

# Über die Ursachen der Bergschläge; Beitrag zu ihrer Erklärung.

Von

A. FELLER (Zürich).

(Mit 6 Figuren.)

Als Manuskript eingegangen am 27. Mai 1926.

## A. Einleitung.

Mit dem Namen Bergschläge, Gebirgsstoss, knallendes Gestein bezeichnen wir eine Erscheinung der Natur, wie sie beim Bau von Tunnel, Stollen und in Steinbrüchen beobachtet werden kann. Sie besteht im plötzlichen Abspringen, manchmal unter lautem Knall, von bis dezimeterdicken und quadratmetergrossen Gesteinsplatten aus den vertikalen Wänden der gesprengten Räume. Beim Versuch, die schalenförmigen Gebilde wieder in die Ausbruchnischen hineinzupassen, erweisen sich die ersteren als zu gross.

Weil Bergschläge nur an kompaktem und geschichtetem Gestein wie Granit, Kalk, Gneis zu beobachten sind, niemals in treibendem oder zerrüttetem Gebirge, so müssen wir notwendigerweise folgern, dass in der Erscheinung Spannungen sich auswirken, die von den entsprechenden elastischen Formänderungen begleitet sind. Im folgenden wollen wir nun diese Vermutung, die mit den Ansichten über Bergschläge des Simplon-Geologen Prof. C. SCHMIDT<sup>1)</sup> in Basel übereinstimmt, mit Hilfe der Festigkeitslehre rechnerisch zu begründen versuchen. Aus der grossen Zahl der Beobachtungen vom Simplon und andern Orten des Tunnel- oder Bergbaues fassen wir das Typische der Erscheinung zu einem Normalzustand zusammen. Wir wählen als Gestein einen Gneis, anstehend in starken, horizontal liegenden Schichten. Den Ort der Untersuchung legen wir in den Punkt der grössten Überlagerung unseres gedachten Stollens, die wir zu 1500 m annehmen.

---

<sup>1)</sup> Die Geologie des Simplongebirges und des Simplontunnels von C. SCHMIDT, Basel, 1908, Universitätsbuchdruckerei Friedrich Reinhardt.

## B. Versuch einer statischen Begründung.

### 1. Spannungszustand im Beobachtungspunkt vor der Durchörterung (Fig. 1).

In einem Quader, der genau die Grösse unseres Stollens von  $2,0 \times 2,0 \text{ m}^2$  aufweisen soll, treten unter dem Einflusse des Eigengewichts Spannungen nach allen Richtungen auf. In den Bereich unserer Beobachtungen brauchen wir jedoch nur die hauptsächlichsten Kräfte einzubeziehen, die vertikal und horizontal gerichtet sind, weil sie zur Erklärung der Bergschläge genügen. Von unserem Quader lässt sich

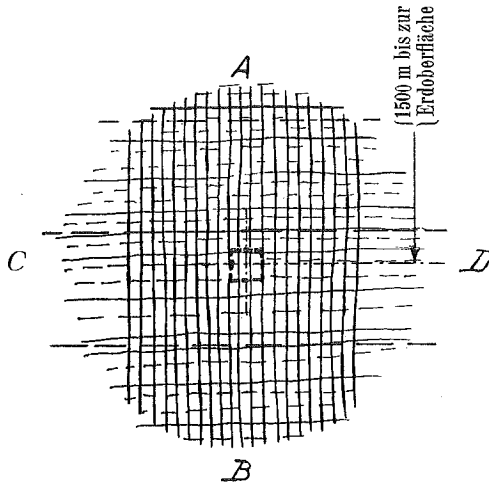


Fig. 1. Spannungszustand vor der Durchörterung.

sagen, dass er sich im Gleichgewicht befindet, da er allseitig als eingespannt zu betrachten ist. Die Kräfte in der Richtung  $A B$ , aus der überlagernden Felsmasse bestimmbar, betragen  $0,26 \text{ kg} \times 1500 = 390 \text{ kg/cm}^2$  (Spez. Gewicht  $2,60 \text{ t/m}^3$ ). Die diesen Kräften entsprechende Querdehnung in Richtung  $C D$  wird durch den Widerstand der angrenzenden Felsmassen verunmöglicht, die denselben Spannungszustand aufweisen. Da für unsere späteren Überlegungen das Wissen um den Verlauf der Spannungstrajektorien von grosser Wichtigkeit ist, so zeichnen wir, wie in Fig. 1 angedeutet, eine Schar von diesen senkrecht zueinander stehenden Druckkurven.

### 2. Spannungszustand während der Durchörterung (Fig. 2).

Beim Fallen der Stollenbrust infolge der Sprengschüsse erleiden nun die Druckkurven einen plötzlichen Unterbruch. Der Hohlraum

müsste allseitig zusammenbrechen, wenn nicht die Gesteinskohäsion an die Stelle des Gegendrucks treten und vorläufig die Kräfte aufnehmen würde. Doch diese streben nach einem stabileren Gleichgewicht und finden ein solches durch Umgehen der Lücke. Sie biegen aus ihrer ursprünglichen Richtung ab und legen sich in dichter Schar um den Stollen herum. Die Folge davon ist eine beträchtliche Mehrbelastung des Gesteins an diesen Stellen. Man hat also beim Vortrieb eines Stollens nicht nur die Gesteinsfestigkeit oder Kohäsion, sowie die Spannung infolge Eigengewichts zu überwinden, sondern auch einen verschärften Spannungszustand, der wie die Sprengungen punktwise vorwärtsschreitet. Daher erklärt sich der hohe Sprengstoffverbrauch inwendig im Stollen, gegenüber dem viel kleineren über Tag oder im

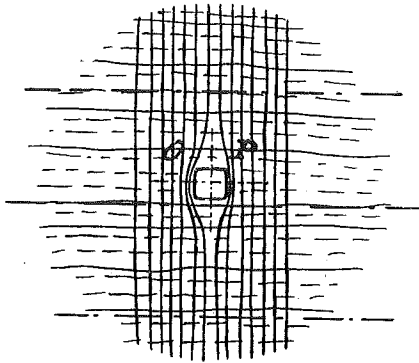


Fig. 2. Während der Durchörterung.

Steinbruch bei gleich grosser Gesteinsmasse, sowie auch die Schwierigkeit im Herausschiessen sauberer, d. h. eckiger Profile. Eine Steigerung der Mehrbelastung bis zum Überwinden der Gesteinsfestigkeit ist sowohl der zu geringen Mächtigkeit der Überlagerung wie auch der langsam sich vollziehenden Lastverteilung wegen ausgeschlossen. Damit es zum Bruch des Gesteins in den meist belasteten Ecken *O* und *P* (Fig. 2) käme, müssten die Tunnel viel tiefer liegen. Rechnerisch ergibt sich der Abstand von der Erdoberfläche bis zum Punkt in der Erdrinde, wo die Bruchfestigkeit eines Gneises von  $2000 \text{ kg/cm}^2$  und  $2,60 \text{ t/m}^3$  spez. Gewicht überschritten ist, zu  $7,70 \text{ km}$ . Bei oberflächlicher Betrachtung der Bergschläge könnte wohl nur ein Zerdrücken des Gesteins wie in der Festigkeitsmaschine in Frage kommen, doch ist die Gesteinsfestigkeit noch gar nicht erreicht. Wir müssen also nach andern Ursachen suchen.

### 3. Spannungszustand nach der Durchörterung. (Fig. 3.)

Wenn wir verschiedene Spannungszustände unterscheiden, so müssen wir uns darüber klar sein, dass wir in Wirklichkeit einen kontinuierlichen Übergang haben. Das Gestein erfährt fortgesetzt Spannungsänderungen vom Augenblick an, da die Minen ertönen, bis zum Eintreffen der Bergschläge. Bis an der durchörterten Strecke die Gesteinsplatten abspringen und im dahinterliegenden Felsen wieder Gleichgewicht herrscht, verfließt eine gewisse Zeit, die abhängig ist von Gesteinsmaterial, Überlagerung und Schichtung. Sie beträgt einige Tage bis Monate. Kommen störende Einflüsse dazu, wie in der Nähe

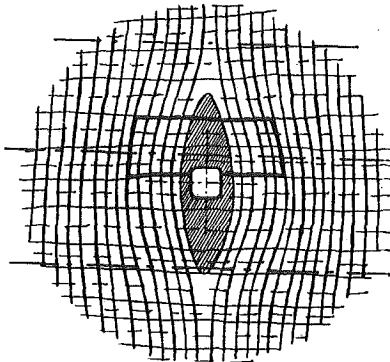


Fig. 3. Nach der Durchörterung.

vorgenommene Sprengungen zum Vollaussbruch, Erdbeben, so wirken diese lösend und man beobachtet eine Zunahme der Erscheinung.

Der in Fig. 2 skizzierte Spannungszustand ist also nur eine augenblickliche Erscheinung. Zwischen dem Berginnern und den mehr belasteten Rändern um den Stollen herum bestehen Spannungsdifferenzen, die einem Ausgleich zustreben. Die Drucklinien wandern soweit einwärts, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Indem die Einflusszone sich vergrößert, sinken die Werte der spezifischen Spannungen. So wird das Gestein am Felsrand nach und nach spannungslos. Es hat die ganze Wucht der ehemals auf ihm lastenden Felsmassen nicht mehr zu tragen, sondern nur das Eigengewicht der dem Hohlraum zunächst liegenden und sich hauptsächlich nach oben erstreckenden, entspannten und geringen Massen. Das im Zustand der elastischen Zusammendrückung sich findende Material beginnt bei der andauernden Druckabnahme von ursprünglich  $390 \text{ kg/cm}^2$  auf schätzungsweise 5 oder  $10 \text{ kg/cm}^2$  sich zu dehnen. Der Vorgang der Dehnung spielt sich zuerst

in dünnen Schichten der Felsoberfläche ab und setzt sich von da ausgehend in die Tiefe des Gesteins fort. Doch wirken ihm sowohl die Kohäsion am Nichtgedehnten, wie auch die Kontraktion infolge Abkühlung entgegen. Dennoch überwiegt die Dehnung. Es entstehen fortwährend wachsende Spannungen, die schliesslich selbst die Kohäsion zwischen den verschiedenen beanspruchten Zonen zu überwinden vermögen und zur Abtrennung von plattenähnlichen Gebilden führen. Ob die Dehnung infolge Druckentlastung tatsächlich Beträge erreichen kann, die den Befund der Beobachter bestätigen, dass keine Platte mehr in ihre Nische hineinpasst, wollen wir nun zahlenmässig untersuchen.

Zu dem Zweck benützen wir die Formeln und Zahlen von C. BACH, wie sie in der Hütte, Festigkeitslehre angegeben sind. Wir setzen Gneis = Granit und finden folgende Gleichungen und Werte für Druck:

$$E = 300\,000 \text{ kg/cm}^2 = \frac{1}{\alpha_0}$$

$$n = 1,12$$

Da bei den Gesteinen der Elastizitätsmodul von der Spannung abhängt, so kommen wir der Wirklichkeit durch Anwenden einer mittleren Dehnungszahl näher.

Mittlere Dehnungszahl  $\alpha$  für die Spannungsgrenzen 0 und  $\sigma = 390 \text{ kg/cm}^2$ :

$$\alpha = \frac{1}{E} = \alpha_0 \sigma^{n-1}$$

oder

$$E = \frac{1}{\alpha_0} \times \frac{1}{\sigma^{n-1}} = \frac{300\,000}{390^{0.12}}$$

$$= 166\,620 \text{ kg/cm}^2$$

Wenn wir die Längenänderung  $\Delta l$  eines dünnen, schmalen Plattenstreifens von 1,50 m Höhe und  $1 \text{ cm}^2$  Querschnittfläche bestimmen wollen, so setzen wir:

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{F \cdot E} = \frac{390 \times 150}{1 \times 166\,620} = 0,35 \text{ cm}$$

Unser Rechnungsbeispiel ergibt also ungefähr 3—4 mm Längenzunahme, welche die an den Platten beobachtete Längenänderung zu erklären scheint.

Ob es sich bei dieser Feststellung um eine allgemein gültige Gesetzmässigkeit handelt oder nicht, ist nun eine weitere Frage. Ferner

dürfen wir die Untersuchung nicht eher abschliessen, bevor wir den Einfluss der Temperatur-Änderung am Gestein infolge kalter Stollenluft untersucht haben.

Nun besteht eine merkwürdige Tatsache, dass die Bergschläge sozusagen ausschliesslich an den vertikalen Wänden der Stollen beobachtet werden. Selten oder beinahe nie im Hangenden, am First oder Dach der Hohlräume. Gerade dort sollte die Erscheinung sich häufen, aber sie bleibt aus! Einzelne Vorkommnisse können wir nicht als Bergschläge auffassen, weil ihre Ursachen anderer Art sind, wie wir später sehen werden. Offenbar liegt dem Ausbleiben der Bergschläge im Scheitel eine Belastungsänderung zugrunde, die auf folgende Umstände zurückzuführen wäre: 1. auf die horizontale Schichtung des Gesteins und 2. auf seine Beanspruchung infolge Biegung, da die Schichtplatte wie ein Deckel oder Balken über dem Stollen-Hohlraum liegt (Fig. 3). Das eine Mal haben wir Druckspannungen senkrecht zur Schichtung, wobei sich die maximale Widerstandsfähigkeit des Gesteins geltend macht, das andere Mal Zugspannungen in Richtung der Schicht und in einem Material, das zur Aufnahme solcher Kräfte ungeeignet ist. Vergleichen wir die Elastizitätsmoduln für Zug und Druck miteinander, so finden wir, dass die ersteren für Zug zweibis dreimal kleiner sind, als die andern, ca. 100,000 kg/cm<sup>2</sup>, d. h. die Dehnung in Richtung der Faser oder Schicht ist grösser als senkrecht dazu. Folglich müssten bei Entlastung noch viel eher Bergschläge zu erwarten sein. Da sie aber ausbleiben, müssen wir schliessen, dass in horizontaler Richtung keine oder nur geringe Druckbeanspruchung herrscht. Vom geologischen Standpunkt aus gesehen scheint das nicht unwahrscheinlich zu sein, wenn man Schicht auf Schicht wie Brett auf Brett gelegt sich denkt. Die Durchörterung ändert also hierin scheinbar nichts. Dazu kommt noch, dass die Vorgänge der Expansion und Biegung die äussern Fasern in der Firstfläche im gleichen Sinn dehnen, sowie der Umstand, dass ihre entsprechenden Werte der spezifischen Spannung sehr klein sind. Das Gestein kann ohne weiteres diese geringen Beanspruchungen aufnehmen, d. h. zum Herbeiführen sichtbarer Deformationen reichen sie nicht aus. Kommt es trotzdem zum Niederbrechen von Platten, so ist der Vorgang auf natürlich vorhandene Risse und Schichtfugen mit verminderter Kohäsion zurückzuführen. Sie verlieren infolge vom Sprengen herrührender Risse, sowie der die Kohäsion aufhebenden horizontalen Schubspannungen und der Verwitterung den Zusammenhang gänzlich und fallen heraus, wenn sie nicht genügend mit der Umgebung verzahnt sind, sonst klingen sie beim Anschlagen hohl. Hier könnte auch der Faktor Temperaturänderung

am nicht expandierenden Gestein des Firstes sich eher geltend machen als an den Seitenwänden, indem eben die Kontraktion infolge Abkühlung ein Ausgleiten der Platten zur Folge haben könnte. Doch ist der Einfluss der Temperatur, wie wir später sehen werden, verschwindend klein. Hingegen müssen wir an dieser Stelle zur Stützung unserer Ansicht, dass keine oder nur geringe Querdehnung, also keine oder nur geringe Druckbeanspruchung in horizontalem Sinne im Gestein besteht, die Tatsache anführen, dass die Bergschläge durch rechtzeitige Verkleidung der Seitenwände verhindert werden können. Mit dünner Ausmantelung wären grosse, horizontal gerichtete Kräfte nicht zu halten. Wenn also die dichte Lage der Druckkurven in Fig. 1, 2 und 3 ein angenähertes Bild der stärkeren oder schwächeren Beanspruchung im Gestein geben soll, so muss die horizontale Schar grosse Abstände aufweisen.

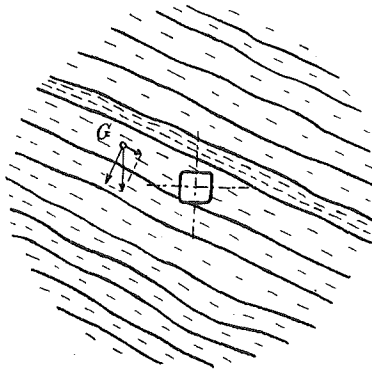


Fig. 4. Stollen in schiefen Schichten.

#### 4. Einfluss schiefer Stellung der Schichten.

Da wir wissen, dass Bergschläge nur in grobbankigem, harten Gestein mit horizontalen Schichtfugen und bei grösserer Überlagerung vorkommen, so müssen wir auch Erklärungen über ihr Ausbleiben bei schiefer oder  $\perp$  gestellter Lagerung abgeben können. Gelingt uns das, so beweisen wir umgekehrt, warum sie nur bei horizontalen Schichten zu beobachten sind.

Wir gehen vom denkbar einfachsten Fall (Fig. 4) aus, wo die Schichten mit der Stollenachse parallel streichen und gegen die Horizontale nur wenig geneigt sind. Lassen wir jene allmählich steiler werden, bis sie  $\perp$  stehen und zeichnen wir schematisch für verschiedene Lagen das Kräfteparallelogramm eines beliebigen Punktes, so überwiegt anfänglich die Komponente  $\perp$  zur Schichtfuge den Schub parallel dazu. In bezug auf den Spannungszustand hat sich beim Durch-

örtern in Felsen solch schiefer Schichten nicht viel geändert, als dass eine minder grosse Druckbeanspruchung in den Vertikalwänden des Stollens vorhanden ist. Das Gestein wird sich wie schon beschrieben verhalten und Bergschläge zeigen. Richten wir die Schichten immer mehr und mehr auf, bis sie  $\perp$  stehen, so nimmt die Belastung, die ehemals von Schicht zu Schicht wirkte, allmählich ab, bis die Richtungen von Gewicht und Platte zusammenfallen (Fig. 5). Diese selbst wird durch unseren Stollen entzweigeschnitten, analog den Platten in Fig. 1—3, mit dem Unterschiede jedoch, dass sie dort wagrecht liegen. Der obere Teil davon ist zwischen den übrigen Felsschichten eingeklemmt. Das Gewicht überträgt sich infolge der Reibung auf die ganzen Felstafeln. Da wir die Platte ihrer Stütze oder des Widerstandes beraubt haben, so muss die Dehnung in Richtung der Schwerkraft ein-

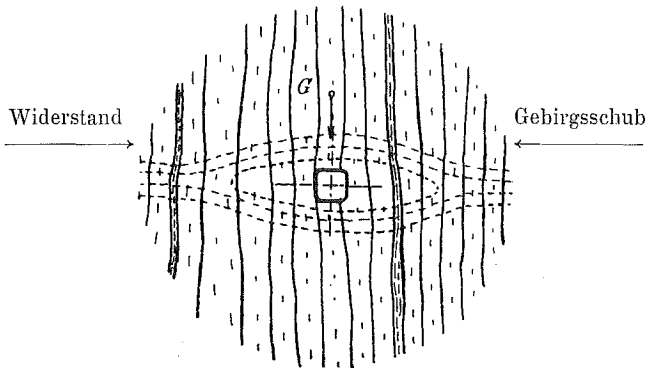


Fig. 5. Stollen in senkrechten Schichten.

setzen. Auch hier findet sich am Rande entlastetes Material vor, analog der Fig. 3, doch geschieht diesmal die Dehnung in Richtung der Schicht und nicht  $\perp$  dazu. Ursache zu verschiedenen beanspruchten Zonen ist bei den gleichgerichteten äussern und innern Kräften nicht vorhanden. Die Kohäsion hält das Ganze zusammen. Sie wird durch die Reibung auf den Schichtfugen unterstützt, die der Dehnung entgegenwirken oder sie gar verunmöglichen. Zum Abreissen von plattenförmigen Gebilden, zu Bergschlägen wird es nicht kommen. In der Praxis werden wir also von den horizontalen Schichten ausgehend bei zunehmendem Neigungswinkel eine Abnahme der Bergschläge bis zum völligen Ausbleiben bei  $\perp$  stehenden beobachten können. Künstlich könnten wir die Bergschläge nur erzeugen, wenn wir die gebirgsbildenden horizontalen Kräfte, wie Widerstand und Schub, an unserm Beispiel Fig. 5 anbringen könnten. Wie wir uns diese zwei Kräfte wirksam denken, so liegen gleiche Bedingungen wie in Fig. 2—3 vor.



Fassen wir die Befunde unserer Untersuchung zu einem Schluss zusammen, so lautet eine erste Bedingung für das Auftreten von Bergschlägen: Horizontalliegende, stark zusammengedrückte, standfeste Gesteinsschichten, die durch den Stollen an den Rändern entlastet werden, wobei sich Teile der Wand infolge Dehnung ablösen.

### 5. Einfluss der Temperatur.

Bis dahin haben wir vom Einfluss der Temperatur abgesehen. Nun ist man versucht, die Bergschläge auch auf Kontraktion infolge Abkühlung durch die kältere Stollenluft zurückzuführen.

Wir bleiben bei unserem Beispiel von 1500 m Überlagerung. Das Gestein zeige eine Temperatur von  $34^\circ$ , der abfliessende Luftstrom

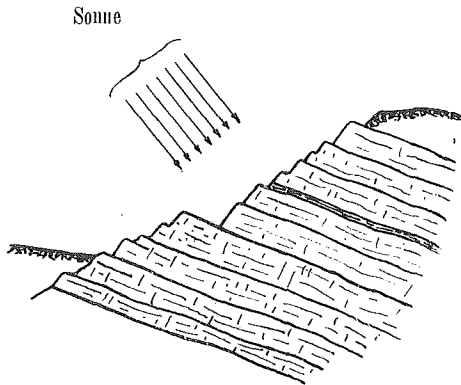


Fig. 6. Temperatureinfluss im Steinbruch.

eine solche von  $24^\circ$ . Das Temperaturgefälle beträgt somit  $10^\circ$  und behalte monatelang diesen Wert. Setzen wir den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\beta = 0,000008$  für Kalk = Gneis und rechnen wir mit 150 cm Länge, so finden wir die Längenänderung

$$\Delta l = 1500 \times 10 \times 0,000008 = 0,12 \text{ mm}$$

Dieser Wert ist, da es sich um Kontraktion handelt, vom Wert der Expansion abzuziehen. Im letztern Falle handelt es sich um Grössen, die nach Millimetern zählen (3—4 mm), im Fall der Temperatur um Bruchteile davon, so dass die Temperatur, vielmehr die Kontraktion gegen die Expansion nicht aufzukommen vermag, ja selbst wenn wir das Temperaturgefälle auf 20 und  $30^\circ$  erhöhen und  $\Delta l$  auf 0,24 — 0,36 mm.

Treten wir aber aus dem Bergesinnern gegen die Erdoberfläche zu, lassen also den senkrechten Druck auf horizontale Schichten immer

kleiner werden bis 0, womit die Ursache der Expansion wegfällt, so macht sich der Faktor Temperatur mehr bemerkbar und wird ausschlaggebend an der Erdoberfläche. Dies ist der Fall in Steinbrüchen (Fig. 6), wo dem Bergschlag ähnliche Vorgänge beobachtet werden. Da das druckerzeugende Element, die Überlastung, fehlt, liegt kein Grund zur Expansion im Sinne der Fig. 1—3 vor, wohl aber zur Kontraktion und Abreißen von Platten infolge ungleichmässiger Temperaturabnahme um  $40-50^{\circ}$  von der sonnendurchglühten Felswand tagsüber bis auf  $20^{\circ}$  in der Nacht. Die tiefere Ursache des Vorganges liegt natürlich in der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Gesteins begründet, die einem raschen Ausgleich entgegensteht.

### C. Schlussfolgerungen.

Bergschläge können also zurückgeführt werden auf Ausdehnung des Gesteins horizontaler Schichten infolge Druckentlastung, wie sie beim Bau tiefliegender Tunnel und Druckwasser-Leitungsorgane der Kraftwerke vorkommt, aber auch als Kontraktion infolge Abkühlung an Felswänden der Steinbrüche. Analoge Vorgänge kennen wir bei der Gesteinsverwitterung in der Wüste, z. B. Sahara. Für jeden Fall besonders ist zu ermitteln, ob der eine oder andere Faktor überwiegt. Hingegen ist die Ansicht, dass in den Bergschlägen noch eine nachträgliche Auswirkung rückständiger Spannungen infolge der Gebirgsbildung sich zeigt, abzuweisen. Wenn man sich vergegenwärtigt, wie durch die Talbildung die Gesteinstafeln oder -platten, die „Schichtpakete“ der Geologen allseitig zersägt sind, so muss man sofort sagen, dass unmöglich solch alte Spannungen noch vorhanden sein können, da sich schon längst alles ausgeglichen haben muss. Unsere Gebirge stehen nur noch unter dem Einfluss der Schwerkraft.

Zürich - Wollishofen, den 21. Mai 1926.

---