazonen

Karst sieht in jeder Klimazone anders aus. Im feuchten Tropenklima entsteht durch die starke Lösung ein **Kegel- und Turmkarst**: steile Kalktürme über einer Ebene, etwa bei Guilin in Südchina oder in der Ha-Long-Bucht in Vietnam, wo die Türme aus dem Meer ragen. Im Mittelmeerraum ist der Karst oft **nackt**, weil nach der Abholzung seit der Antike der Boden abgespült wurde (dinarischer Karst). Die Schwäbische Alb ist ein **bedeckter Karst** unter Boden und Wald, mit Trockentälern als Erbe der Kaltzeiten.

Karstgebiete sind besonders verwundbar: Was an der Oberfläche versickert, Gülle, Dünger oder Öl, erreicht ungefiltert und schnell die Quellen. Für die Trinkwasserversorgung gelten deshalb in Karstgebieten große Schutzzonen.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
Doline: runde, trichter- oder schüsselförmige Senke durch Lösung oder Einsturz
Höhle: natürlicher, begehbarer Hohlraum, im Karst durch Lösung entlang von Klüften
Karren: Rillen und Rinnen im Kalk, durch ablaufendes Wasser gelöst
Karstquelle: Austritt des Karstwassers, ergiebig, stark schwankend, kaum gefiltert
Karstwasserspiegel: Obergrenze der wassergefüllten Hohlräume im Karst
Korrosion: chemische Lösung des Gesteins, bei Kalk durch Kohlensäure
Polje: großes, flaches Becken mit steilen Rändern und Ponoren, oft periodisch überflutet
Ponor: Schluckloch, in dem ein Gewässer im Untergrund verschwindet
Sinterbildung: Abscheidung von Kalk, wenn CO_2 aus dem Wasser entweicht
Sinterterrassen: treppenartige Becken aus Kalksinter an Hängen mit kalkreichem Wasser
Stalagmit: vom Boden nach oben wachsender Tropfstein
Stalaktit: von der Decke nach unten wachsender Tropfstein
Trockental: Tal ohne ständigen Abfluss, im Karst durch Versickerung
Tropfstein: Sinterform aus tropfendem Wasser (Stalaktit, Stalagmit, Säule)

Üben: **noctua** ↗

10 Landschaftsgenese Südwestdeutschlands

BP 3.5.2.1 (4)

Baden-Württemberg ist auf engem Raum erstaunlich vielfältig: Rheinebene, Schwarzwald, Gäu, Keuperbergland, Alb, Oberschwaben, Bodensee. Mit den Begriffen der vorigen Kapitel lässt sich erklären, wie diese Landschaften in über 300 Millionen Jahren entstanden sind. Das Kapitel folgt der Erdgeschichte und zeigt, wie endogene Vorgänge (Gebirgsbildung, Grabenbruch, Hebung, Vulkanismus) und exogene Vorgänge (Ablagerung, Abtragung, Vergletscherung) zusammengewirkt haben.

10.1 Die Erdzeitalter

Die Erdgeschichte seit dem Auftreten vielzelliger Lebewesen mit Hartteilen gliedert man in drei Erdzeitalter (Abbildung 60):

- **Paläozoikum** (Erdaltertum), vor etwa 539 bis 252 Millionen Jahren,
- **Mesozoikum** (Erdmittelalter), vor etwa 252 bis 66 Millionen Jahren, mit Trias, Jura und Kreide,
- **Känozoikum** (Erdneuzeit), seit 66 Millionen Jahren, mit Paläogen, Neogen (früher zusammen „Tertiär“) und Quartär.

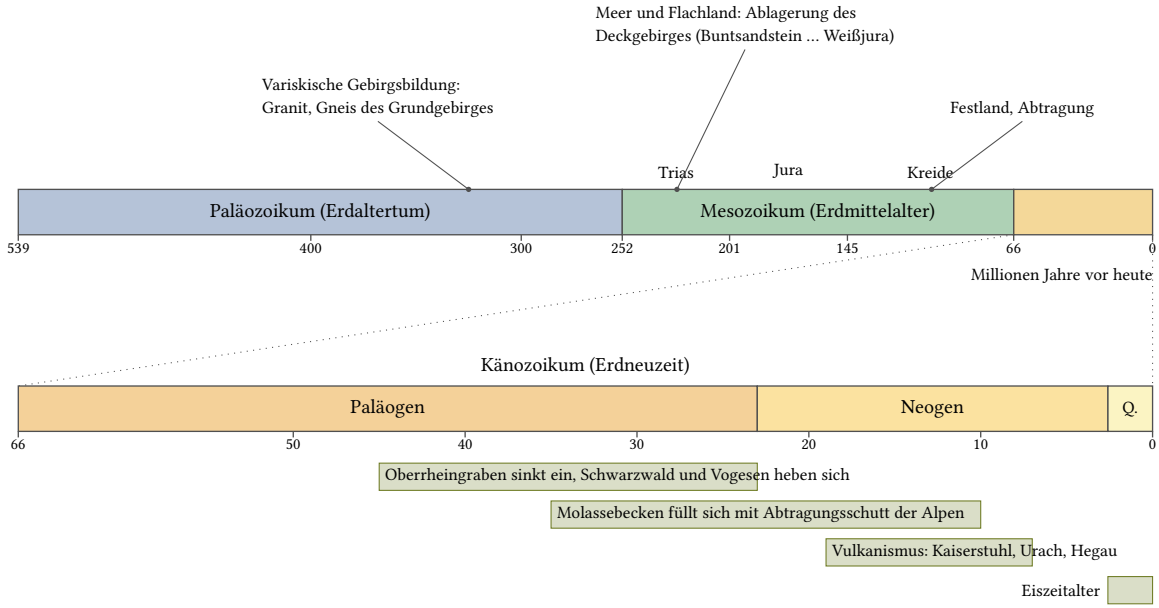


Abbildung 60: Erdzeitalter und wichtige Ereignisse in Südwestdeutschland; unten das Känozoikum gedehnt (Zeitangaben gerundet nach der Internationalen Chronostratigraphischen Tabelle).

10.2 Paläozoikum: das Grundgebirge

Im Karbon, vor etwa 350 bis 300 Millionen Jahren, stießen Kontinentalplatten zusammen und türmten das **Variskische Gebirge** auf, das von Südwesteuropa bis nach Polen reichte. In seiner Tiefe wurden ältere Gesteine unter hohem Druck und hoher Temperatur zu Gneisen umgewandelt, Magma drang ein und erstarrte zu Granit. Diese harten, kristallinen Gesteine bilden das **Grundgebirge**. Schon im späten Paläozoikum war das Gebirge weitgehend abgetragen; an seinem Fuß lagerten sich die roten Schuttmassen des Rotliegenden ab.

Das Grundgebirge tritt heute im südlichen und mittleren Schwarzwald, im Odenwald und in den Vogesen an die Oberfläche; überall sonst liegt es unter jüngeren Schichten verborgen.

10.3 Mesozoikum: das Deckgebirge

Im Mesozoikum lag Südwestdeutschland meist tief und war abwechselnd Festland, flaches Meer oder Küstenebene. Über dem eingeebneten Grundgebirge lagerten sich Schicht um Schicht Sedimente ab, die zusammen das **Deckgebirge** bilden:

Abteilung	Ablagerungsraum, Gesteine	heute an der Oberfläche
Buntsandstein (Trias)	Flüsse und Wüste auf dem Festland: rote Sandsteine	Nordschwarzwald, Odenwald
Muschelkalk (Trias)	flaches, warmes Meer: Kalke, Mergel, Steinsalz im Mittleren Muschelkalk	Gäuflächen, Hohenlohe, Neckar- und Taubertal
Keuper (Trias)	Küstenebene, Seen, Flüsse: bunte Mergel, Gips, Sandsteine	Keuperbergland, Stuttgarter Bucht
Schwarzer Jura (Lias)	Meer: dunkle Tone, Ölschiefer (Fossilien von Holzmaden), Kalksandsteine	Filder, Albvorland
Brauner Jura (Dogger)	Meer: Tone und eisenhaltige Sandsteine	Albvorland
Weißer Jura (Malm)	warmes Meer mit Schwamm- und Korallenriffen: Kalke	Schwäbische Alb

Tabelle 9: Das Deckgebirge Südwestdeutschlands, von unten (alt) nach oben (jung).

In der Kreidezeit wurde Südwestdeutschland Festland; Ablagerungen aus dieser Zeit fehlen, stattdessen begann die Abtragung. Die Steinsalzlager im Muschelkalk werden bis heute bei Heilbronn und Bad Friedrichshall abgebaut.

10.4 Känozoikum: Grabenbruch, Hebung, Schichtstufen

Die entscheidenden Ereignisse für das heutige Relief fallen ins Känozoikum. Sie hängen mit der Bildung der Alpen zusammen, die durch die Kollision der Afrikanischen mit der Eurasischen Platte entstanden.

Der Oberrheingraben. Seit dem Mitteleozän, vor etwa 45 Millionen Jahren, dehnte sich die Erdkruste zwischen Vogesen und Schwarzwald. Entlang von Verwerfungen sank ein rund 300 km langer und 35 bis 40 km breiter Streifen ein: ein **Grabenbruch**. Die Grabensohle ist gegenüber den Schultern um mehrere Kilometer versetzt, an manchen Stellen um gut 4 km. Weil der Graben gleichzeitig mit Sedimenten aufgefüllt wurde, ist er heute eine Ebene. Die Grabenränder sind bis heute aktiv; das zeigen Erdbeben (etwa bei Basel 1356) und die Thermalquellen von Baden-Baden und Badenweiler, die an den Randverwerfungen aufsteigen.

Hebung der Grabenschultern. Während der Graben einsank, hoben sich seine Ränder: Schwarzwald und Vogesen sind die Grabenschultern. Auf den gehobenen Schultern trug die Abtragung das Deckgebirge ab; im Süden des Schwarzwalds, wo die Hebung am stärksten war, liegt heute das Grundgebirge frei (Feldberg, 1493 m), im Norden blieb eine Decke aus Buntsandstein erhalten. Im Graben dagegen sind die abgesunkenen Schollen des Deckgebirges unter der Grabenfüllung erhalten geblieben (Abbildung 61).

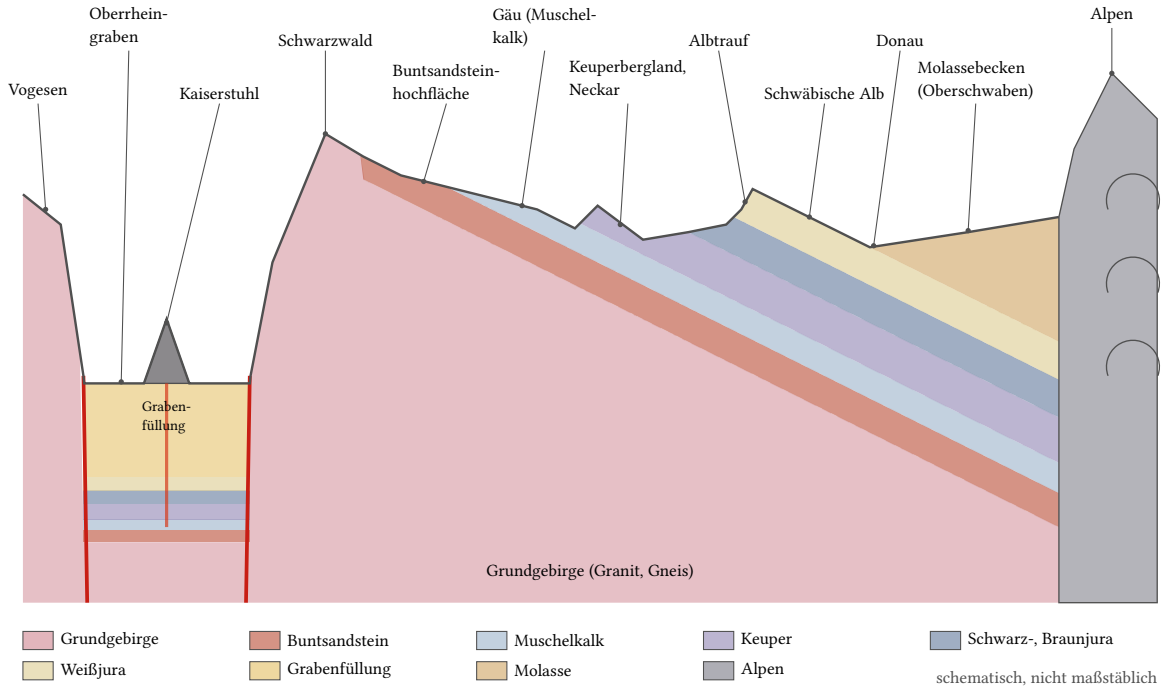


Abbildung 61: Schematisches Profil durch Südwestdeutschland von den Vogesen bis zu den Alpen (stark überhöht, nicht maßstäblich).

Die Schichtstufenlandschaft. Durch die Hebung am Rand des Grabens wurden die Schichten des Deckgebirges östlich des Schwarzwalds schräg gestellt; sie fallen flach nach Südosten ein. Die Flüsse schnitten sich ein, und die Abtragung legte die Schichten nacheinander frei. Weil harte und weiche Gesteine wechseln, entstand die **Schichtstufenlandschaft** mit ihren nach Nordwesten gerichteten Stufen (Abschnitt 8). Je weiter man nach Südosten geht, desto jüngere Schichten bilden die Oberfläche – bis zum Weißjura der Alb.

Vulkanismus. Die Dehnung der Kruste ließ Magma aufsteigen: Im Kaiserstuhl (vor etwa 19 bis 15 Millionen Jahren), im Schwäbischen Vulkan bei Urach und Kirchheim (vor etwa 17 bis 11 Millionen Jahren) und im Hegau (vor etwa 15 bis 7 Millionen Jahren). Etwa zur selben Zeit, vor rund 15 Millionen Jahren, schlugen zwei Meteoriten ein und hinterließen das Nördlinger Ries und das Steinheimer Becken.

Das Molassebecken. Nördlich der aufsteigenden Alpen bog sich die Kruste unter der Last des Gebirges nach unten. In dieser Senke, dem **Molassebecken**, sammelte sich vom Oligozän bis ins Miozän der Abtragungsschutt der jungen Alpen: Sande, Mergel und Gerölle, abwechselnd im Meer und auf dem Festland abgelagert. Nahe den Alpen ist die Molasse mehrere Kilometer mächtig, nach Norden keilt sie aus; ihr Nordrand liegt etwa an der Donau. Das Molassebecken bildet den Untergrund des Alpenvorlands, Oberschwabens und des Bodenseegebiets.

10.5 Quartär: die Glaziallandschaft

Im Eiszeitalter wurde die Landschaft zum letzten Mal grundlegend umgestaltet (Abschnitt 4, Abschnitt 5). Aus den Alpen stieß der Rheingletscher mehrmals weit ins Alpenvorland vor. Er schürfte das Becken des Bodensees aus und hinterließ in Oberschwaben eine **Glaziallandschaft** mit Jungmoränen, Drumlins, Toteislöchern und Mooren der Würm-Kaltzeit sowie weiter nördlich die Altmoränen der Riß-Kaltzeit. Auch der Schwarzwald trug eigene Gletscher; der Titisee füllt ein Zungenbecken, der Feldsee ein Kar.

Das übrige Land lag im Periglazial: Frostschutt und Solifluktionsdecken überzogen die Hänge, auf der Alb entstanden Trockentäler, und im Windschatten wurde Löss abgelagert – die Grundlage der fruchtbaren Böden im Kraichgau, im Oberrheingraben und am Kaiserstuhl. Zugleich verschoben sich die Flusssysteme: Der Rhein mit seiner tiefen Erosionsbasis zapfte Teile des Donaugebiets an (Wutach, Donauversickerung). Im Postglazial verlandeten Seen zu Mooren (Federsee, Wurzacher Ried), und die Flüsse schnitten sich in ihre Schotter ein.

Merksatz

Landschaftsgenese Südwestdeutschlands in Grundzügen: Paläozoikum – Variskisches Gebirge, Grundgebirge aus Gneis und Granit; Mesozoikum – Ablagerung des Deckgebirges (Trias, Jura); Känozoikum – Einbruch des Oberrheingrabens, Hebung von Schwarzwald und Vogesen, Schrägstellung und Abtragung des Deckgebirges zur Schichtstufenlandschaft, Vulkanismus, Füllung des Molassebeckens; Quartär – Glaziallandschaft im Alpenvorland, Periglazial mit Löss und Trockentälern im übrigen Land.

Fachbegriffe des Plans in diesem Kapitel
Deckgebirge: Sedimentschichten des Mesozoikums über dem Grundgebirge (Buntsandstein bis Weißjura)
Glaziallandschaft: vom Eis der Kaltzeiten geformte Landschaft, in Baden-Württemberg Oberschwaben und Bodenseegebiet
Grabenbruch: entlang von Verwerfungen eingesunkener Krustenstreifen, z. B. Oberrheingraben
Grundgebirge: kristalline Gesteine (Gneis, Granit) aus dem Paläozoikum, im Schwarzwald freigelegt
Känozoikum: Erdneuzeit seit 66 Millionen Jahren (Paläogen, Neogen, Quartär)
Mesozoikum: Erdmittelalter, vor etwa 252 bis 66 Millionen Jahren (Trias, Jura, Kreide)
Molassebecken: Senke nördlich der Alpen, gefüllt mit deren Abtragungsschutt
Paläozoikum: Erdaltertum, vor etwa 539 bis 252 Millionen Jahren
Schichtstufenlandschaft: Landschaft aus Stufen und Landterrassen in flach geneigten Schichten wechselnder Härte

Üben: **noctua** ↗

