

Die Vermessungsmethoden bei bedeutenden Tunnelbauwerken von der Antike bis heute

The Surveying Methods Concerning Important Tunnel Projects from Antiquity until Today

Bertold Witte

Gewidmet meinem geschätzten Schüler, Herrn Prof. Dr.-Ing. Willfried Schwarz, dessen vielfältiges und engagiertes Wirken in Forschung und Lehre sowie in zahlreichen wissenschaftlichen Gremien und Berufsverbänden ich über viele Jahre mit Anerkennung verfolgt habe.

Anhand von fünf Tunnelbauwerken (Eupalinos-Tunnel auf der Insel Samos, Mont-Cenis- und Gotthard-Bahntunnel, Ärmelkanaltunnel und Gotthard-Basistunnel) soll die Entwicklung der Vermessungsmethoden im Tunnelbau in Abhängigkeit vom wissenschaftlichen und technischen Fortschritt gezeigt werden. Diese Tunnel werden wegen ihrer besonders hohen Ansprüche an die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Vermessung ausgewählt und stellen die Entwicklung von der Fluchtung mit bloßem Auge bis zu den heutigen vielfältigen Messverfahren exemplarisch vor.

Schlüsselwörter: Tunnelvermessung in der Antike, Tunnelvermessung in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts, Tunnelvermessung heute

With the help of five tunnels (the tunnel of Eupalinus at Samos Island, the Mont-Cenis- and Gotthard railway-tunnels in Switzerland, the Channel Tunnel between France and Great Britain and the Gotthard Base-Tunnel) the development of surveying methods in tunnel survey is demonstrated depending on the scientific and technological progress. Due to the extraordinary challenges concerning reliability and accuracy of the surveyor's work these tunnels are chosen. The surveying methods used start with the simple setting out procedure and conclude with the various up to date methods, e.g. satellite based, gyro-theodolite based, inertial based.

Keywords: Tunnel survey in Antiquity, tunnel survey in the 2nd half of the 19th century, tunnel survey today

1 EINLEITUNG

Die in diesem Beitrag behandelten fünf Tunnelbauwerke beginnen mit dem Tunnel des Eupalinos auf der griechischen Insel Samos, für den kein ursprünglicher Bauplan existiert, weil sein Bau in das 6. Jahrhundert vor Christus fällt. Die Planungsideen, die vermessungstechnischen Arbeitsmethoden und die erreichbaren Genauigkeiten bei der Richtungsübertragung in den Berg hinein können deshalb nicht direkt erkannt, sondern müssen aus dem Bauwerk selbst erschlossen werden. Bei den bisher bekannten antiken Tunneln lässt sich nach /Grewe 1998/ deutlich nachvollziehen, dass kein antiker Tunnel

ohne eine gründliche Planung, Trassierung und gegebenenfalls ohne Vortriebskorrekturen gebaut wurde. Eine Korrektur wird sicher nur nach einer Kontrollmessung vorgenommen worden sein.

Die Dokumentation über die Vermessungsmethoden der vier weiteren Tunnel ist ganz anders, weil der Bau der hier behandelten Mont-Cenis- und Gotthard-Bahntunnel in die 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts fällt. Auch die Vermessung des Ärmelkanal- und des Gotthard-Basistunnels ist gut dokumentiert. Der Zeitsprung von mehr als 2.000 Jahren in der Auswahl dieser Beispiele ist dem

Umstand geschuldet, dass erst durch den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt seit Beginn der Neuzeit sowie den besonderen Herausforderungen durch den Eisenbahnbau einzigartige Tunnelbauwerke in Angriff genommen wurden. Die ausgewählten Eisenbahntunnel haben sowohl im 19. Jahrhundert als auch in der heutigen Zeit höchste Anforderungen an die leitenden Ingenieur-geodäten gestellt.

Da die heutigen alpenquerenden Bahnprojekte als Flachbahnen für hohe Geschwindigkeiten trassiert werden, verlängern sich die Tunnelstrecken erheblich, wie beim Gotthard-Basistunnel auf 57 km. Die Genauigkeitsforderungen sind sehr hoch und die Arbeitsbedingungen denkbar ungünstig. Dass es unter diesen Umständen zu keinen größeren Abweichungen gekommen ist, kann nicht hoch genug bewertet werden.

2 DER EUPALINOS-TUNNEL

Das erste Beispiel eines bedeutenden Tunnelbauwerks, das mit einfachsten technischen Hilfsmitteln abgesteckt wurde, entstand vor etwa 2.500 Jahren. Das Wissen über die Existenz dieses Bauwerks verdanken wir Herodot, dem Begründer der griechischen Geschichtsschreibung, der in seinen Historien das Werk des Baumeisters Eupalinos als eines der bedeutendsten seiner Zeit bezeichnet. Im Auftrag des „Tyrannen“ Polykrates hatte Eupalinos einen über 1.000 m langen Wasserleitungstunnel auf der griechischen Insel Samos im Gegenortsbetrieb aufgeföhren. Im Buch III, Kapitel 60, der Historien des Herodot steht /Horneffer 1971/: „Dieser Tunnel ist 7 Stadien lang und 8 Fuß hoch und breit. Unter diesem Tunnel ist seiner ganzen Länge nach ein zweiter, 20 Ellen tiefer und 3 Fuß breiter Tunnel gegraben. Durch diesen Letzteren wird aus einer großen Quelle das Wasser in Röhren in die Stadt (Samos) geleitet. Diese Wasserleitungsanlage wurde gebaut von Eupalinos, Naustrophos' Sohn aus Megara.“

Aufgrund dieser Beschreibung wurden die Mundlöcher dieses „Meisterwerks der archaischen Ingenieurkunst“ /Kienast 2005/ 1882 durch Fabricius wiederentdeckt /Fabricius 1884/. Diese aufwendige Wasserversorgung war wohl erforderlich geworden, um die Stadt Samos sicher mit Wasser zu versorgen. Die Leitung ist (Abb. 1) von der Quelle in einem unterirdischen Kanal geführt, der in einen Anschlussstunnel in Qanatbauweise¹ übergeht, bevor diese das eigentliche Tunnelbauwerk, den Haupttunnel von 1.036 m Länge erreicht. Auf der Stadtseite (Süden) schließt sich wieder ein Tunnel in Qanatbauweise an. Die Vermessung des Haupttunnels stellte Eupalinos vor eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe, weil gleichzeitig von beiden Seiten die Aufföhierung erfolgte. Der Querschnitt des Tunnels besteht aus zwei Teilen: einem begehbaren Stollen von etwa 1,80 m Breite und gleicher Höhe sowie einem tiefer gelegten Leitungsraben von halber Tunnelbreite, der ein Gefälle von 0,4 % aufweist. Während der Tunnel nach seiner Entdeckung schnell berühmt wurde, hat es etwa 60 Jahre gedauert, bevor die ersten Theorien über die Art der Vermessung publiziert wurden, in denen für die Richtungsübertragung der Einsatz der Dioptra² unterstellt wurde. Der Benutzung der Dioptra wurde von /Kastenbein

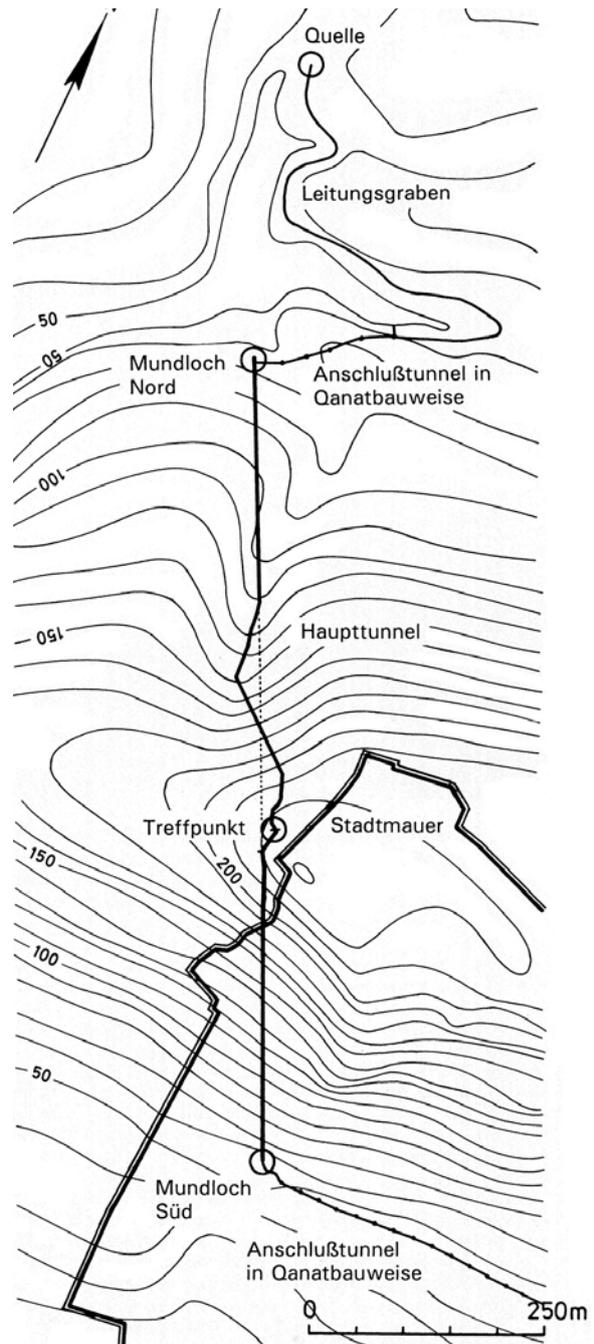


Abb. 1 | Lageplan des Eupalinos Tunnel (nach /Kienast 1977/ und /Grewé 1998, S. 59/)

1966/ und /Goodfield & Toulmin 1965/ widersprochen, die unabhängig voneinander zu dem Ergebnis kamen, dass die Tunnelachsen mithilfe von Fluchtstäben durch indirektes Fluchten über den Berg bestimmt wurden. Bei diesem Messverfahren musste die Frage beantwortet werden: Wie kann die abgesteckte Gerade ins Berginnere übertragen worden sein, wenn die Mundlöcher in einem Berghang liegen. Es mussten für die Richtungsübertragung zwei signalisierte Festpunkte auf jeder Seite zur Verfügung stehen, um die Richtung ins Berginnere hineinfluchten zu können. Für eine

¹ Nach /Grewé 1998, S. 35/ werden Schächte abgeteuft, die unterirdisch verbunden werden. „Von einem Schacht zum nächsten werden fortschreitend Stollen aufgeföhren, deren Verbindung schließlich den Qanat ergeben wird.“ Die Schwierigkeit besteht darin, dass der von einem Schacht vorgetriebene Stollen den nächsten Schacht treffen muss.

² Ein theodolitähnliches Instrument, das von Heron von Alexandria etwa 50 v. Chr. in seinem Vermessungsbuch „Dioptra“ beschrieben wurde /Schöne 1909/.

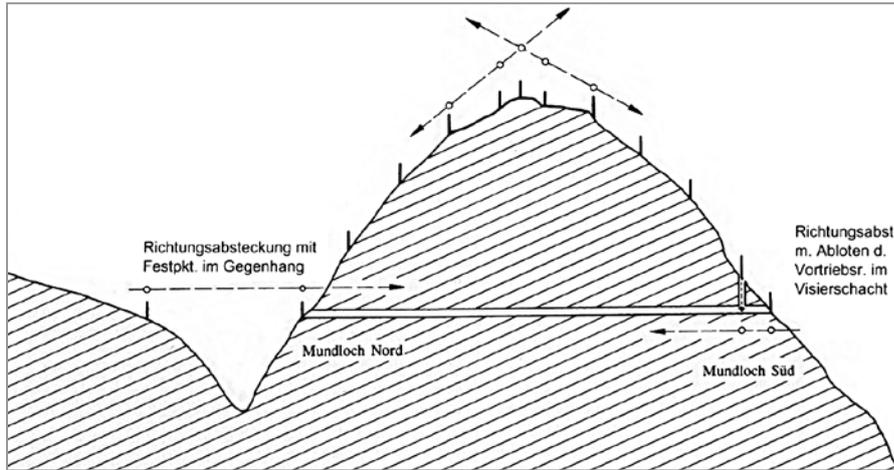


Abb. 2 | Mögliche Richtungsübertragung für den Eupalinos-Tunnel (nach /Grewe 1998, S. 61/)

Eupalinos einen finalen Bogen auf-fahren lassen (Abb. 3), der dann auch den Südstollen trifft. Tatsächlich weicht die Richtung des Nordstollens um $0,64^\circ$ von der geplanten ab. Der Beurteilung von /Grewe 1998/ möchte ich mich anschließen: „Dass es trotz dieser misslichen Ausgangslage gelang, beide Stollen zu einem Tunnel zu vereinigen, ist als eine der groß-artigsten Ingenieurleistungen der Technikgeschichte zu bezeichnen. Plan und Ausführung des Eupalinos-Tunnels lassen eine Strategie erkennen, die bezüglich ihrer geometrischen Grundlagen zeitgleich keine Parallelen hat.“

hinreichende Genauigkeit mussten die betreffenden Punkte weit genug auseinanderliegen. Geländebedingt würde sich der zweite Punkt zu tief am Abhang befinden, sodass eine Fluchtung in das Berginnere nicht möglich ist. Auf der nördlichen Seite ist ein Tal, weshalb auf dem gegenüberliegenden Hang ein Festpunkt platziert werden konnte (Abb. 2). Auf der Südseite gab es diese Möglichkeit nicht. Abhilfe war nur durch einen „Visierschacht“ zu erreichen, der bei den Ausgrabungen auch tatsächlich gefunden wurde.

Diese einzigartige Leistung wurde über viele Jahrhunderte nicht wieder erreicht. Eupalinos besaß wahrscheinlich ein exzellentes empirisches Verständnis über den Einfluss zufälliger Abweichungen auf geodätische Messungen, was sich insbesondere bei der Festlegung der Länge der Fluchtungsgerechten für die Richtungsübertragung ins Berginnere gezeigt hat /Stiros 2009/.

Aus der später nach der Freiräumung erfolgten Aufmessung durch Pestal /Kienast 2005/ von 1975 bis 1982 kann eindeutig geschlossen werden, dass sich die Tunneltrasse in zwei Stollen aufteilt, von denen der Südstollen auf einer Strecke von 400 m völlig geradlinig verläuft, dann nach Osten abknickt und nach 30 m auf den Nordstollen trifft (Abb. 1). Dieser ist auf den ersten 260 m ebenfalls geradlinig aufgefahren, knickt dann nach Westen ab, um einer geologischen Problemzone auszuweichen. Diese Abweichung von der ursprünglichen Richtung wird durch eine Linienführung in Form eines Dreiecks ausgeglichen. Darauf folgt wieder eine Strecke von 40 m in der ursprünglichen Richtung. Um nach diesen Änderungen von der ursprünglichen Planung, für die ein Zusammen-treffen der beiden Stollen im beiderseitigen geradlinigen Vortrieb vorgesehen war, zu ermöglichen, und um gewisse Ungenauigkeiten, die insbesondere beim indirekten Fluchten, auch als Fluchten aus der Mitte bezeichnet /Witte & Sparla 2011/, auftreten können, hat

Für die Rekonstruktion der Trassierungsstrategie des Eupalinos, insbesondere für die des Nordstollens, hat /Kienast 2005/ durch Auffinden der ursprünglichen Messmarken an den Tunnelwänden und deren Entschlüsselung die entscheidenden Erklärungen erarbeitet. Insgesamt konnte er sieben unterschiedliche Längensysteme nachweisen und viele Höhenangaben. Das wichtigste System weist Markierungen in beiden Stollen auf, die belegen, dass von außen nach innen gemessen wurde und so den Vortrieb in den Tunneln dokumentierten. Die Markierungen bestehen aus einem senkrechten Strich und einem dazugeschriebenen Buchstaben, welcher dem milesischen Zahlensystem zugeordnet werden kann.

Bisher war nur die Richtungsübertragung angesprochen worden, aber auch die Höhenbestimmung zwischen den beiden Mund-löchern war von großer Bedeutung, weil der Tunnel ja der Wasser-versorgung dienen sollte. Zur Zeit des Eupalinos waren zwei Methoden bekannt: das Austafeln oder die Messung mit dem Chorobat³. Beide Verfahren verlangen, dass horizontal um den Berg gemessen werden kann. Ob die eine oder die andere Methode

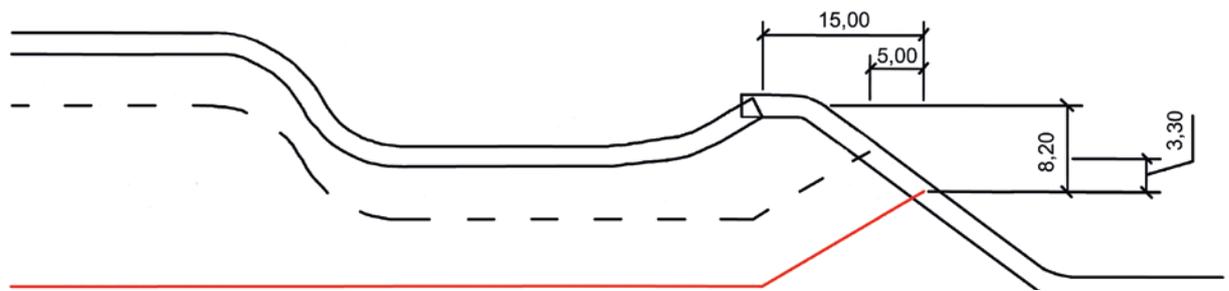


Abb. 3 | Bereich des Durchschlags beim Eupalinos-Tunnel (nach /Kienast 2005/). In Rot die ursprünglich geplante Trasse des Nordstollens; gestrichelt die Trasse nach Eliminierung der Vortriebsabweichung von $0,64^\circ$; die durchgehenden Linien dokumentieren den aufgemessenen Bereich.

³ Nach Vitruv /Reber 2004/ besteht der Chorobat „aus einem längeren Richtscheit von etwa 20 Fuß, der an den äußeren Enden völlig gleichartige Schenkel hat, die in die Enden des Richtscheits nach dem Winkelmaß eingefügt sind, und Streben zwischen dem Richtscheit und den Schenkeln, die durch Einzapfung festgemacht sind. Wenn aber der Wind störend einwirkt, dann soll das Instrument oben eine Rinne von sechs Fuß Länge, einen Zoll Breite und anderthalb Zoll Tiefe haben, in welche man Wasser hineinzugießen hat und wenn das Wasser in gleicher Höhe den Rand berührt, so wird man wissen, dass die Lage waagrecht ist.“

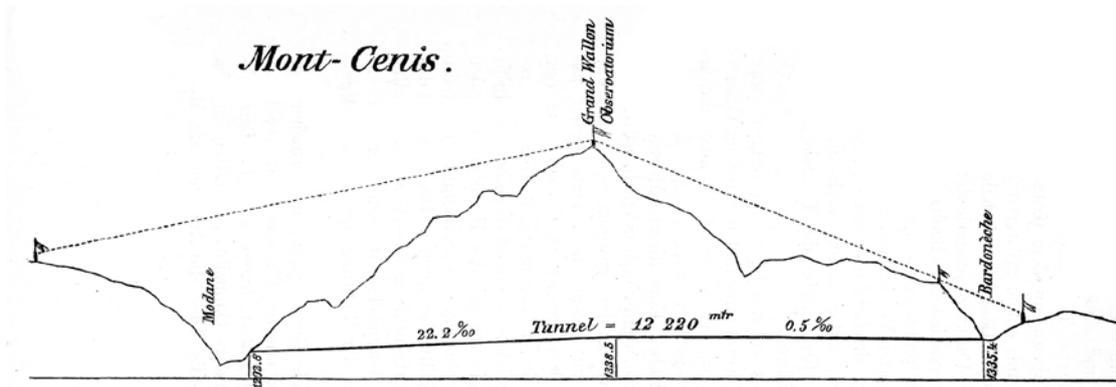


Abb. 4 | Profil des Mont-Cenis

gewählt wurde, lässt sich nach /Kienast 2005/ nicht mehr feststellen. Das Ergebnis ist erstaunlich genau: Die Differenz beträgt nur 4 cm.

3 DER MONT-CENIS- UND DER GOTTHARD-BAHTUNNEL

Für das 2. Beispiel überspringen wir mehr als 2.000 Jahre und beschäftigen uns in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts mit zwei besonderen Tunnelbauwerken, dem Mont-Cenis- und dem Gotthard-Bahntunnel, für die aufgrund der topographischen Gegebenheiten unterschiedliche Messmethoden zum Einsatz kamen, obwohl diese Bauwerke nur in kurzem zeitlichen Abstand erstellt wurden. Es ist die Zeit, in der Eisenbahnlagen auf der ganzen Welt geplant und gebaut wurden. Der Mont-Cenis-Bahntunnel konnte trotz seiner Länge von mehr als 12 km direkt abgesteckt werden, was jedoch nur wegen der Topographie und des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts seit Beginn der Neuzeit möglich war.

Für exakte Vermessungen war die Erfindung des Fernrohrs ein Meilenstein in der Entwicklungsgeschichte der geodätischen Instrumente. Die dem Fernrohr zugrunde liegende Idee der richtigen Kombination von Linsen verdanken wir dem niederländischen Brillenhersteller Lipperhey aus Middelburg (1607) /Ingensand 1992/. Dieses Fernrohr wurde von Galileo Galilei zum astronomischen weiterentwickelt, und Ideen von Johannes Kepler führten 1611 zu einem verbesserten terrestrischen Fernrohr, das durch die Anordnung von Spinnfäden in der Brennebene des Okulars durch William Gascoigne (1640) zu einem Messfernrohr entwickelt wurde. Es dauerte noch fast 100 Jahre bis zur Entstehung des ersten brauchbaren Theodoliten (1730). Etwa um 1830 wurden Fernrohrnivelliere allgemein in die Praxis eingeführt. Neben den instrumentellen Entwicklungen sei besonders auf die von Snellius gefundene Methode der Triangulation hingewiesen, weil es hiermit möglich ist, Tunnelachsen indirekt abzustecken.

Im August 1857 begannen die Absteckungsarbeiten für den Mont-Cenis-Bahntunnel /Koppe 1876/, die die Verbindungsgerade zwischen den in Aussicht genommenen Stollenmundlöchern festzulegen hatten. Nachdem die Linie festgelegt war, konnten die Punkte für die Errichtung der Observatorien auf beiden Seiten des Tunnels und auf dem höchsten Punkt, dem Grand Vallon, bestimmt werden. Auch ein Nivellement zur Bestimmung des Höhenunterschieds der

beiden Mundlöcher konnte noch im gleichen Jahr beobachtet werden, sodass mit den vorbereitenden Bauarbeiten begonnen werden konnte. Im Juli 1858 wurde die bisher provisorisch festgelegte Tunnelrichtung durch drei Punkte definitiv markiert und auf dem Grand Vallon (Abb. 4) ein Observatorium errichtet, das mit einem größeren Theodolit ausgestattet wurde. Mithilfe dieses Instruments konnte ein etwa 9 km entfernter südlich gelegener Punkt eingefluchtet werden. Dieser Vorgang wurde mehrfach von verschiedenen Beobachtern wiederholt, sodass dieser Punkt mit hoher Wahrscheinlichkeit in der gedachten Vertikalebene der

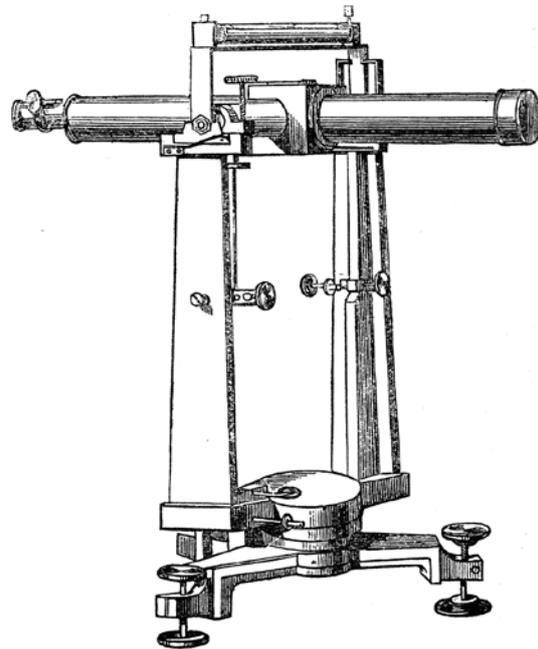


Abb. 5 | Ein bei den Fluchtungen zum Bau des Mont-Cenis-Bahntunnels benutztes Passageinstrument, aus /Gelpke 1880, S. 105/

Tunnelachse liegt. Dann konnten weitere Zwischenpunkte und auch die beiden Observatorien gegenüber den Tunnelportalen endgültig festgelegt werden. Durch ein weiteres direktes Nivellement wurden die Höhenunterschiede dieser beiden Observatorien exakt bestimmt. Die Länge des Tunnels musste indirekt durch Triangulation über 86

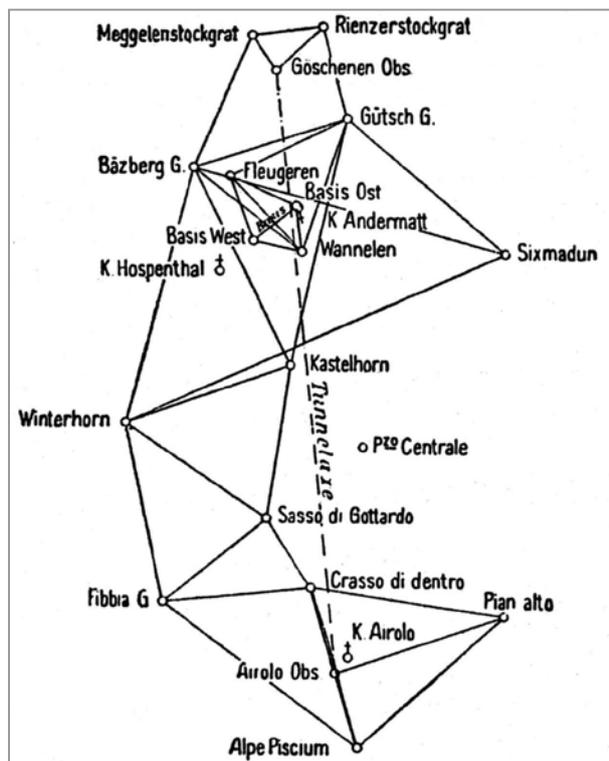


Abb. 6 | Triangulationsnetz für den Gotthard-Bahntunnel von Gelpke

Dreiecke mit den Hauptpunkten der Absteckung und einer Basis von 8,7 km ermittelt werden. Angaben über die Durchschlaggenauigkeit sind nicht bekannt. Gefluchtet wurde u.a. mit dem in Abb. 5 dargestellten Passageinstrument.

Die Vermessung des Gotthard-Bahntunnels wurde dem Ingenieur beim Eidgenössischen Stabsbüro Otto Gelpke übertragen, der im Sommer 1869 das in der Abb. 6 dargestellte und aus nahezu gleichseitigen Dreiecken bestehende Netz beobachtete /Kobold 1982/. In diesem Netz 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. 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. Nicht weniger wichtig als die Achsrichtungsbestimmung war die Ermittlung des Höhenunterschieds zwischen den Portalpunkten, eine Aufgabe, für die Gelpke die Schweizerische Geodätische Kommission gewinnen konnte. Da er die Methode der kleinsten Quadrate nicht kannte, hatte Gelpke nur die Dreiecks widersprüche verteilt und dabei den sphärischen Exzess nicht berücksichtigt. 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. Aus der trigonometrischen Höhenübertragung von Göschenen nach Airolo ergab sich zum geometrischen Nivellement ein Widerspruch von 97 mm. Dieses Netz hatte später Koppe streng nach der Methode der

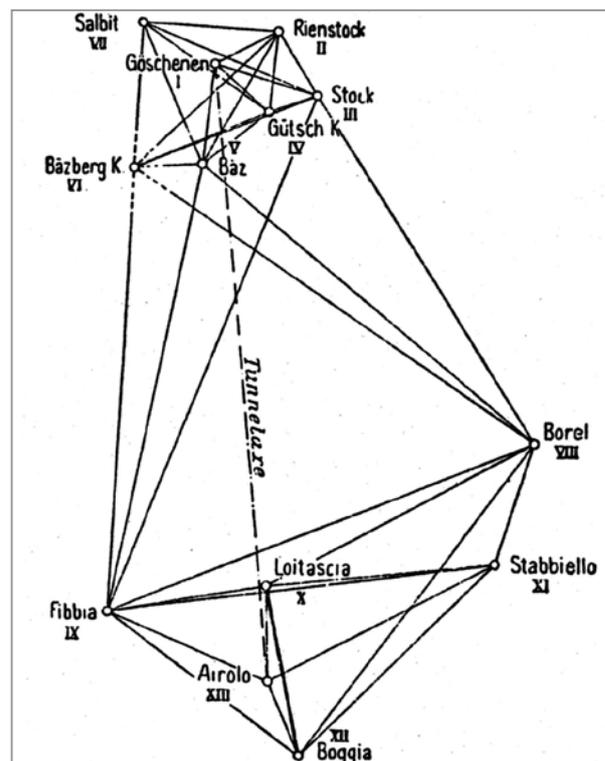


Abb. 7 | Triangulationsnetz für den Gotthard-Bahntunnel von Koppe

kleinsten Quadrate ausgeglichen und eine Standardabweichung von 0,75 mgon für eine einzelne Richtung berechnet.

Um eine möglichst hohe Sicherheit für ein einwandfreies Zusammentreffen der beiden Tunnelvortriebe zu erhalten, entschloss sich die Bauleitung, ein vom bisherigen Netz völlig unabhängiges Netz beobachten zu lassen. Für diese Aufgabe wurde 1872 Dr. Carl Koppe eingestellt, der als Landmesser auch Erfahrungen auf dem Gebiet der Eisenbahnvermessung mitbrachte. Noch im gleichen Jahr gelang ihm der Entwurf des in Abb. 7 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 Ausgleichung einführen zu 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 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 sicher 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 1875, S. 405/, dass er es unterlassen habe, für jeden Punkt eine Orientierungsunbekannte einzuführen, was aber

wohl kaum zu größeren Differenzen zu den 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 betragen; eine erfolgreiche Kontrolle. Eine weitere Kontrolle wurde von der Bauleitung verlangt, für die Koppe die Achsrichtung in Airolo ins Gelände übertrug und mithilfe von vier Zwischenpunkten bis zum Grat des Kastelhorn verlängerte. Von Göschenen aus bestimmte Koppe einen Hilfspunkt, von dem aus er das Signal auf dem Kastelhorn anvisieren konnte. Die seitliche Abweichung schätzte Koppe auf 10 cm bis 15 cm. Für die dritte Kontrolle führte Koppe astronomische Beobachtungen nach der Methode von Bessel aus, deren Ergebnissen er eine nicht allzu hohe Bedeutung zubilligte, weil er die Lotabweichungen hätte berücksichtigen müssen. 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 untertage wurde die Methode des Alignements gewählt, wozu das in *Abb. 5* gezeigte 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 2 m zwischen den Messungen von Gelpke und Koppe gegenüber den neueren feststellen, die sich zum Teil auf die Unsicherheit der Lattenlänge der bei der Basismessung verwendeten Holzplatten zurückführen lässt. Es hat Deutungsversuche wie von /Messerschmitt 1902/ gegeben, die aber auch die Diskrepanz nicht schlüssig erklären konnten.

4 DER ÄRMELKANAL-TUNNEL

Der Ärmelkanal-Tunnel, auch Eurotunnel genannt, ist als Eisenbahntunnel ausgelegt und verbindet Sangatte bei Calais mit Shakespeare Cliff bei Dover. Das Tunnelsystem besteht aus drei Röhren, einem zentralen Servicetunnel und parallel dazu aus zwei Eisenbahnröhren, die aus geologischen Gründen einen kurvenförmigen Verlauf aufweisen. In Abständen von 375 m befinden sich Querverbindungen zwischen den drei Tunnelröhren. Etwa 37 km der Gesamtlänge von 50,5 km verlaufen unter dem Ärmelkanal.

1986 wurde mit den Vorarbeiten für den Tunnelbau begonnen. Zu diesem Zeitpunkt lag aus einem Vorprojekt (1972/75) sowie von der französischen und britischen Landesvermessung umfangreiches Messmaterial (Richtungen-, Strecken- und Azimutmessungen) vor. Da die Zeit bis zum Baubeginn im Frühjahr 1987 für eine Neuvermessung nicht mehr ausreichte, wurde dieses Material zu einem trigonometrischen Netz zusammengestellt (*Abb. 8*) und gemeinsam

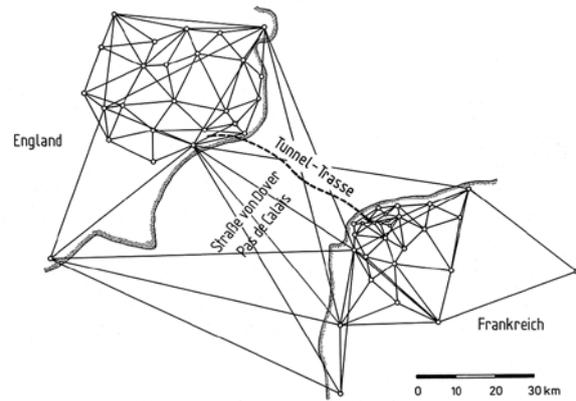


Abb. 8 | Triangulationsnetz für den Eurotunnel

ausgeglichen, wobei der Gewichtsansatz für die Messgrößen umgekehrt proportional zu den a priori angenommenen Varianzen gewählt wurde. Da die großen Halbachsen der mittleren Fehlerellipsen im Bereich der Tunnelstartpunkte größer als 10 cm waren, musste das Netz durchgreifend kontrolliert werden, wozu sich das damals neue GPS-Messverfahren anbot. Das GPS-Netz ist in *Abb. 9* dargestellt. Die Ergebnisse der GPS-Messungen wurden gemeinsam mit den terrestrischen Messungen ausgeglichen. Um eventuelle Maßstabs- und Orientierungsunterschiede zwischen den GPS- und den terrestrischen Messungen zu berücksichtigen, wurden eine Maßstabs- und Orientierungsunbekannte eingeführt. Für die GPS-Beobachtungen wurde ein hoher Gewichtsansatz gewählt, sodass die terrestrischen Messungen praktisch nur der Netzverdichtung dienen.

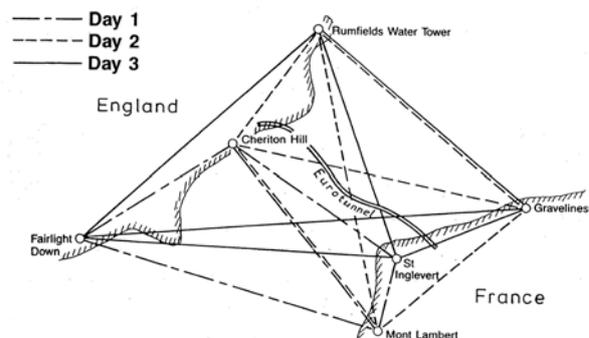


Abb. 9 | GPS-Netz für den Eurotunnel

Eine Genauigkeitsabschätzung für die Querabweichung des Durchschlags bezogen auf die Distanz von 38 km zwischen den beiden Startpunkten, allein resultierend aus diesem Netz, ergab eine Standardabweichung von 4 cm /Jacobs 1991/.

Bei der Höhenverbindung der Tunnelstartpunkte bestand das Problem, dass die Höhensysteme beider Länder wegen der Insellage von Großbritannien nicht miteinander verknüpft waren und damit keine einheitliche Höhenbezugsfläche existierte. Es mussten daher Verbindungsmessungen erfolgen, für die letztlich nur zwei Verfahren infrage kamen: das hydrodynamische Nivellement und die Höhenbestimmung mithilfe von Satellitenmessverfahren. Beim hydrodynamischen Nivellement wird aus den Pegelständen beider Küsten eine ruhend angenommene Meeresoberfläche abgeleitet, deren strömungsbedingte Schiefelage infolge von großräumigen Wasserbewegungen berücksichtigt wird. Aufgrund umfangreicher Tidegang-

beobachtungen von mehreren benachbarten Pegeln beider Küsten wurde der Höhenunterschied der englischen zur französischen Bezugsfläche zu 29 cm mit einer Standardabweichung von 8 cm bestimmt. Mit den Satellitenverfahren konnten seiner Zeit zwar die ellipsoidischen Höhen auf wenige cm genau ermittelt werden, um aber den gesuchten Höhenunterschied zwischen den beiden Bezugsflächen berechnen zu können, hätten auf beiden Seiten des Kanals zahlreiche Punkte höhenmäßig sowohl durch Nivellements als auch durch Satellitenverfahren bestimmt werden müssen. Es konnte jedoch nur ein Profil aus acht Messpunkten erstellt werden, aus dem der Höhenunterschied zu 17 cm mit einer Standardabweichung von 8 cm abgeleitet wurde. Wegen dieser ungünstigen Voraussetzungen wurde dem hydrodynamischen Nivellement das größere Gewicht beigemessen und der Höhenunterschied zu 30 cm festgesetzt. Unter Einbeziehung der Anschlussmessungen dürfte die Standardabweichung für die Höhe beim Durchschlag 10 cm betragen /Jacobs 1991/.

Da für die Richtungsangaben der eingesetzten Tunnelbohrmaschinen Polygonzüge zu messen waren und die Brechungswinkel in Tunneln durch Seitenrefraktion verfälscht werden, insbesondere wenn teilweise stoßnah gemessen werden muss, war es bei einem derartig langen Tunnel zwingend notwendig, die Polygonzüge richtungsmäßig durch Kreiselmessungen zu stützen. Bekanntlich wirkt sich ein am Anfang des Zugs durch Seitenrefraktion beeinflusster Brechungswinkel systematisch verfälschend auf die Richtungsbestimmung aus, die zu einer einseitigen Verschwenkung des Polygonzugs führt. Um diesen Einfluss zu reduzieren, wurden die Polygonzüge in beiden Eisenbahnrohren wechselseitig über Konsolen am rechten und linken Stoß geführt. Aus technischen Gründen konnten die Polygonzüge nicht in der Tunnelmitte beobachtet werden. Bei einer Messweglänge von 22 km auf britischer Seite und von 16 km auf französischer Seite würde die zu erwartende Querabweichung trotz der wechselseitigen Polygonzugführung im Bereich von Metern liegen, wenn auf Kreiselmessungen verzichtet würde /Korittke 1990/. Die Winkel- und Streckenmessungen erfolgten mit dem kombinierten Theodolit/Distanzmesser Wild T2002/DI2000. Die Kreiselmessungen mit dem Gyromat wurden durch das Institut für Lagerstätte und Vermessung (ILV) der Deutschen Montan Technologie (DMT) auf fast jedem 2. Polygonpunkt ausgeführt, wobei das Azimut und das Gegenazimut beobachtet wurden. Ohne die Kreiselmessungen wäre das Durchschlagergebnis mit einer Querabweichung von 361 mm nicht erreicht worden. Die Abweichung in Längsrichtung betrug 69 mm und in der Höhe 58 mm. Diese geringe Höhenabweichung belegt, dass durch das hydrodynamische Nivellement der Höhenunterschied zwischen den beiden Höhensystemen richtig bestimmt wurde /Korittke 1991/.

Das Nachtragen der Vortriebsrichtung für die Steuerung der Tunnelbohrmaschinen konnte durch ein automatisches Führungssystem erreicht werden, das aus einer motorisierten, zielsuchenden Totalstation, zweier Neigungssensoren, vier Ultraschallsensoren für die Abstandsmessung und einem Prozessrechner bestand. Das Programm berechnete aus den Messdaten der Totalstation und den in Längs- und Querrichtung angeordneten Neigungssensoren die dreidimensionalen Koordinaten für den vorderen Achspunkt der Maschine und zeigte auf dem Display die vertikalen und horizontalen Abweichungen der momentanen Maschinenachse gegenüber der

geplanten Achse an. Der Maschinenführer hatte dafür zu sorgen, dass sich der Leuchtpunkt (Maschinenachse) möglichst im Nullpunkt des Displaystrichkreuzes (geplante Achse) befand bzw. in dessen Nähe /Jacobs 1991/.

5 DER GOTTHARD-BASISTUNNEL

Durch den Gotthard-Basistunnel sind an die Vermessung Forderungen gestellt worden, die zum Teil nur mit extra entwickelten Messmethoden gelöst werden konnten. Das Tunnelbauwerk besteht aus zwei im Abstand von 40 m parallel verlaufenden einspurigen Eisenbahnrohren, die durch Querschläge miteinander verbunden sind. Die Durchschlagtoleranz wurde mit 25 cm für die Querabweichung und zu 12,5 cm für die Höhe vom Bauherrn festgelegt, woraus sich Standardabweichungen von 10 cm für die Querabweichung und von 5 cm für die Höhe ergeben. Diese Genauigkeitsforderung stellt hohe Anforderungen an das Lage- und Höhennetz. Das Lagenetz, das extra für den Gotthard-Basistunnel erstellt wurde, besteht aus 31 Haupt- und Portalpunkten, für das 1995 nur die GPS-Technik zur Anwendung kam (Abb. 10). Es hat eine Ausdehnung von 80 x 15 km mit Höhenunterschieden bis zu 1.500 m und wurde mit 14 GPS-Empfängern an zwei Tagen beobachtet /Ryf et al. 2000/. 2005 wurde dieses Netz zur Kontrolle erneut mit einer weiterentwickelten

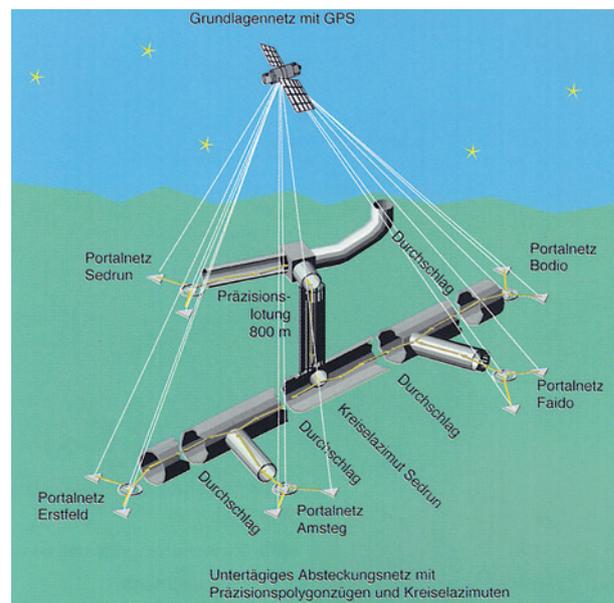


Abb. 10 | Messprinzip für das Lagenetz des Gotthard-Basistunnels aus /Ebner & Carosio 1998/

GPS-Technik beobachtet und eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen aus dem Jahre 1995 erzielt. Lediglich Punktverschiebungen aufgrund von rezenten Krustenbewegungen wurden festgestellt /Schätti 2006/. Dieses Netz weist eine innere Genauigkeit von 5 mm auf /Ingensand 2009/. Das zu Beginn der Bauarbeiten gültige amtliche Höhensystem der Schweiz ist ein Gebrauchshöhensystem ohne Berücksichtigung der Schwere und der Alpenhebung von 1 mm/Jahr im Projektgebiet und konnte deshalb nicht verwendet werden. Bei einem orthometrischen Höhensystem wird mithilfe von

Korrekturen die Nichtparallelität der Äquipotentialflächen berücksichtigt. Diese orthometrischen Korrekturen können in diesem Gebiet bis zu 10 cm betragen /Ryf et al. 2000/. Daher wurden die vorliegenden Nivellementsdaten durch orthometrische Reduktion der Höhen und Berücksichtigung der Hebungsbeiträge korrigiert.

Außerdem wurden astronomische Azimutmessungen auf jeweils einem Pfeiler des Grundlagentzuges in Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Faido und Bodio ausgeführt, die gleichzeitig Kreiseleichstrecken waren /Schätti & Ryf 2007/. Im Ergebnis wiesen die astronomischen Azimute keinen signifikanten Unterschied zu den aus GPS-Koordinaten gerechneten auf. Die mit Zenitkameras gemessenen Lotrichtungen zeigten nur in Einzelfällen Abweichungen von $> 0,3$ mgon gegenüber den auf Modellen basierenden gerechneten Lotrichtungen. Auch die gemessenen Schwerewerte bestätigten die modellbasierten Werte.

Eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe ist die Richtungs- und Maßstabsübertragung vom oberirdischen Lagenetz durch die Portale und durch den Schacht in Sedrun nach unter Tage, weil ungünstige Verhältnisse in den Portalbereichen wie eingeschränkte Visuren zu Richtungsverfälschungen führen können. Auch die Seitenrefraktion, die wegen des großen Temperaturgefälles im Bereich der Portale auftritt, muss beachtet werden, ein Problem, dass sich durch temporäre Hilfspunkte entschärfen ließ, die wenige Meter außer- und innerhalb des Stollens angeordnet waren /Stengele 2007/. Die Polygonpunkte wurden für die in beiden Tunnelröhren gemessenen Präzisionspolygonzüge streng in der Tunnelmitte in der betonierten Sohle im Abstand von 400 m bis 450 m vermarktet. Falls möglich, wurden zusätzlich übergreifende Visuren mit Zielweiten bis zu 900 m gemessen. In Kurvenbereichen konnte ein Mindestabstand $> 1,5$ m von den Stößen eingehalten werden, um den Einfluss der Seitenrefraktion zu reduzieren. Zwischen den beiden Röhren wurden Verbindungsmessungen ausgeführt. Mindestens nach sieben Polygonpunkten wurde der Polygonzug durch Kreismessungen mit dem Gyromat 2000 gestützt, weil so einseitig wirkende, kleine systematische Abweichungen der Brechungswinkel im Polygonzug erkannt werden können und die Zuverlässigkeit erhöht wird. Auch die Genauigkeit der Polygonzüge wird durch zusätzliche Kreismessungen gesteigert, was sich mithilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes leicht nachweisen lässt. Um bei diesen optimale Ergebnisse zu erzielen, wurden Azimut und Gegenazimut zügig hintereinander und jeweils mindestens ein Referenzazimut im Portalnetz vor und nach den Untertagemessungen beobachtet. Wiederholungsmessungen erfolgten möglichst nicht auf denselben Punkten, um den Einfluss von Lotabweichungen zu variieren.

Für den Zwischenangriff Sedrun musste ein 800 m tiefer Schacht (Durchmesser 8 m) abgeteuft werden, der über einen 1 km langen Zugangstollen erreicht wird. Da vom Schachtfuß aus die Vortriebe nach Norden und Süden aufgeföhren wurden, mussten Lage und Höhe durch den Schacht nach unten übertragen werden, wozu die optische und mechanische Lotung gewählt wurden /Schätti 2006/. Die mechanische Lotung wurde als Mehrgewichtsotung mit bis zu 400 kg schweren Gewichten ausgeführt, bei der die Schwingungsmittellage der Lotdröhren ermittelt wird. Sowohl bei der optischen als auch bei der mechanischen Lotung müssen Lotabweichungskorrekturen angebracht werden /Schätti & Ryf 2004/. Die Orientierung unter Tage konnte zunächst nur über Kreismessungen erfolgen, weil bei einer Doppellotung der Abstand

der beiden Lote zu gering gewesen wäre, um eine Kontrolle der Kreismessungen zu gewährleisten. Auch die Benutzung des zweiten 38 m weit entfernten Schachts für eine weitere Lotung war wenig Erfolg versprechend /Ingensand 2009/. Kreismessungen sind aber bei den hohen Genauigkeitsforderungen von $< 1,5$ mgon nicht unproblematisch, weil lokale Lotabweichungen neben anderen Einflüssen die Genauigkeit beeinträchtigen. Um die Richtungsübertragung durch die Kreismessungen zu überprüfen, wurde als einzige unabhängige Alternative die inertielle Messmethode gesehen /Neuhierl et al. 2006/. Für den genauen Richtungsanschluss des Inertialsystems an die Richtung im Zugangstollen am Schachtkopf Sedrun sowie für die Richtungsübertragung am Schachtfuß in die Vortriebe konnte die Autokollimationsmethode benutzt werden, bei der die Zielstrahlen eines auf unendlich fokussierten Theodolitenrohrs auf einen Spiegel gelenkt und in sich reflektiert werden. Bei einem beleuchteten Strichkreuz sieht man zwei Strichkreuze: das tatsächliche und das reflektierte, die mit den Feintrieben des Theodolits zur Deckung gebracht werden. Nach dem Richtungsanschluss mithilfe der Autokollimation am Schachtkopf wird das Inertialsystem mit dem Förderkorb rasch zum Schachtfuß geföhren, um das Driften des Systems zu minimieren. Am Schachtfuß wurde die Richtung analog wie oben in den Stollen übertragen. Der gesamte Vorgang wurde mehrfach in zwei Messkampagnen wiederholt. Die Differenz zwischen den Messungen mit dem Inertialsystem und denen mit den Kreismessungen betrug 2,2 mgon. Die Höhenübertragung von den Portalpunkten aus erfolgte durch Präzisionsnivellements. Bei den gegenüber den bisher vorgestellten Projekten verbesserten und neuen messtechnischen Möglichkeiten stellt sich die Frage nach den erreichten Durchschlagsergebnissen. Grundsätzlich gilt, dass je kleiner diese Abweichungen sind, umso geringer ist der planerische und bautechnische Aufwand nach erfolgtem Durchschlag. Die Ergebnisse belegen, dass die vertraglich zulässigen Toleranzen bei Weitem nicht ausgenutzt werden mussten. Lediglich beim Durchschlag Amsteg/Sedrun betrug die Querabweichung 13,7 cm, während diese bei allen anderen (Bodio/Faido; Erstfeld/Amsteg; Segrun/Faido) weniger als 10 cm ausmachte. Die Höhenabweichung lag maximal bei 2,3 cm (Bodio/Faido). Beim Durchschlagsergebnis Amsteg/Sedrun muss bedacht werden, dass es sich wegen der ungünstigen Voraussetzungen um ein „außergewöhnlich positives Resultat“ handelt /Stengele et al. 2010/.

Neben den bisher beschriebenen Aufgaben muss auch die Steuerung der Tunnelbohrmaschinen erwähnt werden, die, wie zuvor beim Ärmelkanaltunnel dargestellt, ebenfalls durch automatisierte Messsysteme geleitet wurden. Diese Form der Maschinensteuerung kann auch als ein Navigationsvorgang angesehen werden: 1. Positionsbestimmung und 2. Kursermittlung aufgrund der aktuellen Position und Tendenz der Maschine /Messing 2006/. Für die ständig zu aktualisierende Position wurden zwei servomotorisierte Tachymeter benutzt, von denen sich der eine auf einer fest fixierten, koordinierten Wandkonsole befand, die im Nachläuferbereich der Maschine montiert war. Im vorderen Teil der Maschine war mit dem Schreitwerk ein selbsthorizontierender Dreifuß mit dem 2. Tachymeter fest verbunden. Über der Stehachse angebrachte Prismen erlaubten die gegenseitige Einmessung. Außerdem dienten auf verschiedenen Teilen der Maschine fest vorgegebene Punkte als Ziele, die fortlaufend eingemessen wurden. Vor jeder Messung des

Maschinen-Tachymeters führte das Wandkonsoleninstrument eine Richtungskontrolle zu einem zurückliegenden Anschlusspunkt aus. Schließlich sollen noch kurz die heutigen Möglichkeiten der Rohbaudokumentation angesprochen werden, die sich durch das Laserscanning ergeben haben. So dienen hochauflösende Aufnahmen (Punktabstand < 5 mm) der geometrischen Dokumentation des Rohbautunnels, um für die Zwecke der Bahntechnik die erforderlichen geometrischen Grundlagen zur Verfügung zu stellen.

RÉSUMÉ

Unsere Vermessungsmethoden müssen immer so ausgewählt und angewandt werden, dass sie den Zweck des zu errichtenden Bauwerks ermöglichen. So diente der Eupalinos-Tunnel der Wasserversorgung der Stadt Samos, weshalb die im Gegenortsbetrieb aufgefahrenen Tunnelvortriebe nicht geradlinig aufeinandertreffen mussten und Eupalinos die aufgetretene Richtungsabweichung durch die geniale Idee des Sicherungsbogens auffangen konnte. Die danach behandelten Tunnel konnten nur dank des technischen Fortschritts im Instrumentenbau und der ständigen Weiterentwicklung des geodätischen „Theoriegebäudes“ realisiert werden. Der jetzt erreichte Stand ist eine gute Basis für die im Bau befindlichen alpenquerenden Projekte wie den Brenner-Basistunnel.

LITERATUR

- Ebneter, F. (2006):** Die Absteckung des Gotthard-Bahntunnels vor 125 Jahren – Vergleich mit heute. In: Geomatik Schweiz, 326–329.
- Ebneter, F.; Carosio, A. (1998):** Gut vermessen ist halb gebohrt ... Sonderdruck aus Schweizer Baublatt, VIII-XIII.
- Fabircius, E. (1884):** Mitteilungen des archäologischen Instituts Athen, 9, 163 ff.
- Gelpke, O. (1880):** Die letzten Richtungsverifikationen und der Durchschlag am grossen St. Gotthardtunnel. In: ZfV, Bd. IX, 101-116 u. 149–163.
- Goodfield, I.; Toulmin, S. (1965):** How was the tunnel of Eupalinos aligned? In: Isis, 56, 46-55.
- Grewe, K. (1998):** Licht am Ende des Tunnels – Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau. Von Zabern Verlag, Mainz, 58 ff.
- Grewe, K. (2005):** Vermessungspräzision beim Bau antiker Aquädukte. In: 5000 Jahre angewandte Geometrie, 9. Symposium zur Vermessungsgeschichte, Schriftenreihe des Förderkreises Vermessungstechnisches Museum, 35, 29–51.
- Herodot, Übersetzung von Horneffer, A. (1971):** Historien, Deutsche Gesamtausgabe. Kröner Verlag, Stuttgart.
- Ingensand, H. (1992):** 2000 Jahre Theodolit: von Heron bis Heinrich Wild – Ein Beitrag zur Entwicklungsgeschichte des Theodoliten. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 128–137.
- Ingensand, H. (2009):** Alpenquerende Tunnelprojekte und Herausforderungen an die Ingenieurgeodäsie. In: Vermessung und Geoinformation, 319–323.
- Jacobs, E. (1991):** Die Bau- und Vermessungsarbeiten für den Kanaltunnel Dover – Calais. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 10–17.
- Kastenbein, W. (1966):** Markscheiderische Vermessung im Dienste archäologischer Forschung. Der Stollen des Eupalinos – ein Bauwerk des Polykrates auf Samos. In: Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, 73, 26–36.
- Kienast, H. (1977):** Der Tunnel des Eupalinos auf Samos. In: Architektura, 7, 97–116.
- Kienast, H. (2005):** Die Vermessung des Tunnels des Eupalinos – Fakten und Thesen. In: 5000 Jahre angewandte Geometrie, 9. Symposium zur Vermessungsgeschichte, Schriftenreihe des Förderkreises Vermessungstechnisches Museum, 35, 17–28.
- Kobold, F. (1982):** Vor hundert Jahren: Die Absteckung des Gotthard-Bahntunnels. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 49–54.
- Koppe, C. (1875):** Bestimmung der Axe des Gotthardtunnels. In: ZfV, 369–444.
- Koppe, C. (1876):** Bestimmung der Axe des Gotthardtunnels II. In: ZfV, 353–382.
- Korittke, N. (1990):** Vortrieb und Vermessung beim Bau des Eurotunnels. In: Glückauf, 126, 656–663.
- Korittke, N. (1991):** Vortrieb, Vermessung und Durchschlag beim Bau des Eurotunnels. In: AVN, 73–88.
- Messerschmidt, I. (1902):** Neuberechnung der Länge des Gotthardtunnels. In: ZfV, 189–191.
- Messing, M. (2006):** Die Navigation der Tunnelbohrmaschinen – Das Steuerungssystem SLS. In: Geomatik Schweiz, 340–342.
- Neuhierl, T.; Wunderlich, T.; Ryf, A.; Ingensand, H. (2006):** AlpTransit Sedrun: Weltpremiere mit inertialer Messtechnik. In: VDMmagazin, 364–367.
- Ryf, A.; Haag, R.; Schättli, I. (2000):** AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Aktueller Projektstand, ingenieurgeodätische Aspekte, XII. In: Schnädelbach, K.; Schilcher, M. (Eds.): International Course on Engineering Surveying, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- Schättli, I. (2006):** Herausforderungen bei der Absteckung des Gotthard-Basistunnels. In: Geomatik Schweiz, 322–325.
- Schättli, I.; Ryf, A. (2004):** Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels. In: Geomatik Schweiz, 424–427.
- Schättli, I.; Ryf, A. (2007):** AlpTransit Gotthard-Basistunnel – Grundlagenvermessung, letzte Kontrollen vor dem ersten Durchschlag. In: Brunner, F. K. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 07. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Schöne, H. (1903):** Heron von Alexandria, Vermessungslehre und Dioptra. Teubner Verlag, Stuttgart.
- Stengele, R. (2007):** Erster Hauptdurchschlag im Gotthard-Basistunnel – Tunnelvermessung in Theorie und Praxis. In: Brunner, F. K. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 07. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Stengele, R.; Ryf, A.; Schättli, I.; Studer, M.; Salvini, D. (2010):** Vermessung im Gotthard-Basistunnel – Vortriebsmessung, Laserscanning und Langzeit-Monitoring. In: Wunderlich, T. A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 10. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach.
- Stiros, S. (2009):** Orientation and Alignment of the 5th Century BC Tunnel of Eupalinos at Samos (Greece). In: Survey Review, 218–225.
- Vitruvius, M.; Übersetzung von Reber, F. (2004):** De Architectura libri decem, 8. Buch, 5. Kapitel. Marix Verlag, Wiesbaden.
- Witte, B.; Sparla, P. (2011):** Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 7. Aufl. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 156.
- Zölly, H. (1940):** Die Länge des Gotthardtunnels. In: Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik.

Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte

Im Brockenfeld 18
52074 Aachen

