

Vermessung langer Tunnel von der Antike bis zum 20. Jahrhundert

Anhand des Eupalinos-Tunnels, des Gotthard-Bahntunnels und des Ärmelkanaltunnels soll die Entwicklung der Vermessungsmethoden im Tunnelbau in Abhängigkeit vom wissenschaftlichen und technischen Fortschritt gezeigt werden. Von der Fluchtung mit blossen Auge bis zu den heutigen vielfältigen Messverfahren werden diese exemplarisch vorgestellt.

A l'aide du tunnel Eupalinos, du tunnel ferroviaire du Saint-Gothard et du tunnel sous la Manche, cet article mettra en évidence le développement des techniques d'arpentage dans la construction de tunnels, en fonction du progrès scientifique et technique. Ces tunnels seront cités comme exemples des différentes techniques d'arpentage, de l'alignement à l'œil nu aux diverses méthodes actuelles.

Partendo dal tunnel di Eupalino, dalla galleria di base del Gottardo e dal tunnel della Manica si intende qui illustrare lo sviluppo dei metodi di misurazione nella costruzione di gallerie, tenendo in considerazione il progresso tecnico e scientifico. Nell'articolo si illustrano esempi che spaziano dall'allineamento alle misurazioni a occhio nudo, fino ad arrivare ai vari processi odierni di misurazione.

B. Witte

Modifizierte Fassung des in der AVN 2014 S. 88–96 erschienenen Beitrags «Die Vermessungsmethoden bei bedeutenden Tunnelbauwerken von der Antike bis heute».

Die hier behandelten drei 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. Bezogen auf die in dieser Zeit bekannten Vermessungsmethoden kann dieser Tunnel als ein langer angesehen werden, weil bei einer Länge von etwa 1 km seine Vermes-

sand, H., 2009), soll das vermessungstechnische Konzept hier nicht nochmals vorgestellt werden.

1. Der Eupalinos Tunnel

Das erste Beispiel eines Tunnelbauwerks, das mit einfachsten technischen Hilfsmitteln abgesteckt wurde und der Wasserversorgung der Stadt Samos auf der griechischen Insel Samos diente, entstand vor etwa 2500 Jahren. Das Wissen über die Existenz dieses Bauwerks verdanken wir Herodot, dem Begründer der griechischen Geschichtsschreibung, der in seinen Historien (Buch III, Kapitel 60, Hornegger, A., 1971) das Werk des Baumeisters Eupalinos als eines der bedeutendsten seiner Zeit bezeichnet.

Aufgrund dieser Beschreibung wurden die Mundlöcher 1882 durch Fabricius (Fabricius, E., 1884) wiederentdeckt. Die Leitung ist, vgl. Abb.1, von der Quelle in einem unterirdischen Kanal geführt, der in einen Anschlusstunnel in Quanatbauweise übergeht, bevor diese das eigentliche Tunnelbauwerk, den Haupttunnel von 1036 m Länge erreicht. Auf der Stadtseite (Süden) schliesst sich wieder ein Tunnel in Quanatbauweise¹ an. Die Vermessung des Haupttunnels stellte Eupalinos vor eine äusserst anspruchsvolle Aufgabe, weil gleichzeitig von beiden Seiten die Auffahrung erfolgte. Der Querschnitt des Tunnels besteht aus zwei Teilen: Einen begehbaren Stollen von etwa 1,80 m Breite und gleicher Höhe sowie einem tiefer gelegten Leitungsgraben von halber Tunnelbreite, der ein Gefälle von 0,4 % aufweist. Die Tunnelachsen wurden mit Hilfe von Fluchtstäben durch indirektes Fluchten über den Berg bestimmt. Bei diesem Messverfahren trat das Problem auf, wie die abgesteckte Gerade ins Berginnere zu übertragen ist, 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 hinreichende Genauigkeit mussten die betreffenden Punkte weit genug auseinander liegen. Gelände-

bedingt würde sich der zweite Punkt zu tief am Abhang befinden, sodass eine Fluchtung ins Berginnere nicht möglich ist. Auf der nördlichen Seite ist ein Tal, weshalb auf dem gegenüber liegenden Hang ein Festpunkt platziert werden konnte, vgl. 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.

Aus der später nach der Freiräumung erfolgten Aufmessung durch Pestal (Kienast, H., 2005) von 1975 bis 1982 kann eindeutig geschlossen werden, dass die Tunneltrasse sich 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

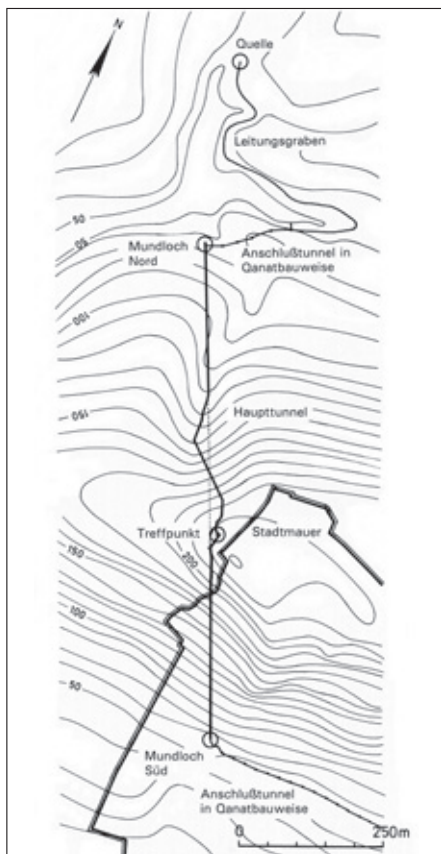


Abb. 1: Lageplan des Eupalinos Tunnel (n. Kienast, H., 1977 und. Grewe, K., 1998, S. 59).

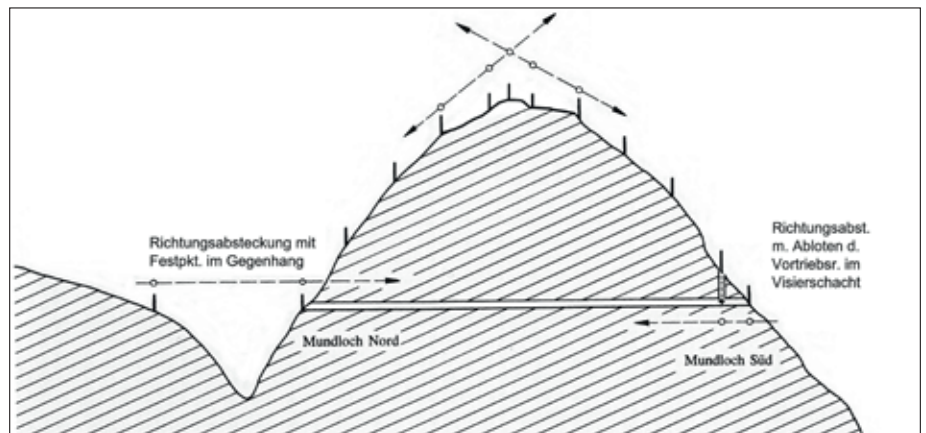


Abb. 2: Mögliche Richtungsübertragung für den Eupalinos Tunnel (n. Grewe, K., 1998, S. 61).

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 Zusammenreffen der beiden Stollen im beiderseitigen geradlinigen Vortrieb vorgesehen war, zu ermöglichen und um gewisse Ungenauigkeiten, die insbesondere beim indirekten Fluchten auftreten können, hat Eupalinos einen finalen Bogen auffahren 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 (Grewe, K., 1998) möchte ich mich anschließen: «Dass es trotz dieser misslichen Ausgangslage gelang, beide Stollen zu einem Tunnel zu vereinigen, ist als eine der grossartigsten Ingenieurleistungen der Technikgeschichte zu bezeichnen.» Diese einzigartige Leistung wurde über viele Jahrhunderte nicht wie-

der 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 Fluchtungsgeraden für die Richtungsübertragung ins Berginnere gezeigt hat (Stiros, S., 2009).

Für die Rekonstruktion der Trassierungsstrategie des Eupalinos, insbesondere für die des Nordstollens, hat Kienast (Kienast, H., 2005) durch Auffinden der ursprünglichen Messmarken an den Tunnelwänden und deren Entschlüsselung die entscheidenden Erklärungen erarbeitet. Alle sieben Längenmessungen weisen Markierungen in beiden Stollen auf, die belegt, dass von aussen nach innen gemessen wurde und den Vortrieb in den Tunneln dokumentierten.

Bisher war nur die Richtungsübertragung angesprochen worden, aber auch die Höhenbestimmung zwischen den beiden Mundlöchern war von grosser Bedeutung, weil der Tunnel ja der Wasserver-

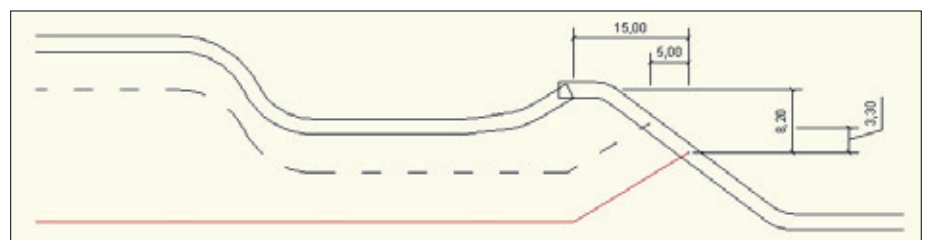


Abb. 3: Bereich des Durchschlags beim Eupalinos Tunnel (n. Kienast, H., 2005); in rot die ursprünglich geplante Trasse des Nordstollens; gestrichelt die Trasse nach Eliminierung der Vortriebsabweichung von $0,64^\circ$; die durchgehenden Linien dokumentieren den aufgemessenen Bereich.

sorgung dienen sollte. Zur Zeit des Eupalinos waren zwei Methoden bekannt: Das Austafeln oder die Messung mit dem Chorobat². Beide Verfahren verlangen, dass horizontal um den Berg gemessen werden kann. Ob die eine oder die andere Methode gewählt wurde, lässt sich nach Kienast (Kienast, H., 2005) nicht mehr feststellen. Das Ergebnis ist erstaunlich genau: Die Differenz beträgt nur 4 cm.

2. Der Gotthard-Bahn-Tunnel

Für das zweite Beispiel überspringen wir mehr als 2000 Jahre und beschäftigen uns in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts mit einem besonderen Tunnelbauwerk, dem Gotthard-Bahntunnel, für den aufgrund der topographischen Gegebenheiten unterschiedliche Messmethoden zum Einsatz kamen. Es ist die Zeit, in der Eisenbahnlinien auf der ganzen Welt geplant und gebaut wurden. Während der Mont-Cenis-Bahntunnel trotz einer Länge von mehr als 12 km noch direkt abgesteckt werden konnte, war dies für den Gotthard-Bahntunnel wegen der Topographie nicht möglich.

Die Vermessung dieses Tunnels wurde dem Ingenieur beim Eidgenössischen Stabsbüro Otto Gelpke übertragen, der im Sommer 1869 das in der Abb. 4 dargestellte und aus nahezu gleichseitigen Dreiecken bestehende Netz beobachtete (Kobold, F., 1982). In diesem Netz wurden alle drei Winkel gemessen, die Gelpke in der Regel durch 24-maliges Reperieren 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 Holzlatten. 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 Höhenunterschiedes zwischen den Portalpunkten, eine Aufgabe für die Gel-

pke die Schweizerische Geodätische Kommission gewinnen konnte. Da er die Methode der kleinsten Quadrate nicht kannte³, 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 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. 5 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 Reperitionsverfahren 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

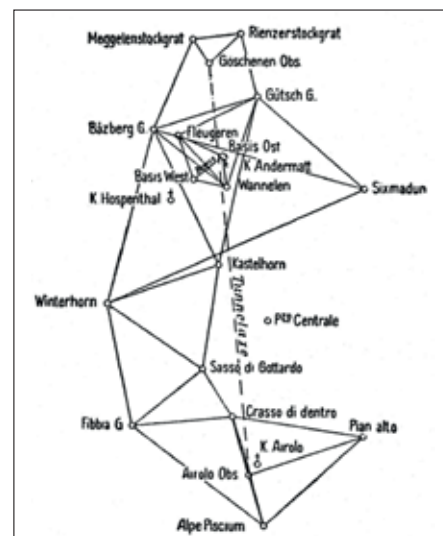


Abb. 4: Triangulationsnetz für den Gotthard-Bahntunnel von Gelpke.

sicher gelohnt, weil jetzt auch ein Genauigkeitsmass für die Achsrichtungen gewonnen wurde: Für die Achsrichtungs genauigkeit 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, C., 1875, S. 405), dass er es unterlassen habe, für jeden Punkt eine Orientierungsunbekannte einzuführen, was

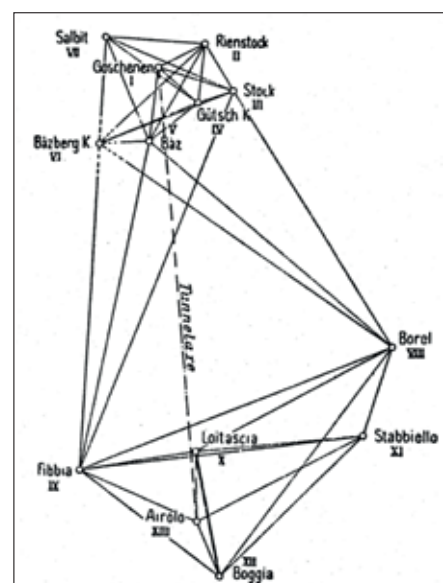


Abb. 5: Triangulationsnetz für den Gotthard-Bahntunnel von Koppe.

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 mit Hilfe von vier Zwischenpunkten bis zum Grat des Kastelhorn verlängerte. Von Göschenen aus bestimmte Koppe einen Hilfspunkt, von dem er das Signal auf dem Kastelhorn anvisieren konnte. 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 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, C., 1875, S. 375). Für die Absteckung der Tunnelrichtungen untertage wurde die Methode des Alignements gewählt. 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 Längenabweichung 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 (Zölly, H., 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 Latten-

länge der bei der Basismessung verwendeten Holzlatten zurückführen lässt.

3. Der Ärmel-Kanal-Tunnel

Der Ärmelkanal-Tunnel, auch Eurotunnel genannt, ist als Eisenbahntunnel ausgelegt und verbindet Sangatte bei Calais mit Shakespeare Cliff bei Dover. Das Tunnel-system 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. 6) und gemeinsam ausgeglichen, wobei der Gewichtsansatz für die Messgrössen umgekehrt proportional zu den a-priori angenommenen Varianzen gewählt wurde. Da die grossen Halb-

sen 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. 7 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 dienten.

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, E., 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 in Frage kamen: Das hy-

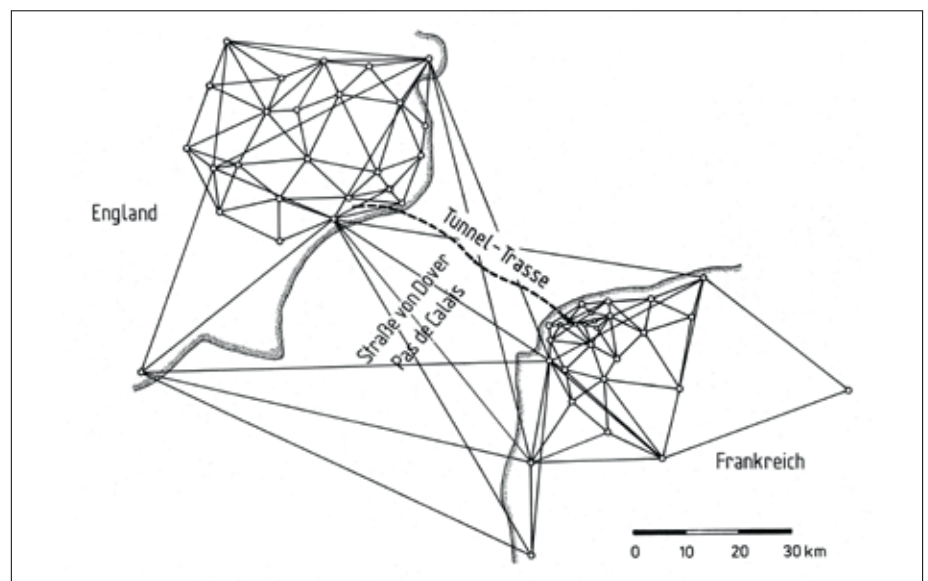


Abb. 6: Triangulationsnetz für den Eurotunnel.

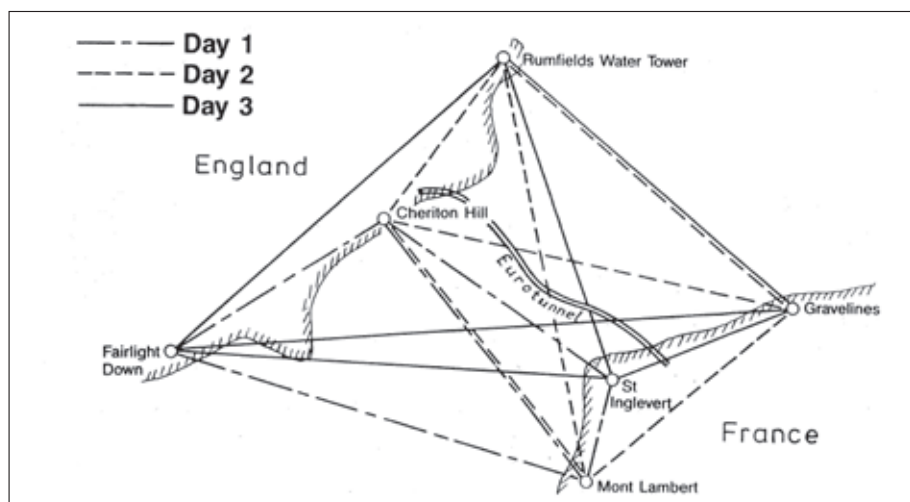


Abb. 7: GPS-Netz für den Eurotunnel.

hydrodynamische Nivellement und die Höhenbestimmung mit Hilfe 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 Tidegangbeobachtungen 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, E.,

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 Kreismessungen zu stützen. Bekanntlich wirkt sich ein am Anfang des Zuges durch Seitenrefraktion beeinflusster Brechungswinkel systematisch verfälschend auf die Richtungsbestimmung aus, die zu einer einseitigen Verschwenkung des Polygonzuges 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 Kreismessungen verzichtet würde (Korittke, N., 1990). Die Winkel- und Streckenmessungen erfolgten mit dem kombinierten Theodolit/Distanzmesser Wild T200/DI2000. Die Kreismessungen mit dem Gyromat wurden durch das Institut für Lagerstätte und Vermessung (ILV) der Deutschen Montan Technologie (DMT) auf fast jedem zwei-

ten Polygonpunkt ausgeführt, wobei das Azimut und das Gegenazimut beobachtet wurden. Ohne die Kreismessungen 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, N., 1991). Das Nachtragen der Vortriebsrichtung für die Steuerung der Tunnelbohrmaschinen konnte durch ein automatisches Führungssystem erreicht werden, das aus einer motorisierten, zielsuchenden Totalstation, zwei 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, E., 1991).

4. Résumé und Ausblick

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 aufgefahrenden Tunnelvortriebe nicht geradlinig aufeinander treffen 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 geodä-

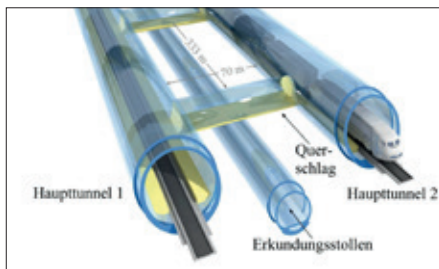


Abb. 8: Die beiden Hauptröhren und der Erkundungsstollen beim Brenner Basistunnel (Quelle BBT SE © 2011, Beschr. geändert).

tischen «Theoriegebäudes» realisiert werden. Die beim Bau des Gotthard-Basistunnels gewonnenen Erfahrungen sowie der erreichte Stand in der Ingenieurgeodäsie sind eine gute Basis für den im Bau befindlichen insgesamt 64 km langen Brenner Basistunnel, der die Besonderheit aufweist, dass sich mittig innerhalb der beiden Haupttunnelröhren ein Erkundungsstollen befindet, der 12 m tiefer liegt (Abb. 8). Bereits vor Beginn der Hauptbauphase – im November 2015 soll die erste TBM in einer Hauptröhre mit der Arbeit beginnen – sind die erreichbaren Durchschlagsgenauigkeiten mit Hilfe von a-priori-Simulationsrechnungen geschätzt worden (Macheiner, K. et al. 2013). Die dafür erforderlichen Grundlagen wie die Genauigkeit der oberirdischen Festpunkte, die Tunnelachsen und die Portalnetze sind bekannt. Als Ergebnis der Rechnungen und Überlegungen ergab sich, dass ein durchgehender Erkundungsstollen mit einem zusammenhängenden untertägigen Netz zu einer deutlichen Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit gegenüber einer unterbrochenen Variante führt. Falls diese Variante gebaut wird, müssen Kreisellazimute in den Hauptröhren gemessen werden. Ohnehin kommt den Richtungskontrollmessungen eine besondere Bedeutung zu.

Literatur:

Fabricius, E. (1884): Mitteilungen des archäologischen Instituts Athen, 9. 163ff.
 Gelpke, O. (1880): Die letzten Richtungsverifikationen und der Durchschlag am grossen St. Gotthardtunnel, ZfV, Bd. IX, S. 101–116 u. S. 149–163.

Grewe, K. (1998): Licht am Ende des Tunnels – Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau, S. 58ff, von Zabern Verlag, Mainz.

Grewe, K. (2005): Vermessungspräzision beim Bau antiker Aquädukte, S. 29–51, in 5000 Jahre angewandte Geometrie, 9. Symposium zur Vermessungsgeschichte, Bd. 35 der Schriftenreihe des Förderkreises Vermessungstechnisches Museum.

Herodot, Übersetzung von Horneffer, A. (1971): Historien, Deutsche Gesamtausgabe, Kröner Verlag, Stuttgart.

Ingensand, H. (2009): Alpenquerende Tunnelprojekte und Herausforderungen an die Ingenieurgeodäsie, Vermessung und Geoinformation, S. 319–323.

Jacobs, E. (1991): Die Bau- und Vermessungsarbeiten für den Kanaltunnel Dover – Calais, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, S. 10–17.

Kastenbein, W. (1966): Markscheiderische Vermessung im Dienste archäologischer Forschung. Der Stollen des Eupalinos – ein Bauwerk des Polykrates auf Samos, Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, 73, S. 26–36.

Kienast, H. (1977): Der Tunnel des Eupalinos auf Samos, Architektura 7, S. 97–116.

Kienast, H. (2005): Die Vermessung des Tunnels des Eupalinos – Fakten und Thesen, S. 17–28, in 5000 Jahre angewandte Geometrie, 9. Symposium zur Vermessungsgeschichte, Bd. 35 der Schriftenreihe des Förderkreises Vermessungstechnisches Museum.

Kobold, F. (1982): Vor hundert Jahren: Die Absteckung des Gotthard-Bahntunnels, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, S. 49–54.

Koppe, C. (1875): Bestimmung der Axe des Gotthardtunnels, ZfV, S. 369–444.

Koppe, C. (1876): Bestimmung der Axe des Gotthardtunnels II, ZfV, S. 353–382.

Korittke, N. (1990): Vortrieb und Vermessung beim Bau des Eurotunnels, Glückauf, 126, S. 656–663.

Korittke, N. (1991): Vortrieb, Vermessung und Durchschlag beim Bau des Eurotunnels, AVN, S. 73–88.

Macheiner, K. u. Windischer, G. (2013): Simulationsrechnung für den Durchschlag beim Brenner Basistunnel, VDV Magazin Geodäsie und Geoinformatik, S. 96–100.

Stiros, S. (2009): Orientation and Alignment of the 5th Century BC Tunnel of Eupalinos at Samos (Greece), Survey Review, S. 218–225.

Vitruvius, M., Übersetzung von Reber, F. (2004): De Architectura libri decem, 8. Buch, 5. Kapitel, Marix Verlag. Wiesbaden.

Zölly, H. (1940): Die Länge des Gotthardtunnels, Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik.

Anmerkungen:

¹ Nach Grewe /Grewe, K., 1998 S. 35/ werden Schächte abgeteuft, die unterirdisch verbunden werden. «Von einem Schacht zum nächsten werden fortschreitend Stollen aufgeföhren, deren Verbindung schliesslich den Quanat ergibt».

² Nach Vitruv /Reber, F., 2004/ besteht der Chorobat «aus einem längeren Richtscheid von etwa 20 Fuss, der an den äusseren Enden völlig gleichartige Schenkel hat, die in die Enden des Richtscheits nach dem Winkelmass eingeföhgt sind, und Streben zwischen dem Richtscheid und den Schenkeln. Wenn aber der Wind stöhrend 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 beröhrt, so wird man wissen, dass die Lage waagrecht ist.»

³ Zwar war diese Methode schon 1806 von A. M. Legendre in «Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes» veröffentlicht worden; der Anhang dieser Veröffentlichung hat die Überschrift «Sur la méthode des moindres carrés». Die wahrscheinlichkeitstheoretische Begründung erfolgte durch C. F. Gauss 1809, 1810 und 1821, in der Astronomie durch ihn seit 1795 angewandt, bei geodätischen Netzen später. Seine Schriften waren in Latein publiziert und nicht leicht verständlich; eine vollständige deutsche Übersetzung erschien erst 1887, eine französische bereits 1855. Jedoch haben die Gauss-Schüler u.a. Gerling (1843) diese Methode bekannt gemacht. Zunächst beherrschte Koppe die Ausgleichsrechnung nicht; er hat sich dann während einer Beurlaubung in diese Methode eingearbeitet.

Prof. Dr.-Ing. em. Bertold Witte
 Professur für Geodäsie
 Institut für Geodäsie und Geoinformation
 Nussallee 17
 DE-53115 Bonn
 bertold.witte@uni-bonn.de