Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 11 (1910-1912)
Heft: 1

Artikel: Die Wärmeverteilung im Simplon
Autor: Niethammer, G.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-157077

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: 05.02.2026

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

Die Wärmeverteilung im Simplon.

Von G. Niethammer, Basel.

Einleitung.

Auf Veranlassung von Prof. C. Schmidt habe ich es im Frühjahr 1905 unternommen, die vorhandenen Resultate der Temperaturbeobachtungen im *Simplon* zu sammeln und zu verarbeiten. H. Schardt [1] und ebenso C. Schmidt [2] geben in ihren zusammenfassenden Publikationen bereits vorläufige «geothermische Profile» für den Simplontunnel, ohne die Frage eingehend zu diskutieren. J. Königsberger und E. Thoma [3] verwerten gelegentlich auch die im Simplon gemachten Erfahrungen über Verteilung der Wärme im Berginnern. Die beiliegende Tafel I ist schon vor fünf Jahren von mir, gemeinschaftlich mit Prof. C. Schmidt, entworfen worden und die betreffenden Daten wurden in den genannten Publikationen von C. Schmidt, J. Königsberger und E. Thoma verwertet.

In ihren interessanten neuern Arbeiten suchen J. Königsberger und E. Thoma das Problem der Wärmeleitung in Bergen in seiner Anwendung auf Tunnelbauten allgemein theoretisch zu lösen. Sie sind dabei gezwungen, die «Profillinie» durch eine regelmässige Kurve, am besten eine Sinus-

[1] H. Schardt, Les résultats scientifiques du percement du Tunnel du Simplon, *Bull. technique de la Suisse romande*, 1905.

Id. Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Simplondurchstichs, *Verhandl. d. schweiz. Naturf. Ges.* in Winterthur, 1904, S. 204.

[2] Schmidt, Die Geologie des Simplongebirges und des Simplontunnels, *Rektoratsprogramm der Universität Basel für 1906 und 1907*. Basel, Fr. Reinhardt, 1908, S. 95 u. 96.

[3] E. Thoma, Ueber das Wärmeleitungsproblem bei wellig begrenzter Oberfläche und dessen Anwendung auf Tunnelbauten. *Inaug.-Diss.* Karlsruhe 1906.

J. Königsberger, Ueber die Beeinflussung der geothermischen Tiefenstufe durch Berge, Seen, vulkanische Erscheinungen, chemische Prozesse und Wärmeleitfähigkeit der Gesteine. Congr. géol. Mexico 1906, *Compte rendu*, S. 1127—1154, sowie

Id., Ueber die Beeinflussung der geothermischen Tiefenstufe durch Berge und Täler, Schichtstellung, durch fliessendes Wasser und durch Wärme erzeugende Einlagerungen. *Eclog. geol. helv.*, vol. IX 1906, S. 133—134.

kurve zu ersetzen und von den Temperaturbeobachtungen unter Ebenen auszugehen. Meine Arbeit beschränkt sich auf eine kritische Verarbeitung sämtlicher Temperaturbeobachtungen am Simplon und die Berechnung der für den Simplon gültigen Temperaturgradienten [1].

Die mir zur Verfügung stehenden Bestimmungen von Gesteinstemperaturen im Innern des Tunnels und an der Oberfläche sind in erster Linie entnommen den « Rapports trimestriels au Conseil fédéral Suisse sur l'état des travaux du percement du Simplon », die vom 31. Dezember 1898 bis zum 31. März 1906, anfänglich von der Jura-Simplonbahn, später von den Schweizerischen Bundesbahnen ausgegeben worden sind. Fernerhin verdanken wir den leitenden Ingenieuren der « Baugesellschaft für den Simplontunnel » die Mitteilung sämtlicher Resultate der von ihnen im Tunnel ausgeführten Temperaturbestimmungen.

Herrn Prof. C. Schmidt bin ich für mannigfache Mithülfe zu Dank verbunden. Von grossem Nutzen waren mir die Ratschläge zur mathematischen und graphischen Behandlung der Probleme, die mir mein Bruder, Dr. Th. Niethammer, gütigst erteilt hat.

Inhaltsübersicht.

1. Ermittlung der Bodentemperaturen an der Oberfläche über dem Tunnel.
2. Die Felstemperaturen im Simplontunnel.
3. Konstruktion der Geoisothermen im Tunnelprofil.
4. Berechnung des durchschnittlichen Temperaturgradienten für den Simplon.
5. Die Differenz zwischen dem Simplon- und Gotthardgradienten und ihre Ursachen.
6. Die geothermischen Tiefenstufen der einzelnen Teile des Simplons.

[1] Siehe auch F. M. Stapff, *Studien über die Wärmeverteilung im Gotthard*, I. Teil. Der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft zu ihrer 60. Jahresversammlung in Bex gewidmet. Bern 1877. Der II. Teil, welcher die « Schlusssätze über den Einfluss, welchen die topographische Beschaffenheit der Oberfläche, Wasserzuflüsse im Innern, Verschiedenheit der Wärmekapazität oder Wärmeleitung der konstituierenden Gesteinsarten, auf die Temperaturzunahme nach dem Innern ausüben », bringen sollte, ist nie erschienen. 1880 publizierte dann Stapff eine graphische Darstellung der Wärmeverteilung im Gotthard in 1 : 50,000 mit begleitendem Text, betitelt : « *Répartition de la température dans le grand Tunnel du Saint-Gotthard* », als « *Annexe au vol. VII des Rapports trimestriels du Conseil fédéral suisse sur la marche des travaux du chemin de fer du Saint-Gotthard* ». Berne, 1880.

1. Ermittlung der Bodentemperaturen an der Oberfläche über dem Tunnel [1].

Die Darstellung der Wärmeverteilung in der Vertikalebene längs des Simplontunnels hat sich zu stützen auf Temperaturbeobachtungen des Gesteins im Tunnel und solchen des Bodens an der Oberfläche.

Um die Wärmeverhältnisse an der Erdoberfläche festzustellen, wurden von der geologischen Simplonkommission der Simplongesellschaft an 15 Punkten des Simplongebietes die Bodentemperaturen in 1 bis 1,5 M. tiefen Löchern gemessen. In dieser Tiefe machen sich die täglichen Schwankungen der Lufttemperatur nicht mehr bemerkbar [2]. Leider sind nun aber nur die Beobachtungen von 8 Stationen so vollständig, dass aus ihnen die wirklichen mittleren Bodentemperaturen ermittelt werden konnten. Es sind die folgenden Stationen: 1. Im Rafji beim Nordportal des Tunnels (690 M.), 2. Bielen auf Brigerberg (915 M.), 3. Resti bei Rosswald (1850 M.), 4. Unter Berisal (1320 M.), 5. Hohenegg bei Wasenalp (2030 M.), 6. Simplonhospitz (2008 M.) auf der Nordseite, und 7. Bugliaga (1316 M.), 8. Nante unterhalb Iselle (589 M.) auf der Südseite. Die Temperatur des Bodens dieser Orte wurde — womöglich alle Monate zweimal — in 1 M. tiefen Löchern gemessen mit Hilfe von Lamond-Thermometern. Die aus diesen Messungen berechneten Monatsmittel sind nicht gleichwertig, da für die höher gelegenen Stationen im Durchschnitt nur halb soviel Ablesungen vorliegen als für die tiefer gelegenen [3].

Von den übrigen — in Höhen von 1800—2700 M. gelegenen — sieben Stationen sind nur die, zum Teil sehr spärlichen, während des Sommers gemachten Ablesungen vor-

[1] Bezüglich der bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur auftretenden und zu erörternden Fragen verweise ich auf J. Königsberger, E. Thoma und F. Leier. Ueber Bodentemperaturen im Schwarzwald, in Graubünden und in Egypten. *Bericht d. Naturf. Gesellsch. Freiburg i. Br.*, Bd. XVIII (1909) S. 23—42, sowie auf die in dieser Arbeit zitierte Literatur, wovon besonders die Arbeit von A. Woeikof in der *Zeitschrift f. Meteorol.* Bd. 21 (1904) S. 50, zu beachten ist.

[2] Nach einigen Angaben der « *Rapports trimestriel* », die offenbar Resultate von Kontrollbeobachtungen darstellen, ist dies nicht immer der Fall. Vielleicht sind auch die Intervalle zwischen den einzelnen Messungen nicht genügend gross gewesen, sodass das Thermometer am Ende dieser Zeiträume noch nicht die wirkliche Gesteinstemperatur annehmen konnte.

[3] Vergl. die Anmerkungen auf S. 99.

handen; während der kalten Jahreszeit wurden nur die Minimal-, nicht auch die Maximaltemperaturen gemessen. Es sind dies die Stationen: 9. Passo di Forchetta oder Passo di Aurona (2690 M.), 10. Rossetto am Fuss des Gletschers von Aurona (2211 M.), 11. Punta di Amoinciei (2709 M.), 12. Lago d'Avino (2237 M.), 13. Passo di Valgrande oder Colle di Vallé (2448 M.), 14. Alpe di Vallé (1863 M.) und 15. Passo Possette (2248 M.). Wie aus den « Rapports trimestriels » Nr. 8 und 14 hervorgeht, wurden die Bodentemperaturen der Stationen 9, 11, 13 und 15 mit Minimumthermometern in 1,5 M. tiefen, horizontalen Bohrlöchern beobachtet, während die Löcher der Stationen 10, 12 und 14 nur 1 M. tief sind, da zuerst geplant war, an diesen Stationen auch im Winter regelmässige Ablesungen auszuführen und sie deshalb auch mit Lamond-Thermometern ausgerüstet wurden. Davon musste aber notgedrungen abgesehen werden und es erhielten auch diese Stationen Minimumthermometer.

In folgender Tabelle (S.100) sind die aus den Beobachtungen ermittelten Monatsmittel[1] der Bodentemperaturen dieser 15 Stationen zusammengestellt, sowie die aus den beobachteten Winterminima berechneten mittleren Minima der 7 Höhenstationen. Nur von den 8 vollständig beobachteten Stationen sind auch die aus den Monatsmitteln berechneten Jahresmittel angegeben.

Wie schon erwähnt besitzen wir von den Höhenstationen nur spärliche über die Monate Juni-November sich erstreckende Temperatur-Beobachtungen. Für die übrige Zeit besitzen wir nur die Angaben des Minimumthermometers. Man hätte auch die zur Sommerszeit eintreffenden Temperaturmaxima beobachten sollen, da nach den Versuchen von J. Königsberger etc. für zirka 3 M. tiefe Bohrlöcher « das Mittel aus Maximum und Minimum sogar bei Jahresschwankungen von über 5° auf + 0,1° genau gleich dem planimetrisch ausgemessenen Mittel der Monatstemperaturen ist ». Doch ist es sehr fraglich, ob dieser Erfahrungssatz auch anzuwenden ist auf die Bodentemperaturen in nur 1—1 ½ M. Tiefe unserer Höhenstationen mit ihren zirka 10°, z. T. mehr als 18° C. betragenden Jahresschwankungen. Diese grossen Schwankungen sind leicht erklärlich; denn diese Höhenstationen entbehren der schützenden Pflanzendecke

[1] Mit Ausnahme der 7 Höhenstationen wurden die Monatsmittel gebildet aus Halbmonatsmitteln. Halbmonatsmittel wurden gebildet, weil an den 8 leicht erreichbaren Stationen die Bodentemperatur monatlich zweimal abgelesen wurde in Intervallen von ± 15 Tagen.

Stationen	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahresmittel	Berech. Jahresmittel	Beob. minus berechn.
Im Rafji..... (690 M.)[1]	1.4	0.5	0.7	3.5	7.3	10.0	11.8	12.5	11.5	9.2	5.3	2.8	**6° 35** C	8.7	— 2.35
Brigerberg..... (915 M.)[2]	3.7	2.8	2.8	5.2	8.4	10.9	13 0	14.4	14.0	11.8	8 2	5.4	**8° 35** C	7.65	+ 0.70
Rosswald..... (1850 M.)[3]	1.3	0.6	0.7	0.6	1.2	4.7	8.2	9.1	8.1	5.4	3.2	2.0	**3° 76** C	3.3	+ 0.46
Unter Bérisal... (1320 M.)[4]	2.1	1.9	1.8	2 3	7.7	11.3	14.0	14.8	12.8	9.3	5.5	2.9	**7° 24** C	5.8	+ 1.44
Hohenegg..... (2030 M.)[5]	0.3	0.2	0 3	0.2	1.0	4.2	9.0	10.1	8.3	5.0	2.4	1.1	**3° 53** C	2.5	+ 1.03
Simplonhospiz.. (2008 M.)[6]	0.8	0.1	—0.2	0.5	2.0	4.0	6.2	7.3	6.7	5.2	3.6	1.6	**3° 15** C	2.6	+ 0.55
Passo Forchetta (2690 M.)[7]	Minimum		—	7.9	—	—0.2	3.4	4.1	3.5	1.0	2.5	—	—	—	—
Rossetto..... (2211 M.)[8]	Minimum		—	5.4	—	3 1	7.5	8.7	7.1	3.7	1.5	—	—	—	—
Amoinciei..... (2709 M.)[9]	Minimum		—	10.5	—	1.9	4.7	4.5	4.1	1.3	—	—	—	—	—
Lago d'Avino... (2237 M.)[10]	Minimum		—	5.1	—	1.0	4.5	6.5	5.3	3.2	1.6	0.8	—	—	—
Col de Vallé.... (2448 M.)[11]	Minimum		—	4.2	—	3.9	5.7	6.8	5.2	2.6	0.2	—	—	—	—
Alpe de Vallé... (1863 M.)[12]	Minimum		—	2.8	—	3.8	8.8	7.5	6.1	4.1	2.1	0.7	—	—	—
Passo Possette.. (2248 M.)[12]	Minimum		—	4.0	—	4.6	9.4	8.5	6.6	3.9	1.7	0.6	—	—	—
Bugliaga..... (1316 M.)[13]	3.2	2.0	1.5	1.5	4.5	8.2	11.2	13.3	12 1	9.7	5.9	3.9	**6° 43** C	5.8	+ 0.63
Nante ..... (589 M.)[14]	2.5	1.9	—2.5	7.7	12.0	15.4	17.4	16.7	14.0	9.9	5.6	3.5	**9° 05** C	9.2	— 0.15

[1] u. [2] Monatsmittel gebildet aus 9—14, meist 11—13 Beobachtungen
[3] » » 4—8 » 6—8 »
[4] » » 4—8 » 6 »
[5] » » 3—6 » 5 »
[6] » » 8—14 » 11—12 »
[7] » » 2—7, die Minimummittel aus 5 Beobachtungen
[8] » » 2—7, » » 3 »
[9] Monatsmittel gebildet aus 2—6, die Minimummittel aus 5 Beobachtungen
[10] » » 2—7, meist 2, 6 u. 7, » » 4 »
[11] » » 2—5, » 2 u. 5, » » 5 »
[12] » » 3—6, » 3, » » 4 »
[13] » » 7—12, » 9—12 Beobachtungen
[14] » » 5—10, » 8 »

oder sind nur spärlich bewachsen. Insolation und Ausstrahlung machen sich deshalb in ihren Wirkungen sehr bemerkbar, auch noch in 1 M. Tiefe, da in diesen Höhen eben infolge der spärlichen oder mangelnden Pflanzendecken die obersten Gesteinsschichten viel stärker und tiefer zerklüftet sind als an tiefer gelegenen Orten.

Um von diesen 7 Höhenstationen trotzdem brauchbare mittlere Temperaturwerte zu erhalten, wurde folgendermassen vorgegangen. Aus den Sommerbeobachtungen wurden die Monatsmittel gebildet und diese graphisch als Ordinaten aufgetragen, ebenso die Winterminima, welche, wie die Kurven der niedriger gelegenen Stationen lehren, Ende Februar bis Anfang März eintreffen. Die Endpunkte dieser Ordinaten wurden geradlinig miteinander verbunden und dann durch diese gebrochene Linie eine Kurve gezogen, die möglichst wenig oder gleich viel nach oben und nach unten von der gebrochenen Linie abweicht, und die möglichst regelmässig verlief und der Temperaturkurve der übrigen 8 Stationen nachgebildet war. Dabei wurden natürlich die aus 5—7 Beobachtungen gebildeten Monatsmittel stärker berücksichtigt als die nur aus 2—4 Beobachtungen ermittelten Durchschnittstemperaturen. Da diese Kurven die *Mittel*-Temperaturen der Sommermonate darstellen und nicht die Monatsmaxima, so durften sie für die Winterszeit (Dezember bis Mai) nicht durch das Mittel der gemessenen Winterminima gelegt werden, sondern sie mussten diese Minima abschwächen. Als Betrag, um den der tiefste Stand der Kurve von dem beobachteten Winterminimum vermutlich abweicht, wurde für die fünf niedriger, zwischen 1800 und 2500 M. gelegenen Orte 1—2° C., für die beiden auf zirka 2700 M. Höhe gelegenen Stationen 2—3° C. angenommen. Die dadurch erhaltenen Wintermonatsmittel der Bodentemperatur sind eher zu niedrig als zu hoch angesetzt, da schon bei den auf zirka 2000 M. Höhe gelegenen Stationen Hohenegg und Simplonhospitz Abweichungen bis zu 1,3° C. vorkommen zwischen den Wintermonatsmitteln (Januar-April) und den in diesen Monaten bei der allmonatlich höchstens zweimal stattfindenden Ablesung, gefundenen Minimaltemperaturen.

An der so konstruierten Kurve wurden nun die Monatsmittel abgelesen und aus ihnen die Jahresmittel berechnet. Die erhaltenen Werte sind in Tabelle S. 102 zusammengestellt.

Um für die zwischen diesen Stationen liegenden Punkte des Tunnelprofils die mittleren Bodentemperaturen zu inter-

polieren, wurden die Temperatur- und Höhenwerte der 15 Stationen in die Gleichung

$$T = t_0 - \frac{h}{100}\alpha$$

eingesetzt, in welcher T die Bodentemperatur eines Profilortes in der Höhe h, t_0 diejenige des Ortes für $h = 0$, also auf Meereshöhe und α eine Konstante, die Temperaturabnahme pro 100 M. bedeutet. Die Werte der Unbekannten t_0 und α wurden auf folgendem Wege ermittelt. Zunächst wurde der Durchschnittswert der für die 15 Orte aufgestellten Gleichungen gebildet; er beträgt

$$3{,}63 = t_0 - 18{,}09\,\alpha$$

Diese Gleichung wurde von den 15 einzelnen Gleichungen subtrahiert; dadurch wird t_0 eliminiert. Die Gleichungen enthalten dann nur noch die Unbekannte α, deren Wert nach der Methode der kleinsten Quadrate zu berechnen ist. Die Rechnung ergibt:

$$\alpha = 0{,}457$$

In obige (Durchschnitts-) Gleichung eingesetzt, folgt für t_0 der Wert

$$t_0 = 11{,}8$$

Mittelst der Gleichung

$$T = t_0 - \frac{h}{100}\alpha$$

$$= 11{,}8 - 0{,}457\,\frac{h}{100}$$

Stationen	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahresmittel	Berech. Jahresm.	Beob. minus berechnet
Passo Forchetta (2690 M.)	—4.4	—5.8	—5.9	—5.3	—3.9	—1.3	2.5	4.1	3.7	1.9	—0.3	—2.4	**—1°4 C**	—0.6	—0.8
Rossetto..... (2211 M.)	—2.5	—3.8	—3.9	—3.2	—1.3	1.8	6.0	8.7	7.6	4.8	2.0	—0.4	**+1°3 C**	+1.6	—0.3
Amoinciei ... (2709 M.)	—6.3	—7.4	—7.4	—6.4	—4.0	0.2	3.7	4.5	4.3	2.5	—0.5	—3.3	**—1°7 C**	—0.7	—1.0
Lago d'Avino. (2237 M.)	—2.1	—2.9	—3.0	—2.5	—1.4	0.5	4.1	6.5	5.8	3.7	1.7	—0.1	**+0°9 C**	+1.5	—0.6
Col de Vallé.. (2448 M.)	—2.3	—2.9	—2.9	—2.2	—0.4	2.5	5.5	6.7	5.7	3.7	0.5	—1.1	**+1°1 C**	+0.5	+0.6
Alpe de Vallé.. (1863 M.)	—0.3	—1.4	—1.7	—1.2	+0.1	2.5	6.2	7.3	6.4	5.1	2.5	0.9	**+2°2 C**	+3.3	—1.1
Passo Possette (2248 M.)	—0.9	—2.5	—2.9	—2.2	—0.5	2.8	7.3	8.4	7.3	5.0	2.2	0.5	**+2°0 C**	+1.5	+0.5

wurde nun die Bodentemperatur T von den einzelnen Profilpunkten von 100 zu 100 M. ü. M. berechnet[1]. Diese wurden graphisch aufgetragen und lieferten eine Oberflächentemperaturkurve, die nur eine Funktion der Höhe ist. Durch die Endpunkte der als Ordinaten eingetragenen, beobachteten Bodentemperaturen der 14 Profilstationen (Simplonhospiz liegt abseits im W) wurde nun eine Kurve gezogen, die die Abweichungen zwischen der beobachteten und berechneten Temperatur ausgleicht, also eine Funktion der Höhe bleibt, dabei aber auch die Einflüsse der Sonnenbestrahlung, Trockenheit, Feuchtigkeit und Wärmeaufnahmsfähigkeit des Bodens berücksichtigt und uns nun die gewünschten interpolierten Bodentemperaturen für die Punkte zwischen den 14 Stationen liefert. Diese beiden Kurven sind schwarz dargestellt auf Tafel I unter dem Tunnelprofil (die Hilfskurve, die nur eine Funktion der Höhe ist, ist punktiert gezeichnet).

Aus dem Verlauf der beiden Kurven erkennen wir, dass auf der Nordseite des Simplons die beobachteten Temperaturen teilweise höher und auf der Südabdachung teilweise niedriger sind als die berechneten[2]. Auf der Nordseite kann dieses von der Regel abweichende Verhalten der Temperatur erklärt werden durch die ausserordentliche Trockenheit der betreffenden Gebiete (Brigerberg, Rosswald, Berisal, Hohenegg) im Verein mit der für eine Talsüdseite sehr starken Sonnenbestrahlung (im Osten liegt das weite Rhonetal, im Süden die Depression des Simplonpasses).

Dass die beobachtete Temperatur für Im Rafji am Nordportal des Tunnels um fast $2\,^1/_2\,\%$ geringer ist als die berechnete, erklärt sich durch die Lage dieser Station am Fusse einer steil nach NW fallenden Felswand. Auf der Südab-

[1] Für die Abnahme der Quellentemperatur in den Zentral Tiroleralpen fand F. von Kerner (*Meteorolog. Zeitschrift*, XXII, 1905, S. 163) die Gleichung :

$$T = 12{,}11 - 0{,}44\,\frac{h}{100}$$

Da die Quelltemperaturen bekanntermassen durchschnittlich um einige Grade höher sind als die Bodentemperaturen, so erscheint die Differenz zwischen den Werten der Kerner'schen und denjenigen unserer Gleichung als gering (so erhält man z. B. als Differenz Quell-Bodentemperatur für 1300 M. Höhe 0,6, für 2600 M. 0,8 C°). Sie ist es aber nicht, weil die mittlere Jahrestemperatur der Luft im Wallis höher ist als im Tirol. J. Maurer gibt (in *Meteorolog. Zeitschrift*, 1908, S. 241) als Betrag der Wärmeabnahme der Luft mit der Höhe in den Schweizeralpen pro 100 M. an : für die Südseite der Alpen 0,588, das Wallis 0,555, den Nordabhaug 0,510 und die Schweizer Ostalpen 0,514 C°.

[2] Vergl. Kolonne « Beob. minus berech. » der Tabelle auf S. 100 u. 102.

dachung des Simplons, am Col de Vallé, Passo Possette und am ganzen Südabhang des Pizzo Teggiolo haben wir — wie zu erwarten war — eine gegenüber der berechneten etwas höhere Temperatur. Lago d'Avino, Alpe de Vallé und Nante (berechn. Temp.: 9,2) besitzen relativ zu niedrige Bodentemperaturen. Es wird uns dies erklärlich, wenn wir bemerken, dass diese drei Stationen in feuchten Mulden und Tälern und teilweise stark im Schatten liegen; der grössere Fehlbetrag für Alpe de Vallé rührt wahrscheinlich von dem nahe unter der Oberfläche zirkulierenden kalten Karstbache her. Dass wir endlich im Gebiet der höchsten Berggipfel inmitten des Simplonmassivs niedrigere Temperaturen als die berechneten erhalten (vergl. Passo di Forchetta und Punta Amoinciei) ist verständlich, da sich hier die starke Abkühlung der schneefreien Berggipfel und -kämme infolge Ausstrahlung und Windexposition geltend macht.

2. Die Felstemperaturen des Simplontunnels.

Die Gesteinstemperaturen des Simplontunnels sind auf Tafel I über dem Tunnel in der roten Kurve graphisch dargestellt. Ihre Werte sind zur Hälfte von der Baugesellschaft für den Simplontunnel, Brandt, Brandau & Cie., beobachtet worden und uns in sehr verdankenswerter Weise von Herrn Dr. K. Brandau zugestellt worden. Für diejenigen Tunnelstrecken, in welchen die Baugesellschaft selbst noch keine Gesteinstemperaturen beobachtete, wurden die Angaben der « Rapports trimestriels » benützt, was in der Kurve durch Unterbrechung der ganz ausgezogenen roten Linie angedeutet wurde.

Die Gesteinstemperaturen, die zur Konstruktion dieser Kurve die Grundlage bildeten, sind in folgender Tabelle (S. 106-107) zusammengestellt. Es muss bemerkt werden, dass diese Zahlen von sehr ungleichem Werte sind. Da die Gesteinstemperaturen in der Regel nicht gleich nach dem Vortrieb des Stollens gemessen wurden, das Gestein sich also inzwischen infolge der ausgiebigen Ventilation merklich abkühlen konnte, so musste die wirkliche Gesteinstemperatur durch Extrapolieren der nach Vortrieb während einiger Zeit beobachteten Temperaturreihe ermittelt werden. Die uns von der Tunnelunternehmung mitgeteilten Temperaturen stellen in dieser Richtung genau korrigierte Werte dar; sie wurden erhalten durch Extrapolieren der 4—8 Tage nach der maschinellen

Auffahrung begonnenen und einige Zeit alle 10 Tage wiederholten Temperaturbeobachtungen. Die so erhaltenen Anfangstemperaturen erwiesen sich als zuverlässig, wie die zur Kontrolle am Vororte angestellten Beobachtungen zeigten. Die aus den « Rapports trimestriels » entlehnten Temperaturwerte konnten nicht genau korrigiert werden [1], da die Werte der erhaltenen Temperaturreihe meist nach sehr verschieden grossen Zeiträumen beobachtet wurden und auch die Zeit des Auffahrens der betreffenden Gesteinspartie nicht genau bekannt war. Die abgelesenen Temperaturen der ersten zwei Kilometer auf der Nordseite und diejenigen innerhalb des ersten Kilometers ab Südportal konnten überhaupt nicht verbessert werden, da das Datum ihrer Beobachtung nicht veröffentlicht worden ist [2]. Die Gesteinstemperaturen der « Rapports trimestriels » wurden deshalb unkorrigiert in die Tabellen auf Seite 106 und 107 eingetragen und daneben ihr abgeschätzter, vermutlicher Fehlbetrag angegeben [3].

Die Temperaturen wurden von der Unternehmung gemessen in 1,5 M. tiefen Bohrlöchern, die in die Stollenwände schwach ansteigend in 0,8 M. Höhe und stets an demselben äussern (südlichen) Stoss des Stollens II angebracht wurden.

3. Konstruktion der Geoisothermen im Tunnelprofil.

Nach der Ermittlung der Bodentemperaturen an der Oberfläche und der auf die Zeit der maschinellen Auffahrung schätzungsweise umgerechneten Gesteinstemperaturen im Tunnel sind wir in der Lage, die Verteilung der Wärme im

[1] Um die Wirkung der Ventilation auf die Gesteinstemperatur festzustellen, wurde (vergl. *Rap. trim.* Nr. 16) am 8. Juli 1902 die Ventilation eingestellt. Nach 12 Stunden wurde bei zirka Km. 7.0 ab NP in 3 M. Tiefe eine Temperatur von 52—53 ° C gefunden gegenüber 50,7 ° vor Einstellen der Ventilation und 47 ° nach einigen Tagen Ventilationswirkung, in 1,5 M. Tiefe. Die Abkühlung durch die Ventilation und besonderen Kühlungsvorrichtungen beträgt hier also nach einigen Tagen schon 5—6 ° und erreicht selbst vor Ort dank der kühlenden Wirkung des Druckwassers der Bohrmaschinen den Betrag von 1.5—2 ° C. Nach 14 Tagen betrug die Temperaturerniedrigung zirka 10 °, nach drei Monaten 20 °.

[2] Die wirkliche Gesteinstemperatur dieser Tunnelstrecken kann jedoch nicht um so viel höher gewesen als wie unter Anmerkung 1 für die weiter innen im Tunnel gelegenen Strecken angedeutet wurde ; denn erstens ist die Gesteinstemperatur viel niedriger, zweitens war die kühlende Wirkung des durch keine künstlichen Mittel weiter abgekühlten Luftstroms keine so grosse.

[3] Die unterbrochenen Teile der roten Kurve « Beobacht. Felstemperatur i. T. » der Tafel I stellen die nur abschätzungsweise korrigierten Temperaturbeobachtungen dar.

Im Simplon-Tunnel auf der NORDSEITE beobachtete Gesteinstemperaturen.

Entfernung ab Nordportal Meter	Temperatur Centigrad		Entfernung ab Nordportal Meter	Temperatur Centigrad	
50	9.6	Etwas zu niedrig	6200	39.0	Um 3-5° zu niedrig
100	10.6		6400	38.6	
200	10.8		6614	42.3	
300	12.2		6800	42.9	
400	12.8		7000	44.8	Um 1,5-2° zu niedrig
500	14.5		7200	49.8	
600	15.1		7344	52.2	Korrigiert
700	15.9		7460	53.0	
800	15.9		7504	53.6	
900	16.4		7572	54.1	
1000	16.7		7801	55.2	
1200	17.4		7981	55.2	
1400	18.4		8110	55.4	
1600	19.7		8197	53.7	
1800	20.0		8466	54.5	
2000	20.8	Um 1-2° zu niedrig	8609	54.0	
2200	21.0		8804	53.0	
2400	21.2		9041	52.4	
2600	22.2		9264	52.1	
2800	23.9		9311	51.9	
3000	26.0		9405	50.0	
3200	26.8		9450	51.0	Um 1,5-2,5° zu niedrig
3400	27.8		9612	49.0	
3664	28.6		9702	48.6	
3800	28.6		9807	48.2	
4000	28.5	Um 2-3° zu niedrig	9860	49.5	
4200	28.9		9900	49.0	
4400	29.4		9928	48.0	
4600	30.2		10.020	47.5	
4800	31.0		10.047	48.5	
5000	32.0		10.096	47.5	
5200	32.5	Um 3-5° zu niedrig	10.164	46.0	
5400	33.9		10.279	47.0	
5600	34.1		10.314	47.5	
5800	35.4		10.376	Durchschlag	
6000	36.8				

Im Simplon-Tunnel auf der SÜDSEITE beobachtete Gesteinstemperaturen.

Entfernung ab Südportal	Temperatur		Entfernung ab Südportal	Temperatur	
Meter	Centigrad		Meter	Centigrad	
50	12.5	Etwas zu niedrig	5376	32.7	Korrigiert
100	14.7		5572	35.5	
200	16.2		5767	35.9	
300	18.7		5968	37.5	
400	20.8		6168	38.9	
500	20.9		6418	39.5	
600	23.9		6568	39.4	
700	25.1		6768	39.6	
800	26.2		6968	39.1	
900	27.2		7168	39.7	
1000	27.1		7268	38.9	
1060	28.7	Korrigiert	7368	39.1	
1360	31.6		7418	39.4	
1560	31.8		7518	39.2	
1760	32.7		7618	39.2	
1960	33.2		7668	38.5	
2160	34.2		7768	38.9	
2360	33.8		7968	39.3	
2560	33.9		8168	38.9	
2760	32.8		8268	39.2	
2960	31.8		8368	39.0	
3160	31.5		8468	39.4	
3360	30.3		8568	40.1	
3560	28.8		8668	40.3	
3760	27.7		8768	41.0	
3960	26.7		8868	41.2	
4160	23.0		8968	41.5	
4360	18.3		9068	43.5	
4588	21.5		9168	45.3	
4768	23.0		9218	44.5	
4968	26.0		9318	44.8	
5177	29.8		9353	Durchschlag	

Simplon in der Ebene zwischen Tunnel und Oberfläche darzustellen — in Geoisothermen —, unter der Voraussetzung natürlich, dass die Temperaturabnahme vom Tunnel zur Oberfläche der Entfernung vom Tunnel proportional erfolge.

Zur Konstruktion der Geoisothermen wurden die korrigierten Gesteinstemperaturen im Profil ins Tunnel-Tracé eingetragen und von den betreffenden Punkten aus die nächsten normalen Entfernungen[1] von der Profiloberfläche gezeichnet, die Bodentemperatur an der Austrittsstelle dieser Normalen an der Kurve unten abgelesen und dann die Differenz zwischen Tunnel- und Oberflächengesteinstemperatur bestimmt. Durch Division der nächsten Entfernung von der Oberfläche durch die Temperaturdifferenz erhielt man die Anzahl Meter, mit welchen die Temperatur nach innen (in normaler Entfernung zur Oberfläche) um 1° C. zunimmt, d. h. die geothermischen Tiefenstufen für diese Punkte in der Richtung der Normalen. Mit Hilfe dieser geothermischen Tiefenstufen wurden nun im Tunnelprofil auf diesen Normalen die Orte bestimmt, in denen die Gesteinstemperaturen 0°, 5°, 10°, 15°, 20° etc. herrschen — vorausgesetzt, dass in derselben Richtung die Temperaturzunahme dieselbe bleibt — und die Punkte gleicher Temperatur verbunden. Die auf solche Weise unter den Bergkuppen nicht zu erhaltenden Temperaturpunkte wurden gefunden durch Ermittlung und Abtragung der geothermischen Tiefenstufe in vertikaler Richtung.

Diese von 5 zu 5° eingezeichneten Geoisothermen oder Chtonisothermen lassen uns nun die annähernd richtige Temperatur eines Profilpunktes direkt ablesen und geben uns ein anschauliches Bild von der Wärmeverteilung im Simplon. Sie lassen uns auch leicht die Aenderungen der geothermischen Tiefenstufe erkennen. Da wo die Kurven einander am nächsten stehen, wie unter der Nordabdachung des Wasenhorns (im Profil nördl. P. Forchetta), ist die geothermische Tiefenstufe am kleinsten. Unter Alpe de Vallé, in der Zone der starken kalten Quellen, ist sie am grössten, die Kurven sind hier am weitesten voneinander entfernt. Den zahlenmässigen Ausdruck für diese Differenzen erhält man aber durch Berechnung der für den Simplon im allgemeinen und im speziellen gültigen Temperaturgradienten.

[1] Vergl. C. F. Naumann, *Lehrbuch der Geognosie*, 2. Aufl. 1. Bd., S. 52.

4. Berechnung des durchschnittlichen Temperaturgradienten für den Simplon.

Die Kenntnis des durchschnittlichen Temperaturgradienten bildet die wesentliche Grundlage für die Vorausberechnung von Tunneltemperaturen. Bekanntlich erheben sich hier Schwierigkeiten, indem die Temperatur im Tunnelniveau nicht proportional zunimmt mit der Distanz von der Erdoberfläche in vertikaler oder normaler Richtung. Der theoretischen Behandlung des Problems durch THOMA und KÖNIGSBERGER liegt der Gedanke zu Grunde, die Erdoberfläche zu ersetzen durch eine ihr möglichst nahe kommende, ideale Fläche, welche die Eigenschaft hat, Lösung der Differentialgleichung für stationäre Wärmeleitung zu sein und zugleich deren Grenzbedingungen zu erfüllen, unter der Voraussetzung, dass das Profil zu beiden Seiten der Tunnelrichtung das gleiche sei.

Bei der praktischen Durchführung der numerischen Berechnung des Gradienten müssen wir über die allgemeine Aussage der Wärmeleitungsgleichung, es sei die Differenz zwischen der Tunneltemperatur und den Temperaturen an der Oberfläche irgendwie eine Funktion der überlagernden Massen, spezielle Annahmen machen. Die STAPFF'sche Annahme, es sei Proportionalität vorhanden zwischen der Temperaturdifferenz und dem Abstand bis zur Oberfläche führt zu einer unbefriedigenden Darstellung, da sich unter Tälern grössere Temperaturgradienten ergeben als unter Bergspitzen oder Kämmen; der nach dieser Annahme berechnete Durchschnittswert des Gradienten kann keine allgemeine Giltigkeit besitzen. Diesen Uebelstand vermeiden wir, wenn wir eine *ausgeglichene Profillinie* an Stelle der wirklichen setzen. Unter einer ausgeglichenen Profillinie verstehen wir die Kurve, die dadurch entsteht, dass statt der einzelnen Profilhöhen mittlere Höhen eines grössern Gebietes aufgetragen werden. Mit zunehmender Profilhöhe hat man die Grösse dieses Gebietes wachsen zu lassen, um zu berücksichtigen, dass, je grösser die Ueberlagerung, um so mehr auch die seitlichen Massen den Temperaturgradienten in der Vertikalebene der Tunnelrichtung beeinflussen. Da diese Abhängigkeit aber nicht bekannt ist, müssten wir eine willkürliche Annahme darüber machen. Wir sehen deshalb hievon ab und berechnen die Höhe der ausgeglichenen Profillinie je aus demselben Gebiet. Die Grösse des Gebietes wählen wir gleich derjenigen

einer Kreisfläche von 1000 M. Radius. Für Ueberlastungshöhen unter 1000 M. wird die Fläche schätzungsweise eher zu gross und für solche über 1000 M. eher zu klein sein, also durchschnittlich eine befriedigende Darstellung liefern. Die Punkte der ausgeglichenen Profillinie werden in Abständen von 500 zu 500 M. berechnet; sie ist auf Tafel I eingetragen (dort kurzweg « mittlere Profillinie » benannt). Für diese ausgeglichene Profillinie bestimmen wir nun den Temperaturgradienten γ unter der Annahme, es sei die Differenz δ zwischen der Temperatur des Tunnels und der Temperatur der ausgeglichenen Profillinie der Vertikaldistanz h proportional; es sei also

$$\delta = \gamma\, h$$

Für das ausgeglichene Profil mussten natürlich wieder neue Oberflächentemperaturen bestimmt werden. Diese wurden erhalten, indem längs einer Kurve, die aus der Formel Seite 102 berechnet wurde und die nur eine Funktion der Höhe darstellt, eine zweite Kurve so gelegt wurde, dass sie in ähnlicher Weise von der ersten abwich wie die auf Tafel I dargestellten Oberflächentemperaturkurven für das wirkliche Tunnelprofil voneinander abwichen, ihr aber im übrigen möglichst parallel lief.

Werden nun die Höhen des ausgeglichenen Profils und dessen Oberflächentemperaturen bei der Einsetzung der Werte in obige Formel verwertet und dann die erhaltenen Gleichungen nach der Methode der kleinsten Quadrate verrechnet, so erhält man als durchschnittlichen Temperaturgradienten für den Simplon den Wert

$$\gamma = 0{,}025$$

entsprechend einer geothermischen Tiefenstufe von 40 M.

Hiebei wurde die von den kalten Quellen gestörte Region auf der Südseite in die Rechnung einbezogen. Schalten wir diese Region (Km. 2,0—6,5 ab SP) bei der Berechnung aus, so erhalten wir einen für normale Verhältnisse zutreffenderen Wert und zwar

$$\gamma = 0{,}027$$

was einer *geothermischen Tiefenstufe* von *37 M.* entspricht[1].

[1] Berechnet man — wie ich zuerst tat — die Temperaturgradienten für das unausgeglichene Profil, wobei unterschieden werden muss zwischen Temperaturzunahme in normaler und vertikaler Richtung, so erhält man für erstere $\gamma_n = 0{,}028$ (Tiefenstufe = 35,7 M.) und für letztere $\gamma_h = 0{,}0272$

5. Die Differenz zwischen dem Simplon- und Gotthardgradienten und ihre Ursachen.

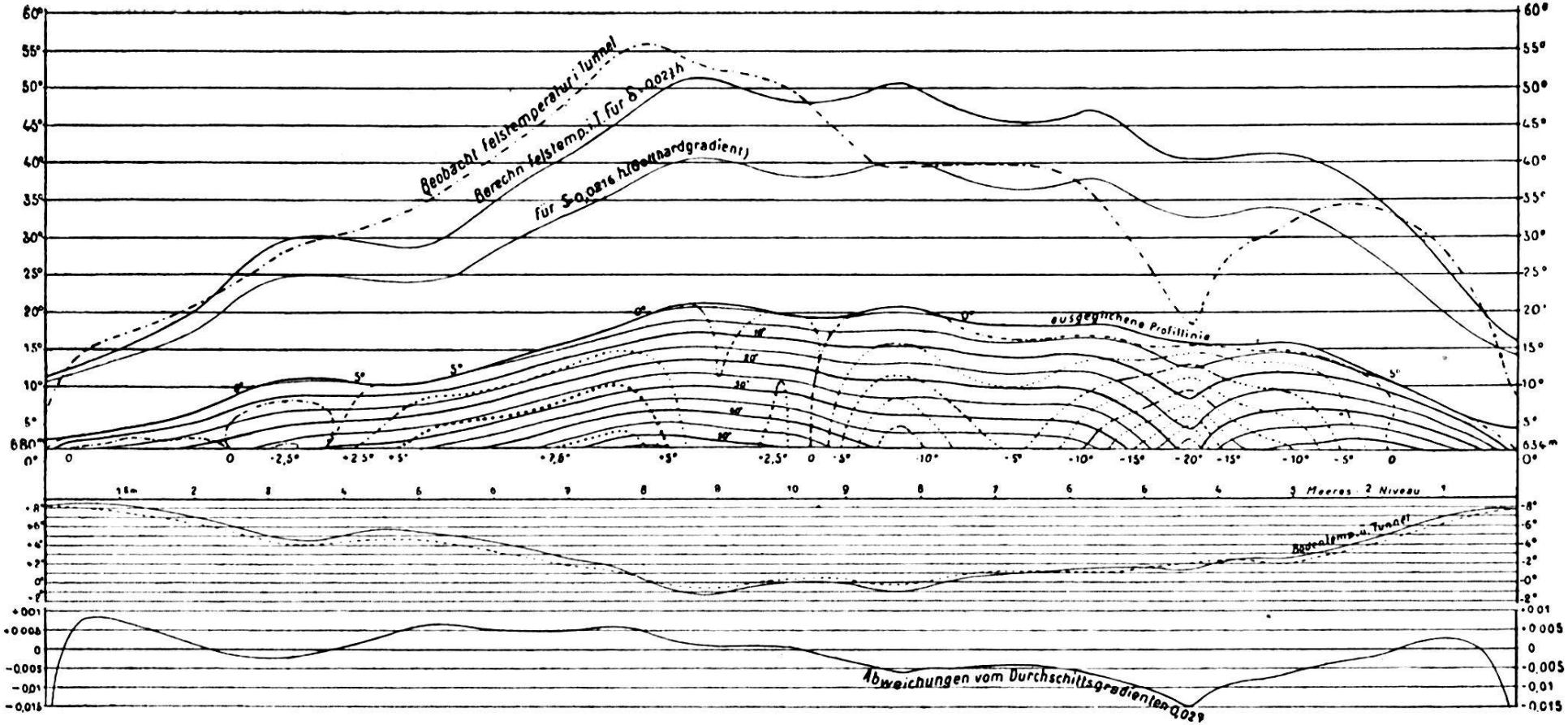
Aus der Grösse des Simplongradienten (0,027 : geothermische Tiefenstufe = 37 M.) und derjenigen des Gotthardgradienten (0,021 : geothermische Tiefenstufe = 47 M.), erkennt man die unerwartet grosse Verschiedenheit der beiden Gebirge in bezug auf ihre Wärmeverhältnisse im Innern. Was für Felstemperaturen angetroffen worden wären, wenn im Simplon der Wärmegradient des Gotthard Geltung gehabt hätte, geht aus der Kurve der Fig. S. 112 welche die mit dem Gotthardgradienten und mittleren Simplonprofil berechneten Felstemperaturen darstellt. Vergleichen wir die bedeutende Differenz zwischen Simplon- und Gotthardgradient mit dem geologischen Bau der beiden Gebirge, so fällt als wahrscheinliche Ursache dieser Gradientendifferenzen sofort auf die beträchtlich verschiedene Gesteinslagerung. Die Gesteinsschichten des Gotthard stehen fast durchweg mehr oder weniger senkrecht; beim Simplon hingegen finden wir grösstenteils schwach zur Oberfläche geneigte Schichten. Und während am Gotthard auch unter dem Tunnel die Gesteinsschichten sehr steil aufgerichtet sind, nehmen sie im Simplon mit der Tiefe eine mehr und mehr flachere Lagerung an[1]. Da die Gesteinsarten des Simplon und des Gotthard sehr nahe mit einander verwandt sind, so können deren Wärmeleitungskoeffizienten nicht stark von einander abweichen. Zudem konnte J. Königsberger aus den Untersuchungsresultaten von Gölz[2] den Schluss ziehen, dass in den Alpen « die verschiedene Wärmeleitfähigkeit verschiedener Gesteine ein Faktor von untergeordneter Bedeutung» ist. Wohl aber wurde

(Tiefenstufe = 37 M.). Der mittelst des ausgeglichenen Profils erhaltene Gradient ist also noch etwas kleiner als der kleinste dieser beiden. Dies erklärt sich aus der Tatsache, dass die südwestlich des Tunnelprofils sich erhebenden Gebirgsmassen die Höhen des mittleren Profils viel mehr beeinflussen als die des einfachen Profils.

Stapff berechnete für den Gotthard als Gradienten in normaler Richtung 0,0216 (Tiefenst. = 46 M.) und in vertikaler 0,0207 (Tiefenst. = 48 M.). Wendet man diese Gotthardgradienten auf das ausgeführte Simplontunnelprojekt an, so erhält man — unter Berücksichtigung der ermittelten Oberflächentemperaturen — als höchste Gesteinstemperatur 41 ½ °.

[1] Vergl. C. Schmidt, loc. cit., *Ecl. geol. helv.*, Bd. IX, Taf. 7 u. 8.

[2] In J. Königsberger, Versuche über primäre und sekundäre Beeinflussung der normalen geothermischen Tiefenstufen und über die Temperaturen im Albula-, Arlberg-, Simplon-, Ricken-, Tauern-, und Bosruck-Tunnel. *Eclog. geol. helv.*, Bd. X, 1908, S. 510.



Erklärung: Linien gleicher Abweichung zwischen der aus den beobachteten Temperaturen abgeleiteten Wärmeverteilung und der mit dem durchschnittlichen Gradienten 0,027 berechneten beobachtete Temperaturen {grösser / kleiner} als berechnet.

G. Niethammer, April 1910.

durch die am Simplon erheblich kleiner als am Gotthard gefundene geothermische Tiefenstufe eine merkliche Verschiedenheit der Wärmeleitung in der Richtung der Gesteinsschichtung zu der normal zur Schichtfläche erfolgenden Wärmeleitung sehr wahrscheinlich gemacht, und zwar so, dass sie parallel der Schichtung schneller erfolgt, als normal dazu. Die Versuche KÖNIGSBERGERS[1] haben dies bestätigt. Der Quotient zwischen Simplongradient und Gotthardgradient beträgt 1,3. Das Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit parallel und solcher normal der Schieferung beträgt nach den Bestimmungen von GÖLZ[1]

	Trocken.	Feucht.
Für Kalkphyllite des Simplontunnels	1,11 u. 1,13	1,01 u. 1,10
Antigoriogneiss »	1,44	1,39
Granatglimmerschiefer »	2,79	2,32
Maigels- u. Sellagneiss des Gotthardgebietes	1,36 u. 1,30	1,34 u. 1,20

Frühere Beobachter haben nach KÖNIGSBERGER[2] dieses Verhältnis ermittelt:

Für Kalkphyllit	zu 1,3	
Gneisse	1,2 im Mittel	(1,12—1,45)
Glimmerschiefer	1,4—1,8	

Allein die relative Kleinheit der geothermischen Tiefenstufe des Simplon ist nicht allein bedingt durch die im allgemeinen flachere Lagerung der Schichten gegenüber derjenigen am Gotthard und deshalb kann die Zahl 1,3, das Verhältnis des Simplongradienten zum Gotthardgradienten, nicht etwa angesehen werden als Quotient der Wärmeleitfähigkeit parallel und normal der Schieferung der Simplongesteine im Durchschnitt. Die Differenz zwischen den Wärmegradienten für Gotthard und Simplon mag teilweise auch bedingt sein durch die verschiedene Art der Wasserführung, die allerdings wieder eng zusammenhängt mit der verschiedenartigen Lagerung. Infolge der steilen Schichtstellung, bei welcher Wässer viel leichter in die Tiefe dringen können, wurden im Gotthardtunnel sehr zahlreiche, relativ kleine, über den ganzen Tunnel verbreitete Quellen angetroffen. Diese Quellen kühlen nicht nur, sondern die durchfeuchteten Schichten leiten die Wärme alsdann auch besser als im trockenen Zustand. Im Simplon hingegen wurden nur wenige, dafür aber sehr starke Quellen angeschlagen (vergl. Tafel I). Der grösste Teil des Simplon-

[1] Loc. cit., S. 511.
[2] J. KÖNIGSBERGER, *Eclog. geol. helv.*, Bd. X, S. 511 u. 512.

tunnels erwies sich als sehr trocken, entsprechend der an diesen Stellen relativ flachen und wenig steilen Schichtlagerung. Als dritter Faktor, der die unerwartet hohe Felstemperatur des Simplontunnels bedingt hat, ist die geringere Höhenlage des Simplontunnels über Meer anzusehen. Je tiefer ein Tunnel ein Gebirge durchbohrt, um so näher liegt er der Erdschicht, in der dieselben Gesetze der Wärmeleitung herrschen wie im Flachland, d. h. in Gebirgen nimmt mit der Tiefe die Grösse der Tiefenstufe ab bis sie ungefähr auf den im Flachland geltenden Betrag gesunken ist.

6. Die geothermischen Tiefenstufen der einzelnen Teile des Simplons.

Um die Gebiete zu erkennen, in denen neben der Ueberlastung noch andere Ursachen die Gesteinstemperatur beeinflussen, berechnen wir mit Hilfe des Simplongradienten 0,027 und des mittleren Profils die Gesteinstemperaturen für den Simplon im Niveau des Tunnels zurück und tragen sie graphisch auf (vergl. Tafel I). Die so erhaltene Kurve gibt uns ein Bild der Temperaturverhältnisse, die bei homogener Masse vorhanden wären. Die Kurve steht daher in direkter genauer Abhängigkeit von der Ueberlastung. Die Abweichungen dieser idealen Temperaturkurve von der Kurve der beobachteten Felstemperaturen (vergl. Fig. S. 112) zeigen uns die Gebiete mit anormalen Felstemperaturen. Die vertikalen Abstände beider Kurven geben uns aber kein richtiges Bild von der Grösse des anormalen Verhaltens, da in der Grösse der Abstände sich noch die sehr verschiedenen Ueberlastungshöhen wiederspiegeln. Wir können die Temperaturabnormitäten verschiedener Simplonteile erst mit einander vergleichen und deren Grösse richtig einschätzen, wenn wir die vertikalen Abstände der beiden Kurven, d. h. also die absoluten Temperaturdifferenzen durch die relativen Ueberlastungshöhen dividieren. Man erhält dadurch die Temperaturdifferenzen für 1 M., d. h. direkt die Gradientendifferenzen. Sie sind auf Tafel I unten in der roten Kurve (Abweichungen vom Durchschnittsgradienten 0,027) dargestellt. Ihre Addition zum allgemeinen Simplongradienten liefert den für jede Stelle im Simplon gültigen Temperaturgradienten. Als Gradient für die verschiedenen Teile des Simplon gilt demnach :

		Gradient.		Tiefenstufe. M.
Km. 0,25	— 1,75 ab NP	0,030—0,035°	C pro M.	33—28,5
1,75	— 4,5 »	0,030—0,025	»	33—40
4,50	— 8,5 »	0,030—0,035	»	33—28,5
8,5 ab NP	— 9,0 ab SP	0,030—0,024	»	33—42
9,0 ab SP	— 6,5 »	0,024—0,021	»	42—48
6,5	— 2,0 »	0,025—0,012	»	40—83
2,0	— 0,5 »	0,025—0,030	»	40—33

Bevor wir diese Differenzen auf mögliche, am Simplon erkennbare Ursachen betrachten, müssen uns die dem Simplongradienten 0,027 entsprechenden Durchschnittseigenschaften bekannt sein. Die Gesteine des Simplontunnels [1] bestehen zu ungefähr gleichen Teilen einerseits aus jurassischen Bündnerschiefern und Triasgesteinen, anderseits aus Gneissen. An der Oberfläche verschiebt sich das Verhältnis zu Gunsten der Gneisse, sodass es zirka 2 : 1 beträgt. Unter dem Tunnel hingegen ändert es sich zu Gunsten der Bündnerschiefer; bei einem Tunnel auf Meereshöhe würde etwa zweimal mehr Bündnerschiefer und Triasgestein angeschlagen als Gneiss. Während aber für geologisch-tektonische Untersuchungen die Unterscheidung dieser Gesteine von sehr grosser Wichtigkeit ist, ist sie für die Beurteilung der thermischen Verhältnissse im Simplon nur von geringer Bedeutung. Es erhellt dies aus folgenden Wärmeleitfähigkeitswerten von Simplongesteinen, die H. Gölz [2] bestimmt hat. Die Werte beziehen sich auf das Wärmeleitungsvermögen eines Glases als Einheit [3].

1. Antigoriogneiss von Gondo, Simplon				feldspatreich	2,12
				biotitreich	2,60
2. Antigoriogneiss, granitisch, Simplontunnel,	3500	M.	ab	SP	1,95
3. Paragneiss im Antigoriogneiss	»	225	»	SP	1,80
4. Valgrandegneiss, hornblendeführ.	»	6552	»	NP	1,65
5. Granatschiefer	»	.....			2,50
6. Triasmarmor	»	4325	»	SP	2,00
7. Phyllit (Clintonitschiefer)	»	450	»	NP	2,60
8. Kalkphyllit	»	3400	»	NP	1,80
9. Phyllit, kalkhaltig	»	9361	»	SP	2,80

Die Wärmeleitfähigkeitswerte der Gneisse varieren also zwischen 1,65 und 2,60, diejenigen der Kalkphyllite der Bündnerschiefer und der Triasmarmore zwischen 1,80 und

[1] Vergl. C. Schmidt, *Eclog. geol. helv.*, Bd. IX, Taf. 8, und *Rektoratsprogramm*, Taf. III.

[2] J. Königsberger, *Eclog. geol. helv.*, Bd. X, S. 509 u. 510.

[3] Vergl. loc. cit., S. 509.

2,80. Nach KÖNIGSBERGER wird deshalb « nur unter ausgedehnten Schiefermassen bei gleicher Lagerung die Tiefenstufe etwas grösser sein als bei Gneissen ». Es mag dies im Simplon der Fall sein, in dem direkt südlich der Tunnelmitte gelegenen Teil des Simplons.

Die für unsere Betrachtungen viel wichtigere Gesteinslagerung ist im Mittel ungefähr gleich derjenigen in der Tunnelmitte (20—30°); im nördlichen Teil ist sie steiler bis senkrecht, im südlichen Teil flacher bis horizontal. An der Oberfläche ist die Lagerung im Ganzen etwas steiler, in der Tiefe nähert sie sich immer mehr der Horizontalen.

Den dritten und wichtigsten sekundären Einfluss auf die Felstemperaturen eines Tunnels bilden die Quellen. Sie übten im Simplon in Bezug auf die Felstemperatur eine stark abkühlende Wirkung aus. Da nun die Region der wichtigsten und grössten, an Ertrag und Abkühlung allein sehr bedeutenden Quellen auf der Südseite des Simplontunnels (unter Alpe de Vallé) wegen deren abnorm starken Einflusses bei der Aufstellung des allgemeinen Simplongradienten nicht berücksichtigt wurde, so kann bei der nachfolgenden Betrachtung zwecks Eliminierung der die Wärmeverteilung im Simplon beeinflussenden Faktoren, das Fehlen von Quellen nur für eine kleine Erhöhung des Gradienten in Anspruch genommen werden.

Betrachten wir nun die einzelnen Teile des Simplons hinsichtlich eventueller, die Wärmeleitung beeinflussender sekundärer Faktoren.

Vom Nordportal bis fast Km. 4 ab NP trifft man sehr steil bis senkrecht stehende Bündnerschiefer, untergeordnet Triasgesteine. Aber nur von Km. 2,25—3,75 sehen wir eine Erniedrigung des Simplongradienten eintreten, die im Maximum nur 0,002 beträgt. In den übrigen Teilen dieser Strecke ist der Gradient höher und zwar um 0,003 bis 0,008. Wir sehen also wohl eine kleine Vergrösserung der geothermischen Tiefenstufe unter Rosswald ; dass diese nicht mehr beträgt, ist der Trockenheit dieses Gebietes, mehr aber wohl der flacheren Stellung der Gesteinsschichten in grösseren Tiefen zuzuschreiben, wie aus der Tektonik des Simplongebietes hervorgeht. Der Grund, warum unter Brigerberg der lokale Gradient grösser ist als der allgemeine Gradient, liegt vermutlich in dem Umstande, dass hier die mittlere Ueberlastungshöhe aus einem zu weiten Umkreis berechnet wurde.

Bei Km. 4 ab NP wird die geothermische Tiefenstufe kleiner, während sie vorher grösser war als die Durchschnitts-Tiefen-

stufe. Gleichzeitig geht ein schroffer Gesteinswechsel vor sich : die bisherigen Kalkphyllite werden abgelöst durch Gneisse. Da die Wärmeleitfähigkeit der Kalkschiefer etwas besser ist, als die der Gneisse, so könnte darin der Grund zur Erhöhung des Gradienten liegen ; indessen ist die Ueberlastung so klein, dass nur eine unerhebliche Differenz daraus erklärt werden kann. Viel eher wird sie bedingt sein durch das Zusammenrücken der Geoisothermen unter Tälern und durch die sehr flache, muldenartige Lagerung der Gesteinsschichten in grössern Erdtiefen. In diesem Fall würde die Differenz teilweise auch verschwinden, wenn die mittlere Höhe des Profils aus einem grösseren Gebiet berechnet würde.

In der nächsten Tunnelstrecke (4,5—8,5) finden wir auf die lange Strecke von 4 Km. hohe Gradienten (0,03—0,035) ; *auf 3,25 Km. Länge* dieser Strecke gilt sogar im Mittel der Gradient **0,034**. In dieser Region liegen die Gneisse annähernd parallel zur (relativ trokenen) Oberfläche, der Nordabdachung des Wasenhorns. Diese Lagerung bedingt die schnellste Wärmezunahme von der Oberfläche zum Tunnel normal zu den Schichtflächen und ist beim Mangel jeder bedeutenden Marmoreinlagerung ausserdem als Ursache der grossen Trockenheit dieser Tunnelstrecke anzusehen. Die Trockenheit verschlechtert die Wärmeleitfähigkeit und erhöht dadurch die wärmeakkumulierende Wirkung der Gesteinsschichten in diesem Teil des Simplongebirges.

Die Tunnelstrecke Km. 8,5 ab NP bis Km. 9,0 ab SP hätte der Ueberlastung nach die höchste zu erwartende Temperatur liefern sollen. Dieselbe wurde aber schon bei Km. 8 erreicht und nachher sank die Gesteinstemperatur trotz der bis Km.9 noch zunehmenden Ueberlastung. Der Grund hiefür könnte in der Tatsache liegen, dass alle von Km. 9 ab südwärts über dem Tunnel liegenden Gesteine zu einem Grossteil fast normal zur Oberfläche ausstreichen, also die Wärme des Erdinnern besser ableiten. Ausserdem gelangen diese Schichten in die feuchten Gebiete der höchsten Simplonregionen, sind in den der Oberfläche benachbarten Teilen wahrscheinlich gut durchfeuchtet und dadurch besser wärmeleitend gemacht. Wie schon C. Schmidt dargelegt hat, haben aber wahrscheinlich auf die Felstemperaturen erniedrigend gewirkt bis zum Km. 8 ab NP die « heissen » Quellen, die zwischen Km. 10 ab NP und Km. 9 ab SP angeschlagen wurden mit insgesamt ca. 300 sl[1]. In

[1] Näheres über die Quelleinbrüche des Simplontunnels findet man in der anfangs erwähnten Arbeit von C. Schmidt, *Rektoratsprogramm*, S. 96-102.

der Region des Auftretens dieser Quellen haben sie auf die Gesteine sicher kühlend gewirkt, da die Quellen eine Temperatur von 28—49° C besitzen, die Gesteine aber eine solche von 50—44°. Auf den Einfluss dieser Quellen ist wohl der so auffallend scharfe Knick der Felstemperaturkurve bei Km. 8,5 ab SP zurückzuführen. Durch diese Umstände wird der noch bei Km. 8 anormal hohe Gradient zuerst auf die Höhe des Durchschnittsgradienten herabgedrückt und dann niedriger als dieser gemacht.

Mit Km. 10 ab NP hat ein schroffer Gesteinwechsel stattgefunden, mit welchem auch das Auftreten der heissen Quellen in ursächliche Verbindung zu bringen ist. Gneisse sind von Kalkphylliten abgelöst worden und diese halten nun bis Km. 6,8 ca. ab SP an. Ihre bessere Wärmeleitfähigkeit mag bei der auf der Strecke 9,0—6,5 ab SP zu beobachtenden Erhöhung der Tiefenstufe von 37 auf 42—48 M. ein wenig mitgewirkt haben. Sicher aber haben daran Teil die Quellen in der Tunnelmitte und die Quellen bei Km. 4,5 ca. ab SP. Da der Ertrag dieser letzerwähnten Quellen sehr gross war (1000 sl.) und ihre Temperatur sehr niedrig ist (10—14°), so konnten sie auch eine sehr grosse kühlende Fernwirkung ausüben.

Die Minimalgrösse der Fernwirkung dieser kalten Quellen können wir an der Kurve der beobachteten Felstemperaturen ablesen. Die Kühlwirkung geht mindestens bis zu den Stellen, wo die Kurve anstatt der Ueberlastung gemäss noch zu steigen, zuerst kurze Zeit auf gleicher Höhe stehen bleibt und dann bald rapid zu fallen beginnt. Es sind das die 6,7 und 2,0 Km. ab SP gelegenen Punkte; beide liegen fast genau 2,4 Km. von der Stelle der kalten Quelleinbrüche entfernt (vergl. Tafel I). An der Peripherie dieser Wirkungszone beträgt der Gradient einerseits (tunneleinwärts) 0,023 (Tiefenstufe = 43,5 M.), andererseits (tunnelauswärts) 0,025 (Tiefenstufe = 40 M.), während sie in dessen Zentrum, bei den Quelleinbrüchen selbst nur 0,012 (Tiefenstufe = 83 M.) beträgt.

In der letzten Strecke Km. 2,0 bis Km. 0,5 ab SP[1] finden wir wieder normale Temperaturverhältnisse (Gradient 0,025—0,03; Tiefenstufe 40—33 M.), entsprechend der Trockenheit in diesem Teil des Gebirges.

[1] Wie bei der ersten Tunnelstrecke, so wurde auch hier die dem Tunnelportal benachbarte Strecke für diese Betrachtungen ausser Acht gelassen, weil deren bis um 0,025 zu niedrige Temperaturgradienten zu stark von der « Oberwelt » abhängig sind.

Es folgt hieraus, dass bei einer Temperaturprognose für einen Tunnel es nicht genügt, einen einzigen Gradienten anzuwenden, sondern es müssen verschiedene zur Anwendung gelangen, je nach der Wasserführung des Gebirges und der Schichtstellung der Gesteine. Für dem Simplon ähnlich aufgebaute Teile der Zentralalpen können die in dieser Arbeit, auf Grund der Temperaturbeobachtungen im Simplontunnel, berechneten Temperaturgradienten zur Voraussage der Temperatur im Berginnern dienen. Ich bemerke noch, dass KÖNIGSBERGER [1] auch versucht hat, die *Grösse* des Einflusses der Schichtstellung und der Quellen, je nach Einfallswinkel der Schichten und Ertrags- und Temperaturhöhe der Quellen, in einer Formel auszudrücken. Für die Voraussage der Tunneltemperaturen ist indessen die Berücksichtigung des Einflusses kalter Quellen minder wichtig, solange die Berechnung der Maximaltemperaturen unter normalen Verhältnissen, die in erster Linie interessieren, noch mit grosser Unsicherheit behaftet ist.

Zum Schlusse erübrigt mir noch, darzulegen wieso M. STAPFF bei der Vorausberechnung der höchsten in einem Simplontunnel zu erwartenden Temperatur auf den überraschend hohen Wert von 53 C° kam [2]. Da muss in erster Linie betont werden, dass STAPFF seiner Vorausberechnung ein anderes Projekt als das ausgeführte zu Grund gelegt hatte, nämlich das Projekt Favre-Clo (1875), das mit einer grösseren maximalen Ueberlastung. Diese beträgt 2220 M. und liefert mit dem Gotthardgradienten 0,021 multipliziert 46,6°. (Simplongradient 0,027 würde 60° ergeben), also 5,7° mehr, als bei der Ueberlastung von maximal nur 1950 M. beim angeführten Projekt nach den Wärmeverhältnissen im Gotthard zu erwarten gewesen wäre. Zu dem Betrag von 53° kam STAPFF nun auf zweierlei Wegen. Das eine Mal, indem er diesen 46,6° noch 6,4° hinzufügte wegen etwaiger zusitzender Wässer (excl. Thermen)[2]. Zu diesem Zuschlag glaubte er sich durch die im Gotthardtunnel gemachten Beobachtungen berechtigt. Darnach sollen nämlich die Tunnelwässer kälter sein als das umgebende Gestein, wenn deren Temperatur unter 24—25° bleibt hingegen wärmer im entgegengesetzten Fall. Für die Differenz stellte er eine Formel auf,

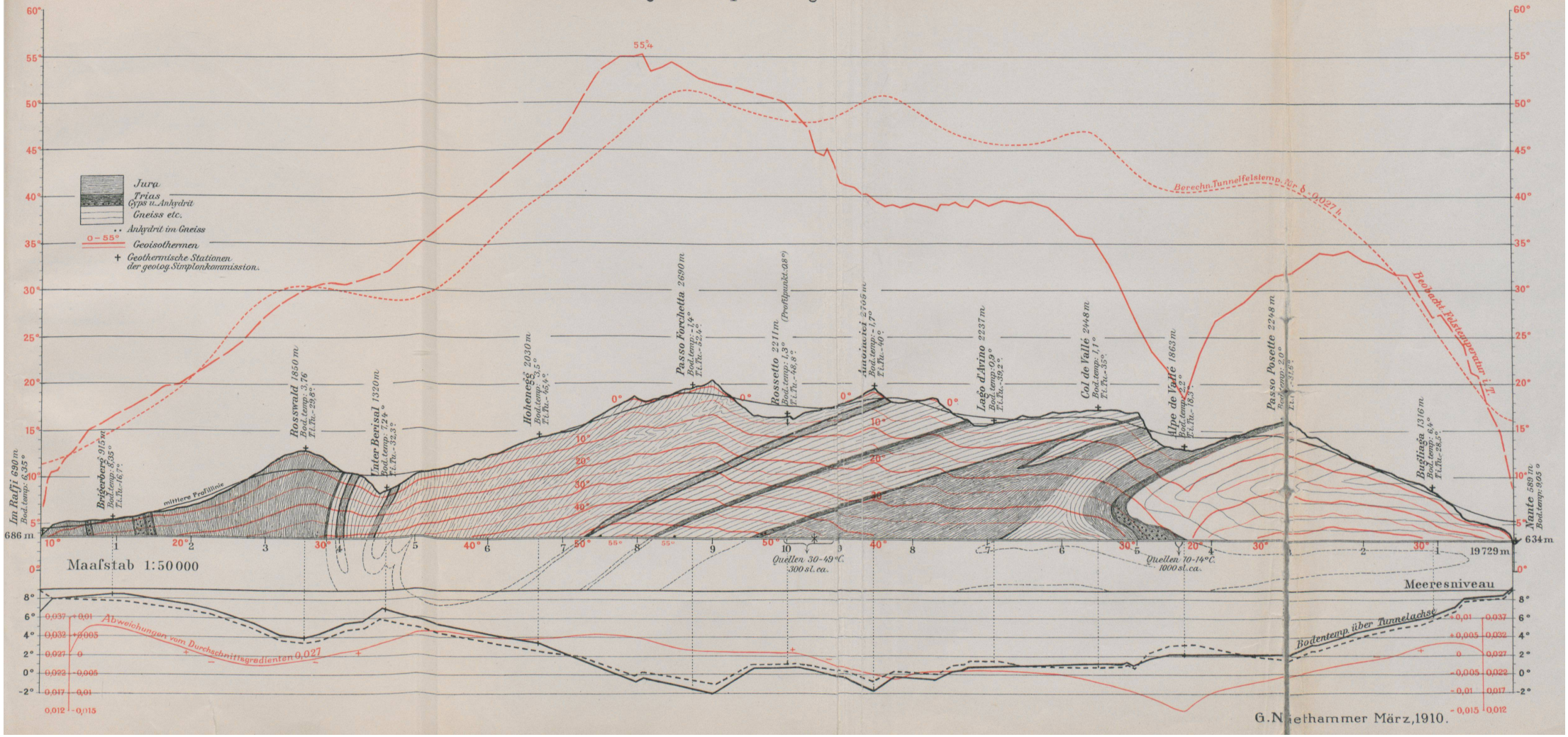
[1] KÖNIGSBERGER, *Eclog. geol. helv.*, Bd. IX, S. 140, und Bd. X, S. 523.

[2] In F. M. STAPFF, Einfluss der Erdwärme bei Tunnelbauten. *Archiv f. Physiologie*, herausgegeben v. E. Du Bois-Reymond, Jahrg. 1879, sowie F. M. STAPFF, Wärmezunahme nach dem Innern von Hochgebirgen. — Bern, Dalph'sche Buchhandlung, 1880.

nach der er den Zuschlag für den Simplontunnel berechnete. Die Erfahrungen am Simplon beweisen, dass STAPFF seine Beobachtungen im Gotthardtunnel falsch interpretiert hat. Auch scheint STAPFF selbst den Irrtum bald eingesehen zu haben; denn ein Jahr später kommt er für dasselbe Projekt Favre-Clo zu 53° auf andere Weise. Ausgehend von der Ueberlegung, dass in Gebirgen mit der Tiefe die geothermische Tiefenstufe kleiner werden müsse, berechnet er die Tiefe, in der sich eine nahezu horizontale Isotherme einstellen muss und findet sie zu 750 M. Ueber dieser Horizontalisotherme wird die Wärmezunahme von der Form des überliegenden Terrains wesentlich beeinflusst, unter ihr aber treten andere von der oberflächlichen Gebirgsgliederung unabhänige Wärmegradienten in Funktion. Für letztere setzt er 0,024 an (Mittel zwischen 0,02 des Gotthards und 0,03 der Ebenen). Ein Blick auf die ins Simplonprofil eingezeichneten Geoisothermen lehrt, dass die Horizontalisotherme noch beträchtlich tiefer liegen muss als im Niveau des in 634-705 M. über Meer gelegenen Simplontunnels.

Basel, Minerolog.-geolog. Anstalt der Univerität, 4. März 1910.

Wärmeverteilung im Simplon längs der Achse des Tunnels.



G. Niethammer März, 1910.