

Tunnel : die Entwicklung der Technik von den Anfängen bis zum Ende des Mittelalters

Autor(en): **Grewe, Klaus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG**

Band (Jahr): **80 (2008)**

PDF erstellt am: **21.09.2024**

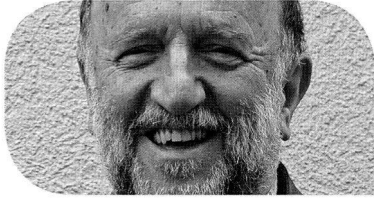
Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-378437>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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



Tunnel – Die Entwicklung der Technik von den Anfängen bis zum Ende des Mittelalters

Dr. Dipl.-Ing. Klaus Grewe

Jahrgang 1944, studierte in Mainz Vermessungswesen und übernahm 1967 am Rheinischen Landesmuseum Bonn die Stelle des Vermessungsingenieurs. Seit Beginn seiner Tätigkeit in Bonn widmete er sich intensiv der Erforschung römischer Wasserleitungen im Rheinland und übernahm Ende der 70er Jahre die Leitung des Forschungsprojektes Eifelwasserleitung. 1988 wurde ihm die Frontinus-Medaille der Frontinus-Gesellschaft verliehen. Wissenschaftlicher Referent beim Rheinischen Amt für Bodendenkmalpflege, mit der Bearbeitung verschiedener technikgeschichtlicher Projekte beschäftigt. 1997 hat er an der Universität Nimwegen promoviert.



Bild 1: Hiskia-Tunnel von Jerusalem. Blick auf den Blindstollen in einer Korrekturstelle des Vortriebs. Diese Blindstrecken sind ein unwiderlegbarer Beweis für Planung und Trassierung. (Foto: Klaus Grewe)

Für fast alle Tunnelbauwerke der Antike und des Mittelalters gilt gleichermassen, dass Bauzeichnungen, Pläne oder zeitgenössische Beschreibungen nicht mehr vorhanden sind. Der Planungsgedanke und damit letztlich die in einem Tunnel steckende Vortriebstechnik ist also von den Ingenieuren unserer Tage aus den Bauwerken selbst – also an den Wandungen und Firsten der Tunnel – abzulesen und zu entschlüsseln. Dabei wird oftmals sichtbar, dass die antiken Ingenieure vor dem Ausbau des endgültigen Tunnelprofils Probetunnel angelegt haben, um den späteren Durchschlag sicherzustellen.

For nearly all tunnels built in ancient times and the Middle Ages, the same holds true: the construction drawings, plans or historical records no longer exist. The planning concepts and tunnelling technology behind a tunnel can, therefore, only be surmised by today's engineers from the actual constructions themselves – specifically from the walls and vaults of the tunnel. In examining these, it often becomes evident that the engineers of antiquity first created a pilot tunnel before expanding the final tunnel profile in order to ensure the breakthrough later.

Einleitung

Tunnelbauten zählen zu den schwierigen Disziplinen in der Geschichte des Ingenieurbaus. Im Gegensatz zum Bergbau, bei dem man sich mit dem Vortrieb der Stollen an den auszubeutenden Lagerstätten im Berg zu orientieren hatte, galt es im Tunnelbau, unter Tage eine zuvor projektierte Linie einzuhalten, um zwei in den Aussenhängen eines Berges vorgegebene Punkte unterirdisch miteinander zu verbinden. Insofern kann man die Baulose eines Tunnelbaus bis zum Treffpunkt durchaus als Stollenvortriebe bezeichnen, denn ein Stollen führt in einen Berg hinein, während ein Tunnel durch einen Berg hindurchführt. Ein Tunnel ist also immer das Ergebnis einer gründlichen Planung und deren baulicher Umsetzung, der Trassierung also. Durch Planung und Trassierung wird ein Tunnelbau zum Ingenieurbau. Man mag sich in diesem Zusammenhang vielleicht daran stören, dass es die Berufsbezeichnung des Ingenieurs erst seit dem 12. Jahrhundert – im deutschen Sprachraum erst seit dem 17. Jahrhundert – gibt, die grossartigen Leistungen der antiken Berufskollegen lassen es aber durchaus zu, ihnen den Ingenieurstatus postum zu verleihen.

Wie schwierig es für die antiken und mittelalterlichen Baumeister war, eine geplante Trassenlinie nach unter Tage zu übertragen, ist in vielen Bauwerken ablesbar: Schon nach wenigen Metern Vortrieb wurde eine Kontrollmessung durchgeführt, was in den meisten Fällen zu einer Richtungs-

korrektur im weiteren Vortrieb führte. Diese ständige Abfolge von Vortrieb, Kontrollmessung und Richtungskorrektur hatte zur Folge, dass historische Tunneltrassen sehr häufig im leichten Zickzack-Verlauf durch den Berg führen. Das wiederum hilft dem *«verständigen Ingenieur unserer Epoche, aus dem Bauwerk selbst dasjenige zu lösen ... , was uns im Bericht seines römischen Vorgängers unverständlich bleibt»* [Th. Mommsen, 1871].

Zwei Techniken zur Auswahl

Von der Antike bis in die frühe Neuzeit wurden zwei Bauverfahren angewendet, um einen Tunnel aufzufahren. Beim sogenannten Gegenort-Verfahren beginnt man den Tunnel an beiden Seiten des zu durchstossenden Berges und trifft sich mehr oder weniger genau in der Mitte. Berühmtes Beispiel für dieses Bauverfahren ist der im späten 6. Jahrhundert v. Chr. gebaute Eupalinos-Tunnel auf der griechischen Insel Samos.

Die besondere Schwierigkeit dieses Tunnelbauverfahrens lag darin, über lange Vortriebsstrecken die geplante Richtung unter Tage einzuhalten. Abweichungen von der geplanten Trassenlinie waren durch Änderung der Vortriebsrichtung in der anschliessenden Strecke zu korrigieren. Gerade diese Korrekturen sind es, die in nach dem Gegenort-Verfahren gebauten Tunneln heute noch gut erkennbar sind.

Um derartige Vortriebsfehler zu minimieren, hat man schon seit frühester Zeit nach einem anderen Bauverfahren Tunnel gebaut: dem sogenannten Qanat-Verfahren, auch Lichtloch-Verfahren genannt. Bei diesem Bauverfahren teilt man die Strecke in mehrere Baulose auf. Man steckt die Tunneltrasse über den zu durchfahrenden Berg ab und teuft in gewissen Abständen Schächte ab. In jedem der Schächte beginnt man in einer vorausgerechneten Teufe mit dem Vortrieb eines Stollens, mit dem man den jeweils nächstliegenden Schacht zu treffen versucht. Die Verbindung aller Stollen ergibt schliesslich den geplanten Tunnel.

Dieses Verfahren kommt aus dem alten Persien, wo man zur Versorgung der Oasen Wasser oftmals von weither heranführen musste: Man zapfte unterirdische Vorkommen an und führte sie in kilometerlangen «Qanaten» in das Versorgungsgebiet. Und diese Qanate waren nichts anderes als aus vielen, vielen Baulosen verbundene Tunnelabschnitte. Das Qanat-Verfahren verbreitete sich nach seinen Ursprüngen um 1000 v. Chr. bald über ganz Vorderasien und Nordafrika. Unter Bezeichnungen wie Kahriz, Käriz (Iran), Foggara (Sahara), Khiras (Afghanistan), Sahrig (Yemen), Falaj (Oman), Ngoula, Kriga oder Chegga (Nordafrika), Khattara (Südmorokko) oder auch Mambo (Japan) sind Qanate über die halbe Welt verbreitet. In Europa finden wir nach diesem Verfahren gebaute Tunnel besonders in Italien, denn die Etrusker brachten es in dieser Disziplin zu wahrer Meister-

schaft. Und auch die Römer sollten dann unzählige Tunnel für ihre Strassen, Aquädukte und Seeabsenkungen auf diese Weise bauen.

Mohamed Al Karagi, ein arabischer Mathematiker, schrieb Anfang des 11. Jahrhunderts n. Chr. in Persien über den Bau von Qanaten. Seine Texte sind derart detailliert und präzise, dass sie uns einen tiefen Einblick in die technischen Probleme geben. Da Al Karagi oftmals mehrere Lösungen für ein und dasselbe Problem anbietet, kann man davon ausgehen, in seinen Büchern nicht nur den technischen Stand um die erste Jahrtausendwende n. Chr. zu finden, sondern zugleich den Erfahrungsschatz der vorausgegangenen Generationen. Das wird auch deutlich durch Textstellen wie «Die alten Perser haben ...».

Der Hiskia-Tunnel

Den ersten Grosstunnel der Geschichte finden wir in Jerusalem. König Hiskia stand bei einem drohenden Angriff der Assyrer im Jahre 701 v. Chr. vor der Aufgabe, die bestehende unsichere Wasserversorgung der Stadt durch eine sichere zu ersetzen. Das war nur durch den Bau eines Tunnels zu erreichen, durch den das Gihon-Wasser unter dem Tempelberg hindurch zu einem innerstädtischen Wasserreservoir geführt wurde. Danach war die Quellschicht nach aussen zu verschliessen. Die Felsüberdeckung der einzig in Frage kommenden Tunneltrasse liess einen Tunnelbau in Qanatbauweise nicht zu. Hiskias Ingenieure planten und bauten deshalb einen Tunnel im Gegenort-Verfahren, wofür es bis zu diesem Zeitpunkt kein belegtes Vorbild gab (Bild 1). Schon deshalb ist die Leistung von Hiskias Ingenieuren nicht hoch genug einzuschätzen, und den Bibel-Autoren ist durchaus zuzustimmen, wenn sie diese besonders herausstellen:

«Die übrige Geschichte Hiskias und alle seine Erfolge, wie er den Teich und die Wasserleitung anlegte und das Wasser in die Stadt geleitet hat, das alles ist aufgezeichnet in der Chronik der Könige von Juda.» [2. Könige 20, 20]

Der Tunnel war vor seiner Wiederentdeckung durch den amerikanischen Forscher Edward Robinson im Jahre 1838 nur aufgrund der Bibelstellen im Alten Testament bekannt. 1867 nahm sich Charles Warren dieses Bauwerks an und untersuchte es bei einer vierstündigen Entdeckungstour. Der Tunnel war zu dieser Zeit fast vollständig verfüllt und liess streckenweise nur einen Freiraum von 50 cm Höhe, der dazu noch 30 cm hoch mit Wasser verfüllt war. Warren übersah etwas, was einige Jahre später zum aufregenden Erlebnis im Leben eines Jungen wurde. Im Juni 1880 badete ein Schüler des deutschen Architekten Conrad Schick mit einigen Freunden im Siloah-Teich. Bei einer Krabbelei im anschliessenden Hiskia-Tunnel entdeckte er eine in althebräisch verfasste sechszeilige Inschrift. Schick machte von

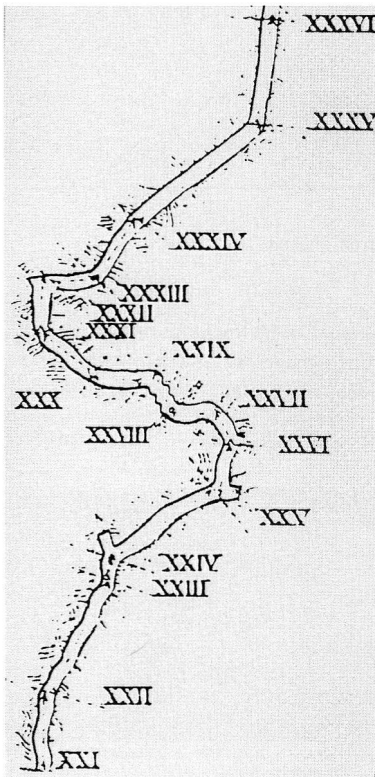


Bild 2: Hiskia-Tunnel von Jerusalem. Der Lageplan des Treffpunktbereichs zeigt mehrere solcher Blindstrecken. (Foto: Klaus Grewe)

dieser Entdeckung Mitteilung, und mit einer Abschrift durch A. H. Sayce sowie der Anfertigung eines Abklatsches stand der Forschung fortan eine einzigartige Urkunde vom Bau eines Tunnels zur Verfügung:

«[Die Vollendung] des Tunnelbaus. Und dies ist die Geschichte vom erfolgreichen Durchschlag. Während [die Steinhauer] noch ihre Hacken [schwangen], ein jeder in Richtung des Gefährten, bis nur noch drei Ellen zu durchörtern waren, [hörte man] die Stimme eines Mannes, der seinem Gefährten etwas zurief, denn auf der rechten Seite im Felsgestein gab es eine Spalte. Und am Tage des Durchschlags durchbrachen die Steinhauer [den Fels] und standen sich gegenüber, Hacke gegen Hacke. Dann floss das Wasser von der Quelle bis zum Sammelbecken, 1200 Ellen weit, und die Höhe des Felsens über den Köpfen betrug 100 Ellen» (Bild 2).

Die Inschrift scheint zu bestätigen, dass man sich bis zum Zeitpunkt des Durchbruchs keineswegs sicher war, sich auch wirklich zu treffen. Man würde ansonsten kaum das Vernehmen einer Stimme aus dem Gegenort derart gefeiert haben. Die Betrachtung des Hiskia-Tunnels aus der Sicht des Ingenieurs führt darüber hinaus zu dem Schluss, dass dieses Bauwerk ohne eine gründliche Planung und Trassierung nicht entstanden sein kann. Ein unwiderlegbares Zeugnis hierfür sind die vielen Korrekturstellen, die heute noch im Tunnel zu sehen sind.

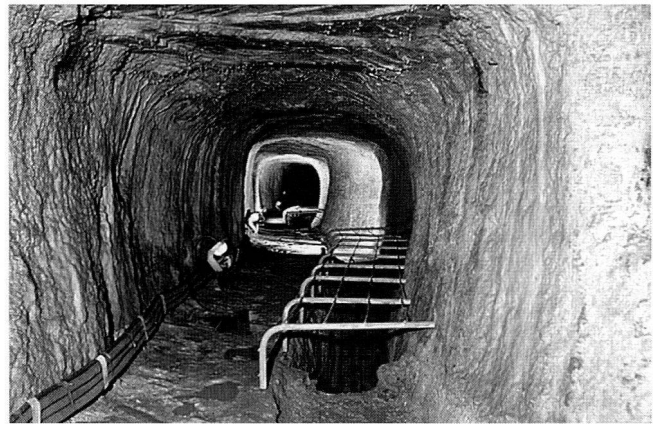


Bild 3: Eupalinos-Tunnel auf Samos. Blick in den Tunnel mit seitlichem Graben für die Wasserleitung. (Foto: Klaus Grewe)

Der Eupalinos-Tunnel

Berühmtestes Beispiel aus der Reihe der nach dem Gegenort-Verfahren gebauten Tunnel ist der im späten 6. Jahrhundert v. Chr. gebaute Eupalinos-Tunnel auf der griechischen Insel Samos. Der 1036 m lange Tunnel lässt auch in einer nachträglichen Trassenbetrachtung erkennen, dass Eupalinos als Baumeister jeden Schritt des Vortriebs in seinen beiden Baulosen in einem Bauplan überwacht hat (Bild 3). Selbst als er wegen geologischer Probleme Umwegstrecken auffahren muss, macht er dies mittels einer klaren geometrischen Figur, sodass er seine Vortriebsstrecken immer auf der Planungsgrundlinie überwachen kann. Im entscheidenden Moment des Treffpunktes gleicht er mit einem genialen Schachzug alle erkannten und unerkannten Vortriebsfehler aus, indem er in der Endphase des Vortriebs in einem Baulos einen «finalen Versicherungshaken» auffährt, um auf diese Weise das gegenüberliegende Baulos sicher und zwangsläufig von der Seite zu treffen.

Der Tunnel von Samos war als Gegenort-Tunnel mit Treffpunkt in der Mitte geplant. Er wurde von beiden Seiten aus aufgeföhren, wobei die Arbeiten im Südstollen planmässig abliefen. Im Nordstollen zeigten sich nach etwa der Hälfte der Vortriebsstrecke geologische Schwierigkeiten, die zu einer Aufgabe der geradlinigen Vortriebsrichtung zwangen. Der Baumeister vollzog im weiteren Vortrieb einen Hakenschlag nach Westen und wählte dazu als Hilfskonstruktion ein gleichschenkliges Dreieck mit den Winkeln 1:3. Dieses Winkelmaß hatte für ihn den Vorteil, auch im Tunnel leicht konstruierbar zu sein. Darüber hinaus legte Eupalinos im Bereich der Umgehungsstrecke einen Raster über seinen Bauplan, über welchen er den schrägen Vortrieb auf seiner Basislinie verfolgen konnte (Bild 4).

Mit Erreichen des Scheitelpunktes seiner Umgehungsstrecke änderte er noch einmal seinen Bauplan. Er gab den Mittelpunkt der Basis als Treffpunkt auf. Im Südstollen fuhr

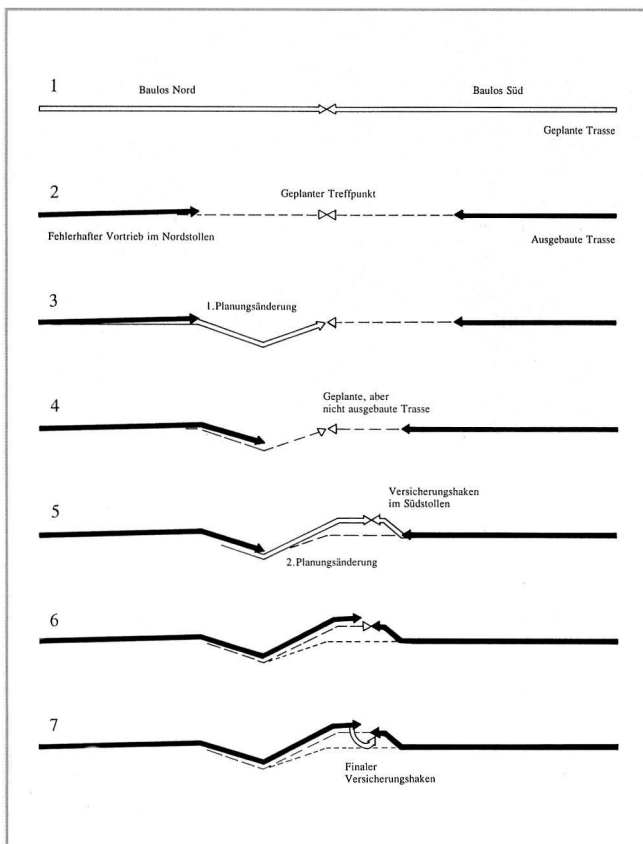


Bild 4: Eupalinos-Tunnel auf Samos. Die nachvollziehbaren Korrekturen im Vortrieb belegen die Planung und Trassierung. Eupalinos muss den Vortrieb ständig überprüft und mit seinem Plan verglichen haben. (Foto: Klaus Grewe)

er noch einen schräg nach Osten gerichteten Versicherungshaken auf, knickte an dessen Ende für ein kurzes Stück des Vortriebs in eine Basisparallele nach Norden ab und stellte die Arbeiten ein. Von Norden zielte er nun nicht mehr auf den aufgegebenen Treffpunkt, sondern strebte der Basisparallelen des Südstollens zu. Nachdem er diese erreicht hatte, bog er mit seinem Vortrieb in sie ein und strebte auf gerader Linie der Ortsbrust des Südstollens zu (Bild 5).

Das Aufmass des Tunnels zeigt, dass diese Strategie voll aufgegangen wäre, wenn ein anfänglicher Fehler bei der Richtungsübertragung in den Tunnel in der Größenordnung von $\sim 0,5^\circ$ von Eupalinos erkannt worden wäre. Mit diesem Fehler war der gesamte Vortrieb des Nordstollens behaftet, seine Auswirkungen zeigen sich in der Lage der beiden Suchorte zueinander kurz vor dem Zusammentreffen. Eupalinos fuhr die Schlussstrecke des Nordstollens als «finalen Versicherungshaken» auf, der weit nach Westen ausbuchtete und den Versicherungsvortrieb des Südstollens genau in seiner Flanke traf (Bild 6).

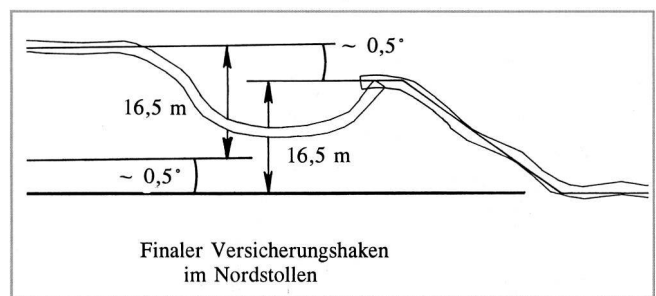


Bild 5: Eupalinos-Tunnel auf Samos. Im Treffpunktbereich schlägt Eupalinos im Vortrieb des nördlichen Bauloses einen «finalen Versicherungshaken», um das Südbaulos von der Seite sicher zu treffen. (Foto: Klaus Grewe)



Bild 6: Eupalinos-Tunnel auf Samos. Schema der Richtungsübertragung in den Berg: Von Norden stand ein Gegenhang zur Vermarkung der Richtung zur Verfügung; im Südhang (Meerseite) war das nicht der Fall, hier diente ein Orientierungsschacht der Richtungsübertragung. (Foto: Klaus Grewe)

Römischer Tunnelbau

In der Römerzeit entwickelt sich der Tunnelbau zu seiner ersten grossen Blüte: Man baut Tunnel für Aquädukte, Strassen, Flussumleitungen, Seeabsenkungen, zum Hochwasserschutz und sogar als Goldfallen, um unterhalb grosser Goldminen selbst die geringsten Mengen des in Flüssen noch mitgeführten Restgolds abzuschöpfen. Während solche Tunnel nur in Spanien und Portugal zu finden sind, trifft man auf Strassentunnel nur in Süd- und Mittelitalien. Aquäduktunnel hingegen sind – mit Ausnahme Englands – praktisch über das ganze Imperium verteilt gebaut worden. Bei Walferdingen (Luxemburg) und Düren (Deutschland) finden sich die respektabelsten Bauwerke nördlich der Alpen, letzteres mit 1660m Länge dazu noch der längste in dieser Region.

Im Titus-Tunnel von Çevlik sind diese Spuren sehr aussagekräftig, wenngleich sie auch schwer zu entdecken sind. Die Flussumleitung mit all ihren erkennbaren Besonderheiten, mit der weitgehend erhaltenen Talsperre, dem

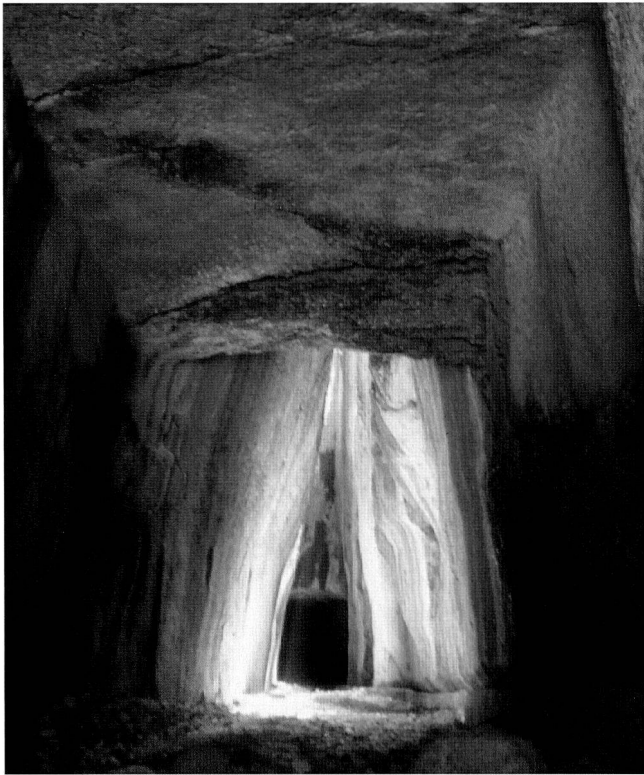


Bild 7: Titus-Tunnel von Çevlik (Türkei). Tunnelinneres. (Foto: Klaus Grewe)

zweiteiligen Tunnel und mit der Bauinschrift ist als Gesamtkunstwerk ein bedeutendes Zeugnis antiker Technikgeschichte – zudem kann der Titus-Tunnel auch noch als einer der schönsten Tunnel gelten, die je gebaut worden sind (Bild 7).

Die Erfordernis für eine derart grosse Baumassnahme ist durch die Topographie zu begründen. Hier, an einer Stelle, wo das Tal eines Gebirgsbaches sich zur Küste hin weit öffnet, fand man in der Antike das geeignete Gelände für die Gründung der Hafenstadt Seleukia Pieria – Hafen für das antike Antiochia. Während sich die in einer Gesamtlänge von 12 km ummauerte Stadt im Hang des Berges beiderseits des Baches weit nach oben ausdehnte, nutzte man den Küstenstreifen für die Anlage eines grosszügigen Hafens.

Das Hafenbecken war von starken Mauern umringt, wobei zur Seeseite natürlich eine Öffnung für die Schifffahrt belassen war. Vom Berg durchströmte der Gebirgsbach das Stadtgebiet und danach das Hafenbecken, doch anstatt für eine ständige Durchspülung zu sorgen, führten die vom Wasser mitgeführten Geröllmassen in regelmässigen Zeitabschnitten zu einer Verlandung des Hafens. Diese für den Hafenbetrieb unerwünschte Erscheinung war nur durch ein ständiges Freiräumen des Beckens zu beseitigen – oder durch den Bau einer Flussumleitung oberhalb des Hafens.

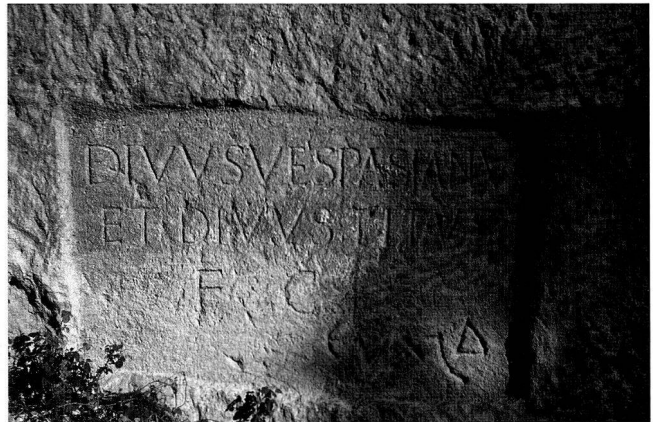


Bild 8: Titus-Tunnel von Çevlik (Türkei). Bauinschrift: Divus Vespasianus et Divus Titus F(aciendum) C(uraverunt). (Foto: Klaus Grewe)

Es war den römischen Ingenieuren unter Vespasian (Kaiser von 69 bis 79 n. Chr.) vorbehalten, hier für Abhilfe zu sorgen. Sie konzipierten für den Gebirgsbach ein 875 m langes Hochwasserumleitungssystem, das aus Staumauer, Tunnel und einem als Felseinschnitt angelegten offenen Graben besteht (Bild 8).

Durch eine Bauinschrift sind die Auftraggeber dieses Flussumleitungssystems genau bekannt. Die Inschrift *DIVVS VESPASIANVS ET DIVVS TITVS FACIENDVM C(uraverunt)* belegt darüber hinaus die Jahre um 79 n. Chr. als Bauzeit für diesen aussergewöhnlichen Tunnel. Der Bauinschrift können wir entnehmen, dass mit dem Bau noch unter Vespasian begonnen wurde, die Arbeiten aber möglicherweise erst nach dem Tod von dessen Nachfolger Titus (Kaiser von 79 bis 81 n. Chr.) abgeschlossen worden sind. Deshalb der Name «Titus-Tunnel». Die Bauzeit dürfte also in der Übergangszeit zwischen diesen beiden Regentschaften anzusetzen sein.

Dem Tunnelbau als Herzstück der Gesamtanlage gilt das besondere technische Interesse. Erstaunlicherweise hat man den Bergdurchstich nämlich nicht auf der ganzen Trasse als ein durchgängiges Tunnelbauwerk konzipiert, sondern stattdessen den Berg in drei Abschnitten durchstossen. Am Anfang und am Ende des Berges befinden sich zwei 89 m bzw. 31 m lange Tunnelabschnitte, die über einen 64 m langen offenen Felseinschnitt verbunden sind. Alle drei Abschnitte weisen technische Besonderheiten auf, die das Ensemble von Çevlik zu einem interessanten technikgeschichtlichen Forschungsobjekt machten (Bild 9).

Der Felseinschnitt war durch eine aus dem Fels herausgearbeitete Treppe erschlossen worden, die heute noch an der linken Wandung «klebt». Das untere Ende der Treppe ist durch Auswaschung ein wenig zerstört, liegt aber deutlich über dem Niveau der Sohle der Flussumleitung; die erste erkennbare Stufe liegt gar in einer Höhe von 5,6 m über

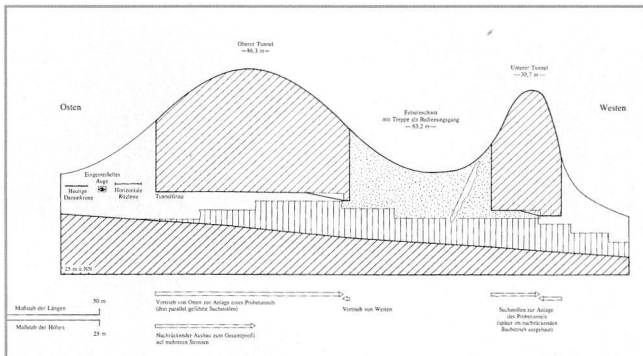


Bild 9: Titus-Tunnel von Çevlik (Türkei). Schema der Baustellenorganisation: Der Vortrieb erfolgte mittels zweier Suchstollen von aussen und über zwei weitere Suchstollen von einem Felseinschnitt im Mittelteil. (Foto: Klaus Grewe)

Grund. Dieser Umstand hat sicherlich mit dem Baubetrieb auf dieser Baustelle zu tun: Man legte den Felseinschnitt als Erstes offensichtlich nur bis zu einer Tiefe an, die dem oberen Bereich der von hier aufzufahrenden Tunnelbaulose entsprach, also dem Niveau der Suchstollen, mit denen man die beiden Tunneldurchschläge sozusagen probte. Nachdem die Durchschläge zwischen den Suchstollen in beiden Baustellen gelungen waren und die Probetunnel auf die Breite der ersten Strossen ausgebaut worden waren, konnte das bei der folgenden Tieferlegung anfallende Abraummateriale durch die Mundlöcher nach draussen befördert werden, und die Treppe verlor ihre Zweckbestimmung.

Der obere Tunnel hat einen leicht gewundenen Verlauf. Sein oberes Mundloch zeigt in etwa das Tunnelprofil an, das anfangs einen hufeisenförmigen Querschnitt von 6,3m Breite und 5,8m Höhe hat. Nach etwa 3m geht dieser Querschnitt zu einem fast rechteckigen über, und am Auslauf der ersten Tunnelstrecke ist der Querschnitt 6,9m breit und 6,5m hoch. Zum Mundloch führt ein 55m langer offener Graben, der als Felseinschnitt mit der Breite des anschliessenden Tunnels angelegt worden ist. Seine Länge war von der Tragfähigkeit des zu durchfahrenden Gesteins abhängig, denn mit dem Tunnel konnte man erst bei ausreichender Überdeckung beginnen.

In grösserer Höhe sind zwei merkwürdige Steinbearbeitungen zu sehen. Eine davon stellt ein reliefiertes Auge dar, das in einem rechteckigen Feld in etwa 5,2m Höhe angebracht ist. Noch einmal 1,5m höher verläuft in Richtung zum Tunnel eine 6,5m lange horizontale Ritzlinie. Möglicherweise ist hierin eine Höhenangabe für den Tunnelbau zu sehen, eine solche Zweckbestimmung ist in römischen Bauwerken nicht unwahrscheinlich. Weiterhin ist denkbar, dass in diesen Zeichen Hochwassermarken zu sehen sind.

Deutlich erkennbar ist die Anlage eines Probetunnels vor dem Ausbau des Gesamtprofils. Allerdings erkennt man

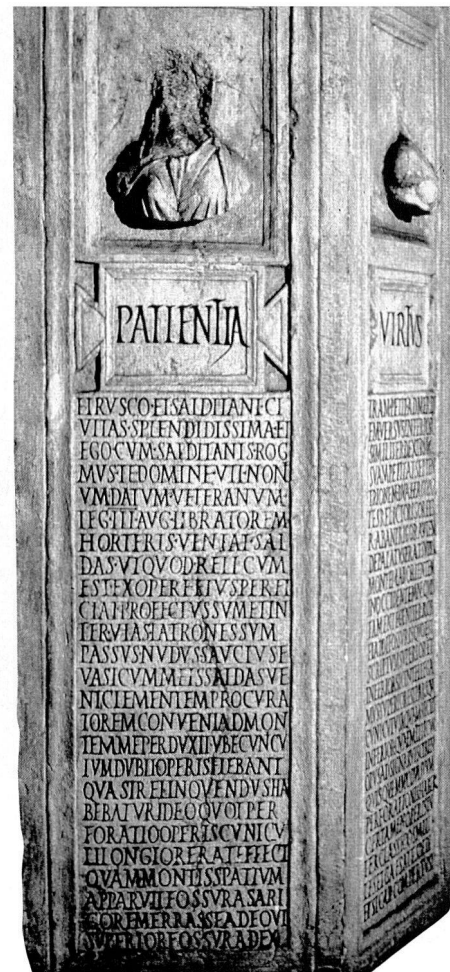


Bild 10: Eine wichtige Primärquelle antiken Tunnelbaus: Die Inschrift des römischen gromaticus Nonius Datus über seinen Tunnelbau in Saldae (Algerien). Die Schlagworte über der Inschrift Patientia – Virtus – Spes sind in diesem Fall am ehesten mit «Geduld, Tatkraft und Zuversicht» zu übersetzen. (Foto: Klaus Grewe)

die Spuren der Suchstollen nicht im gesamten Tunnelverlauf, sondern nur noch im Bereich der Wandung unmittelbar unter der Firste und in der Firste im Treffpunktbereich.

Der untere Tunnel hat einen rechteckigen Querschnitt von 7,3m Breite und 7,2m Höhe am Einlauf, einen trapezförmigen mit 5,5m Sohlenbreite und 7,0m Höhe am Auslauf. Dieser Tunnel ist mit seinen 31m Länge zwar kürzer als der östliche, zeigt aber im Wesentlichen dieselbe Art der Vorgehensweise beim Bau. Auch hier sind im Treffpunktbereich die Spuren dreier von Osten aus aufgefahrener Suchstollen erkennbar, während diesen von Westen nur eine Spur wiederum auf der Südseite entgegenkommt. Der Vortrieb von Westen erfolgte wiederum nur mit einem Gegenstollen, der gegenüber dem südlichen der drei östlichen Suchstollen aufgefahren worden ist.



Bild 11: Drover-Berg-Tunnel bei Düren (Deutschland). Die Wasserleitung knickt aus dem Hangverlauf in den Tunnel ab. (Foto: Klaus Grewe)

Sind die Tunnel von Çevlik für die Baugeschichte allein schon exemplarisch, so sind sie für eine darüber hinausgehende technikgeschichtliche Betrachtung von noch grösserer Bedeutung, da die Strategie des Baumeisters bezüglich seiner Planung und Trassierung anhand der Abbau-spuren so gut rekonstruierbar ist.

Eine der wenigen Primärquellen zur antiken Technikgeschichte ist der Grabstein des Nonius Datus aus Algerien. Nonius Datus war als *gromaticus* (Vermessungsmann) bei der *legio III Augusta* in Lambaesis beschäftigt und für den zivilen Auftrag zum Bau einer Wasserleitung samt Tunnelbau in Saldae abkommandiert worden. Der Inschrift zufolge war der von Nonius Datus über den Berg abgesteckte Tunnelverlauf von den Bauleuten unter Tage nicht eingehalten worden (Bild 10). Der versierte Praktiker Nonius Datus stellte den im Vortrieb gemachten Fehler fest, glich ihn durch eine bauliche Korrektur aus, und die Wasserversorgung Saldaes konnte in Betrieb genommen werden. Nonius Datus nennt in seiner Inschrift noch die Tugenden, die den antiken Tunnelbauern abverlangt wurden, denn er hat seine Inschrift unter die Schlagworte «*Patientia – Virtus – Spes*» (Geduld, Tatkraft und Zuversicht) gestellt.

Der Drover-Berg-Tunnel bei Düren zwischen der Quelle «Heiliger Pütz» bei Drove und Soller ist schon etwa seit der Jahrhundertwende bekannt; von früheren Ausgrabungsversuchen existieren allerdings lediglich Beschreibungen oder amateurhafte Skizzen.

Im Gelände ist die Tunneltrasse an einer lückenhaften Kette von Bauschächten, die sich an der Oberfläche durch



Bild 12: Drover-Berg-Tunnel bei Düren (Deutschland). Einer der Bauschächte des Tunnels, schon in römischer Zeit mit Ton verfüllt. (Foto: Klaus Grewe)

trichterförmige Mulden mit Durchmessern von bis zu 6 m abzeichnen, zu erkennen. Durch den Betrieb des Truppenübungsplatzes und durch den Verkehr von Kettenfahrzeugen sind zahlreiche Trichter allerdings zerstört worden. Die heute noch im Gelände auszumachenden ca. 50 Bauschächte liegen vereinzelt im Truppenübungsplatz-Gelände, grösstenteils aber an dessen Rand oder im Waldgebiet ausserhalb. Der Gesamtverlauf des Tunnels liess sich nach der topographischen Aufnahme der Schachttrichter allerdings noch rekonstruieren (Bild 11).

Der Tunnel mit einer Gesamtlänge von 1660 m unterquert den Drover Berg in einer maximalen Tiefe von 26 m unter dem Scheitelpunkt des durchbrochenen Bergrückens. Damit ergibt sich auch die grösste Teufe der Bauschächte bis zu ca. 26 m. Die Tunnelachse verläuft nicht etwa geradlinig über den Berg, sondern sie folgt – der Eigenart der Qanatbauweise entsprechend – der Einsenkung eines Sattels. Dadurch wurde der Tunnel zwar länger, es waren dafür auf dieser Linie aber die kürzesten Bauschächte abzuteufen.

Noch etwas stimmt mit anderen Tunneln dieser Bauart überein: Man hatte zwar die Linie der geringsten Geländehöhe über den Berg gesucht, folgt dieser dann aber mit der Tunneltrasse um einige Meter seitlich versetzt. Beim Drover-Berg-Tunnel wird dies besonders auf der westlichen Seite im nach Drove abfallenden Steilhang deutlich: Die Linie der römischen Schächte erklettert den Berghang parallel zum Verlauf eines kleinen trockenen Seitentales, aber gut 10 m von der eigentlichen Sohle dieses Siefens nach Süden versetzt. Auf halber Höhe wechselt die Tunnelachse mit einem leichten Schlenker auf die Nordseite des Taleinschnitts über. Sie folgt dann der Sattellinie über den Bergrücken, aber auch hier deutlich zu einer Seite hin versetzt.

Dieses Verfahren erscheint auf den ersten Blick unvernünftig, weil hierdurch die Bauschächte – wenn auch

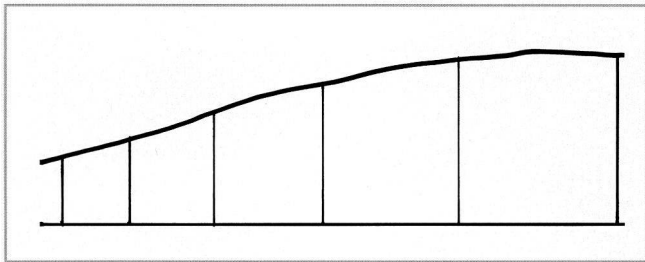


Bild 13: Drover-Berg-Tunnel bei Düren (Deutschland). Vorgaben für die Arbeiten an den Bauschächten: Der Baumeister steckte den nächsten Schacht genau so weit ab, wie der Schacht tief werden sollte. (Foto: Klaus Grewe)

nur geringfügig – tiefer werden mussten. Der Sinn dieser leichten Trassenverschiebung kann nur darin gesehen werden, dass man bei Regenfällen während der Bauzeit auf diese Weise die Oberflächenwasser von den Bauschächten fernhalten wollte. Weiterhin konnte sich nach Abschluss der Bauarbeiten und der Wiederverfüllung der Schächte kein Oberflächenwasser in diesen sammeln und auf diese Weise auch nicht bis in den Tunnel durchsickern, somit auch nicht das im Kanal geführte Quellwasser verunreinigen (Bild 12).

Die Bauschächte folgen – wie schon beschrieben – zwar keiner geraden Linie über den Berg, ein Ergebnis der Ausgrabungen von 1982 ist aber, dass sie einer plausiblen Linie folgen, die sich in einer grossen Windung über den Berg zieht. Keiner der Schächte «tanzt aus der Reihe», was ohne Frage das Ergebnis einer gelungenen Vermessungsarbeit in römischer Zeit ist. Der Abstand der Schächte schwankt zwischen 12 und 15 m in den Hanglagen und 17 bis 26 m auf der Höhe der Drover Heide. Bei den Arbeiten unter Tage mussten also maximal Vortriebsstrecken dieser Grössenordnung eingehalten werden.

Ein wichtiger Hinweis auf die Organisation einer antiken Tunnelbaustelle ergibt sich aus einer näheren Betrachtung der Bauschachtabstände. Es fällt nämlich auf, dass die Bauschächte nicht nur uneinheitliche Schachtabstände haben, sondern darüber hinaus auch, dass die Bauschächte an Tunnelanfang und -ende wesentlich näher beieinander liegen als im Mittelteil des Tunnels (Bild 13). Daraus wird deutlich, dass die Schachtabstände in einem ganz bestimmten Verhältnis zur Teufe der jeweils betroffenen Schächte stehen. Die genaue Vermessung des Tunnels und des ihn umgebenden Geländes zeigte dann, dass die Vortriebsstrecke zwischen zwei Bauschächten auffällig deutlich mit der Teufe des Ausgangsschachtes für das jeweilige Baulos übereinstimmte.

Versuchen wir die Organisation dieser antiken Tunnelbaustelle zu rekonstruieren, so bietet sich als Vergleich die Tunnelbaustelle von Saldae (Nordafrika) an. Wir wissen aus der Inschrift des Nonius Datus, dass dieser zwecks

Planung einer Wasserleitung von der in Lambaesis gelegenen *legio III Augusta* ausgeliehen war. Ingenieure, die derart komplizierte Bauwerke planen konnten, waren also nicht leicht zu finden. Möglicherweise standen solche Fachleute gar nur beim Militär zur Verfügung. Es liegt deshalb nahe anzunehmen, dass der Ingenieur als Planer eines Tunnels sich nicht ständig auf einer Baustelle aufhalten konnte. Es bedurfte also einer eindeutigen Massnahme, den Bauleuten die technischen Abmessungen des in Angriff genommenen Bauwerks «handgreiflich» zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grunde scheint der Planer des Drover-Berg-Tunnels einen technischen Kniff angewendet zu haben, der genial einfach, aber vor allem leicht zu praktizieren war: Er steckte die Lage der Bauschächte des Tunnels im Verlauf der über den Berg geplanten Trasse ab. Dabei wählte er Schachtabstände, die genau der planmässigen Teufe des Ausgangsschachtes für den jeweils nächsten Bauabschnitt entsprachen. Die Bauleute benötigten im fortschreitenden Baubetrieb für die Abteufung der Schächte also keinerlei Baupläne, sondern lediglich eine Schnur. Sie nahmen damit von einem Schacht zum nächsten die vorgegebene Distanz ab, befestigten dann ein Lot an der Schnur und konnten das abgenommene Mass als planmässige Teufe in den Schacht übertragen.

Ähnlich einfach wurde auch die Vortriebsrichtung nach Untertage übertragen: Über dem bis zur planmässigen Teufe fertiggestellten Schacht wurde ein einfaches Holzgerüst aufgebaut. Daran war in Augenhöhe eine Holzlatte befestigt, an der an beiden Enden Lote aufgehängt waren, deren Schnüre bis zur Tunnelbaustelle hinunterreichten. Der Abstand der Lotschnüre war dabei durch die lichte Weite des Bauschachtes vorgegeben. Über dem Schacht wurde nun mittels der beiden Lotschnüre der Festpunkt über dem nächsten Schacht anvisiert. Damit entsprach die Visurlinie über Tage exakt der planmässigen Vortriebsrichtung unter Tage. Da die Schnüre der zur Visur bis zur Sohle eines Schachtes hinabreichten, stand dort eine Richtungsangabe zur Verfügung, nach der der Vortrieb anzulegen und vor allen Dingen zu kontrollieren war. Erst nach der Fertigstellung des Tunnels ist die Wasserleitung eingebaut worden.

Doch wer baute eine solch aufwendige Leitung und welchen Ort versorgte sie? Von der Richtung her käme als grösserer Siedlungsplatz nur Zülpich/*vicus Tolbiacum* als Versorgungsziel in Frage. Entsprechende Funde wurden allerdings nie gemacht, sodass dieses Ziel eher ausscheiden dürfte. In gleicher Richtung wurde allerdings eine römische *villa rustica* nachgewiesen, die durch Lesefunde als mit einer reichen Ausstattung versehen vermutet werden darf. Vielleicht war es der Besitzer dieser Villa in Vettweiss-Froitzheim, der zur Versorgung seines Anwesens das Wasser vom «Heiligen Pütz» herleitete und dazu den Bau des Drover-Berg-Tunnels veranlasste.

Das Mittelalter

Im Tunnelbau trat nach dem Niedergang des Imperium Romanum eine Pause ein. Nach dem Ende der Römerzeit sind für mehrere Jahrhunderte keine Neubauten mehr feststellbar. Schon diese Tatsache macht ersichtlich, dass wir es beim Tunnelbau mit einer Bautechnik zu tun haben, die wie kaum eine andere der staatlichen oder kirchlichen Macht, grosser finanzieller Mittel und eines speziellen technischen Wissens bedurfte, um zur Anwendung zu kommen. Und es ist nicht verwunderlich, dass die ersten Tunnel, die in der Nachantike entstehen, von klösterlichen Gemeinschaften in Angriff genommen wurden.

Aber auch die klösterlichen Tunnel des Hochmittelalters sind eher Ausnahmereischeinungen. Die beiden bedeutendsten Tunnelbauten des Mittelalters im deutschsprachigen Raum sind der Mönchsberg-Tunnel in Salzburg (Österreich) und der «Fulbert-Stollen» in Maria Laach (Rheinland-Pfalz), hinzu kommt noch ein weiterer Tunnel zur Flussumleitung in Bad Frankenhausen (Thüringen). Es darf dabei nicht vergessen werden, dass es vor dem Bau dieser Tunnel eine Pause von fast 1000 Jahren gegeben hat, in der nach heutigem Wissensstand keine Tunnel gebaut worden sind.

In Salzburg (Österreich) stand der Klerus hinter dem Projekt eines Tunnelbaus durch den Mönchsberg. Im Jahre 1136 nahmen das Domkapitel und der Konvent von St. Peter einen Meister namens Albert in Dienst und beauftragten ihn mit dem Bau eines Tunnels, um das Wasser des Almkanals auf die Stadtseite des Mönchsberges zu leiten. Nach vielen Schwierigkeiten wurde der Tunnel 1143 vollendet. Er durchquert das weiche Konglomerat-Gestein des Mönchsberges auf einer Länge von 370 m. Gleich nachdem das Wasser den Tunnel verlassen hatte, wurde es geteilt und versorgte mit einem Arm die Gärten und die Mühle von St. Peter und mit dem zweiten Arm den Grundbesitz der Domherren.

Der – zumindest im Rheinland – bekannteste mittelalterliche Tunnel wurde am Laacher See (Maria Laach) gebaut (Bild 14). Er erhielt seinen Namen «Fulbert-Stollen» nach seinem Bauherrn, dem zweiten Laacher Abt Fulbert, der zwischen 1152 und 1170 im Amt war. In Maria Laach mögen zwei Gründe ausschlaggebend gewesen sein, dass die Mönche einen Tunnel durch den südlichen Rand des Laacher Kessels gebaut haben. Durch diesen künstlichen Abfluss liess sich der Hochwasserstand so begrenzen, dass eine Überschwemmungsgefahr für die Klostergebäude in Zukunft ausgeschlossen wurde. Zudem gewann man direkt vor den Toren des Klosters eine grosse Fläche fruchtbaren Landes. Aufgrund dendrochronologischer Auffälligkeiten kommt das Jahr 1164 für den Bau dieses Tunnels in Betracht. Die angewandte Bauweise ist das Qanat-Verfahren. Der «Fulbert-Stollen» erreichte eine Gesamtlänge von etwa 880 m bei einem mittleren Querschnitt von 1,5 m x 3,5 m.

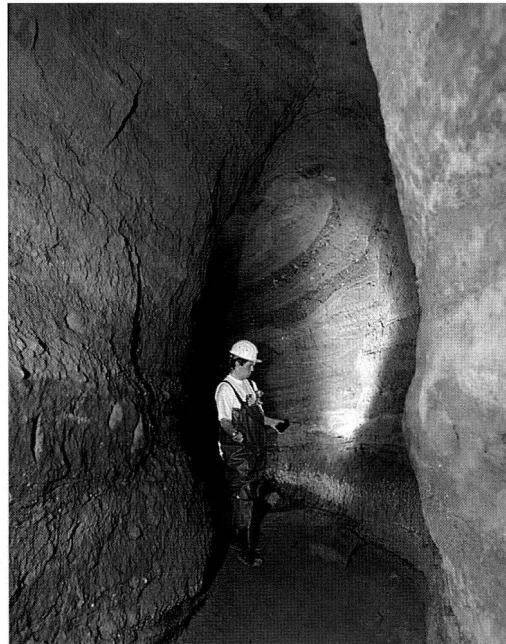


Bild 14: Fulbert-Stollen von Maria Laach (12. Jahrhundert, Deutschland). Tunnelinneres. (Foto: Klaus Grewe)

Beim Vergleich der Linienführung mit den Höhenverhältnissen in der Landschaft wird klar, dass Fulberts Mönchs-Ingenieure in etwa der Linie niedrigster Höhen über den Kesselrand gefolgt waren und damit dem Bau kürzerer Schächte den Vorzug vor einer kürzeren Trasse gaben. Damit wird eine auffällige Übereinstimmung nicht nur zu einem antiken Bauverfahren allgemein, sondern auch hinsichtlich eines wesentlichen Details dieser Technik deutlich. Wo aber kommt das technische Wissen zum Bau eines solchen Tunnels nach Hunderten von Jahren technischer Brache auf diesem Gebiet plötzlich her?

Wir können nur vermuten, dass die Laacher Mönche natürlich in der Lage waren, Vitruvs Texte zu lesen, und deshalb etwas von den in der Antike verwendeten Techniken wussten. Möglicherweise hatten die Benediktiner aber auch Verbindung zu ihrem Mutterhaus in Italien, und den Mönchen dort sind die antiken Tunnel zur Seeabsenkung in den Albaner Bergen sicherlich bekannt gewesen – zumal sie sich noch in Funktion befanden. Geologische Probleme hatten die Laacher Mönche beim Bau ihres Tunnels sicherlich nicht, denn der Tuff, bei den Vulkanausbrüchen 10 000 Jahre vorher als Lavaasche hier abgelagert, war leicht zu durchhörtern.

Der Kleine Wipper-Tunnel bei Bad Frankenhausen (Thüringen) stammt etwa aus dem Jahre 1350. Auch dieser Tunnel steht mit einer Klosteranlage in Verbindung, wobei es anscheinend gleich zwei Nutzniesser nach dem Bau des Tunnels gegeben hat. Die Mönche des Kloster Göllingen im



Bild 15: Tiergartentunnel von Blankenheim/Ahr (Deutschland). Tunnelinneres. (Foto: Klaus Grewe)

Tal der Wipper klagten nämlich einerseits über zu viel Wasser, das zu einer ständigen Verlandung ihrer Fischteiche führte, während in Frankenhausen auf der anderen Seite des nahe gelegenen Hanfenberges für den Betrieb der Mühräder einer Saline über zu wenig Wasser Klage geführt wurde. Man baute also durch den Hanfenberg einen Flussumleitungstunnel, der schliesslich 540 m lang werden sollte.

Kleinere, aber deswegen nicht unbedeutendere Tunnelbauten wurden im Mittelalter zur Wasserversorgung von Burgen gebaut. Wenn man sich in der Regel auch aus Zisternen, Brunnen oder nahe gelegenen Bächen und Quellen mit Wasser versorgte, so gibt es doch einige wenige Beispiele für den Einsatz aufwendigerer Bautechniken.

Ein herausragendes Beispiel unter den mittelalterlichen Wasserleitungen ist sicherlich die Wasserversorgung der Burg Blankenheim/Eifel, die mit einer Druckleitungsstrecke durch ein 12 m tiefes Tal und einer Tunnelstrecke ausgestattet ist. Der Tiergarten-Tunnel von Blankenheim ist rund 150 m lang (Bild 15). Die Tunnelstrecke ist nicht im so-

nannten Gegenort, also von zwei Seiten aus aufgeföhren worden, sondern man hat die Trasse in sechs Abschnitte aufgeteilt, um beim unterirdischen Vortrieb kürzere Strecken aufföhren zu können. Auf diese Weise waren die Auswirkungen der unvermeidbaren Richtungsfehler zu minimieren.

Der Tiergarten-Tunnel von Blankenheim gehört sicherlich zu den kleineren Ingenieurbauten, die im Laufe der 3000-jährigen Geschichte des Tunnelbaus gebaut worden sind. Da er aber in einer Zeit gebaut worden ist, in der in unseren Breiten nicht viele Tunnelbauten errichtet wurden, steht ihm ein hoher technikgeschichtlicher Rang zu. Vergleichbare Bauwerke für diese spezielle Technik externer Wasserversorgung mittelalterlicher Burgen sind nördlich der Alpen äusserst selten, weshalb dem Blankenheimer Tunnel eine durchaus europäische Bedeutung zukommt.

Der technische Aufwand sollte im Rheinland erst im Jahre 1837 mit dem Bau des Eisenbahntunnels bei Königsdorf im Verlauf der Strecke Köln–Aachen übertroffen werden.

Literatur

- Grewe, Klaus: Der «Fulbert-Stollen» am Laacher See. Eine Ingenieurleistung des hohen Mittelalters. Zeitschr. Arch. Mittelalter 7, S. 107–142, 1979.
- Grewe, Klaus: Der Aquäduktunnel durch den Drover Berg bei Vettweiss-Soller, Kreis Düren. Ausgrabungen im Rheinland '81/82, S. 159–163, 1983.
- Grewe, Klaus: Licht am Ende des Tunnels. Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau (Mainz), 1998.
- Grewe, Klaus: Der Tiergartentunnel von Burg Blankenheim. Rhein. Kunststätten 455 (Köln), 2000.
- Grewe, Klaus: Historische Tunnelbauten im Rheinland. Materialien zur Bodendenkmalpflege im Rheinland 14 (Pulheim), 2002.
- Grewe, Klaus u.a.: Wasser für Burg Blankenheim (Mainz), 2007.
- Grewe, Klaus: Der Ratz im Rohr – Eine archäologische Zeitreise (Wiesbaden), 2007.
- Maidl, Bernhard: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus (Essen), 1984.
- Mommsen, Theodor: Tunnelbau unter Antoninus Pius. Archäologische Zeitung NF III, 5, 1871.
- Müller-Salzburg, Leopold: Der Felsbau, III: Tunnelbau (Stuttgart), 1978.
- Rziha, Franz: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst (Berlin; Reprint Essen 1987), 1872.
- Sandström, Goesta Edward: The History of Tunneling (London), 1963.
- Wöckel, Ferdinand: Baugeschichte des Königsdorfer Tunnels. In: Bundesbahndirektion Köln (Hrsg.): Königsdorfer Tunnel – Freilegung und Abbruch 1954–1955 (Darmstadt), S. 5–12, 1955.