



Der tektonisch einseitige Schub von Eduard Sueß: mechanischer Unsinn oder geologische Wahrheit?

ALI MEHMET CELAL ŞENGÖR *)

12 Abbildungen

*Tektonik
Orogenese
Geschichte
Geologie
Appalachen
Apennin*

Inhalt

Zusammenfassung	391
Abstract	391
Der einseitige tektonische Schub in der Gebirgsbildung und Eduard Sueß	392
Die Idee des tektonisch einseitigen Schubes vor Sueß	392
Frühe Deutungen über das Wesen des Triebes der Gebirgsfaltung	392
Entdeckung der Einseitigkeit der Appalachen und ihre Deutungen: Anfänge	394
Entdeckung der Einseitigkeit der Appalachen und ihre Deutungen: die Gebrüder Rogers	395
Entdeckung der Einseitigkeit der Appalachen und ihre Deutungen: James Dwight Dana	398
Einseitigkeit der Gebirge bei Eduard Sueß	400
Ergebnis: Einseitiger Bau als Ausdruck des Wesens der Gebirgsbildung	407
Danksagung	408
Literaturverzeichnis	408

Zusammenfassung

Eine zentrale Idee in den Vorstellungen von Eduard Sueß über Gebirgsbildung war die des tektonisch einseitigen Schubes. Dabei wurde ihm vorgeworfen, die fundamentalste Idee der Newtonschen Mechanik nicht verstanden zu haben, wonach für jede applizierte Kraft, eine Gegenkraft sofort in Wirkung treten müßte. Eduard Sueß war der erste Geologe, der alle großen Gebirge unserer Erde einer einheitlichen strukturgeologischen Studie unterzog und zeigte, dass sie alle asymmetrisch gebaut sind. Vor ihm hatten die Gebrüder Rogers und Dana zwar bereits dasselbe vermutet, aber diese hatten noch nicht die gesamte vorhandene geologische Information über die Gebirge der Erde bearbeitet. Die überaus genauen Kartierungsarbeiten der Gebrüder Rogers in den Appalachen haben gezeigt, dass um diese Asymmetrie zu erzeugen, irgendeine Entkopplung der sich faltenden Schichten (sei es die Sedimentschichten, sei es die gesamte kontinentale Kruste) von ihrem Untergrund erforderlich sei. Die Theorie der Gebirgsstruktur von Sueß zeigte schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts, dass alle Gebirge im Grunde genommen Abscherungsstrukturen und deshalb einseitig sind. Erst mit dem Aufkommen der Plattentektonik wurde eingesehen, dass die Subduktion den Hauptabscherungshorizont der Gebirgsbildung darstellt und notwendigerweise eine asymmetrische Struktur auf alle Gebirge aufprägt. Die subduzierende ozeanische Lithosphäre (oder die unterschiebende kontinentale Lithosphäre in Kollisionsgebirgen) stellt den Gleithorizont dar und die Stirnregion der aufliegenden Platte fungiert als ein den einseitigen Schub verwirklichender Kolben. Dieser einseitige Schub verliert auf der Gleitfläche allmählich seine Kraft auf Grund des auf der gesamten Fläche verbreiteten Widerstandes entlang des Abscherungshorizonts. Deswegen nimmt die Deformation der abgescherten Decke mit der Entfernung von dem Kolben ab und bildet dabei ein asymmetrisches Gebirge.

Eduard Sueß' one-sided tectonical push: mechanical nonsense or geological truth?

Abstract

A central idea in Eduard Sueß' theory of mountain-building was that of one-sided tectonical push. He was criticised for not having understood the most fundamental idea of Newton's mechanics, according to which every applied force instantly creates a counter-force. Eduard Sueß was the first geologist, who studied all the major mountain ranges of our globe from a structural geological viewpoint and showed that all have an asymmetric structure. Before him the Rogers brothers and Dana had guessed the same, but they had not studied the entire available geological information about the mountains of the earth. The extremely precise mapping of the Rogers brothers in the Appalachians had shown that a decoupling of the folding layer from its basement is necessary to create the asymmetric mountain architecture. Sueß' theory of mountain structure showed already in the beginning of the twentieth century that all mountains are fundamentally décollement structures and that is why they are asymmetric. The rise of plate tectonics eventually showed that subduction is the main décollement and it necessarily imports an asymmetric structure on all orogenic belts. The top of the subducting oceanic lithosphere (or of the underthrusting continental lithosphere in collision zones) represents the main detachment horizon and the prow of the upper plate functions as the piston that creates the one-sided push. This one-sided push gradually loses its force on the detachment, because the resistance to deformation is distributed on the entire detachment surface and that is why the deformation dies away from the piston, thereby creating an asymmetric mountain range.

*) ALI MEHMET CELAL ŞENGÖR, İTÜ Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, Ayazağa TR-34469 Istanbul, sengor@itu.edu.tr

Der einseitige tektonische Schub in der Gebirgsbildung und Eduard Sueß

Eine zentrale Idee in den Vorstellungen von Eduard Sueß (1831–1914) über Gebirgsbildung war die des einseitigen Schubes. Sueß hat diesen Begriff nie weiter erläutert, verwendete ihn aber immer wieder in seinen Beschreibungen der Gebirgsbildungsvorgänge, auch nachdem man ihn für diese angeblich mechanisch unsinnige Idee scharf angegriffen hatte. Es wurde ihm vorgeworfen, die fundamentalste Idee der Newtonschen Mechanik nicht verstanden zu haben, wonach jede Aktion eine Gegenaktion, d. h. eine Reaktion, hervorrufen, und für jede applizierte Kraft, eine Gegenkraft sofort in Wirkung treten müßte¹. Wenn man die Beschreibungen von Sueß sowie die Kritik nur oberflächlich liest, glaubt man der Kritik zustimmen zu müssen und stellt sich die Einengung bei der Gebirgsbildung so vor, als ob zwischen den Backen eines Schraubstockes Material zusammengepresst wird. Die meisten Tektoniker des 20. Jahrhunderts haben genauso verfahren und dadurch ein künstliches, in der Natur kaum existierendes Bild der Gebirgsbildung im Rahmen eines zweiseitigen Orogens gelehrt². Es gibt allerdings scheinbar zweiseitige Orogene wie die Kordillere beider Amerika oder den Kuen-Lun in Zentral Asien³. Doch die meisten Orogene sind einseitig gebaut, genau wie sie Sueß in seinen Schriften ab 1875 darstellte. Wie ist diese Sachlage mit der Newtonschen Mechanik zu vereinbaren und ist die Idee des einseitigen Schubes von Sueß überhaupt zu retten? Der Beantwortung dieser Fragen ist diese Abhandlung gewidmet.

Die Idee des tektonisch einseitigen Schubes vor Sueß

Frühe Deutungen über das Wesen des Triebes der Gebirgsfaltung

Die Idee eines einseitigen Schubes bei der Entstehung der Gebirge wurde von der Asymmetrie der Gebirgsstruktur inspiriert. Der eigentliche Schöpfer der Hochgebirgsgeologie Horace-Bénédict De Saussure (1740–1799) war vielleicht der erste, der die topographische Asymmetrie eines Gebirges, in diesem Fall die der Alpen, als einen wichtigen Charakterzug dieses Gebirges betonte. Er erwähnte 1796 in seinem Überblick über die Alpen zwischen Tirol und dem Mittelmeer (*Coup-d'oeil general sur les Alpes comprises entre le Tyrol & la Mer Méditerranée*) im letzten Band seiner epochemachenden „*Voyages dans les Alpes*“, dass „*im Allgemeinen die Böschungen auf der Südseite steiler und die Täler tiefer sind*“⁴. In diesem klassischen Buch beschrieb De Saussure in vielen Orten aufgerichtete Schich-

1 BITTNER, 1887; LÖWL, 1906; TIETZE, 1917

2 Vgl. KOBER, 1921; Stille, 1924

3 Seit den Veröffentlichungen Kobers wurden viele andere „Orogene“ als zweiseitig dargestellt, wie, z. B. die Kaledoniden in Nordosteuropa und Ostgrönland (schon von Sueß so aufgefasst), die Alpiden auf der Balkanhalbinsel und in Kleinasien usw. Keine von diesen „Orogenen“ sind eigentliche, selbstständige Orogene im Sinne der Plattentektonik, sind aber zusammengesetzte, von mehr als einem Orogen ausgebaute orogene Systeme (vgl. ŞENGÖR, 1990; ŞENGÖR und NATAL'IN, 2007). In vielen orogenen Gebilden besteht tatsächlich eine „Scheinsymmetrie“ wegen der häufig auftretenden bivergenten tektonischen Strukturen auf den beiden Seiten des Orogens, wie, z. B. in den Kordillere beider Amerika, die Faziesverteilung in solchen Fällen verrät aber bald die echte Einseitigkeit des Gebildes.

4 DE SAUSSURE, 1796, S. 465

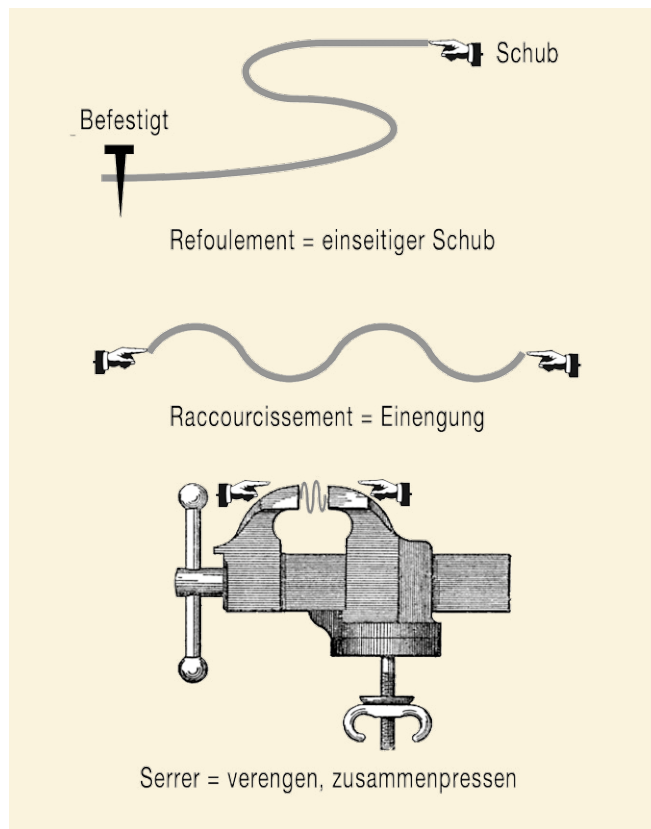


Abb. 1. Schematische Darstellungen der Deformationsgeometrien und ihre Bezeichnung auf Französisch und Deutsch. Oben, bei *refoulement*, ist eine Komponente der Scherung (rotationelle Deformation). In der Mitte und unten (*raccourcissement*, *serrer*) ist allein Verengung ohne externe Rotation.

ten, die ursprünglich horizontal abgelagert worden waren. Er stellte sich vor, dass zuerst die sogenannten primitiven Gesteine (Kristallinmassive der Alpen) im Meer abgelagert worden waren und dann die sekundären sich auf diesen primitiven abgesetzt hatten. Nach der Ablagerung kam die Aufrichtung, wobei die Primitiven bis zum Vertikal aufgerichtet wurden und sich die Sekundären gegen die Primitiven lehnten. Das Einfallen der sekundären Gesteine verringerte sich, je weiter man sich von der vertikalen, primitiven Achse des Gebirges entfernte, bis sie in den Ebenen ihre ursprüngliche Horizontalität wieder erreichten. Die Ursache der Aufrichtung suchte De Saussure zuerst im unterirdischen Feuer oder in irgendeiner anderen „elastischen Flüssigkeit“ innerhalb der Erde, d. h. er dachte zunächst an eine unmittelbare vertikale Erhebung⁵.

Seine späteren Begehungen ließen ihn aber nirgends ein Anzeichen eines solchen Feuers in irgendeinem Mineral oder in einem Gestein entdecken, schrieb er selbst⁶, ohne jedoch zu erwähnen, was er genau als Spur eines solchen Feuers zu sehen erwartete. 1783, während seiner Reise von Altdorf nach Luzern, hatte De Saussure Gelegenheit, die Klippen entlang der Westküste des Urnersees zu beobachten. Ohne Zweifel kannte er die früheren Zeichnungen des Grafen Luigi Ferdinando Marsili (1658–1730) aus dem Jahre 1705⁷, die aber damals noch nicht von Marsili selbst, sondern von seinem Freund Johann Jacob

5 DE SAUSSURE, 1786, §919, S. 338–340

6 DE SAUSSURE, 1796, §1302, S. 107

7 GORTANI, 1930



Abb. 2. Die südliche Hälfte des berühmten Querschnitts von Hutton und seinen Freunden durch die Southern Uplands von Schottland von der englischen Grenze (links) nordwärts. Man beachte die jetzt als Cambrium-Ordovizium datierten, stark gefalteten und aufgerichteten Schichten, mit vielen stehenden Isoklinalfalten. (aus CRAIG et al., 1978, Abb. 39)

Scheuchzer (1672–1733) publiziert worden waren⁸. Die dort gesehenen liegenden Falten veranlassten De Saussure, seine frühere Meinung über den Mechanismus der Aufrichtung von Schichten zu revidieren. Er folgerte:

„Die Natur dieser Gebirge, die aus einem festen Kalkstein bestehen, und daher durch Absatz und nicht durch Kristallisation entstanden sind, erlaubt uns nicht zu glauben, dass diese gebogene Form ihre primitive und ursprüngliche Form (forme primitive & originaire) sei. Noch dazu, der Hohraum, der auf der konvexen Seite aller Schichten von diesem Typ, die ich beobachtet habe, existiert, scheint zu beweisen, dass sie beim Umschlagen diesen Hohraum schufen, den sie in ihrer primitiven und horizontalen Lage erfüllt hatten. Nun kann eine Verstellung von dieser Art nur durch zwei Mitteln erzeugt werden: entweder durch eine von unten nach oben wirkende Kraft, die die linke Seite des Gebirges auf die rechte Seite geworfen hat, oder durch einen Schub (refoulement),

der eine auf die andere gefaltet hat. Nun erscheint mir die Hypothese des Schubes viel wahrscheinlicher als die einer Explosion, um dieses Phänomen zu erklären, insofern als wir bereits in anderen Orten andere Zeichen des Schubes gesehen haben und sie noch sehen werden.“⁹

Ich möchte hier ein wenig bei der Wortwahl dieses bedeutenden Genfer Naturalisten verweilen: Um die in liegender Faltenform zum Ausdruck gekommene Bewegung zu beschreiben, verwendete er das französische Wort „refoulement“, was mit Zurückdrängen, Abweisung oder Förderung ins Deutsche übertragen werden kann, und nicht etwa „raccourcissement“, was einfach Verkürzung, Kürzerwerden bedeutet, oder „serrer“, was unter vielen anderen Bedeutungen auch mit „verengen“ übersetzt wird. Es ist interessant, dass De Saussure ein französisches Wort auswählte, das eine einseitige Bewegung ausdrückt, und nicht etwa „verengen“, ein Wort der Einengung oder des Zusammenpressens (Abb. 1). Seine Wahl ist für diejeni-



Abb. 3. Die stehenden Falten der Southern Uplands entlang der Küste von Berwickshire gezeichnet von Sir James HALL im Jahre 1811 (aus Hall, 1815, Tafel I).

8 VACCARI, 2003

9 DE SAUSSURE, 1796, §1937, S. 114–115; Übersetzung aus dem Französischen durch den Verfasser

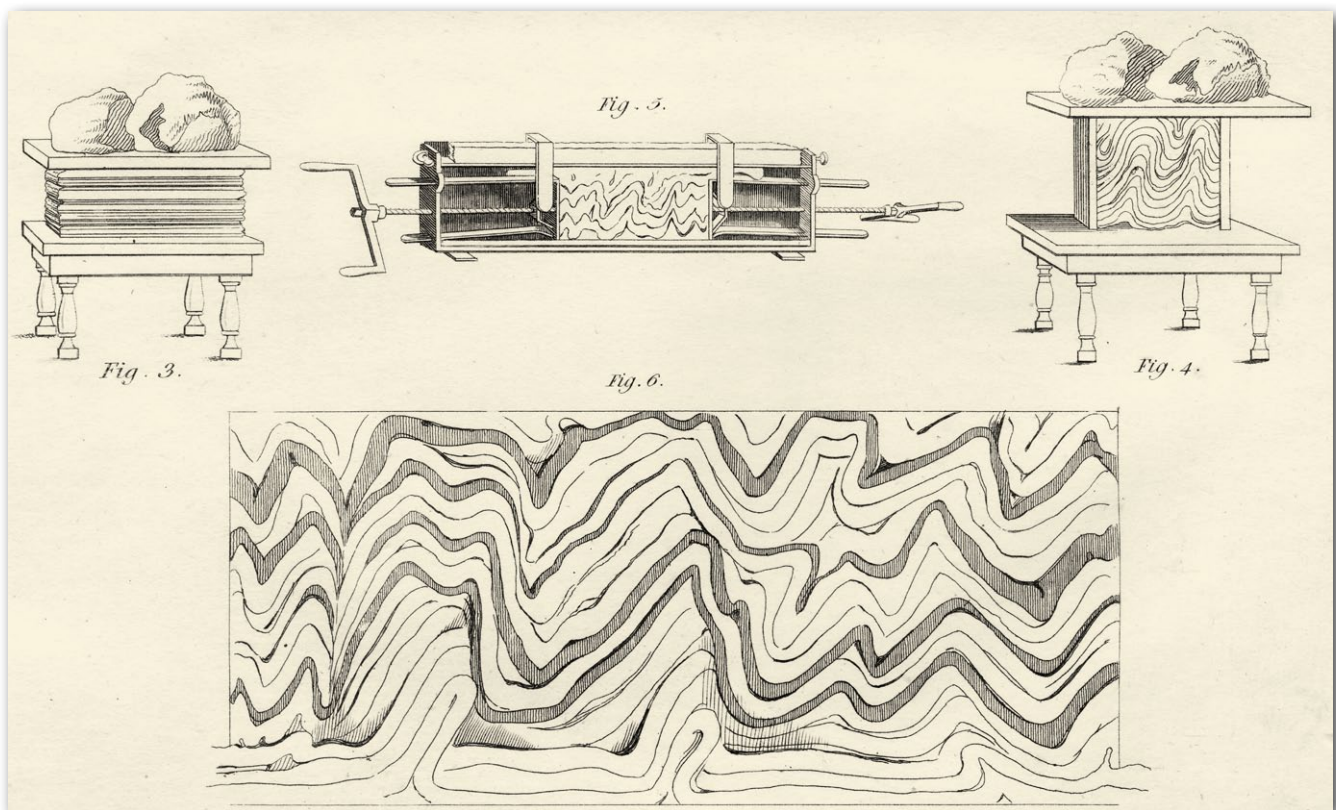


Abb. 4.
Die Experimentalausrüstung von Sir James Hall und ein Ergebnis seiner Versuche (aus Hall, 1815, Tafel IV). Vgl. mit den in Abb. 3 abgebildeten natürlichen Falten.

gen leicht zu verstehen, die die äußeren (d. h. „externidischen“) Teile der Alpen aus eigener Anschauung kennen. Von Frankreich bis nach Vorarlberg sieht man in den ersten Hochketten (die hauptsächlich aus den Helvetischen Decken bestehen) oft nach Norden überschlagene Falten, wie z. B. die berühmten Morcles Falten im Dent de Morcles, die Falten in den Achsen, die Drusberg Decken entlang der Urnerseeküsten, die wunderschöne Churfürsten Falte am Ostende des Walensees oder die bildschönen Falten des Säntis. Um diese Strukturen als Falten zu erfassen, braucht man kein Geologe zu sein und auch De Saussure hat sie bereits als Falten gedeutet und ihren Mechanismus der Entstehung zu erfassen versucht. Es war ihm bald klar, dass dies ohne irgendeine Form der Scherung nicht möglich war – daher der einseitige Schub, „le refoulement“.

Nur vier Jahre nach dem Urnersee-Besuch De Saussures besuchten James Hutton (1726–1797) und seine Freunde die Southern Uplands entlang der Schottisch-Englischen Grenze und nahmen dabei ein ungefähr 60 km langes Profil zwischen der englischen Grenze und den Lammermuir Hügeln (Abb. 2) auf. In diesem, wegen seiner Genauigkeit von den modernen Kennern der schottischen Geologie gepriesenen¹⁰ Profil sehen wir sehr deutlich, gezeichnete Isoklinalfalten, die aber, in scharfem Gegensatz zu den Helvetischen liegenden Falten, stehende Falten sind. Hutton und seine Gefährten müssen ihrem jüngeren Freund Sir James Hall of Dunglass (1761–1832) diesen Querschnitt gezeigt und ihre Ideen dazu mitgeteilt haben. Jahre später, 1811, hat Sir James selbst die Gesteine derselben Zone entlang der Berwickshire Küste studiert und ihre Strukturen gezeichnet (Abb. 3). Es waren diese Gelän-

debeobachtungen, die zu seinen berühmten Experimenten über den Mechanismus der Faltung Anlass gaben und bei diesen Experimenten benützte Sir James einen zweiseitigen Schraubstock, um das zwischen den Backen gelegene Material falten zu lassen. Diese zweiseitige Bewegung zwischen hochstehenden Backen erzeugte symmetrische, stehende Falten (Abb. 4) ähnlich denjenigen, die Sir James in Berwickshire gesehen hatte. Die 1815 gedruckte Arbeit von Sir James¹¹ hat damit nachhaltig die Ideen über das Wesen des Faltentriebes als einfache einengende Bewegung geprägt.

Schon zu Beginn der Studien über Falten entwickelte man also zwei Deutungen über das Wesen des faltenden Triebes: die alpinen Beobachtungen führten zu der Idee des refoulements, d. h. des einseitigen Schubes; die kaledonischen Studien dagegen gaben Anlass zu der Deutung des zweiseitigen Schubes. Die weiteren Schicksale dieser beiden Ideen hingen von den weiteren Beobachtungen in anderen Gebirgen und von den theoretischen Ideen über das Erdverhalten ab.

Entdeckung der Einseitigkeit der Appalachen und ihre Deutungen: Anfänge

Wenige der großen Gebirgsgürtel unserer Erde, die sich inmitten des zivilisiertesten Teiles der Erde befinden, sind so auffallend einseitig gebaut wie die Appalachen im südöstlichen Nordamerika. Schon die frühesten Erforscher der Geologie dieses Gebirges stellten diese Tatsache fest. Bereits 1820 beschrieb Amos Eaton (1776–1842), einer der Gründungsväter der US-amerikanischen Geologie, in

10 CRAIG et al., 1978, S. 58

11 HALL, 1815

seinem einflussreichen „Index“ nicht nur Falten, sondern auch nach Westen geneigte Falten in Connecticut zwischen Danbury, Stockbridge und Alford und schrieb ihren Ursprung einer horizontalgerichteten und auf die Ostenden der Schichten applizierten Kraft zu¹². Diese Äußerung von Eaton ist, meiner Meinung nach, die allererste Erwähnung einer „einseitigen Kraft“ (als verschieden von „Schub“) bei der Gebirgsbildung. Die spätere Entwicklung der Kenntnisse der Appalachen hat diese Idee immer wieder verstärkt, bis ihr die musterhaften geologischen Kartierungsarbeiten der Gebrüder Rogers in den südlichen Appalachen wenigstens in den Vereinigten Staaten allgemeine Anerkennung verschafften.

In den 1830er Jahren begann in den Vereinigten Staaten von Amerika die Etablierung von Einrichtungen für geologische Forschung, die von den einzelnen Bundesstaaten finanziert wurden (die sog. „Geological Surveys“). Mit Ausnahme des einzigen und kurzlebigen Versuchs im Jahre 1824 in Nordkarolina, wurde bis 1830 nichts Derartiges in den Vereinigten Staaten unternommen. 1830 begann mit Edward Hitchcock (1793–1864) die staatliche geologische Erkundung von Massachusetts. Weiters folgten geologische Erkundungen 1831 von Maryland und Tennessee, 1835 von Connecticut, New Jersey und Virginia, 1836 von Maine, New York, Ohio, Pennsylvanien und Georgien, 1837 von Delaware, Indiana und Michigan, 1838 von Kentucky, 1839 von New Hampshire und Rhode Island, 1842 von Südkarolina, 1844 von Vermont und 1852 von Nordkarolina¹³. Die Bundesregierung in Washington D. C. sandte 1834 George William Featherstonhaugh (1780–1866) nach Westen, um eine geologische Aufnahme des damaligen Territoriums Arkansas zu unternehmen¹⁴ sowie 1839 den Geologen und Künstler David Dale Owen (1807–1860), um dasselbe für das Territorium Iowa zu tun¹⁵. Die kanadische geologische Anstalt („Canadian Geological Survey“) wurde 1841 von Sir William Edmond Logan (1798–1875) gegründet. Die Früchte dieser und anderer Studien im Gebiete der Appalachen trugen wesentlich zum Verständnis der gebirgsbildenden Vorgänge von Sueß bei, ganz besonders diejenigen in Virginia, Pennsylvanien, New Jersey und New York, insbesondere wegen der genialen, im Jahre 1843 publizierten Arbeit der Gebrüder Rogers¹⁶. Alle späteren Entwicklungen über das Wesen der Gebirgsbildung im 19. Jahrhundert lehnten sich mehr oder minder an dieses monumentale Werk und an die Deutung des Wesens des Faltentriebs von Sir James Hall an.

Entdeckung der Einseitigkeit der Appalachen und ihre Deutungen: die Gebrüder Rogers

Im Jahre 1836 sehen wir von den Gebrüdern Rogers William Barton (1804–1882) als Staatsgeologe in Virginia und Henry Darwin (1808–1866) als Staatsgeologe in Pennsylvanien. Im selben Jahr wurde die geologische Aufnahme des kleinen, Pennsylvanien im Osten begrenzenden Küstenstaates, New Jersey ebenso Henry Darwin anvertraut¹⁷. Somit mussten die beiden Brüder zwei breite Strei-

fen quer durch das Appalachengebirge, von der Küstenebene im Osten bis zum Vorland mit seiner flachliegenden sedimentären Bedeckung im Westen, geologisch kartieren. Dabei waren sie von der Regelmäßigkeit und der Kontinuität der geologischen Strukturen entlang des Gebirges und ganz besonders von Falten und Überschiebungen beeindruckt. Das Gebirge ließ sich längs, aber auch quer zum Streichen in durch ihre gemeinsamen Charaktere ausgezeichnete Zonen gliedern. Bestimmte Charaktere waren jedoch allen diesen Zonen gemein und diese Charaktere machten das gesamte Gebirge zu einer einheitlichen Struktur.

In den gesamten Appalachen ist die Schichtenneigung (d.h. das Einfallen der Schichten) überwiegend südöstlich. Dies gilt nicht nur für die nordwestlicheren sedimentären Teile, sondern auch für die südöstlicheren „hypogäen“ (d.h. metamorphen). In den südöstlicheren Zonen ist Schichteninversion durch Entstehung von geneigten Falten häufig.

Jede Flexur (unter „Flexur“ verstanden die Gebrüder eigentlich solche Strukturen, die wir heute Falten nennen), die keine Inversion der Schichten herbeiführt, nannten sie eine normale Flexur. Die Neigung der Schichten in solchen Flexuren wurde normales Einfallen („normal dip“) genannt. Strukturen, die durch gleiches Einfallen gekennzeichnet sind, wurden monoklinal genannt und solche Termini wie monoklinales Gebirge oder monoklinales Tal wurden für einzelne morphotektonische Elemente verwendet. Als allgemeine Termini für (nach oben) konvexe und konkave Flexuren wurden Bogen („arch“) und Mulde („trough“) eingeführt.

„Wenn wir uns eine Ebene durch den Scheitel oder durch die größte Krümmung der konzentrischen Flexur in einer Antiklinale oder Synklinale vorstellen, die damit eine mittlere Position zwischen den zwei Teilen der Kurve einnimmt, nennen wir diese Ebene die Axialebene („axis-plane“)¹⁸.

Wenn eine Flexur eine perfekte Symmetrie besitzt, d.h. wenn das Einfallen der Schichten auf den beiden Seiten denselben Betrag (aber gegensätzliche Einfallrichtungen) hat, sei die Axialebene vertikal. „In der Appalachenregion und, wie wir glauben, in beinahe allen anderen gestörten Ketten, wo das Phänomen der Flexuren [sic meinen Faltung] in einem weiten Maßstab („on a scale of much extent“) vorkommt, sind die Axialebenen dem Senkrechten mehr oder minder geneigt, je nach der Energie der wirkenden Kraft“¹⁹. Meiner Kenntnis nach, ist dieser Satz der erste, der die Einseitigkeit aller Gebirge behauptet, eine Idee, der Sueß später folgen und sie beweisen sollte und was die moderne Tektonik als richtig ansieht.

Nachdem die Gebrüder dieser Ansicht Ausdruck verliehen hatten, sagten sie, dass

„in der Region vor uns das Einfallen der imaginären [axial-]Ebene [der Falten] fast immer gegen Südosten ist; wenn wir die Kette nach Nordwesten überqueren, nimmt der Unterschied von dem Senkrechten progressiv ab. Eine entsprechende Regel der Axialebenen wird, wir sind davon überzeugt, in allen Gruppen mit vielen Achsen gefunden werden. Der allgemeine Ausdruck

12 EATON, 1820, S. 160; siehe auch Merrill, 1924, S. 78

13 MERRILL, 1920; für einige Korrekturen, vgl. MERRILL, 1924

14 BERKELEY und BERKELEY, 1988

15 HITCHCOCK, 1841, S. 8

16 ROGERS und ROGERS, 1843

17 MERRILL, 1920

18 ROGERS und ROGERS, 1843, S. 485; im Nachdruck von 1884, S. 609; Übersetzung aus dem Amerikanischen durch den Verfasser

19 Ebd., S. 485–486; im Nachdruck, S. 609; Übersetzung aus dem Amerikanischen durch den Verfasser

dieser Regel ist, dass sich die Axialebenen immer gegen die Region der maximalen Störung neigen“²⁰.

Die Gebrüder Rogers haben gesehen, dass, wenn man in den Appalachen nach Nordwesten geht, die „Flexuren“ (gemeint sind Falten) flacher werden, bis sie sich ganz in den flachliegenden Regionen verlieren. Die Faltung nimmt also allmählich nach Nordwesten ab und gibt dabei dem Gebirge auch von dem Gesichtspunkt der Deformationsintensität eine einseitige Struktur. In manchen überkippten Falten, entwickelten sich Verwerfungen entlang der axialen Ebene, die eine erstaunliche Streichlänge von hundert Meilen (≈ 160 km) haben können. In solchen Fällen sollten die höchsten Glieder der Appalachenstratigraphie mit den niedrigsten in Berührung kommen und entlang einer großen Störung auf der Westseite des Appalachentales („Appalachian Valley“) wurden mehrere Glieder der Stratigraphie von der Störung entweder zum Teil oder als ganzes verschluckt („swallowed“²¹)²². Solche Verwerfungen waren nicht selten und der verschluckte Teil, so glaubten die beiden Brüder, hatte ein gewisses Hindernis für eine weitere Faltung des unterschobenen Teils geformt und deswegen sah man vor solchen Verwerfungen weite Areale ohne Falten. Wo aber die Verwerfung im Streichen verschwand, zeigten sich vor (d. h. „nordwestlich von“) seiner seitlichen Projektion wieder Falten.

Die Falten verlängerten sich seitwärts mit der Zeit²³ und wenn sich zwei Falten gegeneinander verlängerten, konnten sie einander hindern aber auch helfen. So kam es zu Interferenzerscheinungen. Solche Beziehungen sollte man laut den Brüdern Rogers am besten dort sehen können, wo sich nach Nordwesten konvex gekrümmte Gebirgssegmente mit den auf den beiden Seiten liegenden linearen Segmenten begegneten. Die nordwest-konvexen Gebirgssegmente entstanden dadurch, dass zuerst die Falten der benachbarten linearen Segmente zustande gekommen waren und einander in dem künftigen konvexen Segment in stumpfen Winkeln annähernten aber nicht berührten. Mit der Zeit entwickelten sich andere Falten im zwischenliegenden Raum. Ihre Entwicklung ist aber seitwärts durch die bereits formierten Falten der benachbarten linearen Segmente gehemmt und nur ihre zentralen Teile marschierten weiter gegen Nordwest, wobei ihre Achsen gebogen wurden.

Die nach Nordwesten konkaven Segmente der Appalachen zeigten eine minder regelmäßige Verteilung der Achsen. Diese Sachlage sollte in folgender Manier zustande kommen: Wenn zwei Gebiete Falten bilden, verlängern sich diese Falten seitwärts und treffen einander in der Mitte des dazwischenliegenden Segments, wo sie miteinander interferieren und einander hemmen. Dadurch bleibt hier Faltenbildung zurück, weil die sich weiter entwickelnden Falten der benachbarten Gebiete weiter nordwestwärts marschieren.

In anderen Gebieten sah man

„eine merkwürdige Einrichtung in échellon“ [sic!] ²⁴
„welche wir in vielen Gruppen von Achsen des Delaware-

Flusses oder im New Jersey-Segment beobachten, wo, obwohl im Einzelnen geradlinig, sie ihr Streichen mehr und mehr ändern, wenn wir nach Nordosten fortschreiten. Dies hat eine einfache Erklärung, wenn wir nur annehmen, dass ein Teil der Falten im nächsten linearen Segment im Südwesten zuerst produziert und von denen im Nordosten, in New Jersey und in den unmittelbar benachbarten Gebieten von New York gefolgt wurde, wobei die Undulationen, wie üblich, im Südosten begonnen hätten. Diejenigen im Nordosten, die zuletzt entstanden und mit den früheren konvergieren, und als Falten nach Nordwesten marschieren, erfahren in ihren südwestlichen „Extremitäten“ eine Hemmung, wenn sie mit den östlichen Enden der älteren Falten interferieren, während ihre fernen, oder nordöstlichen „Extremitäten“ mit der vollen Geschwindigkeit weiter marschieren. Die natürliche Neigung eines solchen Widerstandes wäre die Brechung der zurückgehaltenen Welle und die Erzeugung eines nördlicheren Streichens der nordöstlicheren Teile. Die ganze Bewegung ist mit einer nach rechts abgestuften Angriffskolonie vergleichbar, wobei die fortgeschrittenen Reihen nach links umbiegen.“

Ich habe die von den Gebrüdern Rogers in einer exemplarischen Deutlichkeit beschriebenen geometrischen Eigenschaften der Falten und Faltengruppen der Appalachen in einigem Detail zitiert, um zu zeigen, wie klar man sich daraus die gesamte Bewegung der gefalteten Gesteinsmasse in den Appalachen vorstellen kann. In diesen Beschreibungen sind solche großräumigen Strukturen wie Scharungen und Virgationen, die von Sueß zum ersten Mal formell benannt und in der kinematischen Interpretation von Gebirgen benützt wurden, zu erkennen.

Fast jeder spätere Geschichtsschreiber der Tektonik fand die Deutung der Gebrüder Rogers und der von ihnen so exemplarisch beschriebenen Strukturen sehr unglücklich und betonte, dies hätte die Glaubwürdigkeit ihrer Arbeit sehr vermindert. Der US-amerikanische Strukturgeologe an der Yale-Universität John Rodgers (1914–2004), einer der besten Kenner der Appalachen und der Geschichte ihrer Erforschung, fand die Theorie der Gebrüder Rogers sogar bizarr²⁵.

Das Problem der beiden Brüder bestand darin, nicht nur eine Erklärung für die Ursache der Wellenform der Schichten, sondern auch für ihr Ausklingen nach Nordwesten hin zu finden, wo die Falten breiter und niedriger werden²⁶. Die Theorie des Knickens war seit den grundlegenden Veröffentlichungen von Leonhard Euler (1707–1783) und Joseph-Louis Lagrange (1736–1813) gut bekannt und deshalb konnte man die Wellenlänge der Bögen eines gegebenen schlanken Stabes unter einer gegebenen axialen Belastung ohne große Mühe berechnen²⁷. Ich bin einigermaßen erstaunt, dass die Gebrüder Rogers diese mögliche Deutung nicht einmal erwähnten. Es könnte durchaus sein, dass ihnen die mechanische Knickungstheorie nicht bekannt war. Die beiden versuchten vielmehr das Deformationsmuster des Faltenwurfes der Appalachen als eigentliche Wellen zu interpretieren. Darum glaubten sie, unter dem Faltenwurf eine flüssige Schicht annehmen zu müssen, die die Wellen bildete und weiter verbreiten konnte.

25 RODGERS, 1949, S. 1647

26 Leider benützten die Gebrüder Rogers das Wort „Amplitude“ für Wellenlänge, was die Verwirrung bei einer sehr oberflächlichen Lektüre noch weiter erhöht haben dürfte.

27 TIMOSHENKO, 1953, S. 37–39

20 Ebd.; Übersetzung aus dem Amerikanischen durch den Verfasser

21 Ich glaube, dass diese Stelle die allererste Erwähnung der Idee der „Verschluckung“ ist, die fast ein dreiviertel Jahrhundert später von AMPFERER und HAMMER (1911) in den Ostalpen auf einem viel größeren Maßstab und unabhängig von den Gebrüdern Rogers wiedereingeführt wurde.

22 ROGERS und ROGERS, 1843, S. 496; im Nachdruck, S. 616

23 „Fortbau“ im Sinne von STILLE, 1924, S. 273–275

24 ROGERS und ROGERS, 1843, S. 516; im Nachdruck, S. 631; Übersetzung aus dem Amerikanischen durch den Verfasser

te. Diese Schicht, meinten sie, könne nur eine Magmaschicht sein, was einen doppelten Vorteil bot: Sie konnte Wellenformen annehmen und, wenn sie erstarrt war, diese bewahren.

Was konnte die Wellen selbst erzeugen? Die Gebrüder Rogers wurden durch ihre Wahl des wellenformenden Mediums gezwungen, einen sehr raschen, d. h. einen katastrophalen Vorgang finden zu müssen, um die Wellen zu erzeugen. Die Stratigraphie des gefalteten Faltenwurfes hat sie ebenfalls zu diesem Schluss geführt: nach ihnen war der gesamte appalachische Schichtenstapel nach der Karbon-Zeit auf einmal gefaltet worden. Sie glaubten gezeigt zu haben, dass die appalachische Schichtenserie von den untersten Klastiken bis zu den obersten Kohlen-schichten²⁸ eine enorm mächtige, in sich mehr oder weniger konkordante Serie ausmachte. Innerhalb dieser Serie zeigte zwar die Existenz lokaler Diskordanzen das Vorhandensein lokaler und schwacher Bewegungen. Auch einige Konglomerathorizonte könnten im selben Sinne gedeutet werden. Aber im Allgemeinen war die Serie komplett und in sich konkordant. Erstaunt beobachteten sie, dass der darüber mit schärfster Diskordanz ruhende „Neue Rote Liegende“²⁹ nirgends von den faltenden Bewegungen im Geringsten betroffen war. Daraus folgerten sie, dass die große appalachische Faltung in einem sehr kurzen Intervall, nämlich zwischen der Zeit der obersten Kohlen-schichten und der Zeit der untersten roten Sandsteine und Konglomerate stattgefunden haben musste³⁰.

Was konnte so etwas hervorbringen? Es müsste eine rasche Eruption der unterirdischen Gase entlang einer langen Spalte gewesen sein, die im Südosten die Kruste hob und eine große Woge erzeugt hätte. Die Öffnung der Spalte würde eine rasche Druckverminderung verursachen und eine gewaltige Explosion hervorrufen. Durch diese Explosion würden nicht nur in der unter dem Schichtenstapel ruhenden Magmamatraxe Wellen erzeugt, sondern sie würden erst weiter von der Explosionslinie entfernt allmählich verklingen. Die Explosion(en) würde(n) gleichzeitig den gesamten Faltenwurf en masse vorwärts treiben und in dieser horizontalen Bewegung en masse sahen die Gebrüder Rogers die Ursache der Überkipfung der Falten und die Achsenebenen entfernt von der Explosionslinie. Diese Deutung vereinbart in einer seltsamen Weise die beiden Interpretationen De Saussures zum Faltentrieb: Explosion und Vertikalbewegung und ein dadurch verursachter refolement.

Dieser Mechanismus für die Schaffung der Faltenwellen der Appalachen ist seitdem, wie ich oben bereits erwähnt habe, mit einigem Spott kritisiert worden. Ich bin der Meinung, dass diese verhöhnende Kritik einen sehr wesentlichen Punkt im Denkprozess der Gebrüder Rogers immer wieder übersehen hat. Sie haben in den appalachischen Falten nicht nur eine Wellenform vorgefunden, sondern eine nach Nordwesten verklingende Wellenform. Sie glaubten auch nicht, dass ein einfach horizontaler Schub

vom Südosten her dieses schöne Wellenbild erzeugen konnte, weil die Gesteine nicht widerstandsfähig genug gewesen wären, die Spannungen so weit zu übermitteln. Jahre später gaben ihnen die Experimente von Friedrich Pfaff (1825–1886), die die Entstehung der Falten unter seitlichem Druck erklärten, und jene von Bailey Willis (1857–1949), wo es spezifisch um die Entstehung der appalachischen Falten ging, recht. Pfaff³¹ konnte überhaupt nur eine Falte direkt vor dem sich bewegenden Kolben zustande bringen und folgerte, dass

„der Druck [...] sich in den plastischen Massen nur auf geringe Entfernung fort [pflanzt].
Sie folgen nicht den hydrostatischen Gesetzen“³².

Wenn Pfaff anstatt nur einen, zwei sich symmetrisch gegeneinander bewegende Kolben benutzte (wie seinerzeit Sir James Hall), bildeten sich zwei Falten wieder nur direkt vor den beiden Kolben. Auch Willis (1893) konnte die Falten weit entfernt von dem beweglichen Kolben nur dann erzeugen, nachdem er sie erst unter großem, von gegossenem Blei erzeugten Druck gebracht hatte (vergleichbar mit dem oberen Deckel auf dem Schraubstock in den Experimenten von Sir James: siehe Abb. 4). Sonst entstanden die Falten nur direkt vor dem Kolben und konnten sich nicht weiter verbreiten³³. Das Prinzip der Schmierung der Sockeloberfläche und die dadurch erleichterte Abscherung des Faltenwurfes waren damals noch nicht bekannt. Erst Pfaff³⁴ sah sehr klar die Notwendigkeit einer „völligen Isolierung“ der sich faltenden Schichten von ihrer Unterlage, um die in den Helvetischen Decken der Schweiz damals bekannten Faltenformen bilden zu können. Er hielt dies aber für unmöglich und konnte die Jahre später entwickelte Abscherungstektonik damals noch nicht gründen. Was die Gebrüder Rogers suchten, war eben eine Art von Grenzschichtschmierung, um die darüber liegenden Schichten leicht falten zu lassen. Da sie die Abscherung entlang einer dünnen Grenzschicht mit weniger Widerstandsfähigkeit gegenüber der Scherung nicht erkannt hatten, dachten sie anstatt dessen an ein flüssiges Liegendes der gefalteten Schichten, sowohl um die verklingende Wellenform des Schichtenstapels zu erzeugen, als auch um das Problem der Spannungsübermittlung zu vermeiden. Mit anderen Worten versuchten sie eine mechanisch akzeptable Erklärung für die von Amos Eaton zum ersten Mal 1820 erwähnte „Einseitige Kraft“ zu finden. In einem haben sie aber doch recht behalten: Die Lösung des Problems der einseitigen Kraft lag in der Abschaffung der Analogie eines Schraubstockes, zwischen dessen Backen ein widerstandloses Material gefaltet wird – wie es zum ersten Mal von Sir James Hall (1761–1832) experimentell dargestellt worden war³⁵ (siehe Abb. 4) und zwei Dezennien später Élie De Beaumont vorschweben würde³⁶ – und ihr Ersatz durch ein Modell, in welchem die Spannung von einem wider-

28 Jetzt wissen wir, dass die jüngsten, von der Orogenese betroffenen Schichten in den Appalachen ein unterpermisches Alter haben. RODGERS, 1970, S. 218

29 Jetzt als Keuper (Obertrias) eingestuft. Vgl. RODGERS, 1970, S. 218

30 Zwischen dem Unterperm und der Obertrias war ein Zeitintervall von ±65 Millionen Jahren, also eine Zeitspanne gleich der gesamten Dauer des Känozoikums, was natürlich den Gebrüdern Rogers nicht bekannt sein konnte.

31 PFAFF, 1880, S. 22–25

32 Ebd., S. 24, Sperrung von Pfaff

33 Die modernen rechnerischen Modellierungen der Juradeformation haben auch immer wieder zum selben Schluss geführt (z. B. MÜLLER und HSÜ, 1980; MÜLLER und BRIEGEL, 1980).

34 PFAFF, 1880, S. 139

35 HALL, 1815

36 „[...] comme les deux mâchoirs d'un étaiu ...“ (ÉLIE DE BEAUMONT, 1852, S. 1317).

Fig. 623.

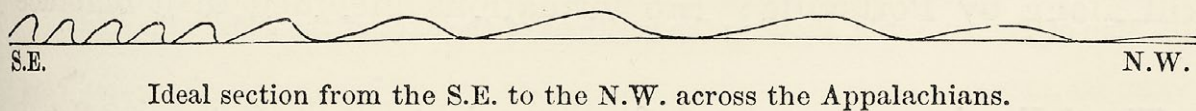


Abb. 5. Danas Vorstellung der idealisierten Struktur der Appalachen wie sie durch die präzisen Kartierungsarbeiten der Gebrüder Rogers erschlossen wurde (aus DANA, 1863, S. 405, Fig. 623).

standsfähigen Material von der Druckquelle weg allmählich durch abnehmende Umformung ausgeglichen wird³⁷.

Dies ist das Wesen des Begriffes einer gefalteten Abscherungsdecke, wie er mehr als ein halbes Jahrhundert später von dem Basler Geologen August Buxtorf (1877–1969) für die Jurafaltung entwickelt wurde³⁸, wobei die sich faltende Decke nicht ganz von ihrer Unterlage isoliert, aber ihre Bewegung doch durch irgendeine Grenzschichtschmierung erleichtert wird. Die späteren Kritiker der Gebrüder Rogers scheinen deren Probleme nicht richtig erfasst zu haben. Im Lichte der Formulierung dieser Probleme, wie es hier dargestellt wurde, und ihrer vorgeschlagenen Lösung, erscheint ihr gewählter Mechanismus nicht annähernd so bizarr wie es John Rodgers, zum Beispiel, darstellte. Dieses Missverständnis bezüglich der Gedankengänge der Gebrüder Rogers sowie die späteren Veröffentlichungen von Élie De Beaumont und Dana über die für die Gebirge unzutreffende Schraubstock-Analogie haben ihren Einfluss bis in die zweite Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts mithilfe des Geosynklinalbegriffs geltend gemacht und verhinderten, dass Geologen das gesamte Bild der Gebirgsbildung von Eduard Sueß verstanden.

Wir wissen nicht, ob Sueß diese beachtenswerte Arbeit der Gebrüder Rogers je gelesen hat. Jedenfalls zitiert er sie in keiner seiner Schriften. Es gibt aber in der Bibliothek des Naturhistorischen Museums in Wien ein Exemplar der „Reports of the First, Second and Third Meetings of the Association of American Geologists and Naturalists, at Philadelphia in 1840 and 1841, and at Boston in 1842, embracing its Proceedings and Transactions“, in welchem die Arbeit der Gebrüder Rogers veröffentlicht wurde, und wir wissen, nach dem „Katalog der Bibliothek des k. k. Hof-Mineralien-Cabinetes in Wien“³⁹, dass dieses Buch schon vor der Ernennung Sueß' zum Assistenten im Museum (damals Cabinet) vorhanden war. Ich kann mir angesichts Sueß' Beschäftigung mit der Bibliothek des Hof-Mineralien-Cabinetes⁴⁰, seiner Wissbegier und seines Interesses für die Geologie der Appalachen schon als Paläontologe kaum vorstellen, dass er die Publikation nicht gelesen hätte. In der „Entstehung der Alpen“ zitierte er eine spätere, überarbeitete und besser illustrierte Version⁴¹, die Henry Darwin Rogers in sein klassisches Buch „The Geology of Pennsylvania“ aufgenommen hatte⁴². Alle Hauptargumente der älteren Arbeit wurden in der neueren wiederholt und mit einer wunderschönen farbigen geologischen Kar-

te des Staates Pennsylvanien sowie einer separaten Karte des Anthrazit-Beckens desselben Bundesstaates illustriert. Niemand, der das Buch von Henry Darwin Rogers gelesen hat, kann die Wichtigkeit, ja die Überwiegenheit der einseitigen horizontalen Bewegungen der Gesteinsmassen in der Gebirgsbildung bezweifeln und ich kann mir nicht vorstellen, dass Sueß von dieser Prachtarbeit und von den darin beschriebenen Ideen nicht ebenfalls beeindruckt gewesen wäre.

Entdeckung der Einseitigkeit der Appalachen und ihre Deutungen: James Dwight Dana

Um die interne Struktur der Gebirge zu beschreiben, griff James Dwight Dana (1813–1895), vielleicht der berühmteste amerikanische Geologe des 19. Jahrhunderts, der einen mächtigen Einfluss auf das Denken von Sueß ausübte, die Darlegungen von den Gebrüdern Rogers auf. Abb. 5 zeigt seine Zusammenfassung der appalachischen Struktur nach den beiden Rogers. Abb. 6 stellt seine Veranschaulichung der Interpretation dieser Strukturen allein als Folge eines seitlichen Druckes dar. Dana stellte sich vor, dass zuerst die erste Falte, Bng, erzeugt werde. Wenn diese Falte unter andauernder Einengung zu der Konfiguration CoG wuchs, würde ihre gravitative Einwirkung die nächste Falte, huw bilden. Diese Einführung einer Schwerekomponente, d. h. den Einfluss der Topographie bei der Spannungsübermittlung, ist meines Wissens Dana eigen⁴³ und stellt eine höchst wichtige Idee dar. Sueß wird diese Idee in einer sehr kreativen Weise erst 1898 für die Erklärung der Entstehung der Großformen der Gebirge und dann wieder 1904 für die Erklärung der Bewegung der Decken und der engen Vergesellschaftung der Decken und Grünsteine verwenden, was ab 1910 zu den mobilistischen Ideen Frank Bursley Taylors⁴⁴ und ab 1922 Émile Argands Anlass gab⁴⁵. Warum würde aber die Falte überkippen? Dana sagte einfach, dass sich die Form CoG zu Dpg entwickelt, angeblich genau wie bei der Entstehung der Form CoG. Er wiederholte also nur die Ansicht der Gebrüder Rogers, dass für die Erzeugung einer überkippten Falte eine horizontale und eine vertikale Komponente der einengen-

37 siehe z. B. JOHNSON, 1970, Abb. 3.4

38 BUXTORF, 1907, S. 103–114; 1916

39 PARTSCH, 1851, S. 169, Nr. 2674

40 SUESS, 1916, S. 146

41 ROGERS, 1859c, S. 884–916, Sueß zitiert mit 1858 ein falsches Publikationsdatum.

42 H. D. ROGERS, 1859a, b, c, d

43 MASSON (1976, S. 531) will in den Ausführungen des GRAFEN DE RAZOUMOWSKY (1784, S. 4–5) eine frühe Form der „tectonique de gravité“ erblicken. Wenn man den Gegenstand so breit und unbestimmt formuliert, hat er wohl recht. Aber wenn man weiter fragt „was für eine tectonique de gravité?“, wird die Antwort fast unmöglich, weil der Graf von einengenden und pilzfaltenschaffenden Bewegungen spricht, die von Schwereunterschieden innerhalb der Voralpen entlang des Rhönetales hervorgerufen werden sollten. Wenn überhaupt etwas aus seinen Worten vermutet werden kann, würde ich mir lieber eine gravitative Vertikaltektonik wie später dem großen amerikanischen Geologen Clarence Edward Dutton (1841–1912) vorschwebte, vorstellen. Vgl. DUTTON, 1876

44 Vgl. TAYLOR (1910, 1921, 1928a, b, 1930, 1933

45 Diese Idee ist seitdem sehr populär geblieben und dominiert heute unsere Ansichten über kontinentale Deformation.

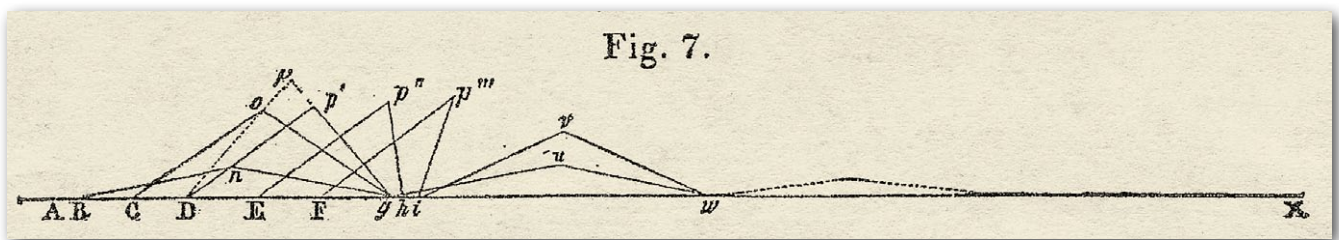


Abb. 6. Danas Veranschaulichung der Entwicklung der appalachischen Falten (aus DANA, 1847, S. 183, Fig. 7). B, C, D, und F geben die sukzessiven Positionen der linken Flügel der Falte und n, o, p, p', p'' die korrespondierenden Positionen des Faltenscheitels während des Fortschritts des Faltungsvorgangs an.

den Bewegung nötig sind⁴⁶. Es scheint, als ob Dana, genau wie die Gebrüder Rogers, nicht an die Nötigkeit einer Scherkomponente (d. h. rotationelle Komponente) für die Erzeugung der überkippten Falten gedacht hat. Er sagte weiter, dass mit zunehmender Einengung, die Position Dp'g sich zu Ep''h und dann zu Fp'''i entwickeln wird. Er fügte hinzu, dass der größte horizontale Druck von dem Schichtsegment pg dann ausgeübt wird, wenn es eine Neigung zwischen 45° und 60° hat.

Danas berühmtes „Manual of Geology“ wurde von 1862 bis 1895 mit revidierten Zwischenausgaben acht Mal auf-

um die Theorie der Geosynklinalen. Diese Theorie hat einen so tiefgreifenden Einfluss auf die Entwicklung der Ideen über die Tektonik der Gebirge und über die Entwicklung der Kontinente gehabt, wobei sie auf so schwachen, ja zum Teil auch damals ganz unhaltbaren, sogar absurden Voraussetzungen basiert, dass es mich immer wieder frappiert, dass sie so lange ihre zentrale Position in den Überlegungen zur Tektonik bewahrt hat. Schon in seiner ersten Schrift über die Entstehung der Gebirge deutete Sueß in seiner üblichen Höflichkeit an, dass er die Theorie der Geosynklinalen nicht gerade befriedigend fand.

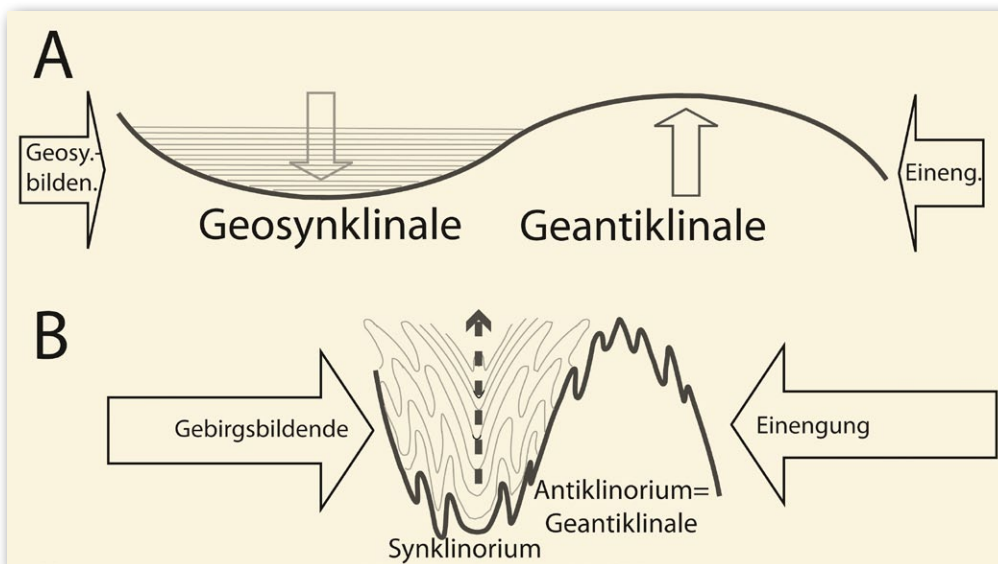


Abb. 7. Die Deformation einer Geosynklinale und die Schaffung eines Synklinoriums und eines begleitenden Antiklinoriums im Sinne von Dana. Eine solche Geometrie schafft notwendigerweise ein symmetrisches Synklinorium und nicht ein asymmetrisches, wie Dana es verlangt. Sueß muss diese Schwäche in den Gedanken Danas gesehen haben.

gelegt. Es ist wohl möglich, dass Sueß Danas Ideen zuerst aus seinem Lehrbuch gelernt hat. Wir wissen, dass er dessen zweite Ausgabe (DANA, 1875) in der „Entstehung der Alpen“ zitierte⁴⁷. Wenn wir Danas Ideen über Gebirgsbildung bis 1873 weiter verfolgen, erscheint darin eine andere wichtige Entwicklung in der amerikanischen Auffassung der Gebirgsbildung, die mit dem Namen Dana innigst verknüpft ist und die kommende Entfaltung der Tektonik bis in die siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts, trotz der entschlossenen Ablehnung von Sueß, zutiefst und in einer sehr negativen Weise beeinflusst hat. Es handelt sich

Abb. 7 zeigt das Problem. Geosynklinale Einengung schafft notwendigerweise ein, wenigstens im Prinzip, symmetrisch gebautes Gebirge. Einengung einer Geosynklinale ähnelt genau der Einengung in einem Schraubstock. Sueß wusste, dass die großen Gebirgsgürtel der Erde nicht symmetrische, wie in einem Schraubstock zusammengesetzte Strukturen sind. Deswegen schrieb er schon in der „Entstehung der Alpen“:

„Es ist mir, ich gestehe es, nicht klar, wie, selbst wenn alle Prämissen richtig wären, durch Senkung und Erweichung einer ausgedehnten Fläche des Meeresbodens Gebirge entstehen könnten, welche auch nur einige Aenlichkeit mit unseren grossen, an ihrer Aussenseite regelmässig gefalteten und nach Aussen überschobenen Ketten hätten.“⁴⁸

In seinem ersten Buch über den Boden von Wien beschrieb Sueß die Alpen ganz im Sinne der alten Erhebungstheorie als ein symmetrisch gebautes

46 Horizontale Einengung, die nur eine horizontale und eine vertikale Komponente der Umformung zustande bringen kann, kann nur eine nichtrotationelle Umformung erzeugen, d. h. das umformende Objekt wird in der horizontalen Richtung verkürzt und in der vertikalen (oder in der anderen horizontalen, die rechtwinklig zu der Verkürzungsrichtung stehen muss) Richtung verlängert, wobei die totale Rotation aller seiner Elemente einem Nullwert gleichkommt (wir nehmen hier nur eine Umformung in einer Ebene an = „plane strain“).

47 SUESS, 1875, S. 6–7

48 SUESS, 1875, S. 97

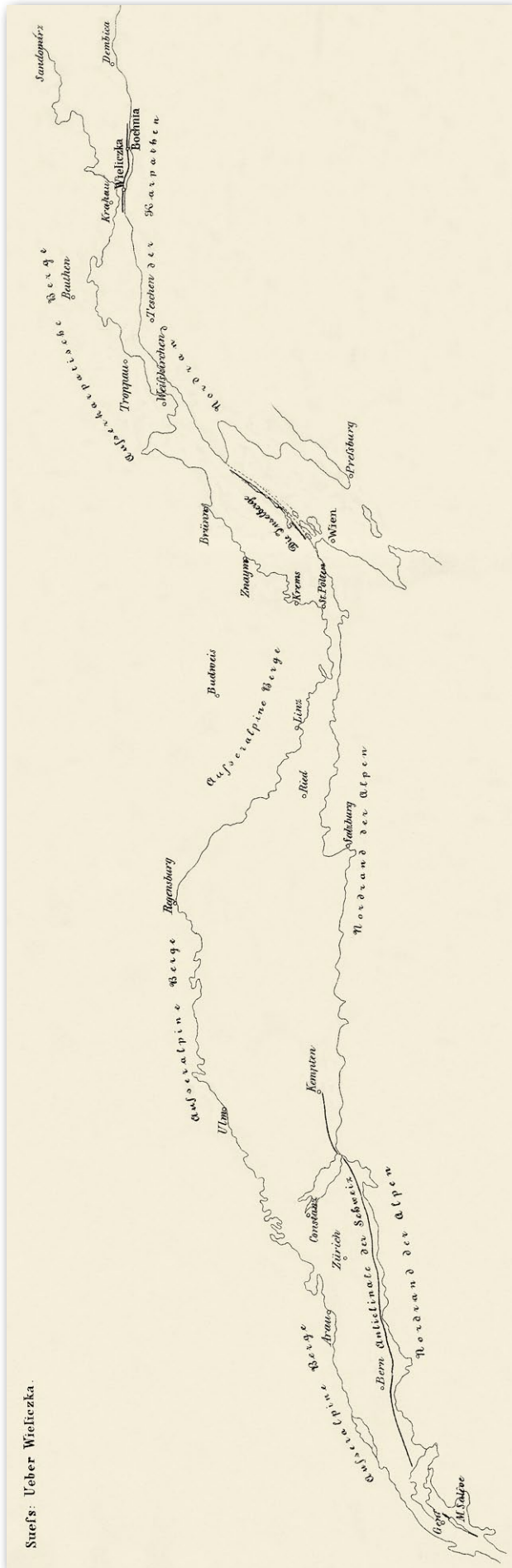


Abb. 8. Die Strukturskizze von Sueß, die die Position der Antiklinalstrukturen in der Molassezone nördlich der Alpen und der Nordkarpaten zeigt. (aus SUSS, 1868, Falttafel). Sueß glaubte, sie zeigten eine einheitliche Nordbewegung des gesamten Körpers des Alpen-Karpaten Gebirges.

Gebirge⁴⁹. Wir wissen auch, dass er um die ziemlich schnellen stratigraphischen Übergänge im Wiener Becken zu erklären, auf eine Erhebung des Beckengebietes zurückgegriffen hatte.⁵⁰ Diese beiden Äußerungen zeigen, dass damals, also knapp vor 1862, Sueß die Alpen noch im Lichte der damals herrschenden Erhebungstheorien ansah. Schon 1860 hatte er selbst Beobachtungen gemacht, die ihm von der Passivität der magmatischen Gesteine in Gebirgsbildungsprozessen zu überzeugen begonnen hatten⁵¹, aber seine Schriften aus den Jahren unmittelbar vor 1862 geben kein Anzeichen, dass er die vertikale Erhebungstheorie der Gebirgs- und Kontinentbildung aufgegeben hätte. Erst 1862, so sagt er selbst⁵², sah er bei seinen Geländearbeiten in der Umgebung von Eggenburg ein, dass es nicht möglich war, die Formationsgrenzen mit kontinentalen Schwingungen zu erklären. Sueß wurde überzeugt, dass die weite Verbreitung der Formationsgrenzen über Kontinente hinweg, allein mit einer Bewegung der Meeresoberfläche zu erklären war. Wie ich anderswo gezeigt habe, hat ihn dieser Gedankengang zu der Constant Prevostschen (1787–1856) Version der Schrumpfungstheorie geführt. Wann genau dies geschah, wissen wir noch nicht, aber eine Bemerkung in einer populären Schrift, die Sueß zusammen mit seinem Freund Ferdinand von Hochstetter (1829–1884) 1865 publiziert hatte, könnte uns vielleicht einen Anhaltspunkt geben, denn darin ist geschrieben,

„dass man die Erscheinungen der Eiszeit naturgemäß aus einer anderen Vertheilung von Wasser und Land und aus großen Schwankungen im Niveau der Landmassen in der jüngsten geologischen Periode erklärt“⁵³.

Da diese Bemerkung als Unterstützung gegen eine irdisches geologisches Geschehen beeinflussende cosmogonische Hypothese zu Hilfe gezogen wurde, könnten wir daraus ableiten, dass Sueß sich noch nicht ganz entschlossen hatte, die Erhebungstheorie in allen seinen Formen aufzugeben. Wie wir unten sehen werden, verstärken seine späteren, bis 1875 veröffentlichten Schriften diesen Eindruck.

Einseitigkeit der Gebirge bei Eduard Sueß

Aus Anlass eines Wasserdurchbruches in dem alten und weltberühmten Salzbergwerk Wieliczka im November 1868 besuchte Eduard Sueß die Gegend, um sich ein Bild der dortigen geologischen Struktur und der Ursache der Wasserkatastrophe zu machen. Seine eigenen Geländebegehungen, Gespräche mit den lokalen Bergwerkszuständigen und eine genaue Lektüre der Literatur überzeugten ihn, dass das Bergwerk in einer in der nördlich der Karpaten liegenden Molassezone befindenden Antiklinalstruktur ausgegra-

49 SUSS, 1862, S. 16–20
 50 Ebd., S. 44
 51 SUSS, 1860
 52 SUSS, 1916, S. 139
 53 SUSS, VON HOCHSTETTER, 1865, S. 256

ben wurde und dass die Wasserkatastrophe dadurch verursacht worden war, dass ein Stollen die nördlichen Flügel der Antiklinalzone durchgebrochen und in die schlecht verfestigten und wassergetränkten Sandsteinschichten der Molassezone hineingereicht hatte. Sueß erblickte in den Lagerungsverhältnissen des Bergwerks Bochnia weiter im Osten eine östliche Fortsetzung der Antiklinalzone von Wieliczka⁵⁴.

Seine neue Kenntnis über diese Antiklinalzone dicht am nördlichen Rand der Karpaten erinnerte Sueß an ähnliche Antiklinalstrukturen entlang der alpinen Front vom Mont Salève südlich von Genf bis nach Kempten in Bayern (Abb. 8). Sueß schrieb

„Zahlreiche Angaben Gumbel's lassen kaum daran zweifeln, daß diese Anticlinale sich in Baiern noch weiter über Kempten hin fortsetzt; im oberösterreichischen Becken wird man sie, trotz der bedeutenden Überschüttung des Randes der Alpen mit Trümmern, wohl früher oder später auffinden. In Niederösterreich und Mähren ist sie unter eigentümlichen Verhältnissen nachweisbar“⁵⁵.

Diese eigentümlichen Verhältnisse waren nichts anderes als diejenigen der äußeren Klippenzone in den Karpaten und ihre Fortsetzung in Niederösterreich durch das Wiener Becken. Sueß zählte diese, von ihm selbst als eine unter tektonischem Druck zerborstene Falte gedeutete Zone⁵⁶, auch zu seiner Antiklinalzone des alpinen Nordsaumes.

Er unterstrich ferner die auffallende Asymmetrie dessen „welches wir in Übereinstimmung mit den Geologen der Schweiz das Molasseland nennen mögen“⁵⁷: Im Norden war sein Rand durch eine unverändert erhaltene ursprüngliche Anlagerungszone gekennzeichnet. Der Südrand dagegen, d. h. gegen den Rand der Alpen hin, verhält sich anders: „Die schweizerischen Geologen haben gezeigt, daß längs dem Nordrande der westlichen Alpen, und zwar nicht weit von demselben, eine ihm parallele Störungslinie durch die Molasse hinläuft, welche sie die Anticlinallinie der Schweizermolasse nennen“⁵⁸.

Die 1868er Arbeit von Sueß dient dazu, die Existenz dieser Antiklinalzone entlang der gesamten Alpen- und Karpatennordfront zu beweisen.

Warum war Sueß an dieser Antiklinallinie so interessiert? Er sagt es selbst bereits in den einführenden Absätzen der 1868er Abhandlung:

„Man wird hienach, im Gegensatz zu älteren Anschauungen, diese Linien wohl nur als Faltungen des jüngeren Gebirges ansehen können, welche nach Ablagerung der Molasse durch einen langsamen und andauernden Druck von den Alpen her erzeugt wurden, und welche da und dort, wie am M. Salève, die Unterlage der Molasse zu Tage kommen ließen. Es wird dabei zugleich gegenüber den zahlreichen und mühevollen Arbeiten, welche zu der Anschauung von einer gewissen Selbständigkeit der einzelnen Centralstöcke geführt haben, doch in dem

langen und stetigen Fortlaufen dieser Faltungslinien eine größere Einheit und Gleichförmigkeit der erhebenden und faltenden Kraft anerkannt werden müssen.“⁵⁹

Hier sagt Sueß deutlich, dass er sich von den älteren Anschauungen, die von der Erhebungstheorie von Leopold von Buch abgeleitet worden waren, entfernte und in der Entstehung der Alpen einen einheitlich wirkenden und die ganze Kette samt der Karpaten umfassenden Vorgang sah. Was dieser Vorgang ist, sagte er in dieser Arbeit nicht, mit der Ausnahme, dass ein horizontaler und von den Alpen her wirkender (d. h. einseitiger) Druck erzeugt wurde. Bereits 1868 also betrachtete Sueß die Alpen (und die Nordkarpaten) als eine sich einheitlich nach Norden bewegende Bergkette, die die Strukturen in der Molasse verursachte. Dies war eine erhebliche Abweichung von den damals in Europa herrschenden Ideen über Gebirgsbildung und eine Annäherung an die Ideen der Amerikaner, ganz besonders an diejenigen der Gebrüder Rogers. Sueß' Ideen in dieser Richtung entwickelten sich weiter besonders während seiner Exkursionen in Italien.

Während der Osterferien 1871 besuchte Sueß in Begleitung des Mineralogen und Petrographen Prof. Gerhard von Rath (1830–1888) aus Bonn, des Zoologen, Botanikers und Paläontologen Prof. Andreas Kornhuber (1824–1905) aus Wien, seines eigenen ehemaligen Schülers Dr. Theodor Fuchs (1842–1925) aus Wien und des Studierenden Julius Dreger aus Berlin, Süditalien. Sie reisten von Rom zum Vesuv und von dort nach Kalabrien (für die von Sueß in seinen über dieser Exkursion publizierten Bemerkungen erwähnten Lokalitäten, siehe Abb. 9). In Kalabrien folgten sie einer Route, die sie von der Straße von Messina entlang der Küste des Ionischen Meeres bis nach Siderno brachte. Am 6. April trennte sich die Gesellschaft. Sueß und von Rath gingen nach Norden ins Crati-Tal. In Aspromonte und Serra San Bruno sahen sie kristalline Gesteine ganz nach der Art der alpinen Zentralmassen (nach der damaligen Terminologie). Die Sila war ebenfalls aus den kristallinen Gesteinen gebaut und von Schiefer umgeben. Erst als sie San Donato (di Lecce) erreichten, wurden sie von dem hohen Kalkberge der Basilicata begrüßt. In seinen Erinnerungen schrieb Sueß:

„Am 12. April fuhren wir durch das weite Tal des Crati. Bei dem Dorfe Tarsia erblickten wir zum ersten Male die überschneiten Hochgebirge der Basilicata. Mein Begleiter v. Rath hat diese ganze kalabrische Reise in einem besonderen Büchlein (Bonn, 1871) beschrieben und erwähnt den tiefen Eindruck, den dieser Anblick auf mich hervorbrachte. Hier erst erhielt ich die Überzeugung von der Ähnlichkeit des Baues des Appennin und der Karpathen, sowie der Einseitigkeit dieser Ketten, die der Ausgangspunkt weiterer Schleifen geworden ist.“⁶⁰

Was von Rath in seinem Buch berichtete, war nichts von der Einseitigkeit der Gebirge oder von einem Vergleich mit den Karpaten. Er schrieb lediglich:

„Die Ebene, die wir von Tarsia nach Terranova [beide im Crati-Tal] durchfuhren, ist wild und wenig bebaut, sie mag eine Meereshöhe von 500 bis 550 Fuss besitzen. Dieser weite (etwa 2 bis 3 d. M. messende) Zwischenraum zwischen Sila und Appennin ist in orographischer

54 SUESS, 1868; auch Abb. 9 hier

55 Ebd., S. 542-543

56 SUESS, 1867, S. 188

57 SUESS, 1868, S. 541

58 Ebd., S. 542

59 Ebd., S. 542

60 SUESS, 1916, S. 233

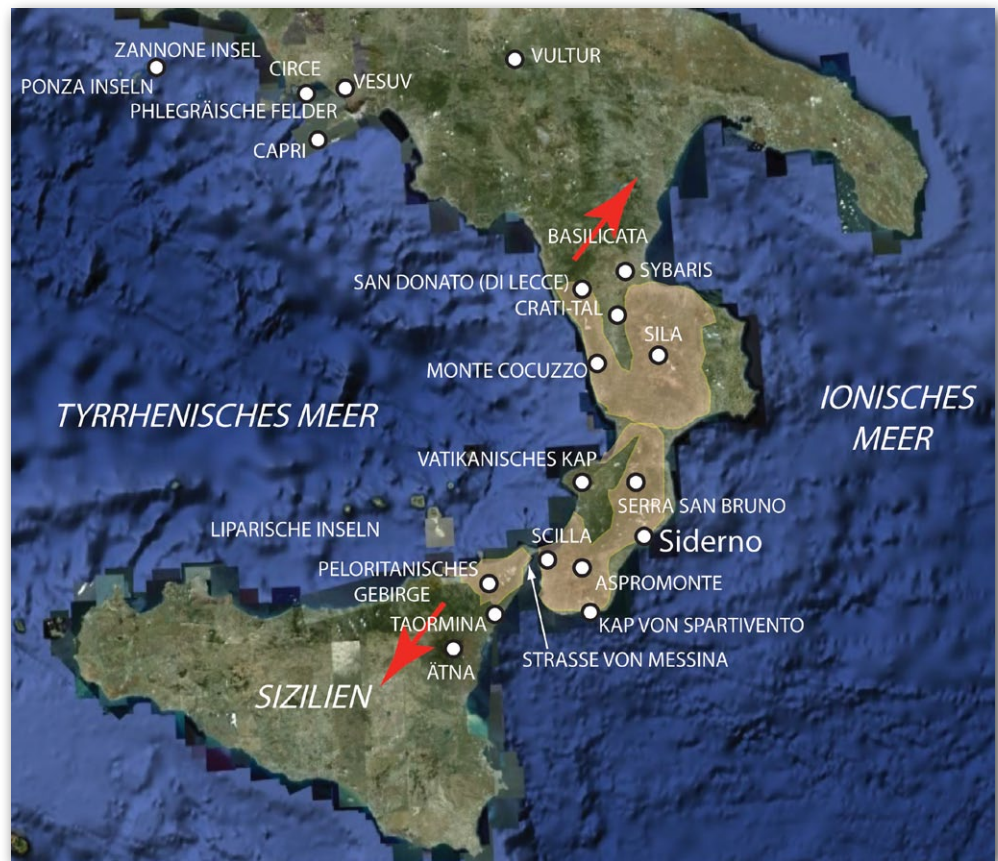


Abb. 9.
Die Lokationskarte von Süditalien zeigend die Ortschaften, die von Sueß in seinen Berichten über die 1871er Exkursion erwähnt wurden. Die leicht braunen Flecken im Süden sind die Kristallingesteine des Peloritani-Gebirge und von Kalabrien. Sueß hat sie damals als Zentralmassen gedeutet. Die roten Pfeile zeigen die Stellung und die Vergenz der Nebenzonen auf den beiden Seiten.

und geologischer Hinsicht eine der merkwürdigsten Oertlichkeiten in ganz Italien. „Könnten wir uns nicht einbilden, dass wir uns in einem Längenthal der Alpen, zwischen der Centralzone und den Kalkalpen befänden, etwa im Innthal oberhalb Innsbruck?“ fragte Freund Süß und bezeichnete damit vollkommen zutreffend die Eigenthümlichkeiten des uns umgebenden Landes.“⁶¹

In seiner eigenen 1872 publizierte Abhandlung beschreibt Sueß den Apennin als ein mit einer alpinen Nebenzone vergleichbares Gebirge, weil

„dem ganzen Appennin im strengeren Sinne, der Kette des Gran Sasso, der orographischen Hauptlinie Italiens, jedes Gestein fehlt, welches sich den älteren und centralen Gesteinen der Alpen oder auch nur z. B. den älteren Schiefergesteinen vergleichen liesse, welche da und dort in den Südalpen, wie, z. B. bei Recoaro sichtbar werden. Der Appennin verräth nicht den Bau eines den Alpen vergleichbaren Gebirges, sondern nur den einer gefalteten Nebenzone, richtiger vielleicht wegen seines Verhältnisses zum Macigno⁶², eine Wiederholung der Klippenlinie der Karpathen im risigsten Massstabe.“⁶³

In Kalabrien aber, sah Sueß doch alte kristalline Gesteine und verglich sie mit dem alpinen Zentralmassiv. Noch dazu bekam er in Sizilien, bei Taormina, von dem berühmten italienischen Geologen Giuseppe Seguenza (1833–1889) eine denjenigen in den nördlichen Kalkalpen sehr vergleichbare permisch bis jurassische Serie gezeigt und deutete diese als Vertreter einer westlichen Nebenzone (es ist wichtig zu

bemerken, dass Sueß „Nebenzone“ nicht näher definiert!). Sein Streifzug durch Kalabrien überzeugte ihn

„von der durchaus alpinen Beschaffenheit der dortigen Gebirge und bot zugleich die Möglichkeit einer Gliederung in Centralmassen“⁶⁴.

Dann, als er in Begleitung des Prof. von Rath im Crati Tal ankam

„da war es uns klar, dass die grosse weisse Kalkkette der Basilicata, welche schneebedeckt vor uns sich aufthürmte, den Schichtkopf der östlichen Nebenzone darstellte [...]. Zwischen Taormina und Sybaris besteht also thatsächlich ein mächtiges Stück einer alpinen Centralkette, der Appennin bildet ihre nordöstliche, Sicilien einen Theil der südwestlichen Nebenzone [...]“⁶⁵.

Also hier ist immer noch von einem symmetrischen Gebirge die Rede, das nun zerstückelt vor uns erscheint.

„Unter dem Tyrrhenischen Meere“ schrieb Sueß weiter,

„liegt die tektonische Achse der italienischen Halbinsel, welche in ihrem gegenwärtigen Zustande nur die aus dem Meere und den jüngeren Ablagerungen heraufragenden Trümmer des grossen, alten Tyrrhenischen Gebirges darstellt, und so wie man bei Wien mit Recht von einer inneralpinen und einer ausseralpinen Niederung spricht und diese Ausdrücke eine massgebende Bedeutung für das Studium der jüngeren Tertiäralagerungen erhalten haben, ist in Italien z. B. die toscanische Niederung als eine innertyrrhenische, jene von Bologna als eine aussertyrrhenische anzusehen.“⁶⁶

61 VON RATH, 1871, S. 136–137

62 Oligozäne Vortiefenfüllung des nördlichen Apennin, die aus turbiditischen Sandsteinen und Schiefer besteht.

63 SUESS, 1872, S. 217

64 SUESS, 1872, S. 218

65 Ebd., S. 218–219

66 Ebd., S. 219



Abb. 10.
Die tektonischen Einheiten Süditaliens
nach den Anschauungen von Sueß im
Jahre 1872.

Sueß war bereit, dieses hypothetische Tyrrhenische Gebirge als die wahre tektonische Fortsetzung der Alpen anzusehen und den Apennin direkt mit den damals als „südliche Nebenzone“ genannten Südalpen zu korrelieren. Dadurch erhielt auch die Nebenzone von Sizilien eine Stellung als die direkte Fortsetzung der nördlichen Nebenzone der Alpen (Abb. 10) und Sueß selbst sagte ja, dass die Schichtserien bei Taormina am besten mit denjenigen der nördlichen Kalkalpen zu vergleichen wären:

„Auch für den Zusammenhang des Apennin mit den Alpen hat nun eine wesentlich verschiedene Anschauung zu gelten. Vor vielen Jahren hat nämlich Studer schon darauf hingewiesen, dass der westliche Theil der Süd-Alpen allmählich unter der oberitalienischen Ebene verschwinde, dass ein Theil derselben unter dieser Ebene begraben liege. Die neuen Arbeiten Gastaldi's und Anderer bestätigen dies vollkommen, und es zeigt somit die Umgebung des Golfes von Genua, wie zwei mächtige Gebirgszüge sich vereinigen und dabei die centralen Massen beider Gebirge bis auf geringe Rudimente unter das Meer oder unter die Ebene hinabsinken. Es könnte sogar die Meinung einige Begründung finden, dass die versunkene tyrrhenische Achse als die wahre tektonische Fortsetzung der im Bogen gekrümmten Achse der Alpen selbst anzusehen sei. Die tithonischen Fragmente und die Kreideformation in den Euganäischen Bergen verrathen ohnehin, dass zwischen Vicenza und dem Apennin wenigstens die höheren Stufen der mesozoischen Sedimente in Verbindung stehen.“⁶⁷ (zur weiteren Erläuterung, siehe Abb. 11).

Wenn man die oben zitierten Zeilen von Sueß liest, glaubt man einen Text eines Anhängers der alten Erhebungsthe-

orie von Leopold von Buch⁶⁸ oder von Bernhard Studer⁶⁹ (1851, 1853) vor sich zu haben, die ein beispielhaftes, von Zentralmassen emporgehobenes, symmetrisches Gebirge beschreiben. Dies kann aber nicht wahr sein, weil der Autor seine Abhandlung mit einer Unterstreichung der von Geologen immer mehr akzeptierten passiven Rolle der früher als Zentralmassen angesehenen Gesteinskomplexen einführt. Viele der roten Porphyre und ein großer Teil der alpinen Granite sind keine „eigentlichen Centralmassen“⁷⁰. Diese Erkenntnis änderte die Anschauungen über den Bau der Alpen so wesentlich, dass er diese neuen Anschauungen an einem anderen Gebirge zu prüfen wünschte und dabei den Apennin wählte.

Was waren also diese „wesentliche Veränderungen“ in den Anschauungen über den Bau der Alpen? Sie waren nichts anderes als seine 1868 publizierte Ablehnung der „gewissen Selbständigkeit der einzelnen Centralstöcke“, d. h. den auf Gleichförmigkeit der erhebenden und faltenden Kraft basierenden treibenden Vorgang der Erhebungstheorie und seine Anerkennung, der in dem langen und stetigen Fortlaufen der sich in der Molasse befindenden Faltungslinien zum Ausdruck kommt.

In seiner Arbeit aus 1872 erfahren wir noch nichts von dem Wesen dieser Kraft. Wir erfahren aber bereits Sueß'sche Ideen:

„Der allgemeine Eindruck, welchen die Reisen in den Alpen und in Italien im Laufe der letzten Jahre auf mich hervorgebracht haben, ist der einer geringen Stabilität der grossen Gebirge. Dabei ist die Wiederholung der

67 SUESS, 1872, S. 221

68 VON BUCH, 1824a, 1824b

69 STUDER, 1851, 1853

70 SUESS, 1872, S. 217



Abb. 11.
Die tektonischen Korrelationen im zentralen Mittelmeergebiet nach den Anschauungen von Sueß im Jahre 1872.

Erscheinungen eine sehr auffallende. Schlagend ist z. B. die Übereinstimmung des Baues zwischen Karpathen und Appennin. Auch in den Karpathen ist fast nur eine der Nebenzone, nämlich die nördliche, sichtbar; Trümmer der Mittelzone bilden die Tatra u. s. f.; nur Spuren der südlichen Nebenzone treten hervor; in den Senkungsfeldern erscheinen anstatt der Vulkane Latiums und Neapels die ungarischen Trachyte. Immer ist es eine Wiederholung im grossen Massstabe desselben Phänomens, welches die inneralpine Niederung von Wien und ihre mit Thermen besetzten Ränder darbieten.“

Das Hauptphänomen, das hier Sueß am meistens interessierte, war das der Senkung. Seitdem er sich 1862 überzeugt hatte, dass Vertikalbewegungen der Kontinente die Formationsgrenzen nicht bestimmen konnten, suchte er einen Mechanismus, um das Niveau des Meeresspiegels zu ändern, und zwar so einen, der das von Sir Charles Lyell (1797–1875) erstellte Bild der Geologie ohne weltumspannende Umwälzungen aufrecht erhalten konnte. Irgendeine Senkung, die das Volumen der Ozeane vergrößert, kann das globale Meeresspiegel senken und das war gerade das, was Sueß brauch-

te. Vor ihm stand das Tyrrhenische Meer als ein Neubecken, das durch den Zusammenbruch des ehemaligen tyrrhenischen Gebirges zustande gekommen war und dadurch die Kapazität des Ozeans expandiert hatte. Diese Schlussfolgerung erinnerte ihn an die Ergebnisse seiner früheren Forschungen über die Meere des jüngeren Tertiärs, die er zuerst in einem Einbruchbecken studiert hatte, nämlich dem Wiener Becken. Anfänglich war er zufrieden, die abrupten Wechsel des Absatzmilieus im Wiener Becken durch episodische Erhebungen der umliegenden Gebiete zu erklären. Aber seine Korrespondenz mit dem russischen Paläontologen und Stratigraphen Nikolai Pawlowitsch Barbot De Marigny (1829?–1877) lehrte ihn später, dass die im Wiener Becken zu beobachtenden Änderungen im Sedimentationsmilieu nicht auf dieses Becken beschränkt gewesen waren und man einzelne Glieder der Wiener jungtertiären Stratigraphie bis nach Südrussland und weiter bis zum Aralseegebiet verfolgen konnte⁷¹. Da gab Sueß alle Hoffnung auf, diese Ergebnisse durch kontinentale Erhebung erklären zu können. Er sah ein, dass, wenn er

71 SUESS, 1866

und Barbot De Marny recht hätten, das globale Meeresspiegelniveau unabhängig von den Kontinenten schwingen müsste. Und so etwas wäre nur möglich, wenn man irgendein Mittel finden könnte, die Kapazität des Ozeans von Zeit zu Zeit zu ändern. Tektonische Senkung und sedimentäre Nachfüllung waren innerhalb der Möglichkeiten der damaligen Tektonik die einzigen Mittel, die Sueß erlauben könnten, die Kapazität eines Ozeans zu ändern, ohne auf fabulöse Weltumwälzungen zurückzugreifen. Jetzt vor den Wogen des tyrrhenischen Meeres glaubte Sueß, die Bestätigung seiner Vermutungen endlich gefunden zu haben. Ein riesiges Areal, das noch in jüngeren geologischen Zeiten ein mächtiges, den Alpen ähnliches Gebirge beherbergt hatte, lag tausende von Metern unter den bildhübschen blauen Gewässern des Mittelmeeres. Die Ränder waren steile Bruchküsten und in der Nähe dieser Ränder wiesen junge und noch tätige Vulkane auf die Existenz offener Verbindungen mit dem Inneren der Erde hin.

Dass es dieses Ergebnis war, das ihn damals am meisten fesselte, erfahren wir aus einer kleinen Schrift aus dem Jahre 1873 von einem seiner frühesten Konvertiten, nämlich aus dem Büchlein über den Vesuv von seinem Freund und Reisebegleiter in Italien, Gerhard von Rath. Als von Rath die Stellung vom Vesuv im tektonischen Bau der italienischen Halbinsel zu erklären versuchte, folgte er den Ansichten seines Freundes und betonte die Wichtigkeit der tyrrhenischen Senkung für das Verständnis des Baues des Apennins:

„Auf dem europäischen Festlande gibt es nur einen thätigen Vulkan, den Vesuv, am Golf von Neapel. Die Lage des Feuerbergs am südwestlichen Gestade steht in innigem Zusammenhange mit der Gestaltung und dem Bau der Apenninhalbinsel, diesem merkwürdigen Lande, welches das schönste Meer der Welt in eine östliche und eine westliche Hälfte scheidet. Die tyrrhenische Küste der, für europäische Dimensionen sehr ausgedehnten Halbinsel ist in jeder Hinsicht begünstigt und bevorzugt vor dem adriatischen Gestade, welches auf mehr als 100 d. M. fast geradlinig ist – mit Ausnahme des Gargano-Sporns. – Das Küstenland der Adria ist ein einförmiges Gehänge oder eine ebene Platte – il tavoliere –; kein großes Flußthal öffnet die geschlossene Kette des Apennins; keine Stätte alter Herrschaft und Kultur zieht das Interesse des Historikers dorthin. Auf der tyrrhenischen Seite hingegen ist Italien ausgebuchtet in vielen Golfen; die Gebirgszweige springen weit hinaus ins Meer, welches durch drei Inselgruppen – die toskanischen, die campanischen, die liparischen oder äolischen Inseln – belebt wird. Gegen die tyrrhenische Küste wenden sich alle großen Flüsse der Apenninen, vor allen Arno, Tiber, Garigliano; ihre Täler öffnen das centrale Gebirgsland. Das Gestade der Tyrrhener besitzt unterirdische Erdschätze – in den apuanischen Alpen, bei Campiglia und Massa marittima und anderen Punkten des ‚toskanischen Erzgebirges‘ –, ganze Berge von Eisenglanz und Rotheisen auf Elba und über 2000m hohe alpengleiche Berge aus weißem Statuenmarmor (bei Carrara und Serravezza), welche nicht ihres Gleichen in der Welt besitzen. Diese und andere Vorzüge, verbunden mit der Lage gegen Westen, gegen die Länder und Meere der Zukunft, haben schon Aeneas Zeiten dieser Küste das Übergewicht vor dem adriatischen Littoral gegeben.

[...] – Worin liegt die Ursache der außerordentlichen Verschiedenheit beider Seiten der großen Halbinsel? Die geologische Kenntniß des Landes bahnt die Lösung des Räthsels an. Die Seite der Adria ist ein einfach aus dem Meere gehobenes Land jüngerer Bildung, die tyrrhenische Seite besteht wesentlich aus alten Bildungen. Dort ist der Außenrand, hier der Innenrand des großen italienischen Gebirgs. Auf dieser Innenseite haben ungeheure Zerspaltungen, Abbrüche, Verwerfungen, Einsenkungen jene reichere Gliederung der Küste und des Landes bedingt. Im tyrrhenischen Meere müssen ganze große Gebirgstheile versunken und überfluthet sein. So ist die Gorgona ein Fragment des Pisanerbergs. Elba ist in geologischer Hinsicht ein Stück des Continents, der Berge von Campiglia. Die inselgleichen Vorgebirge, Argentario, Circello, die Insel Capri mit dem Cap Campanella sind einzelne Trümmer früher verbundener Gebirge, welche in die Tiefe des Tyrrhenischen Meeres versenkt sind.

Längs dieser zerbrochenen und zertrümmerten Küste, auf deren Bruchlinie Gebirge versanken, fanden die vulkanischen Kräfte ihre Ausbruchstellen, thürmten geschlossene Trachytberge, den Monte Amiata, Monte Cimini, Schlackenhügel und kratertragende Vulkane auf und überschütteten eine Fläche von weit über 100 d. Q.-M. mit Tuffen.“⁷²

Diese Beschreibung, worin von Rath auf den soeben erschienenen Aufsatz seines Freundes Sueß Bezug nimmt, erschließt uns von einer unabhängigen Quelle den damaligen Schwerpunkt der Sueß'schen Gedanken. Diese befassten sich mit der Einsenkung ausgedehnter Gebiete ins Meer und die Schaffung neuer Behältervolumen für die Wassermenge des Ozeans.

Wie hat Sueß diese Senkungsgeschichte des tyrrhenischen Meeres mit Gebirgsbildung verbunden? Hier, glaube ich, kommt erstens der am Anfang seiner Abhandlung aus dem Jahre 1872 erwähnte Beweis der Passivität der meisten magmatischen Gesteine der Alpen. Das muss ihm gezeigt haben, dass die von Leopold von Buch (1774–1853), Alexander von Humboldt (1769–1859) und von Bernhard Studer (1794–1887) vertretene Version der Erhebungstheorie nicht mehr aufrecht erhalten werden konnte. Zweitens muss ihn seine 1868 publizierte Erfahrung der einheitlichen Nordbewegung des gesamten Alpen- und Nordkarpatenkörpers davon überzeugt haben, dass einheitliche Horizontalbewegungen bei der Bildung der Gebirgsstrukturen – wie die Entstehung der Antiklinallinie vor den Alpen – vielleicht wichtiger waren, als die angeblichen Vertikalbewegungen um die einzelnen Zentralmassen. Endlich führten die Zeitfestlegung der Versenkungen hinter den einzelnen Gebirgstheilen – wie in den Apenninen oder in den Karpaten – und die Vorfaltungen in denselben Gebirgen dazu, die zeitlich korrelierbaren Versenkungs- und Faltungsgeschehen auch kausal zu verknüpfen. Und gerade hier kam ihm die Prévostsche Version der Schrumpfungstheorie zu Hilfe, die Sueß auch wegen ihres Nachdrucks auf Senkungen und ihrer Ablehnung der Erhebungen und der aktiven Rolle der magmatischen Gesteine bei der Gebirgsbildung sowieso seit jeher sehr sympathisch erschien. Schon 1839 berichtete man über Prévosts Ideen das Folgende:

72 VON RATH, 1873, S. 4-6

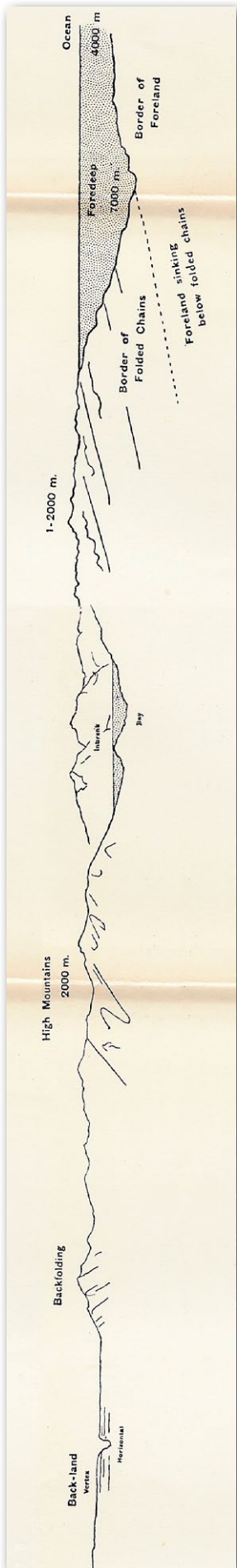


Abb. 12. Sueß' eigener Querschnitt von dem alten Scheitel Eurasiens bis zum pazifischen Ozean. Sueß zeichnete diesen Querschnitt auf die Bitte des Herausgebers der Englischen Übersetzung von „Antilitz der Erde“, Professor William Sollas (1849–1936) aus Oxford. Was uns am meisten an diesem Querschnitt interessiert, ist Sueß' Deutung der Tiefseerinnen um den pazifischen Ozean. Er hat sie als die Aufschlussstellen gewaltiger Überschiebungen gedeutet, wobei der gesamte Kontinent den Ozeanboden überschiebt und dabei ein Gebirge entlang des pazifischen Saumes bildet. Hier erscheint Gebirgsbildung als Ganzes als eine auf einem Abscherungshorizont stattfindende Einengungsdeformation, was völlig unseren modernen Anschauungen entspricht (aus SUESS, 1924).

„[...] dass man vielleicht immer noch sehr zugeneigt ist auf die Bodenbewegungen und ganz besonders auf die Erhebungen zurückzugreifen, um die geologischen Tatsachen zu erklären. [Er] zweifelte nicht, dass der Boden vielmal die Wirkungen der mehr oder weniger gewaltsamen und großräumigen Dislokationen erfahren hätte. [Er] dachte aber, dass große Senkungen die hauptsächlichsten Ergebnisse waren und die Erhebungen immer einen sehr begrenzten Platz nahmen. Um seine Idee zu betonen ging er in die Entwicklung betreffend die Theorie der sogenannten Erhebungen ein, die [er] zutreffender Weise die Theorie der Senkungen genannt sehen wollte, wenn man mit einem Wort die Ursache der Veränderungen des Bodenreliefs ausdrücken möchte. Die Ursache, die das Bodenrelief modifiziert, sei nichts als die Schrumpfung und das Zusammenziehen der konsolidierten Erdkruste, die diese als Folge seiner kontinuierlichen Erkaltung erfährt und nicht, wie viele Personen zu glauben scheinen, ein fluider oder gasförmiger Agent, der, während seiner Bemühung von dem Inneren der Erde zu entweichen, die Hindernisse zerreißt und erhebt. Die Granite, die Porphyre, die Basalte kommen durch den Boden heraus, wie die Larven es tun, indem sie von den Spalten des durch das Zusammenziehen dislozierten Bodens profitieren, und diesen Materialien die Dislokation selbst zuzuschreiben, sei nichts als das Ergebnis, als die Ursache zu verkennen.“⁷³

Hier ist eine Theorie, die alle Erfordernisse der Denkungsweise und der Erfahrungen von Sueß befriedigen konnte. Aber Prévost gab ihm noch mehr:

Nun, da die Theorie der Erhebungen durch die oben gegebenen Zitate klar dargestellt und definiert ist, wird die Frage gegen diese Theorie klar aufgeworfen:

1. Dass das Relief der Erdoberfläche das Ergebnis großer, sukzessiver Einsenkungen ist, die, durch eine Reaktion (*par contre-coup*) und eine sekundäre Weise, absolute Erhebungen, lateralen Druck, Biegungen, Faltungen, Brüche, Absackungen, Verwerfungen usw. zustande gebracht werden konnte; aber nichts erlaubt uns zu glauben, dass eine unter der Erdoberfläche agierende Ursache, d. h. eine erhebende Kraft sie erzeugt hat.
2. Die Störungen des Bodens sind die komplexen Ergebnisse des Zurückziehens (*retrait*), der Schrumpfung, der Faltungen und des Sturzes.
3. Dass die magmatischen Stoffe (Granite, Porphyren, Trachyte, Basalte, usw.), nicht im Entferntesten den Boden erhoben und zerrissen haben, sondern lediglich vom Zerreißen des Bodens und durch dessen Zurückziehen sowie von Brüchen profitiert haben, um herauszukommen, durchzusickern und sich nach Außen zu verbreiten.⁷⁴

Jetzt war Sueß völlig ausgerüstet. Er war bereit, seinen eigenen Gedanken über das Wesen der Gebirgsbildung Ausdruck zu geben. Dies geschah in seinem ersten Buch tektonischen Inhalts, in der „Entstehung der Alpen“, 1875, das für immer das Panorama des tektonischen Denkens änderte.

In diesem Büchlein von nur 168 Seiten ohne Abbildungen zeichnete Sueß ein Bild der Gebirgsstruktur, das von unseren modernen Vorstellungen kaum abweicht: Er behauptete dort ganz kategorisch:

„Immer deutlicher zeigt sich schon bei diesen ersten Betrachtungen, dass gleichförmige Bewegungen grosser Massen im horizontalen Sinne einen viel wesentlicheren Einfluss auf die heutige Gestaltung des Alpensystems gehabt haben, als die bisher allzusehr betonten vertikalen Bewegungen einzelner Theile, [...]“⁷⁵

Obwohl dieses Bild auch mit den Vorstellungen von Élie De Beaumont zum Teil vereinbar war, glaubte Sueß in den Ideen von Prévost seinen eigenen Ideen viel näher stehende Vorstellungen zu finden:

„Während aber schon Beaumont an der Stelle des Wortes „*élévation*“ die Bezeichnung „*ridement*“ gesetzt haben wollte, leugnete sein scharfsinniger Gegner Const. Prévost ausdrücklich und mit Bestimmtheit das Vorhandensein

73 PRÉVOST, 1839, S. 430, Übersetzung aus dem Französischen durch den Verfasser

74 PRÉVOST, 1840, S. 186; Übersetzung aus dem Französischen durch den Verfasser

75 SUESS, 1875, S. 25

irgendeiner centripetalen⁷⁶, erhebenden Kraft. Nach Prévost wären die Erhebungen nur eine sekundäre Folge benachbarter Senkungen, wie dies auch vor ihm Deluc behauptete.⁷⁷

Diese Ideen gaben ihm zudem die Vorstellung, dass die großen Gebirge doch einseitige Strukturen sein sollen und nicht symmetrisch gebaute Strukturen:

„Man bemerkt sofort, dass die Anschauungen L. v. Buch's und Hopkins' eine symmetrische, jene von Prévost eine asymmetrische, einseitige Anordnung der einzelnen Gebirgsglieder [...] voraussetzt.“⁷⁸

Schon im zweiten Kapitel seines Buches teilte Sueß seinen Lesern mit, was er von dem Bau großer Gebirge hält:

„Wenn nach dem Vorbergehenden nicht das Hervor-tauchen grosser eruptiver Centralmassen, sondern eine in ihren Wirkungen durch entgegenstehende ältere Gebirge beeinflusste mehr oder minder horizontale und gleichmäßige Gesamtbewegung die Ursache der Aufrichtung unserer Gebirgsketten sein soll, so entsteht sofort die weitere Frage, ob die Quelle dieser Bewegung innerhalb des einzelnen Gebirgszweiges zu suchen sei, oder ob irgend eine allen Theilen des Alpen-Systems, vom Appennin bis zu den Karpathen, gemeinschaftliche Ursache dieser grossartigen Erscheinung zu Grunde liege. Schon der Verlauf der Ketten deutet auf die zweite Annahme hin, denn alle die genannten Ketten zeigen in ihren Streichen das Bestreben, gegen Nordwest, gegen Nord, oder gegen Nordost gekrümmte Bogen zu bilden, in ihrem Baue aber tritt zwischen den nördlichen und den südlichen Abhängen in übereinstimmender Weise eine so weitgehende Verschiedenheit hervor, dass an der Gleichartigkeit und Gemeinsamkeit der bewegend Kraft kaum ein Zweifel bleibt, und sich gleichsam eine Aussenseite und eine Innenseite jedes einzelnen näher bekannten Gebirgszweiges unterschieden hat.“⁷⁹

Am Ende dieses Kapitels, fasste er seine Ansichten zusammen und in dieser Zusammenfassung sehen wir zum ersten Mal in seinem gedruckten Werk einen von ihm sehr beliebten und in seinem ganzen Leben immer wieder mit Vorzug benützten Vergleich zwischen den Gebirgen und Wellen, was uns zu den Vorstellungen von den Gebrüder Rogers zurückbringt und in diesem Aufsatz mit dem begonnenen Zyklus endlich schließt:

Blicken wir zurück.

„Von Nordwest nach Südost erstreckt sich der Appennin. Nahezu dieselbe Richtung verfolgen die dinarischen Alpen. Mehr nach Ost verlaufen die Züge in Croatien und Slavonien. Rein West-Ost ist das Streichen des Ivancica-Gebirges. Mehr gegen Nordost wendet sich das ungarische Mittelgebirge. In rein nordöstlicher Richtung gehen die Karpaten aus dem Nordsaume der Alpen hervor. Je nördlicher diese Zweige sind, umso deutlicher ist ihr Zusammenhang mit dem gemeinschaftlichen Hauptstamme, den Alpen, und selbst der Appennin zeigt an seinem nördlichen Ende Spuren eines Anschmiegens an diese. Im Appennin, dem ungarischen Mittelgebirge und den Karpaten, in allen genauer bekannten Strahlen ist der einseitige Bau ausser Zweifel; dabei ist die Bruchseite stets dem Süden angewen-

det. Im Inneren der Alpen verfolgen wir die Spuren eines gleichen Baues. Den Alpen selbst ist noch ein in gleichem Sinne einseitiges Gebirge vorgelagert, nämlich der Jura.

Wie Wellen auf einem Wasserspiegel folgen sich diese Ketten, gestaut und abgelenkt am central-Plateau Frankreich's, bei Dôle, an den südlichen Enden des Schwarzwaldes und der böhmischen Masse und in ihrem Verlaufe wesentlich durch diese bedingt. Wo diese gegen nord zurücktreten und flach werden, treten die grossen Wellen auseinander und zeigen deutlicher ihren einseitigen Bau.“⁸⁰

Ergebnis: Einseitiger Bau als Ausdruck des Wesens der Gebirgsbildung

Eduard Sueß war also der erste Geologe, der alle großen Gebirge unserer Erde einer einheitlichen struktureologischen Studie unterzog und sagte, dass sie alle asymmetrisch gebaut sind. Vor ihm hatten die Gebrüder Rogers und Dana dasselbe vermutet, aber diese hatten noch nicht die gesamte vorhandene geologische Information über die Gebirge der Erde bearbeitet. Die genauen Kartierungsarbeiten der Gebrüder Rogers in den Appalachen und die fast gleichzeitigen Arbeiten im Juragebirge von Jules Thurmann (1804–1855) zeigten, dass diese Gebirge asymmetrisch sind und, um diese Asymmetrie zu erzeugen, irgendeine Entkopplung der sich faltenden Schichten von ihrem Sockel erforderlich ist. Die Gebrüder Rogers glaubten dieses Problem dadurch zu lösen, indem sie ein flüssiges Substrat für den Faltenwurf annahmen. Erst viel später erkannten die Geologen, dass ein einseitiges Gebirge dadurch entsteht, indem eine Schmierschicht unter der sich faltenden Schichtdecke vorhanden ist und den Widerstand gegenüber der faltenden Kraft auf die gesamte Breite des Gebirges ausweitet. August Buxtorf nannte dies 1907 Abscherung und zeigte, wie sich die Jurafalten als Deformation einer Abscherungsdecke gebildet hatten.

Die Theorie der Gebirgsstruktur von Sueß zeigte schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts, dass alle Gebirge im Grunde genommen Abscherungsstrukturen und deshalb alle einseitig sind. In der vermutlich letzten Skizze der Gebirgsstruktur, die er zeichnete, verdeutlichte Sueß dies besonders. (Abb. 12). Erst mit dem Aufkommen der Plattentektonik erkannte man, dass die Subduktion den Hauptabscherungshorizont der Gebirgsbildung darstellt und notwendigerweise eine asymmetrische Struktur auf alle Gebirge aufprägt. Die subduzierende ozeanische Lithosphäre (oder die unterschiebende kontinentale Lithosphäre in Kollisionsgebirgen) stellt den Gleithorizont dar und die Stirnregion der aufliegenden Platte fungiert als ein den einseitigen Schub verwirklichender Kolben. Dieser einseitige Schub verliert auf der Gleitfläche allmählich seine Kraft wegen des auf der gesamten Fläche verbreiteten Widerstandes entlang des Abscherungshorizonts. Dadurch klingt die Deformation der abgescherten Decke allmählich aus, je weiter sie vom Kolben entfernt ist. Auf der Seite des Kolbens gibt es keinen Kraftverlust; auf dem Abscherungshorizont gibt es einen immer größer werdenden Kraftverlust, je weiter man sich von dem Kolben entfernt. In mechanischem Sinn sind natürlich

76 Hier liegt ein Schreibfehler von Sueß vor: Er muss versehentlich centripetal geschrieben haben, anstatt centrifugal.

77 SUESS, 1875, S. 3

78 Ebd., S. 7

79 Ebd., S. 26-27

80 SUESS, 1875, S. 45

die Kräfte auf den beiden Seiten gleich, aber nicht in Hinblick auf ihre Wirkung. Darin liegt das Wesen des Ausdrucks „einseitiger Schub“ und es ist kein Unsinn davon zu sprechen. Ohne diese Einseitigkeit anzuerkennen, wäre es nicht möglich, das Wesen der Gebirgsbildung zu verstehen.

Das alles musste die Geologie ab den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts wiederentdecken, weil die einfache und zutreffende Idee des einseitigen Schubes in der Gebirgsbildung von Sueß' Nachfolgern in einer pedantischen Weise verspottet wurde, indem sie dem ehemaligen Studenten des Ingenieurwesens unverständlichlicherweise vorwarfen, die einfachsten Grundzüge der Newtonschen Mechanik nicht zu wissen! Ihre Modelle der Gebirgsbildung, die angeblich mit der Newtonschen Mechanik in vollem Einklang standen, aber die Geologie weniger berücksichtigten, verfielen, diejenigen von Sueß, die der Geologie so treu wie möglich waren, sind geblieben.

Danksagung

Ich danke Frau Dr. Daniela Angetter für ihre sehr freundliche und gewissenhafte Hilfe bei der Verbesserung der Sprache dieser Schrift.

Literaturverzeichnis

- AMPFERER OTTO, HAMMER WILHELM, Geologischer Querschnitt durch die Ostalpen vom Allgäu zum Gardasee, in: Jahrbuch der kaiserlich-königlichen Geologischen Reichsanstalt 61, 1911
- ARGAND ÉMILE, La tectonique de l'Asie, in: Congrès Géologiques International, Comptes Rendus de la XII^{me} session, Premier Fascicule, Liège 1924
- BERKELEY EDMUND, BERKELEY DOROTHY SMITH, George William Featherstonhaugh – The First U.S. Government Geologist: History of American Science and Technology Series, Tuscaloosa, London 1988
- BITTNER ALEXANDER, Über einige geotektonische Begriffe und deren Anwendung, in: Jahrbuch der kaiserlich-königlichen Geologischen Reichsanstalt 37, 1887
- BUCH LEOPOLD VON, Ueber geognostische Erscheinungen im Fasathal. Ein Schreiben an den Geheimrath von Leonhard, in: v. Leonhard's Mineralogisches Taschenbuch für das Jahr 1824, [1824a], (nachgedruckt in: BUCH'S LEOPOLD VON, Gesammelte Schriften, Bd. 3, Hrsg. J. EWALD, J. ROTH, W. DAMES, Berlin 1877)
- BUCH LEOPOLD VON, Ueber die geognostischen Systeme von Deutschland. Ein Schreiben an den Geheimrath von Leonhard, in: v. Leonhard's Mineralogisches Taschenbuch für das Jahr 1824, [1824b] (nachgedruckt in: BUCH'S LEOPOLD VON, Gesammelte Schriften, Bd. 3, Hrsg. J. EWALD, J. ROTH, W. DAMES, Berlin 1877)
- BUXTORF AUGUST, Geologische Beschreibung des Weissensteintunnels und seiner Umgebung, in: Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, Neue Folge, 21. Lieferung, 1907
- BUXTORF AUGUST, Prognosen und Befunde beim Hauensteinbasis- und Grenchenbergtunnel und die Bedeutung der letztern für die Geologie des Juragebirges, in: Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel 27, 1916
- CRAIG GORDON YOUNGER, MCINTYRE D. B., WATERSTON C. D., James Hutton's Theory of the Earth: The Lost Drawings, 1978
- DANA JAMES DWIGHT, Geological results of the earth's contraction in consequence of cooling, in: American Journal of Science and Arts, 2nd series, Bd. 3, 1847
- DANA JAMES DWIGHT, Manual of Geology: Treating of the Principles of the Science with special reference to American Geological History, for the use of colleges, academies and schools of science, Philadelphia 1863
- DANA JAMES DWIGHT, On some results of the earth's contraction from cooling, including a discussion of the origin of mountains and the nature of the Earth's interior, in: American Journal of Science and Arts, 3rd. series, Bd. 5, 1873
- DANA JAMES DWIGHT, Manual of Geology: Treating of the Principles of the Science with special reference to American Geological History, New York 1875
- DUTTON CLARENCE EDWARD, Critical observations on theories of the Earth's physical evolution, in: The Penn Monthly 7, 1876
- EATON AMOS, An Index to the Geology of the Northern States with Transverse Sections extending from Susquehanna River to the Atlantic, crossing Catskill Mountains to which is prefixed a Geological Grammar, second edition wholly written over anew and published under the Direction of the Troy Lyceum, Troy, N. Y. 1820
- ÉLIE DE BEAUMONT LÉONCE, Notice sur les Systèmes des Montagnes 3, 1852
- GORTANI MICHELE, Idee precorritrici di Luigi Ferdinando Marsili, in: Memoria intorno a Luigi Ferdinando Marsili, Bologna 1930
- HALL JAMES (SIR), On the vertical position and convolutions of certain strata and their relation with granite, in: Transactions of the Royal Society of Edinburgh 7, Teil 1, 1812
- HITCHCOCK EDWARD, First Anniversary Address before the Association of American Geologists, at their second annual meeting in Philadelphia, April 5, 1841, in: The American Journal of Science and Arts 41, 1841, (Auch separat gedruckt von B. L. Hamlen in New Haven und in letzter Zeit wieder nachgedruckt von Kessinger Publishing, Montana)
- JOHNSON ARVID M., Physical Processes in Geology, San Francisco, 1970
- KOBER LEOPOLD, Der Bau der Erde, Berlin 1921
- LÖWL FERDINAND, Geologie: in: Die Erdkunde, Eine Darstellung ihrer Wissensgebiete, ihrer Hilfswissenschaften und der Methode ihres Unterrichtes, XI. Teil, Hrsg. M. KLAR, Leipzig, Wien, 1906
- MASSON HENRI, Un siècle de géologie des Préalpes: de la découverte des nappes à la recherche de leur dynamique, in: Eclogae Geologicae Helvetiae 69, 1976
- MERRILL GEORGE P., Contributions to a History of American State Geological and Natural History Surveys, in: Smithsonian Institution United States National Museum Bulletin 109, 1920
- MERRILL GEORGE P., The First One Hundred Years of American Geology, New Haven 1924
- MÜLLER WALTER H., BRIEGEL UELI, Mechanical aspects of the Jura overthrust, in: Eclogae Geologicae Helvetiae 73, 1980
- MÜLLER WALTER H., HSÜ KENNETH J., Stress distribution in overthrusting slabs and mechanics of Jura deformation, in: Rock Mechanics, Supplement, Bd. 9, 1980
- PARTSCH PAUL MARIA, Katalog der Bibliothek des K. K. Hof-Mineralien-Cabinetes in Wien, Hrsg. Geologische Reichsanstalt, Wien 1851

- PFUFF FRIEDRICH, Der Mechanismus der Gebirgsbildung, Heidelberg 1880
- PRÉVOST CONSTANT, [Diskussionsbemerkung ohne Titel], in: Bulletin de la Société Géologique de France 10, 1839
- PRÉVOST CONSTANT, [Diskussionsbemerkung ohne Titel], in: Bulletin de la Société Géologique de France 11, 1840
- RATH GERHARD VON, Ein Ausflug nach Calabrien, Bonn 1871
- RATH GERHARD VON, Der Vesuv: Sammlung Gemeinverständlicher wissenschaftlicher Vorträge, Hrsg. RUDOLF VIRCHOW, FRANZ VON HOLTZENDORFF, VIII. Serie, Heft 185, Berlin 1873
- DE RAZOUMOWSKY GRIGORIJ, Voyage Minéralogiques dans le Gouvernement d'Aigle, et une Partie du Valais suivie de la Relation d'une Excursion sur le Lac de Lucerne, ou Lac des Quatre Cantons, Lausanne 1784
- RODGERS JOHN, Evolution of thought on structure of Middle and Southern Appalachians, in: Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 33, 1949
- RODGERS JOHN, The Tectonics of the Appalachians, New York 1970
- ROGERS HENRY DARWIN, The Geology of Pennsylvania - A Government Survey with a General View of the Geology of the United States - Essays on the Coal-Formation and Its Fossils, and a Description of the Coal-Fields of North America and Great Britain, Bd. 1, Philadelphia 1859 [1859a]
- ROGERS HENRY DARWIN, The Geology of Pennsylvania - A Government Survey with a General View of the Geology of the United States - Essays on the Coal-Formation and Its Fossils, and a Description of the Coal-Fields of North America and Great Britain, Bd. 2, Teil 1, Philadelphia 1859 [1859b]
- ROGERS HENRY DARWIN, The Geology of Pennsylvania - A Government Survey with a General View of the Geology of the United States - Essays on the Coal-Formation and Its Fossils, and a Description of the Coal-Fields of North America and Great Britain, Bd. 2, Teil 2, Philadelphia 1859 [1859c]
- ROGERS HENRY DARWIN, The Geology of Pennsylvania - A Government Survey with a General View of the Geology of the United States - Essays on the Coal-Formation and Its Fossils, and a Description of the Coal-Fields of North America and Great Britain, Mappe mit 5 gefalteten farbigen geologischen Karten, Philadelphia 1859 [1859d]
- ROGERS WILLIAM BARTON, ROGERS HENRY DARWIN, On the physical structure of the Appalachian Chain. as exemplifying the laws which have regulated the elevation of great mountain chains generally, in: Reports of the First, Second and Third Meetings of the Association of American Geologists and Naturalists, at Philadelphia in 1840 and 1841, and at Boston in 1842, embracing its Proceedings and Transactions, Boston 1843; (Diese klassische Arbeit wurde, mit wenigen Korrekturen nachgedruckt in: ROGERS WILLIAM BARTON, A Reprint of Annual Reports and Other Papers on the Geology of the Virginias, New York 1884)
- DE SAUSSURE HORACE-BÉNÉDICT, Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève, tome second, Genève 1786
- DE SAUSSURE HORACE-BÉNÉDICT, Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève, tome quatrième, Neuchâtel 1796
- SCHEUCHZER JOHANN JAKOB, Helvetiae Stoicheiographia. Orographia et Oreographia. – Oder Beschreibung Der Elementen/ Grenzen und Bergen des Schweitzerlands. Der Natur-Historie des Schweitzerlands. Erster Theil, Zürich 1716
- SCHEUCHZER JOHANN JAKOB, Kupfer-Bibel In welcher die Physica Sacra Oder Beheiligte Natur-Wissenschaft Derer In Heil. Schrifft vorkommenden Natürlichen Sachen Deutlich erklärt und bewährt, Hrsg. JOHANN ANDREAS PFEFFEL, Augsburg und Ulm 1731
- ŞENGÖR A. M. CELÂL, Plate tectonics and orogenic research after 25 years: A Tethyan perspective, in: Earth Science Reviews 27, 1990
- ŞENGÖR A. M. CELÂL, NATAL'IN BORIS A., Eduard Suess and the Altaids: What is in a name? in: Magmatism and Metallogeny of the Altai and Adjacent Large Igneous Provinces with an introductory Essay on the Altaids, Hrsg. R. SELTMANN, A. BORISENKO, G. FEDOSEEV (= IAGOD Guidebook Series 16), London 2007
- STILLE HANS, Grundfragen der Vergleichenden Tektonik, Berlin 1924
- STUDER BERNHARD, Geologie der Schweiz, erster Band. Mittelzone und südliche Nebenzone der Alpen, Bern, Zürich 1851
- STUDER BERNHARD, Geologie der Schweiz, zweiter Band. Nördliche Nebenzone der Alpen. Jura und Hügelland, Bern, Zürich 1853
- Suess EDUARD, Über die Spuren eigentümlicher Eruptions-Erscheinungen am Dachstein-Gebirge, in: Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, math.-nat. Classe, 40, 1860
- Suess EDUARD, Der Boden der Stadt Wien nach seiner Bildungsweise, Beschaffenheit und seinen Beziehungen zum bürgerlichen Leben, Wien 1862
- Suess EDUARD, Untersuchungen über den Charakter der österreichischen Tertiärablagerungen. II. Über die Bedeutung der sogenannten „brackischen Stufe“ oder der „Cerithienschichten“, in: Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, math.-nat. Classe 54, 1866
- Suess EDUARD, Note sur le Gisement des Térébratules du groupe de Diphya dans l'Empire d'Autriche, in: FRANÇOIS JULES PICTET, Mélanges Paléontologiques, troisième livraison, Genève, 1867
- Suess EDUARD, Bemerkungen über die Lagerung des Salzgebirges bei Wieliczka, in: Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, math.-nat. Classe 58, 1868
- Suess EDUARD, Über den Bau der italienischen Halbinsel, in: Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, math.-nat. Classe 65, 1872
- Suess EDUARD, Die Entstehung der Alpen, Wien 1875
- Suess EDUARD, Über die Asymmetrie der nördlichen Halbkugel, in: Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien, math.-nat. Classe, Bd. 107, Abt. I, 1898, (Eine englische Übersetzung dieses Aufsatzes an Benjamin Kendall Emersons Präsidialrede von der Geological Society of America angehängt, unternommen vom Präsidenten selbst: SUESS EDUARD, Asymmetry of the northern hemisphere, in: Bulletin of the Geological Society of America 11, 1900)
- Suess EDUARD, Sur la nature des charriages, in: Comptes Rendus hebdomadaire de L'Académie de Sciences 139, 1904
- Suess EDUARD, Erinnerungen, Leipzig 1916
- Suess EDUARD, The Face of the Earth (Das Antlitz der Erde), Bd. V Indexes and Maps, Oxford 1924
- Suess EDUARD, HOCHSTETTER FERDINAND VON, Einiges über cosmogenische Hypothesen, in: Berg- und Hüttenmännisches Jahrbuch – Leoben, Bd. XIV, 1865

- TAYLOR FRANK BURSLEY, Bearing of the Tertiary mountain belt of the origin of the earth's plan, in: Bulletin of the Geological Society of America 21, 1910
- TAYLOR FRANK BURSLEY, Some points in the mechanics of the arcuate and lobate mountain structure, in: Bulletin of the Geological Society of America 32, 1921
- TAYLOR FRANK BURSLEY, North America and Asia: a comparison in Tertiary diastrophism, in: Bulletin of the Geological Society of America 39, 1928 [1928a]
- TAYLOR FRANK BURSLEY, Sliding continents and tidal and rotational forces, in: Theory of Continental Drift. A Symposium on the Origin and Movement of Land Masses both Inter-Continental and Intra-Continental, as Proposed by Alfred Wegener, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 1928 [1928b]
- TAYLOR FRANK BURSLEY, Correlation of Tertiary mountain ranges in the different continents, in: Bulletin of the Geological Society of America 41, 1930
- TAYLOR FRANK BURSLEY, Wegener's theory of continental drifting: A critique of some of his views, in: Bulletin of the Geological Society of America 43, 1933
- TIETZE EMIL, Einige Seiten über Eduard Sueß - Ein Beitrag zur Geschichte der Geologie, in: Jahrbuch der kaiserlich-königlichen Geologischen Reichsanstalt 66, 1917
- TIMOSHENKO STEPHEN P., History of Strength of Materials - with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures, New York 1953
- VACCARI EZIO, Luigi Ferdinando Marsili geologist: From the Hungarian mines to the Swiss Alps, in: Four Centuries of the World Geology Ulisse Aldrovandi 1603 in Bologna, Hrsg. GIAN BATTISTA VAI, WILLIAM CAVAZZA, Bologna 2003
- WILLIS BAILEY, The mechanics of Appalachian structure, in: Thirteenth Annual Report of the United States Geological Survey to the Secretary of the Interior 1891-'92 by J. W. Powell, Director, Part II - Geology, Washington 1893

Manuskript bei der Schriftleitung eingelangt am 24. August 2009