Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 31 (1986)

Artikel: Grundzüge einer Geomorphologie des Aargaus
Autor: Gerber, Eduard K. / Hantke, René
Kapitel: Bildung und Formen von Talböden
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-172785

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Gehänges, jede Richtungsänderung des Tales oder/und des Streichens führt zu Zwischenformen. Zwischenformen, die weder Längs- noch Quertal-Formen darstellen, zählen zu den *Diagonaltälern*. Sie können etwa durch schräge Blatt-Verschiebungen entstanden sein. Die Schnittlinien verlaufen bei nicht horizontaler Schichtlage schief über das Gehänge und steigen auf oder ab.

Bildung und Formen von Talböden

Das in einer Rinne oder im Flußbett eines Tales fließende Wasser kann eine bestimmte Menge Material als Geschiebe, als aufgeschwemmte Flußtrübe und gelöst mittransportieren. Dieses Material wird vom Gewässer, aus dessen Bett Schutt oder Festgestein erodiert worden ist, nach dem Transport, durch den es abgerundet wird, wieder abgelagert. Jedes Gewässer erhält Geschiebefracht von seitlichen Zuflüssen und vom Gehänge, aus dem es in das Gewässer gleitet, rutscht oder stürzt, und wird von diesem mittransportiert.

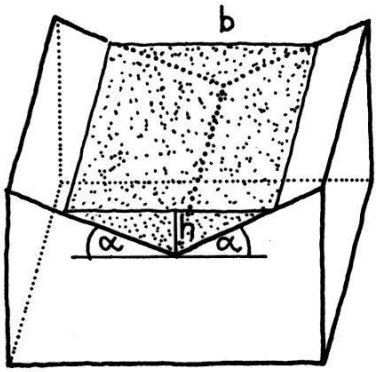
G sei das Geschiebe-Transportvermögen an einer bestimmten Stelle eines Gewässers, G_z die Geschiebefracht des Gewässers und S_z die Zufuhr vom Gehänge; dann ist ein Gewässer im Zustand der *Tiefenerosion*, wenn $G > G_z + S_z$.

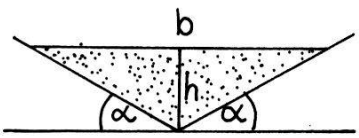
Damit ein *Gewässer aufschüttet*, muß $G < G_z + S_z$ sein. Dazwischen befindet sich der selten verwirklichte *Gleichgewichtszustand* $G = G_z + S_z$ – in dem weder aufgeschüttet noch erodiert wird.

Da die Wasserführung der Gewässer in weiten Grenzen schwankt, ist immer mit Katastrophen-Hochwassern zu rechnen. Durch diese treten in Stunden gewaltige Veränderungen auf, wie sie sich durch Jahrzehnte nicht ereignen; stellenweise wird erodiert, beim Ausufern jedoch über weite Flächen meterhoch abgelagert.

Im einfachen Modell eines V-Tales, das durch Tiefenerosion entstanden ist, soll nun aufgeschüttet werden. Dieser Zustand soll zugleich konstant sein, also pro Zeiteinheit wird immer gleichviel Material abgelagert, ferner sei die seitliche Einschüttung S_z im Verhältnis zur Geschiebe-Aufschüttung des Gewässers gering. Dies ist bei größeren Talgewässern oft verwirklicht. Unter diesen vereinfachten Annahmen kann die seitliche Einschüttung vernachlässigt werden. Beim Aufschottern nimmt die Talbodenbreite zu. Ist b die Talbodenbreite und h die Höhe der Aufschüttung, so ergibt sich:

$$b = \frac{2h}{\operatorname{tg} \alpha}$$





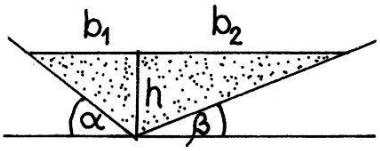


Fig. 79 In einem V-Tal mit den Gehänge-Neigungen α, bzw. α und β und der Talbodenbreite b bzw. $b_1 + b_2$ wird bis zur Höhe h aufgeschüttet.

Das Volumen des abgelagerten Materials beträgt für die Einheitslänge eines Tal-Abschnittes

$$V_1 = \frac{h^2}{tg\,\alpha};$$

V nimmt also mit dem Quadrat der Höhe zu. Bei konstanter Geschiebezufuhr nimmt die Höhenzunahme pro Zeiteinheit rasch ab, $h = \sqrt{V\,tg}$.

Mit dem Anheben des Talbodens durch Aufschüttung nimmt die Seitenerosion ab, da eine zunehmend breitere Talboden-Fläche zu überschottern ist und das Gewässer von einem Hang zum andern zunehmend größere Weglängen zurückzulegen hat. Die Aufschüttung des Talbodens quantitativ zu erfassen ist nur unter vereinfachten Annahmen möglich, etwa wenn sich das Querprofil eines Tales im Laufe der Aufschüttung nicht verändert. Dies ist wegen der Seitenerosion des Talgewässers und wegen des Abtrages im Gehänge nie der Fall.

Mit der Aufschüttung nimmt das Gefälle ab; dadurch wird dieses talaufwärts verschoben. Für die Talboden-Gestaltung kommt es darauf an, wie groß die seitliche Zufuhr ist. Am Ausgang von größeren Gehänge-Rinnen und Seitentälern werden oft Schwemmkegel in den Talboden hineingebaut; dadurch kommt es im Haupttal oberhalb der Mündung zu Stauungen und – wegen des verminderten Gefälles – zu vermehrter Aufschüttung.

In kleinen Tälchen kann die beidseitige Einschüttung im Vergleich zur Schuttführung des Talgewässers überwiegen: es entsteht ein gegen dieses Talgewässer geneigter Talboden.

Ein Gewässer ist erosionsfähig, wenn $G > G_z$ ist. Ist die seitliche Einschüttung groß und gilt $G < G_z + S_z$, so hebt sich der Talboden, während das Gewässer gleichzeitig in die Tiefe erodiert. Es entsteht eine enge Rinne im sich anhebenden Talboden. Ist die seitliche Einschüttung stark einseitig, so wird das Talgewässer an das weniger Schutt liefernde Gegengehänge gedrängt und hier angehoben, selbst wenn das Gewässer aktiv in die Tiefe erodiert.

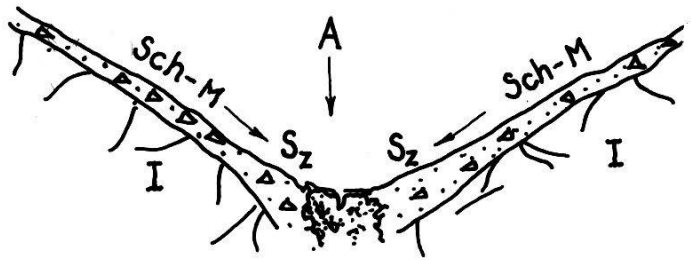


Fig. 80 Talboden aus Gehängeschutt und Geschiebe des Talgewässers
A Gewässer-Aufschüttung
Sch-M Schuttmantel
S_z Talboden-Aufschüttung durch das Gehänge
I Innengestein

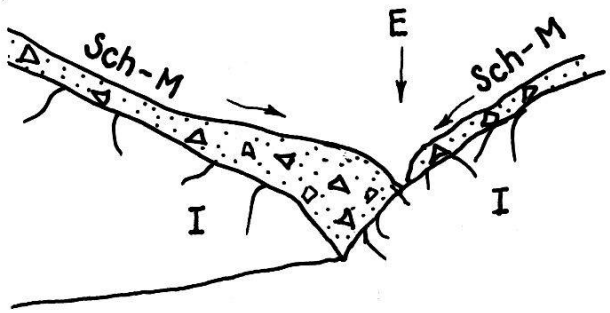


Fig. 81 Talboden aus Gehängeschutt mit einseitiger starker Gehängeschutt-Zufuhr;
E kräftig erodierendes Talgewässer im sich anfüllenden Talboden

Im Aargau sind es vor allem Tobel und kleinere Gewässer, bei denen der seitlichen Einschüttung Bedeutung zukommt. Je breiter der Talboden ist, desto mehr kann sich das *Gehänge als freies Gehänge* entwickeln, indem die Vorgänge in der Fallinienrichtung ungehindert in die Fußfläche ausmünden können. Wird vom Gehänge breitflächig geschüttet, entsteht eine dem Talboden aufruhende Schuttmantel-Halde. Oft wird aus dem flachen Fuß Feinmaterial ausgeschwemmt und als flacher Saum vorgelagert.

Gleichgewichtszustand und Terrassenbildung

Nimmt der Aufschüttungszustand $G < G_z + S_z$ ab, so wird $G = G_z + S_z$ erreicht und durchlaufen: das Gewässer wird wieder erosionsfähig und $G > G_z + S_z$. Der Zustand $G = G_z + S_z$ kann nie ein Dauerzustand sein; doch ist es möglich, daß über längere Zeit ein Pendeln um den Gleichgewichtszustand stattfindet. Es liegt dann ein *dynamisches Gleichgewicht* vor, bei dem – je nach Wasserführung, Geschiebezufuhr und Seitenerosion – das Talgewässer zeitweise in die Tiefe erodiert, die Gleichgewichtslage durchläuft und vorübergehend wieder akkumuliert. Dies kann sich mehrfach wiederholen. Beim Pendeln um den Gleichgewichtszustand kann bald das Aufschütten, bald das Eintiefen überwiegen. Überwiegt die Tiefenerosion, entstehen in den Talschottern *Terrassen*. Der neue Talboden ist oft leicht gegen das Gewässer geneigt. Überwiegt die Aufschüttung, entsteht ein horizontaler Talboden.

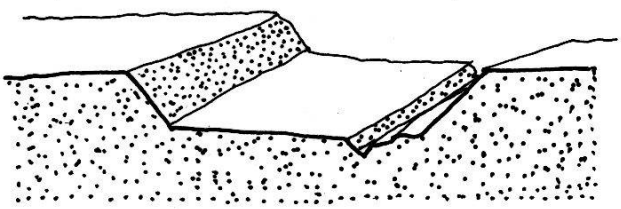


Fig. 82 Fluviale Terrasse mit leicht gegen das Gewässer geneigtem neuem Talboden, der durch langsames Eintiefen entstanden ist

Durch Pendeln des Flußlaufes und Ausufern entstehen nach Hochwassern Altwasserläufe, die sich mit Feinmaterial füllen. In Vertiefungen kommt es zu Schrägschüttungen, so daß ein Schotterkörper nie durchgehende horizontale Schichtung aufweist, sondern beidseits auskeilende Sandschmitzen und mit Feingut verfüllte Altläufe zeigt.

Wird in einem Schotterkörper mit eingetieftem Talboden aufgeschüttet, so wird das Terrassenbord immer wieder unterschnitten und beim Wegpendeln des Gewässers nachbrechen. Eine scharfe Grenzlinie kann kaum je beobachtet werden.

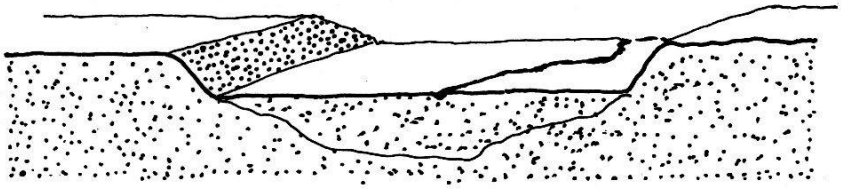


Fig. 83 Fluviale Terrasse mit Schotterfüllung

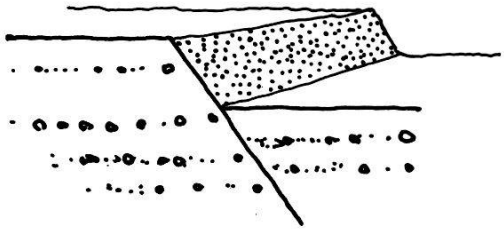


Fig. 84 Fluvialer Terrassen-Rand: Hypothetisch scharfe Grenze zwischen altem und neuem Schotterkörper

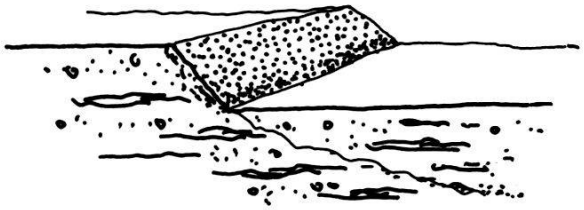


Fig. 85 Fluviale Terrasse: Wahrscheinlichere undeutliche Grenzlinie zwischen altem und neuem Schotterkörper

Geht die Eintiefung rasch vor sich, entsteht eine enge Rinne, in der das Gewässer in der Richtung fixiert ist. Da Schotterwände rasch verwittern, stürzen sie nach. Die seitliche Einschüttung wird erhöht und die Seitenerosion im gelockerten Material wirksamer. Verlangsamt sich die Tiefenerosion und stellt sich wieder ein dynamisches Gleichgewicht ein, so entsteht durch Seitenerosion und gelegentliches Aufschütten ein weiter Talboden. Ist dies nun ein Erosions- oder ein Akkumulations-Talboden? Es wird behauptet, dies lasse sich am Zustand der Terrassenränder entscheiden, was ein Zitat aus E. BUGMANN (1958) belegen mag. «Ist ein tieferes Terrassenniveau als jüngeres Akkumulationsniveau in einem älteren Komplex eingeschaltet, muß sich am innern Terrassenrand der Akkumulationsfläche A_2 gegen den ältern Terrassenhang T_1 ein Kontakt ergeben» (Fig. 86). «Im Kontakt $T_1 - A_2$ müssen sich wesentliche Unterschiede in der *Geröll-Zusammensetzung und -Schichtung* des Materials M_2 gegenüber dem Material M_1 mit einer *Verwitterungsrinde* vom ältern Material M_1 absetzen. Wenn wir diese Verhältnisse antreffen, sind wir sicher, daß jüngere Schotter in ältere eingeschachtelt sind, und daß A_2 *als Akkumulationsniveau* angesprochen werden kann.»

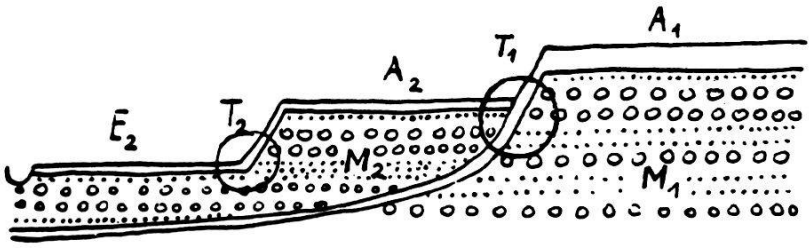


Fig. 86 «Kontakte von Terrassenflächen und Terrassenhängen. Erläuterungen im Text»

«Finden wir dagegen wie beim Kontakt T_2–E_2 weder Unterschiede im Material noch eine trennende Verwitterungsrinde, muß die Terrassenfläche als Erosionsfläche (E_2) angesprochen werden.

Durch glücklichen Zufall ist es nun möglich, diese Zusammenhänge in den Würm-Schottern im Aaretal bei Villigen und Würenlingen durch aufgeschlossene Kiesgruben eindeutig abzuklären» (Fig. 87).

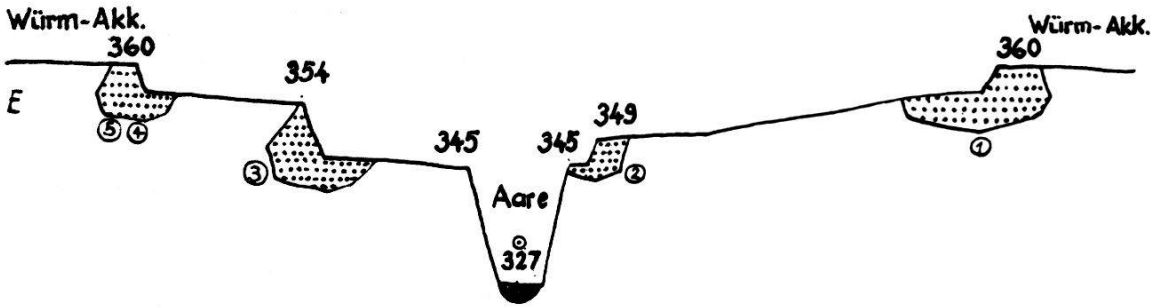


Fig. 87 «Querprofil Würenlingen–Villigen (halbschematisch). Aufschlüsse: 1 Kommetgraben Villigen (69), 2 Kommetgraben Villigen (68), 3 Zementfabrik Siggenthal (66), 4 und 5 Underfeld SW Würenlingen (64), (65). Die Geröllagen der tieferen Terrassenflächen ziehen unter dem höheren Terrassenhang durch und qualifizieren sie damit als Erosionsflächen.»

«Alle fünf Aufschlüsse zeigen, daß die Aufschotterung einheitlich und durchgehend ist; Verwitterungsrinden bestehen an den kritischen Punkten deshalb ebenfalls nicht. Damit sind alle Terrassenflächen unter dem Niveau 360 m eindeutig als Erosionsflächen belegt. Lediglich die höchste Fläche (360 m) kann als Akkumulationsfläche angesprochen werden.»

Nach den dargelegten Ausführungen ist diese Argumentation höchst fraglich.

Terrassen kommt in den größeren Talsystemen der Aargauer Landschaft Bedeutung zu. Es sind Schüttungsflächen, die ein fremdes, horizontales Element in ein Tal bringen; sie weisen keine Innen-, sondern Anlagerungsstruktur auf. Terrassen sind oft stufenartig übereinander angeordnet, liegen über dem tiefsten, früher oft Überschwemmungen ausgesetzten Talboden und tragen Dörfer und Felder. Sie sind Zeugen des Wechsels von Tiefenerosion und Ausweitung zu breitflächigen Aufschüttungen. Ihr Alter ist meist durch die Höhenlage gegeben, denn, je höher sie liegen, desto älter sind sie normalerweise. Entsprechend der Höhenlage sind im Pleistozän meist vier Schotterfluren unterschieden worden. Sodann wurde angenommen, daß die höchste Flur, der *Ältere Deckenschotter,* auf kaum durchtalter Landoberfläche als zusammenhängende, von den Alpen zum Jura geneigte Schotterflur im Vorfeld der günzzeitlichen Gletscher abgelagert worden wäre. Nach einer ersten Eintiefungsphase wäre in der nächsten Kaltzeit, in der Mindel-Eiszeit, – wiederum als weitreichende Schotterflur – der *Jüngere Deckenschotter* geschüttet worden (Fig. 88 und 89).

Versuchen wir Befund und Entstehungstheorie auseinanderzuhalten. Die Deckenschotter treten nur in relativ kleinen Vorkommen auf; in der Westschweiz fehlen sie. Sie müssen deshalb nicht unbedingt Reste einer das ganze Mittelland bedeckenden Schotterflur sein, sondern können ebensogut als *randliche* Vorstoßschotter älterer Vergletscherungen gedeutet werden (HANTKE, 1978). Das Querprofil durch den Lindenberg von H. JÄCKLI (1972), das auch Bohrungen ausgewertet hat, zeigt Verzahnungen von Schottern und Moräne. Die dritte Schotterflur, die Hochterrasse, ebenfalls eine kaltzeitliche Schüttung, wurde durch spätere Erosion größtenteils in das Landschaftsbild verarbeitet. Die tiefsten Fluren, die *Niederterrassenschotter,* dagegen, sind noch heute «als Aufschüttungsebenen ein fremdes

Element» (P. NIGGLI 1913). «In das Landschaftsbild verarbeitet» bedeutet, daß Schotterflächen, die einst weite horizontale Flächen bildeten, ihre Ebenheiten nicht mehr zeigen, sondern als Schuttmantel das Innengestein überziehen. Auf den Höhen weisen sie modellierte Oberflächen auf und fallen als Gehängeformen nicht weiter auf. Nur in Anrissen kommt ihre Schotternatur zum Vorschein. Untersuchungen haben ferner ergeben, daß Fluren, wie sie sich auch bei der letzten, der Würm-Eiszeit, erkennen lassen, zu verschiedenen Eisständen gehören. Schemati-

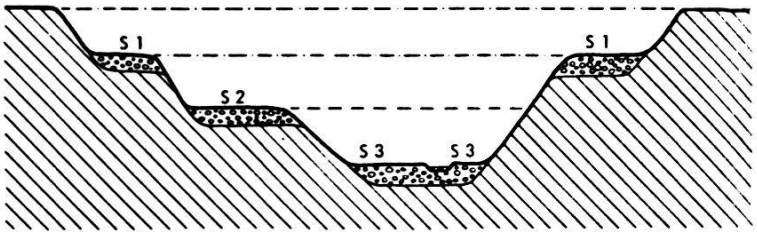


Fig. 88 Entstehung von Flußterrassen. Gerissene Linien: Ausgangsoberfläche und frühere Talauen nach H. WEBER 1958

S_1 bis S_3: sukzessive jüngere Talböden

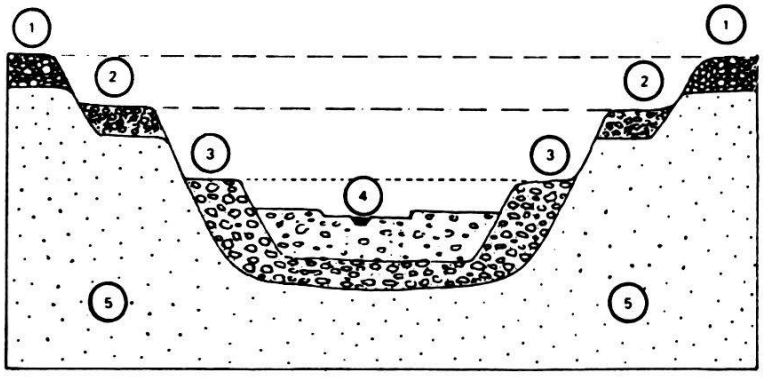


Fig. 89 Heute im Mechanismus überholtes Schema: eiszeitlicher Schotter auf dem Molasse-Untergrund und die entsprechenden Talsohlen (aus E. BUGMANN 1958)

1 Ältere Deckenschotter: auf dem Stierenberg, Heitersberg, Siggenberg
2 Jüngere Deckenschotter: Chrüzliberg (Teufelskeller), Bruggerberg, Gebenstorferhorn
3 Hochterrassenschotter: Ruckfeld, Strick bei Leuggern, Möhlinerfeld
4 Niederterrassenschotter: Flußtäler im Mitteland, unteres Aaretal, Rheintal
5 Molasse

sche Darstellungen – wie jene im *Fischer-Lexikon der Geographie* (1968) – können daher falsche Vorstellungen erwecken. Zudem sind die Profile stark überhöht und berücksichtigen den geomorphologisch wichtigen Unterschied zwischen Wand- und Schuttmantel-Hängen nicht. Zudem ruhen die Schotter meist nicht einer ebenen Festgesteinsunterlage auf. Erst recht gilt diese Bemerkung der Talquerschnitt-Darstellung für die *«Heimatkunde für Jedermann»,* die in unverstandene Darstellungen der Schulhefte übergehen. Das Terrassenschema vereinigt in einem Modell Erscheinungen, wie sie nirgends zu sehen sind. Schon die Schüttung des Älteren Deckenschotters erfolgte *von einem Eisrand aus.* Dieser wurde bereits vor und bei der Ablagerung des Jüngeren Deckenschotters zerschnitten, die Oberfläche umgestaltet und teilweise zerstört. Schon vor Schüttung der Hochterrassenschotter bestanden tiefe Täler, deren Sohlen unter den heutigen Talböden liegen.

Dies belegen auch pollenanalytisch untersuchte Feinsedimente der vorletzten Zwischeneiszeit mit einer Vegetationsentwicklung, die sich von jener der letzten unterscheidet (M. WELTEN, 1982). Vor und während der Schüttung der Hochterrassen wurden beide Deckenschotter weiter zerschnitten und umgestaltet. Zuletzt wurden die Schotter der tieferen *Hoch-* und der *Niederterrasse* abgelagert und durch periglaziale und fluviale Vorgänge ihrerseits überprägt.

Das Gehänge vom Plateaurand zum Gehänge-Fuß

Die skizzierten Modelle geben nur Teilaspekte der Gehänge-Formen wieder. Im ganzen Gehänge treten verschiedenste Vorgänge auf, die es im Zusammenhang zu klären gilt. Betrachten wir zunächst einfache Querprofile. Jedes Gehänge hat eine obere und eine untere Begrenzung. Die obere ist durch die Wasserscheide oder den Plateaurand gegeben; weniger scharf ist meist die untere. Bei einem freien Gehänge laufen die Bewegungen ins Vorgelände aus; die Ablagerungen sind oft nicht scharf begrenzbar. Bei gebundenen oder gekoppelten Gehängen kann der Übergang von der Fallinienrichtung in die Talrichtung als Grenzzone betrachtet werden. Während die Bewegungen an der Wasserscheide beginnen, enden nicht alle am Gehänge-Fuß. Gehänge-Material wird vielfach von den Gewässern forttransportiert, bis es zur vorläufig «endgültigen» Ablagerung kommt. Von der Vielzahl an Gehänge-Formen seien anhand von 4 Profilen einige grundsätzliche Aspekte aufgezeigt (Fig. 90).

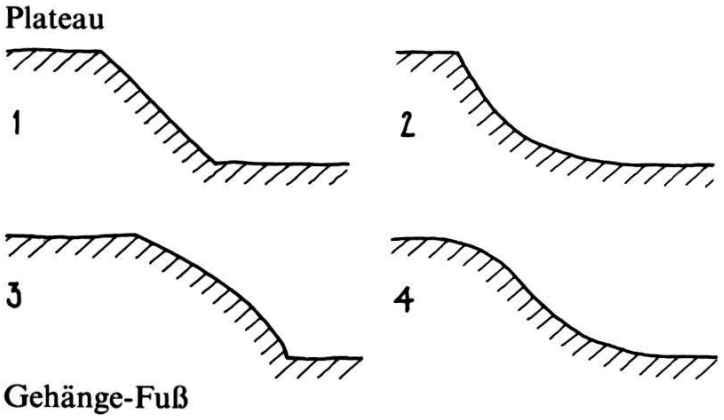


Fig. 90 Einfachstes Modell eines Gehänges ist eine ebene Hangfläche zwischen zwei Horizontalflächen (a). Eine sinnvolle Entwicklungsreihe kann aber nur gegeben werden, wenn das Gestein und sein Verhalten in Rechnung gestellt werden.
b konkaves, c konvexes Gehänge
d = a mit Übergangszonen

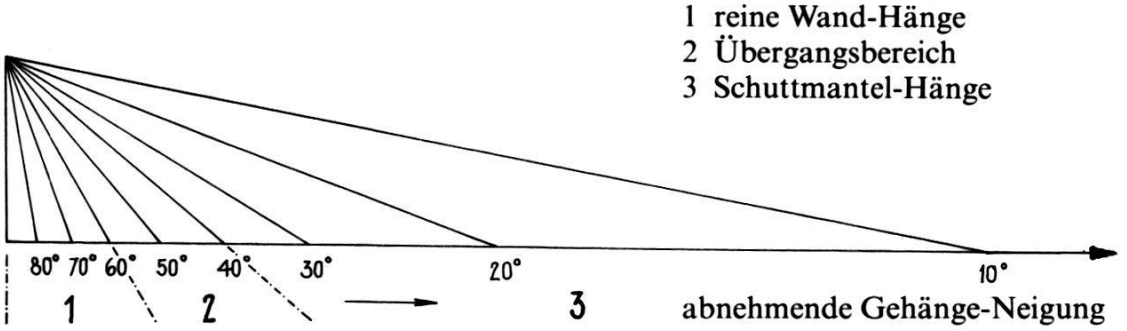


Fig. 91 Neigungsbereiche von Gehängen

Vor allem ist zwischen Wand- und Schuttmantel-Hängen zu unterscheiden. Bei den Felswänden im Jura sind es meist geschichtete Kalke und Dolomite.

Bei den Wandflächen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die quer zur Schichtung (Fig. 92/1) verlaufen, und solchen, die schichtparallel angelegt sind (Fig. 92/2–5).

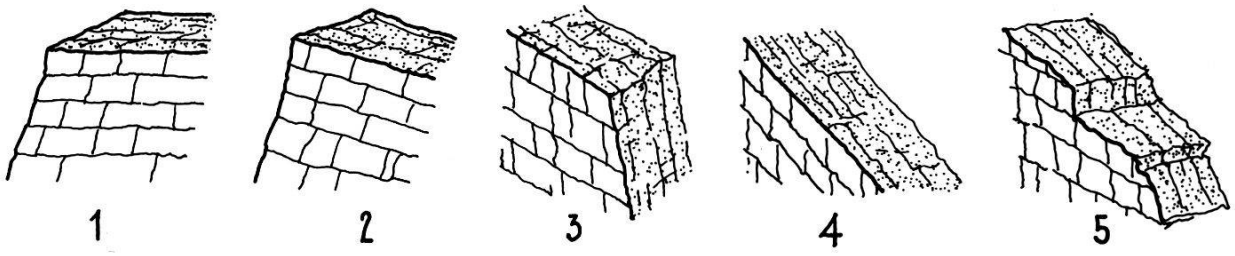


Fig. 92 Wand-Hänge bei verschiedenem Schichtfallen

Bei Felswänden mit horizontaler Schichtung entstehen im Schichtkopf- und im unterschnittenen Schichtflächen-Hang steile, meist 80° übersteigende Wände, die beim Zurückwittern ihre Steilheit behalten. Bei steil einfallenden Schichtflächen können diese als Gleitfläche dienen; sie bilden dann selbst Wandflächen. Es können Wandpartien entblößt sein, die *Übergänge zu Schuttmantel-Hängen* zeigen; doch sind solche selten in größerem Ausmaß verwirklicht. Zu ihnen gehören auch felsdurchsetzte Schuttmantel-Hänge. Die Annahme, daß Felswände in ihrer Entwicklung flacher werden, wie dies gar in Handbüchern der Geomorphologie dargestellt wird, findet sich weder im Jura, noch in den Alpen bestätigt.

Alle Modelle, welche die Material-Veränderungen im Laufe des Abtrages nicht berücksichtigen, können wohl theoretisch einwandfrei sein, vermögen aber die realen Gegebenheiten eines Hanges nicht zu erfassen. Dies gilt für verschiedene Theorien, wie sie A. E. SCHEIDEGGER (1970) zusammengestellt hat.

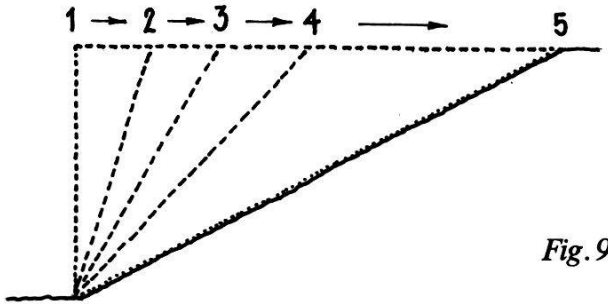
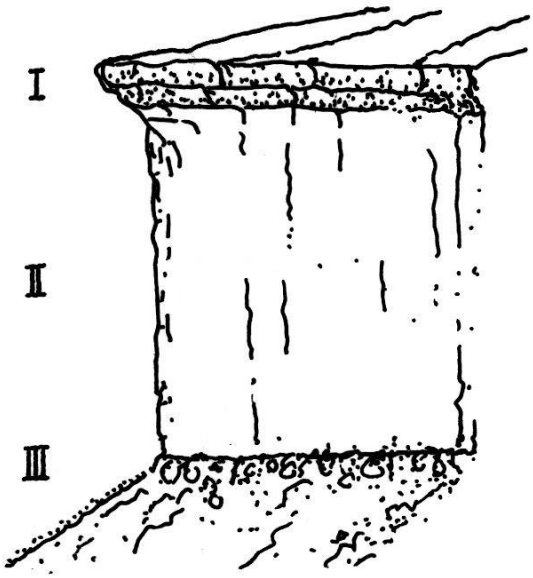


Fig. 93 In der Natur nicht verwirklichte Annahme des Zurückwitterns einer Felswand

Die in der Natur *nicht* verwirklichte Annahme, daß eine senkrechte Felswand beim Zurückwittern von 1 über 2, 3, 4 allmählich in den Schuttmantel-Hang 5 übergeht, ist eine *theoretische Fehlspekulation.*

Vielmehr zeigt sich, daß immer wieder oberflächenparallele steile, von der Vertikalen nur wenig abweichende Bruchflächen sich bilden, nach denen die Wand schalig zurückwittert. Diese Bruchflächen entstehen durch *Spannungen im Gestein.*

Frostwirkung mag bei der Lossprengung mitbeteiligt sein, aber nur sekundär, nach der Bruchbildung durch endogene Spannungen. Die Frostwirkung ist nicht zu unterschätzen; doch kommt ihr nicht die oft zugeschriebene Bedeutung zu. Bei horizontalen oder nur wenig geneigten Schichten zeigt sich zuweilen ein Überragen der obersten Wandpartie. Dabei wittert die Schichtung deutlich heraus. Erst in der freien Wand mit gewisser Überlagerungshöhe macht sich die plattige Abwitterung geltend. Am Fuß bleibt vielfach ein Sockel stehen. So ergibt sich eine Dreiteilung der Felswand in:



1 eine unbelastete Deckschicht mit spannungsfreier Verwitterung,
2 eine freie Wand, die unter Spannung steht und in der sich oberflächenparallele Platten bilden, und
3 einen Wandsockel

Fig. 94 Die Dreigliederung eines Wand-Hanges

Bei ungestörter Entwicklung wittert die *Wand parallel zurück,* während die Schutthalde von unten in die Höhe wächst. Die Schutthalde besitzt den maximalen Böschungswinkel von geschüttetem Lockergestein. Die Wand-Rückwitterung ist abgeschlossen, wenn die Schutthalde den Wandscheitel erreicht hat. Dann deckt ein Schuttmantel den ganzen Hang und verbirgt den Felskern. Damit ist die ursprüngliche Felswand über eine um die Schutthalde sich verkleinernde Wand in einen Schuttmantel-Hang übergegangen. Dieser verwittert jedoch völlig anders als die Felswand. In ihm finden Setzungsvorgänge und Verdichtungen statt. Regenwasser fließt nicht mehr nur über die Felswand ab, sondern dringt in den Schutt ein, der weiter verwittert. Bilden sich Mergel und Tone, kommt es im Schuttmantel-Hang, wo sich Wasser ansammelt, zu Gleitungen und Rutschungen. Schon die Schutthalde ist keine ebene Fläche; brechen beim Verwittern der Wand Blöcke nieder, so springen diese über den Schuttfuß und bilden einen Block-Saum. Im Schuttmantel-Hang wird Feinmaterial über den Fuß hinaus transportiert; es entsteht eine konkave *Hang-Schleppe.* Konkave Gehänge sind die Regel bei Schuttmantel-Hängen, die frei auslaufen; konvexe Hänge entstehen, wenn sie Talgewässer unterschneiden.

Die obere Kante wird um so stärker abgerundet, je flacher das Gehänge wird; konvex-konkave Gehänge sind die Folge.

Zwischen zurückwitternder Wand und Schutthalde entsteht ein scharfer Knick, was am Fuß jeder Wand beobachtet werden kann. Dieser Knick bleibt erhalten, bis die Schutthalde den Scheitel der zurückwitternden Wand erreicht hat; solange kann die Hang-Entwicklung nicht durch ungebrochene Kurven dargestellt werden. Ein knickloser Glatthang und seine Weiterentwicklung muß – mit allen Vorbehalten hinsichtlich Material-Zusammensetzung von Schuttmantel und Innengestein – von einem Schuttmantel ausgehen.

Der erste, der Wand-Rückwitterung, Höhersteigen der Schutthalde und Bildung eines Felskerns theoretisch zu ergründen suchte, war O. FISCHER (1866), ein englischer Geistlicher. Er beobachtete Kalkkliffe, die durch Wellenschlag entstanden waren und dann trocken lagen. Als Modell wählte er eine vertikale Wand zwischen zwei Horizontalebenen. Die Tatsache, daß Felswände immer senkrecht sind, ließ den Schluß zu, daß diese nicht abflachen, sondern wandparallel zurückwittern. Zur Berechnung des Felskerns setzte FISCHER vereinfachend das Volumen des abgestürzten Felsgesteins jenem der Schutthalde gleich, obschon das Schutthalden-Volumen um das Poren-Volumen größer ist; der Böschungswinkel α der Schutthalde kann als konstant angenommen werden. Daraus ergibt sich für das Profil des Felskerns

$$y = \sqrt{2hx \ \mathrm{tg}\,\alpha}$$

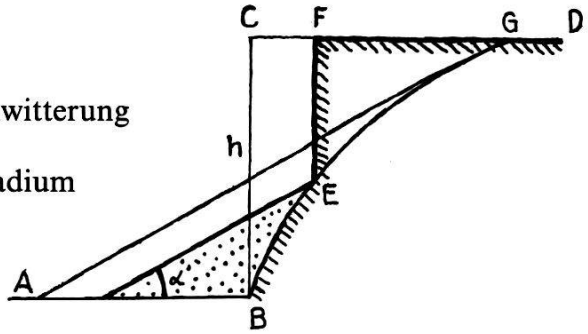


Fig. 95 FISCHERS Grundmodell der Wand-Rückwitterung
ABCD Ausgangslage
ABEFD Felsform in einem Zwischenstadium
ABGD Felsform im Endstadium
α Schutthaldenwinkel
BC = h ursprüngliche Wandhöhe

Danach entspricht das Profil des Felskerns einer Parabel mit Scheitel am Wandfuß. Die Rückwitterung der Wand ist abgeschlossen, wenn die Schutthalde die Plateauhöhe erreicht hat. Bis zu diesem Endzustand besteht im Gehänge ein Knick zwischen Schutthalde und Wand von $90 + \alpha°$. Mit dem Abschluß der Wand-Rückwitterung ist der Wand-Schuttmantel-Hang in einen reinen Schuttmantel-Hang übergegangen.

O. LEHMANN (1933) hat die Annahmen verfeinert und das Verhältnis von

$$\downarrow \frac{\text{Felsvolumen}}{\text{Schuttvolumen}} = \frac{1-c}{1} \downarrow$$

gesetzt. Wird kein Schutt entfernt, so entspricht c dem Porenvolumen des Schuttes, doch ist der Ansatz allgemein anwendbar. LEHMANN hat auch geneigte Felswände in die Berechnung miteinbezogen; α ist wie oben der Schutthaldenwinkel, β der Neigungswinkel der Wand. Aus diesen Annahmen ergibt sich:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{h \cdot \mathrm{ctg}\,\beta + (\mathrm{ctg}\,\alpha - c \cdot \mathrm{ctg}\,\alpha - \mathrm{ctg}\,\beta) \cdot y}{h\text{-}cy}$$

und durch Integration:

$$x = k(1 + m)\ln\frac{m}{m - y} - ky$$

$$m = \frac{h}{c},\ K = \frac{(1 - c)\,\mathrm{ctg}\,\alpha}{c} - \frac{\mathrm{ctg}\,\beta}{c},$$

$$1 = \frac{h \cdot \mathrm{ctg}\,\beta}{\mathrm{ctg}\,\alpha - \mathrm{ctg}\,\beta - c\,\mathrm{ctg}\,\alpha}$$

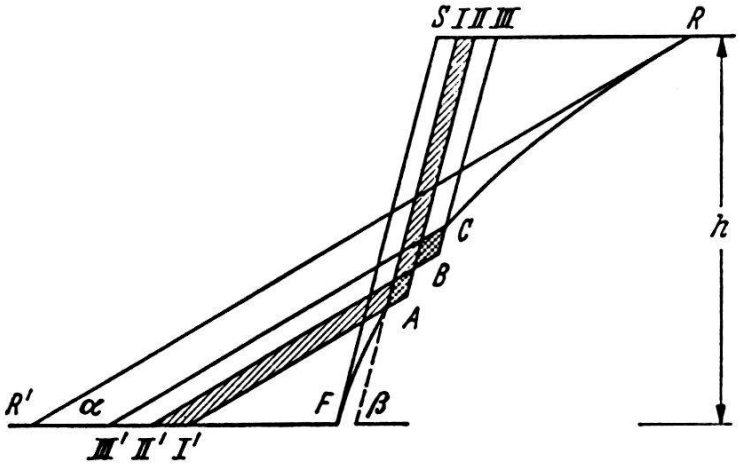


Fig. 96 Aufbau einer Schutthalde am Grunde eines Steilhanges (nach O. LEHMANN, 1933)

Dies ist eine logarithmische Kurve, die in die FISHERsche Parabel übergeht, wenn $c = 0$ und $\beta = 90°$ ist, also von einer Parabel nur wenig abweicht. Wird unter einer Wand aller Schutt entfernt, ohne daß diese unterschnitten wird, muß $c = -\infty$ gesetzt werden. Dann ergibt sich unter der Wand eine geneigte, gerade noch mit etwas Schutt überstreute Felsfläche $y = x\ \mathrm{tg}\alpha$. LEHMANN hat diese Felsfläche *Richtersche Denudationsböschung* genannt, da E. RICHTER (1901) solche Felsflächen beschrieben hat.

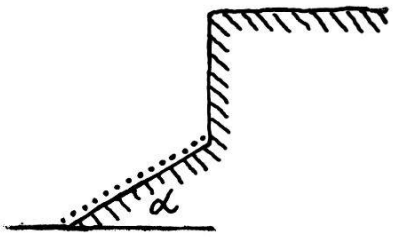


Fig. 97 Rückgewitterte Felswand mit Richterscher Denudationsböschung

Eine Weiterentwicklung von LEHMANNS Theorie versuchten BAKKER & J. W. N. LE HEUX (1947); doch widerspricht diese den geomorphologischen Fakten. BAKKER glaubte in einer schematischen Gebirgszeichnung von A. PHILIPPSON (1931) ein allgemeines Rückwitterungsprinzip steiler Gehänge zu erkennen und versuchte dies auf LEHMANNS Theorie anzuwenden. BAKKER & LE HEUX nahmen an, daß Felswände nicht parallel zurückwittern, sondern zunehmend abgeschrägt werden. Dabei ließen sie die Abschrägung stets vom gleichen Punkt aus gehen und sprachen von «zentral-geradliniger Rückwitterung».

S = Scheitel
F = Wandfuß
h = ursprüngliche Wandhöhe
I–I' Profilverlauf während der
II–II' Rückwitterung

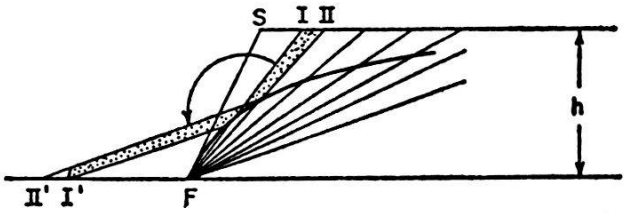
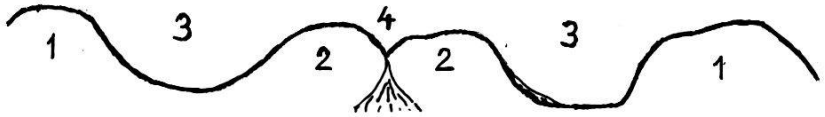


Fig. 98 Annahme einer zentral-geradlinigen Rückwitterung nach BAKKER & LE HEUX, 1947

Daß sich «Abschrägungslinien» im Fußpunkt der ursprünglichen Felswand schneiden, ist eine Annahme, die wohl die mathematische Fassung erleichtert, sich aber geomorphologisch nicht begründen läßt. Vor allem ist die Grundannahme fraglich, wonach Felswände mit dem Rückwittern abschrägen. *Alle Feldbeobachtungen sprechen dafür, daß Felswände oberflächenparallel zurückwittern.* Wenn nicht besondere Strukturen im Gestein vorliegen, *sind und bleiben Felswände steil bis senkrecht,* bis sie vom höhersteigenden Schuttmantel verdeckt werden. BAKKERS Bilder von Felswänden aus dem Monument Valley in Utah zeigen Wände über breiten Sockeln, die der RICHTERschen Denudationsböschung entsprechen. Obwohl diese auf beträchtliche Rückwitterung schließen lassen, sind die Wände senkrecht geblieben und entsprechen *in keiner Weise* seiner Abschrägungstheorie.

Werden Gehänge vorab durch Profile charakterisiert, stellen diese ausgewählte Schnitte dar, die zur Interpretation Angaben über die Linienführung verlangen. In der Landschaft springen sich abhebende *Horizontlinien* in die Augen: Kamm- und Gratlinien sowie absteigende Vorsprünge, die Wasserscheiden tragen, an denen nicht erodiert wird. Es sind gerundete Verwitterungs- und Abspülformen mit vorwiegend konvex-konkaven, gegen den Fuß oft wieder konvexen Profillinien. Erosion und Wasserbewegungen finden stets in der Fallinienrichtung statt. Viele Fallinien, besonders jene in Gehänge-Einbuchtungen, zeigen konkave Formen; sie setzen an Geländerücken und an Hochflächen mit einem Knick ein. Erst in ganz flachen Gehängen überwiegen konkav-konvexe Formen, da in diesen meist weder Massenbewegungen noch Gehänge-Rinnen entstehen.

Gehänge werden durch mündende Täler *zerschnitten* und durch Gehänge-Rinnen und -Mulden *gegliedert.* Gehänge-Abschnitte zwischen Seitentälern heißen *Sektoren,* Glieder zwischen Seitental und Gehänge-Rinnen oder Kleinmulden und zwischen zwei solchen *Facetten.*



1 Sektoren
2 Facetten
3 Seitental
4 Gehängerinne mit Gehänge-Mulde

Fig. 99 Gehänge mit mündenden Seitentälern

Gehängemodelle mit mehrfachen Knicken und ihre Größenordnung

In vielen Gehängen treten – je nach Gestein und Lagerung – verschiedenartigste Kombinationen der Grundformen mit Gehängeknicken auf. Durch Modelle mit *drei Flächen* kann die mittlere beidseits begrenzt werden, so daß Aussagen über die Breite gemacht werden können. Aus der unübersehbaren Schar von Dreiflächen-Modellen seien Gehänge-Verflachungen zwischen zwei steileren Gehängepartien in drei Modifikationen herausgegriffen (Fig. 100, 1–5):

- talwärts geneigte Verflachung (1)
- horizontale Verflachung, die Terrasse im engeren Sinn (2), und
- die Gehänge-Mulde (3) sowie
- zwei Modelle einer Gehänge-Versteilung zwischen zwei flacheren Partien (4, 5)

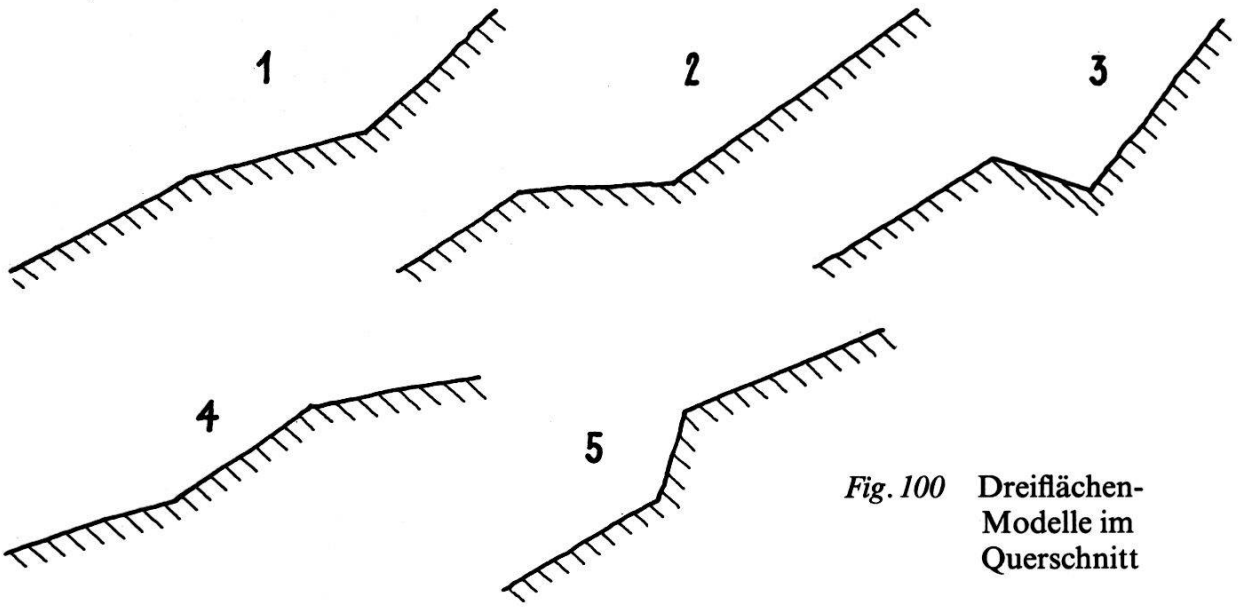


Fig. 100 Dreiflächen-Modelle im Querschnitt

1 Gehänge-Verflachung
2 Gehänge-Terrasse
3 Gehänge-Mulde
4 Gehänge-Versteilung in einem Schuttmantelhang
5 Gehänge-Versteilung als Wand-Hang

Bei der *Größenordnung* kann eine *absolute,* in Metern angegebene, und eine relative unterschieden werden; bei ihr wird die Mittelfläche mit den Seitenflächen verglichen.

Zur absoluten Größenordnung ist festzuhalten, daß Verflachungen im cm-Bereich in Schuttmantel-Hängen zu «auffälligen» Unregelmäßigkeiten der Kleinstformen gehören. In Wand-Hängen verdienen selbst kleinste Schichtwechsel-Absätze und Bruchflächen volle Aufmerksamkeit. Als Hangmulden oder Kleinspalten können sie in Schuttmantel-Hängen erste *Anzeichen von Rutschungen* sein. Mit zunehmender Größe wächst ihre Bedeutung. Verflachungen im m-Bereich und darüber vermögen Material aus dem höheren Gehänge aufzufangen. Dabei ist die relative Größe entscheidend: eine Verflachung von wenigen Metern unter einem Hang von geringer Höhe ist bedeutsamer als unter einem solchen von hundert Metern Höhe. Wichtig sind besonders Gehänge-Mulden, da der talwärtige Wall oder Rücken eine Zwischenwasserscheide bildet.

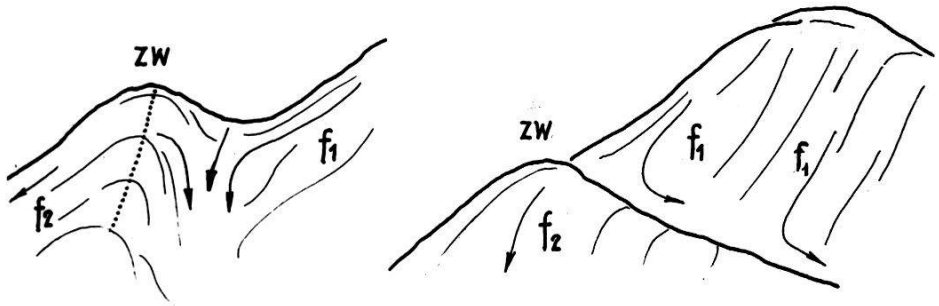


Fig. 101 Die Gehänge-Mulde, die das Gesamtgehänge trennt
ZW Zwischenwasserscheide
f_1 Fallinien, die von der Mulde abgebogen werden
f_2 Fallinien im unteren Gehängeteil

Durch die Mulde wird das Gehänge unterteilt in ein höheres, das zur Mulde entwässert, und ein *selbständiges unteres,* das zum Gehänge-Fuß entwässert. Die relative Größe ist wiederum wesentlich. Relativ kleine Mulden können aus einem hohen oberen Gehänge durch größere Rutschungen verschüttet werden, so daß das Wasser aus der Mulde ausbricht. Bei Verflachungen stellt sich – wie bei jeder Oberflächenform – die Frage nach dem Material und den Bedingungen, unter denen sie gebildet wurden. Dabei können *fünf Typen* unterschieden werden, die durch Übergänge miteinander verknüpft sind.

1. *Verflachungen und Terrassen durch Tiefenerosion*
   Schon bei Talboden-Schotterterrassen war von solchen Formen die Rede (S. 119). Wird der Schotterkörper eines breiten Talbodens zerschnitten, entstehen *Schotterterrassen* (Fig. 101/1). Doch kann selbst ein breiter, kaum horizontaler Talboden im Anstehenden durch verstärkte Tiefenerosion zerschnitten werden, so daß Terrassen im Anstehenden entstehen (Fig. 101/2).

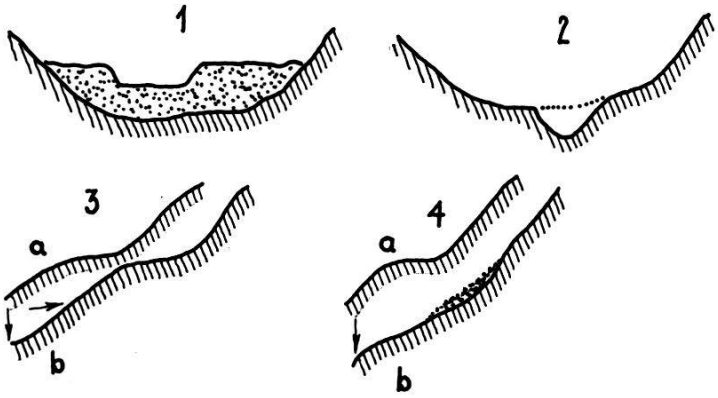


Fig. 102 Terrassen-Modelle
1 Schotterterrasse
2 Felsterrasse
3 Schutt-Anlagerung und Überschüttung einer Felsterrasse
4 Glaziale Stauschutt-Terrasse

   Nach der Terrassen-Theorie werden Terrassen im Anstehenden bei weiterer Eintiefung des Tales und Rückverlegung des Gehänges als Form etwa auf gleicher Höhe erhalten (Fig. 101/3). Dies trifft nur unter bestimmten Voraussetzungen, bei Härteterrassen, zu (siehe unten). Terrassen im homogenen Gestein werden allmählich ausgeglichen: durch Einschüttung von oben und Zurückwittern von unten (Fig. 101/4).

2. *Härte-Verflachungen und Versteilungen*
   Bei vielen Verflachungen im Gehänge, besonders im Faltenjura, kommen Struktur und Material-Eigenschaften des Innengesteins Bedeutung zu. Das Gestein kann dabei offen zutage treten oder von einem Schuttmantel bedeckt sein.

2.1 *Horizontalstruktur*
   Bei Wechsellagerung von harten und weichen Schichten sowie beim Wechsel von Fest- und Lockergestein ergeben sich Treppungen durch selektiven Abtrag. Sind in einem Steilhang die Absätze schmal und die Schuttlieferung vom höheren Gehänge groß, so wird der Absatz von einer zusammenhängenden Schutthalde überzogen. In flacheren Hängen sind gar härtere Schichtglie-

der oft von einem Schuttmantel überschichtet, so daß sie sich nur als Versteilung abzeichnen (S. 113).

2.2 *Der unterschnittene Schichtflächen-Hang*

Im Falten- wie im Tafeljura zeichnen sich unterschnittene Schichtflächen-Hänge ab. Liegt unter einer Kalkbank eine Ton- oder Mergelschicht, so können größere *Schichtpakete abgleiten.* Zugspannungen verursachen zunächst Zugrisse; es tritt eine «Bergzerreißung» ein. Später gleitet die losgelöste Schichtpartie auf der wasserstauenden Unterlage ab. Dies geschieht meist nach größeren Regenfällen, bei denen Feinmaterial in plastischen Zustand übergeht.

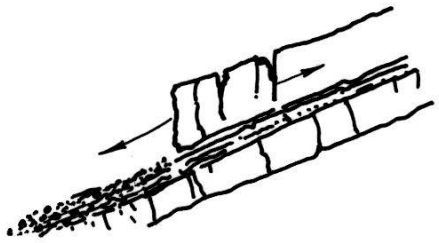


Fig. 103 Auf einem Gleithorizont fahren losgerissene Pakete ab.

2.3 *Der schichtparallele Hang*

Durch Gleitvorgänge werden tiefere Schichtflächen freigelegt.

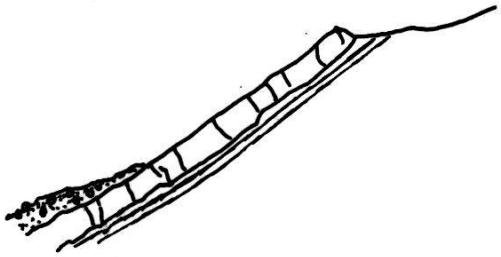


Fig. 104 Verflachung, entstanden durch das Abgleiten von Gesteinsschichten

2.4 *Der überschnittene Schichtflächen-Hang*

Ist der Hang flacher als das Schichtfallen, so entstehen zwischen zwei resistenten Kalkbänken Ausräumungen in Form von Mulden; diese steigen im Gehänge an, laufen über Sättel und fallen wieder ab. Die Schichtköpfe sind hangaufwärts gerichtet.

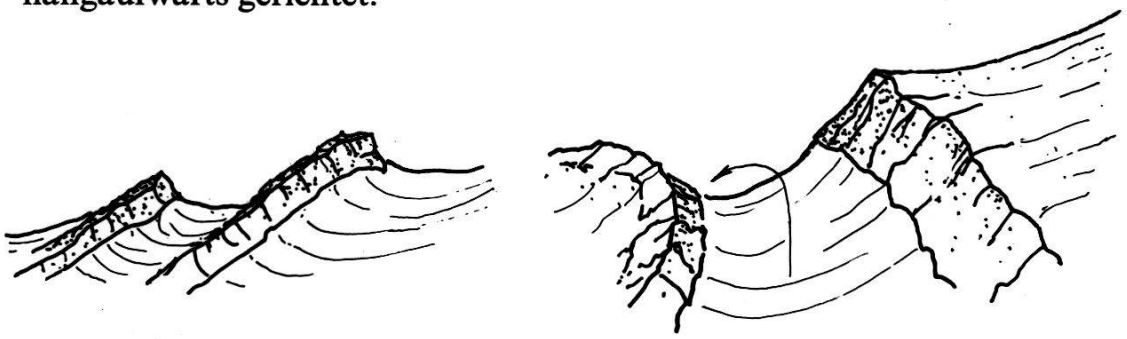


Fig. 105 Verflachung am unterschnittenen Schichtflächen-Hang

2.5 *Der Schichtkopf-Hang*

Auch im Schichtkopf-Hang können durch Ausräumung mergelig-toniger Zwischenschichten Verflachungen und Mulden entstehen. Die Schichtköpfe sind abwärts gerichtet.

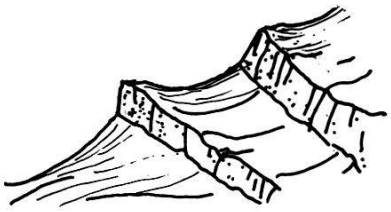


Fig. 106 Verflachungen am Schichtkopf-Hang

3. *Gehänge-Verflachungen durch Sackungen und Gleitpakete*

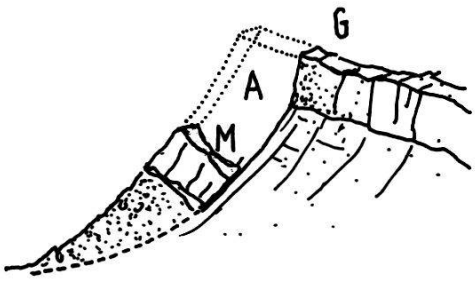


Fig. 107 a) Gehänge-Verflachung durch Hinterfüllung der Sackungsmasse

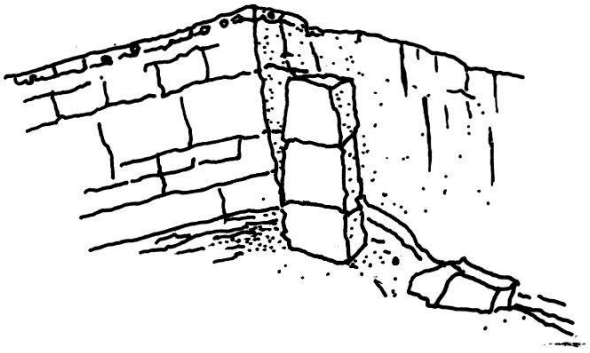


Fig. 107 b) Versackter Felsturm

Beim Verwittern der Wand stürzen kleinere Partien ab, oder es lösen sich ganze Pakete, die

- entweder in sich zusammenstürzen oder
- im Verband absacken.

Sackungen setzen genügende Kohäsion voraus; denn sie widersprechen der linearen Ausbildung von Fallinienvorgängen. Sie beschränken sich daher auf Hänge mit Festgestein. Entlang einer gebogenen Gleitfläche fährt eine Schichtpartie langsam talwärts; dabei wird die Schichtung etwas gelockert und zerbrochen, bleibt aber im Verband erhalten. Bei konkaver Gleitfläche ergibt sich eine Versteilung des Schicht-Einfallens, so daß zwischen Anstehendem und abgesunkener Masse eine *Sackungsmulde,* ein *Nackentälchen,* entsteht. Die Sackung kann in mehreren, zeitlich gestaffelten Schüben vor sich gehen, so daß der Hang eine Treppung erfährt. Dabei wird der Verband talwärts zunehmend stärker gelockert: es bildet sich mehr und mehr «Sackungsschutt». Im Aargau können Sackungsgebiete von über 1 km Länge beobachtet werden. Weit verbreitet finden sich im Aargau *Gleitpakete.* Auch hinter abgeglittenen Paketen stellen sich häufig Verflachungen ein.

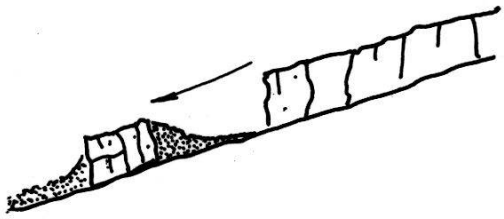


Fig. 108 Schutt-Hinterfüllung bei abgeglittenem Schichtpaket

4. *Gehänge-Verflachungen in Rutschungen*
In Rutschungen vollziehen sich die Bewegungen differenziert. Am Abriß herrscht Zugspannung. In gerutschtem Material wechseln Partien mit Zugspannungen, in denen Risse entstehen und das Material in die Länge gezogen wird, mit solchen von Druckspannungen, in denen sich Wülste und Überschiebungen bilden. Lokal kann gar fließfähiges Material austreten. Dadurch entstehen unruhige Oberflächen mit Verflachungen und Versteilungen. Je nach dem Zustand des Materials ereignen sich *oberflächliche* Rutschungen, von denen nur die *Grasnarbe* ergriffen wird, oder *tiefgründige,* die bis ins *Innengestein* reichen.

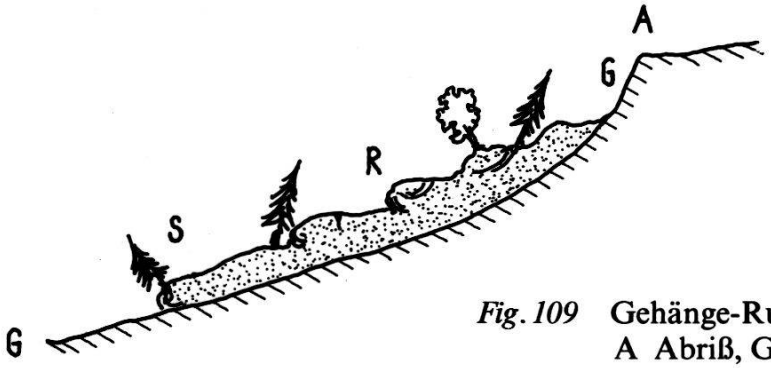


Fig. 109 Gehänge-Rutschung
A Abriß, G—G Gleit- und Aufschub-Fläche
S Stirn der Rutschung, R Rutschmasse

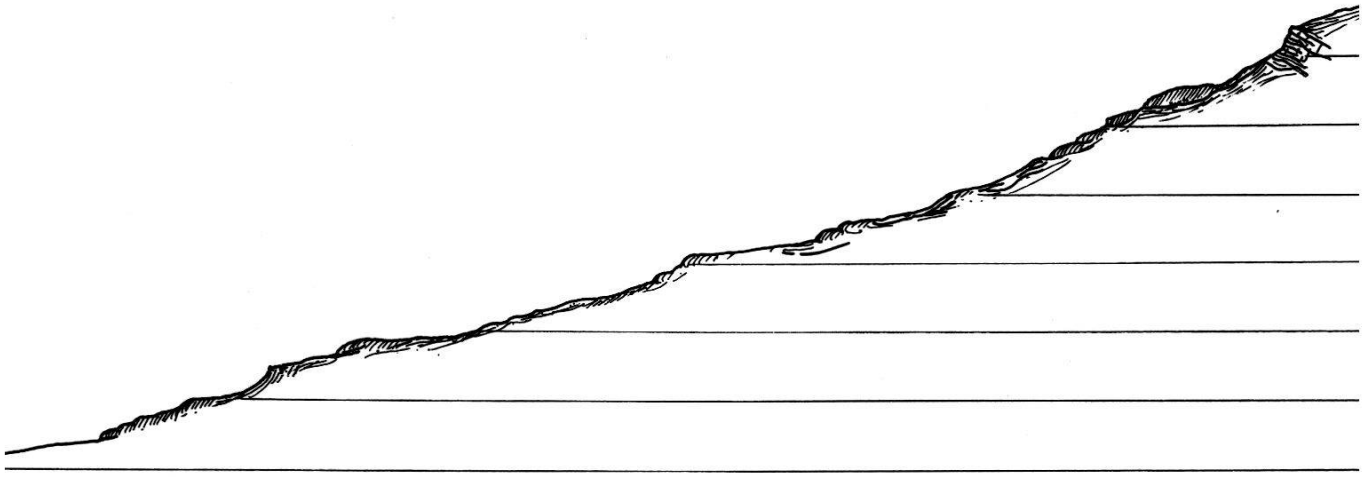


Fig. 110 Längsprofil der Gehänge-Rutschung in den Mösern, Gemeinde Schinznach-Dorf, Zustand Juni 1960. Diese Rutschung wurde über 20 Jahre vermessen (GERBER & A. E. SCHEIDEGGER, 1984)

5. *Gehänge-Verflachungen durch glaziale Aufschüttungen*
   Überall, wo durch eiszeitliche Gletscher in einem Hang Seitenmoränen angelagert wurden, entstanden dahinter Mulden-Verflachungen. Diese können schon zur Eiszeit durch fluviale Ablagerungen von Schmelzwasserbächen, die neben dem Gletscher flossen, sowie vor und nach dem Abschmelzen des Eises durch Schutt aus den höheren Gehängepartien teilweise verfüllt worden sein.

Die Verkettung von Ausgleichsvorgängen: die Ausgleichscatena

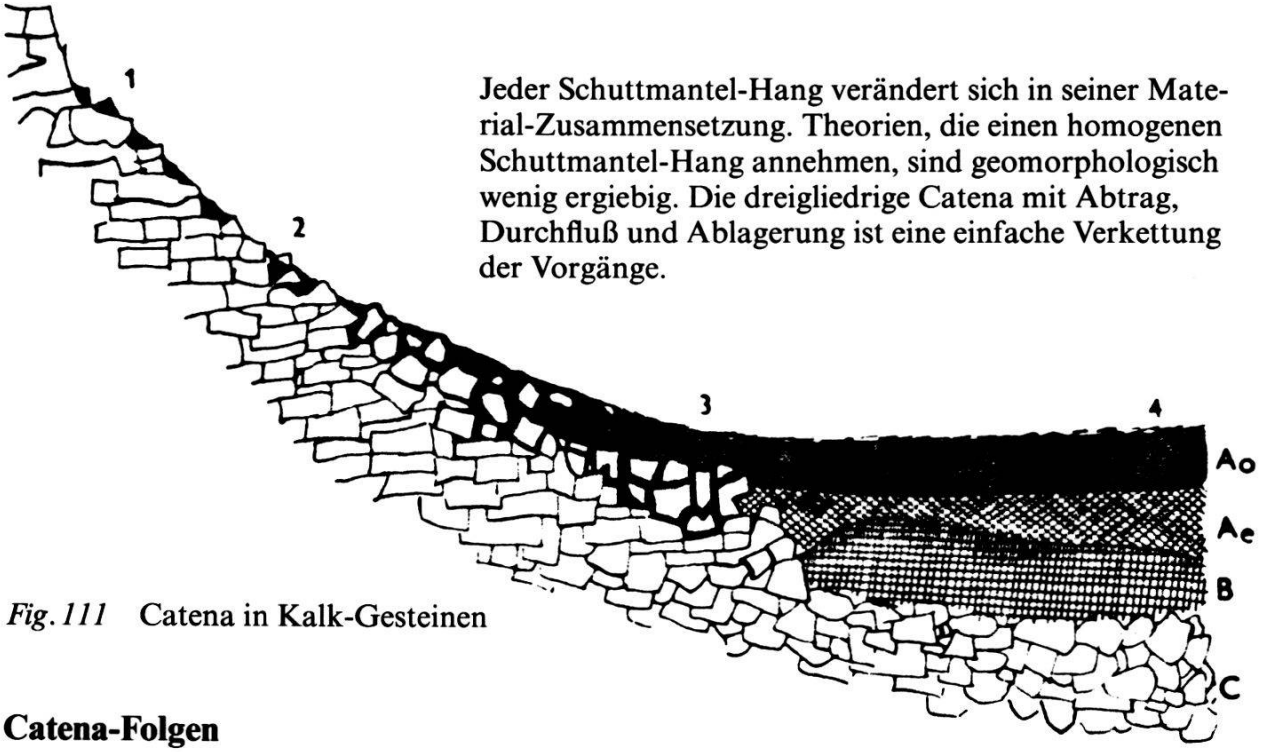
Die Vorgänge in einem Gehänge bestehen aus Abtrag, Transport und Ablagerung von abgetragenem Material, vorab im Vorgelände. Die drei sind miteinander eng verknüpft, verkettet. All diese Vorgänge bewirken den Ausgleich von Höhenunterschieden, die primär durch endogene Prozesse entstanden sind. Solche miteinander verkettete Vorgänge werden – in Analogie zu einer Verkettung von Vorgängen in der Bodenkunde – als *Ausgleichscatena* bezeichnet. Darnach können vom Hangscheitel zum Gehänge-Fuß drei miteinander verkettete Zonen unterschieden werden.

1. *Das Obergehänge oder die Eluvialzone*
   Im obersten Gehänge, unter der Wasserscheide oder am Rand einer Hochfläche, kann nur entfernt werden: wenn ein Wand-Hang vorhanden ist, durch Absturz von wenig verwittertem Festgestein, in einem Schuttmantel-Hang durch Abkriechen und Abschwemmen von feinem, krümeligem Lockergestein. Dadurch wird der oberste Teil abgetragen. Verwitterung und Bodenbildung laufen nur unvollständig ab: das Feinmaterial wird weggespült, durch Zutransport aber nicht wieder ersetzt. Besteht das Innengestein aus Kalk, der zu Trümmern verwittert, ruht diesem ein flachgründiger Boden, im ersten (Initial-) Stadium eine *Rendzina* auf. Dies ist ein dunkelgrauer, humoser, bröckligkrümeliger Boden, der im humiden Klima im A-Horizont kaum mehr Kalk enthält.

2. *Das Mittelgehänge oder die Colluvialzone*
   Der Mittelhang ist die Zone der Durchmischung und zunehmender Zerkleinerung und Verwitterung. Von oben werden Lockergesteine verschiedener Korngröße sowie Lösungen zugeführt, die mit der Abwärtsbewegung durchtransportiert werden. Je nach Material und Hangneigung kann die Schuttdecke bis auf das Innengestein bewegt werden. Dieses wird dadurch korrodiert und in die Verwitterung einbezogen.

3. *Das Untergehänge oder die Alluvialzone*
   Wird im Obergehänge nur Material fortgeführt, im Mittelgehänge vor allem durchtransportiert, so wird im Untergehänge eines freien Gehänges nur zugeführt und abgelagert. Da das Material auf dem gesamten Weg durchmischt sowie zerkleinert wird und dabei stets der Verwitterung ausgesetzt ist, wird es zunehmend verändert. Besonders leicht werden feine und tonhaltige Fraktio-

nen transportiert und daher als *Schwemmschleppe* am weitesten in der Fußfläche abgelagert; es entstehen tiefgründige und feinerdige Böden, die zu Podsol-Bildung neigen. Durch Abwandern der Hydroxiden kann der Boden gar versauern.



Jeder Schuttmantel-Hang verändert sich in seiner Material-Zusammensetzung. Theorien, die einen homogenen Schuttmantel-Hang annehmen, sind geomorphologisch wenig ergiebig. Die dreigliedrige Catena mit Abtrag, Durchfluß und Ablagerung ist eine einfache Verkettung der Vorgänge.

Fig. 111 Catena in Kalk-Gesteinen

Catena-Folgen

Viele Gehänge sind gestuft, weil das Innengestein verschieden resistent ist oder in der Vorgeschichte Aufschüttungen und Wieder-Einschneiden wechselten, so daß Terrassen oder Hang-Verflachungen entstanden. Auch bei Rutschungen und Sackungen bleiben oft abgleitende Massen im Gehänge stecken und erreichen den Gehänge-Fuß nicht, so daß Absätze oder Mulden entstehen.

Die Grunderscheinungen der Catena können auch in gestuften Gehängen beobachtet werden. Oft sind verschiedene Catenen mit einzelnen *Catena-Gliedern* miteinander verknüpft.

1. *Catena-Glieder in konvex-geknickten Gehängen*

   a) Catena-Glieder im vom Talgewässer angeschnittenen Gehänge.
   Wird ein Gehänge vom Talgewässer angeschnitten, beginnt am Anriß eine neue Eluvialzone. In der oberen Catena kann sich deshalb keine Alluvialzone ausbilden. Ob in der tieferen eine vollständige Abfolge sich ausbilden kann, hängt vom Transportvermögen des Talgewässers ab.

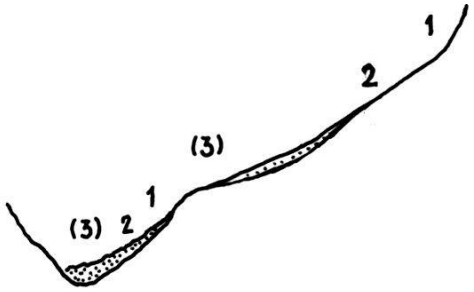


Fig. 112 Catena-Glieder im Gehänge