

Die Temperaturprognose im Tunnelbau

Autor(en): **Andreae, C.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **71 (1953)**

Heft 42

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-60647>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Temperaturprognose im Tunnelbau

Von Prof. Dr. C. ANDREAE, Dipl. Ing., Zollikon (Zürich)

DK 624.19 : 550.361

Schluss von Seite 599

III. Praktische Erfahrungen und Beispiele

Um den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Tunneltemperaturen zu zeigen, haben wir bisher eine Anzahl *schematischer* Beispiele betrachtet. In der praktischen Wirklichkeit liegen die Dinge in der Regel nicht so einfach. Es sind hauptsächlich drei Umstände, welche die Temperaturbestimmungen erschweren können:

a. Der Tunnel durchquert nicht immer einen regelmässigen Gebirgszug, sondern liegt irgendwie anders im Gebirge, was besonders bei Kraftwerkstollen der Fall sein kann.

b. Ein weiterer erschwerender Faktor kann der geologische Aufbau des Gebirges sein. Wenn in den vorangehenden Beispielen die Rechnung jeweils mit drei verschiedenen Werten für α durchgeführt wurde, so wurde jedesmal ein gleichmässig aufgebautes Gebirge vorausgesetzt. Das ist in Wirklichkeit durchaus nicht immer der Fall. Man betrachte nur das bekannte geologische Profil des Simplontunnels [1, 2, 17]. Der Normalgradient α muss in solchen Fällen durch Kombination und Vergleich mit bekannten Fällen und durch Zusammenwirken von Ingenieur und Geologen geschätzt werden. Mitunter sind für einzelne Strecken verschiedene Normalgradienten anzuwenden. Der Normalgradient kann wohl aus Beispielen mit ähnlichem geologischem Aufbau übernommen werden, nicht aber der zu erwartende, mittlere Gradient; denn dieser ist, wie gezeigt wurde, nicht vom geologischen Aufbau allein abhängig, sondern auch — und zwar primär — von der topographischen Form des Gebirges.

c. Wo fliessendes Wasser angeschlagen wird — selbst in verhältnismässig kleinen Mengen — da ist dessen Einfluss auf die Temperaturen, bzw. den Gradienten, erheblich grösser als in Tabelle 1 für bloss feuchtes Gebirge angegeben.

Wasseradern bei einer Temperaturprognose richtig zu berücksichtigen ist eine schwer zu lösende Aufgabe. Koenigsberger gibt dafür eine Formel an [10, 13], deren Allgemeingültigkeit jedoch schon von Willman bestritten wurde [19], weil in ihr das Temperaturgefälle zwischen Wasser und Gebirge fehlt, das für die Kühlwirkung von Bedeutung ist. Dieses kann in der Tat, je nach dem vom Wasser zurückgelegten Weg, sehr verschieden sein. Im Simplontunnel traten zwischen warmen Quellen von 46 bis 49° C auch solche von nur 30° C auf. Diese kamen offenbar auf kürzerem Wege von der Erdoberfläche zum Tunnel als die wärmeren, die einen längeren und wahrscheinlich auch durch grössere Tiefen führenden Weg hinter sich hatten, wobei sie grössere Wärmemengen aufnehmen konnten. Für die Prognose ist eine solche Formel von zweifelhaftem Wert; denn, wenn auch die geologischen und hydrologischen Untersuchungen über die vermutlich anzutreffenden Wassermengen und die möglichen Einbruchstellen Anhaltspunkte geben können, so wird es wohl stets schwierig oder unmöglich sein, über den Weg, den das Wasser vor Erreichen des Tunnels zurücklegt, zuverlässige Auskunft zu geben. Besonders schwierig ist es, die durch das Wasser bewirkte Abkühlung zu bestimmen, wenn es nicht in Form geschlossener Adern, also als Quelle, sondern in durchlässigem Gebirge auf grösserer Länge verteilt, regenförmig auftritt. Es sind darüber noch viele Erfahrungen zu sammeln. Vorläufig kann, gestützt auf die bisherigen Beobachtungen, angenommen werden, dass, wo fliessendes Wasser in nennenswerter Menge angetroffen wird, der Wärmegradient ganz erheblich, örtlich bis 50 %, vermindert werden kann. Es bleibt auch die Möglichkeit bestehen, Thermen anzuschlagen, die wärmer sind als das Gestein ihrer Umgebung und dieses somit heizen. Es wurde seinerzeit dieses von Dr. A. Zolliinger von den Quellen des Simplontunnels vermutet [20]. Doch ist der Verlauf der Isothermen dort, wie Schardt und Niethammer dartun, ein unzweideutiges Anzeichen dafür, dass auch die warmen Quellen dem Gestein

Wärme entzogen, d. h. dieses kühlen und nicht heizen. Eine andere Frage ist natürlich ihr Einfluss auf die von der künstlichen Kühlanlage beim Bau abzuführende Wärmemenge [15, 16].

1. Stollen Isère-Arc des Kraftwerkes Randens in Savoyen (Bild 5)

Dieser in den Jahren 1949/1953 aufgefahrenen, 12 km lange Stollen (lichter Querschnitt 41 m²) durch das Massiv des Mont Bellachat durchfährt hauptsächlich fächerförmig stielgestellte kristalline Schiefer, die eine Triassynklinale einschliessen. In der Tiefe war auch Granit zu erwarten. Die Schichten streichen annähernd senkrecht zur Stollenaxe. Ihr Fallen ist aus Bild 5 ersichtlich. Nach den zurzeit der Temperaturbestimmung zur Verfügung stehenden geologischen Angaben war Wasser nur in der Nähe des Ostportals zu erwarten. Die Gesteine und ihre Lagerung sind für die Abkühlung günstig. Laut geologischer Prognose war aber in der Tiefe bei der Entstehung der Synklinale zerquetschtes Gestein und überhaupt etwas unbestimmtes Gebirge zu vermuten. Im Jahre 1948 wurde der Verfasser von der Bauherrschaft (E. d. F.) u. a. mit der Untersuchung der zu erwartenden Temperaturen beauftragt.

Der Stollen liegt im Mittel 444 m ü. M. Der höchste Geländepunkt des Längenprofils liegt rund 1900 m über Tunnelmitte. Die Relieflinie wurde wie früher angegeben bestimmt. Aus einer Karte im Masstabe 1:20 000 mit Höhenkurven von 10 m Aequidistanz wurde alle Kilometer ein Querprofil herausgezeichnet, dessen Breite auf jeder Seite der Stollenaxe gleich der Höhe des Geländepunktes über dem Stollen angenommen wurde (s. Bild 2). Von diesen Querprofilen wurde die mittlere Höhe bestimmt und als Ordinate der Relieflinie über dem Stollen aufgetragen.

Die von dieser Relieflinie und dem Tunnelhorizont eingeschlossene Fläche beträgt 11 186 000 m². Daraus ergibt sich als Höhe der Sinuskurve $h_s = 1464$ m.

Die Bodentemperatur ϑ_0 auf der Höhe des Stollens wurde von der Bauleitung gemessen; sie beträgt 11° C.

Mit Rücksicht auf die etwas unsichere Beschaffenheit des Gebirges, wie sie im damals noch «vorläufigen» geologischen Profil angegeben war, wurde α nicht, wie für stielgestellte Schichten in Tabelle 1 angegeben, zu 0,027 bis 0,028° angenommen, sondern vorsichtshalber $\alpha = 0,029°$; b ist $12\,000/\pi = 3820$ m; $C_1 = 55,4$.

Als Ausgangstiefenstufe ergab die Untersuchung nach Gleichung 5 für den Scheitel der Sinuskurve 48 m.

Die Bodentemperatur am Scheitel der Sinuskurve wurde nach Gleichung 13, von $\vartheta_0 = 11°$ C auf Meereshöhe 444 m ausgehend, mit + 4,3° C gefunden. Die Temperaturdifferenz beträgt somit 6,7°.

$$D = 1464 - 6,7 \cdot 48 = 1142 \text{ m; } D/b = 0,299; C_2 = -95; x_1 = 1520 \text{ m; } x_2 = 378 \text{ m; } \vartheta_1 = 37° \text{ C.}$$

Mittlerer Gradient:

$$\frac{37 - 11}{1142} = 0,0227°; \text{ mittlere Tiefenstufe: } 44 \text{ m.}$$

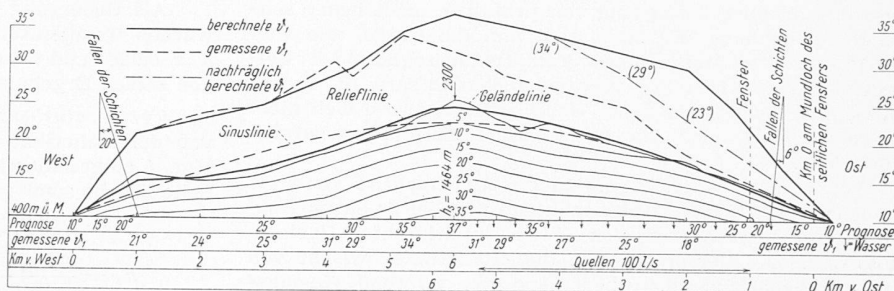


Bild 5. Kraftwerkstollen Isère-Arc mit Isothermen nach Koenigsberger - Thoma

Tiefenstufe an den Stollenenden: Berechnung der Temperatur 500 m unter den Enden:

$$x = x_1 + 500 = 2020 \text{ m}; \quad x/b = 0,529$$

Nach Gleichung 6:

$$\vartheta_{x=2020} = 110,8 \lg \left(e^{0,529} + \sqrt{e^{2 \cdot 0,529} - 1} \right) - 95 = 29^\circ \text{ C}$$

$$\text{Tiefenstufe: } \frac{500}{29 - 11} = 28 \text{ m}$$

Mit den so gefundenen Tiefenstufen wurden die Isothermen gezeichnet und davon die Stollentemperaturen abgeleitet. Die im Stollen während des Baues gemessenen Temperaturen sind in Bild 5 ebenfalls eingetragen. Auf der Westseite, die trocken blieb, stimmen die vorausbestimmten und die gemessenen Temperaturen bis km 5 so gut überein, als von einer Prognose überhaupt erwartet werden kann, und der Unterschied zwischen der berechneten und der gemessenen Höchsttemperatur beträgt nur 3^o.

Aber auf der Ostseite sind die Wärmeverhältnisse weitgehend durch Wasseradern (über 100 l/s, Temp. rd. 25^o C) beeinflusst. Die auf dieser Seite in der Tiefe gemessenen Temperaturen entsprechen einem Normalgradienten $\alpha = 0,024^o$, was eine Verminderung gegenüber 0,029^o um 17 % bedeutet. Aufschlussreich ist der grosse Unterschied zwischen Prognose und Wirklichkeit im Punkt km 2 ab Ostportai. Hier zeigt sich nämlich die Bedeutung der rechnerischen Methode. Bei der Prognose wurden seinerzeit, wie oben gezeigt, nur die Temperatur, der mittlere Gradient und die mittlere Tiefenstufe in Tunnelmitte und an den Enden rechnerisch bestimmt. Innerhalb dieses Rahmens waren sodann die Isothermen durch empirische Schätzung interpoliert worden. Die nachträglich durchgeführte, durch die gefundenen Differenzen veranlasste, direkte Berechnung einzelner Punkte nach Gleichung 2 ergibt auf der Ostseite, deren Relieflinie nur unbedeutend von der Sinuslinie abweicht, eine Temperaturkurve (in Bild 5 strichpunktiert), die sich der Kurve der gemessenen Temperaturen bedeutend mehr nähert und, wenn von vorneherein durchgeführt, ohne den Einfluss des Wassers, wahrscheinlich von dieser nur sehr wenig verschieden gewesen wäre.

Auf der Westseite weicht die Relieflinie ziemlich erheblich von der Sinuslinie ab. Es ist nun interessant und für die Anwendbarkeit der Methode Koenigsberger-Thoma von Bedeutung festzustellen, dass auch hier die Berechnung mit den früher gefundenen Werten, die — mit etwas mehr Glück als auf der Ostseite — mit den gemessenen zusammenfallen, übereinstimmende Ergebnisse zeitigt. Sie muss nur dem Verlauf der Relieflinie angepasst werden, indem jeweils der für einen Punkt nach Gleichung 2 gefundene Wert ϑ um so viele Grade vermehrt oder vermindert wird, als die Division des Höhenunterschiedes zwischen Relief- und Sinuslinie über dem betreffenden Punkt durch die mittlere Tiefenstufe (hier 44 m) ergibt⁷⁾. Für Km. 3 ab W. P. z. B. ergibt Gleichung 2 zunächst $\vartheta = 29^o$. Die Relieflinie liegt hier 200 m tiefer als die Sinuslinie. Wir finden somit $\vartheta_1 = 29 - \frac{200}{44} = 25^o$, wie in Bild 5 angegeben, usw. Es zeigt sich somit, dass bei zweckmässiger Anpassung die Methode Koenigsberger-Thoma auch dann anwendbar ist, wenn die Relieflinie von der Sinuslinie etwas abweicht. Da die von beiden eingeschlossenen Flächen gleich sind, bleibt auch der Wärmestrom praktisch gleich. Es kann sich nur um Verschiebungen handeln.

2. Stollenstrecke Isorno-Lodano der Maggia-Kraftwerke (Bild 6)

In den bisher betrachteten Beispielen, sowohl in den schematischen, wie in dem der Wirklichkeit entnommenen, handelt es sich um eigentliche «Gebirgstunnel», d. h. um Durchstiche quer durch einen Gebirgszug von praktisch unendlicher seitlicher Ausdehnung. Es stellt sich nun die Frage, wie weit die geschilderte Methode zur Temperaturprognose für tief liegende Kraftwerkstollen verwendet werden darf, die anders im Gebirge liegen und deren Ueberlagerungsprofil sich nicht zu beiden Seiten der Axe auf grössere Entfernung parallel wiederholt.

Ein solcher ist z. B. die in der Ueberschrift genannte Stollenstrecke. Sie verläuft annähernd parallel zu einem Ausläufer eines verzweigten, von Tälern durchfurchten Gebirgsmassivs. Das Längsprofil bzw. die «Relieflinie» weicht von einer Sinuslinie ziemlich bedeutend ab, während Koenigs-

berger selber als Voraussetzung für die Anwendbarkeit seiner Methode ein nur geringfügiges Abweichen davon nannte [11]. (Die oben durchgeführte Bestimmung der Temperaturen im Stollen Isère-Arc hat bereits gezeigt, dass diese Voraussetzung nicht unbedingt erfüllt sein muss.) Als weitere Besonderheit ist anzuführen, dass der Gesamtstollen, von dem die betrachtete Strecke ein Teilstück ist, nicht in einer Geraden liegt, sondern aus mehreren, einen Winkel miteinander bildenden, geraden Einzelstrecken besteht, von denen die betrachtete Strecke eine ist. Dabei ist das eine Ende (Km. 7) nicht auf Geländehöhe, sondern, beim Fenster Lodano, unter hoher Ueberlagerung.

Anfangs 1952 hatte der Leiter der Projekt- und Bauarbeiten, Dr. h. c. A. Kaech, die Freundlichkeit, dem Verfasser die nötigen Unterlagen zur Verfügung zu stellen, um zu versuchen, ob die geschilderte Methode der Temperaturbestimmung den vorliegenden Verhältnissen angepasst werden könne. Der Stollen war zu jener Zeit bereits in Arbeit, und durch den geologischen Dienst der Bauleitung waren die Gesteintemperaturen von Km. 0 bis 3,000, sowie die Temperatur bei Km. 7,000 im Stollen gemessen worden. Für die damals noch nicht aufgefahrene Strecke Km. 3,000 bis 7,000 waren die Temperaturen noch unbekannt. Die Geologen hatten ebenfalls die Bodentemperaturen über dem Stollen aus den von der meteorologischen Zentralanstalt angegebenen Lufttemperaturen bestimmt.

Versuchter Vorgang: Zunächst wurde aus der topographischen Karte 1 : 50 000 mit Höhenkurven (Aequidistanz 20 m) die «Relieflinie» nach der früher geschilderten Methode (Bild 2) gezeichnet, und zwar in gerader Richtung über Km. 7, wo die Stollenrichtung ändert, hinaus bis dort, wo die verlängerte Stollenaxe aus dem Gebirge tritt (bei Km. 9,750 der verlängerten Stollenrichtung).

Da, wie aus Bild 6 ersichtlich, das Längsprofil, bzw. die Relieflinie, keinen ausgesprochenen Scheitel in Mittenähe, also in der Nähe des Scheitels einer über die ganze Länge der Strecke gehenden Sinuslinie, besitzt, sondern, im Gegenteil, dort eine Vertiefung aufweist, wurden zwei Sinuslinien, a und b, konstruiert.

Sinuslinie a über der Stollenstrecke Km. 0 bis 8 als Basis und so, dass die von ihr und dem Stollenhorizont eingeschlossene Fläche gleich der doppelten von der Relieflinie und dem Stollenhorizont von Km. 0 bis 4 eingeschlossenen ist.

Sinuslinie b über der Stollenstrecke Km. 4,250 bis 9,750 mit Scheitel über Km. 7,000, wobei ihr Flächeninhalt ebenfalls dem doppelten Flächeninhalt zwischen Relieflinie und Stollenhorizont von Km. 7,000 bis 9,750 entspricht.

Es ist zu berücksichtigen, dass nicht auf der ganzen Länge die selben geologischen Verhältnisse vorherrschen. Von A (Km. 0) bis Km. 3 durchfährt der Stollen steil aufgerichtete Gneise. Für solche gibt Tabelle 1 als «Normalgradient» $\alpha = 0,027$ bis $0,028^o$ an. Mit Rücksicht auf die antikinale Stellung der Schichten (s. Bild 6) wurde der höhere der beiden Werte, also $\alpha = 0,028^o$, gewählt.

Es folgen bis B (Km. 7) Schiefer, die mit etwa 45^o fallen. Für so geneigte Schiefer gibt die Tabelle einen Normalgradienten $\alpha = 0,034$ bis $0,036^o$ an. Die Schichten sind allerdings fächerförmig (synklynal) gestellt. Erfahrungsgemäss ergibt solche Stellung niedrigere Normalgradienten (Gott-hard, Isère-Arc). Sie erleichtert auch das Eindringen von Wasser. Andererseits waren in den beiden genannten Beispielen die Schichten viel steiler aufgerichtet (Isère-Arc Fallen 84 bis 70^o). Mit Rücksicht darauf, dass in der Tiefe des Stollens die Schichten, nach dem geologischen Profil zu schliessen, flacher liegen könnten, wurde für diese Strecke $\alpha = 0,033^o$ gewählt.

Als Uebergang von einem Normalgradienten zum andern wurden Temperatur und Tiefenstufe für Km. 4 zuerst mit $\alpha = 0,028^o$ und dann nochmals mit $\alpha = 0,033^o$ berechnet und von beiden Ergebnissen das Mittel genommen.

Temperaturbestimmung mit Hilfe der Sinuslinie a: Die von der Relieflinie und dem Stollenhorizont von Km. 0 bis Km. 4 eingeschlossene Fläche beträgt 3 077 000 m². Die doppelte Fläche somit:

$$F = 6\,154\,000 \text{ m}^2; \quad l = 2 \cdot 4000 = 8000 \text{ m};$$

$$h_s = \frac{6\,154\,000}{16\,000} \pi = 1208 \text{ m}$$

1208 m über dem Stollen ist die Bodentemperatur + 5^o C.

⁷⁾ Vgl. Fussnote 2.

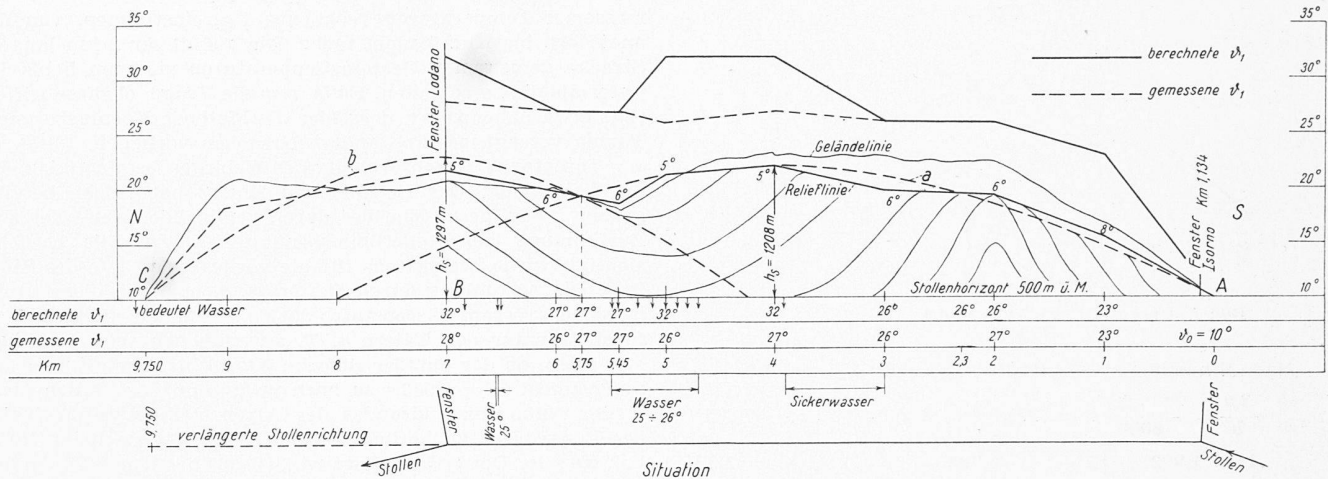


Bild 6. Stollenstrecke Lodano-Isorno der Maggiakraftwerke. Temperaturen längs der Stollenstrecke

Die Bodentemperatur in A ist $\vartheta_0 = + 10^\circ \text{C}$. Die Differenz beträgt somit 5° .

Wir berechnen zunächst die Gesteinstemperatur ϑ_1 im Stollenpunkt Km. 4, also für $y = b \pi/2$, wobei $b = 8000/\pi = 2548 \text{ m}$.

$$\text{Für } \alpha = 0,028^\circ \text{ ist } C_1 = 0,028 \cdot \frac{2548}{2} = 35,7$$

Wir beginnen die Rechnung mit einer Ausgangstiefenstufe von 40 m, finden jedoch mit Hilfe von Gleichung 5 eine solche von 52 m.

$$D = 1208 - 5 \cdot 52 = 948 \text{ m};$$

$$\frac{D}{b} = 0,372; C_2 = -50; x_1 = 819 \text{ m}; x_2 = -129 \text{ m}$$

$$\vartheta_1 = 30^\circ \text{C}$$

Mittlerer Gradient: $0,021^\circ$; mittlere Tiefenstufe: 48 m.

$$\text{Für } \alpha = 0,033^\circ \text{ ist } C_1 = 0,033 \cdot \frac{2548}{2} = 42$$

Die Ausgangstiefenstufe wird 45,4 m.

$$D = 1208 - 5 \cdot 45,4 = 981 \text{ m};$$

$$\frac{D}{b} = 0,385; C_2 = -60; x_1 = 801 \text{ m}; x_2 = -180 \text{ m}$$

$$\vartheta_1 = 34^\circ \text{C}$$

Mittlerer Gradient: $0,024^\circ$; mittlere Tiefenstufe: 41,6 m. Das Mittel der beiden Rechnungsergebnisse gibt somit für

Km. 4:

$$\vartheta_1 = 32^\circ \text{C}$$

Mittlerer Gradient: $0,0225^\circ$; mittlere Tiefenstufe: 44,8 m.

Bestimmung der geothermischen Tiefenstufe bei A (Km. 0) mit $\alpha = 0,028^\circ$

Annahme: $x = x_1 + 500 = 1319 \text{ m};$

$$\frac{x}{b} = 0,517; e^{\frac{x}{b}} = 1,677; e^{\frac{2x}{b}} = 2,812$$

Nach Gleichung 6 wird:

$$\vartheta_x = 1319 = 71,4 \lg 3,023 - 50 = 29^\circ \text{C}$$

Mittlerer Gradient: $\frac{29 - 10}{500} = 0,038^\circ$; mittlere Tiefenstufe: 26 m.

*

Für Km. 3 und 2 wurden die Lage der Isothermen und die in Bild 6 eingetragenen Temperaturen ϑ_1 von der Bodentemperatur ausgehend, durch Anwendung der für Km. 4 mit $\alpha = 0,028^\circ$ gefundenen Tiefenstufe von 48 m bestimmt.

Km. 3: Ordinate der Relieflinie über Stollenhorizont = 956 m.

Bodentemperatur über dem Stollen: $+ 6^\circ \text{C}$

$$\vartheta_1 = 6 + \frac{956}{48} = 25,9 \sim 26^\circ \text{C}$$

Km. 2: Ordinate der Relieflinie über Stollenhorizont = 940 m.

Bodentemperatur über dem Stollen: $+ 6^\circ \text{C}$

$$\vartheta_1 = 6 + \frac{940}{48} = 25,6 \sim 26^\circ \text{C}$$

Für Km. 1 wurde das Mittel der Tiefenstufen 48 und 26 m, also eine Tiefenstufe von 37 m angenommen.

Ordinate der Relieflinie über dem Stollenhorizont: 559 m. Bodentemperatur über Km. 1: $+ 8^\circ \text{C}$.

$$\vartheta_1 = 8 + \frac{559}{37} = 23^\circ \text{C}$$

Zur Kontrolle wurde noch die Temperatur für Punkt Km. 2,300, für den die Ordinaten der Relieflinie und der Sinuskurve gleich sind, nach den Gleichungen 2 und 3 direkt bestimmt:

$$b = 2548 \text{ m}; \alpha = 0,028^\circ; C_1 = 35,7; C_2 = -50$$

$$\frac{2y}{b} = \frac{2 \cdot 2300}{8000} \pi = 103^\circ 30'; 2 \cos \frac{2y}{b} = -0,466$$

$$x = 819 \text{ m}; e^{\frac{2x}{b}} = 1,902$$

$$A = 1,902 + \sqrt{1 - (-0,466 - 1,902) \cdot 1,902} = 4,247$$

$$A + \sqrt{A^2 - 1} = 8,375$$

$$\vartheta_1 = 35,7 \lg 8,375 - 50 = 26^\circ \text{C}$$

Die für Km. 5 und 5,450 in Bild 6 eingetragenen Temperaturen wurden ebenfalls von den Bodentemperaturen ausgehend, aber mit der für $\alpha = 0,033^\circ$ gefundenen Tiefenstufe von 41,6 m bestimmt.

Km. 5: Ordinate der Relieflinie über Stollenhorizont = 1149 m.

Bodentemperatur über Km. 5 = $+ 5^\circ \text{C}$

$$\vartheta_1 = 5 + \frac{1149}{41,6} = 32^\circ \text{C}$$

Km. 5,450: Ordinate der Relieflinie über Stollenhorizont: 870 m.

Bodentemperatur über Km. 5,450: $+ 6^\circ \text{C}$

$$\vartheta_1 = 6 + \frac{870}{41,6} = 27^\circ \text{C}$$

Temperaturbestimmungen mit Hilfe der Sinuslinie b: Die von der Relieflinie und dem Stollenhorizont von Km. 7,000 bis Km. 9,750 eingeschlossene Fläche beträgt $2\,270\,000 \text{ m}^2$, die doppelte Fläche somit:

$$F = 4\,540\,000 \text{ m}^2; l = 2 \cdot 2750 = 5500 \text{ m}; h_s = \frac{4\,540\,000}{11000} \pi = 1297 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,033^\circ; b = 1752 \text{ m}; C_1 = 29$$

Km. 7,000: $y = b \pi/2$

Bodentemperatur 1297 m über Stollenhorizont = $+ 4^\circ \text{C}$.

Nach Gleichung 5 gefundene Ausgangstiefenstufe: 53 m.

$$D = 1297 - 6 \cdot 53 = 979 \text{ m};$$

$$\frac{D}{b} = 0,559; C_2 = -28;$$

$$x_1 = 347 \text{ m}; x_2 = -632 \text{ m}$$

$$\vartheta_1 = 32^\circ \text{C}$$

Mittlerer Gradient: $\frac{32 - 4}{1279} = 0,0219^\circ$; mittlere Tiefenstufe: 46 m.

Km. 5,750: Hier treffen sich die beiden Sinuslinien auf der Relieflinie. Für beide müssen sich hier die selben Temperaturen ergeben.

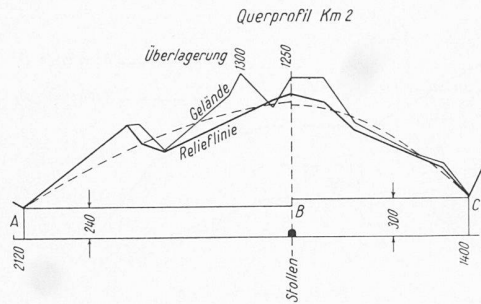


Bild 7. Querprofil Km. 2 von Bild 6

Nach Sinuslinie a: $\alpha = 0,033^\circ$; $C_1 = 42$; $C_2 = -60$

$$\frac{2y}{b} = \frac{11500}{8000} \pi = 258^\circ 40'; 2 \cos \frac{2y}{b} = -0,393$$

$$A = 1,902 + \sqrt{1 - (-0,393 - 1,902) \cdot 1,902} = 3,991$$

$$A + \sqrt{A^2 - 1} = 7,885$$

$$\vartheta_1 = 42 \lg 7,885 - 60 = 27^\circ \text{ C.}$$

Nach Sinuslinie b: $\alpha = 0,033^\circ$; $C_1 = 29$; $C_2 = -28$

$$\frac{2y}{b} = \frac{8000}{5500} \pi = 261^\circ; 2 \cos \frac{2y}{b} = -0,312$$

$$\frac{2x}{b} = \frac{2 \cdot 347}{1752} = 1,486$$

$$A = 1,486 + \sqrt{1 - (-0,312 - 1,486) \cdot 1,486} = 3,402$$

$$A + \sqrt{A^2 - 1} = 6,553$$

$$\vartheta_1 = 29 \lg 6,553 - 28 = 27^\circ \text{ C}$$

Die Berechnung nach beiden Sinuslinien gibt für Punkt 5,750 übereinstimmend

$$\vartheta_1 = 27^\circ \text{ C}$$

Da, wie oben erwähnt, die betrachtete Stollenstrecke, besonders in ihrem untern Teil, einem Bergrücken annähernd parallel verläuft, kann man sich fragen, ob diesem Umstande durch die gewählte Breite der Querprofile für die Bestimmung der Relieflinie in genügendem Masse Rechnung getragen ist. Um dies zu untersuchen, ist in Bild 7 das dafür typischste Profil Km. 2 wiedergegeben, und zwar beidseitig bis zu dem Punkte verlängert, wo das Gelände im Profil wieder anzusteigen beginnt. Für dieses Querprofil wurde auf gleiche Weise wie für das Längsprofil die Relieflinie bestimmt.

Das Profil ist zur Stollenaxe unsymmetrisch. Es wurde daher die Temperatur im Stollenpunkt zweimal berechnet, zuerst unter der Annahme, das Profil sei zur Stollenaxe symmetrisch, dass der rechte Teil das Spiegelbild des linken sei. Sodann wurde die Operation wiederholt unter der Annahme, der linke Teil sei das Spiegelbild des rechten. Basis der Sinuslinie ist das eine Mal die Horizontale durch den tiefsten Punkt der Relieflinie links, das andere Mal durch den tiefsten Punkt rechts der Stollenaxe. Die erste Horizontale liegt so 240 m, die zweite 300 m über dem Stollenhorizont. Die Berechnung wurde nun in genau gleicher Weise durchgeführt, wie oben für die Punkte unter dem Scheitel der Sinuslinie im Längsprofil. Wir geben sie daher hier nicht wieder.

Für die erste Sinuslinie erhält man nach Gleichung 4 mit $x = x_1 + 240 \text{ m}$

$$\vartheta_1 = 27,5^\circ \text{ C}$$

Für die zweite Sinuslinie nach Gleichung 4 mit $x = x_1 + 300 \text{ m}$

$$\vartheta_1 = 26,6^\circ \text{ C}$$

Für den gleichen Punkt Km. 2 hatten wir oben gefunden

$$\vartheta_1 = 26^\circ \text{ C}$$

Der Unterschied zwischen diesem Wert und dem Mittel der beiden aus dem Querprofil gerechneten Temperaturen beträgt 1° , was innerhalb der Genauigkeitsgrenze solcher Prognosen liegt. Die aus dem Querprofil gefundene Temperatur ist sogar 1° höher als die früher gefundene (und gleich der später gemessenen). Die Taleinschnitte zu beiden Seiten des Stollens wurden somit offenbar genügend berücksichtigt.

*

In Bild 6 sind nun auch die nach dem Auffahren durch die Geologen der Bauleitung gemessenen Temperaturen eingetragen. Es fällt auf, dass bis Km. 3 die berechneten und ge-

messenen Temperaturen recht gut übereinstimmen, von da an jedoch bis Km. 5 nicht mehr. Die auf dieser 2 km langen Strecke gemessenen Gesteinstemperaturen sind um 5 bis 6° tiefer als die berechneten. Es ist nun die Frage, ob diese Differenz etwa daher rührt, dass hier die Methode Koenigsberger-Thoma versagt, oder ob andere Ursachen vorliegen.

Die starke Durchfurchung des Gebirges begünstigt z. B. die Abkühlung. Das Beispiel von Km. 2 hat jedoch bereits gezeigt, dass dieser Einfluss durch genügende Breite der zur Bestimmung der Relieflinie benutzten Querprofile berücksichtigt wurde, wenigstens für die vorliegende Tiefe des Stollens. Die Abkühlung durch die Gräte, d. h. die in diesen vorhandene grössere Tiefenstufe, dürfte durch die kleinere Tiefenstufe unter den Tälern z. T. ausgeglichen sein. Es fragt sich auch, ob der auf der Strecke Km. 3 bis 7 gewählte Normalgradient $\alpha = 0,033^\circ$ zu hoch war; denn der Stollen liegt in der Nähe des Südrandes der Alpen. (Ob etwa die Nähe des Langensees zu berücksichtigen wäre [11], scheint fraglich zu sein. Der Stollen liegt rd. 300 m über dem See, dessen Tiefe und Wassermenge nicht die eines Meeres sind.)

Von Km. 4,690 bis 5,500 wurden einige Quellen angeschlagen mit einer Temperatur von 25 bis 26° C . Die Gesteinstemperaturen werden, wie schon wiederholt festgestellt, durch Wasser stark beeinflusst. Die gemessenen Temperaturen der Strecke Km. 3 bis 5 entsprechen einem Normalgradienten $\alpha = 0,026^\circ$, d. h. einem Normalgradienten, der um 21 % niedriger ist als der für die Beurteilung dieser Strecke gewählte von $0,033^\circ$. Es ist möglich, dass der gewählte Normalgradient in Anbetracht der südlichen Lage des Stollens und vielleicht auch für die vorliegenden geologischen Verhältnisse dieser Strecke etwas zu hoch war. (Die niedrigere Temperatur bei Km. 7 war schon vor Durchführung der Berechnung bekannt. Sie ist ausgesprochen durch Wasser bedingt.) Jedenfalls hat das Wasser einen ausschlaggebenden Anteil an der Differenz. Im Stollen Isère-Arc betrug, wie bereits erwähnt, die Verminderung des Normalgradienten durch Wasser auf der Ostseite ungefähr 17 %. Wasser und allenfalls ein etwas zu hoch gewählter Normalgradient können die Differenzen ohne weiteres erklären, so dass diese nicht in der grundsätzlichen Anwendung der Methode Koenigsberger-Thoma ihre Ursache zu haben scheinen. Ein einzelnes Beispiel ist allerdings noch kein endgültiger Beweis für die Anwendbarkeit der Methode in ähnlichen Fällen. Es ist aber noch weniger ein Hinweis auf das Gegenteil.

IV. Schlussfolgerungen

Sowohl die unter III angeführten praktischen, wie die unter II gezeigten schematischen Beispiele lassen erkennen, dass die Methode Koenigsberger-Thoma ein recht einfaches, handliches Mittel ist, um den Einfluss der Oberflächenform des Gebirges auf die zu erwartenden Tunnel- oder Stollentemperaturen zu berechnen.

Für die Gesteinstemperaturen in der Tiefe des Gebirges sind unter normalen Verhältnissen zwei Hauptfaktoren ausschlaggebend: Das Relief des Gebirges und die Leitfähigkeit der Gesteine je nach ihrer Lagerung. Jede Methode zur Bestimmung der Gesteinstemperaturen in der Tiefe muss den Einfluss beider berücksichtigen. Während früher der erste, der Einfluss der Gebirgsform, nur empirisch geschätzt werden konnte, ist für ihn die Empirie durch die Rechnung ersetzt. Was den zweiten anbelangt, so bleibt für Geologie und Geophysik noch ein weites Forschungsgebiet offen. Die wenigen Fälle, die bisher Gelegenheit boten, die Methode Koenigsberger-Thoma zur Prognose anzuwenden und deren Ergebnisse nachher auch durch Feststellung der wirklichen Temperaturen zu überprüfen, genügen noch nicht, um von Erfahrung zu sprechen. Die Erfahrungen müssen noch bedeutend erweitert werden. Die wenigen Beispiele zeigen immerhin, dass die Methode grundsätzlich richtig und zweckmässig ist. Worüber noch viel praktische Erfahrung zu sammeln ist, betrifft hauptsächlich den zweiten Faktor, nämlich die Wahl des Normalgradienten $\alpha = 2C_1/b$. Tabelle 1 gibt dafür einige Werte an. Diese müssen durch praktische Erfahrung weiter überprüft werden. Sie müssen namentlich auch vervollständigt, und es muss mehr Erfahrung über ihre Anwendung in Fällen gewonnen werden, wo das Gebirge nicht homogen, sondern aus Teilen aufgebaut ist, deren Wärmeleitung und damit deren Normalgradienten α verschieden sind. Koenigsberger hat in dieser Richtung bereits einen Versuch unternommen [14], der aber weitergeführt und überprüft werden muss.

Leider liegen die praktischen Möglichkeiten zu solchen Untersuchungen und Ueberprüfungen meistens zeitlich so weit auseinander, dass eine Kontinuität der Forschung am praktischen Objekt fast ausgeschlossen ist. Auch die Bestimmung der Relieflinie bedarf weiterer Erfahrung.

Ein weiterer besonders wichtiger Faktor ist der Einfluss des Wassers. Die Gesetzmässigkeit seines Einflusses harrt noch der Abklärung. Die Prognose ist bei allen Methoden dadurch bedeutend erschwert, dass die Menge des vermutlich anzutreffenden Wassers in den meisten Fällen schwer vorzubestimmen ist.

Unter III sind zwei nach der Methode Koenigsberger-Thoma durchgeführte Prognosen angeführt. Es lagen ihnen verschiedenartige Verhältnisse zugrunde. Wie bereits am Schlusse jenes Kapitels bemerkt, ist ein einzelnes Beispiel nicht endgültig schlüssig, besonders wenn, wie unter III, 2, das Ergebnis nicht ganz eindeutig ist. Wenn dieses Beispiel hier angeführt ist, so deshalb, weil, wie erwähnt, die Gelegenheiten, solche Prognosen durchzuführen, zeitlich und örtlich so auseinanderliegen, dass sie immer wieder von andern Fachleuten durchgeführt werden müssen. Es muss daher jeder Einzelne seine Erfahrungen, sein Beispiel, bekanntgeben, damit so mit der Zeit eine «Erfahrung» über das Problem und seine Lösung zusammenkommt.

Eine möglichst genaue Temperaturprognose ist für den Bau langer, tiefliegender Tunnel und Stollen wichtig, um das Leistungsvermögen der Kühleinrichtungen entsprechend bestimmen zu können. Dieses hängt von der bei den vorhandenen Gesteinstemperaturen aus dem sich abkühlenden Gebirge in der Zeitinheit dem Stollen oder Tunnel zuströmenden Wärmemenge ab. Ueber den Zusammenhang zwischen der Gesteinstemperatur und der vom Gebirge an den künstlich geschaffenen, abgekühlten Hohlraum abgegebenen Wärmemenge sind beim Bau des Simplontunnels durch Dr. Heerwagen eingehende Untersuchungen durchgeführt worden, deren Ergebnisse in den unter [15, 16 und 21] angeführten Werken veröffentlicht sind.

Berichtigungen: S. 598, rechte Spalte, 25. Zeile von unten, lies: Tiefenstufe für $y = 0$ oder $y = \pi b$. — S. 599, rechte Spalte, 4. Zeile von oben, lies: $x_2 = -769$. — Bild 4, S. 599 gilt für $h/l = 1/5$ (nicht $1/10$).

Literaturverzeichnis

- [1] *Schardt H.*: Les résultats scientifiques du percement du tunnel du Simplon. «Bulletin Technique de la Suisse Romande» 1905. — Die geothermischen Verhältnisse des Simplongebirges in der Zone des grossen Tunnels. Aus der Festgabe der Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich zur Einweihungsfeier 1914, Schulthess & Co. 1914.
- [2] *Niethammer G.*: Die Wärmeverteilung im Simplon. «Ecl. Geol. Helv.», Vol. XI, No. 1, Juni 1910.
- [3] *Künzli E.*: Beiträge zur geolog. Karte der Schweiz XXI (51).
- [4] *Buxtorf A.*: Thermische Verhältnisse des Grenchenbergtunnels.

- Unter III im Schlussbericht über den Bau der normalspurigen Hauptlinie Münster-Lengnau. Selbstverlag der BLS, Bern 1917.
- [5] *Stapff F. M.*: Studien über die Wärmeverteilung im Gotthard. Schw. Naturf. Gesellschaft zur 60. Jahresversammlung in Bern 1877 u. a.
 - [6] *Lommel G. H.*: Etude de la question de chaleur souterraine et de son influence sur les projets et systèmes d'exécution du grand tunnel alpin du Simplon présentée à la réunion de la Société helv. des Sciences nat. à Brigue le 13 sept. 1880.
 - [7] Rapport sur les conditions géologiques du Tunnel du Splügen par *C. Schmidt* et *A. Stella* avec un résumé des études thermiques de *J. Koenigsberger*. E. Birkhäuser, Basel 1911.
 - [8] *Fourier M.*: Analytische Theorie der Wärme. Deutsche Ausgabe von Dr. B. Weinstein, Berlin 1884. — *L. R.* und *A. C. Ingersoll* und *O. J. Zobel*, Heat conduction with engineering and geological applications. London 1948.
 - [9] *Thoma E.*: Ueber das Wärmeleitungsproblem bei wellig begrenzter Oberfläche und dessen Anwendung auf Tunnelbauten, Karlsruhe 1906.
 - [10] *Koenigsberger J.*, unter Mitwirkung von *Thoma E.* und *Goetz H.*: Versuche über primäre und sekundäre Beeinflussung der normalen geothermischen Tiefenstufe und über Temperaturen im Albul-, Arlberg-, Simplon-, Ricken-, Tauern- und Bosruck-tunnel. «Ecl. geol. Helv.» Bd. X, 1908.
 - [11] *Koenigsberger J.* und *Mühlberg M.*: Ueber Messungen der geothermischen Tiefenstufe, deren Technik und Verwertung zur geologischen Prognose und über neue Messungen in Mexico, Borneo und Mitteleuropa. «Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Palaeontologie» XXXI, Beilageband, Stuttgart 1911.
 - [12] *Woeikof A.*: Probleme der Bodentemperatur. Typen ihrer vertikalen Verbreitung. Verhältnis zur Lufttemperatur. «Meteorologische Zeitschrift» 1904.
 - [13] *Koenigsberger, Thoma* und *Leier*: Ueber Bodentemperaturen im Schwarzwald, in Graubünden und in Aegypten. «Berichte der Naturf. Ges. zu Freiburg i. Br.» Bd. 18, Heft 1, 1910.
 - [14] *Koenigsberger J.*: Ueber Beeinflussung der geothermischen Tiefenstufe durch Berge, Täler, Schichtenstellung, durch fließendes Wasser und durch Wärme erzeugende Einlagerungen. «Ecl. geol. Helv.» Vol. IX, 1906.
 - [15] *Andrae C.*: Der Bau langer, tiefliegender Gebirgstunnel. Julius Springer, Berlin 1926.
 - [16] *Andrae C.*: Les grands souterrains transalpins. Leemann Verlag Zürich 1948.
 - [17] *Schmidt C.*: Die Geologie des Simplongebietes und des Simplontunnels. F. Reinhardt, Universitätsdruckerei, Basel 1908.
 - [18] *Pressel K.*: Experimentelle Methode der Vorausbestimmung der Gesteinstemperatur im Innern eines Gebirges. R. Oldenbourg, München und Berlin 1928.
 - [19] *v. Willmann E.*: Die Beeinflussung der normalen geothermischen Tiefenstufe durch fließendes Wasser. «Ecl. geol. Helv.» Bd. X, 1908/09.
 - [20] *Zollinger A.*: Wärmeverteilung im Innern verschiedener Alpentunnels. Orell Füssli, «Techn. Mitteilungen», Heft 26, Zürich.
 - [21] *Brandau K.* und *Imhof K.*: Handbuch der Ingenieurwissenschaften. Band V Tunnelbau. 4. Aufl. Wilh. Engelmann, Leipzig 1920.
 - [22] *Haefeli R.* und *Kasser P.*: Beobachtungen im Firn- und Ablationsgebiet des grossen Aletschgletschers, SBZ vom 4. Sept. 1948. — Glaziologische Beobachtungen am grossen Aletschgletscher, SBZ vom 30. Aug. 1952.

Die neuen Sulzer-Zweitakt-Schiffsmotoren geschweisster Bauart

DK 621.436:629.12

Von Dipl. Ing. W. A. KILCHENMANN, technischer Direktor der Abteilung für Dieselmotoren der Firma Gebrüder Sulzer, Aktiengesellschaft Winterthur

Schluss von Seite 606

2. Die neuen Bauelemente in geschweisster Ausführung

Der Uebergang von den schweren Gussteilen zu den leichteren Bauelementen in geschweisster Ausführung der RS-Motoren wurde hauptsächlich durch die Tatsache veranlasst, dass im Laufe des letzten Weltkrieges — namentlich in den britischen Werften — im Bau geschweisster Schiffe und Antriebsmaschinen sehr ausgedehnte Erfahrungen gesammelt worden waren. Zudem und im Zusammenhang damit bot es nach dem Kriege vielfach grosse Schwierigkeiten, Gusstücke solcher Ausmasse zu erhalten, wie sie für den Bau grosser Schiffsmotoren benötigt werden. Infolgedessen wurde beschlossen, bei den neuen Motoren einen grundsätzlich neuen Aufbau zu wählen, der weitgehend aus geschweissten Bauelementen besteht.

Bei Verwendung geschweisster Kurbelgehäuse verlangt die Frage der Kräfteverteilung über das Gerippe und die Ständer ganz besondere Aufmerksamkeit. Die sehr beträchtlichen und wechselnden inneren Kräfte, die bei der Zündung des Brennstoffs im Verbrennungsraum entstehen, müssen auf dem direktesten Weg vom Zylinderdeckel auf die Kurbelwellenlager übertragen werden, und zwar so weit wie möglich ohne quergerichtete Schweissnähte zu kreuzen. Dieser Bedingung wird auf die einfachste Weise durch den Einbau von Zugankern entsprochen (Bild 20), wie sie bei stationären Sulzer-Motoren von jeher verwendet wurden. Bei den RS-Mo-

toren werden diese Kräfte von der oberen Seite des gusseisernen Zylinderblocks über Zuganker direkt auf die Querträger der Grundplatte geleitet, in denen die unteren Schalen der Kurbelwellenlager eingebettet sind. Durch die den Zugankern erteilte Vorspannung werden der Zylinderblock, die Ständer und die Grundplatte einer derart bemessenen Druckbelastung unterworfen, dass diese Elemente selbst unter dem Einfluss der Zündkräfte nie auf Zug beansprucht werden. Die Mehrzahl der geschweissten Bauteile braucht aus diesem Grunde nicht spannungsfrei gegläht zu werden. Einem solchen Glühprozess werden einzig die Querträger der Grundplatte unterzogen, da sie den Hauptlagern der Kurbelwelle als Stütze dienen und die von den Zugankern übermittelten Kräfte daran angreifen.

Die sich aus der Anwendung von Zugankern bietenden Vorteile wurden auch bei der Konstruktion der Grundplatte ausgenutzt, indem die sehr beträchtlichen, von den Kurbelwellenlagern ausgeübten Kräfte durch vorwiegend auf Druck beanspruchte Bauteile auf dem kürzesten Wege auf die unteren Schraubenmutter der Zuganker übertragen werden. Die Grundplatte wird infolgedessen nur kleinen Zug- und Biegebeanspruchungen ausgesetzt. Der Umstand, dass die Zuganker so nahe wie möglich an die Kurbelwellenlager heran verlegt sind, um die Grundplatte zu entlasten, hat allerdings zur Folge, dass der Platz für das Unterbringen der üblichen Bolzen zum Befestigen der Kurbelwellenlagerdeckel nicht