

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 93/94 (1929)
Heft: 4

Artikel: Vorausbestimmungen der Gesteinstemperatur im Innern eines Gebirgsmassivs
Autor: Pressel, Konrad
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-43289>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 17.02.2026

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

INHALT: Vorausbestimmung der Gesteintemperatur im Innern eines Gebirgsmassivs. — Wettbewerb für Universität-Erweiterungsbauten und chem. Laboratorium Bern. — Zur Geschichte unserer Siegfriedkarte. — Fernheizwerk für die Eidg. Technische Hochschule. — Mitteilungen: Wälzkolbenpumpe von Mocigemba. Neue Qualitätsbestimmungen für Holz. Kirchgemeindehaus Predigern-Grossmünster in Zürich. Entwicklung der Gaserzeugung in der Schweiz. Neubau der Chirurgischen Klinik

Zürich. Prof. Dr. M. Ros. — Nekrologe: Dr. h. c. Ludwig Kohlfürst. Prof. Dr. Konrad Pressel. — Wettbewerbe: Kindergartenhaus in Wiedikon. — Literatur. — Schweizer. Verband für die Materialprüfungen der Technik. — Mitteilungen der Vereine: Sektion Bern. Technischer Verein Winterthur. Bündner Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. Vortrags-Kalender. S. T. S.

Band 93.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 4

Vorausbestimmung der Gesteintemperatur im Innern eines Gebirgsmassivs.

Von Prof. Dr. KONRAD PRESSEL in München, vormals Oberingenieur der Baugesellschaft für den Simplontunnel, Südseite.

Beim Bau langer, tiefliegender Alpentunnel dringt man in Gebiete von ungewöhnlich hoher Temperatur des Gesteins. Hier reicht die einfache Lüftung mit frischer Luft nicht mehr aus, um erträgliche Arbeitsbedingungen zu schaffen: die Luft muss vielmehr auch noch in ausgiebigster Weise gekühlt werden. Umfassende Einrichtungen müssen getroffen werden zur Abfuhr der ungeheuren Wärmemengen, die in den Tunneln aus den Wänden und, gegebenen Falls, aus heissen Quellen strömen. So z. B. betrug während der langen Zeit, da man sich durch die inneren, heissen Gebiete des Simplontunnels hindurcharbeitete, diese Wärmemengen stündlich rund 6 000 000 Kalorien, die zu beseitigen waren. Bei der Planung solcher Tunnel ist es daher unerlässlich, möglichst zutreffend die der Tunnel Luft aus dem Gebirge zuströmende Wärmemenge zu berechnen, unter der Bedingung, dass die Lufttemperatur in den Arbeitsstellen einen gewissen, noch zulässigen Höchstwert nicht übersteige.

Die eingehende Untersuchung und Lösung dieses Problems verdanken wir F. Heerwagen, der von der Baugesellschaft für den Simplontunnel damit betraut worden war. Sein Originalbericht ist leider nicht veröffentlicht worden; doch sind die Hauptergebnisse im Handbuch der Ingenieurwissenschaften¹⁾ und besonders eingehend von C. Andreae²⁾ mitgeteilt worden.

Voraussetzung für die Berechnung der abzuführenden Wärmemengen ist die Kenntnis der im Richtstollen zu erwartenden Gesteintemperaturen. Es ist deshalb von besonderer Wichtigkeit, für die Vorausbestimmung dieser Temperaturen zuverlässige Methoden zu besitzen.

Zur Zeit der Planung der langen Tunnel des Mont Cenis, Gotthard und Simplon war dieses Problem noch ungelöst. Man war auf ziemlich rohe Schätzungen angewiesen, indem noch zu wenig Erfahrungen vorlagen über den Verlauf der Geoisothermflächen in gebirgigen Gegenden mit hohen Bergen und tiefeingeschnittenen Tälern. Staff³⁾, der verdienstvolle Geologe des Gotthardtunnels, hatte wohl auf Grund seiner zahlreichen Beobachtungen der Temperaturen, sowohl des Gesteins im Tunnel als auch des Bodens über dem Tunnel, Gleichungen aufgestellt, die die an einem beliebigen Punkt des Gebirges herrschende Gesteintemperatur als Funktion einmal des lotrechten Abstands dieses Punktes von der Oberfläche, ein ander Mal als Funktion des kürzesten Abstands von der Oberfläche darstellen sollten. Diese Ausdrücke konnten aber nur für den Gotthard gelten, aus dessen Temperaturbeobachtungen sie abgeleitet waren, nicht aber für andere Gebirgsmassive mit anderem geologischem Aufbau. Unter diesen Umständen, zu denen noch hinzukam, dass die auf Untersuchung der geologischen und Wärme-Verhältnisse im Simplongebiet angewendeten Mittel sehr bescheiden waren, kann es nicht wundernehmen, dass die für den Simplontunnel vorausgesagte Höchsttemperatur so bedeutend abwich von der im Tunnel tatsächlich beobachteten. Bekanntlich war diese mit 56° C um 14° C höher als die vorausgesagte von etwa 42° C.⁴⁾

¹⁾ Bd. 5, Tunnelbau, 4. Aufl., Seite 539 ff. Leipzig 1920.

²⁾ C. Andreae: Der Bau langer tiefliegender Alpentunnel, Berlin 1926, bei Julius Springer. S. 96 ff.

³⁾ J. Staff: Studien über die Wärmeverteilung im Gotthard, Bern 1877.

Diese aussergewöhnlich grossen Abweichungen waren wohl der Anlass, dass man sich seit der Zeit des Simplonbaues eingehender mit dem Problem der Temperaturprognose für tiefliegende Alpentunnel befasst hat. Grundlegende Arbeiten hierüber verdankt man J. Königsberger⁵⁾ und E. Thoma⁶⁾. Sie schlugen den analytischen Weg ein, indem sie als Ersatz für ein ausgeglichenes mittleres Längenprofil eine symmetrische Funktion der mathematischen Behandlung zu Grunde legten.

Im Gegensatz dazu habe ich den Weg des Modellversuchs eingeschlagen, teils aus einer dem Ingenieur angeborenen Neigung zur experimentellen Methode, teils, und vor allem, weil es mir ausser Zweifel erschien, dass die fassbaren hauptsächlichsten Einflüsse, die die Gesteintemperatur unter der Erdoberfläche bedingen, sich an einem Modell des zu untersuchenden Gebietes in viel weitergehendem Mass und auf viel einfachere Weise berücksichtigen lassen, als auf dem Weg der Rechnung.

Vor Eingehen auf einige Möglichkeiten, wie solche Versuche etwa angeordnet und durchgeführt werden könnten, mögen zunächst besprochen werden

DIE EINFLÜSSE, VON DENEN DIE GESTEINTEMPÉRATUR IM INNERN EINES GEBIRGES ABHÄNGT.

Diese Einflüsse sind mannigfacher Art und zwar:

1. die Gestalt der Erdoberfläche, 2. die Bodentemperatur an der Erdoberfläche, 3. der geologische Aufbau des Gebirges und, davon abhängig, 4. die innere Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, 5. die Wasserführung des Gebirges, 6. das chemische Verhalten des Gesteins, endlich 7. das Vorhandensein radioaktiver Stoffe, die Wärme zuführen.

Ueber diese verschiedenen Einflüsse ist folgendes zu sagen:

zu 1. Die Gestalt der Erdoberfläche lässt sich mit jeder beliebigen Genauigkeit feststellen.

zu 2. Von der Bodentemperatur an der Erdoberfläche gilt das gleiche wie zu 1. bemerkt. Man kann und sollte bei einer für den Bau eines langen, tiefliegenden Tunnels so wichtigen Untersuchung ausreichende Mittel aufwenden, um an zahlreichen, in einem grossen Gebiet der Erdoberfläche über dem Tunnel passend gewählten Stellen die mittlere Jahrestemperatur des Bodens zu ermitteln. Bei den oben genannten drei grossen Alpendurchstichen ist dies bedauerlicherweise nicht in ausreichendem Mass geschehen.

zu 3. Die Zuverlässigkeit der Erforschung des geologischen Aufbaues hängt wesentlich ab von den angewendeten Mitteln. Die Möglichkeit einer genügend zutreffenden geologischen Prognose ist jedenfalls gegeben.

zu 4. Die innere Wärmeleitfähigkeit des Gesteins kann entweder, wie dies insbesondere durch Königsberger geschehen ist, im einzelnen an Probestücken im Laboratorium ermittelt werden, oder man kann dafür Durchschnittswerte aus bekannten Verhältnissen ableiten, sei es durch Temperaturmessung in Bohrlöchern in dem zu untersuchenden Gebiet oder durch Beobachtungen im Gebiet bereits erstellter Tunnel, oder endlich durch Heranziehung der Beobachtungen im neu herzustellenden Tunnel nach Massgabe der Fortschritte im Richtstollen.

⁴⁾ Es verdient übrigens hervorgehoben zu werden, dass (meines Wissens von Stockalper) bereits früher die Höchsttemperatur zu etwa 53° C geschätzt worden war.

⁵⁾ J. Königsberger: Normale und anormale Werte der geothermischen Tiefenstufe, „Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie“, 1907, Nr. 22.

⁶⁾ E. Thoma: Ueber das Wärmeleitungsproblem bei willig begrenzter Oberfläche und Anwendung auf Tunnelbauten; Karlsruhe 1906.

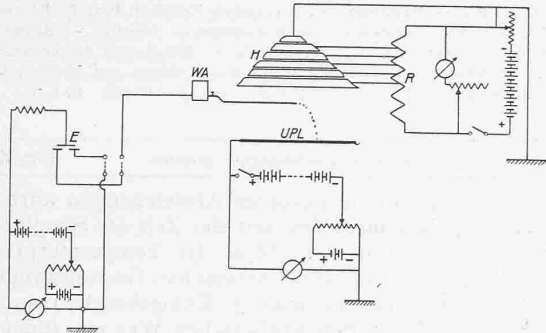


Abb. 1. Schema der Messung mittels elektrostatischen Feldes.

zu 5. Die Wasserführung im Innern eines so grossen Gebirgsmassivs wie z. B. des Simplon mit einer, auch nur einigermaßen zutreffenden Wahrscheinlichkeit vorauszusagen, erscheint nach den gerade am Simplon gemachten Erfahrungen als ein Ding der Unmöglichkeit. Dort hat bekanntlich die auf der Südseite tatsächlich angeschlagene Wassermenge etwa das Neunfache der vorausgesagten betragen. Aber auch selbst wenn man die Wassermenge annähernd richtig geschätzt hätte, genügte dies noch nicht zur Abwägung ihres Einflusses auf die Temperaturverhältnisse des Gebirges, da es ganz ausgeschlossen ist, sich ein Bild zu machen von der Grösse der Berührungsfläche zwischen Wasser und Gestein, durch die der Wärmeaustausch erfolgt.

zu 6. u. 7. Ganz abgesehen davon, dass aller Wahrscheinlichkeit nach diese beiden Einflüsse kaum von erheblicher Bedeutung sein dürften, ist nicht anzunehmen, dass sie zuverlässig ermittelt werden können.

Aus vorstehenden Betrachtungen ergibt sich, dass nur die vier erstgenannten Einflüsse bei Untersuchungen zur Vorausbestimmung der Gesteintemperatur in Betracht gezogen werden können. Sehr günstig fügt es sich, dass gerade die Gestaltung der Erdoberfläche, die beliebig genau festgestellt werden kann, nach aller Wahrscheinlichkeit besonders bedeutsam ist für den Verlauf der Gesteintemperatur. Hinsichtlich des Einflusses von Gebirgswässern kann man behaupten, dass er in weitaus überwiegendem Mass ein die Gesteintemperatur erniedrigender sein dürfte. Damit ist allerdings nicht gemeint, dass dadurch ohne weiteres für eine Tunnelarbeit günstigere Verhältnisse geschaffen werden. Ohne besondere Massnahmen würde im Gegenteil durch das Wasser der Tunnel Luft bedeutend mehr Wärme zugeführt als bei trockenem, wenn auch heissem Gestein.

EINIGE MÖGLICHKEITEN VON VERSUCHSANORDNUNGEN.

1. „Theoretischer“ Versuch.

Sehr naheliegend wäre der Gedanke, in grösserem Massstab ein nicht bloss in den geometrischen, sondern auch in den geologischen Verhältnissen der Wirklichkeit möglichst genau entsprechendes Modell des Gebirgsmassivs aus den darin zu erwartenden Gesteinschichten oder ähnlich wärmeleitenden Stoffen herzustellen. Man könnte dadurch also auch den Wärmeleitverhältnissen mit grosser Annäherung Rechnung tragen. Das Gebiet, über das das Modell sich erstreckt, wäre so gross zu wählen, dass es sich zu beiden Seiten der Tunnelaxe und über die Tunnelmündungen hinaus etwa 12 bis 15 km oder mehr erstreckt. Unten möge das Modell abgegrenzt werden durch eine wagrechte ebene Grenzfläche in solcher Tiefe unter dem Meeresspiegel, dass man diese Ebene als Geoisothermfläche ansehen kann. Die lotrechten Grenzflächen wären gegen Wärmeaustausch so gut als möglich zu schützen. Die untere ebene Grenzfläche hätte man dauernd durch Heizung auf einer solchen Temperatur zu halten, wie sie nach der mutmasslichen geothermischen Tiefenstufe ihrer Tiefenlage entspricht. Die obere, der natürlichen Form der Erdoberfläche nachgebildete Grenzfläche müsste auf einer Tempe-

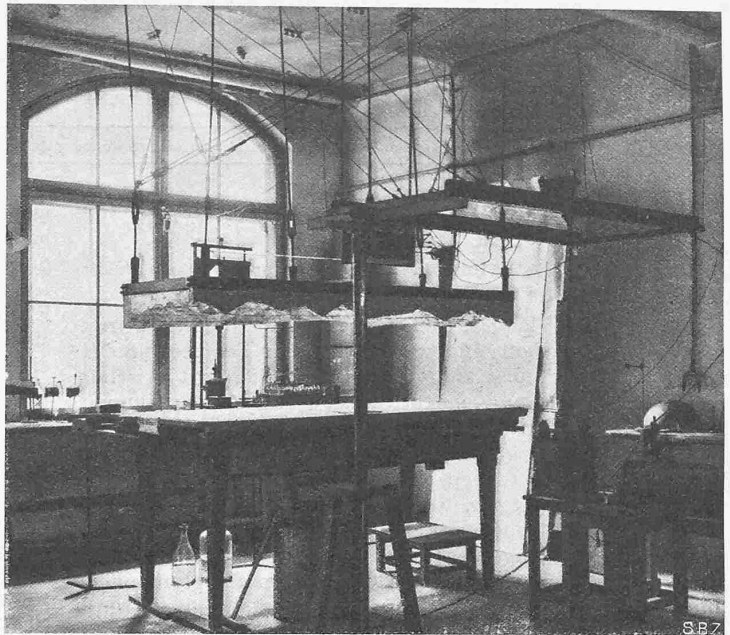


Abb. 2. Aufhängung des Hohlmodells für Temperaturbestimmung mittels elektrost. Feldes.

ratur gehalten werden, wie sie der mittleren Jahrestemperatur des Bodens entspricht. Noch weitergehend wäre es, die obere Grenzfläche in eine Anzahl Gebiete zu teilen, denen die entsprechenden mittleren Jahrestemperaturen des Bodens im betreffenden Teilgebiet zuzuweisen wären. Wäre dann in der Durchwärmung des Modells der Beharrungszustand erreicht, so liessen sich durch Thermolemente, die durch feine Bohrungen bis zur Tunnelaxe oder bis zu beliebigen andern Punkten des Modells versenkt würden, die Temperaturen an jenen Stellen unmittelbar messen.

2. „Kalorischer“ Versuch.⁷⁾

Der Boden eines Gefässes wird aus Kupferblech als Hohlmodell des zu untersuchenden Gebirgs hergestellt. Die Seitenwände bestehen aus möglichst schlechten Wärmeleitern. Das Gefäss wird, mit irgend einer bei passender Temperatur gefrierenden Flüssigkeit, z. B. Wasser, gefüllt, in einen grösseren Behälter eingehängt, in dem eine Flüssigkeit, z. B. Chlorcalciumsole, umläuft, die mittels einer Kältemaschine auf einer etwas unterhalb des Gefrierpunkts der Füllflüssigkeit liegenden Temperatur gehalten wird. Die Füllflüssigkeit im unteren Teil des Modellgefässes erstarrt allmählich von aussen nach innen, wobei in jedem Augenblick die Oberfläche des erstarrten Teiles eine Isothermfläche bildet. Von Zeit zu Zeit wird die Oberfläche des erstarrten Teiles mit Hilfe des lotrechten, in einem Rost geführten Sonden abgetastet und festgestellt. Die Gewichts-, also auch die Volumenzunahmen des erstarrten Teiles sind den Temperaturunterschieden der Isothermflächen proportional. Zur Bestimmung des Temperaturwertes der ermittelten Isothermflächen genügt die Kenntnis der mittlern Temperatur der obersten Erdkruste und der Temperatur eines im Gebirginnern gelegenen Punktes. Bei dieser Versuchsart wäre die Berücksichtigung der Veränderlichkeit der Bodentemperatur von Ort zu Ort oder selbst von Teilgebiet zu Teilgebiet kaum durchführbar. Man müsste sich also mit Ergebnissen begnügen, wie sie einer überall gleichmässigen Temperatur, nämlich der mittlern Jahresbodentemperatur auf der ganzen betrachteten Erdoberfläche, entsprechen.

Wenn auch an der Durchführbarkeit der beiden vorerwähnten Versuche nicht zu zweifeln ist, und so verlockend auch der erste „theoretische“ Versuch erscheint, so zeigt sich doch, dass beide Versuche sehr umständlich

⁷⁾ Siehe K. Pressel, Sitzungsbericht d. K. Bayer. Akad. d. Wi. Math.-physikal. Kl. 1912, Bericht vom 3. Februar 1912.

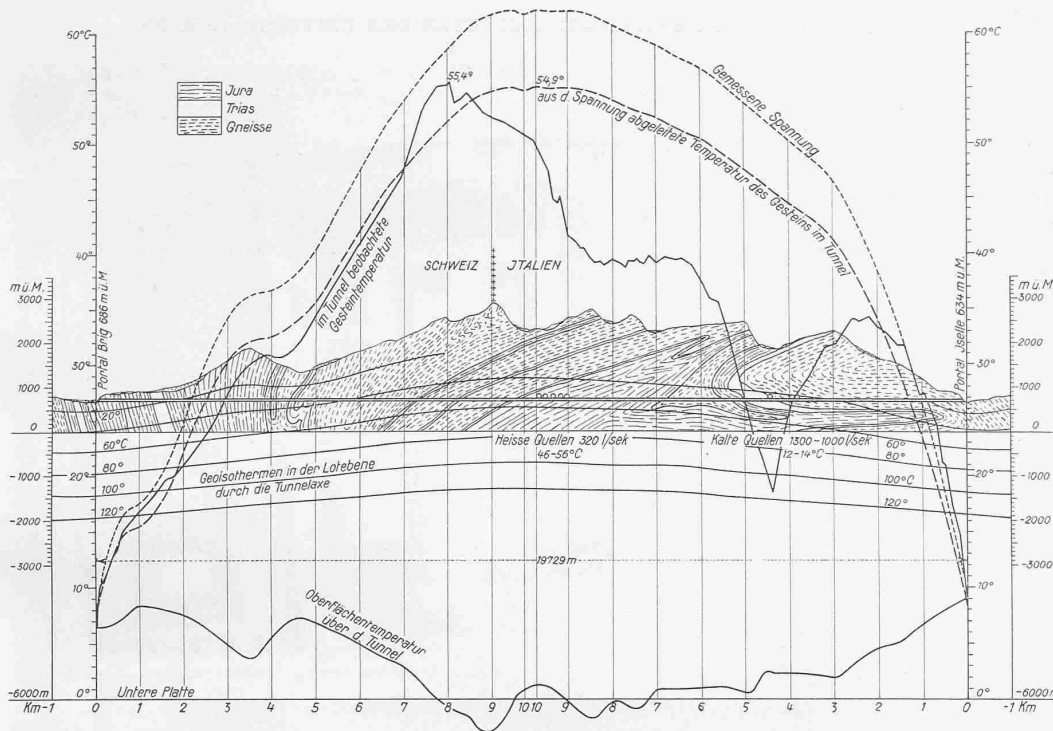


Abb. 3. Experimentelle Vorausbestimmung der Gesteintemperatur nach elektr. Methode an einem Modell des Simplon-Tunnels.⁸⁾

sind und kostspielige Einrichtungen erfordern, sodass man sich wohl nicht zu ihrer Anwendung entschliessen wird, um so weniger, als eine dritte, nachstehend beschriebene Methode sich darbietet, die weitaus einfacher, bequemer, sicherer und genauer zum Ziele führt.

3. „Elektrischer“ Versuch.⁸⁾

Zu dieser Versuchsart hat folgende Ueberlegung geführt. Die Differentialgleichung der stationären Wärme-

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

gilt bekanntlich auch für den Spannungszustand eines elektrischen Kondensators, sowie für mehrere andere physikalische Zustände und Vorgänge. Es ist daher möglich, ein thermisches Feld durch ein elektrostatisches *konform* abzubilden. Misst man in einem solchen elektrostatischen Feld die Spannungen, so lassen sie sich in einfacher Weise in Temperaturwerte umsetzen.

Elektrostatische Felder lassen sich leicht herstellen, und, im Gegensatz zu thermischen Feldern, beliebig lang unverändert erhalten. Die Spannung darin kann bequem und sehr genau gemessen werden, wie Hermann Ebert⁹⁾, weiland Professor der Physik an der Techn. Hochschule in München, bei den von ihm eingeführten Modellversuchen zur Ausmessung des elektrischen Erdfeldes gezeigt hat.

Zur Verwirklichung der konformen Abbildung des thermischen Feldes wird folgendermassen verfahren (siehe Abb. 1 und 2). Ein Hohlmodell H der passend abgegrenzten Erdoberfläche wird in der der Natur entsprechenden Lage an der Decke des Versuchsraums unbeweglich aufgehängt. Das Hohlmodell wird an seiner Unterseite mit einer elektrisch gut leitenden Schicht (etwa Aluminiumfolie) belegt, doch so, dass der Belag in einzelne, von einander elektrisch isolierte Felder geteilt wird; das Hohlmodell selbst besteht aus eisenbewehrtem Gips. Entsprechend einer Tiefenlage von etwa 6 bis 8 km unter dem Meeresspiegel, wo die Isothermen, nicht mehr beeinflusst durch

⁸⁾ Siehe Konrad Pressel: Experimentelle Methode zur Vorausbestimmung der Gesteintemperatur im Innern eines Gebirgsmassivs, Verlag R. Oldenbourg, München und Berlin, 1928.

⁹⁾ Siehe H. Ebert und C. W. Lutz: Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre. Zeitschrift für die wissenschaftl. Erforschung der höheren Luftschichten. Herausgegeben von R. Assmann und H. Hergesell. Bd. II. Heft 5. Strassburg 1908.

die Unregelmässigkeiten der Erdoberfläche, als Ebenen angesehen werden dürfen, befindet sich, genau wagt, eine ebene Zinkplatte UPL, gut isoliert.

An die einzelnen Felder des Hohlmodellbelages werden Spannungen angelegt, die den mittlern Bodentemperaturen der betreffenden Felder entsprechen.

Die UPL wird auf eine beliebige Spannung von 200 bis 300 Volt gebracht. Auf dieser Platte ist die Axe des Tunnels mit den Halbkilometerstationen verzeichnet. Zur Spannungsmessung dient, in Verbindung mit dem Elektrometer E, der Wassertropfengleich WA, der vertikal und horizontal verschiebbar ist, sodass der Zerstäubungspunkt des aus

einer sehr feinen Düse austretenden Wasserstrahlchens in jede wünschenswerte, durch Theodolith und Kathetometer zu kontrollierende Lage gebracht werden kann. Bezüglich aller weiteren Einzelheiten der Einrichtung, der Messvorgänge, der Fehlerquellen usw., sei auf meine oben angeführte Schrift hingewiesen.

Die neue Methode wurde an zwei bekannten Tunnelgebieten, des Simplon und des Gotthard, geprüft. Die Modelle waren im Masstab 1 : 15 000 für den Simplon und 1 : 20 000 für den Gotthard aus bewehrtem Gips hergestellt.

Der Wassertropfengleich WA wurde in der Weise verschiebbar eingerichtet, dass der Zerstäubungspunkt des aus dem Sondenröhrchen austretenden Wasserstrahlchens an jede Stelle der Lotebene durch die Tunnelaxe, zugleich Mittelebene des Modells, gebracht werden konnte. Man begnügte sich mit dieser Anordnung, weil ja nur der Verlauf der Geothermen in dieser Lotebene und vor allem die Messstellen längs der Tunnelaxe interessierten.

Es sei hier noch bemerkt, dass angesichts der verhältnismässig grossen Breite des Modells in der Mittelebene die Randstörungen des elektrischen Feldes nicht mehr fühlbar sind. Ebensovienig werden nach den Untersuchungen von Karl Hoffmann¹⁰⁾ und mir selbst die Spannungen in der lotrechten Mittelebene des Modells durch die Deformationen des elektrischen Feldes infolge des Eindringens des Sondenröhrchens beeinflusst.

Die Messungen ergaben, unter Verwendung der auf den ersten Stollenstrecken gemessenen wahren Gesteintemperaturen, zunächst eine Spannungskurve, deren Ordinaten nur abhingen von der Gestalt der belegten Modelloberfläche und von den, den einzelnen Teilflächen zugewiesenen Spannungen. Um diese Spannungen in Temperaturgrade überzuführen, wurden beim Simplonmodell, nach Massgabe der Fortschritte im Richtstollen, die jeweilig gemessenen wahren Gesteintemperaturen herangezogen zur Ermittlung des Verhältnisses

$$\varepsilon = \frac{F_T}{F_V} = \frac{\text{Temperatur in } ^\circ\text{C}}{\text{entsprechender Spannungswert in Volt}}$$

Dadurch kam von selbst die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit auf den betreffenden Strecken zur Geltung.

¹⁰⁾ Karl Hoffmann „Experim. Prüfung der durch verschiedene Messungsanordnungen in einem homog. elektr. Feld hervorruft. Störungen der Niveauflächen.“ Dokt.-Diss. München 1911.

