

Tunnelvermessungen in der Schweiz im 19. und 20. Jahrhundert

Surveying of Tunnels in Switzerland in the 19th and 20th Century

Bertold Witte

Anhand von drei nicht nur für die Schweiz bedeutenden Tunnelbauwerken, des 15 km langen 1872–1882 gebauten Gotthard-Bahntunnels, des 20 km langen von 1898–1905 errichteten Simplontunnels und des 17 km langen gekrümmt trassierten Gotthard-Straßentunnels, soll die Entwicklung der Messmethoden und der Auswerteverfahren bei Tunnelvermessungen exemplarisch gezeigt werden.

Schlüsselwörter: Besondere Tunnelvermessungen in der Schweiz zwischen 1870 und 1975, historische Tunnelvermessungen, Gotthard-Bahntunnel, Simplontunnel, Gotthard-Straßentunnel, erste Anwendung der Ausgleichsrechnung bei Tunnelvermessungen, Lotabweichungsberücksichtigung bei Tunnelvermessungen

Using the example of three tunnels not only important for Switzerland (the 15 km long Gotthard railway-tunnel, erected between 1872 and 1882, the 20 km long Simplon-tunnel, erected between 1898 and 1905 and the 17 km long curved Gotthard street-tunnel) the development of the surveying and computational methods at that time is demonstrated.

Keywords: Tunnel survey and its analysis in Switzerland between 1870 and 1975, historic tunnel surveys, Gotthard railway tunnel, Simplon-tunnel, Gotthard street-tunnel, first application of the least squares method for a tunnel survey, calculations of deviations of the vertical for tunnel surveys

1 EINLEITUNG

Im Juni 2016 fuhren die ersten Züge durch den Gotthard-Basis-tunnel. Dies sei Anlass, die bedeutenden vermessungstechnischen Leistungen für den Bau früherer Schweizer Tunnel zu würdigen. Aus der Vielzahl der existierenden Schweizer Eisenbahn- und Straßentunnel sollen exemplarisch die Vermessung des 1872 bis 1882 erbauten Gotthard-Bahntunnels, des um die Jahrhundertwende errichteten ungefähr 20 km langen Simplontunnels und des in der zweiten Hälfte der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts fertig gestellten Gotthard-Straßentunnels behandelt werden, weil die bei jedem dieser Tunnel infolge des wissenschaftlich-technischen Fortschritts eingesetzten Mess- und Auswerteverfahren verbessert wurden.

Vor zwei Jahren waren bereits in dieser Zeitschrift die Vermessungsarbeiten für den Bau des Gotthard-Bahntunnels im Rahmen einer historischen Darstellung über Tunnelvermessungen von der Antike bis heute behandelt worden /Witte 2014/. Die Leistungen der verantwortlichen Vermessungsingenieure sollen hier nochmals gewürdigt werden, weil nicht nur die Triangulationsmethode und

die Ausgleichsrechnung für die Bestimmung der Tunnelachsen erstmalig eingesetzt wurden, sondern auch, weil zuvor nie ein Tunnelbauwerk von 15 km Länge aufgeföhren worden war. So dienten die Vermessung und die eingesetzten Bauverfahren später als Vorbild für viele Alpentunnel wie z. B. für den Bau des 10,2 km langen Arlbergtunnels in Österreich /Scheidtenberger 1884/. Auch für die Vermessungsarbeiten beim Bau des Simplon-Eisenbahntunnels, der das Rhönetal in der Schweiz mit dem Diveriatal in Italien verbindet, diente der Gotthard-Bahntunnel als Orientierungsgröße.

2 DER GOTTHARD-BAHNTUNNEL

1869 hatte man sich nach langen Diskussionen über verschiedene Varianten darauf geeinigt, als Trasse für die geplante Eisenbahnlinie Basel–Luzern–Mailand diejenige auszuführen, für die durch das Gotthardmassiv ein Tunnel zu bauen war. Neben dem langen Tunnel waren auch bei den Zufahrtlinien zahlreiche Probleme zu lösen, weil

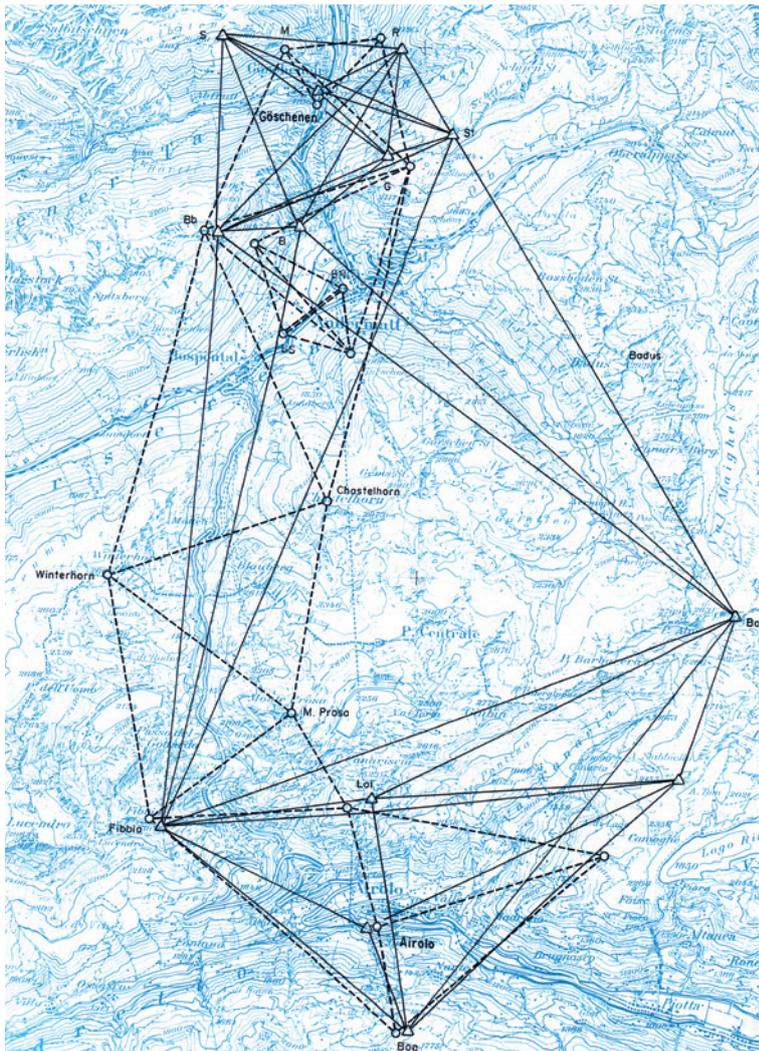


Abb. 1 | Triangulationsnetz von Gelpke (gestrichelte Linien) und von Koppe (ausgezogene Linien) für den Bau des Gotthard-Bahntunnels (entnommen aus /Kobold 1983/)

in den Tälern nördlich und südlich des Passes große Höhenunterschiede durch eine dem Gelände angepasste Trassierung überwunden werden mussten, was mithilfe der berühmten Schleifen und Kehrtunnel erreicht wurde. Das bedeutendste Bauwerk der gesamten Bahnlinie ist aber der zweigleisige Tunnel zwischen Göschenen und Airolo mit einer Scheitelhöhe von 1150 m, für dessen Erstellung die zuvor beim mehr als 12 km langen Mont-Cenis-Tunnel entwickelten Baumethoden zu verbessern und neue zu entwickeln waren.

Als außerordentlich schwierig wurde die Absteckung des langen Tunnels betrachtet¹, weil es nicht wie beim Mont-Cenis-Tunnel und bei den zuvor gebauten Tunneln möglich war, die Methode des oberirdischen Aufsuchens einer „Verbindungsgeraden“ zwischen den Achspunkten der Tunnelportale anzuwenden /Kobold 1983/. Für die Absteckung musste daher ein lokales Triangulationsnetz erkundet und beobachtet werden, welches die beiden Achspunk-

te enthielt. Die veraltete und relativ ungenaue Landstriangulation konnte nicht verwendet werden. Allerdings existierten genaue Höhen, weil der Anschluss an das zeitlich vorhergelegte „Nivellement de précision“ in Airolo und Göschenen möglich war. Die Vermessung wurde Otto Gelpke übertragen, einem Ingenieur beim Eidgenössischen Stabsbüro, der im Sommer 1869 das in der Abb. 1 gestrichelt dargestellte und aus nahezu gleichseitigen Dreiecken bestehende Netz beobachtete /Kobold 1982a/. In jedem dieser Dreiecke wurden alle drei Winkel gemessen, die Gelpke in der Regel durch 24-maliges Repetieren bestimmte. Um die Koordinaten der Punkte berechnen zu können, benötigte Gelpke einen Maßstab, den er sich aus einer Basismessung in der Ebene von Andermatt herleitete, obwohl wegen der Geradlinigkeit des Tunnels dem Netzmaßstab für die Absteckung keine besondere Bedeutung zukommt. Da die Längenmessung mit Stahlbändern ausgeführt wurde, bestimmte er 1873 ein zweites Mal die Basislänge, diesmal mit geeichten Holzplatten. Diese zweite Messung diente dazu, die Länge des Tunnels aus dem oberirdischen Netz berechnen zu können. Gelpke war die Methode der kleinsten Quadrate nicht bekannt, weshalb er nur die Dreieckswidersprüche verteilte und dabei den sphärischen Exzess nicht berücksichtigte. Als Ergebnis seiner Berechnungen erhielt er neben den Koordinaten seiner Netzpunkte die Koordinaten der zwei Achspunkte sowohl in Göschenen als auch in Airolo, aus denen er die Azimute für die Tunnelabsteckung ableiten konnte. Koppe hat dieses Netz später streng nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen und eine Standardabweichung von 0,75 mgon für eine einzelne Richtung berechnet. Aus der trigonometrischen Höhenübertragung von Göschenen nach Airolo ergab sich zum geometrischen Nivellement ein Widerspruch von 97 mm.

Um eine möglichst hohe Sicherheit für ein einwandfreies Zusammentreffen der beiden Tunnelvortriebe zu erhalten, entschloss sich die Bauleitung, ein völlig unabhängiges Netz beobachten zu lassen. Für diese Aufgabe wurde 1872 Dr. Carl Koppe eingestellt, der über Erfahrungen bei der Eisenbahnvermessung verfügte. Noch im gleichen Jahr gelang ihm der Entwurf des in Abb. 1 mit durchgezogenen Linien dargestellten, aber anders konzipierten Netzes. Koppe wollte mit möglichst wenigen Zwischenpunkten von einem Ende zum anderen gelangen und dabei möglichst große Dreiecke bilden. Er hatte in seinem Netz im Gegensatz zu Gelpke möglichst alle beobachtbaren Richtungen gemessen, um ein Höchstmaß an überschüssigen Beobachtungen in die Ausgleichung² einführen zu

¹ Über eine ebenfalls schwierige Aufgabe, die bei den komplexen markscheiderischen Vermessungsarbeiten des 10,3 km langen Ernst-August Stollens in den Jahren 1850–1864 zu lösen war, berichtet Koppe im Anhang seines Beitrags zur Absteckung des Gotthard-Bahntunnels /Koppe 1875/.

² Koppe beherrschte zunächst die Ausgleichsrechnung auch nicht, ließ sich aber für eine gewisse Zeit beurlauben, um sich bei Helmert in Aachen mit der Methode der kleinsten Quadrate vertraut zu machen. Diese Kenntnisse konnte er später bei der Ausgleichung des schweizerischen Netzes 1. Ordnung verwenden /Kobold 1971/.

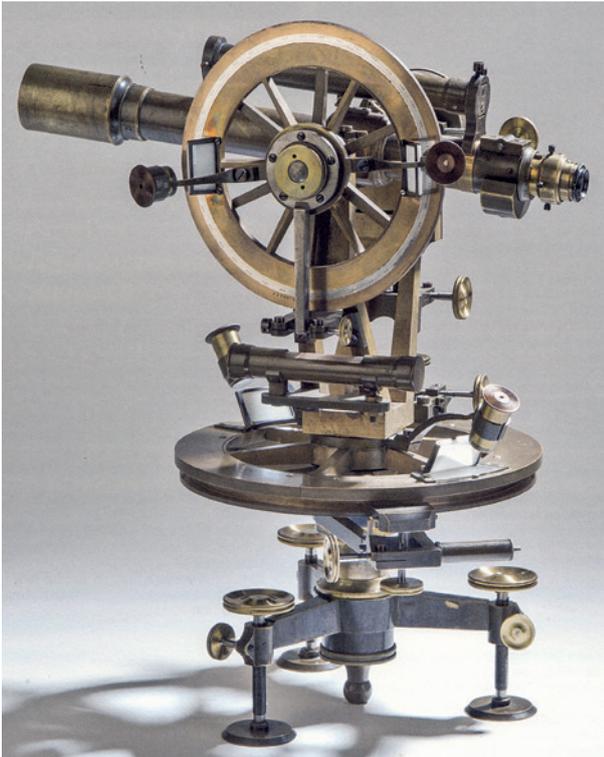


Abb. 2 | Nonientheodolit (Repetitionstheodolit) hoher Genauigkeit von J. Kern, Aarau (entnommen aus /Haas 2012/)

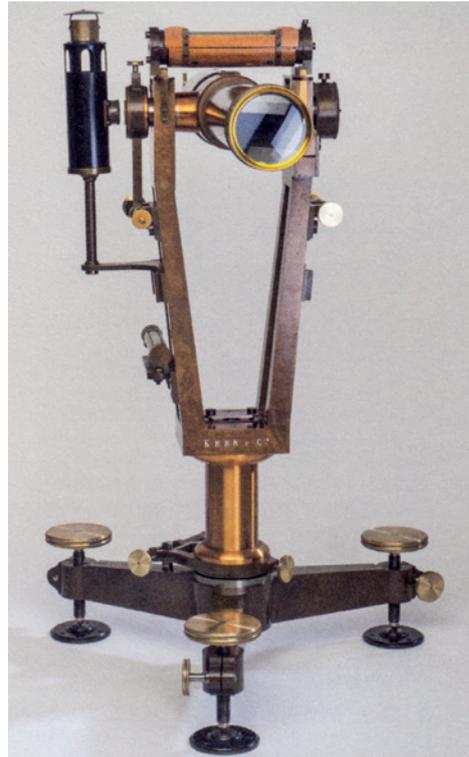


Abb. 3 | Absteckungsinstrument von J. Kern für den Simplon-Tunnel mit 37-facher Fernrohrvergrößerung, einer Fernrohrlänge von 67 cm und einem Gewicht von 25 kg (entnommen aus /Haas 2012/)

können. Im Gegensatz zu Gelpke kam bei ihm nicht das Repetitionsverfahren zur Anwendung, sondern die Satzmessung nach Bessel, für die er einen Nonientheodolit von Kern aus Aarau (Abb. 2) einsetzte. Auch er hatte die Zenitwinkel mit beobachtet, um die Ergebnisse des geometrischen Nivellements nochmals unabhängig kontrollieren zu können. Der Aufwand für die strenge Ausgleichung, in der Koppe auch den sphärischen Exzess berücksichtigte, hat sich gelohnt, weil jetzt auch ein Genauigkeitsmaß für die Achsrichtungen gewonnen wurde: Für die Achsrichtung in Göschenen erhielt er 0,31 mgon und für die in Airolo 0,36 mgon.

Aus diesen Ergebnissen leitete er als Einfluss des oberirdischen Netzes auf den Durchschlag eine Standardabweichung von 4 cm ab. Helmert, der damalige Schriftleiter der zfv, ergänzte in einer Fußnote die Ausführungen von Koppe /Koppe 1875 S. 405/, dass er es unterlassen habe, für jeden Punkt eine Orientierungsunbekannte einzuführen, was aber wohl kaum zu größeren Differenzen zu den von ihm berechneten Werten geführt habe.

Mit Verbindungsmessungen zwischen den beiden Netzen ließen sich die Abweichungen der Absteckungsrichtungen berechnen, die 0,15 mgon für Göschenen und 0,22 mgon für Airolo betrug, eine erfolgreiche Kontrolle. Weitere Kontrollen wurden von der Bauleitung verlangt. Für die zweite Kontrolle übertrug Koppe die Achsrichtung in Airolo und in Göschenen ins Gelände und verlängerte diese von Kamm zu Kamm bis zum Zusammentreffen. Die seitliche Abweichung schätzte Koppe auf 10 bis 15 cm. Für die dritte Kontrolle führte Koppe astronomische Beobachtungen nach der Methode von Bessel aus, deren Ergebnissen er eine nicht allzu hohe



Abb. 4 | Vermessungsingenieure und Hilfspersonal mit ihren Instrumenten um 1880 (entnommen aus /Häsler 1982/)

Bedeutung zubilligte, weil er die Lotabweichungen hätte berücksichtigen müssen³. Der Unterschied zwischen der abgesteckten Stollenachse und der aus den astronomischen Beobachtungen abgeleiteten Achse betrug 0,48 mgon /Koppe 1875, S. 375/.

Für die Absteckung der Tunnelrichtungen unter Tage wurde die Methode des Alignements gewählt, wozu ein wie in *Abb. 3* konzipiertes Instrument benutzt wurde. In Abständen von 2 km wurden exakt in der Achse liegende Punkte bestimmt, die von den ausführenden Firmen für ihre Absteckungsaufgaben genutzt wurden. Die Hauptabsteckung erfolgte von den Observatorien der beiden Portale aus in der verlängerten Tunnelachse.

Beim Durchschlag des Tunnels am 28./29.2.1880 betrug die Querabweichung 33 cm, die Höhenabweichung 7 cm und die Abweichung in Achsrichtung 7,10 m. Die Frage, wie es zu einer derartig großen Differenz zwischen der direkt gemessenen Länge und der trigonometrisch bestimmten kommen konnte, ist nie vollständig geklärt worden. /Zölly 1940/ konnte auf der Basis einer Neutriangulation der Kantone Uri und Tessin in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Differenz von etwa 2 m zwischen den Messungen von Gelpke und Koppe gegenüber den neueren feststellen, die zum Teil auf die Unsicherheit der Lattenlänge der bei der Basismessung verwendeten Holzlatten zurückgeführt werden konnte. Die verbleibenden fünf Meter lassen sich wahrscheinlich mit den Ungenauigkeiten bei den schwierigen Messumständen während der Längenmessung im Tunnel erklären.

3 DER SIMPLONTUNNEL

Der Simplontunnel, der aus zwei einspurigen parallelen Tunneln im Abstand von 17 m und einer Länge von 19,8 km besteht, wurde von 1898 bis 1905 erbaut und stellte bis Ende der 1970er-Jahre den längsten Gebirgstunnel der Erde dar. Der nordöstliche der beiden Tunnel wurde zuerst gebaut, während der zweite zunächst nur als Stollen vorgerieben und erst 1912–1921 für den Eisenbahnbetrieb ausgebaut wurde. Die Tunnelmünder liegen beidseitig in einer Kurve, während das Mittelstück von 19,321 km geradlinig ist. Für die Absteckung der Tunnelachse durch ein Alignement befanden sich auf jeder Seite des ersten Tunnels Richtungsstollen, die eine gerade Linie mit dem Mittelstück bilden. Die Vermessung dieses besonderen Bauwerks

wurde Max Rosenmund übertragen, einem Ingenieur des eidgenössischen topographischen Bureaus. Auch für diesen Tunnel musste ein lokales Triangulationsnetz erkundet und beobachtet werden. Beim Entwurf dieses Netzes waren die folgenden Forderungen zu beachten /Rosenmund 1901, 1902/:

1. Beide Tunnelachspunkte (Portalpunkte) sollten jeweils an mindestens drei Punkte angeschlossen werden.
2. Das Netz, das die beiden Achspunkte verbindet, sollte mit einer möglichst geringen Zahl von Zwischenpunkten konzipiert werden.
3. Um viele Rechenproben zu ermöglichen, sollte das Netz aus zwei Dreiecksketten bestehen, die untereinander verknüpft und durch Querverbindungen kontrolliert sind.
4. Um die Distanz zwischen den beiden Achspunkten und damit die Länge des Tunnels bestimmen zu können, sollte die Seite Wasenhorn–Füllhorn (*Abb. 5*) an das Schweizer Gradmessungsnetz angeschlossen werden.

Das diesen Forderungen entsprechende Triangulationsnetz ist in *Abb. 5* dargestellt. Der höchste Stationspunkt dieses Netzes, der Monte Leone, weist eine Höhe von 3357 m auf, während der tiefste, der Achspunkt der Südseite, auf einer Höhe von 633 m liegt. Für die im Sommer 1898 ausgeführte Winkelmessung wurde ein Mikroskoptheodolit von Kern in Aarau benutzt, der jedoch infolge eines Sturzes durch einen Nonientheodolit (*Abb. 2*) desselben Herstellers ersetzt wurde. Die Beobachtungsmethode ähnelte der von Schreiber /Schreiber 1878/. So wurden auf jeder Station alle Winkelkombinationen zwischen den anzielenden Punkten

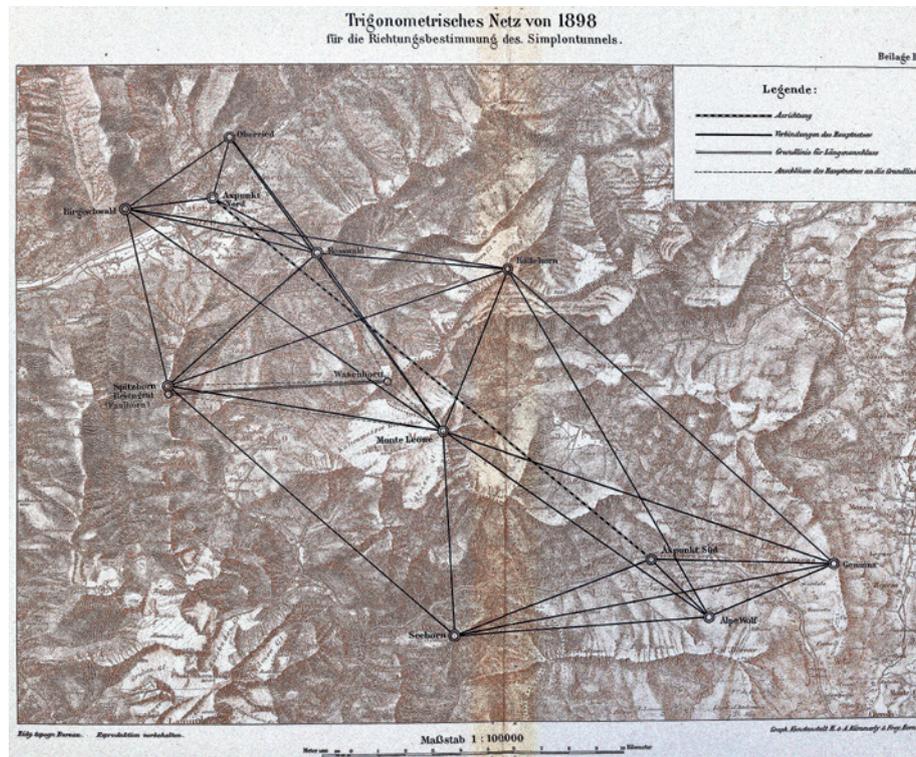


Abb. 5 | Triangulationsnetz von Rosenmund für den Bau des Simplontunnels (entnommen aus /Rosenmund 1901/)

³ Astronomische Beobachtungen zur Bestimmung von Lotabweichungen konnten auf den dafür zu besetzenden Hochgebirgspunkten nicht ausgeführt werden und für deren Berechnung aus Massen hätten genaue Karten zur Verfügung stehen müssen /Kobold 1971/.

gleich oft gemessen, sodass das Gewicht der ausgeglichenen Winkel dem eines 48-mal gemessenen Einzelwinkels entsprach. Für die Winkel erhielt Rosenmund schließlich im Durchschnitt eine Standardabweichung von 0,3 mgon. Der durchschnittliche Dreieckswiderspruch betrug 1,0 mgon, während der größte einen Wert von 2,8 mgon annahm. Die Nachmessungen in den Dreiecken mit den größten Widersprüchen bestätigten jedoch die Ergebnisse der ursprünglichen Messungen. Die größten Widersprüche traten in den Dreiecken mit den steilsten Visuren auf, weshalb als Erklärung für dieses Ergebnis nur der Einfluss von Lotabweichungen bedingt durch die umgebenden Gebirgsmassen in Frage kam.

Daraufhin wurde der Einfluss der Lotabweichungen geschätzt, indem die sichtbaren Gebirgsmassen aus Karten unter der Annahme einer mittleren Gesteinsdichte von $2,8 \text{ g/cm}^3$ berechnet und deren Anziehung mit der der Erde zusammengefasst wurde. Die Abweichung dieser Größe von der theoretischen Lotrichtung entspricht der Lotabweichung. Unter der Voraussetzung, dass beim Punkt Monte Leone keine Lotabweichungen auftreten, konnten die relativen Lotabweichungen der anderen Netzpunkte in Bezug auf diesen Punkt berechnet und die Winkel entsprechend reduziert werden. Der durchschnittliche Dreieckswiderspruch betrug jetzt 0,55 mgon und der größte 1,6 mgon.

Das Netz wurde nach vermittelnden Beobachtungen (Gauß-Markoff-Modell) ausgeglichen – einmal, indem die Lotabweichungen berücksichtigt wurden, und ein zweites Mal ohne Anbringen von Korrekturen der ermittelten Lotabweichungen. Insgesamt ergaben sich 56 Verbesserungsgleichungen mit 18 Unbekannten. Als Differenz aus den beiden Ausgleichungen ergab sich für die Achsrichtung berechnet als seitliche Abweichung bezogen auf die Mitte des Tunnels ein Wert von 26 cm. Mit den Ausgleichungsergebnissen unter Berücksichtigung der Lotabweichungen wurde weitergearbeitet. Die Standardabweichung für eine Richtung des Dreiecksnetzes betrug 0,3 mgon und für die Tunnellänge 0,83 m, wobei die Unsicherheit in der Länge der aus dem schweizerischen Netz übernommenen Dreiecksseite berücksichtigt wurde.

Die Zuverlässigkeit der Bestimmung der Lotabweichungen konnte durch astronomische Messungen überprüft werden, die von der schweizerischen geodätischen Kommission in den Observatorien bei den Tunnelportalen ausgeführt wurden. Die Differenzen von 0,6 mgon bis 1 mgon zu den aus Massen gewonnenen Lotabweichungen waren relativ gering und tolerierbar. Nach der endgültigen Berechnung der Tunnelrichtung wurde diese auf beiden Portalseiten durch feste Zielmarken gesichert, die in einer Vertikalebene lagen und sich auf der Nordseite in Entfernungen von 561 m und 748 m vom Observatorium befanden, während auf der Südseite topographisch bedingt die Distanzen vom Observatorium zu den Marken nur 53 m und 92 m betragen. Das für die Richtungsübertragung in das Tunnelinnere benutzte Kern-Instrument (*Abb. 3*) verfügte über einen mit besonderer Sorgfalt gefertigten Okularauszug, damit der durch Umfokussieren entstehende Kollimationsfehler möglichst gering wurde.

Nach Festlegung der Zielmarken war die Verlängerung der Achsrichtung in den Tunnel hinein einfach. Mit dem im Observatorium aufgestellten Kern-Instrument (*Abb. 3*), dessen durchschlagbares Fernrohr sich zum Drehen aus den Lagern nehmen ließ, wurde die Zielmarke anvisiert. Über den im Innern des Tunnels jeweils

festzulegenden Punkt wurde ein spezielles Stativ mit einem an einer Teilung verschiebbaren Schlitten aufgebaut. Dieser war mit einer senkrechten Platte mit Visierspalte verbunden, die durch eine Acetylenlampe von hinten beleuchtet wurde (*Abb. 6*). Die Bestimmung eines derartigen Kontrollpunkts erfolgte durch acht Visuren abwechselnd in beiden Fernrohrlagen und anschließende Mittelung der Ablesungen am Schlitten. Es zeigte sich, dass zu lange Visuren vom Observatorium in den Tunnel wegen der unterschiedlichen Refraktionsverhältnisse außer- und innerhalb des Tunnels nicht günstig waren. Die bei diesen Beobachtungen festgestellten starken Zitterbewegungen des Zielzeichens waren Anlass für die ersten eingehenden Untersuchungen über Refraktionserscheinungen bei Tunneln /Gast 1904/. Auf dem jeweils zuletzt abgesteckten Richtungspunkt wurde dann das Absteckungsinstrument, das dem Observatorium-Instrument entsprach, aufgebaut und in gleicher Weise der nächste Kontrollpunkt abgesteckt.

Am 24. 2. 1905 wurde der Tunnel durchgeschlagen und am 15. 8. erfolgte die Schlusskontrollmessung, die eine seitliche Abweichung in der Achsrichtung von 20,2 cm, in der Höhe eine Abweichung von 0,87 cm und in der Tunnellänge von 79 cm auswies. Dieses gute Ergebnis fand allgemeine Bewunderung und Anerkennung, die u. a. in der unabhängigen Verleihung der Ehrendoktorwürden durch die Universitäten Basel, Lausanne und Genf an den leitenden Ingenieur Max Rosenmund zum Ausdruck kam /Kobold 1982b/, der 1904 als Professor für die vermessungstechnischen Fächer an die ETH Zürich gewählt worden war.

4 DER GOTTHARD-STRASSENTUNNEL

Bei dem ungefähr 17 km langen Straßentunnel durch das Gotthard-Massiv befinden sich die Tunnelleingänge in der Nähe der Portale des alten Bahntunnels. Die Absteckungsvermessung war jedoch entscheidend anders zu lösen als 100 Jahre früher, weil die Tunnelachse als gekrümmte Linie entworfen war und im Tunnel mehrere der Be- und Entlüftung dienende vertikale und schräge Schächte, die von oben nach unten abgeteuft wurden, auf wenige Zentimeter genau an den vorgesehenen Stellen mit dem Tunnel zusammentreffen sollten /Kobold 1983/ (*Abb. 7*). Somit war die zu lösende Aufgabe schwieriger als die von Gelpke und Koppe. Allerdings standen jetzt den ausführenden Vermessungsingenieuren neue Messmethoden zur Verfügung, von denen wohl die wichtigste die elektrooptische Distanzmessung ist, mit der sich die oberirdische Triangulation rationeller und genauer ausführen ließ als 100 Jahre früher. Insbesondere die unterirdische Absteckung, die wegen der Kurven nur mit genauen Distanzmessungen möglich ist, ließ sich mit den jetzt verfügbaren Instrumenten leichter realisieren. Auch die Berechnungen, vor allem die umfangreichen Ausgleichungen, konnten mithilfe der EDV und entsprechender Programme in kürzester Zeit gelöst werden, sodass jetzt in einem Netz mehr Größen gemessen werden konnten, die früher wegen des hohen Rechenaufwands nicht beobachtet wurden.

Für die anstehende Aufgabe wurde aus verschiedenen Gründen nicht das gegenüber der Zeit von Gelpke und Koppe erheblich verbesserte Netz der Landesvermessung gewählt, sondern ein neues kombiniertes Netz beobachtet, das aus einem genauen Poly-

gonzug und aus einem Triangulationsnetz mit den Punkten der Landesvermessung bestand, in das die Tunnelportale und die Schächte einbezogen wurden (Abb. 8). Die Winkel- bzw. Satz-messungen erfolgten mit dem Kern-Theodolit DKM 3 (Abb. 9) und die Distanzmessungen mit dem AGA-Geodimeter NAS M-6. Das Netz enthielt 285 Richtungs- und Distanzmessungen und wurde in zwei Stufen ausgeglichen. In der ersten Phase wurden keine Lotabweichungen eingeführt, während diese in der zweiten Phase berücksichtigt wurden. Als Ergebnis der ersten Aus-gleichung ergab sich für eine Richtung eine Standardabwei-chung von 0,36 mgon und für die Distanzen 18 mm. Allerdings betrug die Standardabweichung der Stationsausgleichungen im Durchschnitt nur 0,18 mgon, ein Betrag, der sich durch die Ausgleichung erhöht hatte. Aus Sicht eines Praktikers hätte man sich mit diesen Ergebnissen begnügen können /Kobold 1983/. Da jedoch der zu groß erscheinende Betrag der Standardab-weichung auf systematische Einflüsse hindeutete, wurden in der zweiten Ausgleichung die Lotabweichungen für alle Punkte berücksichtigt, was zu Änderungen der gemessenen Richtungen, Distanzen und Zenitdistanzen führte. Außerdem wurden für die Reduktion der Messungen auf die Ellipsoidoberfläche die Geoidundulationen berücksichtigt /Elmiger 1973/.

Die astronomische Methode zur Bestimmung der Lotabwei-chungen konnte wegen der Hochgebirgspunkte nicht ange-wandt werden, weshalb ähnlich wie beim Simplontunnel die Lotabweichungen aus Massen berechnet wurden, ein Vorgehen, das im Hochgebirge für kleinere Gebiete zu brauchbaren Ergeb-nissen führt /Kobold 1983/. Durch die zweite Ausgleichung

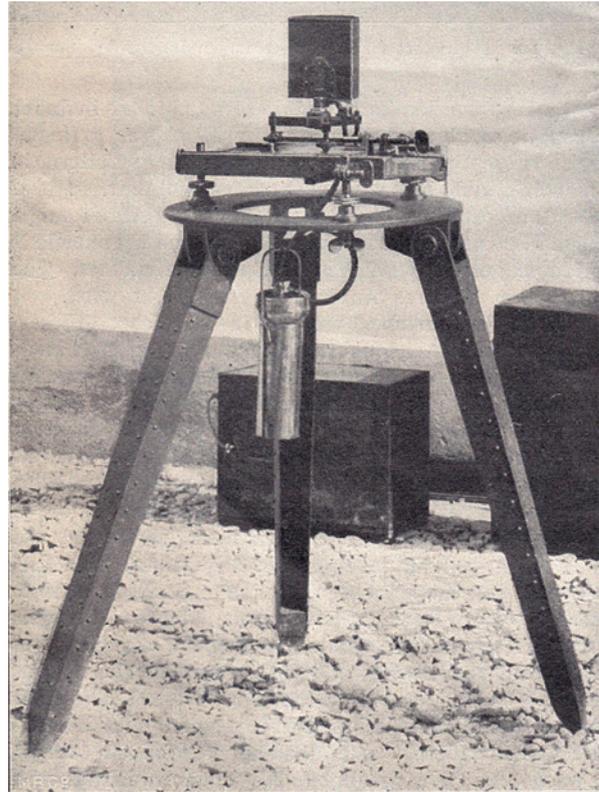


Abb. 6 | Spezielles Stativ mit Schlitten, Acetylenlampe und angehängtem Generator für die Richtungsübertragung (entnommen aus /Rosenmund 1901/)

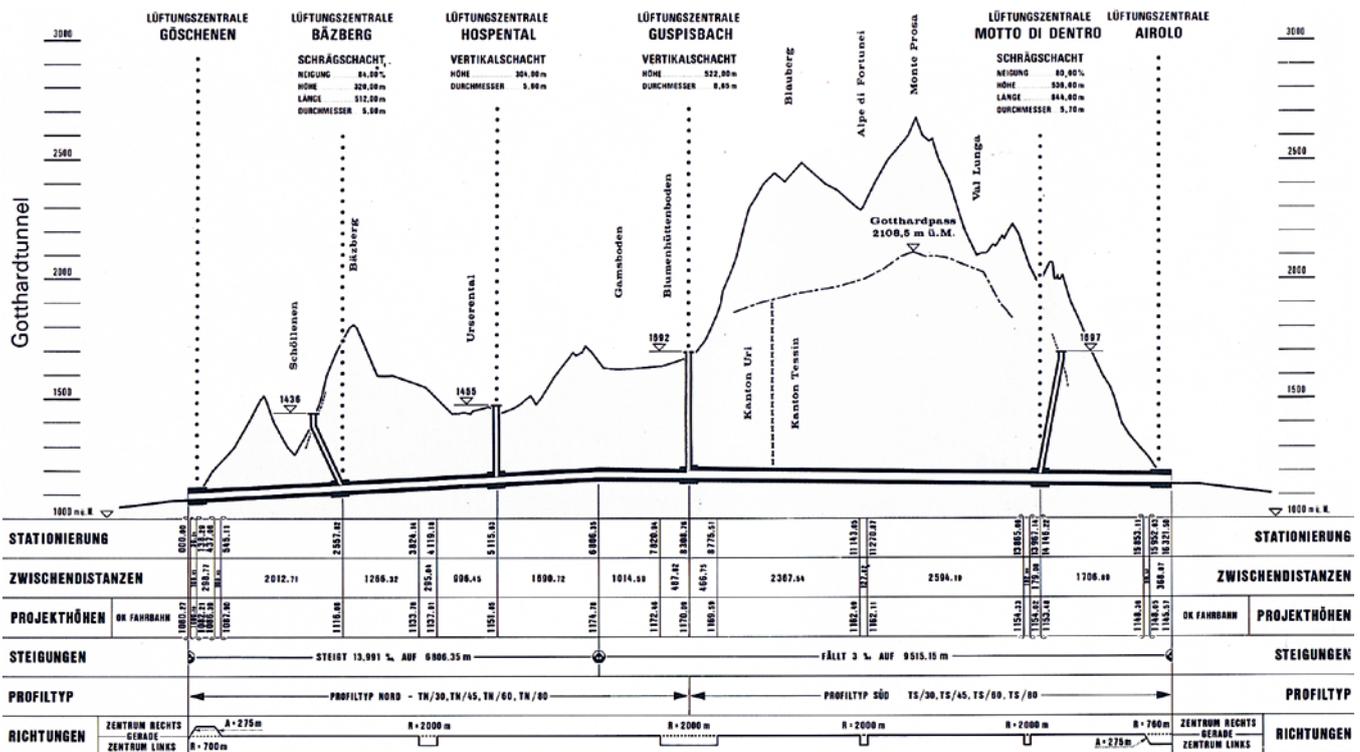


Abb. 7 | Längsprofil des Gotthard-Straßentunnels (entnommen aus dem Falblatt zum Neubau der Autobahn N2 für den Bereich des Seelisberg- und Gotthardtunnels, etwa 1970)

reduzierte sich die Standardabweichung für eine Richtung von 0,36 mgon auf 0,29 mgon und für die Distanzen von 18,6 mm auf 13,6 mm. Bei der räumlichen Ausgleichung des Netzes mit auf die Ellipsoidnormalen reduzierten Zenitdistanzen verringerte sich die Standardabweichung für eine Zenitdistanz von 0,85 mgon auf 0,29 mgon. Die Berechnung dieses Sondernetzes hat demnach zu einer Erhöhung der Genauigkeit von Koordinaten und Höhen geführt.

Bei diesem Tunnel konnte das Alinement wegen der gekrümmten Achse im Unterschied zum Gotthard-Bahntunnel nicht angewandt werden. Es ließen sich aber zwei Polygonzüge messen, weil parallel zum Straßentunnel ein Sicherheitsstollen aufgeföhren wurde, der alle 250 m mit dem Straßentunnel durch Querschläge verbunden wurde, sodass die beiden Polygonzüge miteinander verknüpft werden konnten /Huber 1976/. Unter der Annahme einer Standardabweichung von 0,4 mgon für die Brechungswinkel des Polygonzugs und von 5 mm für die Distanzen wurde aufgrund einer strengen Ausgleichung eine Standardabweichung für den Durchschlag von 206 mm prognostiziert, wobei der Einfluss der oberirdischen Triangulation nur 45 mm ausmachte.

Ob die getroffenen Annahmen unter den herrschenden Bedingungen realistisch abgeschätzt waren, konnte nicht abgesehen werden, obwohl Erfahrungen bei älteren Tunnelbauten mit Geodimeter-Polygonzügen vorlagen /Elmiger 1965/. Mit dem weiteren Baufortschritt zeigte sich, dass beim Vergleich der zu verschiedenen Zeiten gemessenen Winkel und Distanzen die Differenzen zwischen den Beobachtungen derselben Größen für gewisse Abschnitte der beiden Stollen gleiches Vorzeichen hatten. Erklären ließ sich diese Systematik nur mit dem Einfluss des mit der Temperatur sich ändernden Refraktionskoeffizienten (Seitenrefraktion) in den Kurven. Während der Zeit der Bauarbeiten musste entschieden werden, welche Messungen für die weitere Absteckung verwendet werden sollten. Man wählte diejenigen, die wahrscheinlich unter besseren Bedingungen zustande gekommen waren /Kobold 1983/. Ein Vermessungskreislauf konnte nur sehr rudimentär eingesetzt werden /Tischhäuser 1976/.

Der Durchschlag, der am 26. 3. 1976 erfolgte, wies eine Abweichung von 5 cm sowohl quer zur Tunnelachse als auch in deren Längsrichtung auf, in der Höhe betrug sie 6 cm. Die Abweichung der beiden Achsen war also bedeutend geringer als prognostiziert – ein erfreuliches Ergebnis, insbesondere für die beteiligten Vermessungsingenieure und für die Wissenschaftler der ETH Zürich.

5 SCHLUSSBEMERKUNGEN

Nicht nur in der Schweiz wurden in dem hier behandelten Zeitraum besondere Tunnelbauwerke vermessen und gebaut, sondern beispielsweise auch in Österreich. Die dortigen Vermessungsarbeiten bei zahlreichen Tunneln in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts können häufig mit den Namen der Professoren Rinner, Schelling und Stoltzka in Verbindung gebracht werden, wobei Rinner und Schelling schon relativ früh Vermessungskreislauf zur Stützung der untertätigen Polygonzüge eingesetzt haben /Rinner 1975/, /Schelling & Mischker 1976/.

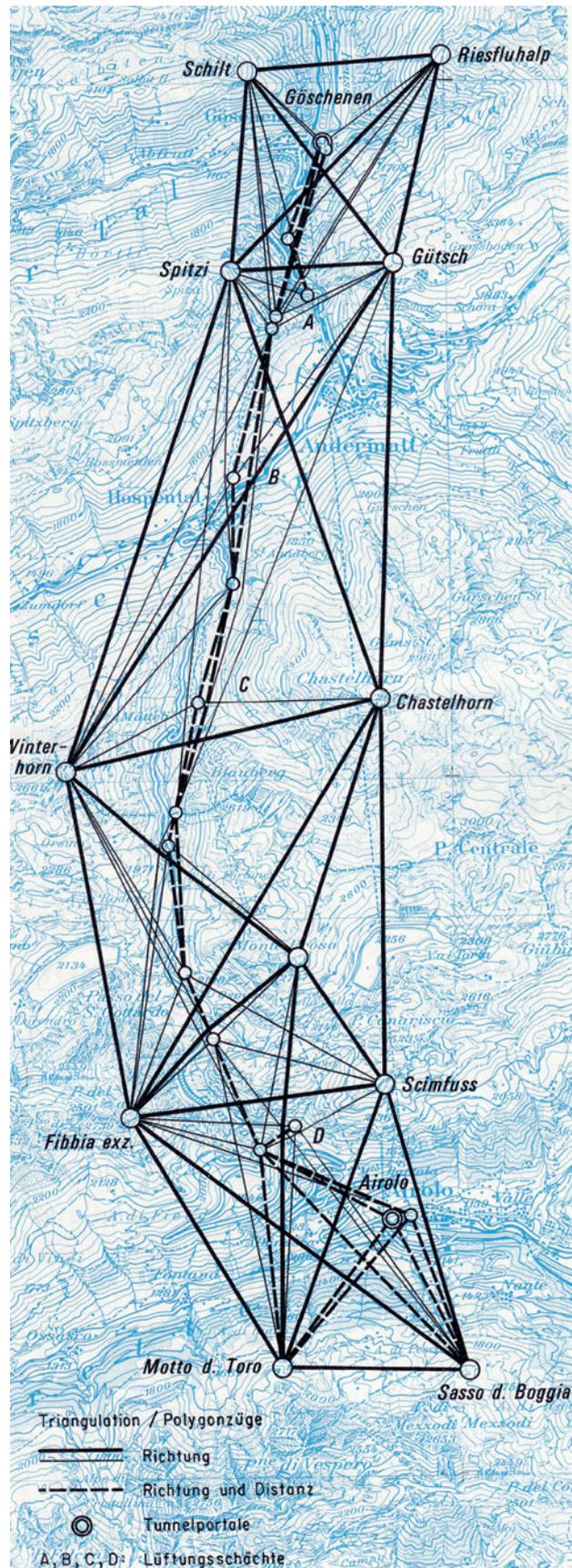


Abb. 8 | Triangulationsnetz für den Gotthard-Straßentunnel (entnommen aus /Kobold 1983/)

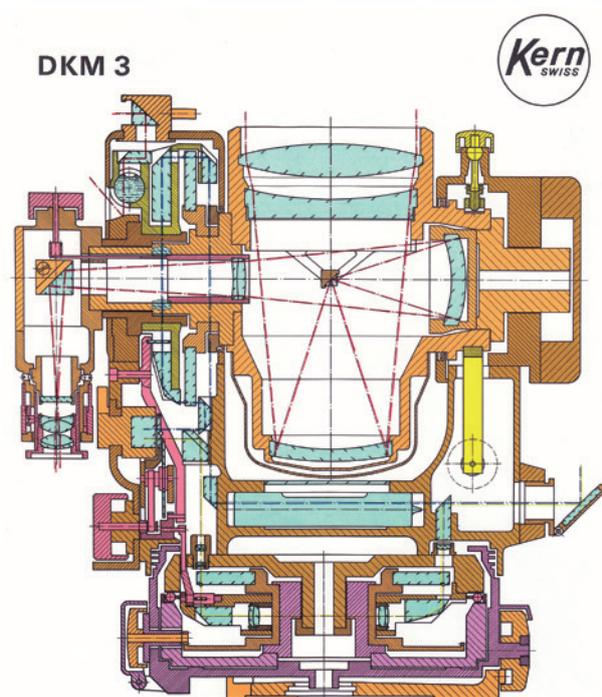


Abb. 9 | Schnittbild des Kern-Theodoliten DKM 3, entworfen und berechnet von Heinrich Wild zusammen mit Rudolf Haller (entnommen aus /Haas 2012/)

Inzwischen ist die hohe Genauigkeit bei der Vermessung von Tunnelbauwerken in der Öffentlichkeit zur kaum beachteten Selbstverständlichkeit geworden – eine Entwicklung, die der großen Verantwortung der leitenden Vermessungsingenieure nicht gerecht wird.

LITERATUR

- Elmiger, A. (1965): Stollenabsteckung mit Geodimeter-Polygonzügen und Vergleich mit der Methode der Triangulation. In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, (1965), 314–330 und 336–344.
- Elmiger, A. (1973): Einfluss von Lotabweichungen und Geoidhöhen auf die Absteckung des Gotthard-Straßentunnels. In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, (1973), 119–131.
- Gast, P. (1904): Über Luftspiegelungen im Simplon-Tunnel. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, (1904), 241–271.
- Gelpke, O. (1880): Die letzten Richtungsverifikationen und der Durchschlag am grossen St. Gotthardtunnel. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, IX(1880), 101–116 u. 149–163.
- Haas, F. (2012): *Kern-Geschichten*. Hrsg. von H. Aeschlimann. Druck: Südostschweiz Presse und Print AG.
- Häsler, A. (1982): *Gotthard – Als die Technik Weltgeschichte schrieb*. Huber, Stuttgart.
- Huber, N. (1976): Praktische Erfahrungen bei der Absteckung des Gotthard-Straßentunnels. In: VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, Bd. II., 711–718.
- Kobold, F. (1971): Altes und Neues zur Tunnelabsteckung durch den St. Gotthard. In: *Festschrift 50 Jahre Wild Heerbrugg 1921–1971*, 59–67.
- Kobold, F. (1982a): Vor hundert Jahren: Die Absteckung des Gotthard-Bahntunnels. In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, (1982), 49–54.

Kobold, F. (1982b): Entstehung und Entwicklung des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie 1855–1974. *IGP-Mitteilungen*, 32. ETH Zürich.

Kobold, F. (1983): Tunnelabsteckungen im Gotthardgebiet von Koppe bis zur Gegenwart. Beiträge zum Carl-Koppe-Gedächtniskolloquium, Braunschweig 1981. Veröffentlicht in *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe E*, 20.

Koppe, C. (1875): Bestimmung der Axe des Gotthardtunnels. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, (1875), 369–444.

Koppe, C. (1876): Bestimmung der Axe des Gotthardtunnels II. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, (1876), 353–382.

Rinner, K. (1975): Über die Absteckung des Tauern- und Gleimalmtunnels. In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* (1975), Festschrift Prof. Dr. F. Kobold zum 70. Geburtstag, Fachblatt, 193–197.

Rosenmund, M. (1901): Die Bestimmung der Richtung, der Länge und der Höhenverhältnisse. Special-Bericht der Direktion der Jura-Simplon-Bahn an das schweizerische Eisenbahndepartement über den Bau des Simplontunnels, Bern.

Rosenmund, M. (1902): Achsabsteckung am Simplontunnel. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, (1902), 74–82.

Rosenmund, M. (1906): Die Schlussergebnisse der Absteckungen des Simplontunnels. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, (1906), 578–579.

Schelling, G.; Mischker, B. (1976): Zur Vermessung langer Straßentunnel. In: VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, Bd. II, 677–687.

Scheidtenberger, C. (1884): Der Bau des Arlberg-Tunnels zur Zeit des Sohlenstollen-Durchschlags. Separat-Abdruck aus den Mitteilungen des polytechnischen Clubs.

Schreiber, O. (1878): Ueber die Anordnung von Horizontalwinkel-Beobachtungen auf der Station. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, (1878), 209–240.

Tischhäuser, H. (1976): Der Einsatz eines Kreisels-theodoliten bei der Absteckung des Gotthard-Straßentunnels. In: VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, Bd. II, 719–728.

Witte, B. (2014): Die Vermessungsmethoden bei bedeutenden Tunnelbauwerken von der Antike bis heute. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)*, 121(2014)3, 88–96.

Zölly, H. (1940): Die Länge des Gotthardtunnels und die äußeren Einrichtungen für seine Absteckung: 1869–1939. In: *Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik*, (1940), 84–92 und 105–111.

Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte

UNIVERSITÄT BONN
PROFESSUR FÜR GEODÄSIE

Im Brockenfeld 18 | 52074 Aachen

