

Über tektonische Druckspalten und
Zugspalten.

Von Herrn JOHANNES WALTHER.

— .

Halle, im Januar 1914.

Am Fuße einer steilen Felsenklippe und noch viel mehr beim Anblick eines Gebirges wird der Beschauer unwillkürlich zu der Ansicht geleitet, daß diese höhergelegenen Teile der Erdrinde über ein vorher gleichartiges Gelände „gehoben“ worden seien. Man kann es daher wohl verstehen, daß die Lehre von der „Hebung“ der Gebirge auch in der Wissenschaft frühe Verbreitung fand.

Als im Jahre 1707 bei Santorin eine neue Insel vulkanisch unter dem Meere entstand und sich dampfend über den Wasserspiegel erhob, da wollten griechische Fischer sogar Austernschalen auf dem neuen Lande gefunden haben. Der gelehrte VALISNERI¹⁾ beschrieb die merkwürdige Erscheinung, sein Bericht ging in das Werk von L. MORO²⁾ über, das auch in deutscher Übersetzung viel gelesen wurde, und so schien die Entstehung der Gebirge sowie das Vorkommen von Meereskörpern auf trockenem Lande durch „vulkanische Hebung“ ihre einfache Erklärung zu finden.

Vor etwa hundert Jahren verfolgte J. HALL an der schottischen Küste bei Eyemouth die merkwürdigen Falten der Gesteine, und stellte an Bord seines Segelbootes einen tektonischen Versuch an, indem er über Segeltuchstreifen ein mit Steinen beschwertes Brett legte und dann die Leinwandstreifen mit Hammerschlägen von der Seite her in Falten legte. Man sollte meinen, daß dieser Versuch dazu geführt hätte, auch die Gebirgsfaltung durch Seitenschub zu erklären. Aber man sah darin nur einen Beweis dafür, daß eine von unten wirkende vulkanische Kraft die Gebirgsfalten erzeuge.

Zwar hatte v. SECKENDORF schon 1832, DE LA BECHE schon 1834 und J. J. DANA 1846 die Bildung der Faltengebirge durch Seitenspannung in der Erdrinde über dem schrumpfenden Erdkern erklärt, aber in Deutschland verhinderte es die Autorität großer Namen, daß diese Ansicht Zustimmung fand.

¹⁾ VALISNERI: De crostacei e degli altri marini corpi, che si trovano su monti. Venezia 1740.

²⁾ L. MORO: Neue Untersuchung der Veränderungen des Erdbodens. Leipzig 1751, S. 254.

Zu allgemeiner Anerkennung kam die neue Lehre erst durch E. SUESS, der zunächst in seiner Schrift über die „Entstehung der Alpen“, dann in seinem monumentalen „Antlitz der Erde“ die Grundlage unserer modernen Anschauungen schuf.

Daß die Seitenspannung nicht nur in hebenden, sondern auch in horizontalen Bewegungen der Erdrinde zum Ausdruck kommen könne, zeigten ESCHER v. d. LINTH und A. HEIM an den liegenden Falten des Glarner Landes und ROTHPLETZ in anderen Teilen der Alpen; aber noch ahnte man nicht die große Bedeutung horizontaler Bewegungen für den Aufbau des ganzen Gebirges. Da erkannten SCHARDT u. A., daß ein großer Teil der Westalpen aus übereinandergeschobenen Decken bestehen, und seither hat die Arbeit zahlreicher Forscher in allen Teilen Europa ausgedehnte horizontale Überschiebungen nachgewiesen.

Bei dem großen Interesse, das die tektonische Analyse der Faltungsgebirge beansprucht, sind eine Reihe von damit verbundenen Problemen, die früher die Wissenschaft viel bewegten, in den Hintergrund getreten. Ich denke zunächst an die sogenannten Luftsättel, die im Gegensatz zu den Mulden gewöhnlich geöffnet und sehr tief ausgeräumt sind. Es kann wohl keinem Zweifel unterliegen, daß in den Sattellinien eines Faltengebirges eine starke Dehnung und Zerrung der hangenden Schichten erfolgt, die den denudierenden Kräften viel leichtere Angriffspunkte bietet als die Kerne der Mulden. Deshalb wirkt jede denudierende Kraft, sei es die Erosion des Wassers, die Exaration des Eises oder die Deflation des Windes, unter sonst gleichbleibenden Umständen stärker auf die Sättel als auf die Mulden ein. Auch die Flexuren¹⁾, die höchst wahrscheinlich den Rand der Kontinente gegen die Tiefseebecken begrenzen, mögen durch die Abrasion der Brandung in der breiten Stufe des Schelfes geöffnet sein.

Nicht minder wichtig²⁾ sind andere sich daraus ergebende Schlüsse. In Zeiten, wo die Faltung eines Gebirges wieder lebendig wird, müssen unter sonst gleichbleibenden klimatischen Umständen durch die Denudationskräfte viel mächtigere Massen von Konglomeraten nach dem Vorland getragen und dort aufgehäuft werden, als in Zeiten tektonischer Ruhe. Man kann daher aus der stratigraphischen Verteilung mächtiger Konglomeratmassen auf die wechselnde Intensität der Faltung in

¹⁾ J. WALTHER: Über den Bau der Flexuren an den Grenzen der Kontinente. Jenaische Zeitschr. f. Naturw. 1886, S. 1.

²⁾ J. WALTHER: Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. III, Lithogenesis der Gegenwart. Jena 1894, S. 603.

den benachbarten Gebirgen schließen, ohne einen Wechsel in der Stärke der denudierenden Kräfte anzunehmen.

Überschauen wir die Entwicklung der Ansichten über die Bildung der Faltengebirge, so sehen wir, wie man zunächst vertikale Höhenunterschiede durch eine senkrecht von unten nach oben wirkende Kraft zu erklären versuchte, und erst allmählich lernte, die vertikale Hebung aus horizontal wirkenden Druckkräften herzuleiten.

Seit langem unterscheidet man von den bisher behandelten Falten und ihren Begleiterscheinungen die tektonischen Ablösungsflächen, die uns in Bruchlinien, Klüften und Gängen so vielgestaltig entgegneten. Im Jahre 1791 zeigte A. G. WERNER in seiner berühmten „Theorie von der Entstehung der Gänge“, daß die Gangmasse chemisch niedergeschlagen worden sei, und zauderte nicht, selbst die mit Basalt oder Porphyr erfüllten Gangspalten als sedimentäre Bildungen zu erklären. Er nahm an, daß Erz- und Basaltgänge am Boden des Urmeeres freigeöffnete Spalten gewesen seien, die von oben mit der Gangmasse erfüllt wurden.

Aber bald nach WERNERS Tod trat auch hier der Einfluß der Vulkanisten in den Vordergrund, und da so viele Erzgänge in gefalteten Gebirgen auftreten, schienen Zertrümmierungen durch das aufdringende Magma, Zerrüttungen durch die vulkanischen Dämpfe, Absonderungsformen bei der Abkühlung der Magmakörper die Mannigfaltigkeit der Spaltenbildung zu erklären; wo aber tektonische Spalten fern von Vulkanen auftraten, da suchte man sie durch Abrutschungen, Erdfälle und unterirdische Einbrüche von Gypsschotten zu erklären.

Im Jahre 1832 veröffentlichte W. v. SECKENDORF¹⁾ eine sehr wichtige Schrift: „Über die Abkühlung und Schwerkraft der Erde als bei der Erdentwicklung tätige Kräfte“, und sprach hier zum ersten Male eine große Zahl von Gedanken aus, die noch heute die Ansichten über das Wesen der Gebirgsbildung beherrschen: Niederungen und Meeresbecken sind Senkungsbereiche, während die Gebirgsmassen randlich emporgepreßt werden; Verwerfungen und Gänge sind Zerbrechungen der Erdkruste, die mit jenen Vorgängen verknüpft sind. Die Verbreitung der Erdbeben beruht nicht auf der Expansion unterirdischer Gase, sondern auf der Bewegung großer Senkungsfelder unter dem Einfluß der Schwere, und selbst vulkanische Magmaergüsse werden passiv herausgepreßt.

¹⁾ W. v. SECKENDORF: LEONHARD u. BROMS Jahrbuch für M. G. G. und Petrefaktenkunde 1832, III, S. 19.

Es war v. SECKENDORF nicht vergönnt, daß seine Gedanken Einfluß auf den Gang der Wissenschaft gewannen, und vergingen lange Jahre, bis das „Antlitz der Erde“ erschien. Hier unterscheidet E. SUESS grundsätzlich zwischen den durch die Seitenspannung in der Erdrinde entstehenden tangentialen Falten und Überschiebungen und den auf der bloßen Wirkung der Schwerkraft beruhenden radialen Bewegungen, welche Brüche und Gräben, Senkungsfelder und Meeresbecken erzeugen. Da die Schwerkraft nur von oben nach unten wirkt, müssen die zwischen den Senken auftretenden Horste auf einem früher einheitlichen höheren Niveau stehengeblieben sein.

Es soll meine Aufgabe sein, zu zeigen, daß wir alle Klüfte, Brüche und Gänge sowie alle kleineren Gräben und viele Horste auf denselben tangentialen Seitenschub zurückführen können und müssen, mit dem wir Falten und Überschiebungen erklären.

Obwohl in den unterirdischen Aufschlüssen des Bergbaues Sprünge, Brüche und Gangspalten eine häufige Erscheinung sind, und wir auch wissen, welchen bestimmten Einfluß die Störungslinien für die Gestaltungen des Geländes spielen, hat es doch sehr lange gedauert, bis man sich entschloß, auch auf den Meßtischblättern Verwerfungen einzutragen. Noch in den siebziger Jahren schien es, wenn man die damals veröffentlichten Blätter vergleicht, als ob nur gewisse Gebiete von Bruchlinien zerschnitten seien. Noch galten die deutschen Horste als Inseln des permischen und triadischen Meeres, und die merkwürdige Verteilung des Keupers von Thüringen wurde durch diskordante Auflagerung desselben auf der durch Erosion zergliederten Muschelkalkplatte erklärt.

Da wiesen EMMERICH und BÜCKING südwestlich des Thüringer Waldes ein stark gestörtes Gebiet nach; MOESTA zeigte die Bedeutung der Verwerfungen für die hessischen Lande, VON KOENEN für die Rhön und LANGSDORF veröffentlichte seine Karten des Oberharzes mit der überraschend großen Zahl von Bruchlinien, die damals niemand für möglich hielt. Auch die Alpen galten für viele Geologen als ein reines Faltengebiet, in dem Bruchlinien keine Rolle spielten, und die Karte der Vilser Alpen von ROTHPLETZ mit ihren zahlreichen Verwerfungen erregte bei ihrem Erscheinen allgemeine Verwunderung.

Wenn wir jetzt ältere Auflagen von Meßtischblättern mit den Neuauflagen der letzten Zeit vergleichen, dann sehen wir, wie sich die Querbrüche jedesmal ungemein vermehrten, weil man allmählich gelernt hat, Verwerfungen auch da zu sehen.

und darzustellen, wo sie eine frühere Generation von Forschern nicht erkannt hatte.

Aber selbst auf den mit allen Hilfsmitteln moderner Technik kartierten Blättern kann nur ein Teil der wirklich im Gelände vorhandenen Störungslinien dargestellt werden. Denn alle Verwerfungen, deren Sprunghöhe geringer ist als die Mächtigkeit der hangenden Schichtentafeln, können zwar an günstigen Aufschlüssen erkannt, aber im Streichen nicht weiter verfolgt werden. Auch Horizontalverschiebungen entgehen meist der Beobachtung. Nur wenn ein Tafelland von Gängen durchzogen wird, oder auf einer gefalteten Hochebene die ausstreichenden Bänder der Schichtenköpfe eine genauere Untersuchung ermöglichen, erkennen wir zu unserer Überraschung, wie zerschnitten und zerhackt die Erdrinde überall da ist, wo man alle vorhandenen Störungen verfolgen kann.

So ergibt sich bei kritischer Betrachtung geologischer Karten, daß das Spaltennetz, das an den Horsten und Gräben so ganz verschiedenartige Schichtenglieder nebeneinandersetzt, in vielen Fällen auch vielleicht auf die scheinbar wenig gestörten benachbarten Gebiete hinübergreift, aber hier nicht zur Darstellung kommen konnte, weil das Ausmaß der Bewegungen nicht hinreichte, um verschiedene Gesteine nebeneinander auszuscheiden.

Wenn so die Zahl der auf unseren Karten dargestellten Störungslinien hinter ihrer wirklichen Häufigkeit in der Natur weit zurückbleiben dürfte, ist es kein Wunder, daß auch die theoretische Würdigung der „radialen“ Bruchlinien mit größeren Schwierigkeiten zu kämpfen hatte als die Lehre von der Faltung.

Es ist noch nicht lange her, da glaubte man, daß die in Deutschland auftretenden Spalten entweder unbekanntem älteren Datums oder tertiärer Entstehung seien. Da erkannte A. v. KOENEN, daß zahlreiche Bruchlinien diluvial oder sogar postdiluvial sein müssen, während STILLE zeigte, daß auch ältere cretaceische und jurassische Bruchlinien den Gebirgsbau von Deutschland beherrschen.

Aber nicht nur das Alter, sondern auch die Entstehungsart derso mannigfaltigen Spaltenzüge bietet bis zum heutigen Tage eine Fülle von ungelösten Problemen. Da ich mich seit zwei Jahrzehnten sehr viel mit ihnen beschäftigt habe und noch nirgends Gelegenheit hatte, diese Fragen im Zusammenhang zu behandeln, möchte ich im folgenden das Versäumte nachholen. Zugleich muß ich einige Mißverständnisse aufklären, die dadurch entstanden sind, daß gelegentliche in anderem Zusammenhang

veröffentlichte Äußerungen, und besonders ein von mir vorgeschlagener Schulversuch, anders gedeutet worden sind, als ich diese Dinge seit Jahren auffasse.

Wenn es gilt, einen abgelaufenen geologischen Vorgang ursächlich zu erklären, so stehen uns drei Wege offen. Erstens die Untersuchung seiner bleibenden Wirkungen, zweitens der Vergleich mit ähnlichen rezenten Erscheinungen, und endlich das Experiment.

I. Die tektonischen Spalten.

Schon in der älteren Literatur sind vielfach Versuche gemacht worden, die große Mannigfaltigkeit tektonischer Spalten in Gruppen zu zerlegen, besonders DAUBREE hat solche scharf unterscheiden gelehrt, und neuerdings hat GRABAU¹⁾ ganz im Sinne dieses Aufsatzes auf den Gegensatz von Druckspalten und Zugspalten aufmerksam gemacht.

1. Die Klüfte (Diaklasen).

Fast alle Gesteine werden von feinen Fugen durchzogen, die sich durch Verwitterung zu breiteren offenen Spalten erweitern können.

Bei den an Eruptivgesteinen auftretenden Klüften wird man an „Absonderungen“ während der Abkühlung des heißen Magmas denken können; bei Schichtgesteinen ist eine solche Ursache auszuschließen; hier haben Untersuchungen von HETTNER, BECK, LEPPLA, HAEBERLE u. a. besonders in großen Sandsteingebieten gezeigt, daß die Mehrzahl der gemeinen Klüfte dasselbe Streichen besitzen wie die benachbarten Verwerfungen. Man führt daher diese so orientierten Klüfte mit Recht auf dieselben Ursachen zurück, welche Verwerfungen erzeugen.

Wenn wir beobachten, daß bei jedem stärkeren Erdbeben Risse und Spalten in festgefügtten Mauern entstehen, und erwägen, daß jede Stelle der Erdrinde im Laufe der Zeiten seismisch erschüttert worden sein kann, dann erscheint es naheliegend, die Mehrzahl der Diaklasen auf die Wirkung einstiger Erdbeben zurückzuführen.

Bei allen Diaklasen ist eine dauernde Verschiebung der von der Kluft zerteilten Felsmassen nicht eingetreten. Man darf daraus schließen, daß die seismische Erschütterung an einer Gleichgewichtsfläche erfolgt ist und die zerrissenen Felsen in ihre einstige Lage zurückkehrten. Vielleicht beruht es

¹⁾ A. GRABAU: Principles of Stratigraphy New York 1913, S. 789.

darauf, daß manche Klufflächen so glatt sind, daß man sie als Spiegel bezeichnet hat, denn ihre Politur deutet darauf hin, daß bei ihrer Entstehung Bewegungen erfolgten, wie sie die Technik zum Polieren von Gesteinen anwendet. Während die völlig glatten Spiegel verhältnismäßig selten sind, sehen wir die Klufflächen viel häufiger geglättet und gerieft. Die oftmals horizontale Riefung hat gelegentlich sogar zu Verwechselungen mit Gletscherschliff Anlaß gegeben. Solche Rutschflächen sind in manchen Buntsandsteingebieten ziemlich häufig und werden in der älteren Literatur vielfach besprochen. Ihre wie verglast aussehende Oberfläche besteht aus zerdrücktem und fest zusammengepreßtem Quarzpulver. Deutet schon diese Tatsache auf sehr intensive Zusammenpressungen hin, so zeigen uns die Rutschstreifen mit aller Sicherheit, daß an solchen Klüften die benachbarten Felsen unter starkem seitlichen Druck bewegt wurden.

Bei meinen Wanderungen, die mich im letzten Jahrzehnt durch fast alle Gebirge Deutschlands führten, erkannte ich zu meiner eigenen Überraschung, welch ungeheuere Verbreitung die horizontal gerieften Klufflächen besitzen; wie sie Sediment- und Eruptivgesteine selbst in scheinbar ungestörten Gebieten durchschneiden und darauf hindeuten, daß horizontale Verschiebungen in der Erdrinde eingetreten sind.

So leicht es ist, solche horizontale Bewegungen aus der Riefung der Harnische zu erschließen, so schwer wird es, den Verlauf derartiger Klüfte vom einzelnen Aufschluß über das Gelände zu verfolgen. Wir dürfen uns daher nicht wundern, daß unsere Meßtischblätter ihre Verbreitung und Häufigkeit nicht immer erkennen lassen; nur wenn vulkanische Gänge ein Tafelland durchsetzen, oder eine Hochebene aus gefalteten Schiefnern besteht, treten uns diese Sprünge im Kartenbild entgegen. Man verfolge, um nur einige Beispiele herauszugreifen, BEYSCHLAGS Darstellung der nordfränkischen Basaltgänge und den von ZIMMERMANN festgelegten Verlauf des großen ostthüringischen Diabasganges, die älteren Karten von LANGSDORFF und die neueren Aufnahmen von BODE u. a. aus dem Oberharz, oder die Aufnahmen von DENCKMANN aus der Siegener Gegend und ZIMMERMANNs Blätter aus dem Frankensteinwald, und man erkennt mit Erstaunen, wie häufig horizontale Verschiebungen unter diesen Umständen kartographisch festgelegt werden können, die in den gefalteten Nachbargebieten nicht zu erkennen sind.

2. Die Verwerfungen (Paraklasen).

Während die Verbreitung der Klüfte, auf denen eine horizontale Verschiebung der Felsen eingetreten ist, viel größer sein muß, als aus unseren Karten hervorzugehen scheint, und viele derselben sogar im Aufschluß der Beobachtung entgehen, sind Verwerfungen leicht zu sehen, leicht zu verfolgen, und wenn ihre Sprunghöhe nicht zu gering ist, leicht auf der Karte darzustellen. Daher sind wir über ihre oberflächliche Verbreitung recht gut unterrichtet. Auch ihr unterirdischer Verlauf ist in vielen Fällen durch den Bergbau genau verfolgt.

Der Augenschein lehrt, daß an einer Paraklase die benachbarten Felsmassen vertikal verschoben worden seien — aber ich halte es für einen trügerischen Schluß, daß bei ihrer Entstehung auch vertikal wirkende Ursachen tätig gewesen seien.

In der Regel sind die Bruchspalten feine geschlossene Fugen, die nur gelegentlich im Ausgehenden durch Verwitterung geöffnet und erweitert wurden. Meistens enthalten die Verwerfungsspalten keine Gangmasse, und das zeigt mit aller Deutlichkeit, daß an den Paraklasen ein seitliches Zusammendrücken der Gesteine erfolgt ist. Endlich aber sehen wir auf den meisten Verwerfungsspalten so häufige und deutliche Harnische und Rutschstreifen, daß wir mit Sicherheit nach ihnen einen auf die Spaltenfläche wirkenden seitlichen Druck annehmen müssen.

Theoretische Vorstellungen, die wir bis auf v. SECKENDORF zurückführen können, und die in SUESS' „Antlitz der Erde“ ihren schärfsten Ausdruck gefunden haben, lassen uns in jeder Verwerfung die Wirkung einer vertikalen Verschiebung sehen. Schematische Profile, die von einem Buch in das andere übernommen werden, scheinen sogar zu beweisen, daß an den Verwerfungsklüften nur ein passives Absinken der liegenden gegen den hangenden Flügel erfolgt sei, und viele Autoren betrachten die Frage nach den Bewegungsvorgängen, die zur Entstehung von Verwerfungen führen, unter dem suggestiven Eindruck so vieler gleichartiger Profilzeichnungen für abgeschlossen.

Auch ich habe vor Jahren unter dem faszinierenden Einfluß von SUESS' „Antlitz der Erde“ die Ansicht geteilt, daß alle Verwerfungen der Ausdruck vertikaler Bewegungen seien, die unter dem Einfluß der Schwerkraft erfolgten. Aber je mehr ich mich seither mit den Verwerfungen, Gräben und Horsten, welche die deutschen Mittelgebirge begrenzen und durchziehen,

beschäftigte, desto mehr habe ich mich von der Irrigkeit dieser Auffassung überzeugt. Es gibt sicherlich Fälle, in denen die verworfenen Schollen vertikal aneinander hinglitten, aber viel häufiger ist die Bewegung auf flach an- oder absteigenden schiefen Ebenen erfolgt.

Den unzweideutigen Beweis für diese Auffassung erblicke ich in den Rutschstreifen, die wir auf so vielen Klüften in gestörten Zonen beobachten können. Nachdem ich in Thüringen dies erkannt hatte, war ich nicht mehr überrascht, bei vielen Exkursionen, die ich dann durch andere deutsche Gebirge unternahm, überall die Regel bestätigt zu finden. Bewegt man sich von scheinbar ungestörten, aber doch horizontal verschobenen Tafeln aus gegen die Störungsgebiete und tektonisch bewegten Zonen, dann sind zwar immer noch zahlreiche horizontale Rutschstreifen zu sehen, allein es mehren sich daneben die ansteigenden Winkel. Aber selbst in der Nähe größerer Verwerfungen, wo man nur vertikale Rutschstreifen erwarten sollte, sind noch spitzwinklige Bewegungstreifen häufig.

Es liegt in der Natur der Sache, daß eine einwurfsfreie Statistik über diese Verhältnisse nur unter besonders günstigen Umständen zu gewinnen ist. Um so wichtiger erscheinen mir daher die von SALOMON¹⁾ und seinen Schülern an den Rändern des Rheingrabens ausgeführten Arbeiten. Hier in der Nähe eines der größten deutschen Horste kommen in einem genau untersuchten Gebiet noch 62 Proz. Streifen vor, deren horizontales Bewegungselement größer ist als das vertikale.

Angesichts so weitverbreiteter Tatsachen, die nur auf ein Zusammenpressen der Verwerfungsclüfte und ein flaches Gleiten einer Kluffläche auf der anderen zurückzuführen sind, kann die Hypothese, wonach Verwerfungen durch vertikales Abrutschen an stehenbleibenden Pfeilern entstanden seien, nicht mehr aufrecht erhalten bleiben.

Ich möchte nun schon hier betonen, daß ich niemals daran gedacht habe, statt der Senkung jedesmal eine Hebung an Verwerfungen und Horsten anzunehmen. Es gibt einzelne Fälle, wie der mittlere Thüringer Wald, wo nach meiner Ansicht eine vertikale Emporpressung eines keilförmigen Horstes erfolgt ist. Aber schon für den nahen Harz kann diese Auffassung nicht gelten, und noch weniger für die zahlreichen

¹⁾ SALOMON: d. Z. 1911, S. 496; — LIND: Verh. d. N. Med. Vereins, Heidelberg 1910, S. 1. — DINN: Verh. d. N. Med. Vereins, Heidelberg 1912, S. 237. — SPITZ: Jahresber. d. oberh. geol. Vereins 1913, S. 48.

kleinen Horste und Gräben, deren horizontale oder spitzwinklige Rutschstreifen ohne weiteres ablesen lassen, in welchem Sinne die Bewegung der Nachbarschollen erfolgte.

Während es in der Regel keine Schwierigkeiten macht, das Streichen einer Verwerfung mit größerer Sprunghöhe von einem guten Aufschluß aus im Gelände weiter zu verfolgen, ergeben sich die größten Schwierigkeiten, wenn es gilt, aus den im Ausgehenden beobachteten Fällen auf die Fortsetzung der Bruchlinie nach der Tiefe Schlüsse zu ziehen. Wenn man es schon als einen Erfahrungssatz bezeichnen kann, daß in gut untersuchten Gebieten keine einzige Verwerfung eine längere Strecke geradlinig dahinzieht, so zeigen uns gute Grubenrisse mit derselben Klarheit, daß keine Bruchfläche mit demselben Fallwinkel eine größere Strecke nach der Tiefe zu fortsetzt. Schon der Ausdruck „Schaufelfläche“, den man neuerdings für bergmännisch genau untersuchte Bruchlinien anwendet, zeigt mit aller Deutlichkeit, daß Biegungen und Änderungen des Fallwinkels eine große Rolle spielen. Selbst in größeren Aufschlüssen zu Tage sieht man oft die wellige, bauchige Oberfläche tektonischer Klüfte, die ja auch den Ausdruck „Harnisch“ veranlaßt.

Wenn man allerdings die Profile mustert, welche geologischen Arbeiten beigegeben sind, und besonders wenn man die Zeichnungen betrachtet, die in unseren Lehrbüchern das Verhältnis der Horste und Gräben erläutern sollen, dann kann ein Anfänger wohl glauben, daß in allen diesen Fällen der unterirdische Verlauf der Bruchlinie auf Beobachtung beruhe. Der Fachmann weiß, daß dies nicht der Fall ist, daß vielmehr bei strenger Kritik in einem normal überhöhten Profil der unterirdische Verlauf der Bruchlinien höchstens etwa $\frac{1}{2}$ mm tief nach unten gezogen werden dürfte — alles Weitere ist Hypothese.

Manche Autoren haben dieser Schwierigkeit dadurch Herr werden zu können geglaubt, daß sie alle Bruchlinien direkt senkrecht nach unten ziehen — ich halte aber das für den unwahrscheinlichsten Fall: denn erstens kann man in einem bergmännisch genau aufgenommenen Bruchgebiet niemals genau parallele Bruchlinien erkennen; zweitens sind in einem von Verwerfungen durchschnittenen Aufschluß bei genauerer Aufnahme auch diese stets etwas divergierend, und eine Verlängerung dieser im Aufschluß wohl geringen Abweichung ergibt schon auf eine Tiefe von 100 m ein ganz beträchtliches Auseinanderweichen; endlich sprechen die Rutschstreifen in der Mehrzahl der Fälle für so mannigfaltige Bewegungsrichtungen,

daß parallele Bruchlinien nicht angenommen werden können. Die Frage, ob gleiches Streichen der Diaklasen und Paraklasen für gleichzeitige Entstehung eines Bruchliniensystems spricht, die Rolle, welche Granitmassive für die Orientierung und Ablenkung der Bruchlinien spielen, und die Torsion einzelner Schollen infolge des seitlichen Druckes möchte ich hier nicht näher besprechen.

3. Die Gangspalten (Antiklasen).

Die mit Mineralien oder Gesteinsmassen erfüllten Gangspalten (für die ich den Namen „Antiklasen“ hier anwenden möchte) unterscheiden sich grundsätzlich von den bisher besprochenen Spalten; denn wie der Augenschein lehrt, sind an ihnen die benachbarten Felsmassen seitlich auseinandergewichen, und der dadurch entstehende Hohlraum wurde während oder nach der Spaltenbildung mit neugebildeten Massen ausgefüllt. Der Abstand der Salbänder entspricht dem Ausmaß der stattgefundenen Bewegung, und die Art der Ausfüllung läßt uns erkennen, nach welcher Richtung die Spalte während ihrer Zufüllung geöffnet war.

Obwohl die Gangspalten von der größten Bedeutung für den Bergbau sind und ihre Entstehung mit großzügigen geologischen Vorgängen zusammenhängt, so wurden sie bei tektonischen Erörterungen früher nur wenig berücksichtigt, und bis in die neueste Zeit spielt WERNERS klassische Arbeit vom Jahre 1791 noch eine Rolle. Ein Teil der Gänge entstand jedenfalls durch die wechselnde Spannung in den sich abkühlenden Magmamassen. Hierher gehören zunächst die aplitischen und pegmatitischen Gänge in größeren Magmamassiven, sowie die im nahen Kontakthof verbreiteten Ganggesteine. Aber die Mehrzahl der erzführenden oder mit Mineralmassen erfüllten Gangspalten kann auf diesem Wege nicht erklärt werden.

Die Ausfüllungsmasse der Gangspalten gibt uns Fingerzeige über die Umstände, unter denen sie sich öffneten. Einzelte Fälle von Sandsteingängen zeigen uns, daß hier die Spalte nach oben klappte, und lockere Sandmassen, die seither regional denudiert wurden, in die damals offene Spalte von oben hereinfallen konnten. (Die mit scharfkantigen Trümmern erfüllten, als „Reibungsbreccien“ bekannten Gangspalten werden noch besonders besprochen.)

Alle anderen Gangspalten sind entweder durch Niederschlag aus chemischen Lösungen ausgefüllt worden, die in seltenen Fällen als vadose Sickerwässer von oben oder aus der im Gestein verbreiteten Lithose von der Seite an die

Spaltenwände herantraten — in der Mehrzahl der Fälle aber als eruptose Wasser von unten kamen.

Die Verteilung der Mineralien innerhalb der Gangspalte läßt erkennen, ob nur eine Lösung oder nacheinander mehrere Lösungen bei der Bildung der Gangmineralien beteiligt waren. Die Häufigkeit von schwerlöslichen Mineralien, wie Quarz- und Schwerspat, zeigt, daß von allen in Lösung befindlichen Stoffen die schwerlöslichsten zuerst ausfielen und am längsten konserviert wurden.

Die chemische Einheitlichkeit und Reinheit vieler Mineralgänge läßt uns schließen, daß die betreffenden Gangspalten innerhalb der Erdrinde nach allen Seiten auskeilten und blind endeten.

Die mit Magmagesteinen erfüllten plutonischen und vulkanischen Gänge müssen nach unten gegen einen noch flüssigen oder wieder verflüssigten Magmaherd offen gewesen sein. Die gemischten Gänge deuten auf eine wiederholte Öffnung und Füllung mancher Gangspalten.

Die überwiegende Mehrzahl der Gangspalten findet sich fern von vulkanischen oder plutonischen Massen, entweder in gefalteten oder in gebrochenen Störungsgebieten. Bisweilen zeigt ihre Verteilung und ihr Streichen eine Abhängigkeit von den dort herrschenden tektonischen Leitlinien, aber in der Regel weichen sie beträchtlich davon ab.

Neuerdings haben besonders BORNHARDT und DENKMANN in den Gängen des Siegener Landes so interessante Tatsachen festgestellt, daß ich mir nicht versagen kann, diesen grundlegenden Arbeiten¹⁾ einige Leitsätze zu entnehmen:

„Es ist ein Hauptcharakterzug, daß die Streichrichtung der Gänge sowohl von Gang zu Gang als auch im Verlauf der einzelnen Gänge stark wechselt.

Neben einfachen Krümmungen der Gangwände sieht man S-förmige Windungen und scharfe Hackenbildung; auch bajonettförmige Umbiegungen kommen vor.

Treffen verschieden gerichtete Gänge aufeinander, so beobachtet man niemals, daß ein Gang den andern mit deutlichen Salbändern quer durchsetzt, vielmehr ist die Ausfüllungsmasse beider Gänge stets einheitlich verwachsen.

Innerhalb enger Bezirke herrschen gewisse Streichrichtungen vor.

¹⁾ W. BORNHARDT: Über die Gangverhältnisse des Siegerlandes. Archiv f. Lagerstättenforsch., Heft 2, I. — DENKMANN: Neue Beobachtungen über die tektonische Natur der Siegener Spateisensteingänge. Archiv f. Lagerstättenforsch., Heft 6.

Die Gänge zeigen die deutliche Neigung, sich in Zonen zusammenzudrängen, die vorwiegend dem Hauptstreichen des rheinischen Schiefergebirges folgen. Aber innerhalb solcher gangreichen Zonen sind die Gänge scheinbar regellos verstreut. Man kann daher weniger von Gangzügen als von Gangschwärmen und Ganggruppen sprechen.

Meist sind die Gänge später durch Querstörungen so verschoben, daß man in manchen Gebieten lange suchen kann, bis man auch nur ein 100 m langes unzerstückeltes Gangstück findet. Diese Störungen zeigen Bewegungsspuren, die stark von der Fallrichtung der Schicht abweichen. Spitze Winkel herrschen überall vor.

Die Gänge fallen meist unter steilen Winkeln, seltener unter $15-20^{\circ}$ ein.

Viele Gänge zertrümmern sich und werden hierbei unbauwürdig.

Nebengesteinseinschlüsse häufen sich lokal an, und in der Regel liegen sie völlig wirr und ungeordnet neben- und übereinander. Manche Bruchstücke müssen mehrere hundert Meter tief in die klaffende Zugspalte hinabgestürzt sein.

Eine große Anzahl von Gräben durchschneidet das gefaltete Gebirge, und auf solchen „Ganggräben“ sind die wichtigsten Eisenerzlager ausgeschieden worden.“

Da das Streichen und Fallen der Gänge unterirdisch so oft wechselt, hat v. KOENEN¹⁾ für die Entstehung der Gangspalten folgende Erklärung gegeben: Wenn sich eine wellenförmig gebogene Spaltfläche bewegt, dann entstehen sofort zahlreiche Stücke, an denen die Salbänder auseinanderweichen und offene Spalten bilden. — Würde diese Erklärung für alle Gänge zutreffen, dann müßte sich jeder Gang in eine Verschiebung fortsetzen. Ein Blick auf die Karte eines Ganggebietes zeigt uns jedoch, daß viele Erzgänge in ihrem Streichen von den benachbarten Brüchen völlig unabhängig sind.

Ihre Verteilung zwischen jenen läßt also erkennen, daß mitten zwischen den durch Seitendruck gepreßten und verschobenen Schollen Interferenzzonen eingeschaltet sind, deren Spaltenwände nachträglich klaffend auseinandergewichen sind. Beide können im Streichen ineinander übergehen, können sich verdrängen und ersetzen, aber die Gangspalten bewahren doch in der Regel eine gewisse Eigenart in Richtung und Verteilung.

¹⁾ v. KOENEN: Über Veränderungen des Verhaltens von Störungen 6. Jahresber. d. Niedersächs. geolog. Vereins 1913.

4. Die Trümmerzonen (Polyklasen).

Sowohl an vulkanisch wie an chemisch erfüllten Gangspalten beobachten wir sehr häufig, daß die neugebildete Gangmasse scharfkantige Bruchstücke des Nebengesteins enthält. Die Ringelerze des Oberharzes sind ein wohlbekanntes Beispiel. Auch Eruptivgänge können von mehr oder weniger veränderten fremdartigen Scherben ganz durchsetzt sein.

Noch häufiger treten uns in gefalteten oder gebrochenen Störungsgebieten schmale und breitere Zonen entgegen, in denen das Gestein aus zahllosen scharfkantigen Trümmern besteht, die durch Minerallösungen zu einer bunten Breccie verkittet werden. Man denke an die ostthüringischen, mittelsilurischen Kieselschiefer, in denen weiße Quarzgänge die schwarzen Schiefertrümmer verkitteten, oder an so viele, durch Kalkspatgänge wieder verkittete Trümmerkalke (Marmore) und Dolomite in den Alpen.

Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß hier ganze Gebirgsteile durch Tausende von Zugspalten in Trümmer zerlegt wurden, bevor ihre Zwischenräume durch neugebildete Gangminerale wieder ausgefüllt wurden. Diese Trümmerzonen mußten unterhalb der Erdoberfläche entstehen; denn wenn sie hierzutage ausgingen, so wären sie entweder mit Sedimenten verengt oder wenigstens nicht verkittet, sondern durch Denudation ausgeräumt worden.

Wir müssen daher prüfen, ob nicht neben den verkitteten Trümmerzonen auch unverkittete Gesteinstrümmernmassen in unterirdischen Aufschlüssen vorkommen, die sich in größerer Ausdehnung und mit bestimmtem Streichen innerhalb der Erdrinde verfolgen.

Tunnelbauten haben uns nicht nur in den Alpen, sondern auch in weniger gestörten Tafelländern vielfach mit gelockerten Trümmernmassen bekannt gemacht. Selbst mitten in den Trias tafeln von Deutschland begegnet man an den Wänden mancher Eisenbahndurchschnitte Stellen, an denen das rasch wechselnde Streichen und Fallen großer Muschelkalkblöcke und die dazwischen aufgerichteten Schutzmauern sofort erkennen lassen, daß hier Trümmerzonen durchschnitten wurden, deren Teile zerbrochen, aber nicht wieder verkittet wurden.

Zahlreich sind die Fälle, in denen der Bergbau solche Trümmerzonen mit großen Schwierigkeiten bewältigen mußte. Die Sutanüberschiebung ist nach Mitteilungen von KUKUK eine solche Trümmerzone, die mit einer Mächtigkeit von 1 bis 500 m durch das westfälische Kohlengebirge hindurch zieht.

5. Die Spaltentäler.

Wir haben in den einleitenden Sätzen darauf hingewiesen, daß in gefalteten Gebirgen zahlreiche Täler auftreten, deren Streichen mit den tektonischen Leitlinien völlig parallel geht, die aber nicht etwa einer Mulde, sondern einem geöffneten Sattel entsprechen. Die Entstehung dieser „Spaltentäler“ in gefalteten Gebieten betrachtet man heute als eine selbstverständliche Nebenwirkung der Faltung, und niemand zweifelt daran, daß die Sattelachsen durch seitlichen Zug gelockert und dann durch Erosion ausgeräumt wurden.

Obwohl Männer wie v. KOENEN wiederholt darauf hingewiesen haben, daß auch im Flußnetz der meisten mitteldeutschen Flüsse in nicht gefalteten und scheinbar ungestörten Tafelländern immer wieder Talstrecken auftreten, die den tektonischen Leitlinien benachbarter Horste und Gräben parallel gehen, so scheuen sich doch viele Forscher noch immer, einen ursächlichen Zusammenhang zwischen beiden Erscheinungen anzunehmen.

Ich sehe den Grund hierfür wesentlich darin, daß man sich gewöhnt hat, alle Verwerfungsspalten auf vertikale Bewegungen zurückzuführen, und nun aus dem Fehlen einer vertikalen Sprunghöhe zwischen den beiden Talwänden den Schluß zieht: „hier ist keine Verwerfung, also keine tektonische Störung.“ Sobald wir aber in einer Verwerfung nur den Querschnitt von einer Verschiebung auf schiefer Ebene sehen, sobald wir uns klarmachen, daß sich solche tektonischen Bewegungen nicht nur in Druckspalten mit Harnischen, sondern ebenso leicht in Zugspalten und Trümmerzonen äußern können, dann erscheinen uns auch die Talstücke, die den tektonischen Leitlinien eines Tafellandes parallel streichen, in einem neuen Lichte.

Wir halten sie für Zugspalten im Sinne von geradlinigen Trümmerzonen, die nicht wieder verkittet wurden, weil sie an der Erdoberfläche mündeten, so daß die erodierenden Kräfte hier ein viel leichteres Spiel hatten, eine Erosionsrinne einzuschneiden, als auf den benachbarten geschlossenen Tafeln.

Deuten nicht auch Thermen und Mineralquellen die in Flußbetten aufsteigen, darauf hin, daß hier die Talsohle einer bis in große Tiefe zerrütteten tektonischen (Quell-)Linie entspricht?

Ich kann an dieser Stelle nicht alle Folgerungen ausführen, die sich aus diesen Betrachtungen über „epigenetische Täler“, „Durchbruchtäler“ und ähnliche Probleme der Tal-

bildung ergeben. Es kam mir nur darauf an, zu zeigen, daß es viele Talabschnitte gibt, die tektonisch bedingte sind, ohne daß sich eine vertikale Verschiebung der benachbarten Schollen erkennen läßt.

Nachdem wir die wichtigsten Formen, unter denen uns tektonische Spaltensysteme entgegneten, kennen gelernt haben, wollen wir die rezenten Parallel-Erscheinungen prüfen.

II. Die Erdbebenspalten.

Die Veränderungen der Erdrinde, die wir bei großen Erdbeben auftreten sehen, sind, wie jetzt allgemein anerkannt ist, die rezenten Äquivalente für tektonische Bewegungen, deren fossile Wirkungen wir in den Spalten der Erdrinde beobachten. Wenn wir statistisch die Häufigkeit der einen oder anderen Art von Erdbebenspalten miteinander vergleichen wollen, so müssen wir bedenken, daß manche nur unter ganz besonders günstigen Bedingungen zu erkennen sind, während andere überall und leicht zu beobachten sind

1. Die Zugspalten.

Klaffende und an der Erdoberfläche geöffnete Spalten gehören zu den bekanntesten und häufigsten Bildern aus Schüttergebieten. In langgestreckten Zonen streichen sie durch ganze Länder, wobei die Zahl der Spalten, ihre Richtung und die Breite der zerrütteten Zone beständig wechselt. In manchen Fällen berichten Augenzeugen, daß sich Spalten durch Zug öffneten und im nächsten Moment wieder geschlossen haben. Es sind sogar Fälle bekannt, wo Bäume oder Gebäudeteile hierbei eingeklemmt wurden.

Es hängt nun ganz von dem Pflanzenreichtum einer Gegend ab, ob diese Spaltenzüge nach dem Erdbeben durch den Wurzelfilz der Pflanzenwelt zuwachsen und vernarben, oder ob sie schutzlos den abtragenden Kräften preisgegeben sind.

In dem ersten Fall entsteht eine kurze Talwelle, im anderen Fall eine Zerrüttungszone, welche den Lauf der unterirdischen Lithose beeinflußt.

2. Die Druckspalten.

Während die geöffneten Zugspalten nach dem seismischen Stoß leicht zu sehen sind, gilt dies für die geschlossenen Druckspalten nicht. Besonders die horizontalen Verschiebungen werden nur dann erkannt, wenn sie zufällig ein Eisenbahngleis, einen Weg oder eine Grundstücksgrenze

schneiden. Um so interessanter sind die Fälle, wo bei Erdbeben beträchtliche horizontale Verschiebungen ohne Bildung einer Geländestufe eingetreten sind; ich erinnere an die Verschiebungen der Bäume bei Umara in Japan, an horizontale Verbiegungen von Eisenbahngleisen in Assam und Java und an das schöne Beispiel des zerrissenen Lattenzaunes in Kalifornien. Das Ausmaß solcher horizontaler Verschiebungen wurde in Assam und Kalifornien trigonometrisch während eines kurzen Bebens zu 5—10 m bestimmt.

Viel auffallender sind natürlich die Bruchspalten, an denen eine vertikale Verschiebung und Terrassenbildung zu erkennen ist; obwohl auch sie nur in kultivierten Teilen des Landes gut erkannt werden können. Beispiele hierfür bietet jedes Lehrbuch. Bald sind ebene Straßen oder Eisenbahngleise von Verwerfungen durchschnitten, bald entstanden Wasserfälle in einem vorher ausgeglichenen Wasserlauf. Ähnliche Wirkungen aber, mitten im Wald oder selbst nur unter mächtigeren Schuttdecken, dürften in der Regel nicht zur Beobachtung kommen.

Trotzdem möchte ich aus der verhältnismäßigen Seltenheit von vertikalen Verschiebungen auf Erdbebenspalten nicht ohne weiteres schließen, daß ihre geringe Zahl nur auf der geringen Möglichkeit, sie zu beobachten, beruht. Vielmehr bin ich auf Grund meiner Beobachtungen fossiler Spalten geneigt, anzunehmen, daß die meisten Erdbeben von kleinen Zerreißen in horizontaler Richtung und Verschiebungen auf sehr wenig ansteigenden schiefer Ebenen herrühren, und daß dabei der im vertikalen Sinn zurückgelegte Weg oft verschwindend klein ist gegenüber der horizontalen Verschiebung benachbarter Erd-schollen.

III. Tektonische Experimente.

Während das Experiment in Physik und Chemie und den damit verwandten Wissenschaften, wie Mineralogie, Physiologie u. a. eine grundlegende Bedeutung besitzt, und alle größeren Fortschritte in diesen Wissenschaften veranlaßt oder begleitet, kann in der Geologie das Experiment niemals mit jener exakten Beweiskraft zu endgültigen Schlüssen verwendet werden. Denn die räumlichen und zeitlichen Dimensionen und Nebenumstände, die bei geologischen Vorgängen in der Natur eine so maßgebende Rolle spielen, lassen sich nicht alle im Laboratorium nachahmen. Geradeso, wie viele chemische Versuche, die im Reagenzglas oder der Retorte ein ausgezeichnetes Resultat bieten, bei einer fabrikmäßigen Darstellung im großen

oftmals nur ganz geringe Ausbeute geben, weil mit der Vergrößerung von Masse, Raum und Zeit auch die Fehlerquellen in ungeahnter Weise wachsen, so besteht ein prinzipielles Mißverhältnis zwischen den künstlichen Bedingungen, die wir im Laboratorium zusammenstellen, und den natürlichen Umständen, unter denen ein geologischer Vorgang verläuft.

Man kann im Experiment bestimmte Vorgänge nachahmen, und darin liegt seine pädagogische Bedeutung; aber man muß, wenn es sich um offene Probleme handelt, in jedem Falle auch beweisen, daß nur das angestellte Experiment den Vorgang erklärt und daß alle anderen Möglichkeiten ausgeschlossen sind.

Verhältnismäßig am günstigsten liegen die Verhältnisse in der tektonischen Geologie. Hier haben viele Forscher durch sinnreiche Apparate selbst verwickelte Lagerungsverhältnisse im kleinen nachzuahmen vermocht. Freilich kann meines Erachtens das Experiment auch hier nur nachbilden und verdeutlichen, was die Beobachtung in der Natur an grundlegenden Tatsachen geboten hat.

Die glänzenden Experimente, die REYHER vor Jahren eronnen und angestellt hat, sind später durch eine ganze Anzahl von Forschern weitergeführt und auf die modernen Probleme der Gebirgsbildung angewandt worden. Hierbei wurde allerdings vorwiegend die Faltung, weniger die Bruchbildung experimentell studiert, und so blieb das von E. SUESS zur Erklärung der Schollengebirge angegebene Beispiel von der „bei sinkendem Wasserspiegel zusammenbrechenden Eisdecke eines Sees“ bis heute von führender Bedeutung.

Auch ich habe¹⁾ im Jahre 1896 auf der Geologenversammlung in Stuttgart einen Apparat demonstriert, der im Sinne VON SUESS die Entstehung des Thüringer Horstes als einen stehengebliebenen Streifen auffaßte, an dem nach beiden Seiten andere Streifen passiv absanken. Dem von verschiedenen Seiten an mich herantretenden Wunsche entsprechend, hatte ich schon Auftrag gegeben, diesen Apparat für Unterrichtszwecke zu vervielfältigen, als ich mich bei meinen folgenden Exkursionen in Mitteldeutschland schrittweise davon überzeigte, daß der Thüringer Horst ebensowenig wie der Harz auf diesem Wege entstanden sein könne. Besonders erkannte ich beim Studium der vielen kleinen und schmalen Horste und der mit ihnen oft verknüpften schmalen Gräben (z. B. Seeberg bei Gotha, Leuchtenburg b. Kahla u. a.), daß hier ein vertikales

¹⁾ J. WALTHER: Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges. 1896, S. 712.

passives Absinken gegenüber stehenbleibenden Streifen unmöglich alle Tatsachen erklären könne.

Die Häufigkeit horizontaler oder flach ansteigender Rutschstreifen in gut aufgeschlossenen Störungszonen zeigte mir vielmehr mit immer größerer Deutlichkeit, daß das vertikale Emporsteigen ebenso wie das Hinabtauchen schmaler Streifen zwischen ruhenden Tafeln auf einer horizontal wirkenden Kraft beruhen müsse, deren Wirkungen nur im Querschnitt als vertikale Hebung oder Senkung erscheint.

Daß der Horst des Harzes über das nördliche Harzvorland auf einer schiefen Ebene von Süden her überschoben worden ist, weiß jeder, der dort Exkursionen gemacht hat, und daß der mittlere Thüringer Wald zwischen Ilmenau und Elgersbuch von einer Randkluft begrenzt wird, die steil gegen das Gebirge widersinnig einfällt, das hat schon im Jahre 1776 der damalige Leiter des Ilmenauer Bergbaues, J. C. W. VOIGT¹⁾, nachgewiesen.

So versuchte ich einen neuen Apparat zu bauen, wesentlich zu dem Zweck, um den thüringer Lehrern in einem Ferienkursus den Bau und die Entstehung des mittleren Thüringer Waldes klarzumachen. Der Apparat ist dann in meiner Vorschule²⁾ abgebildet worden. Ich versuchte an diesem einfachen Beispiel besonders zu zeigen, daß zwischen der Faltenbildung und der Bruchbildung kein wesentlicher Unterschied bestehe, daß beide durch den Seitenschub und tangentielle Spannungen in der Erdrinde veranlaßt werden. Mit wenig Handgriffen kann man an dem Apparat Falten ebenso wie Überschiebungen, einen Keilhorst (wie den Thüringer Wald) oder zwei Halbhorste (wie Vogesen und Schwarzwald) nachahmen. Aber dieser Apparat hat gerade wegen seiner Einfachheit große Mängel. Denn er bietet nur einen optischen Querschnitt dar, nicht das flächenhafte Bild der orogenetischen Bewegungen. Ich habe daher seit Jahren nach einer anderen Versuchsanordnung gesucht, um einen Demonstrationsapparat zu konstruieren, der nicht nur den Querschnitt eines Störungsgebietes, sondern die ganze Mannigfaltigkeit eines solchen flächenhaft überschauen läßt; der nicht nur Druckspalten mit horizontalen, schrägen und vertikalen Verschiebungen, sondern auch Zugspalten mit klaffenden Rändern entstehen läßt.

¹⁾ J. C. W. VOIGT: Geschichte des Ilmenauschen Bergbaues. Sondershausen 1821. Taf. I, Fig. 3.

²⁾ J. WALTHER: Vorschule der Geologie. Jena 1905. S. 100. V. Aufl., 1912, S. 144.

Der orogenetische Spaltenapparat¹⁾, der seit etwa Jahresfrist fertig ist, besteht aus einem nachgiebig eingespannten Rahmen, der ein Mosaik von Holzstücken umgreift, für deren Umriß ich einen Spaltenzug aus NW-Deutschland zugrunde gelegt habe. Sobald man auf die völlig eben aneinanderpassenden Holzstücke langsam einen einseitigen Druck wirken läßt, beginnen sich fast alle Stücke zu bewegen, und obwohl diese Bewegung vorwiegend in horizontalem Sinne erfolgt, gliedert sich rasch die Oberfläche in Höhen und Tiefen. Horste steigen empor, Gräben sinken in die Tiefe und Treppenbrüche verbinden beide Regionen. Mitten zwischen den gepreßten und auf schiefen Ebenen aneinander hingleitenden Schollen öffnen sich gleichzeitig kleine und große Zugspalten und verdeutlichen in überraschender Weise, daß Druck auch Zug erzeugen kann, sobald eine Entlastung der gepreßten Platten auf größeren Gleitflächen erfolgen konnte.

IV. Die Horste.

Wenn ein Stück Erdrinde von Spalten durchsetzt wird, an denen sich die einzelnen Stücke in irgendeiner Richtung verschieben können, so entsteht im Querschnitt des Aufchlusses (sofern nicht der seltene Fall vorliegt, daß die Verschiebung absolut horizontal erfolgte) das wohlbekannte Bild kleiner und großer Verwerfungen. Die Höhenunterschiede der benachbarten Schollen ergeben leicht jene drei Fälle, die E. SUESS in seinem „Antlitz der Erde“ in so prägnanter Weise unterschieden hat: Folgen mehrere Schollen in auf- oder absteigender Richtung aufeinander, dann nennen wir dies einen Treppenbruch, liegt ein Streifen höher als die benachbarten, dann nennen wir ihn einen Horst, liegt er tiefer als seine Nachbargebiete, einen Graben.

Aber E. SUESS hat nicht allein diese tektonischen Typen zu unterscheiden gelehrt, sondern zugleich eine Erklärung für ihre Entstehung gegeben. Nach ihm sind die deutschen Horste die später getrennten Stücke einer früher einheitlichen Hochebene, die auf dem alten Niveau stehen blieben, während Gräben und Senkungsfelder, dem Zug der Schwere folgend, zwischen ihnen passiv in die Tiefe sanken.

Ich habe schon erwähnt, daß auch ich früher diese Ansicht geteilt habe. Aber eine Reihe von Tatsachen haben mich

¹⁾ Der Apparat ist von Dr. KRANTZ's Mineralienkontor in Bonn zur Vervielfältigung übernommen worden.

allmählich davon überzeugt, daß die von SUESS gegebene Erklärung zwar für das rheinische und böhmische Massiv zu Recht zu bestehen scheint, aber für die übrigen deutschen Horste nicht gelten könne. Ich habe daher, nachdem ich¹⁾ diese Ansicht schon im Jahre 1902 für den Horst des Thüringer Waldes ausgesprochen hatte, im Jahre 1910 die genannten Massive²⁾ als ständige Horste von den anderen gehobenen Horsten unterschieden³⁾.

Den ersten Beweis für die Auffassung, daß Vogesen und Schwarzwald, Hardt- und Odenwald, Spessart und Thüringer Wald, Seeberg und Kyffhäuser, Harz und Flechtinger Höhen-

¹⁾ J. WALTHER: Geologische Heimatskunde von Thüringen. (I. Aufl. 1902.) IV. Aufl. 1913, S. 100.

²⁾ J. WALTHER: Geologie Deutschlands. (I. Aufl. 1910.) II. Aufl. 1912, S. 140, 179.

³⁾ Da ich meine Auffassung über die Entstehung tektonischer Spalten bisher noch nirgends im Zusammenhang veröffentlicht habe, weil ich noch an dem orogenetischen Spaltenapparat arbeitete, kann ich es wohl verstehen, daß einzelne in anderem Zusammenhang von mir veröffentlichte Sätze mißverstanden werden konnten.

Ganz unverständlich ist es mir, wie die Herren KRANTZ (Über Zusammenschub und Senkungen in Horstgebirgen, Zentralbl. f. Mineralogie 1911, S. 352) und QUIRING (Die Entstehung von Schollengebirgen, diese Zeitschr. 1913, S. 418), wenn sie meine Vorschule, die sie zitieren, gelesen oder selbst nur durchgeblättert haben, zu der Ansicht kommen konnten, ich hätte darin alle Gräben mit nach unten divergierenden Randspalten und alle Horste als Keile mit nach unten konvergierenden Spalten durch Hebung zu erklären versucht.

Im Wörterbuch meiner Vorschule wird das Wort „Graben“ als: ein Streifen der Erdrinde definiert, der tiefer liegt wie seine Nachbargebiete. Man kann sich, glaube ich, nicht objektiver ausdrücken, als ich hier getan habe. Im Text selbst sind auf drei verschiedenen Seiten Gräben abgebildet; der eine (= Königsee) zeigt parallel senkrecht nach unten verlaufende Randspalten; der zweite (= Leuchtenburg) ist mit nach unten spitz konvergierenden Randspalten gezeichnet, der dritte (= Rheingraben) zeigt nach unten divergierende Spalten. Daß ich die Bildung des Königsees oder des Leuchtenburggrabens nicht durch den oben erwähnten Apparat erklären kann und will, muß doch jeder einsehen, der sich einer objektiven Kritik befleißigen will.

Man sollte nun aber glauben, daß ein Autor wie Herr Hauptmann KRANTZ, der sich für berechtigt hält, gegen mich in heftigster Weise zu polemisieren und mit den fettesten Lettern meine akademische Lehrtätigkeit zu kritisieren, wenigstens das angegriffene Büchlein wenn nicht lesen, so doch wenigstens hätte einmal durchsehen müssen.

Aber wie mir scheint, kennt Herr KRANTZ nur einen Artikel in der mir nur dem Namen nach bekannten „Neuen Zeitschrift für Geologie und Paläontologie“. Ich habe für diese Zeitschrift nie einen Artikel geschrieben, und kann nur vermuten, daß es sich um einen Nachdruck aus meiner Vorschule handelt, um den ich einmal durch Vermittlung meines Verlegers gebeten worden bin.

zug u. a. nicht ständige, sondern gehobene Horste sind, erblicke ich in dem geologischen Bau der Randgebiete einzelner der genannten Horste. Der Randbruch des Thüringer Waldes bildet zwischen Ilmenau und Ilgersburg eine Flexur, deren Mittelschenkel widersinnig gegen das Gebirge einfällt. Schon im Jahre 1776 hat VOIGT an dem unterirdischen Verlauf des Kupferschiefers diese Lagerungsform erkannt.

Daß der nördliche Thüringer Wald von Flexuren begrenzt wird, deren Mittelschenkel vom Gebirge abfällt, ist leicht verständlich, denn hier klingt der Horst in der Ebene aus, und nur ein Theoretiker wird den gut beobachteten keilförmigen Bau des mittleren Thüringer Waldes deshalb in Zweifel ziehen, weil das nordwestliche Ende des Thüringer Waldes andere Lagerungsformen zeigt. Der unterirdische Verlauf des südlichen Randbruches ist unbekannt, aber sein scharfes, geradliniges Streichen und die spießeckigen Teilstücke, die von BEYSLAG im Norden wie im Süden in völlig harmonischer Weise verfolgt wurden, sprechen dafür, daß der Horst auch im Süden keilförmig gestaltet ist.

Viel schöner und ausgedehnter sind die Aufschlüsse am Nordrand des Harzes, wo ebenfalls ein uralter Bergbau das widersinnige Einfallen des Randbruches deutlich verfolgen läßt.

Altbekannt ist das widersinnige Einfallen des Lausitzer Horstes gegen den Elbgraben, und in neuerer Zeit haben die Untersuchungen von ROTHPLETZ auch für den Südrand der Böhmisches Masse ähnliche Lagerungsverhältnisse nachgewiesen.

Wenn es nun ANDREÄ, VAN WERWECHE, SALOMON u. a. am Fuße des Schwarzwaldes gelungen ist, mehrfach das widersinnige Einfallen der oberrheinischen Randbrüche zu erkennen, so kann ein Theoretiker wohl trotzdem die Hypothese verteidigen, daß andere nicht genauer untersuchte Brüche vom Schwarzwald gegen die Rheinebene absinken; aber man muß sich doch darüber klar bleiben, daß die Richtigkeit dieser Annahme erst bewiesen werden muß.

Daß viele schematische Profile in Büchern und Karten die oberrheinischen Randbrüche gegen den Graben einfallen lassen, kann bei einer kritischen Diskussion des Problems unberücksichtigt bleiben, denn die Bruchlinien auf diesen Profilen stellen hypothetische Anschauungen, nicht beobachtete Tatsachen dar.

Einen zweiten Einwurf gegen die Ansicht, daß alle Horste ständig seien, erblicke ich in dem Mißverhältnis, das zwischen den Dimensionen kleinerer Horste und ihren benachbarten Senkungsfeldern besteht. Ich habe diese Frage wiederholt

am Seeberg bei Gotha erwogen, der ein etwa fünf Kilometer langer und dabei nur 200 m breiter Horst ist, auf dessen Kamm der mittlere Muschelkalk mit seinen Gipslagern zutage tritt, während in der Tiefe bei Günthersleben eine Scholle von Lias erhalten ist¹⁾. Die Sprunghöhe des aus mehreren Spalten bestehenden Störungszone beträgt etwa 400 m. Im N folgt nach der älteren Auffassung ein „Senkungsgebiet“ von 50 km bis wiederum der kleine Kyffhäuserhorst hervortritt. Nach S trennt ein 10 km breites „Senkungsfeld“ den Seeberg vom Thüringer Wald. Wenn man diese Regionen durchwandert, so wird man angesichts dieser verschwindend schmalen Horste zwischen riesigen tieferliegenden Tafeln mit zwingender Notwendigkeit zu der Überzeugung geführt, daß hier die Horste nicht zwischen breiten Senkungsfeldern stehengeblieben sein können, sondern vielmehr durch sie emporgepreßt wurden. Da diese Aufpressung aber nicht durch eine von unten nach oben wirkende Hebungskraft, sondern durch den tangentialen Seitendruck bedingt war, müssen wir die Hebung keineswegs im vertikalen Sinne verstehen, sondern nur als Endresultat von Bewegungen, die sich auf schiefen Ebenen vollzogen.

Aber der Seeberghorst, der in seinen Größenverhältnissen so sehr viel kleiner wie der Thüringer Horst ist, bleibt immer noch ein Riese im Vergleich zu den Liliputhorsten, die ZIMMERMANN auf den Meßtischblättern Stadt Ilm und St. Remda entdeckte. Unter dem Titel „Eruptives Röt“ hat ZIMMERMANN²⁾ diese merkwürdigen Horste beschrieben und ihre Eigenart gekennzeichnet. Wenn man diese aus weichen Letten bestehenden Horste mitten zwischen harten Muschelkalkplatten auftreten sieht, dann gehört schon ein gutes Maß von theoretischem Glauben an eine hergebrachte Hypothese, um solche Horste als stehengebliebene Pfeiler zwischen gesenkten Schollen anzusehen.

Als eine dritte Gruppe von Beweisen gegen die Annahme, daß alle Horste ständig seien, betrachte ich die Richtung der Rutschstreifen auf den in der Nähe von kleinen und großen Horsten auftretenden Spalten. Die Häufigkeit von fast horizontalen oder in spitzen Winkeln ansteigenden Rutschstreifen auf den Harnischen gibt uns den zwingenden Beweis, daß die vertikale Hebung vieler Horste nur das Ergebnis einer Bewegung auf schiefen Ebenen ist, und widerlegt ebenso zwingend die Auffassung, daß die gesenkten Gräben und Senkungsfelder vertikal nach abwärts bewegt wurden. Wer

¹⁾ BAUER: Erl. zu Blatt Gotha. J. WALTHER: Geol. Heimatkunde von Thüringen, IV. Aufl., S. 151.

²⁾ ZIMMERMANN: d. Zeitschr. 1895, S. 615.

sich einmal angesichts der an den Rutschstreifen direkt abzulesenden tatsächlichen Bewegungen in den komplizierten Mechanismus versenkt hat, der an großen Störungszonen Treppenbrüche, Horste und Gräben gegeneinander verschob, der wird es für das wahrscheinlichste halten, daß gleichzeitig Grabenstreifen nach abwärts und Horststreifen nach aufwärts bewegt wurden.

Wenn mich also H. QUIRING in seiner erwähnten Arbeit als Vertreter der „Hebungstheorie“ aufführt, so möchte ich demgegenüber erklären, daß ich selbst in den Fällen, wo ich das vertikale Steigen eines Horstes für wahrscheinlich halte, darin doch immer nur das Resultat von einer Bewegung auf schiefen Ebenen erblicke.

Am deutlichsten aber ergibt sich die Unhaltbarkeit der bisherigen Annahme, wenn wir einmal versuchen, mit Hilfe einiger Holzstreifen einen Graben nachzuahmen. Die von QUIRING veröffentlichten Figuren 3, 6 und 7 bieten typische Beispiele für diese in der Natur so häufigen Lagerungsformen. Man versuche im Geist, die keilförmigen Gräben durch vertikales Heben in ihre Anfangslage zurückzubringen, und frage sich, wo die in dem dadurch entstehenden Spaltenhohlraum fehlende Gesteinsmasse hingekommen ist? Man versuche dieselbe Rekonstruktion mit dem so merkwürdigen Graben der Leuchtenburg, oder man reponiere den Graben der ober-rheinischen Tiefebene, indem man die auf den bekannten Profilen eingetragenen Trapezoidschollen bis zur Höhe des Vogesenkammes hebt — ich sehe keine mechanische Möglichkeit, mir das landläufige tektonische Bild durch passives Absinken auf konvergierenden Grabenspalten zu erklären.

Alle diese Schwierigkeiten schwinden in dem Augenblick, wo wir uns von der alten Hypothese frei machen, und dafür die einzelnen Grabenkeile auf schiefen Ebenen seitlich aneinander hingleiten lassen, wobei sich die Grabenstreifen etwas abwärts, die Horststreifen etwas aufwärts bewegen.

V. Druck und Zug in der Erdrinde.

Es ist schon wiederholt¹⁾ auf den Widerspruch aufmerksam gemacht worden, der darin beruht, daß wir die Faltung der Gebirge auf eine Abkühlung und Schrumpfung des Erdkernes und damit auf seitliche Druckkräfte in der Erdrinde

¹⁾ VON DEM BORNE: Die physikalischen Grundlagen der tektonischen Theorien. GERLANDS Beiträge zur Geophysik, Bd. IX, 1908, S. 378.

zurückführen, während die mit plutonischen und vulkanischen Gesteinen erfüllten Lücken und Spalten sowie die mannigfaltigen chemisch ausgefüllten Gänge nur mit einer Dehnung und Zerrung derselben Erdrinde verbunden sein konnten.

Zwar hat die genauere Kenntnis der mit Magmagesteinen erfüllten Lücken der Erdrinde immer deutlicher gezeigt, daß hierbei Einschmelzungen und Durchschmelzungen eine viel größere Rolle spielen als die Erfüllung von offenen Spalten. Wenn in einem Faltenkern zwischen die aufgeblättern Schichten granitisches Magma injiziert und dann das neue Mischgestein als Gneis weiter gebogen und gefaltet wird, so zeigt uns schon die fluidale Anordnung dieses Gneises, daß er nicht unter Zug, sondern unter Druckspannung entstand.

Auch die Entstehung der großen gesonderten Granitstöcke, die LEPSIUS als „diskordant“ bezeichnet hat, setzt keine Zerrung der Erdrinde im Sinne einer sich öffnenden Spalte voraus, denn diese Magmakörper bildeten sich ihren Hohlraum mitten im Faltenbau des Grundgebirges, durch die aufschmelzende und auflösende Kraft ihrer glühenden Gase; unbekümmert um Streichen und Fallen der durchschmolzenen Schiefer durchsetzten sie glattwandig ihr Nebengestein.

Lange Zeit hat man geglaubt, daß die vulkanischen Kuppen auf Spalten emporgedrungen seien, und nur die obersten Enden tieferer vulkanischer Gangplatten darstellen; aber BRANCA zeigte in Schwaben, GEICKIE in Schottland, daß diese Eruptivmassen ganz ähnlich wie die größeren Granitmassen auf selbstgeschaffenen rundlichen Kanälen die Erdrinde durchschwärmen.

Nun kennen wir zwar Fälle, wo ein mauerartig herausgewitterter Basaltgang oder eine basalterfüllte schmale Spalte erkennen läßt, daß das Magma auch Gangspalten erfüllen kann — ; allein die Seltenheit solcher Vorkommnisse beweist, daß diese Lagerungsform für aufdringendes Magma nicht charakteristisch ist.

So dürfen also nicht alle plutonischen und vulkanischen Gangbildungen als Beweis dafür betrachtet werden, daß ihre Salbänder auseinandergesogen wurden, und dadurch Hohlräume entstanden, in die das Magma passiv hineindrang.

Man könnte mir einwenden, daß die Lakkolithen und die Lagergänge für jene Auffassung sprechen, aber bei ihrer Bildung weichen die hangenden Gesteinsdecken nicht so sehr seitlich als vertikal auseinander, und damit fallen auch sie unter die vielgestaltigen Erscheinungen der Faltung, bei der ja der Seitendruck allgemein anerkannt wird.

Aber wenn wir die genannten Erscheinungen ausschalten, so sehen wir doch in zahllosen Mineral- und Erzgängen, in verkitteten Reibungsbreccien und Trümmerzonen die deutlichen Zeichen, daß ganze Stücke der Erdrinde zu gewissen Zeiten seitlich gezerzt worden sind.

Auch die rezenten Erbeben zeigen uns auf das allerdeutlichste, daß durch tektonische Bewegungen sowohl Druck- wie Zugkräfte ausgelöst werden, und so müssen wir die Frage erwägen, wie dies zusammenhängen kann.

In einer interessanten Studie¹⁾ hat ROTHPLETZ darauf hingewiesen, daß eine Kontraktion der Erdrinde, wie wir sie bei der Gebirgsfaltung wirken sehen, und eine Expansion, wie sie bei der Bildung vulkanischer Gänge angenommen werden muß, nicht gleichzeitig, sondern in aufeinanderfolgenden Phasen der Erdgeschichte auftreten. Ich habe versucht, einen ähnlichen Gedankengang auszuführen²⁾, indem ich darauf hinwies, daß plutonische Gesteine nachweislich während der Faltung entstehen, und daß von den damals gefüllten Magmaherden erst dann der noch nicht erkaltete Teil des Magmas in der Erdrinde weiter emporsteigt und zu vulkanische Eruption kommt, wenn die Spannung der angesammelten Dämpfe eine hohe Durchschlagskraft erreicht hat und die Last der hangenden Gesteine durch Abtragung vermindert wurde.

Aber wenn wir die großen Störungslinien von der Leine durch Thüringen bis zum Frankenwald verfolgen und hier in den Gängen von Großkamsdorf enden sehen, wenn Schwerpatgänge dasselbe Streichen haben wie die Randbrüche des Thüringer Horstes, wenn die Spateisengänge des Siegener Reviers, wenn ausgeräumte Trümmerzonen und Spaltentäler so vielfach die Richtung der Wasserläufe bestimmen, dann müssen wir auch die Möglichkeit zugeben, daß sowohl tektonische Druckspalten wie Zugspalten durch dieselben Ursachen entstehen können.

Solange man in jeder Verwerfung nur die vertikale Verschiebung der Schollen sieht und nur ein senkrechtcs Absinken für möglich hält, bleibt der eingangs gekennzeichnete Widerspruch in aller Schärfe bestehen.

Aber wenn wir die tektonischen Bruchlinien recht verstehen wollen, dann müssen wir uns zunächst von der irrigen

¹⁾ ROTHPLETZ, Über die Möglichkeit, den Gegensatz zwischen der Kontraktions- und Expansionstheorie aufzuheben. Sitz.-Ber. M. Ph. Kl. K. Bayr. Akad. München 1902, Heft III.

²⁾ J. WALTHER, Geschichte der Erde und des Lebens. Leipzig 1910, S. 106.

Vorstellung frei machen, daß alle Verwerfungen völlig ebene Flächen seien, deren Querschnitt so geradlinig läuft wie die Striche, die man auf Profilen einträgt. Um hier zu einer richtigen Anschauung zu kommen, dürfen wir nicht die schematischen Bilder der Lehrbücher und ebensowenig die schematischen Profile ansehen, auf denen der Autor mit kühner Hand kilometerlange Bruchlinien nach der Tiefe zeichnet, obwohl er in der Regel den wirklichen Verlauf derselben nur auf wenige Meter Länge beobachtet hat. Niemand wird den Wert solcher Profile geringschätzen, weil der unterirdische Verlauf aller Bruchlinien völlig hypothetisch ist; aber bei einer kritischen Betrachtung des Problems muß ihr hypothetischer Charakter betont und berücksichtigt werden.

Betrachten wir die Oberfläche von freigelegten und mit Harnischstreifen versehenen Spalten, dann gehören völlig ebene Flächen zu den größten Seltenheiten; verfolgen wir das Streichen irgendeiner Bruchlinie auf einem modernen Meßtischblatt, dann sehen wir, wie oft ihr Verlauf von der Geraden abweicht — das sind die Tatsachen, die wir verallgemeinern müssen, die uns leiten sollen, wenn wir uns ein Bild machen wollen von der Gestalt der schiefen Ebenen, auf denen sich unter dem Einfluß des Seitendrucks die zerrissenen Schollen der Erdrinde bewegen. Das durch VON KOENEN betonte Prinzip, wonach eine wellig gebogene Bruchfläche bei horizontaler Bewegung überall Spalten und Lücken erzeugt, gilt in noch höherem Maße für die komplizierten Verschiebungen, die gewaltige Streifen und Keile erleiden. Und daß selbst ein einfaches Experiment beide Erscheinungen erzeugen kann, das zeigt mein orogenetischer Spaltenapparat, der neben den verschobenen Druckspalten die klaffenden Zugspalten entstehen läßt.

Aber auf einen weiteren Gesichtspunkt möchte ich hier noch besonders aufmerksam machen: Angenommen, die Kraft des Seitenschubs reicht hin, um eine große Scholle auf einer schiefen Ebene hundert Meter hoch als Horst über das Nachbargebiet emporzuheben, so wird die Wirkung des Seitendrucks aufhören, sobald die Last bis zu der bestimmten Höhe gehoben wurde. Seitendruck und Last halten sich jetzt die Wage.

Aber schon während der Hebung beginnt die Abtragung den Horst zu erniedrigen und seine Last zu verkleinern. Wenn man erwägt, daß von der Höhe des Thüringer Horstes eine Gesteinsplatte von mehr als 1000 m Mächtigkeit entfernt worden ist, und daß die Stärke der Abtragung von

klimatischen Ursachen beherrscht wurde, die völlig unabhängig sind von dem Wechsel in der Stärke des Seitendrucks (der auf dem Wärmegefälle der Erde beruht), so ergeben sich durch das Zusammentreffen zweier so verschiedenartiger Kausalreihen seltsame Wechselwirkungen: Eine kurze Periode des Klimawechsels reichte hin, um vielleicht 100 m Gestein abzutragen und das ganze labile Gewichtssystem des Horstes gegen seine Nebenschollen zu stören. In solchen Zeiten werden nach meiner Ansicht so rasche Entlastungen erfolgen, daß in dem vorher gepreßten Gebiet ganze Schwärme von Zugspalten entstehen.

Wir fassen unsere bisherigen Betrachtungen in folgenden Sätzen zusammen:

Ein Gegensatz zwischen tektonischen tangentialen Bewegungen, welche Falten erzeugen, und radialen Senkungen, welche Bruchlinien entstehen lassen, existiert nicht. Denn auch alle Brüche und Verwerfungen entstehen durch denselben tangentialen Seitendruck wie die Falten.

Die vertikale Verschiebung, die wir an Verwerfungen beobachten, ist in der Regel nur der scheinbare optische Querschnitt durch zwei Schollen, die sich seitlich aneinander bewegt haben.

Die Richtung der Rutschstreifen auf den Kluftwänden gibt uns direkten Aufschluß über die Richtung der stattgehabten Bewegung.

Die Häufigkeit von nahezu horizontal gerieften Harnischen beweist, daß auch viele scheinbar tektonisch nicht bewegte Gebiete durch horizontale Verschiebungen gestört wurden.

Nur wenige Horste sind im Sinne von E. SUESS ständig. Vielmehr sind viele kleinere Horste auf schiefen Ebenen emporgedrückt.

Da während der tektonischen Bewegungen, die sich auf lange Zeiträume verteilen können, die gehobene Streifen meist abgetragen und entlastet, die Gräben und Senkungsfelder aber von neuen Sedimenten bedeckt und belastet werden, und diese Vorgänge vielfach ganz unabhängig voneinander verlaufen, kommt es nachträglich zu lokalen Zerrungen und Dehnungen, die bei glattwandigem Aufreißen Gangspalten bilden; bei unregelmäßiger Zertrümmerung der Gesteinsmassen entstehen Trümmerzonen, die entweder als Reibungsbreccien wieder verkittet oder durch Denudation in Spaltentäler verwandelt werden.