

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 92 (1974)  
**Heft:** 13: Schweizer Mustermesse Basel, 30. März bis 8. April 1974

**Artikel:** Das Durchschlagsnetz zur Gotthard-Basislinie  
**Autor:** Gerber, P.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-72305>

#### 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:** 23.02.2026

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

## Aufruf zur Schweizer Mustermesse



Die Schweizer Mustermesse Basel ist die traditionelle Leistungsschau unserer Wirtschaft. Als Treffpunkt zwischen Produzenten und Konsumenten, Regionen, Branchen und Berufen ist sie ein Spiegelbild des Entwicklungsstandes, eine Momentaufnahme aus dem wirtschaftlichen Leben unseres Volkes. Basel als Standort unterstreicht die internationale Bedeutung der Mustermesse. Die Vorzüge der Stadt, Zentrum einer Region und Knotenpunkt der europäischen Verkehrs- und Handelsströme zu sein, lassen an ihrer Mustermesse den Pulsschlag des wirtschaftenden Europas spürbar werden. Der Pulsschlag hat sich in den letzten Monaten merklich verlangsamt. Der Schutz unserer Umwelt setzt dem ungehemmten Wachstumsstreben natürliche Grenzen. Der weltweite Mangel an gewissen Rohstoffen und Nahrungsmitteln und die damit verbundene Preisentwicklung haben Probleme eigener, ungewohnter Art offen gelegt, die es heute zu bewältigen gilt. Das ist ein Appell an unseren Behauptungswillen, an unsere Fähigkeit, Chancen der Zukunft zu entdecken und zu erschliessen. Der 58. Schweizer Mustermesse vom 30. März bis 8. April 1974 und der ihr angeschlossenen Zweiten Europäischen Uhren- und Schmuckmesse wünsche ich im Namen der Landesregierung einen vollen Erfolg und heisse ihre in- und ausländischen Besucher, Gäste und Aussteller herzlich willkommen.

Ernst Brugger, Bundespräsident

## Das Durchschlagsnetz zur Gotthard-Basislinie

Von P. Gerber, Zürich

DK 528.484:624.19

Mit einer fehlertheoretischen Studie wird am Beispiel der Grundlagenvermessung zur «Gotthard-Basislinie» gezeigt, dass die elektrooptische Laserdistanzmessung eine Netzkonzeption zur Optimierung der Geometrie bezüglich Durchschlagsgenauigkeit gestattet, wobei gleichzeitig der geodätische Arbeitsauf-

wand vermindert werden kann. Ferner wird der Rechenweg zur vorgängigen Beurteilung des Netzentwurfs skizziert, und es werden einige Anhaltspunkte zur Datenkontrolle und zur Organisation der oberirdischen Vermessungsarbeiten anhand einiger Ergebnisse gegeben.

In der Schweiz wird ein neuer Alpendurchstich von rund 50 km Länge geplant: «Die Gotthard-Basislinie» [1]. Sie hat für die Zukunft einen wirtschaftlichen und rationalen Eisenbahntransport zwischen den Industriezentren der Rhein- und der Poebene sicherzustellen. Der Gotthardweg konnte sich seit der Entstehung der Schweizerischen Eidgenossenschaft bis heute als wichtige Nord-Süd-Verbindung Europas behaupten. Er fördert nicht nur einen regen Personen- und Warenverkehr zwischen germanischen und romanischen Kulturen, sondern beeinflusste seit je direkt und indirekt das politische Denken der Schweiz.

Neben vielen anderen Ingenieurvorarbeiten gehört zu einem derartigen Unternehmen die oberirdische Absteckung. Auf Grund einer vermessungstechnischen Beurteilung [2] wurde das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich unter dem Vorstand von Prof. Dr. F. Kobold von den Schweizerischen Bundesbahnen 1971/72 mit der Leitung der oberirdischen Vermessungsarbeiten betraut. Als Verfasser des bereits ausgeführten Projektes «Grundlagenvermessung Gotthardbasis»

und als beauftragter Ingenieur des Institutes habe ich in diesem Zusammenhang das Anliegen, auf einige Besonderheiten des Einsatzes moderner Messmittel (wie die Laserdistanzmessung und ihre Auswirkung) auf die Projektierung und die geodätische Netzgestaltung näher einzutreten. Dank der Laserentfernungsmessung wurde es möglich, die herkömmliche Netzgestaltung der Tunneltriangulationen, wie sie in letzter Zeit noch üblich war, zu verlassen, und in der oberirdischen Absteckung langer Stollen für das Gebirge rationellere Wege zu beschreiten. Dies soll hier zunächst theoretisch und sodann am konkreten Fall gezeigt werden.

Dass zur oberirdischen Richtungsübertragung für den Tunnelbau von Geodäten und Markscheidern gewissermassen ähnliche Überlegungen schon lange vor dem Bestehen der elektronischen Messgeräte gemacht wurden, mögen neben vielen anderen Arbeiten die erste grössere Tunnelabsteckung am Mt. Cenis, welche als «Französischer Durchschlag» in die Fachsprache einging, sowie die oberirdische Absteckung des Lötschbergtunnels durch den bernischen Geometer Th. Mathys bezeugen.

## Einige fehlertheoretische Überlegungen zur Optimierung der Netzgeometrie

«Ob Richtung Süden oder Norden im Tunnelbau misst man genau, sonst bohrt man just an falschen Orten und ärgert sich dann grün und blau. Drum flehet auch den Himmel an und sagt: „Oh steht uns bei, sonst gibt's statt einer Tunnelbahn gleich deren zwei!“»

In diesen Versen kommt die Hauptssorge des Geodäten bei einer Tunnelvermessung zum Ausdruck: zwei Vortriebe von zwei Seiten aus so zusammenzuführen, dass ein möglichst kleiner Durchschlagsfehler entsteht. Wir betrachten deshalb den Durchschlagsfehler als erste Zielfunktion eines Durchschlagsnetzes und definieren zur mathematischen Formulierung:

– Der Durchschlagsfehler ist der Widerspruch  $w$  ( $w_x, w_y, w_z$ ) der entsteht, wenn ein Punkt am Durchschlagsort von beiden Vortriebsseiten her je getrennt eingemessen und entsprechend von jeder Seite aus für sich in Rechnung steht.

Nimmt man dazu den Durchschlagspunkt  $D = 0$  als Ursprung eines orthonormierten Koordinatensystems  $X, Y, Z$ , und legt die  $Z$ -Achse ins Lot, die  $X$ -Achse normal zur Linienführung im Grundriss, dann bedeuten die drei Widerspruchskomponenten:

$$w_x = X_D - X_0 \text{ den Querfehler}$$

$$w_y = Y_D - Y_0 \text{ den Längsfehler}$$

$$w_z = Z_D - Z_0 \text{ den Höhenfehler}$$

Für das Folgende ist der Höhenfehler nicht weiter von Bedeutung und wird hier vernachlässigt, da er von der Lage in  $X$  und  $Y$  meist als Nivellement messtechnisch und rechnerisch unabhängig behandelt wird. Bild 1, welches schematisch den Grundriss einer einfachen Tunnelabsteckung über Winkel- und Distanzmessungen darstellt, entnimmt man unmittelbar die beiden Widerspruchsgleichungen für die Durchschlagsstelle  $D = 0$  orthogonal:

$$w_x = \Delta X_{01} + \Delta X_{12} + \dots + \Delta X_{nD} = [\Delta X]$$

in Querrichtung,

$$w_y = \Delta Y_{01} + \Delta Y_{12} + \dots + \Delta Y_{nD} = [\Delta Y]$$

in Längsrichtung,

$$\text{wenn } \Delta X_{Sz} = X_S - X_0$$

$$\Delta Y_{Sz} = Y_S - Y_0$$

Koordinatendifferenzen der Stations- und Zielpunkte und die eckigen Klammern [] die Gaussischen Summenzeichen bedeuten.

Polar als Addition der Vektorkomponenten:

$$w_x = S_0 \cos \alpha_0 + S_1 \cos \alpha_1 + \dots + S_n \cos \alpha_n = [S \cos \alpha]$$

$$w_y = S_0 \sin \alpha_0 + S_1 \sin \alpha_1 + \dots + S_n \sin \alpha_n = [S \sin \alpha]$$

wobei für ein Azimut  $\alpha_i$  in Funktion der beobachteten Winkel

$$\alpha_i = \alpha_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_i - i\pi$$

zu setzen ist.

Daraus die Linearformen beider Widersprüche

$$w = B^T l \quad \text{Dim (2,1)}$$

wenn für den Vektor der zufälligen Beobachtungsfehler transponiert

$$l^T: \begin{bmatrix} \partial \beta_1 & \partial \beta_2 & \dots & \partial \beta_n & \partial S_0 & \partial S_1 & \dots & \partial S_n \end{bmatrix},$$

durch partielle Differentiation und entsprechendes Einordnen nach den Beobachtungen die Koeffizientenmatrix der Dimension (2,2n+1)

$$B^T = \left| \frac{\partial (w_x, w_y)^T}{\partial l} \right| =$$

$$= \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} Y_1 & Y_2 & \dots & Y_n & \frac{\Delta X_{D1}}{S_0} & \frac{\Delta X_{12}}{S_1} & \dots & \frac{\Delta X_{nD}}{S_n} \\ \hline -X_1 & -X_2 & \dots & -X_n & \frac{\Delta Y_{D1}}{S_0} & \frac{\Delta Y_{12}}{S_1} & \dots & \frac{\Delta Y_{nD}}{S_n} \end{array}$$

$$\text{für } w = \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix}$$

bedeuten. Ist ferner  $Q_{ll}$  der Dim (2n+1)<sup>2</sup> die Kovarianzmatrix des Beobachtungsvektors  $l$ , wobei es sich dabei auch um abgeleitete oder durch vorgängige Netzausgleichungen bereits korrelierte Beobachtungen handeln kann, gewinnt man die Streuung des Durchschlags im eingeführten Koordinatensystem  $X, Y$  gemäß Bild 1 aus der Formmatrix:

$$Q_{ww} = Q^{T_{ww}} = B^T Q_{ll} B = \begin{bmatrix} Q_{wxwx} & Q_{wxwy} \\ Q_{wywx} & Q_{wywy} \end{bmatrix}$$

Dim (2,2)

woraus der mittlere Querfehler

$$m_q = \pm (Q_{wxwx})^{1/2} =$$

und der mittlere Längsfehler

$$m_L = \pm (Q_{wywy})^{1/2} =$$

des Durchschlags bestimmt werden können.

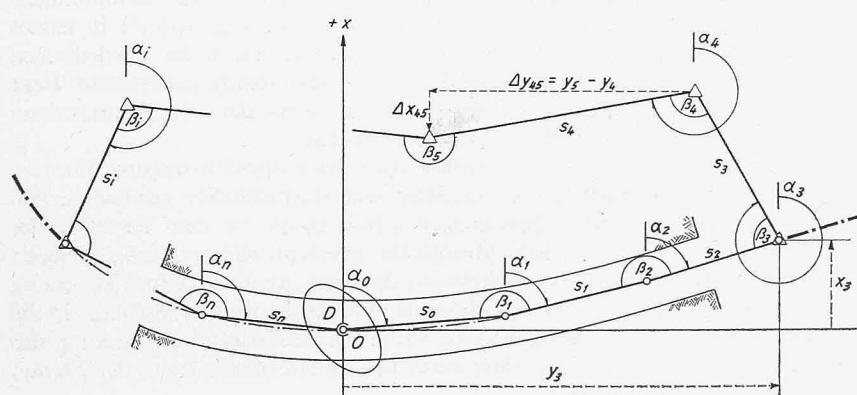


Bild 1. x-Achse senkrecht zur Bauachse (strichpunktierte Linie), in der Durchschlagstelle  $D = 0$  ( $x_D = x_0 = 0, y_D = y_0 = 0$ ),  $n$  Stationen, aussen (Dreiecke), innen (Kreise), Winkelmessungen  $\alpha_i$ , Distanzmessungen  $s_i$

Nebenbei wollen wir festhalten, dass die quadratische Form  $Q_{ww}$  als mittlere Durchschlagsfehlerellipse in einem «Freien Netz» bezüglich den minimal notwendigen Nebenbedingungen zur Lagerung, Orientierung und zur Festlegung der Netzmetrik invariant ist. Zur numerischen Bestimmung von  $Q_{ww}$  aus den Koordinatendifferenzen  $X_D - X_0$ ,  $Y_D - Y_0$  über eine vermittelnde Netzberechnung sei auf [3] und [4] verwiesen.

Denkt man sich nun für ein Netz sämtliche Beobachtungen auf einen einzigen Polygonzug gemäß Bild 1 konzentriert, etwa im Sinne einer Anwendung des Schreiberschen Satzes [5], dann wird die Kovarianzmatrix  $Qu$  zur diagonalen Varianzmatrix der Beobachtungsmittel:

$$Qu = \begin{bmatrix} m_{\beta_1}^2 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & m_{\beta_n}^2 & \cdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & m_{S_0}^2 \\ \vdots & \cdots & \cdots & \ddots & m_{S_n}^2 \end{bmatrix} \quad \text{Dim } (2n+1, 2n+1),$$

worin  $m_\beta$  die mittleren Fehler der Winkel  $\beta$  im arcus und  $m_S$  die mittleren Fehler der Seiten  $S$  im Distanzmaß bedeuten. Mit der Standardisierung

$$P = Qu^{-1}$$

sodass  $Q_{ww} = B^T P^{-1} B$

ergibt sich die Kovarianz des Durchschlags unter Benutzung der Gaußschen Schreibweise explizit zu

$$\begin{aligned} Q_{ww} &= \frac{\left[ \frac{YY}{p_\beta} \right] + \left[ \frac{\Delta X \Delta X}{SSps} \right] - \left[ \frac{XY}{p_\beta} \right] + \left[ \frac{\Delta X \Delta Y}{SSps} \right]}{- \left[ \frac{XY}{p_\beta} \right] + \left[ \frac{\Delta X \Delta Y}{SSps} \right] \left[ \frac{XX}{p_\beta} \right] + \left[ \frac{\Delta Y \Delta Y}{SSps} \right]} = \\ &= \begin{bmatrix} Q_{wxxw} & Q_{wxwy} \\ Q_{wywx} & Q_{wywy} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Damit wäre die anzustrebende Zielfunktion einer Tunnelabsteckung mit Winkel- und Distanzmessungen genauigkeitsmäßig im zweidimensionalen Streubereich  $X, Y$  aufgestellt. Bemerkenswert an der Formmatrix  $Q_{ww}$  ist, dass die Streuung des Durchschlags mit den Gewichten

$$p_{\beta i} = m_{\beta i}^{-2}, \quad p_{Si} = m_{Si}^{-2}$$

darin nicht nur in Abhängigkeit zur Messgenauigkeit  $m_\beta$ ,  $m_S$ , sondern mit den Koordinaten  $X_i, Y_i$  zur Lage der Messstationen und dadurch vereinfacht zur Netzgeometrie in Beziehung gebracht wurde (vergleiche Bild 1).

Aus den Diagonalelementen der Formmatrix  $Q_{ww}$  ergibt sich ferner für den mittleren Querfehler:

$$m_q = \pm \left( [Y^2 m_{\beta}^2] + \left[ \frac{\Delta^2 X}{S^2} m_{S}^2 \right] \right)^{1/2}$$

für den mittleren Längsfehler:

$$m_L = \pm \left( [X^2 m_{\beta}^2] + \left[ \frac{\Delta^2 Y}{S^2} m_{S}^2 \right] \right)^{1/2},$$

zwei Formeln, die mit [6] in Einklang stehen. (Man beachte, dass im Gegensatz zu Kreiselbeobachtungen die Durchschlagsgenauigkeit bei Theodolitbeobachtungen mit  $Y^2 m_{\beta}^2$ ,  $X^2 m_{\beta}^2$  vermehrt von der relativen Lage des zukünftigen Durchschlags  $D(0,0)$  abhängig ist).

Im Falle einer gestreckten Führung kommen weiter alle Messstationen in Bild 1 genähert auf die  $Y$ -Achse zu liegen, so dass mit  $X_i \sim 0$  die Vereinfachungen gelten:

$$Q_{ww} = \begin{bmatrix} [Y^2 m_{\beta}^2] & 0 \\ 0 & [m_S^2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_q^2 & 0 \\ 0 & m_L^2 \end{bmatrix}$$

und womit eine erste Optimierung erzielt wird.

Daraus lässt sich das Prinzip des «französischen Durchschlags» entnehmen:

- Oberirdische Richtungsübertragungen  $\beta_i$  direkt über der Durchschlagsstelle haben mit  $Y_i = X_i = 0$  auf die Durchschlagsgenauigkeit keinen Einfluss.

Bei sehr langen Tunnelachsen, welche ohnehin gestreckt verlaufen, lassen sich obige Beziehungen unter entsprechenden Mittelbildungen aus Einzelzügen ebenfalls in guter Näherung auf ein Durchschlagsnetz verallgemeinern und so zur Optimierung der Netzgeometrie verwenden. In schmalen Triangulationen mit polygonalem Charakter sind nämlich Beobachtungen quer zur Stollenrichtung für die Durchschlagsgenauigkeit von sekundärer Bedeutung, so dass ein derartiges Netz bezüglich Durchschlag fehlertheoretisch in mehrere, praktisch unabhängige Parallel- und Diagonalzüge zerfällt. Dies um so mehr, als kurze und steile Beobachtungen senkrecht zur Tunnelrichtung schon wegen systematischen Einflüssen nicht allzusehr ins Gewicht fallen dürfen.

Für eine gestreckte Netzgeometrie ergeben sich deshalb die zwei weiteren Zielfunktionen zur Optimierung:

$$m_q^2 = [Y^2 m_{\beta}^2] \rightarrow \min$$

$$m_L^2 = [m_S^2] \rightarrow \min,$$

worin wir die Beobachtungsgenauigkeit  $m_\beta$ ,  $m_S$  als konstant betrachten, weil sie erfahrungsgemäß auch durch Wiederholungen nicht beliebig gesteigert werden kann.

Theoretisch muss für den projektierenden Ingenieur beim Entwurf eines gestreckten Durchschlagsnetzes also gelten:

für eine optimale Richtungsübertragung aus  $[Y^2] \rightarrow \min$

a) Möglichst wenige Zwischenstationen bei hoher Brechwinkelgenauigkeit  $m_\beta$ !

b) Unvermeidbare Stationierungen zwischen den festen Angriffsstellen möglichst nahe zur Durchschlagsstelle hin aussuchen!

zur optimalen Absteckung längs der Achse aus  $[m_S^2] \rightarrow \min$

c) Möglichst genaue Distanzmessungen!

Diesen Optimierungen auf Grund der Netzdistribution werden von der Topographie und den atmosphärischen Bedingungen her gewisse Grenzen gesetzt.

Dagegen ist zur Verwirklichung der Grundsätze die elektrooptische Laserdistanzmessung besonders geeignet. Sie garantiert uns mit einer äusseren Genauigkeit von

$$|m_S| < |1 \text{ cm} + S \cdot 2 \cdot 10^{-6}|$$

die Einhaltung einer Präzision in Längsrichtung, die bei weitem den Forderungen an die Absteckung genügt.

Weit wichtiger scheint uns aber ihre Reichweite zu sein, welche analog den Winkelbeobachtungen innerhalb der Sichtweiten unbegrenzt bleibt. Der Beziehung  $m_q^2 = [Y^2 m_{\beta}^2]$  entnimmt man zunächst, dass die Distanzmessungen im gestreckten Fall am gefürchteten Querfehler nicht direkt beteiligt sind. Dank ihrer Reichweite erlaubt die Laserdistanzmessung aber die Netzgeometrie bezüglich Durchschlagsgenauigkeit in Querrichtung optimal anzulegen, d. h.  $[Y^2]$  durch lange Strecken minimal zu halten. Aber nicht nur im stochastischen Sinn wirken sich dabei lange Seiten günstig aus: Im Gebirge bedeuten weite Visuren zugleich flache Visuren, welche von der relativen Inhomogenität des Gravitationsfeldes bei der Reduktion in die geodätische Projektionsebene weit weniger beeinflusst werden als steile Messungen. Ferner führt  $[Y^2] \rightarrow \min$  nicht nur auf ein theoretisches Extremum an Genauigkeit,

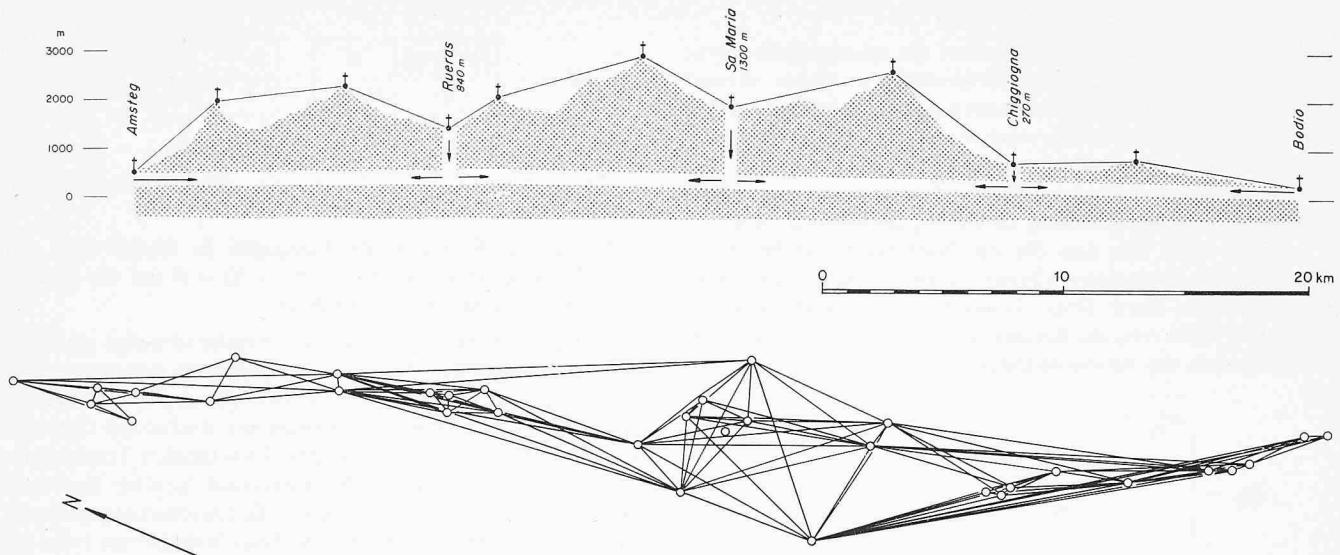


Bild 2. Gotthard-Basislinie

Vertikalschnitt durch das Bauvorhaben mit optimalen Polygonen (oben) und Grundriss der oberirdischen Triangulation (unten)

sondern gestattet dem Verfasser zugleich ein wirtschaftliches Optimum anzustreben, denn weniger Messstationen heisst vor allem: *weniger Messaufwand*. Mit der elektronischen Distanzmessung wird eine breite Netzdistribution zur Massstabübertragung durch Triangulation somit hinfällig. Auf Grund dieser Überlegungen ergab sich für die Grundlagenvermessung der Gotthard-Basislinie ein wesentlich zielbewussteres Konzept, als dies auf konventionelle Art überhaupt möglich gewesen wäre.

#### Netzentwurf und vorgängige Berechnungen zur Beurteilung der projektierten Messanlage

Mit der konsequenten Anwendung des Schreiberschen Satzes – für unseren Fall: sämtliche Beobachtungen auf einen Polygonzug zu vereinigen – könnten weder grobe noch systematische Fehler aufgedeckt werden. Die Sicherheit und Zuverlässigkeit der ganzen Arbeit wäre von vornherein in Frage gestellt, muss doch das Wort «errare humanum est» bei der Komplexität der heutigen Messapparaturen und Rechenverfahren vermehrt in Betracht gezogen werden. Darum gilt für den verantwortlichen Geodäten nach wie vor der Leitsatz: «Eine Messung ist keine Messung» und zwar auch dann, wenn ein und dieselbe, mehrmals wiederholte Visur nur als Mittel erscheint.

Für das Bauvorhaben «Gotthard-Basislinie», Bild 2, mit den Tunnelportalen Amsteg, Giornico-Bodio, sowie den Zwischenangriffen von den Vertikalschächten in Rueras, S. Maria, und Chiggiogna aus, wurde Ende 1971 ein Netz im Gelände rekognosziert und entworfen, das für die 4 geplanten Bauabschnitte und zudem bezüglich beider Portale für einen allfälligen Seitenstollen den unter a), b), c) aufgestellten Grundsätzen Rechnung trägt. Die Messanlage wurde bewusst mit Visuren derart überbestimmt, dass jede Netzrichtung und Netzdistanz indirekt über das Netz zumindest in gleichem Masse bestimmt und damit kontrolliert wird.

Dieser Netzentwurf wurde vorgängig in einer Schönwetter- und einer Schlechtwettervariante unter Ausschluss der längsten Visuren als freies Netz in aller Strenge vermittelnd durchberechnet (unbestimmte Auflösung durch Inversion) und in [7] gemäss Bild 3 und Bild 4 unter eher pessimistischen Genauigkeitsannahmen a priori bezüglich Einfluss auf die Durchschlagsgenauigkeit ausgewiesen. In der Anlage sind bei jeder Angriffsstelle mindestens drei Punkte vorgesehen worden; das Netz umfasste insgesamt 34 Stationen.

Wegen einer Bauprojekterweiterung von Giornico nach Bodio mussten 1973 3 Punkte im Süden bestimmt und ins Netz neu aufgenommen werden, wodurch die Netzanlage bei fünf Angriffsstellen eine Gesamtlänge von 55 km aufweist. Ferner wurde bei der Projektierung 1971/72 ebenfalls in beiden Varianten der Überbestimmungsgrad jeder einzelnen Netzvisur untersucht. Zwischen den Kovarianzen  $Q$  der Messungen  $l$ , der ausgeglichenen Messungen  $\bar{l} = l + v$  und der Verbesserungen (Residuen)  $v$  gilt nach [8] die Beziehung

$$Q\bar{u} + Qvv = Qu = P^{-1}$$

Nun sind in einem «Freien Netz» die singulären Kovarianzen  $Q\bar{u}$  und  $Qvv$  invariant und vorgängig berechenbar, sofern die Streuung der Messungen mit der diagonalen Varianzmatrix  $Qu$  als bekannt vorausgesetzt wird.

Durch Rechtsmultiplikation mit der Gewichtsmatrix  $P$  gewinnt man zunächst die Einheitsmatrix

$$\underline{Q\bar{u}P + QvvP = I}$$

und für die Diagonalelemente  $i, i$  die Varianzrelation

$$\underline{p_i q\bar{u} + p_i qvv = 1}$$

Fasst man eine ausgeglichene Netzvisur  $\bar{l}_i = l_i + v_i$  der Varianz  $q\bar{u}$ , entstanden aus dem direkt gemessenen Beobachtungsmittel  $l_i$  vom Gewicht  $p_i$  und aus dem indirekten Netzanteil  $l_N$  vom Gewicht  $p_N$  wegen  $[p_{vv}] = \min$  als Gewichtsmittel auf:

$$\bar{l}_i = \frac{p_i l_i + p_N l_N}{p_i + p_N}$$

mit der Varianz  $\underline{q\bar{u}} = (p_i + p_N)^{-1}$ ,

dann folgt für den Überbestimmungsgrad  $p_i qvv$ :

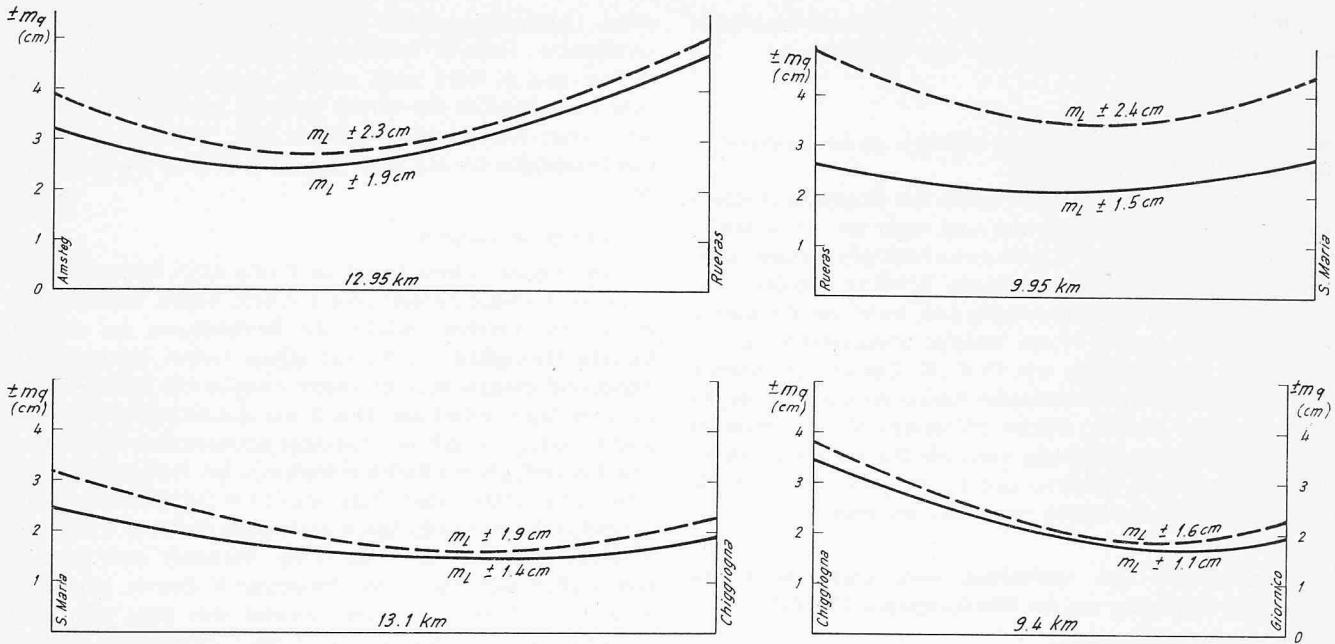
bei  $p_N = 0$ ,  $q\bar{u} = qu = p_i^{-1}$ , so dass mit  $p_i q\bar{u} + p_i qvv = 1$   
 $p_i qvv = 0$  – d.h. die Visur ist unkontrolliert,

bei  $p_N = p_i$ ,  $q\bar{u} = (2p_i)^{-1}$  so dass

$p_i qvv = 0,5$  – d.h. die Visur wird indirekt vom Netz her gleich stark bestimmt

bei  $p_N = \infty$ ,  $q\bar{u} = 0$  so dass

$p_i qvv = 1$  d.h. die Visur erübrigts sich.



$m_r$	$\pm 4^{\circ}$ (Richtungen)	—	Variante gem. Netzplan
$m_d$	$\pm 1$ bis $\pm 5\text{cm}$ (Distanzen)	— —	" ohne 2080, 2110, 2120
$m_L$	mittl. Längsfehler		und lange Visuren NS
$m_q$	" Querfehler (in Abhängigkeit vom Durchschlagsort)		

Bild 3. Einflusscharakteristik des Netzes auf den mittleren Durchschlagsfehler in Querrichtung für die Bauabschnitte bei beliebigem Durchschlagsort zwischen den Angriffsstellen

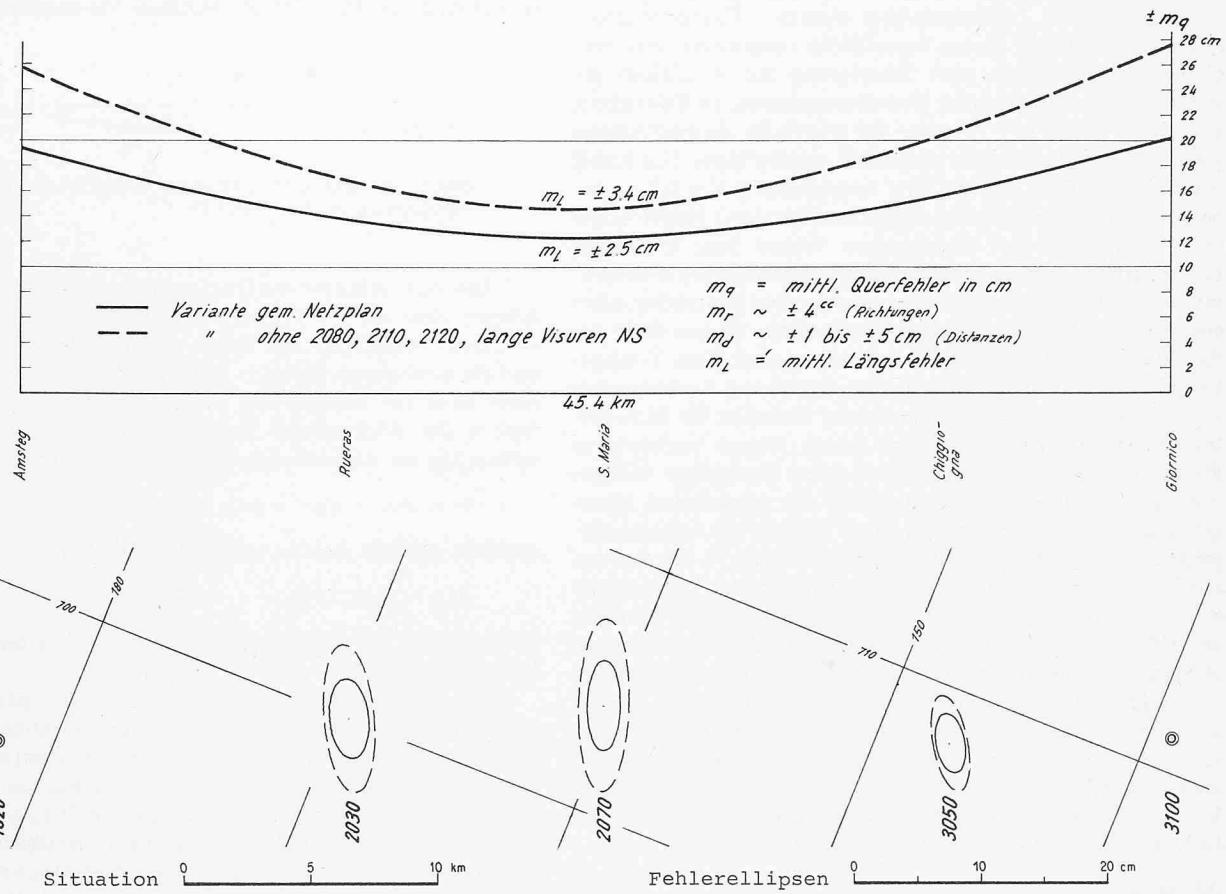


Bild 4. Einflusscharakteristik des Netzes auf den mittleren Querfehler unter beliebigem Durchschlagsort bei einer Absteckung von den Portalen aus (oben). Fehlerellipsen der Schachtanschlüsse bezüglich der Portalpunkte 1020, 3100 (unten)

Beim geodätischen Entwurf zur «Gotthard-Basislinie» wurde beachtet, dass jede Netzvisur der Ungleichung

$$p_i q_{vv} > 0,5$$

genügt, um bei der Ausgleichung allfällige grobe Ausreisser  $l_i$  über  $v_i^2 \leq 3^2 q_{vv}$  aufzudecken.

Derartige Berechnungen a priori zur Projektbeurteilung und zum Variantenvergleich mit weit mehr als  $10^7$  wesentlichen Rechenoperationen (Divisionen, Multiplikationen) können nur auf Grosscomputeranlagen bewältigt werden. Zur Abklärung des Überbestimmungsgrades stand ein Programm zur Verfügung, das in einem anderen Zusammenhang von A. Carosio auf Anregung von Prof. R. Conzett an unserem Institut entwickelt und mit obigem Ansatz erweitert wurde. Es liefert in freien Netzen, welche entsprechend überbestimmt sind, bei der Netzausgleichung wertvolle Hinweise zur Lokalisierung von groben Fehlern, und ist deshalb zur Kontrolle der abgelieferten Messdaten besonders geeignet.

### Zur Organisation und Ausführung sowie praktische Erfahrungen und Ergebnisse aus der Messkampagne 1972/73

#### Die Theodolitbeobachtungen

Für die Horizontal- und Vertikalwinkelmessungen, Punktversicherungen, die Instandstellung der Messanlage sowie Anschlüsse an die bestehende Landesvermessung für die Bestimmung von Näherungskoordinaten und Punkthöhen konnte am 1.5.72 auf dem Submissionsweg die Ingenieurgemeinschaft Swissairphoto und Vermessungen AG, Zürich/Altdorf, und das Studio Tecnico U. Meier, Minusio, beauftragt werden. Die Ingenieurgemeinschaft arbeitete mit Theodoliten der Firma Kern, Aarau, DKM3, DKM2A und für kurze Anschlussdistanzen mit dem DI10 der Firma Wild Heerbrugg. Die langen Netzvisuren verlangten entsprechende Signale; dazu haben wir eigens einen Leichtmetalltyp (System «Gerber-Wattenhofer») konstruiert, dessen Signalfäche vergrössert oder verkleinert werden kann, eine Zentrierung auf  $\pm 0,2\text{mm}$  gestattet und bei bestehender Kabelverspannung an Felsankern von einem Mann in 5 Minuten für zentrische Beobachtungen weggenommen und wieder aufgestellt werden kann. Die Kabel wurden auf 500kp Zug für eine Angriffsfläche von  $0,7\text{m}^2$  bemessen. Die Signale haben Sturm und Wind auf 3000m Höhe im Winter 72/73 gut überstanden. Wegen ihrer knallroten Leuchtfarbe wurden sie nebenbei auch als Zielscheiben vom Militär benutzt und riefen bei einigen Natur- und Heimatfreunden eine gewisse Aufregung hervor, was der beste Beweis dafür ist, dass diese Signale von weit her sichtbar sind. Den Triangulatoren wurde für die unzugänglichen Gipfel und Kretenpunkte ein Kredit von 35 Flugstunden bei der Heliwiss für Materialtransporte eröffnet. Beobachtet wurde immer zentrisch in Richtungssätzen, nach Möglichkeit unter viermaliger Wiederholung. Der schlechten Witterung und der ungünstigen atmosphärischen Bedingungen zum Trotz konnte die Ingenieurgemeinschaft ihre Arbeiten termingerecht Ende 72 bei uns zur ersten Hauptberechnung abliefern. Die erzielte Genauigkeit einer viermal wiederholten Satzrichtung bewegt sich bei mehr als 200 überschüssigen Richtungsmitteln nach der Netzausgleichung zwischen  $3^{\circ}\text{c}$  und  $4^{\circ}\text{c}$  und entspricht unseren Erwartungen und Erfahrungen im alpinen Gebiet [4]. Dabei muss die Leistung der Ingenieure im südlichen Netzteil besonders hervorgehoben werden. Der grossen Messerfahrung dieser Spezialisten verdanken wir es, dass die weiten Nord-Süd-Visuren ins Gegenlicht und in den dunsttreichen Schatten der Leventina mit beachtenswerter Präzision vorliegen.

#### Nivellemente

Die beiden Portale und die drei Zwischenangriffsschächte wurden in ihrer Höhe durch die Nivellemente der Eidgenössi-

schen Landestopographie festgelegt. Das letzte Präzisionsnivelllement Disentis-Lukmanier wurde von E. Gubler berechnet und es wäre wohl müssig, an dieser Stelle von der hohen Genauigkeit der bereits legendär gewordenen und international anerkannten Arbeiten der traditionsbewussten Landestopographie auf diesem Gebiet weitere Worte zu verlieren.

#### Laserdistanzmessungen

Im August 72 konnte uns die Firma AGA Optronik einen ihrer ersten Distanzmesser vom Typ 6BL liefern. Dieser Lasergeodimeter, welcher mühelos die Beobachtung der steilsten Visuren ermöglicht, ist für das alpine Gebiet besonders geeignet und drängte sich für unsere Zwecke mit Distanzen von 20m bis 18km sofort auf. Damit war das technische Problem gelöst. Dagegen ergab sich mit einer permanenten Messstation und drei verfügbaren Reflektorstationen bei Punkten zwischen 300m und 3200m über Meer, wovon 9 Gipfpunkte innert nützlicher Frist unzugänglich sind, zusätzlich ein Transportproblem. Vom Vorsteher des Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements, alt Bundesrat R. Bonvin, persönlich befürwortet, konnten unserem Institut aber dazu vom Eidg. Luftamt im September/Okttober 1 bis 2 Helikopter zur Verfügung gestellt werden. Die Piloten und Fluginspektoren Monod und Donau geleiteten unsere Messequipen innert kürzester Zeit sicher durch die Lüfte von Punkt zu Punkt. Auf diese Weise gelang es uns innerhalb von 18 reinen Messtagen in diesem schwierigen Gelände mehr als 200 Laserdistanzmessungen durchzuführen. Gemessen wurde immer zentrisch und jede Messung mindestens einmal wiederholt, so dass zur Berechnung Ende Oktober rund 100 Distanzmittel vorlagen. Die längste gemessene Distanz im Netz betrug 17,1 km; es wurden dazu am Tag 36 AGA-Reflektoren benutzt. Ferner fanden auf den Gegenstationen auch Kern-Reflektoren sowie die Kippvorrichtung von Prof. Dr. H. Matthias Verwendung.

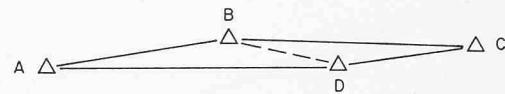


Bild 5. Beispiel eines gestreckten Doppelzuges mit den Netzpunkten A, B, C und D

Das Netz erlaubte die Distanzen in *gestreckten* Zügen anzulegen. Sind die Koordinaten der Punkte A, B, C, D im gestreckten Doppelzug des Bildes 5 näherungsweise bekannt und die gemessenen Seiten in die Projektion reduziert worden, dann kann zur Aufdeckung von groben Mess- und Rechenfehlern der Widerspruch ähnlich einem gestreckten Durchschlagszug zur Abschätzung sofort z.B. aus Differenzen

$$w \sim d_{AB} + d_{BC} - d_{CD} - d_{DA}$$

genähert gebildet werden, wenn in der Differenz

$$d_{AB} = D_{AB} - S_{AB}$$

$D$  die Strecke aus Näherungskoordinaten und  $S$  die reduzierte Messung bedeutet.

Der grösste Widerspruch aus 50 derart gebildeten gestreckten Doppelzügen beträgt 10cm bei 4 Seiten und einer gesamten Zuglänge von 45km. Aus der geometrischen Ausgleichung der ganzen Triangulateration finden wir die grösste Verbesserung mit 4cm an einer reduzierten Distanz von 13km Länge vor. Die Genauigkeitsangaben der Herstellerfirma zum Geodimeter 6BL finden sich damit bestätigt. Das Vertrauensintervall:  $v^2 < 3^2 q_{vv}$ , worin  $q_{vv}$  die entsprechende Varianz einer Verbesserung  $v_i$  bedeutet, wurde bei der ebenen Ausgleichung der freien Triangulateration von keiner Messung überschritten.

## Schlussbemerkungen und Ausblick

Die oberirdischen Arbeiten zur Grundlagenvermessung Gotthard-Basis sind heute abgeschlossen. Ganz besonderen Dank gebührt deshalb Prof. Dr. F. Kobold für die uneingeschränkte Zeit, die er mir freizügig zur Schaffung der theoretischen Grundlagen und zur Erarbeitung des Vermessungskonzeptes einräumte, und für seine wohlwollende Unterstützung bei der Projektausführung. Weit problematischer und schwieriger wird sich die innere Absteckung des längsten Alpentunnels gestalten. Aber auch hier wird man bei den in [2] vorgesehenen Kreisel- und Winkelzügen den Laser und die Elektronik nicht mehr missen wollen.

Wir hoffen, dass dem geäussernten Wunsche zur Gotthard-Basislinie [9] «Der Worte sind genug gewechselt, lässt uns endlich Taten sehen» mit der oberirdischen Absteckung teilweise wenigstens schon entsprochen wurde.

## Riassunto

Mediante uno studio teorico sull'esempio della rete misurata per la galleria ferroviaria alla base del Gottardo, si dimostra che la misura elettrototica di distanze mediante laser permette l'ottimalizzazione della geometria di rete in relazione alla precisione transversale al congiungimento con la contemporanea riduzione del lavoro geodetico. Si accenna inoltre, a un metodo per la valutazione preliminare del progetto di rete e ad alcuni punti di riferimento per l'organizzazione delle misure in superficie.

## Résumé

Par l'étude théorique il est démontré que l'application des mesures de distances au rayon laser pour le tunnel de base du St-Gothard permettent une conception de réseau géodésique qui augmente la précision de jonction tout en diminuant le nombre des stations. D'autre part les principes du calcul antérieur et postérieur aux mesures permettant le jugement et la critique du réseau libre ainsi que l'organisation des travaux sont esquissés par quelques résultats.

## Der Bau von Grössttransformatoren

Von Dr. Reinhart Baehr und Anton Edlinger, Baden

DK 621.314.21

Unter Grössttransformatoren seien Transformatoren mit Einheitsleistungen von über 500 MVA verstanden. In diesem Leistungsbereich treten die spezifisch leistungsbedingten Probleme der Bemessung, also vor allem jene, die sich aus den starken Streufeldern, den grossen Ableitungsströmen, der Abfuhr der riesigen Verlustwärmemengen aus den Wicklungen und der Kurzschlussfestigkeit ergeben, stark in den Vordergrund. Das Auffinden geeigneter technischer Lösungen wird dabei durch die enggezogenen Grenzen der Transportmöglichkeiten und den Umstand erschwert, dass Transformatoren grosser Leistung in der Regel auch mit hohen Spannungen betrieben werden.

Obwohl der Aktivteil der Grössttransformatoren grundsätzlich aus den bekannten Elementen Eisenkern, Wicklungen und Isolierungen besteht, ergibt sich für die grössten heute ausführbaren Einheiten schon vom Gewicht her eine deutliche Abgrenzung zum übrigen Transformatorenbau. So wiegt beispielsweise der Eisenkern des in Bild 1 gezeigten 1300-MVA-Transformators nicht weniger als 240 t. Für den Eisenkern kommen bei Grössttransformatoren im Falle von Dreiphaseneinheiten Fünfschenkelkerne, bei einphasiger Bauweise Zwei- bis Sechsschenkelkerne in Betracht. Technisch anspruchsvoller sind die Probleme bei den stromführenden und spannungser-

## Summary

With a theoretical study on accuracy it is shown by the example of the geodetic network for the future «Gotthard-Basetunnel» that the Laser distance measuring-system allows an approach to optimal geometry of the outside network conception concerning the inside misclosing error and reduces the geodetic amount. Moreover the main points of the calculation for the improvement at the projecting stage and for the Data-control after the measurements are traced with references to the organization by some results.

## Hinweise und Literaturangaben

- [1] W. Rutschmann: Das Projekt 1971 der Gotthard-Basislinie. «SBZ» 90 (1972) H. 18, S. 415–426.
- [2] P. Gerber: Vermessungstechnische Beurteilung zum Projekt Basistunnel Gotthard. Bericht an die Bauabteilung der Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, 29. Juni 1971.
- [3] A. Elmiger: Stollenabsteckung mit Geodimeter-Polygonzügen und Vergleich mit der Methode der Triangulation. «Schweiz. Zeitschrift für Vermessung und Kulturtechnik», 1965, S. 314 und 336.
- [4] P. Gerber: Die Netzberechnung Strassentunnel Gotthard. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, Dezember 1968, S. 14, 17 und Beilage 3.
- [5] E. Gotthardt: Einführung in die Ausgleichsrechnung. Wichmann-Verlag Karlsruhe. 1968, S. 193, 194.
- [6] A. Tarczy-Hornoch: Zur Fehlertheorie der offenen Polygonzüge. Mitteilungen der berg- und hüttenmännischen Abteilung Sopron, Bd. 6, 1934, S. 291.
- [7] P. Gerber: Grundlagenvermessung Gotthard-Basislinie, Projektbeschreibung mit vorprojektiert Messanlage für Submission vom 1. März 1972. Bauabteilung der Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, Bern.
- [8] K. Linkwitz: Über die Systematik verschiedener Formen der AR. «Zeitschrift für Vermessungswesen» Nr. 5, 1960, S. 163.
- [9] M. Portmann: Die Gotthard-Basislinie. «Der Bund», Bern, 30. Nov. 1971, Nr. 280.

W. Schneibel, Operateur bei den Distanzmessungen danken wir für die zeichnerische Gestaltung der Bildvorlagen.

Adresse des Verfassers: Peter Gerber, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Leonhardstrasse 33, 8006 Zürich.

zeugenden Teilen, den Wicklungen. Je nach den Verhältnissen sind mehrfach- oder doppelkonzentrische, besonders bei Einphasentransformatoren und hohen Spannungen aber auch einfachkonzentrische Anordnungen vorzusehen. Die grosse Leistung wirkt sich besonders bei den Wicklungen erschwerend aus. Hier sei nur darauf hingewiesen, dass zwei Wicklungstypen angewendet werden müssen. Es sind dies Wicklungen für sehr grosse Stromstärken auf der Unterspannungsseite bei Maschinentransformatoren und solche für höchste Spannungen und grosse Ströme als Oberspannungswicklungen. Dagegen können bei der Ausbildung der Hauptisolation die vorhandenen, auf dem Isoliersystem «Papier-Transformerboard-Isolieröl» beruhenden Lösungen übernommen werden. Diese bewährte Isoliertechnik wird in der Form, die sie durch die Weiterentwicklung gewonnen hat, auch im Bereich der ultrahohen Spannungen (geplante Betriebsspannungen oberhalb 1000 kV) Anwendung finden [1].

Bei Grössttransformatoren ist vor allem auf die Tatsache hinzuweisen, dass die befriedigende Lösung der Auslegeprobleme einen wesentlichen Fortschritt in der Technik voraussetzt. Dementsprechend hat die Firma Brown, Boveri im Hinblick auf den seit Jahren bestehenden Trend zu grössten Spannungen und Leistungen umfangreiche Entwicklungsarbei-