

Sitzungsberichte

der

Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Mathematisch-physikalische Klasse

Jahrgang 1910, 8. Abhandlung

Über die Ursachen des Kalifornischen Erdbebens von 1906

von

A. Rothpletz

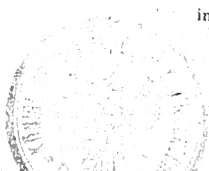
Mit 2 Tafeln

Vorgetragen am 7. Mai 1910

München 1910

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften

in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)



DRUCKSCHRIFTEN

der

KGL. BAYER. AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

(mathematisch-physikalische Klasse)

Die mit * bezeichneten Schriften sind zwar nicht in Sonderabdrücken erschienen, es kann aber das Heft der Sitzungsberichte, in dem sie gedruckt sind, zu 1 Mark 20 Pfg. bezogen werden.

In dem nachfolgenden Verzeichnisse ist A. = Abhandlungen, Sb. = Sitzungsberichte.

- | | |
|---|----------|
| Bergeat, Alfr. Die äolischen Inseln. XX, 1 1899 | 16 M |
| Egger, Jos. G. Foraminiferen und Ostrakoden der Kreidebildungen in den bayerischen Alpen. XXI, 1 1899 | 14 M |
| Fraunhofer, Jos. Gesammelte Schriften. 1888 | 12 M |
| Fuchs, J. Nep. Chemie und Mineralogie. Rede. 1824 | 60 S |
| — Theoretische Bemerkungen über die Gestaltungszustände des Eisens. VII, 1 1852 | 60 S |
| Glunzler G., Das Eruptivgebiet zwischen Weiden und Tirschenreut und seine kristalline Umgebung 1905, 2. | 1 M |
| Groth, Paul. Ueber die Molekularbeschaffenheit der Krystalle. Festrede. 1888 | 80 S |
| — Führer durch die Mineraliensammlung des bayerischen Staates. 1891. 8 ^o | 1 M |
| * Gumbel, Karl Wilh. Ueber das Vorkommen des Antozon-haltigen Flussspathes bei Wölfsenberg. 1863 I S. 301. | |
| * — Ueber das fränkische Knochenbett des Keupers und seine Pflanzenschichten. 1864 I S. 215. | |
| * — Vorkommen von unteren Triassschichten in Hochasien. 1865 II S. 348. | |
| * — Ueber neue Funde von Gosauschichten und Vilsenkalk. 1866 II S. 158. | |
| * — Weitere Mittheilungen über das Vorkommen von Phosphorsäure in Schichtgesteinen Bayerns. 1867 II S. 147. | |
| * — Ueber die geognostischen Verhältnisse des Montblanc nach Favre. 1867 II S. 603. | |
| * — Ueber Pyrophyllit als Versteinigungsmittel. 1868 I S. 498. | |
| — Ueber Gliederung der Procänschichten in Böhmen. X, 2 1868 S. 501 | 2 M 60 S |
| * — Der Riesvulkan. 1870 I S. 153. | |
| * — Ueber die Foraminiferen der Gosau- und Belemniten-Schichten. 1870 II S. 278. | |
| * — Geognostische Verhältnisse des Ulmer Cementmergels und über seine Foraminiferen. 1871 S. 38. | |
| — Sogenannte Nulliporen, I. Abtlg. Nulliporen des Pflanzenreichs (Lithothamnium). XI, 1 1871 S. 1 | 1 M 50 S |
| — Desgl. II. Abtlg. Nulliporen des Thierreichs (Dactyloporen). XI, 1 1871 S. 60 | 2 M 40 S |
| * — Gletschererscheinungen aus der Eiszeit. 1872 S. 223. | |

Sitzungsberichte
der
Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Mathematisch-physikalische Klasse
Jahrgang 1910, 8. Abhandlung

Über die Ursachen des
Kalifornischen Erdbebens von 1906

von

A. Rothpletz

Mit 2 Tafeln

Vorgetragen am 7. Mai 1910

München 1910
Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)

Seit ungefähr 30 Jahren pflegt man die Erdbeben in drei Gruppen einzuteilen, die der Verschiedenartigkeit ihrer Entstehung entsprechen sollen. Begrifflich unterscheiden sich diese Abteilungen sehr gut. Der Einsturz unterirdischer Hohlräume, das Empordringen vulkanischer Massen in und durch die Erdkruste und Verschiebungen von Massenteilen innerhalb der Erdkruste sind die Vorgänge, welche man für die Erdbeben verantwortlich macht, und je nachdem spricht man von Einsturz-, vulkanischen und Dislokations- oder tektonischen Beben.

Der Klarheit und Schärfe dieser Unterscheidung entsprechen die Erfolge aber nicht ganz, die man bisher bei den Versuchen erzielt hat, die einzelnen Erdbeben, die zu unserer Kenntnis gekommen sind, nach diesem Schema in das ihnen zukommende Fach einzureihen. Die Meinungen gehen da oft recht auseinander und wenn in den meisten Fällen schließlich doch eine Einigkeit erzielt worden ist, so beruht das vielleicht mehr auf Übereinkunft als auf Sicherheit der Erkenntnis. So hat man sich, um nur ein Beispiel anzuführen, wohl ziemlich allgemein für die so häufigen kalabrischen Erdbeben der Auffassung von E. Sueß 'angeschlossen, wonach die einen vulkanische, die sogenannten peripherischen aber Dislokations- und zwar Senkungsbeben sind. Es ist aber bisher bei keinem dieser Beben gelungen, eine wirkliche tektonische Bodensenkung nachzuweisen und damit für diese Einteilung statt der nur hypothetischen eine tatsächliche Grundlage zu schaffen.

Viel günstiger scheinen die Verhältnisse in Kalifornien zu liegen, wo fern von vulkanischen Erscheinungen bei dem Beben

von 1906 auf einer tektonischen Spalte in horizontaler Richtung Bodenverschiebungen eintraten im Ausmaße von 3—6 Metern und auf eine Erstreckung von 300 Kilometern. Die tektonische Natur dieses Bebens erschien von Anfang an klar zu sein. Auf einer schon vorhandenen Dislokationsspalte hatten tangentielle Spannungen in der Erdkruste zu einer Schollenverschiebung geführt, die plötzlich mit einem Ruck eintrat und so die Erdoberfläche ringsum erbeben machte. Das Erschütterungsgebiet hat ungefähr die doppelte Größe des Deutschen Reiches und steht in einer nicht zu verkennenden Beziehung zum Verlaufe jener Verwerfungsspalte, so daß man dieses Erdbeben geradezu als tektonisches Spaltenbeben bezeichnen könnte.

Indessen bestehen doch auch hier für diese Auffassung nicht unbedeutende Schwierigkeiten, die noch schärfer hervorgetreten sind, seitdem der I. Band von der State earthquake investigation Commission 1908 erschienen ist, in dem das Erdbeben von 1906 auf 450 Quartseiten und einem Atlas mit 40 Tafeln in Großfolio nach allen Richtungen hin zur Darstellung gekommen ist mit Ausnahme der instrumental-seismologischen Seite, welche dem zweiten noch nicht erschienenen Bande vorbehalten ist. Dieses ausgezeichnete und fundamentale Werk verdankt dem Zusammenwirken von acht amerikanischen Gelehrten seinen Ursprung, welche von der Regierung des Staates Kalifornien als staatliche Erdbeben-Untersuchungskommission unter dem Vorsitze von Andrew C. Lawson bestellt wurden und durch das Carnegie-Institut in Washington die zur Ausführung der ihnen gestellten Aufgaben erforderlichen Geldmittel erhielten.

Das Eigenartigste dieses Erdbebens liegt ohne Zweifel in der Bodenbewegung, welche in dieser Form bisher noch bei keinem anderen Beben beobachtet worden zu sein scheint. Von besonderem Interesse ist deshalb das Kapitel, in dem (S. 114—145 mit Tafel 24 und 25 des Atlas) die staatlichen Geodäten John F. Hayford und A. L. Baldwin die Ergebnisse mitteilen, zu denen eine erneute Triangulation des Erdbebengebietes (1906/07) und ein Vergleich mit den zwei früheren Aufnahmen (1854—66 und 1870—92) geführt haben. Hierdurch

erhalten wir für die Größe und Richtung der Ortsveränderungen bestimmte Angaben. Aber ein Vergleich der Messungen aus den zwei ersten Triangulationsperioden ergab, daß solche Veränderungen auch schon in deren Zwischenzeit eingetreten sind. Damit wird natürlich das Problem noch viel verwickelter, weil die Ortsveränderungen der ersten Zwischenzeit (1866—70) in Richtung und Größe vielfach von denen der zweiten Zwischenzeit (1892—1906) abweichen.

Die beiden Geodäten haben drei Annahmen gemacht, welche dieser Komplikation gewisse Grenzen setzen. Die alte Triangulationsbasis Mocho-Mont Diabolo blieb unverändert und Ortsveränderungen traten nur im April 1906 und im Oktober 1868 oder wenigstens um diese Zeit („about that time“) ein. Für die letzte Annahme war bestimmend, daß am 21. Oktober 1868 ein heftiges Erdbeben stattgefunden hat, dessen Erschütterungsgebiet in der Hauptsache mit dem von 1906 zusammenfiel, wenn es auch etwas kleiner war. Leider wissen wir von den Begleiterscheinungen dieses Bebens nur sehr wenig, weil ein eingehender, von einer Kommission von Gelehrten verfaßter Bericht nicht veröffentlicht worden und das Manuskript vollständig verloren gegangen ist — die Behörden befürchteten, daß sein Bekanntwerden der Entwicklung der erst 18 Jahre alten Stadt schaden könne. Das Wenige, was heute noch festzustellen war, ist im Report 1908 auf S. 434—48 zusammengetragen. Eine alte Verwerfungsspalte auf der Westseite der Berkeley hills, die in einer Entfernung von 30 Kilometer der S. Andreas-Spalte parallel verläuft — auf der Ostseite der Bucht von S. Francisco —, öffnete sich in einer Länge von 32 Kilometer. Ob aber dabei vertikale oder horizontale Bodenverschiebungen eingetreten sind, ist unbekannt.

Lawson (Report, S. 149) ist der Meinung, daß die Ortsveränderungen der ersten Zwischenzeit (1866—70) nicht auf dies Erdbeben von 1868 bezogen werden dürfen, daß sie überhaupt nicht plötzlich, sondern ganz langsam in einem Zeitraume von vielleicht 32 Jahren entstanden seien und auch dann noch weiter anhielten 16 Jahre lang bis 1906. Zur Begründung

wird verschiedenes angeführt, worauf ich später eingehen werde. Man sieht aber schon jetzt, daß wenn die Annahme einer langsamen Bewegung zutreffen sollte, die Zahlen, welche die Geodäten für die zwei Bewegungsarten berechnet haben, nicht genau sein können. Wo nämlich beide dieselbe Richtung hatten, wird die Weite der letzten Bewegung auf Kosten der ersten zu groß, wo die Richtungen entgegengesetzt waren, werden die Zahlen für beide zu klein angegeben sein. Die absolute Bewegungsweite für 1906 wäre nur dann durch Triangulation genau festzustellen gewesen, wenn kurz vor dem Beben ebenfalls eine Vermessung vorgenommen worden wäre.

Auch die andere Voraussetzung, daß die Basis Mocho-Diablo als unverändert angenommen werden könne, wird von Lawson beanstandet. Er meint, ihre wirklich unveränderte Länge stünde nicht im Widerspruch mit einer gleichmäßigen Verlagerung beider Endpunkte nach SO, welches ja im Osten der Spalte die vorherrschende Bewegungsrichtung während des Bebens 1906 war. Eine solche Verlagerung hätte aber wiederum eine wichtige Folge für die Triangulation und ihrer Vernachlässigung wäre es zuzuschreiben, daß die südöstlichen Bewegungen durchschnittlich kürzer befunden wurden als die nordwestlichen. Der Betrag der Basisverschiebung müßte also danach den ersteren zu, den letzteren abgezählt werden. Hierdurch würde zwar die Erklärung der Bewegung von 1906 im Sinne Lawsons erleichtert werden, aber es scheint mir doch fraglich, ob eine solche Auslegung statthaft ist. Diablo liegt in einer Breite, die weiter im Westen nur nördliche, Mocho in einer solchen, wo nur südliche Bewegungen vor 1906 nachgewiesen sind. Eine gegenseitige Entfernung beider Punkte, die aber durch die Vermessung nicht nachgewiesen wurde und mithin wahrscheinlich auch nicht eingetreten ist, wäre deshalb eher zu vermuten als eine gleichsinnige Südbewegung und dies spricht also für die Annahme, daß überhaupt keine Veränderung vorliegt. Ansonst dürften ja doch auch die Punkte Red Hill und Rocky Mound sich nicht gleichzeitig, dieser nach Nordosten, jener nach Norden bewegt haben. Allerdings sagt der geo-

dätische Bericht, daß die Werte für diese Punkte etwas zweifelhaft sind, aber diese Zweifel beziehen sich weniger auf die Richtung als auf das Ausmaß der Bewegungen und sie berechtigen in keiner Weise das Gegenteil, nämlich eine südliche Bewegung als wahrscheinlicher anzusehen.

Wenn ich somit diese zweite Beanstandung nicht für genügend begründet erachten kann, so scheint mir der ersteren doch ein größerer Wert beigelegt werden zu müssen. Daß im Norden ein Gebiet von ungefähr 2500 Quadratkilometer, das durch die Stationen Mount Talmapais, Farallon Lighthouse, Ross Mountain und Chaparral begrenzt wird, um 1.6 Meter als Ganzes in Richtung N 11° W verlagert worden sei, daß zu dieser Scholle wahrscheinlich auch noch Sonoma Mountain zugehöre und daß dies alles ohne irgend eine innere Drehung oder Zerrung sich als ein einheitlicher Block vorwärts bewegt habe, haben die beiden Geodäten als ein Ergebnis ihrer Messungen (l. c., S. 132) mitgeteilt. Ich habe den Eindruck, daß sie dabei unter dem Einflusse einer Zwangsvorstellung standen, die ihnen durch die Bewegungsart von 1906 auferlegt worden war. Faßt man die Karte (Taf. I) ins Auge, so sieht man sofort, daß die Bewegungsrichtungen in diesem Block untereinander Winkel bis zu 30° aufweisen und daß sie ziemlich regelmäßig gegen NNW divergieren, denn die größte Ablenkung nach W liegt am SW-, die größte nach O am NO-Rande jenes Blockes. Die gemessenen Strahlen bilden einen Bündel, der die größte Ähnlichkeit mit dem Radienbüschel eines Kreisausschnittes von 30° hat. Mithin haben sich die einzelnen Punkte bei ihrer radialen Bewegung nach NW zugleich in peripherischer Richtung auseinander bewegt und es muß eine Art von Zerrung (Distortion) eingetreten sein.

Die hierfür maßgebenden Punkte sind in der Reihenfolge ihrer Bewegungsrichtung von W nach O

		m	
Farallon Light-house	N 27 W	1.39	Bewegung
Talmapais	N 12 W	1.64	
Chaparral	N 7 W	1.83	

		m	
Bodega	N 4 W	1.62	Bewegung
Ross Mountain	N 2 O	1.70	
Sonoma Mountain	N 3 O	> 1.24	

Nehmen wir als mittleren Radius die Linie N 12 W und ziehen wir auf diese von den 6 Punkten aus senkrechte Linien, dann ergibt sich von S nach Nord fortschreitend als Aufeinanderfolge:

Farallon Light-house	1.39	N 27 W
Talmapais	1.64	N 12 W
Sonoma	> 1.24	N 3 O
Bodega	1.62	N 4 W
Chaparral	1.83	N 7 W
Ross Mountain	1.70	N 2 O

Sonoma ist mit 1.24 vielleicht etwas zu niedrig eingeschätzt, weil nur der Vergleich der Messungen von 1860—1906 die Zahl 1.24 gab, eine Trennung der älteren und jüngeren Bewegung aber nicht durchzuführen war, und es ungewiß ist, ob die von 1906, wie die Geodäten meinen, gleich O war.

Aus dieser Reihe ist deutlich zu erkennen, daß die Größe der Bewegung abnimmt in der Richtung von N nach S und gleichzeitig auch von dem mittleren Radius sowohl gegen O als auch nach W. Deshalb ist der Unterschied zwischen dem westlichen Farallon und Talmapais größer als zwischen diesem und Chaparral, obwohl für letzteres die Entfernung fast doppelt so groß ist. Das mag auch der Grund sein für die verhältnismäßig kleine Veränderung bei dem östlichen Sonoma. Eine Ausnahme macht nur Bodega mit 1.62, welches doppelt soweit von Talmapais als von Chaparral entfernt liegt, und doch nicht weiter als Talmapais selbst verschoben wurde. Zwischen diesen beiden Orten ist also eine Zerrung oder Distortion nicht eingetreten.

Mit Bezug auf die Karte ist noch darauf aufmerksam zu machen, daß die Messungen der ersten Bewegung für alle anderen Punkte teils nicht ganz sicher teils durch Interpolation gewonnen sind und darum für unsere Auffassung nicht maßgebend sein können.

Somit kommen wir zu dem Schlusse, daß die Ortsveränderungen im Norden von S. Francisco nicht das Bild einer einfachen Schollenverschiebung geben, sondern das einer durch Ausdehnung sich vergrößernden Fläche.

Die Ausdehnung selbst war ungleichmäßig, schritt in nach NW gerichteten und auseinandergehenden Linien fort, die aber wahrscheinlich nicht gerade, sondern gekrümmt sind und zwar gegen Osten konkav. Nach Westen jedoch kann ihre Krümmung nicht einmal vermutungsweise bestimmt werden.

Im Norden von S. Francisco liegt nur noch ein Punkt, für den eine Ortsveränderung vor der zweiten Triangulation nachgewiesen worden ist, das ist Rocky Mound. Die Bewegung ist kleiner als bei den anderen 6 Punkten und N 80° gerichtet, also noch um 5° weiter nach O als bei Sonoma. Dies fügt sich sehr wohl in das vorige Bild ein, wonach gegen Osten die Bewegung an Stärke abnimmt und zugleich in dieser Richtung abgelenkt wird.

Wir wenden uns nun dem Süden von S. Francisco zu. Da ist Loma Prieta der einzige Punkt, für den mit Sicherheit die Verlagerung vor der zweiten Triangulation gemessen werden konnte mit 3 Meter in S 53° O. Aber annähernde Bestimmungen liegen für mehrere andere Punkte vor und die beiden Geodäten folgern daraus, daß die Entfernungen zwischen diesen Punkten und dem Mountain Talmapais im Norden von S. Francisco gewachsen sind, wodurch die Länge der Bucht von S. Francisco um ein 26 000^{stel} vergrößert wurde, und daß auch die Entfernung zwischen den einzelnen südlichen Punkten zunahm, so daß die Bucht von Monterey um ein 13 000^{stel} breiter wurde. Dieser Folgerung hat sich auch Lawson (S. 151) angeschlossen. Er knüpft daran die Bemerkung, daß die Gegensatzlichkeit der Bewegungen im Norden und im Süden von S. Francisco, die von keinen wahrnehmbaren Zerreißen des Bodens in der neutralen Region von S. Francisco und an der Bucht von Monterey begleitet war, auf einen distensiven Charakter der Bewegung schließen lasse, und daß wir damit vor einen höchst

interessanten mechanischen Vorgang in der Erdkruste gestellt sind. Für eine geeignete Diskussion dieses Problemcs bedürfte es aber noch langjähriger Studien und wiederholter Messungen.

Dieser Warnung vor Übereilung kann man gewiß zustimmen, besonders wenn sie auf die Absicht der kalifornischen Erdbeben-Kommission zu schließen berechtigt, die Ortsbewegungen in dieser Gegend weiterhin kontrollieren zu wollen, denn man kann ja vermuten, daß sie durch das Beben von 1906 nur eine vorübergehende Störung erfahren haben und in irgend einer Weise jetzt wieder im Gange sind.

Gleichwohl scheint es mir nicht nur möglich, sondern auch nützlich, die bisher festgestellten Tatsachen, trotz ihrer Unsicherheiten im einzelnen, schon jetzt einer Besprechung zu unterziehen, um die Wege, die zu einer Erklärung führen können, zu beleuchten.

I. Die Ausdehnung vor 1906.

Für die südlichen Verlagerungen vor dem Erdbeben kommen hauptsächlich 6 Punkte in Betracht, die ich zunächst in der Reihenfolge anführe, welche der zunehmenden Ablenkung ihrer Bewegungsrichtung nach O entspricht:

1 Sta Cruz Az. St.	S 15 O	> 2.52
2 Punta Pinos Lat. Stat.	S 33 O	> 5.89
3 „ „ Light-house	S 37 O	> 4.91
4 Black Mountain	S 44 O	< 2.11
5 Gavilan	S 51 O	> 5.22
6 Lonia Prieta	S 53 O	3.03

Diese Linien liegen in einem Kreisausschnitt von 38° und wenn wir die Richtung von S 34 O als Mittellinie nehmen, dann liegt Punkt 4 ziemlich median, 1—3 im West- und 5—6 im Ostteil dieses Ausschnittes. Auch hier wie im Norden strahlen die Bewegungsrichtungen somit radial auseinander. Für die seitlichen Stationen ist aber die Aufeinanderfolge, wenn man sie nach der Größe ihrer Entfernung von jener Mittel-

linie bemißt, nicht die gleiche wie in obiger Tabelle, sondern wir müßten sie so stellen:

3 2 1 4 6 5

Dieser Unterschied fällt jedoch hinweg, sobald man als Radien Kurven mit nach Ost gekehrter Konkavität annimmt. Nach der Bewegungsgröße geordnet gibt es folgende Reihe:

Black Mountain	2.11 (1.6)
S ^{ta} Cruz	2.52 (3.14)
Loma Prieta	3.03
Punta Pinos Lat. Stat.	4.91 (5.3)
Gavilan	5.22 (> 6.22)
Punta Pinos Light-house	5.89 (6.29)

Diese Zahlen bedürfen jedoch einer Korrektur. Nur für Loma Prieta ist die Zahl wirklich bestimmt. Für die anderen Stationen geben sie die Summe der zwei Bewegungen während und vor dem Beben. Da Black Mountain im Osten der S. Andreas-Spalte liegt, so muß ein Betrag abgezogen werden, der aber jedenfalls kleiner als 1 Meter ist, während bei S^{ta} Cruz vielleicht 0.62 hinzuzählen ist, bei Gavilan jedenfalls mehr als 1 Meter, bei Punta Pinos aber weniger, weil es von der Mittellinie weiter weg liegt.

Wenn man diese in Klammern der obigen Tabelle beigegebenen Korrekturen berücksichtigt, dann tritt es mit vollkommener Klarheit in die Erscheinung, daß mit der Entfernung von S. Francisco die Ortsveränderungen ganz erheblich an Größe zunehmen und zwar viel bedeutender als dies im Norden von S. Francisco der Fall ist.

Nun liegen im Süden noch näher gegen S. Francisco vier weitere Stationen, für welche Bewegungen vor dem Beben in Betracht zu ziehen sind. Aber nur für eine derselben, nämlich für Red Hill ist der Betrag mit 0.65 bestimmt worden. Bei den anderen sind selbst die kombinierten Beträge so klein, daß sie zum Teil innerhalb der Fehlergrenzen der Vermessung liegen. Jedenfalls also sind wir damit bereits in eine Gegend verhältnismäßiger Ruhe eingetreten.

Dennoch ist es interessant, die Bewegungsrichtungen kennen zu lernen.

Guano J.	S 28 W	0.21 c
Pulga W Base	S 16 O	0.74 c
„ O Base	S 58 O	0.41 c
Red Hill	N 52 O	0.65

Die Richtungen drehen sich hier deutlich mit dem Fortschreiten von W und O im ganzen um einen Winkel von 156° . Wenn wir trotz der Unsicherheit, die diesen Messungen wegen ihrer geringen Größen anhängen müssen, dieselben gleichwohl hier, allerdings mit allem Vorbehalt, in Rechnung stellen, so geschieht dies nur deshalb, weil die Möglichkeit doch besteht, daß hier sehr kleine Bewegungen selbst in so unerwarteter Richtung stattgefunden haben. Unerwartet waren sie dem Geodäten ja hauptsächlich doch wohl nur deshalb, weil diese von theoretischen Erwägungen ausgingen, die solche Richtung ausschließen.

Wenn wir nun noch einmal alle Bewegungen vor 1906 zusammen betrachten, dann ergibt sich folgendes Bild: Rings um die Bucht von S. Francisco haben kleine aber meßbare Verschiebungen der Erdoberfläche stattgefunden. Nur die Halbinsel, auf der die Stadt steht, scheint daran keinen Anteil genommen zu haben. Von diesem Zentrum aus gingen die Bewegungen nach allen Richtungen auseinander, aber sie waren nur schwach gegen Osten und Nordosten und nahmen an Bedeutung zu gegen NW und SO, wo sie ihr Maximum erreichten. Gegen das Meer hinaus mögen sie auch vorhanden gewesen sein, aber hier fehlt natürlich ihr Nachweis. Dennoch ist Farallon Light-house ein Beweis für ihr Dasein, da dieser einzige Punkt, der im Meere draußen eine Messung gestattete, eine deutliche Verschiebung zeigt und zwar ganz in dem Sinne als ob die Bewegung von der Bucht von S. Francisco nach allen Himmelsrichtungen ausstrahlte.

Die von diesen Bewegungen betroffene Oberfläche hat sich also ausgedehnt, am meisten in der NW-SO-

Richtung, am wenigsten gegen NO und vielleicht auch gegen SW.

Von Ross Mountain im NW bis Gavilan im SO mißt dieses Feld etwa 250 000 Meter. Die Ausdehnung betrug rund 8 Meter, also ein Meter auf 30 000.

Die Form des Feldes könnte ungefähr die Form einer länglichen Ellipse haben, die aber zur Hälfte auf dem Meer liegt und die mindestens doppelt so lang als breit ist. Doch ist die Grenze auf dem Meer möglicherweise auch ausgedehnter und unregelmäßiger als es die Zeichnung andeutet.

Die Entfernung des Mittelpunktes gegen den Ostrand, also die eine Hälfte des kleineren Durchmessers, mißt etwa 51 000 m, die Ausdehnung, wenn man die bei Red-Hill zu Grunde legt, vielleicht 1.30, also 1:40 000.

Von den 8 Metern Ausdehnung fallen auf die nördliche Hälfte gegen 2 Meter, auf die südliche Hälfte 6 Meter. Hier hatte sie also einen dreimal so großen Betrag.

II. Die Ursachen der Ausdehnung vor 1906.

Mit dem Suchen nach diesen Ursachen betreten wir selbstverständlich den Boden der Hypothesen. Indessen läßt sich doch das eine mit ziemlicher Gewißheit behaupten, daß die Ursachen nicht in den oberflächlichen Festlandsschichten gesucht werden dürfen. Wie die Bucht von Monterey und die Insel des Farallon Light-house beweisen, hat auch der tieferliegende Meeresboden die Ausdehnung mitgemacht.

Die aktive Bewegung muß also in tieferen Horizonten liegen. Die oberen Schichten sind nur passiv in Bewegung gesetzt worden und folgten derjenigen ihrer Unterlage. Klaffende Spalten konnten bei der Geringfügigkeit der Bewegung an der Oberfläche dabei nicht entstehen. Wo lockeres Erdreich oder plastische Tone die Oberfläche bilden, konnten sich dünne Risse in der festen Gesteinsunterlage unmöglich bis herauf fortpflanzen. Bei einer Ausdehnung von 1:30 000 wäre eine Spaltenbreite von höchstens 1 mm auf 30 Meter zu erwarten.

Für die Ausdehnung in tieferen Teilen der Erdkruste lassen sich verschiedene Ursachen als möglich denken.

1. Wenn infolge starken tangentialen Druckes in der Erdkruste ein Teil derselben — in unserem Falle der unter dem auf Tafel I rot umgrenzten elliptischen Felde liegende — wegen seiner besonderen physikalischen Beschaffenheit eine außergewöhnliche Zusammenpressung erlitten hat, dann kann sich dieser Teil wieder ausdehnen, wenn jener tangentielle Druck schwächer wird. Diese Möglichkeit wird kaum in Abrede gestellt werden können, aber die Wahrscheinlichkeit, daß sie in unserem Falle zuträfe, ist sehr gering, weil der geologische Aufbau der ellipsoiden Fläche keinerlei Verschiedenartigkeit von ihrer Umgebung aufweist. Man müßte jedenfalls diese erforderliche Verschiedenartigkeit in recht große Tiefe verlegen, aber dann wird es zweifelhaft, ob die Zusammenpressung nach oben sich noch fühlbar machen und beim Nachlassen des tangentialen Druckes in Ausdehnung übergehen könnte. Ich halte diese Hypothese deshalb für unseren Fall als wertlos.

2. Erwärmung führt zu Ausdehnung. Der verstorbene Mellard Reade hat durch Experimente für verschiedenartige Gesteine die lineare Ausdehnung bei Erwärmung festgestellt und daraus für 1°C . Wärmezunahme eine durchschnittliche Ausdehnung von beinahe 1 auf 100 000 berechnet. Wenn also die Isothermen unter unserem Ausdehnungsfeld langsam sich heben, so würde schon eine Hebung von $3\text{--}4^{\circ}$ genügen, um die Ausdehnung 1 : 30 000 zu erzeugen. Ob freilich eine solche verhältnismäßig geringe Wärmeerhöhung in Wirklichkeit diesen Erfolg erzielen könnte, ist zweifelhaft, weil in der Erdkruste die Verhältnisse doch anders liegen, als beim Experiment im Laboratorium, wo man alle anderweitigen Hemmnisse ausschalten kann. Vielleicht also müßte man eine Hebung der Isothermen um mehr als 4° zu Hilfe nehmen. Weitere Annahmen für unseren besonderen Fall wären erforderlich, um die stärkere Ausdehnung gegen Süden und die schwächere gegen Norden und die noch schwächere gegen Osten und Westen zu erklären. Man könnte annehmen, erstens daß die vorhandene

S. Andreas-Spalte das Aufsteigen der Wärme in dieser Richtung begünstigt habe und zweitens daß die Leitungsfähigkeit der Gesteine im Süden von S. Francisco zufällig für Wärme größer als im Norden sei. Die erste dieser zwei Annahmen ist jedenfalls besser fundiert als die zweite, die durch den tatsächlichen Befund nicht gestützt werden kann.

Ein Einwand gegen diese Wärme-Hypothese kann gemacht und damit begründet werden, daß wenn Wärmezuführung die Gesteine in horizontaler Richtung ausdehnt, sie es gleichzeitig auch in vertikaler Richtung tun muß. Der Boden unserer Fläche müßte also neben Ortsverschiebungen auch Hebung vor dem Jahre 1906 erfahren haben. Dieser Einwand ist vollkommen berechtigt. Wenn wir auch nur mit einer Hebung der Isothermen um 4° C. und einer Erdkruste von nur 25000 Meter Dicke rechnen wollten, so ergäbe das schon eine Hebung von 1 Meter, die zwischen der ersten und letzten Triangulation nachzuweisen wäre. Eine solche Hebung innerhalb der letzten 60 Jahre hätte unmöglich verborgen bleiben können. Es ist aber nichts derartiges bekannt geworden.

Freilich ließe sich einwenden, daß die Experimente von Reade nur unter Atmosphärendruck vorgenommen wurden, daß aber unter hohem Druck der Expansionskoeffizient kleiner sein müsse. Rechnen wir mit einem spezifischen Gewicht von 2.5, so ergibt dies für die Tiefe von 25 km einen Druck von 4600 Atmosphären, unter dem eine Temperaturerhöhung von 4° vielleicht eine so geringe Ausdehnung brächte, daß wir sie fast gleich 0 setzen dürften. Aber auch dann noch ergäbe die gesamte Ausdehnung bis zur Oberfläche eine Größe von etwa 0.5 Meter. Wenn aber eine vertikale Bewegung überhaupt vor 1906 stattgefunden hat, was mit Sicherheit noch nicht festgestellt werden konnte, so ist es (s. Report, S. 140) eher eine Senkung als eine Hebung.

Somit besteht wenig Wahrscheinlichkeit, daß bloß lokale Erwärmung es war, welche die Expansion vor 1906 erzeugte.

Wenn wir das Ausmaß der Ausdehnung innerhalb dieses Gebietes für die einzelnen Teile genauer ins Auge fassen, so

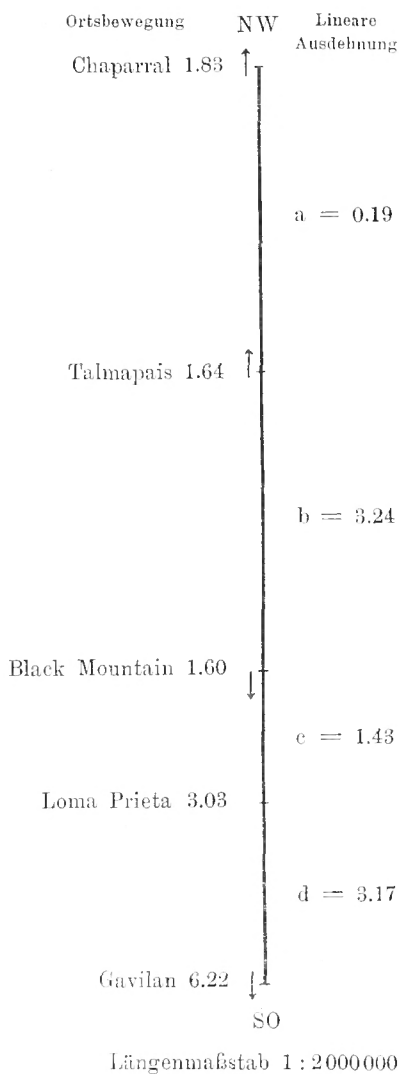


Fig. I.

erkennen wir die Tatsache, auf die bereits hingewiesen worden ist, daß die Stärke der Ausdehnung eine sehr verschiedene war. Am besten läßt sich das für die Strecke nachweisen, die ungefähr die Längsachse des ellipsoiden Feldes bildet (Fig. 1).

Wir haben darauf fünf gemessene Punkte, zwischen denen die Strecken a—d liegen, deren Expansionen in folgendem Größenverhältnisse zueinander stehen:

$$2 \quad 32 \quad 31 \quad 52$$

Die relative Expansion in d war also 26 mal und in b 16 mal größer als in a. Wollte man dies nach Hypothese 2 erklären, so ließe sich die an sich jedoch recht unwahrscheinliche Annahme einer sehr ungleichmäßigen Erwärmung nicht vermeiden.

Für die einzelnen Strecken ist unter Hinweis auf das früher Gesagte folgendes als von Wichtigkeit hervorzuheben:

Strecke a hat sich als Ganzes um 1.6 Meter nach NW bewegt, zugleich aber auch um 0.2 ausgedehnt. Strecke b

hat sich als Ganzes nicht bewegt, sondern nur ausgedehnt. In ihrer Mitte wäre somit der ruhende Punkt zu suchen, von dem aus bei der Wärmehypothese die Bewegung in entgegen-

gesetzten Richtungen erfolgte. In diesem Falle müßten jedoch die Ortsveränderungen nach NW und SO an Größe zunehmen und das stünde dann mit der plötzlich verkleinerten Verschiebungsgröße im Süden der Station Talmapais in einem unauflöselichen Gegensatz. Dieselbe Schwierigkeit besteht, wenn auch in verminderten Maße, für die Strecke c, weil deren Ausdehnung etwas kleiner als in b ist, während sie eigentlich größer sein müßte.

3. Alle diese Schwierigkeiten werden überwunden, wenn man annimmt, daß in der die Oberflächenschichten tragenden Unterlage magmatische Intrusionen von unten her eingedrungen seien, durch die diese Unterlage in horizontaler Richtung auseinander getrieben wurde. Sie wären dann die eigentliche Ursache der Ausdehnung. Da aber solche Intrusionen zugleich ihrer Umgebung Wärme zuführen, so hätten sie auch Ausdehnung innerhalb der Krustenteile selbst zur Folge. Der Unterschied gegen Hypothese 2 liegt darin, daß Ausdehnung durch Wärme nicht ausschließlich in Betracht käme, daß man nicht mit einer allgemeinen und gleichmäßigen Hebung der Isothermen im ganzen Expansionsfelde zu rechnen hätte und daß die Wärmezunahme nur eine viel geringere zu sein brauchte, die eine vertikale Hebung des ganzen Bodens von beträchtlicher und durch geodätische Messungen leicht nachweisbarer Größe nicht bewirkt haben könnte.

Es ist bekannt, daß magmatische Intrusionen in früheren Zeiten in dem Coastrange eine große Rolle gespielt haben, und gerade für unser Gebiet haben die geologischen Aufnahmen, die Lawson in neuerer Zeit ausgeführt und geleitet hat, gelehrt, daß selbst noch im Pliocän Unmassen vulkanischer Produkte aufgestiegen sind und zu Tage gefördert wurden. Die Annahme, daß auch bis in die Gegenwart solche Massenbewegungen, wenn auch in geringerem Maße, hier vor sich gegangen seien, hat deshalb gar nichts Verwunderliches an sich und steht auch mit der Tatsache, daß die ganze Westküste Amerikas durch Vulkanreihen und -gruppen ausgezeichnet ist, von denen viele noch tätig sind, in gutem Einklang.

Die Form und Häufigkeit der Lagergänge, Lakkolithen und Batholithen weisen darauf hin, daß die magmatischen Intrusionen für ihr Zustandekommen nicht schon klaffende Spalten und Hohlräume nötig haben, sondern daß sie sich gewaltsam in die Erdkruste hereinzwängen und diese auseinanderschieben können. Wenn also innerhalb unseres Expansionsfeldes nur soviel Massen sich gangförmig eingeschoben haben, daß sie im Bereich der Längsachse, die in Fig. 3 dargestellt ist, zusammengenommen einen Raum von gegen 8 Metern einnehmen, dann genügt das vollkommen, um die Ausdehnung des ganzen Feldes zu erklären, denn nebenher geht ja noch die Ausdehnung durch die Wärmezuführung, die von den Intrusivgängen gebracht wird.

Wenn wir uns zunächst auf Fig. 1 beschränken, so würde ein in Mitte der Strecke b eindringender Gang von 3 Meter Breite bewirken, daß Talmapais sich um 1.5 nach links fortbewegt, ebenso natürlich auch Chaparral, während der Betrag von 0.1 für Tamalpais und 0.3 für Chaparral der Wärmeausdehnung zugeschrieben werden könnte. Das gleiche gilt natürlich auch für Black Mount auf der anderen Seite, was denn auch für Loma Prieta und Gavilan ein Vorrücken von 1.7 bzw. 1.8 zur Folge hätte. Da sich aber Loma Prieta in Wirklichkeit um 3 Meter bewegt hat, so wäre das einer anderen Intrusion in Strecke c von 1.2 Breite zuzuschreiben, die für Gavilan eine weitere Bewegung von 1.3, im ganzen also von 3.1 ergäbe. Gavilan hat sich aber in Wirklichkeit um 6.2 verlagert und dafür wäre dann nochmals für Strecke d eine Intrusion von 3 Meter erforderlich. Im ganzen macht das 7.2 Meter Intrusionen.

Diese Deduktion wurde unter der stillschweigenden Voraussetzung gemacht, daß die Ortsveränderungen mit den zwei äußersten Stationen ihr Ende noch nicht erreicht haben, denn die Bewegung kann nicht plötzlich zum Stillstand kommen. Sie muß in der Peripherie des Feldes langsam ausklingen. Messungsberichte liegen dafür allerdings nicht vor, aber das mag daran liegen, daß weiter draußen keine geeigneten Fix-

punkte lagen oder daß sie nicht kontrolliert wurden. Immerhin aber wäre es sehr wünschenswert, wenn durch weitere Triangulationen hierüber Aufklärung gegeben werden könnte für den Fall, daß dieselben nicht schon existieren und nur nicht zu meiner Kenntnis gelangt sind.

Diese supponierten Intrusionen unter dem ellipsoiden Feld noch weiter in ihrer Lage anzudeuten, dafür gibt es nur einige Anhaltspunkte. Der Verlauf der radialen Bewegungskurven im nördlichen Teile, deren Verlängerungen nach Süden sich erst in großer Entfernung schneiden würden, deutet wohl darauf hin, daß der Gang in Mitte der Strecke b, der gerade bei San Bruno auf der Karte zu suchen wäre, sich in ostwestlicher Richtung fortsetzt, also einerseits die Bucht von S. Francisco in der Breite von S. Bruno quert, anderseits unter der Halbinsel hinweg nach dem Stillen Ozean fortstreicht. Die von den beiden Geodäten festgestellte Vergrößerung jener Bucht um ein 26 000^{stel} in ihrer Längsachse wäre somit ihm zuzuschreiben. Der Eruptivgang auf Strecke d könnte bei einem Streichen von SW—NO die Verbreiterung der Bucht von Monterey um ein 13 000^{stel} verursacht haben. Selbstverständlich würde derselbe Effekt auch von einer Anzahl schmalerer Gänge erzielt werden und somit wäre es vielleicht ratsam, jeweils nicht von einem Gang, sondern von Gangzügen zu sprechen, von denen einige wohl auch in mehr nordsüdlicher Richtung angenommen werden könnten. Die schon früher erwähnten, von dem regelmäßig radialen Verlauf abweichenden Bewegungsrichtungen bei einigen Ortsveränderungen fänden dann in dem unregelmäßigen Verlauf der Gangzüge eine befriedigende Erklärung.

Für den Zeitpunkt dieser Intrusionen und für ihre Dauer sind wir nur auf vage Vermutungen angewiesen. Im Sinne der beiden Geodäten liegt es, dafür das Jahr 1868 in Anspruch zu nehmen und das Erdbeben vom 21. Oktober 1868 als eine Folgeerscheinung aufzufassen. Der Umstand, daß dabei eine Spalte im Osten der Bucht von S. Francisco aufriß, scheint mir keineswegs dagegen zu sprechen. Es wäre das eben in

diesem Falle ein Expansionsbeben gewesen. Somit gibt uns diese dritte Hypothese eine bessere Erklärung für die Ortsveränderungen vor 1906 als die zwei anderen, und solange es nicht gelingt, eine noch bessere vierte Hypothese aufzustellen oder neue Tatsachen vorzubringen, die sich nicht mit ihr vereinbaren lassen, sehe ich in ihr eine gute Arbeitshypothese von heuristischem Werte.

III. Die Ursache der Ortsveränderungen während des Erdbebens von 1906.

Für diese dauernden Ortsverlagerungen, von denen nicht alle so doch viele unzweifelhaft am 16. April 1906 mit einem Ruck eingetreten sind, besitzen wir ein viel größeres Beobachtungsmaterial als für die älteren Bewegungen. Es beschränkt sich nicht auf das Expansionsfeld von 1868, sondern greift noch 70 Kilometer gegen NW über dasselbe hinaus.

Von den älteren unterscheiden sich diese Bewegungen der Art nach ganz wesentlich nicht nur durch ihre Plötzlichkeit, vielfach auch durch ihre Richtung und Länge, sondern

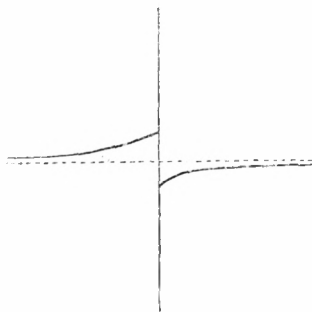


Fig. 2.

insbesondere dadurch, daß sie in der auffälligsten Weise in Abhängigkeit zum Verlaufe der S. Andreas-Verwerfungs-Spalte stehen. Mit ganz wenigen Ausnahmen sind sie auf der Ostseite dieser Spalte nach SO, auf der Westseite nach NW gerichtet und sie nehmen mit Annäherung an die Spalte an Größe erheblich zu. Hätte man also vor dem 16. April eine gerade (in Fig. 2 schraffierte) Linie recht-

winkelig auf die S. Andreas-Spalte markiert, so würden diese auseinandergerissenen Teilstrecken jetzt nach dem Beben gekrümmt sein und zwar um so stärker, je näher sie an die Spalte herantreten.

Diese Feststellung ist eines der wichtigsten Ergebnisse der geodätischen Aufnahmen, denn sie beweist uns, daß wir keine gewöhnliche Spaltenverschiebung vor uns haben, bei denen die Verkrümmung gerade in entgegengesetzter Richtung eintritt, wo sie dann als *Schleppung* bezeichnet wird und uns als eine Reibungshemmung leicht verständlich ist. Wir müssen für ihre Erklärung nach anderen Ursachen suchen und Lawson (S. 150) findet sie in der Annahme, daß durch die vorausgegangenen, bereits besprochenen Expansionsbewegungen der Boden in eine elastische Spannung geraten war, durch welche die einzelnen Punkte der Oberfläche in eine Zwangslage kamen, aus der sich zu befreien und in ihre frühere Position zurückzukehren sie das Streben hatten. Sobald nun die Spalte aufriß, war es den Punkten unmittelbar zu beiden Seiten leichter, ihre ehemalige Stelle wieder zu erlangen als, den entfernteren, und deshalb war die Bewegung an der Spalte eine größere als weiter ab.

Diese Erklärung müßte zur Voraussetzung haben, daß die ursprüngliche Lage der Punkte vor den die Spannung erzeugenden älteren Bewegungen auf der Westseite der Spalte weiter im Süden, auf der Ostseite weiter im Norden war. Das trifft aber nicht zu. Denn die älteren Bewegungen waren alle im Norden nach Norden und im Süden nach Süden gerichtet gewesen. Ich kann mich deshalb dieser Deutung des Vorganges nicht anschließen.

Welches aber auch die richtige Erklärung sein möge, wir müssen jedenfalls von ihr verlangen, daß sie auch einige andere Merkwürdigkeiten aufkläre oder wenigstens nicht mit ihnen in Widerspruch stehe.

Dazu gehört erstens der Umstand, daß die Bewegungsgrößen zu beiden Seiten der Spalte trotz ihrer Widersinnigkeit im Norden von S. Francisco erheblich bedeutender sind als im Süden und zweitens, daß manche Punkte der herrschenden Richtung nicht folgten, sondern sich teils direkt auf die Spalte zu (Hans, Hammond, Montara, Mount Peak) teils von ihr weg (Pt Reyes Light-house, Farallon Light-house und Red Hill) bewegten.

Diese Merkwürdigkeiten, die allerdings das ganze Phänomen recht verwickelt erscheinen lassen, einfach als Messungsfehler zu erklären, halte ich, solange nicht gute Gründe dafür vorgebracht werden können, für gefährlich. Unser Wunsch, die Naturphänomene möglichst einfach zu sehen, verhindert uns erfahrungsgemäß häufig, dem wirklichen Tatbestand genügende Rechnung zu tragen.

Lawson faßt die Expansionsbewegungen vor 1906 so auf, daß durch sie erst die Spannungen in der Kruste erzeugt wurden, die dann zu einer plötzlichen Auslösung durch das Erdbeben von 1906 führten. Die Bewegungen während des Bebens erzeugten dann aber nicht erneute Spannungen, sondern stellten eine neue Gleichgewichtslage her; sie sollten also eher den Charakter von Kompressions- als von Expansionsbewegungen haben und die Verschiebungen auf der einen Seite der S. Andreas-Spalte müßten denen auf der anderen Seite ungefähr das Gleichgewicht halten.

Da aber die geodätischen Aufnahmen dies nicht bestätigen und nach ihnen die wirklichen Bewegungen im Westen erheblich größer als die im Osten waren, so sucht Lawson, wie schon eingangs erwähnt, dieses seiner Annahme widerstrebende Ergebnis dadurch zu entkräften, daß er auch der Vermessungsbasis, die auf der östlichen Seite liegt, eine südliche Verlagerung zuspricht, deren Berücksichtigung für alle südlichen Bewegungen einen größeren und für alle nördlichen einen kleineren Betrag ergäbe. Ganz abgesehen davon, daß diese Basis-Verschiebung nur eine unbewiesene Hypothese ist, wird damit aber noch lange nicht erklärt, weshalb die einzelnen sowohl nördlichen wie südlichen Ortsveränderungen unter sich sehr ungleiche Werte besitzen und wie es möglich war, daß mehrere Orte sogar eine starke Verschiebung in östlicher und westlicher Richtung erhielten.

Sobald wir die Bewegungen von 1906 für sich allein und ohne Rücksicht auf die vorausgegangenen älteren genauer analysieren, kommen wir zu dem Ergebnis, daß auch sie von Zerrungs- oder Expansionserscheinungen begleitet waren.

Fassen wir zunächst die Veränderungen auf der Ostseite der S. Andreas-Spalte ins Auge und vergleichen wir die Größe der Veränderungen von solchen Orten, deren Entfernung von der Spalte ungefähr eine gleiche ist, dann erhalten wir folgende Tabelle:

Ent- fernungen in Kilometern	Orte in Reihe von Nord nach Süd	Südbe- we- gungen in Metern	D = Dehnung K = Kürzung
57 { 0	Dunn	0.79	} D 0.98
{ 2	Clark	0.83	
25 { 57	Lancaster	1.77	} K 0.50
	Henry Hill	1.46	
	Dixon	1.37	
	Chaparral	1.34	
26 { 84	Peaked Hill	1.27	} D 0.39
	Bodega	1.47	
64 { 110	Smith	1.66	} K 1.26
	Talmapais	0.58	
90 { 174	Black Bluff	0.40	} D 0.57
	Loma Prieta	0.97	
			K 0.11
			D 0.18

Hieraus ersehen wir unmittelbar, daß die 264 Kilometer lange Strecke sich mit ihrem Süden um beinahe einen Meter nach S bzw. SO bewegt hat, daß dabei aber das Nordende um 0.18 zurückblieb, was für die ganze Strecke eine Dehnung um diesen Betrag bedeutet. Kompression hat also sicher nicht stattgefunden. Aber außerdem sind auf den einzelnen Teilstrecken abwechselnd Dehnungen und Kürzungen eingetreten, aber im ganzen blieben letztere gegen die Dehnungen um 0.18 im Rückstand. Auffällig ist dabei, daß die nördlichste 57 km lange Teilstrecke allein schon eine Ausdehnung erlangt hat, die dem Betrage der Verlagerung von Loma Prieta gegen Süden gleichkommt.

Neben der allgemeinen Bewegung nach Süd hat somit die ganze Strecke noch gesonderte Bewegungen in zwei einander entgegengesetzten Richtungen erfahren, von denen die eine die allgemeine Bewegung verstärkten, die anderen ihr entgegenwirkten. Es könnte naheliegend erscheinen, in diesen gesonderten Differenzialbewegungen Äußerungen großer longitudinaler Schwingungen zu vermuten, die durch das explosionsartige Zerreißen der S. Andreas-Spalte entstanden und die zu abwechselnden Verdichtungen und Auflockerungen des Bodens führten. Da es sich dabei aber nur um elastische Schwingungen handeln kann, so ist nicht einzusehen, welche Kraft dieselben plötzlich mitten in der Bewegung erstarren machen konnte, so daß daraus dauernde Ortsveränderungen hervorgingen.

Ich halte es deshalb für viel wahrscheinlicher, daß ähnliche Ursachen wie die, welche vor 1906 Expansion hervorbrachten, auch hier tätig waren. Injektionsgänge in der Tiefe unter Mendocino und Sonoma County und einige kleinere bei Bodega und in der Breite von Sta Cruz würden zur Erklärung ausreichen.

Für die Westseite der S. Andreas-Spalte läßt sich eine ähnliche Tabelle aufstellen:

Ent- fernungen in Kilometern	Orte in Reihe von Nord nach Süd	Nordbe- we- gungen in Metern	D = Drehung K = Kürzung
	0 Shoemaker	3.27	D 0.77 K 1.32
	62 Fort Ross	2.50	
51	90 Bodega Head	3.60	
	103 Tomales Port	3.59	
	107 " Bay	3.89	
96	113 Foster	4.59	D 2.91 D 1.08
	120 Point Reyes Hill	3.72	
	180 Road	2.45	
	183 Flat	2.33	
102	209 Sierra Morena	1.68	K 0.51
	311 Gavilan	2.19	

Diese 311 Kilometer lange Strecke ist mit ihrem Nordende um 3.27 Meter nach Norden vorgerückt und hat sich dabei um 1.08 ausgedehnt, also pro Einheit fünfmal so stark als die 264 Kilometer lange Strecke auf der Ostseite.

Wir unterscheiden vier Teilstrecken, die abwechselnd Ausdehnung und Kürzung zeigen.

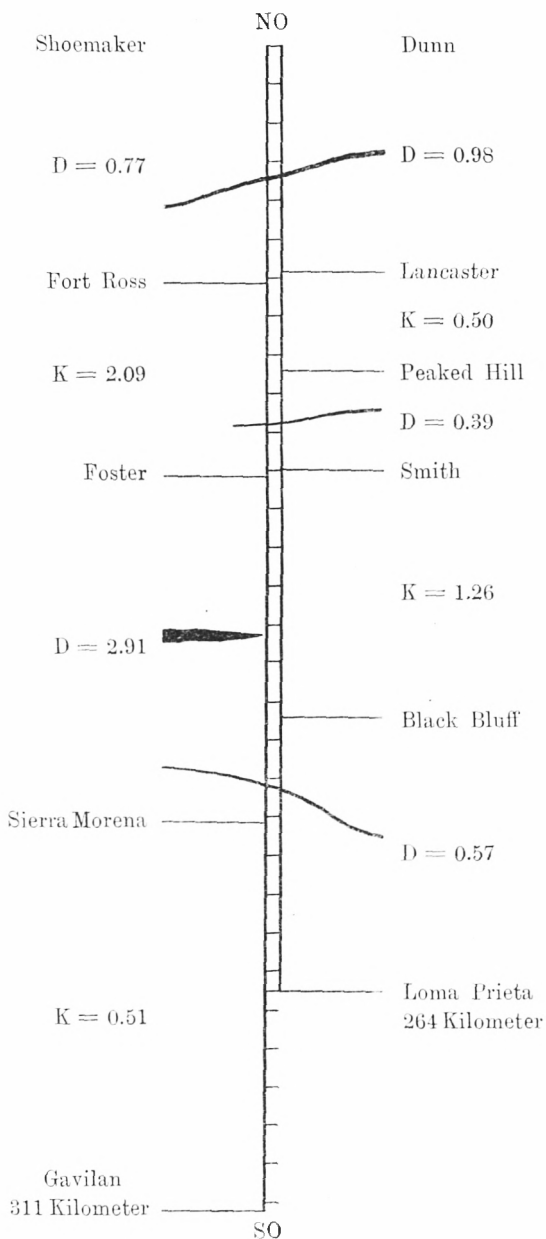
Stellen wir die Ergebnisse der beiderseitigen Verschiebungen in einer Zeichnung nebeneinander (siehe Fig. 3, S. 26), dann erkennt man sofort deren Verschiedenartigkeit. Nur am oberen Ende entsprechen sich die Ausdehnungs-Teilstrecken annähernd, dann aber greifen sie stets übereinander weg, so daß jeweils einer Teilstrecke links zwei Teile unter sich konträrer Strecken entsprechen.

Links ist $D = 3.68$, rechts $D = 1.94$

$K = 2.60$ $K = 1.76$

Wenn die Ausdehnung durch Injektion in der Tiefe entstanden ist, dann muß nach diesen Gleichungen die Injektion im Westen mächtiger als im Osten gewesen sein und im Westen entstanden dadurch stärkere Spannungen als im Osten. Diese Differenz genügte wohl, um die bereits vorhandene Verwerfungsspalte aufzureißen und auf ihr die vorhandenen Spannungen auszulösen. Will man in den Ausdehnungsfeldern die Injektionsmassen andeuten, dann hat man zwei über die Spalte fortsetzende, die eine in der Grenzgegend von Sonoma und Mendocina und die andere etwa bei der Golden Gate. Letztere ist im Westen als aus 2 Gängen bestehend angenommen, von denen der stärkere Ast nicht über die Spalte nach O herübersetzt. Eine dritte gehört nur dem Osten an und mag unter der Bodega Bay liegen. Gleichwohl dürfte auch diese Injektion noch etwas nach Westen über die Spalte herübergreifen haben, denn auf der vorstehenden Tabelle scheint eine ganz kleine Ausdehnung zwischen Tomales Point und Bodega Head angedeutet zu sein. Sie ist aber so unbedeutend, daß sie vielleicht auch auf Messungsfehler zurückgeführt werden könnte.

Die Injektionshypothese wird somit allen Unregelmäßigkeiten der Ortsveränderungen, wie sie die Triangulation zu



Längenmaßstab 1 : 2000000.

Fig. 3.

beiden Seiten der Riftspalte nachgewiesen hat, gerecht und wir haben es nicht notwendig, die Richtigkeit dieser Messungen anzuzweifeln.

Aber es gilt nun auch die Erscheinungen, die weiter seitwärts eingetreten sind, zu erklären.

Die Bewegung von Farallon Light-house (1.78) und Punta Reyes Light-house (1.09) hatte eine Richtung, die mit der S. Andreas-Spalte einen Winkel von $25-30^\circ$ bildet; beide Punkte haben sich damit von der Spalte entfernt. Die Punkte Hans und Hammond auf der Ostseite der Spalte haben sich derselben genähert, Hans unter einem Winkel von 44° um 1.95 Meter, Hammond unter einem solchen von 76° um 2.28. Red Hill hingegen entfernte sich um 0.30 unter einem rechten Winkel von ihr und Montara Mount Peak auf der westlichen Spaltenseite näherte sich ihr um 1.59 unter einem Winkel von 70° .

Wir haben bisher die Wirkungen der supponierten Injektionen nur mit Bezug auf die Bewegungen in der Nähe der S. Andreas-Spalte betrachtet, aber schon dabei erkannt, daß sie großem Wechsel unterliegen, daß die Verteilung der Injektionen in der Erdkruste keine gleichmäßige sein kann und von der Richtung der Spalte ganz unabhängig sein muß. Die Bedingung ist unabweisbar, daß die Injektionsmassen gegen Osten und Westen weiter fortsetzen und auch da zu Expansionen und Ortsveränderungen geführt haben, deren Richtung wesentlich von der Lage der Injektionen abhing.

Das durch die Messungen bewiesene Vorkommen von unter sich divergierenden Bewegungsrichtungen hat somit gar nichts Wunderbares und bedarf keiner besonderen Begründung, weil es gegen keine Regel verstößt. Unter den kontrollierten Punkten sind nicht weniger als 14, die unter Winkeln von 25 und mehr Graden und viele andere, die mit $10-25^\circ$ sich der Spalte genähert oder von ihr entfernt haben. Das Gegenteil trifft also zu und wer dennoch die Parallelität der Bewegungen mit der Spalte als Regel hinstellen will, der muß erst den Beweis dafür erbringen, daß es eine solche Regel gibt.

Auch ist es keineswegs ausgeschlossen, daß die Bewegungsrichtung, die wir jetzt aus der ursprünglichen und der gegenwärtigen Lage eines Punktes als eine zur Spalte parallelen bestimmen, in Wirklichkeit sich aus zwei Linien zusammensetzt, die untereinander einen mehr oder minder großen Winkel bilden und von denen nur die eine zur Spalte parallel ist. Diese entspräche dann der Bewegung beim Zerreißen der Spalte, die andere derjenigen durch die vorausgehende Expansion.

Schon vor der geodätischen Vermessung und zu einer Zeit, als man die Ortsveränderungen noch als Folgen einer einfachen Schollenverschiebung auffassen zu können glaubte, war die auffallende Tatsache festgestellt worden, daß wo deutlich markierte Linien, wie Wege, Zäune etc. von der Erdbebenspalte quer geschnitten wurden, die beiderseitigen Enden nicht jedesmal gleichweit auseinandergerückt sind und daß solche Verschiedenheiten bei nahe beieinanderliegenden Linien oft größer als bei weit voneinander entfernten vorkommen.

Man hat versucht, dies auf lokale Verhältnisse, insbesondere auf das Verhalten der lockeren Oberflächenschichten zurückzuführen und man mag in vielen Fällen damit auch das Richtige getroffen haben, aber wenn die Bewegungsgröße die Summe zweier Größen ist, von denen die der Spaltenverschiebung eine mehr konstante, die der Expansionsbewegung eine variabilere ist, dann können jene Verschiedenheiten auch darin allein schon eine genügende Erklärung finden.

Damit soll jedoch keineswegs in Abrede gestellt werden, daß die in der Tiefe ausgelösten Bewegungen bei ihrem Eintritt in die oberflächlichen Schichten nach Richtung und Stärke Veränderungen erlitten, besonders da, wo letztere eine ganz abweichende physikalische Beschaffenheit haben. In lockeren Sanden und Schottern oder in plastischen Tonen lösten sie Eigenbewegungen etwa in Form von Zusammensitzen oder Gleiten aus, wodurch die Bewegung je nach Umständen beschleunigt oder verlangsamt und deren Stärke vergrößert oder verringert werden konnte.

Die Vielfältigkeit der bewirkenden Ursachen und die Verschiedenartigkeit der Massen, auf welche diese Ursachen die Bewegungen übertrugen, zwingt uns zu größter Vorsicht bei der Deutung der Veränderungen, die als das Ergebnis der verwickelten Vorgänge jetzt vorliegen, und diese Vorsicht muß sich noch steigern in Anbetracht des Umstandes, daß eine sichere Feststellung dieser tatsächlichen Ergebnisse wegen der Geringfügigkeit der dabei zu messenden Grössen nicht immer zu erreichen ist.

Die von mir zur Deutung herangezogene Hypothese setzt voraus, daß die primäre Ursache der Ortsveränderungen in unterirdischen Injektionen liege. Es wird notwendig sein, zur Zeitdauer, die diese Injektionen erforderten, Stellung zu nehmen. Der vulkanische Herd, von dem sie aufstiegen, muß jedenfalls in bedeutender Tiefe liegen, und je nach Belieben kann man mit 20 oder mehr Kilometern rechnen. Gehen wir von dem allerdings nicht sehr wahrscheinlichen Minimum von 20 000 m aus, so ergibt sich schon da, daß die Injektionsmassen den weiten Weg bis nahe an die Erdoberfläche keinesfalls in wenigen Sekunden zurücklegen konnten. Da das ganze Erdbeben nur eine Minute gedauert hat, so kann es gewiß nicht unmittelbar durch die Injektion selbst verursacht sein. Merklliche Erderschütterungen gingen demselben aber nicht voraus und somit erscheint es wahrscheinlich, daß der Injektionsvorgang selbst nicht mit deutlich fühlbarem Erbeben der Erdkruste verknüpft war. Wäre er aber ein sehr rascher, gewissermaßen explosionsartiger gewesen, so hätte er sicherlich zu Erschütterungen führen müssen. Also dürfen wir annehmen — und das gilt natürlich auch für die Injektionen, die dem Erdbeben von 1868 vorausgingen, — daß die Injektionsmassen langsam aufstiegen und die damit verknüpfte Ausdehnung in der Erdkruste ebenfalls langsam zustande kam. Durch sie wurden die Druckspannungen in der Erdkruste erzeugt und das Erdbeben gewissermaßen vorbereitet, das erst eintrat, als durch Zerreißen der S. Andreas-Spalte die Spannungen ihre Auslösung fanden. Im Sinne der Injektions-Hypothese liegt

es somit, daß sowohl durch die Spaltenzerreißung als auch durch die vorhergehende Injektion Ortsveränderungen entstanden sind und daß sie sich zu den Verlagerungen summiert haben, welche nach dem Erdbeben gemessen worden sind.

IV. Der Erdbebenherd und seine Tiefe.

Obwohl die elastischen Schwingungen des Bebens gewiß dem plötzlichen Zerreißen der Spalte zuzuschreiben sind, so ist man doch nicht berechtigt, die ganze Fläche, auf der diese Zerreißung eintrat, als den eigentlichen Herd zu bezeichnen. Als solcher darf vielmehr nur der Teil gelten, wo die Zerreißung zuerst eingetreten ist. Nahe der Oberfläche kann er also nicht liegen, denn die Injektionen sind soweit nicht emporgedrungen. Auch ist es wahrscheinlich, daß deren Volumen gegen oben abnimmt. Von ihm ist aber die Ausdehnung in erster Linie abhängig und somit könnte man den Herd in der Wurzelregion der Injektionen, also nahe dem vulkanischen Herde suchen, von dem diese ausgingen. Gegeben wären dadurch Tiefen, die 20 km jedenfalls überschreiten. Indessen ist für diese noch die Erfüllung einer anderen Bedingung erforderlich, nämlich das Herabreichen der Verwerfungsspalte, von der es keineswegs feststeht, ob sie bis auf den vulkanischen Herd heruntergeht.

Nur soviel läßt sich also sagen, daß der Herd in der Tiefe liegt, wo auf der Spalte durch die Injektionen ein Maximum von Druckspannungen erzeugt worden ist. Da diese Gleichung zwei numerisch unbekannte Größen enthält, so läßt sich aus ihr ein zahlenmäßiger Wert für die Herdtiefe nicht ableiten. Ob das Studium der Seismogramme zu einer genauen Tiefenbestimmung führen kann, wird uns erst der noch nicht erschienene zweite Band des Reports lehren.

Es bedurfte einer gewissen Zeit, bis die in der Tiefe beginnende Zerreißung sich bis zur Erdoberfläche fortgepflanzt hatte und dann erst dort jene starken Bodenschwankungen um 5^h 12^m hervorrief. Das mit dem Geräusch von Donner, Hagel-

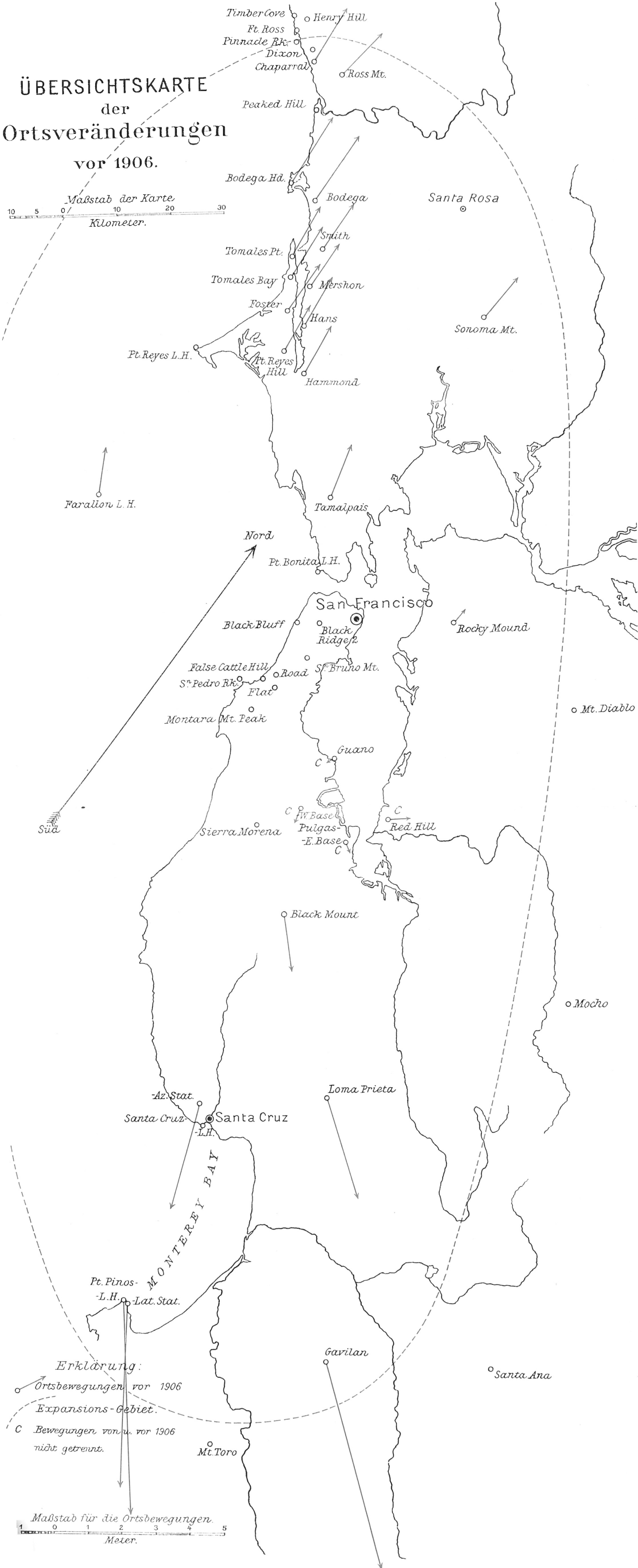
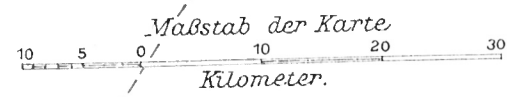
schauer oder Sturmwind vergleichene Tönen, welches schon Sekunden, vielleicht sogar Minuten lang vor dem eigentlichen Eintritt der Erschütterung gehört wurde, könnte uns vielleicht, wenn genauere Zeitbeobachtungen vorlägen, zur Bestimmung der Zeit dienen, welche die Zerreißung in ihrem Fortgang von unten bis oben benötigte.

V. Klassifikation des Kalifornischen Erdbebens.

Wir kommen nun auf die eingangs erwähnte Einreihung dieses Bebens in die tektonische Rubrik zurück und müssen uns fragen, ob sich dieselbe vom Standpunkte unserer Hypothese aus noch aufrecht erhalten läßt. Man bezeichnet die tektonischen auch als Dislokationsbeben, wenn also Dislokationen magmatischer Massen hier vorliegen, könnte man ganz wohl von einem Dislokationsbeben sprechen. Solche Dislokationen hat Toula freilich nicht gemeint, als er jenen Namen für die tektonischen Beben münzte. Er hatte nur Dislokationen schon fester Krustenteile im Auge; aber auch solche haben ja beim Eindringen der magmatischen Massen stattgefunden und so ergibt sich daraus, daß die Benutzung des Wortes Dislokation eigentlich nicht recht geeignet ist, um eine bestimmte Klasse von Beben gegenüber den vulkanischen auszuzeichnen. Hörnes schlug vor eine besondere Gruppe der kryptovulkanischen Beben auszuscheiden (Erdbebenkunde, S. 255), „die mit Intrusionsvorgängen in der Tiefe zusammenhängen, die sich oberflächlich nur durch Erschütterungen verraten“. Er meint allerdings, daß sie „in ihrer eigentlichen Natur wohl sehr schwer — mit den uns zu Gebote stehenden Mitteln aber gewiß gar nicht zu erkennen seien; ein Mangel, über welchen uns allenfalls die Erwägung trösten mag, daß solche Fälle, in welchen große Intrusionen in der Tiefe stattfinden, ohne sich auch an der Oberfläche durch die gewöhnlichen Eruptionerscheinungen zu verraten, vergleichsweise ungemein selten sein mögen“. Das war 1893, also vor 17 Jahren geschrieben. Seitdem hat sich die Seismologie erstaunlich entwickelt. Gleichwohl würden

uns auch jetzt noch die Mittel fehlen, für das Kalifornische Erdbeben den kryptovulkanischen Ursprung wahrscheinlich zu machen, wenn dasselbe nicht durch jene ausgezeichnete Monographie in so gründlicher Weise beschrieben worden wäre. An Stelle des Wortes „kryptovulkanisch“ möchte ich freilich lieber Injektionsbeben setzen. Da es aber denkbar ist, daß sich solche Beben in der verschiedenartigsten Weise oberflächlich bemerkbar machen, und da für das Kalifornische jedenfalls die lineare oder, richtiger gesagt, die flächenhafte Entwicklung ein besonderes Charakteristikum ist, so kann dasselbe auch noch weiter als Spaltenbeben bezeichnet werden. Einer Verwechselung mit tektonischen Spaltenbeben wird leicht vorzubeugen sein durch Anwendung des Namens Injektions-Spaltenbeben.

ÜBERSICHTSKARTE der Ortsveränderungen vor 1906.



Erklärung:

- Ortsbewegungen vor 1906
- Expansions-Gebiet.
- C Bewegungen von u. vor 1906 nicht getrennt.

Maßstab für die Ortsbewegungen.
Meter.

ÜBERSICHTSKARTE des kalifornischen Erdbebens von 1906.

Maßstab der Karte
10 5 0 10 20 30
Kilometer.

