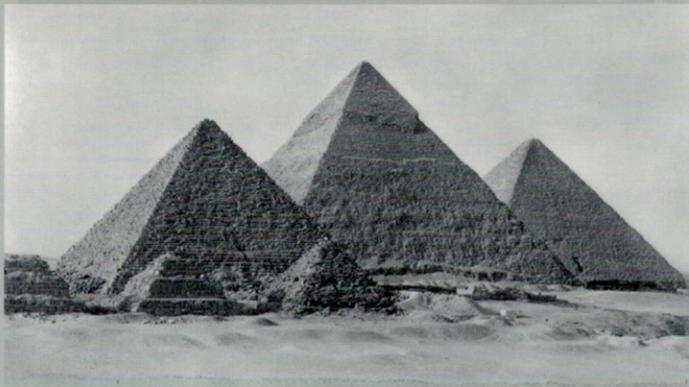


**von Gizeh ...**



**... bis DESY**

**5000 Jahre angewandte Geometrie**

**9. Symposium zur Vermessungsgeschichte  
14.02.2005**

*Herausgegeben von Kurt Kröger*



**FÖRDERKREIS VERMESSUNGSTECHNISCHES  
MUSEUM E.V.**

**Band 35 Schriftenreihe des Förderkreises  
Vermessungstechnisches Museum. Jahresausgabe 2005**

Titelbilder auf der Vorderseite

Links: Die Pyramiden von Gizeh

Rechts: Graphisch gestaltete Computersimulation der Teilchenerzeugung  
in einem Beschleuniger (Higgs-Teilchen). Mit freundlicher Genehmigung  
des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY, Hamburg 2005.

# **Von Gizeh bis DESY**

## **5000 Jahre angewandte Geometrie**

9. Symposium zur Vermessungsgeschichte in Dortmund  
am 14.02.2005 im Museum für Kunst und Kulturgeschichte

Herausgegeben von Kurt Kröger

Veranstalter: Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e.V.

2005

Verlag Chmielorz GmbH – Wiesbaden

ISBN 3-87124-322-1

© 2005 Verlag Chmielorz GmbH, Marktplatz 13, 65183 Wiesbaden,  
Telefon: 0611/36098-0, Telefax: 0611/301303,  
Internet: [www.chmielorz.de](http://www.chmielorz.de), E-Mail: [info@chmielorz.de](mailto:info@chmielorz.de)  
Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen,  
der photomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten.

Druck: Druckerei Chmielorz GmbH, Ostring 13, 65205 Wiesbaden.  
Printed in Germany

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zum Geleit</b>	7
<i>Volker Schmidtchen</i> , Dortmund Die Pyramiden von Gizeh	9
<i>Herman Kienast</i> , München (früher Athen) Die Vermessung des Tunnels des Eupalinos Fakten und Thesen	17
<i>Klaus Grewe</i> , Bonn Vermessungspräzision beim Bau antiker Aquädukte	29
<i>Erich Siems</i> , Niedernhausen Erste Eisenbahnen – nicht ohne Feldmesser	53
<i>Wilfried Schwarz</i> , Weimar Neue messtechnische Entwicklungen bei DESY für das Zukunftsprojekt TESLA	67
<b>Anschriften und Autorenverzeichnis</b>	77

## Zum Geleit

*Das 9. Dortmunder Symposium hat sich das Ziel gesetzt, anhand von baugeschichtlich relevanten Objekten von der Antike bis in die Neuzeit Spuren der praxisorientierten Geometrie aufzuzeigen.*

*Inwieweit haben es Kenntnisse und Beherrschung der Lehrsätze der Geometrie möglich gemacht – und machen es noch –, Bauwerke und technische Anlagen von der Idee des Gestaltens in praktikable Funktionalität umzusetzen. Was ist z. B. die Idee eines Physikers wert, wenn er niemanden findet, der die Forderung, eine bestimmte Bahngeometrie beim Teilchenbeschleuniger einzuhalten in die Praxis umsetzt, damit sein Experiment aussagekräftig ist? Ähnlich waren die Verhältnisse beim Bau der unterirdisch verlaufenden Wasserleitung auf der Insel Samos. Auch hier musste jemand gefunden werden, der über soviel Kenntnis der Geometrie verfügte, dass der Bau im Gegenortverfahren glückte.*

*Der Förderkreis hat für dieses Symposium Referenten gewinnen können, die in ihrem jeweiligen Thema „zu Hause“ sind.*

*Prof. Dr. Volker Schmidtchen hat schon anlässlich der 25-Jahr-Feier des Förderkreises über die Pyramiden von Gizeh referiert.*

*Prof. Dr. Hermann Kienast war bis zu seiner Pensionierung 2. Direktor des Deutschen Archäologischen Instituts in Athen und befasst sich seit vielen Jahren mit dem Tunnel des Eupalinos auf Samos.*

*Dr. Klaus Grewe ist Mitarbeiter des Rheinischen Amtes für Bodendenkmalpflege in Bonn. Er hat in zahlreichen Veröffentlichungen über den Bau und die Trassierung römischer Wasserleitungen berichtet. Er gilt als ausgezeichnete Fachmann auf diesem Gebiet.*

*Dr.-Ing. Erich Siems ist anerkannter „Eisenbahner“ und hat sich eingehend mit der Planung und dem Bau der ersten Eisenbahnen in Deutschland befasst.*

*Prof. Dr.-Ing. Willfried Schwarz, selbst Lehrstuhlinhaber an der Bauhaus-Universität in Weimar, war viele Jahre Mitarbeiter beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Er ist den Förderkreis-Mitgliedern noch gut in Erinnerung, hat er doch anlässlich der Mitgliederversammlung 1998 in Dortmund bereits über DESY referiert.*

*Es ist das Bestreben des Förderkreises, dass die Vorträge nicht nur zu hören sind (es kann auch mitdiskutiert werden), sondern dass sie anschließend auch in gedruckter Form vorliegen.*

*Den Referenten gebührt Dank, dass sie ihre Manuskripte druckfertig zur Verfügung gestellt haben.*

*Dank auch Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge für die ausgezeichnete Moderation des Symposiums. Die Mitglieder erhalten diesen Band als Jahressgabe.*

*Dr. Kurt Kröger*

## Der Bau der Pyramiden von Gizeh

### Reflexionen zu einer nicht nur technischen Problematik

„Der Mensch fürchtet die Zeit. Die Zeit jedoch fürchtet die Pyramiden.“ Dieses arabische Sprichwort findet sich öfters in Reiseprospekten über Ägypten, bleibt aber zumeist unkommentiert und erscheint lediglich als eine Art geheimnisumwitterter Werbespruch. Es soll wohl die Dauerhaftigkeit dieser zweifellos gewaltigen frühen technischen Höchstleistungen des Menschen verdeutlichen, die manifest gewordene Unabhängigkeit vom Verlauf der Zeiten, dem ansonsten jedes menschliche Leben unterliegt. Trotz der anderen Stätten mit den schon in der Antike zu „Weltwundern“ erkorenen Bauwerken sind es gerade die Pyramiden auf dem Plateau von Gizeh bei Kairo, die diesen Begriff angemessen erscheinen lassen.

Bei den Pyramiden handelt es sich um eine einzigartige touristische Attraktion, darüber weit hinaus aber immer noch um ein erstrangiges Forschungsfeld für vielfältige wissenschaftliche Disziplinen und leider auch um eine Spielwiese für selbsternannte „Experten“, für pseudoreligiöse Phantasten, für UFO-Gläubige und andere merkwürdige Zeitgenossen. Die vielen, trotz intensiver Forschung noch offenen Fragen geben immer wieder Anlass für diverse Theorien, für spekulative Vermutungen über rätselhafte Details oder angebliche Geheimnisse, über mit den Bauten in Verbindung gebrachte Mythen und Legenden, über Korrekturen bisheriger Datierungen oder Verknüpfungen mit nicht näher bestimmbar prähistorischen Ereignissen. Vor diesem Hintergrund stellt sich wie von allein letztlich eine zentrale Frage: Was ist eigentlich das Problem?

Goethe hatte seinerzeit die Intention zum Bau der Pyramiden als „... die unerhörteste Idee, die architektonisch nicht zu übertreffen ist“ bezeichnet, und dieser Wertung schlossen sich in der Folge viele Betrachter an, bis die monumentalen architektonischen Zeugnisse des Industriezeitalters mit Abmessungen, die alle bis dahin erreichbaren Dimensionen sprengten, neue Maßstäbe setzten. Bis zur Fertigstellung des Eiffelturms am 30. März 1889 galt die Pyramide des Pharaos Chufu (griech. Cheops) in Gizeh mit ursprünglich 146,6 Metern sogar als das höchste Bauwerk der Erde, das mit dem größten Volumen ist sie bis heute, sieht man einmal von der Großen Chinesischen Mauer ab.

Wie die Menschen in Ägypten um die Mitte des dritten Jahrtausends v. Chr. die Pyramiden beurteilt haben, wissen wir nicht. Das bislang früheste Dokument einer solchen Einschätzung stammt von Herodot (485–425 v. Chr.) aus dem kleinasiatischen Halikarnassos in der Nähe des heutigen Touristenzentrums Bodrum an der türkischen Westküste. Diesen Zeitgenossen des großen Athener Staatsmanns Perikles, mit dem er übrigens gut bekannt war, würde man heute wohl als Weltreisenden, als Geographen, Ethnologen und mit Einschränkungen auch als Historiker bezeichnen. Cicero hat ihn sowohl als „Vater der Geschichtsschreibung“ wie auch als „Erzähler zahlloser Märchen“ bezeichnet. In seinen „Historien“ berichtet Herodot über eigenen Augenschein und über das, was er in den von ihm bereisten Ländern von den dortigen Menschen erfuhr. So sind auch seine Bemerkungen über Ägypten, das zur Zeit seines Besuchs im Jahre 448 v. Chr. unter persischer Herrschaft stand, und seine Aussagen über die Pyramiden ein Konglomerat von eigenen Eindrücken, Angaben einiger Priester aus Memphis und teilweise abenteuerlich anmutenden Hörensagen-Geschichten. Verwertbare Informationen über die damalige Bautechnik finden sich darin nicht. Zwar erwähnt Herodot mechanische Konstruktionen, mit deren Hilfe die ungeheuren Steinmassen aufeinander geschichtet worden sein sollen, doch liefert er keinen Hinweis, wie diese Geräte ausgesehen und funktioniert haben könnten. Rein spekulativ sind auch seine Angaben über die Zahl der Arbeitskräfte und die Dauer der Baumaßnahmen.

Weitere Autoren aus der griechisch-römischen Antike erwähnten zwar die Pyramiden, lieferten aber nur unterschiedliche Deutungen ihrer Zweckbestimmung. Diodor und Strabon, zwei

Zeitgenossen Caesars, bezeichneten die Bauten als Gräber der Pharaonen, und Plinius d. Ä. interpretierte sie als gigantische Beschäftigungsmaßnahmen für das Volk während der Monate der jährlichen Nilüberschwemmung, wenn keine Feldbestellung möglich war.

Wer von uns einmal selbst vor Ort war, ist trotz der beträchtlichen Schäden an den Pyramiden von Gizeh beeindruckt von ihrer Monumentalität. Viereinhalb Jahrtausende nach ihrer Errichtung trotzen sie immer noch unbeeindruckt der Zeit. Spuren hinterlassen hat vor allem der Mensch, ob als Grabräuber, als Steinplünderer oder als Wissenschaftler. Pyramiden gibt es in unterschiedlichen Ausführungen in mehreren Landstrichen Ägyptens. Sprechen wir von „den Pyramiden“, dann sind damit im öffentlichen Bewusstsein meistens die drei Bauwerke von Gizeh gemeint, unerreicht in ihrer Größe und Perfektion. Sie sind nach aktueller wissenschaftlicher Datierung für drei Pharaonen der IV. Dynastie (2614–2479 v. Chr.) innerhalb von nicht einmal 100 Jahren erbaut worden:

- Chufu (Cheops) 2579–2556 v. Chr.
- Chaefre (Chephren) 2547–2521 v. Chr.
- Menkaure (Mykerinos) 2514–2486 v. Chr.

Die „Lücken“ zwischen diesen Regierungszeiten ergeben sich aus der in diesen Zeiträumen nachgewiesenen Herrschaft anderer Mitglieder der königlichen Familie: Auf Cheops folgte für neun Jahre zunächst dessen ältester Sohn Djedefre, bevor der Zweitgeborene Chephren Pharaon wurde. Djedefre hatte sich im heutigen Abu Rowash seine Begräbnisstätte ausgesucht. Die dortige Pyramide wurde allerdings nicht fertig gestellt. Nach Chephren kam zunächst Ba'ka (Bicheris), ein Sohn Djedefres auf den Thron, der aber nach sieben Jahren starb und dessen Grabmal ebenfalls nicht auf dem Plateau von Gizeh, sondern beim Dorf Zawijet al-Aryan errichtet wurde. Er ist dort aber nachweislich nicht bestattet worden. Weder seine sterblichen Überreste noch Grabbeigaben konnten bislang gefunden werden.

Bei den berühmten drei großen Pyramiden von Gizeh handelt es sich demnach um die monumental Grabstätten von Vater, Sohn und Enkel. Regiert haben Cheops 23 Jahre, Chephren 26 Jahre und Mykerinos 28 Jahre. Geht man davon aus, dass der Auftrag zum Bau der jeweiligen Pyramide schon bei Regierungsantritt erteilt wurde, dann ist damit auch die ungefähre jeweilige Bauzeit gegeben. Es ist durchaus möglich, dass bei vorzeitigem Tod des Pharaos sein direkter Nachfolger zusätzlich zum Beginn der Bauarbeiten für die eigene Pyramide noch die des vergöttlichten Vorgängers fertig stellte.

Pyramiden als königliche Begräbnisstätten sind über achteinhalb Jahrhunderte lang (zwischen 2635 und 1780 v. Chr.) an insgesamt 11 Orten in Unterägypten errichtet worden. Aber weder vor noch nach der IV. Dynastie, die eine frühe Phase der ägyptischen Hochkultur repräsentiert, sind Bauten wie die in Medum und Daschur (3 Pyramiden von Pharaon Snofru, dem Vater von Cheops) und Gizeh entstanden. Sie stellen den Höhepunkt des Pyramidenbaus dar und gelten bis heute nicht nur als Spitzenleistung von Planung und Durchführung eines bewunderungswürdigen Bauprojekts, sondern ebenso als Manifestation eines tief empfundenen Jenseitsglaubens, der hier symbolhaft Unvergängliches darstellen wollte: den Glauben an eine göttliche Ordnung und die Hoffnung, auch jenseits des Todes an ihr teilzuhaben.

Unter technischen Aspekten betrachtet haben die Pyramiden, das einzige erhaltene Weltwunder der Antike, noch für uns heute viel Wunderbares und Rätselhaftes. Vertraut mit der vielfältigen Nutzung von Technik einer industriell hoch entwickelten Zivilisation, stehen wir staunend vor kaum glaublichen technischen Leistungen einer Kultur vor viereinhalbtausend Jahren, die aus unserer Sicht und nach der herkömmlichen Einteilung historischer Epochen noch dem Neolithikum zugerechnet wird. Wissenschaftler wie Laien sind gleichermaßen beeindruckt. Während sich die Wissenschaft jedoch im Rahmen ihrer Forschungen bemüht, mehr Aufschluss über die vielen noch nicht eindeutigen Befunde zu gewinnen, wagen sich immer wieder selbst

ernannte Experten an die komplexe Materie, um dann mit geradezu abenteuerlichen Konstrukten Interpretationsversuche zu starten. Sie finden allerdings durchaus ihr unkritisches und selbst für abstruse Theorien schnell zu begeisterndes Publikum.

Vielen Menschen unserer Zeit fällt es offenbar nicht leicht, die gigantisch erscheinenden steinernen Belege für präzise Planung, für hohes technisches Können (ohne den uns geläufigen Einsatz von Maschinen) und für effiziente Projektorganisation schon um die Mitte des dritten Jahrtausends v. Chr. zu akzeptieren. Die Monumentalität der Pyramiden, in Beziehung gesetzt zum belegbaren technischen Instrumentarium ihrer Entstehungszeit, sorgt für Zweifel an den schon gesicherten archäologischen Befunden und gibt Raum für Spekulationen. Hinzu kommen die vielen tatsächlich noch offenen Fragen, und dies alles zusammengenommen sorgt dann für die verbreitete Bereitschaft, wirkungsmächtige „Geheimnisse“ zu unterstellen oder gar neue Datierungen mit Blick auf eine viel ältere, aber angeblich untergegangene Zivilisation, bzw. auf das Wirken Außerirdischer zu behaupten.

Die heute vielerorts verbreitete Neigung, sich an „Rekordmarken“ zu berauschen, tut ein Übriges, führt im Ergebnis zur Abkehr von der als zu profan empfundenen Realität und wird häufig zum Auslöser für begeisterte Amateurforschung, die jenseits der etablierten Wissenschaft „endlich die fantastische Wahrheit“ findet. Greifen wir nur ein Beispiel heraus: Napoleons Militäringenieur und die zu seinem Expeditionskorps für den Feldzug gegen die britische Kolonie Ägypten gehörenden Wissenschaftler haben 1798 angesichts der Pyramiden von Gizeh berechnet, dass man mit deren Masse an Steinen eine Mauer um ganz Frankreich hätte bauen können. In vielen modernen Reiseführern finden sich vergleichbare Spielereien wie etwa die Feststellung, dass man mit den ca. 2,5 Millionen Steinblöcken der Großen Pyramide des Cheops alle während der vergangenen 1000 Jahre in Deutschland gebauten Gotteshäuser noch einmal errichten könnte, oder dass auf der Grundfläche allein dieser Pyramide die fünf größten Kirchen der Welt Platz finden könnten. Das errechnete Gewicht des gigantischen Grabmals beträgt ca. 6 Millionen Tonnen und damit das 35fache des Kölner Doms etc. etc. Doch was haben wir von solchen „Wissenssplittern“?

In diesem Zusammenhang sei auch an die verbreitete Zahlenmystik erinnert, die man aus der Cheopspyramide abgeleitet hat, und mit der Esoteriker und Astrologen ihre Geschäfte machen. Der Umfang der Basis der Cheopspyramide (Addition aller vier Seitenlängen) entspricht dem Umfang eines Kreises mit dem Radius der ursprünglichen Pyramidenhöhe. Ob dies Absicht der Baumeister war oder reiner Zufall ist, sei dahingestellt, hat aber immer wieder Anlass für diverse Interpretationen geboten.

Wenn man diesen Umfang der Pyramide durch die doppelte Länge ihrer Höhe teilt, erhält man annähernd den Wert der Kreiszahl  $\pi$ . Und? Das besagt keineswegs, dass die ägyptischen Mathematiker des dritten Jahrtausend v. Chr. schon die Kreiszahl kannten oder gar mit ihr rechneten. In jedem Bauwerk auf der Welt lassen sich eine Vielzahl mathematischer Beziehungen nachweisen, auch wenn weder Architekt noch Statiker zuvor daran gedacht haben. Gleiches gilt für das behauptete Verhältnis des Flächeninhalts der Pyramidenbasis zum Flächeninhalt des Mittelschnitts, das ebenfalls zu einem, allerdings etwas anderen Näherungswert für die berühmte Kreiszahl führt.

Auch der Goldene Schnitt wird immer wieder in der Cheopspyramide entdeckt. Die Teilung einer Strecke in zwei Abschnitte auf eine Weise, dass sich der kleinere zum größeren Abschnitt der Strecke verhält wie der größere zur Gesamtstrecke (ausgedrückt durch die Konstante  $\phi$ ), erscheint bei der Pyramidenkonstruktion zwangsläufig. Es gibt keinen Beleg, dass es Absicht der Architekten gewesen sein könnte. Dem widerspricht auch, dass die Cheopspyramide keinen Modellcharakter hatte. Selbst die unmittelbaren Nachfolgebauwerke in Gizeh, die Pyramiden des Chephren und des Mykerinos, weisen andere Maße und Proportionen auf. Ein Vergleich dieser und auch anderer Pyramiden in Daschur, Abusir und Sakkara macht vielmehr deutlich, dass die

Architekten offenkundig immer einfache ganze Zahlengrößen für die Abmessungen gesucht haben, womit sie leichter rechnen konnten.

Lassen wir die unwissenschaftlichen und oft auch untauglichen Deutungsversuche des Phänomens „Ägyptische Pyramiden“ einmal beiseite, so müssen wir gleichwohl feststellen, dass es noch erheblichen Forschungsbedarf gibt. Das betrifft auch die virulenten Fragen der Bautechnik. Trotz aller bisherigen Untersuchungen und einer umfangreichen Fachliteratur wissen wir bis heute nicht genau, wie die Pyramiden gebaut worden sind. Die damaligen Baumeister haben keine Aufzeichnungen hinterlassen, und Berichte wie der des Herodot, der wie die anderen späteren Autoren kein Baufachmann war und das Ganze im zeitlichen Abstand von immerhin 2000 Jahren zum Thema machte, können keinen näheren Aufschluss geben. Wir sind auch heute noch auf Hypothesen angewiesen, die zwar unter Maßgabe wissenschaftlicher Kriterien entwickelt werden, aber eben keine unumstößlichen Erkenntnisse bedeuten.

So geht es demnach stets darum, die sicheren Befunde zu bewahren und in Relation zu neueren Entdeckungen zu setzen oder ältere Ergebnisse anhand neuer technischer Methoden zu überprüfen und eine Einordnung in den Gesamtzusammenhang vorzunehmen. Das muss keineswegs den Archäologen und Ägyptologen überlassen bleiben. Glücklicherweise sorgt die Attraktivität der Thematik dafür, dass sich zunehmend Wissenschaftler anderer Fachdisziplinen wie auch Praktiker dafür interessieren und ihre Spezialkenntnisse oder technische Neuentwicklungen einbringen können. Damit lassen sich immer wieder auch bisherige Einschätzungen, die bestimmte Aspekte noch nicht berücksichtigt hatten, korrigieren. Außerdem muss auch hier der Grundsatz gelten, dass eine Arbeitshypothese oder ein umfangreicheres Theoriekonstrukt so lange für die Forschung akzeptabel sind, bis ihre Irrelevanz offenkundig wird. Aufschlussreich sind immer auch Experimente, mit denen Teilaspekte modellhaft praktisch untersucht werden können und zu entsprechenden Erfahrungen in der Praxis wie häufig auch zu übertragbaren Ergebnissen führen.

Nehmen wir als Beispiel die Cheopspyramide, die als größtes jemals errichtetes Bauwerk dieser Art am häufigsten und intensivsten erforscht worden ist und auch noch wird: Es ist hier nicht der Ort, die in der reichhaltigen und qualifizierten Fachliteratur dokumentierten Ergebnisse noch einmal zu referieren. Es gilt vielmehr, aus ihrer Fülle einige exemplarisch herauszuziehen, um im Tenor dieses Beitrags die gesicherten wie die hypothetischen Aspekte zu verdeutlichen. Gliedern lässt sich der Entstehungsprozess in drei Phasen: Planung und technische Vorbereitung, Gewinnung und Transport des Baumaterials sowie Errichtung des Bauwerks. Wie bereits erwähnt, hat nach jüngstem Stand der Forschung Pharao Cheops 23 Jahre regiert. Dieser Zeitraum stand für alle drei Phasen zur Verfügung. Das aber ist von heute und vom Ergebnis her gedacht. Niemand im Alten Reich Ägyptens hat vor 45 Jahrhunderten gewusst, wie lange der Pharao leben würde, auch er selbst nicht. Welcher Zeitplan lag also dem Projekt zugrunde, oder konnte sich Cheops sicher sein, dass seine Söhne als Nachfolger auf jeden Fall das Grabmal des Vaters fertig stellen würden?

Die Pyramide weist einen quadratischen Grundriss auf. Die Ostseite gab die Basislänge von 230,369 m vor. Professor Rainer Stadelmann, mehr als drei Jahrzehnte wissenschaftlicher Direktor des Deutschen Archäologischen Instituts in Kairo und international ausgewiesener Pyramidenforscher, hat die Messgenauigkeit der Seitenlängen am Pyramidenfuß und die bei der Fixierung der rechten Winkel ermittelt. Die Längen differierten nur um 0,9 bis 3,2 cm, und die vier Winkel wichen nur um 0,21 bis 0,97 Bogenminuten voneinander ab. Außerdem ist es den Baumeistern gelungen, den gesamten Baukörper außerordentlich präzise auf die Nord-Süd-Achse auszurichten. Wie das vermessungstechnisch gelöst worden ist, bleibt bislang ebenso unklar wie die Nivellierung der Basisfläche, auf der sich ein Fels Hügel befindet. Dieser Hügel wurde nicht abgetragen, sondern in den Bau integriert. Er konnte an fünf verschiedenen Stellen und in unterschiedlichen Höhen nachgewiesen werden. Seine Abmessungen sind leider exakt nicht zu ermitteln, und daher lässt sich auch nicht die durch ihn bedingte Ersparnis an Baumaterial

bezziffern. Annahmen reichen von 15 bis über 25 Prozent. Das hätte entsprechende quantitative Entlastungen beim Brechen und Bearbeiten der Steine wie beim Transport bedeutet und auch eine erhebliche Ersparnis an Bauzeit gebracht.

Die Kalksteinbrüche für die Cheopspyramide konnten in einer Entfernung von 300 bis 600 Metern südlich der Baustelle nachgewiesen werden. Die für die Grabkammer verwendeten Blöcke aus Rosengranit stammen aus Assuan und sind mit Schiffen auf dem Nil bis zum eigens für den Pyramidenbau angelegten Hafen transportiert worden. Dr. Zahi Hawass, Generalsekretär der ägyptischen Altertümerverwaltung und Chefarchäologe auf dem Gizeh-Plateau, hat seit 1990 im Westen der Pyramide den im 5. Regierungsjahr des Pharaos Cheops angelegten Friedhof der Arbeiter und ihrer Vorgesetzten ausgegraben. Dabei wurden Inschriften freigelegt, die eindeutige Arbeitsverträge darstellen und belegen, dass es sich beim Pyramidenbau keineswegs um Sklavenarbeit gehandelt hat. Gefunden wurden auf dem Plateau auch Grundmauern von Häusern sowie von Werkstätten, Küchen und Bäckereien. Aus alledem lassen sich Rückschlüsse auf die Gesamtzahl der Arbeitskräfte ziehen. Unter Berücksichtigung des auf der Baustelle überhaupt nur verfügbaren und bei wachsender Pyramide immer geringer werdenden Raums, der bislang nachgewiesenen Wohnsiedlungen sowie der realistischen Einschätzung von Versorgungsmöglichkeiten wie der Lösung hygienischer Fragen mussten die in den antiken Berichten überlieferten horrenden Zahlen (100.000 und mehr) der am Bau beteiligten Baumeister, Aufseher, Steinbrecher, Steinmetzen, Polierer und Transportarbeiter drastisch relativieren lassen. Ausgegangen wird heute von maximal 10.000 bis 12.000 Personen und ihren Familien. Diese Arbeitskräfte verteilten sich auf die Steinbrüche, den Hafen und auf die Baustellen am Taltempel, am Aufweg zur Pyramide und am Totentempel.

Da steht sie nun, die Große Pyramide und kann auch heute noch vermessen werden. Aus den feststellbaren Daten des Gesamtkörpers wie vieler einzelner Steinblöcke lassen sich annähernd (mit Vorbehalt wegen der nicht genau bekannten Größe des Felshügels) die Gesamtzahl der Steine und auch ihr Gewicht ermitteln. Damit sind Größenordnungen gegeben, die in Relation zur Bauzeit gesetzt werden können und demzufolge sogar die Bestimmung der Tagesarbeitsleistung ermöglichen. In der Literatur schwanken die Angaben geringfügig, doch im Mittelwert wird deutlich, dass selbst bei den anzunehmenden mehr als zwei Millionen Steinquadern die Aufgabe durchaus mit den damals verfügbaren technischen Mitteln bewältigt werden konnte. Das gilt allerdings nur für die Annahme einer das ganze Jahr über und nicht nur während der Nilüberschwemmung erfolgenden Arbeit. Doch die Behauptung einer nur dreimonatigen Arbeitsphase pro Jahr geht auf die offensichtlich falschen Informationen zurück, die Herodot weitergegeben hat. Inschriften von Arbeiterkolonnen an der von Cheops' Vater Snofru in Daschur erbauten Roten Pyramide besagen, dass 30 Steinlagen im unteren Bereich dort eine Bauzeit von 4 Jahren erforderten. Umgerechnet auf die 210 Steinlagen der erheblich größeren Cheopspyramide und einen entsprechenden Zeitbedarf ergibt eine nüchterne Analyse, dass die Bauaufgabe ohne weiteres innerhalb der 23-jährigen Regierungszeit des Pharaos bewältigt werden konnte. Der Felshügel auf dem Plateau, über dem die Pyramide errichtet wurde, machte eine Reihe von Lagen überflüssig und führte ebenso zu Zeitgewinn wie der bei wachsender Höhe immer geringer werdende Materialbedarf für jede Lage.

Berücksichtigt werden muss noch ein weiterer Aspekt: Taltempel, Aufweg und Totentempel an der Pyramide sowie die „Gräber“ für die Sonnenbarken des Pharaos als eigene Bauabschnitte innerhalb des Komplexes. Doch selbst diese zusätzlichen Baumaßnahmen lassen sich in den im vorgegebenen Zeitraum zu bewältigenden Auftrag integrieren. Anzunehmen ist übrigens auch, dass es im Rahmen der Bauorganisation zu flexiblen Arbeitsregelungen gekommen ist. Aufseher und Steinmetzen wie auch einige Spezialisten in den Steinbrüchen werden über einen längeren Zeitraum beschäftigt worden sein, während man für die körperlich sehr anstrengenden Transportdienste wahrscheinlich in regelmäßigem Rhythmus einer Art von Arbeitsdienst kräftige junge Männer zeitlich befristet unter Vertrag nahm.

Nicht zufrieden stellend beantwortet ist bis heute die Frage, wie die Bauarbeiter die über zwei Millionen Steinquadern der Pyramide aufeinander gestapelt haben. Die älteren Rampenhypothesen mussten wegen der Verhältnisse des Platzes oder aus physikalischen Gründen verworfen werden. Eine Rampe bis zur Spitze der Cheopspyramide hätte beispielsweise weit mehr Material zur Anschüttung erfordert als die Pyramide selbst und wegen des überhaupt nur möglichen Steigungswinkels der Transportbahn länger sein müssen als der am Ort verfügbare Raum dafür. Voraussetzung für die Transportfunktion einer solchen Rampe wäre nämlich eine Steigung, die unterhalb des Reibungswinkels für die jeweiligen Steinblöcke gelegen hätte. Das ist der Winkel, bei dem ein Körper bei Stillstand schon aufgrund seiner Masse von allein wieder abrutscht. Bezogen auf die Cheopspyramide hätte eine solche Rampe mindestens vier Meter breit und mehrere Kilometer lang sein müssen. Die Steinbrüche für das Kernmauerwerk aber lagen maximal 600 Meter südlich des Bauplatzes. Nur das Material für die glatte Verblendungsschicht aus hellem Tura-Kalkstein kam aus Brüchen jenseits des Nils, musste mit Booten über den Fluss gebracht und dann den leicht ansteigenden Hang hinauf bis zur Baustelle geschleift werden. Vor Verlegen jeder neuen Steinlage der Pyramide hätte übrigens zunächst wieder die Rampe erhöht und während dessen die Baumaßnahme unterbrochen werden müssen. Andere Hypothesen sehen eine spiralförmig um den Baukörper herum führende Rampe bzw. mehrere jeweils an den Seiten angelegte kleinere Rampen vor. Eine auch immer wieder ins Spiel gebrachte Innenrampe scheidet als Lösung schon wegen der viel zu steilen Steigung und wegen des Felshügels aus. Bei allen diesen Modellen bleiben die genannten Grundprobleme bestehen. Generell ist zu bemerken, dass es für derart aufwändige Hilfskonstruktionen keinerlei archäologische Hinweise gibt. Allein die Zeit zum Abbau einer großen oder mehrerer kleiner Rampen hätte wiederum Jahrzehnte benötigt.

Herodot hat von „Maschinen“ berichtet, ohne aber irgendeinen Hinweis auf deren Beschaffenheit zu geben. Wahrscheinlich wussten seine Informanten es auch nicht besser. So gibt es nach wie vor viel Raum zur Spekulation, und der wird vor allem von Hobbyägyptologen weidlich genutzt. Interessant und überprüfenswert erscheinen jedoch die in jüngster Zeit von Ingenieuren wie Dr. Wirsching aus Hamburg vorgebrachten Lösungsansätze für den Arbeitsprozess auf der Baustelle: Der Transport des Materials auf Gleitschritten von den Steinbrüchen oder vom Nilhafen zum Bauplatz gilt dank vieler archäologisch fundierter Hinweise als machbar. Wie aber ging es dann dort in die Höhe? Es scheint festzustehen, dass die Verkleidungsblöcke bei jeder Steinlage sofort angebracht wurden, so dass auf den vier Seiten der Pyramide eine glatte schräge Fläche mit einem Neigungswinkel von fast 52 Grad entstand.

Vorgeschlagen wird nun eine Methode, bei der jeder Steinblock auf einer Gleitunterlage hochgezogen werden konnte, indem zwei an ihm befestigte Zugseile über vertikale Umlenkrollen auf der jeweils obersten Plattform liefen. Am Ende der Seile befanden sich die Zugmannschaften. Nach Berücksichtigung aller physikalischen Gesetzmäßigkeiten würden bei dieser Methode pro Block von ca. 2,5 Tonnen Gewicht nur etwa 20 Mann in zwei Zehnergruppen, bei größeren und schwereren Blöcken entsprechend mehr Männer, Seile und Umlenkrollen benötigt. Die Zugteams gingen unter Einsatz ihres Körpergewichts auf der Fläche abwärts und zogen dank der Umlenkrollen den Block aufwärts bis zur gerade erreichten Arbeitsplattform. Einen 2,5 Tonnen wiegenden Steinblock anzuheben, dürfte auch mit 20 Mann kaum gelingen, ihn aber in der beschriebenen Weise auf einer schiefen Ebene nach oben zu ziehen, ist kein Problem von Kraft. Allerdings sei bei dieser Lösung einmal dahingestellt, wie viel Mut von den Männern der Zugmannschaften aufgebracht werden musste, wenn sie sich in 20, 40 oder 100 Meter Höhe ins Geschirr legten und auf der geglätteten, mehr als 50 Grad steilen Seitenfläche der Pyramide hinabstiegen. Ein Ausrutschen konnte den Tod bedeuten.

Der Verfasser möchte sich eine Anregung nicht versagen: Blieb die Zugmannschaft am Boden vor der jeweiligen Pyramidenseite und wollte dennoch das gleiche Prinzip nutzen, dann wurden sehr viel mehr Männer, längere Seile und zusätzliche, am Fuß der Pyramidenseite horizontal angeordnete Umlenkrollen benötigt. Die erstgenannte Lösung scheint bei größeren Höhen des

Baukörpers unter Unfallaspekten problematisch, die zweite schlüssig und auch praktikabel. Außerdem ermöglicht diese Methode das gleichzeitige Arbeiten auf allen vier Seiten des Baukörpers. Wenn die jeweilige oberste Plattform der Lage auf Lage in die Höhe wachsenden Pyramide kleiner wird, reichen auch zwei und zum Schluss eine dieser simplen Zugkonstruktionen aus. Für Umlenkrollen der genannten Art gibt es übrigens archäologische Befunde.

Das mag zur exemplarischen Verdeutlichung einiger Deutungsansätze beim Thema „Bau der Pyramiden“ genügen. Greifen wir die eingangs gestellte Frage nach dem eigentlichen Problem auf, dann lässt sich Folgendes feststellen: Die Quellenlage ist dünn. Die frühesten Berichte stammen von Autoren, die keine bautechnischen Fachleute waren und zu Missverständnissen auch noch subjektive Wertungen fügten, die über Jahrhunderte falsche Vorstellungen tradiert haben. Es gibt die schwierige Rolle der Fachwissenschaften zwischen immenser, aber unterfinanzierter Aufgabe und nur sehr selten spektakulären Funden oder Erkenntnissen auf der einen und besserwisserischen „Amateurforschern“ auf der anderen Seite. Dann ist da noch der Massentourismus, der die wissenschaftliche Arbeit vor Ort stört und einschränkt, von dem der ägyptische Staat aber in erheblichem Maße abhängig ist. Hier gilt es, immer wieder einen Kompromiss zu finden.

Das Hauptproblem aber sind wir selbst! Unser Technikverständnis ist vom Maschinenzeitalter und seinen weiteren Entwicklungen bis heute geprägt, unser Lebensrhythmus von der modernen Arbeitswelt mit den sozialen Errungenschaften und den lieb gewordenen Stereotypen des Freizeitverhaltens. 38,5-Stunden-Woche, regelmäßiger Jahresurlaub, optimierte medizinische Betreuung und die kaum noch überschaubare Vielfalt von Unterhaltungsangeboten erschweren unser Verständnis für harte körperliche Arbeit, Gehorsam, Geduld, tiefe religiöse Überzeugung und Begeisterung für eine gigantische Gemeinschaftsaufgabe. Aber in solche Umstände müssen wir uns hineinversetzen können, wenn wir die Leistungen dieser Menschen vor viereinhalb Jahrtausenden würdigen wollen. Es geht tatsächlich auch ohne Bagger, Kran, Schaufellader, Bulldozer und Lkw, aber es benötigt Zeit, viel Kraft und Schweiß und Durchhaltevermögen, vielleicht sogar eine Vision im Hinblick auf die Aufgabe. Könnten wir im Zuge einer Zeitreise einige Steinmetzen oder Transportarbeiter auf der Baustelle in Gizeh fragen, was sie dort gerade täten, dann würden einige vielleicht antworten, sie hauten den Stein zurecht, glätteten die Kanten oder hebelten den Block in seine Position, andere aber (die mit einer Vision und entsprechender Motivation) würden sagen: „Wir bauen eine Pyramide.“

Staunen dürfen wir, Respekt sollten wir empfinden, an Wunder müssen wir ebenso wenig glauben wie an Außerirdische. Aber zufrieden mit den bisherigen Ergebnissen brauchen wir nicht zu sein, solange noch offene Fragen ihrer Klärung harren. Die Versuche dazu sollten wir unterstützen, innerhalb wie außerhalb der etablierten Wissenschaften. Scharlatanerie entlarvt sich selbst, das ist keine Frage. Interessenten dürfen sich nicht abschrecken lassen, sondern sollten sich kundig machen. Gerade wissenschaftliche Laien haben oft beachtliche Ideen und diskussionswürdige Lösungsansätze zu bieten, wenn der Blick der Fachleute oft nicht über den berühmten Tellerrand hinausreicht. Unvoreingenommenheit kann der Schlüssel zu einer Problemlösung sein, und davon gibt es hinsichtlich des Baus der Pyramiden noch sehr viele.

Wer sich dafür und damit auch für die Kultur des alten Ägypten interessiert, wird sich fragen, was das Phänomen „Pyramiden“ für ihn persönlich bedeutet und wird dann die Antwort selbst finden.

## Die Vermessung des Tunnels des Eupalinos

### Fakten und Thesen

Der Tunnel des Eupalinos auf Samos gilt unangefochten als ein Meisterwerk der archaischen Ingenieurskunst. Bekannt durch die rühmende Beschreibung von Herodot (III 60) wurde in der Neuzeit nach dem seit langem verschütteten Monument gesucht, bis schließlich im Jahre 1882 die Mundlöcher wieder entdeckt wurden. Ein erster Bericht aus diesen Jahren machte den Tunnel der Fachwelt bekannt; seitdem fehlt er in keiner Abhandlung über die Anfänge der Naturwissenschaft, in keiner über die mechanischen Errungenschaften des Altertums. Der Tunnel des Eupalinos gilt als ein herausragendes Beispiel der technischen Großtaten der Menschheit schlechthin und fasziniert vor allem wegen der vermessungstechnischen Probleme, die er impliziert<sup>1</sup>.

Die Insel Samos liegt in der östlichen Ägäis und bildet zusammen mit Milet und Ephesos das Zentrum Ioniens, jener griechischen Provinz, in der Philosophie und Naturwissenschaft ihren Ursprung haben. Die Stadt Samos liegt im Südosten der Insel rings um ein natürliches Hafenbecken und entwickelte sich dank dieser günstigen Lage rasch zu einem wichtigen Handelszentrum, das in der archaischen Zeit – d. i. das 7. und 6. Jh. v. Chr. – eine einmalige Hochblüte erlebte. Um die damalige Bedeutung der Stadt zu ermessen, genügt es, Herodot zu lesen, der in seinem 3. Buch schreibt, dass er sich etwas ausführlicher mit den Samiern beschäftigt habe, weil sie die drei größten Bauwerke von ganz Hellas geschaffen hätten – nämlich den Tunnel, sodann eine Mole für den Hafen und schließlich den Tempel im Heiligtum der Hera, der Schutzgöttin der Insel.

Unsere Informationen über die Stadt Samos sind nach wie vor lückenhaft, zu zeigen ist aber, dass mit Beginn des 6. Jhs. eine sprunghafte Entwicklung einsetzte und mehrere Großprojekte realisiert wurden – eines davon eben jene Wasserleitung. Ob eine solch aufwändige Wasserversorgung wegen eines extremen Bevölkerungszuwachses notwendig wurde, auf einen Klimawandel, auf einen zunehmenden Lebensstandard oder einfach auf politischen Aktionismus zurückzuführen ist, lässt sich nicht beurteilen. Im Bereich der Stadt Samos jedenfalls gab es nur eine Quelle, durch die eine Versorgung langfristig und dauerhaft zu gewährleisten war, eine Quelle, die aber nicht nur außerhalb des Befestigungsringes entsprang, sondern auch jenseits eines Höhenrückens, der die Stadt nach Norden abschirmt. Um das Wasser dieser Quelle in die Stadt zu bringen, bedurfte es einer Wasserleitung, eines Projektes, für das es in der griechischen Welt bis dato keine Vorbilder gab. Die Leitung wurde nach unseren Untersuchungen in den Jahren um 550 v. Chr. in Angriff genommen, und es hat den Anschein, dass auf Samos tatsächlich die erste Anlage ihrer Art entstanden ist. Die Kenntnis von dieser Leitung verdanken wir ausschließlich dem Hinweis bei Herodot; von ihm wissen wir auch den Namen des Baumeisters, nämlich Eupalinos, Sohn des Naustrophos aus Megara.

Bei unvoreingenommener Betrachtung bietet die topographische Situation zwei Alternativen für eine solche Leitung – entweder um den Berg herum oder durch ihn hindurch. Eine Leitung um den Berg herum wäre durchaus realisierbar gewesen. Sie wäre allerdings anfälliger gewesen für Zerstörungen – natürlicher wie mutwilliger – und sie wäre natürlich auch länger geworden als eine Anlage mit Tunnel, die eine kürzere Verbindung bot. Ob diese Gründe ausschlaggebend waren für die Bevorzugung eines Tunnels, ist nicht zu entscheiden, mir scheint jedoch, dass man auch durchaus die Herausforderung gesucht hat. Der Bau eines Tunnels stellt jedenfalls eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe dar – nicht nur die Wasserleitung als solche, vor allem der Untertagebau des Tunnels ist eine Pionierleistung ersten Ranges.

<sup>1</sup> Die Wasserleitung des Eupalinos wurde vom Verf. mit allen Einzelheiten publiziert in der vom Deutschen Archäologischen Institut herausgegebenen Samos-Reihe (Band XIX, 1995). Die Kenntnis dieser Publikation wird hier vorausgesetzt

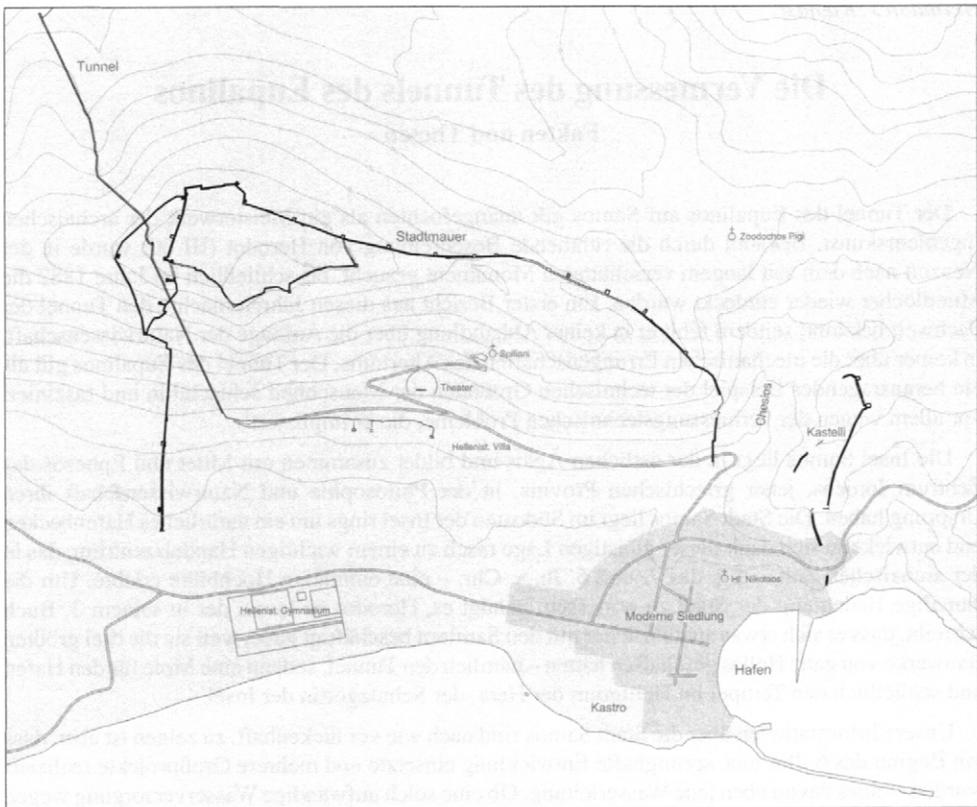


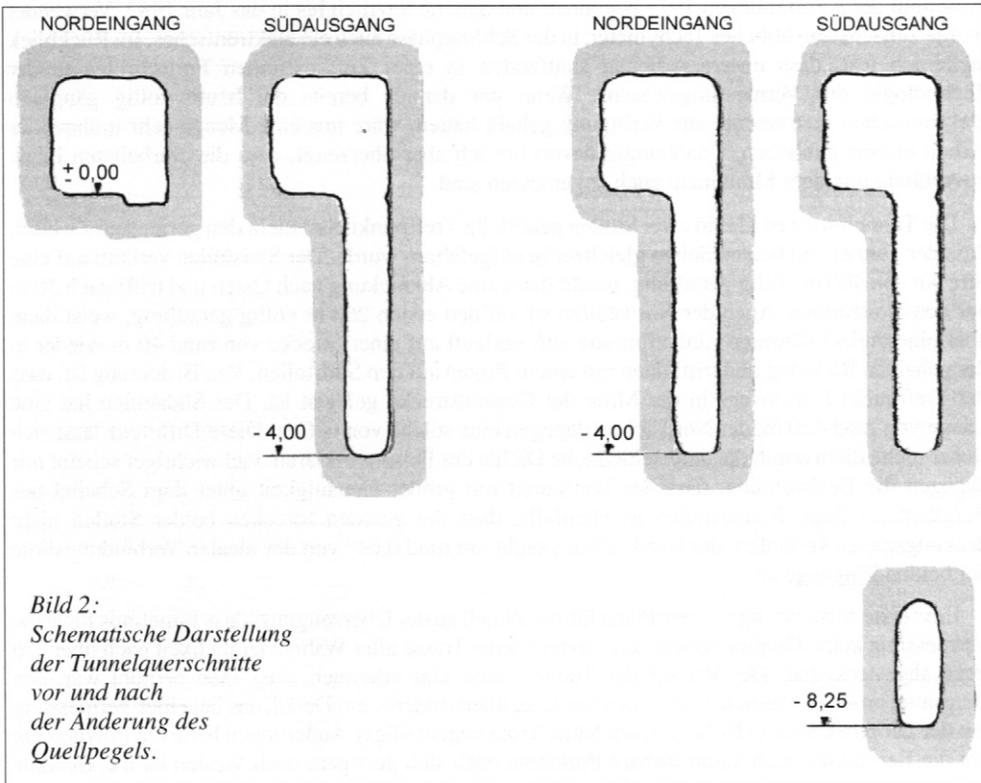
Bild 1: Plan der Stadt Samos mit Hafen, Stadtmauer und Wasserleitung des Eupalinos.

Die gesamte Anlage lässt sich folgendermaßen beschreiben: Die Leitung nimmt ihren Anfang an einer Quelle bei dem heutigen Weiler Ajades. In einem unterirdischen Kanal von rund 900 m Länge wird sie an den Nordabhang des Stadtmauerberges herangeführt, durchquert dann diesen Berg in einem Tunnel von 1036 m Länge und wird auf der Stadtseite auf eine Länge von rund 1000 m weitergeführt – wohl bis hinunter zum Hafen (Abb. 1). Die Konzeption der beiden Abschnitte von der Quelle zum Berghang und vom Tunnelausgang weiter in Richtung Stadt bereitet keine besonderen Schwierigkeiten und kann als Routineprojekt außer Acht bleiben. Der Tunnel dagegen stellte den verantwortlichen Ingenieur vor eine sehr anspruchsvolle Aufgabe, zumal er ja von beiden Seiten gleichzeitig aufgefahren wurde.

Zunächst die Fakten: Der Tunnel durchfährt den Berg auf einer Höhe von rund 55 m über NN. Da die Trasse leicht westlich vom Gipfel verläuft, beträgt die höchste Überdeckung am Bergkamm 167 m. Die ideale Vortriebsrichtung entspricht etwa 25° NNW. Der Querschnitt des Tunnels ist deutlich in zwei Teile geteilt, einen begehbaren Stollen von rund 1,80 m Breite und ähnlicher Höhe sowie einen Kanal von etwa halber Tunnelbreite, der entlang der Ostwand eingetieft ist. Während der Haupttunnel waagrecht durch den Berg geführt ist, weist der Kanal ein Gefälle von rund 0,4% auf. Deutlich ist zu zeigen, dass im Haupttunnel je zwei Hauer vor Ort tätig waren, und dass gleichzeitig auch der Kanal ausgehoben wurde. Der Kanal wurde zunächst vom Gehniveau aus eingetieft, weist heute aber bereits am Nordeingang eine Tiefe von knapp 4 m auf. Diese Tiefe ist eindeutig Resultat einer Korrektur, erzwungen durch eine nachträgliche Verlagerung des Quellniveaus (Abb. 2). Der Hauptstollen liegt aufgrund dieser Tatsache heute auch höher als der Quellpegel.

Die Aufdeckung des Tunnels und seine Bekanntgabe durch E. Fabricius<sup>2</sup> haben ihn schnell berühmt werden lassen, die Diskussion über die vermessungstechnischen Probleme, die beim Vortrieb des Tunnels zu bewältigen waren, kam dagegen nur zögerlich in Gang. Rund 60 Jahre dauerte es, bis dem ersten Bericht die Frage nach der Vermessung folgte. J. Bidez erörterte 1945 als erster dieses Problem<sup>3</sup> und erwgog den Gedanken, dass Eupalinos mit der von Heron von Alexandria beschriebenen Dioptra, einer Vorläuferin unserer heutigen Theodoliten, gemessen habe. B. L. van der Waerden, ein ausgewiesener Kenner der Wissenschaftsgeschichte, bekräftigte 1951 diesen Vorschlag und bezeichnete den Tunnel als das einzige Monument der griechischen Antike, das Auskunft geben könne über die geometrischen Kenntnisse der archaischen Zeit<sup>4</sup>. So sehr diese Aussage zutrifft, zur Vermessungstheorie haben beide Forscher sehr bald Widerspruch erfahren, zumal beide ihre Überlegungen ohne Autopsie veröffentlicht haben.

1958 reiste der Markscheider W. Kastenbein nach Samos mit der dezidierten Absicht, die Methode herauszufinden, nach welcher der Stollen im Altertum vermessen und angelegt worden war<sup>5</sup>. Im gleichen Jahr machte sich auch eine amerikanische Kollegin, J. Goodfield, auf den Weg mit ähnlichen Zielen. Unabhängig voneinander kamen beide Forscher zu dem Schluss, dass die Vortriebsrichtung des Tunnels einfach mit über den Berg abgesteckten Fluchtstangen bestimmt worden sei. Für Goodfield war das eine ebenso einfache wie sichere Methode<sup>6</sup>, Kastenbein sah dagegen ein Problem darin, wie die oberirdisch abgesteckte Gerade ins Bergesinnere übertragen worden sein könnte und überlegte sich verschiedene Visurhilfen.



*Bild 2:  
Schematische Darstellung  
der Tunnelquerschnitte  
vor und nach  
der Änderung des  
Quellpegels.*

<sup>2</sup> E. Fabricius, *Altertümer auf der Insel Samos*, AM 9, 1884, 165 ff.

<sup>3</sup> J. Bidez, *Platon et l'Orient*, Eos 1945 12

<sup>4</sup> B. L. van der Waerden, *Science Awakening* (1954) 102

<sup>5</sup> W. Kastenbein, *Markscheiderische Vermessung im Dienste archäologischer Forschung*, Mitt. aus dem Markscheidewesen 73, 1966, 26 ff.

<sup>6</sup> J. Goodfield - St. Toulmin, *How was the Tunnel of Eupalinos Aligned?*, Isis 56, 1965, 46 ff.

Mit diesen Vorschlägen waren zwei Theorien formuliert. Der ersten, die mit der Dioptra arbeitet, war die andere, die mit einfachen Visuren auskommt, gegenüber gestellt. Die Diskussion, ob eine Dioptra in archaischer Zeit überhaupt schon verfügbar gewesen und ob die einfachere nicht auch die überzeugendere Lösung sei, schien entschieden, bis mit A. Burns ein neuer Verfechter der Dioptra auftrat. Burns hatte in der Bibliothèque Nationale de Paris einen Kodex entdeckt mit einer Darstellung, auf der er große Ähnlichkeit mit der Topographie von Samos feststellte; für ihn war das ein Beleg dafür, dass Eupalinos mit einer Dioptra gearbeitet hat<sup>7</sup>.

Grundlage für alle diese ersten Überlegungen war zum einen der Plan von Fabricius, zum andern aber auch die neue Vermessung von Kastenbein. Während ersterer noch, ohne zu zögern, einen völlig geradlinigen Verlauf des Tunnels angegeben hat, waren bei der Vermessung von Kastenbein, der als Markscheider mit einem Hängetheodoliten gearbeitet hat, zum ersten Mal gravierende Abweichungen von einer solchen idealen Verbindungslinie in Erscheinung getreten – allerdings, ohne dass diese Abweichungen in seinen Überlegungen kommentiert worden wären. Weder Kastenbein noch einer der anderen Forscher ist auf diese Unregelmäßigkeiten eingegangen. Zu betonen ist allerdings, dass der Tunnel nach wie vor nicht durchgängig begehbar war.

Auf eine völlig neue Grundlage wurde schließlich die Dokumentation gestellt, als mit den Ausgrabungen des Deutschen Archäologischen Instituts der gesamte Tunnel freigeräumt und für Detailuntersuchungen zugänglich gemacht wurde. Die Vermessung der Anlage wurde damals unter meiner Leitung und in Zusammenarbeit mit dem Geodäten K. Pestal durchgeführt. Sie wurde nach Abschluß der Ausgrabungen 1975 begonnen und dauerte letztlich bis in das Jahr 1982. Verwendet wurde zunächst ein übliches Tachymeter, in der Schlussphase auch ein elektronisches. Im Rückblick stelle ich fest, dass unsere Arbeiten stattfanden in einer Zeit extremen Fortschrittes in der Technologie des Vermessungswesens: Wenn wir damals bereits die heute völlig gängigen elektronischen Instrumente zur Verfügung gehabt hätten, wäre uns eine Menge sehr mühevoller Arbeit erspart geblieben. Unabhängig davon bin ich aber überzeugt, dass die erarbeiteten Pläne zuverlässig und dem Monument auch angemessen sind.

Die Tunneltrasse ist klar in zwei Stollen geteilt, ihr Treffpunkt lässt nicht den geringsten Zweifel, dass der Tunnel von beiden Seiten gleichzeitig aufgeföhren wurde. Der Südstollen verläuft auf eine Strecke von 400 m völlig geradlinig, macht dann eine Abknickung nach Osten und trifft nach 30 m auf den Nordstollen. Auch der Nordstollen ist auf den ersten 260 m völlig geradlinig, weist dann aber eine dreiecksförmige Linienföhierung auf, verläuft auf einer Strecke von rund 40 m wieder in der gehalten Richtung und trifft dann mit einem Bogen auf den Südstollen. Von Bedeutung ist, dass der Treffpunkt keineswegs in der Mitte der Gesamtstrecke gelegen ist. Der Südstollen hat eine Länge von rund 420 m, der Nordstollen dagegen eine solche von 620 m. Diese Differenz lässt sich sicher nicht allein durch die unterschiedliche Dichte des Felsens erklären, viel wichtiger scheint mir dagegen die Beobachtung, dass der Treffpunkt mit großer Genauigkeit unter dem Scheitel des Bergkammes liegt. Festzustellen ist ebenfalls, dass die geraden Strecken beider Stollen nicht deckungsgleich verlaufen, der Nordstollen weicht um rund  $0,64^\circ$  von der idealen Verbindungslinie der beiden Eingänge ab.

Eine erste Auswertung unserer Pläne föhrte schnell zu der Überzeugung, dass Eupalinos für seine Vermessung keine Dioptra verwendet, sondern seine Trasse aller Wahrscheinlichkeit nach über den Berg abgesteckt hat. Der Verlauf des Tunnels lässt klar erkennen, dass man bemüht war, den Bergsattel an einer möglichst einfachen Stelle zu überwinden – ein Detail, das bei einer Vermessung mit der Dioptra keinerlei Rolle gespielt hätte. Trotz gegenteiliger Äußerungen hätte ein Polygonzug um die Bergflanke auch kaum lösbare Probleme nach sich gezogen; nach Westen ist das Gelände durch einen schluchtartigen Taleinschnitt geprägt, der Distanzmessungen schier unmöglich macht, nach Osten sind die Entfernungen und auch die Höhenunterschiede einfach zu groß. Unabhängig von solchen grundsätzlichen Überlegungen stellte sich für uns nach Fertigstellung der Pläne aber

<sup>7</sup> A. Burns, *The Tunnel of Eupalinos and the Tunnel Problem of Hero of Alexandria*, *Isis* 62, 1971, 172 ff. s. auch Verf. in: *architectura* 1977, 97 ff.

zum ersten Mal die Frage, warum Eupalinos seinen Tunnel nicht geradlinig aufgeföhren sondern mit solch merkwürdigen Unregelmäßigkeiten versehen hat. Besonders die rätselhafte Trassierung des Nordstollens stellte uns vor schier unlösbare Probleme.

Da der Südstollen einen sehr überzeugenden Eindruck macht, sind wir bei unseren Überlegungen davon ausgegangen, dass wir dort auch den Schlüssel zum Verständnis für die Trasse finden müssten. Vor allem die Abknickung der Trasse kurz vor dem Treffpunkt schien uns keineswegs zufällig sondern absichtlich – weiß doch ein jeder, dass es nahezu unmöglich ist, nach einer solch langen Vortriebsstrecke ein Kopf-auf-Kopf-Treffen zu erzielen. Wir sind zunächst selbstverständlich auch davon ausgegangen, dass Eupalinos einen Treffpunkt in der Mitte der Gesamtstrecke angestrebt hat. Die dreieckige Trassenführung im Mittelteil des Nordstollens wurde dagegen sehr bald als Umgehung interpretiert – mit gutem Grund, weil der Tunnel bis zur Abknickung ausgebaut ist und offensichtlich schwieriges Gebirge durchfährt und weil unmittelbar vor dem Knickpunkt auch noch Wasser auftritt, ein Gefahrenherd ersten Ranges, den man offensichtlich umgehen wollte. Der Winkel der Umgehung weist nun einen verblüffenden Gleichlauf mit der Hangneigung auf, eine Übereinstimmung, die uns dazu verleitete, darin auch eine Absicht zu erkennen. Für uns stellte sich der Sachverhalt so dar, dass Eupalinos die Hangneigung einfach in die Waagerechte umgeklappt hat, um auf der Umfahrung die direkten Abstände der Fluchtstangen statt deren Projektion zu messen. Die unterschiedliche Länge der beiden Stollen war für uns einfach das Resultat einer unterschiedlichen Vortriebsgeschwindigkeit; die Trasse des Tunnels schien uns damit erklärt<sup>8</sup>. Diese erste Lösung erwies sich jedoch in vielerlei Hinsicht als problematisch und wurde von der Fachwelt auch prompt angezweifelt.

Es war vor allem K. Peters, der mit einer Alternativlösung aufwartete und für die Unregelmäßigkeiten des Nordstollens eine besondere Erklärung anbot: Peters hatte die Überlegungen von Kastenbein aufgegriffen und vor allem den Schacht im Eingangsbereich des Südstollens als Hinweis darauf genommen, dass dergleichen auch am Nordeingang und sogar in der Mitte des Nordstollens anzunehmen sei. Nur so sei die offensichtliche Ungleichheit der beiden Stollenlängen zu erklären, die in Wirklichkeit eben drei sind<sup>9</sup>. Peters sah sich in seinen Überlegungen bestätigt durch eine Unregelmäßigkeit in der Trassenführung einerseits, vor allem aber durch eine kleine Ausbaustrecke, die seiner Meinung nach eine natürliche Höhlung verdeckt, in der eben der senkrechte Schacht zu lokalisieren sei. Eine überzeugende Erklärung für die dreieckige Linienführung konnte er allerdings nicht geben, eine gewissenhafte Überprüfung vor Ort erbrachte auch keinerlei Anhaltspunkte für seine Theorie. Eine wirklich überzeugende Lösung des Vermessungsproblems war weder durch meinen Vorschlag noch durch die Gegenkonzepte erreicht. Die Frage „How was the Tunnel of Eupalinos aligned“<sup>10</sup> blieb nach wie vor ohne überzeugende Antwort.

Die letztlich vorgelegte Interpretation der Trasse ist Resultat von langwierigen Diskussionen mit Kollegen sowie einer gründlichen Revision der Gegebenheiten vor Ort und der erforderlichen Messvorgänge: Die entscheidende Aufgabe des Geodäten bestand darin, die optimale Strecke durch den Berg zu finden und die Trasse des Tunnels festzulegen. Die zweite Aufgabe war – ausgehend vom Quellpegel –, das Niveau des Nordeinganges zu bestimmen und das gleiche Niveau auf die Südseite zu übertragen. Mit diesen beiden Schritten war der Tunnel in der senkrechten und in der waagerechten Ebene festgelegt und die wichtigsten Parameter des Projektes bereits bestimmt. Zur Durchführung selbst war es dann noch notwendig, auch die Länge des Tunnels zu ermitteln. Der einzig vorgegebene Faktor für das ganze Projekt war das Niveau des Quellpegels, die Trasse war dagegen innerhalb bestimmter Grenzen frei wählbar. Eine Überprüfung der möglichen Varianten zeigt denn auch, dass die gewählte Trasse keineswegs die kürzeste ist<sup>11</sup>. Da aber nicht anzunehmen ist, dass man fahrlässig auf eine ökonomische Lösung verzichtet hat, ist daraus zu schließen, dass

<sup>8</sup> Verf., DiskAB 4 (1983) 104 ff.

<sup>9</sup> K. Peters, Neues zur Vermessungsgeschichte des Tunnels auf Samos, Verm. Ing. 4, 79, 87 ff.

<sup>10</sup> So der griffige Titel des Artikels von J. Goodfield (Anm. 6)

<sup>11</sup> Samos XIX 95, Abb. 27

sie aufgrund der Meßmethode so gewählt wurde. Aufschlussreich ist diesbezüglich der Querschnitt durch den Berg entlang der Trasse, der ein auffallend harmonisches Profil aufweist. Die Wahl einer längeren Trasse zugunsten eines solchen Profils ist m. E. ausreichend, um das Vermessen mit einer Dioptra auszuschließen. Eupalinos hat demnach seine Trasse über den Berghang hinweg abgesteckt.

Der Vorgang des Absteckens bedarf keiner Erläuterung, hinzuweisen ist jedoch auf die grundsätzlichen Möglichkeiten – das Verlängern einer bestimmten Flucht einerseits und das gegenseitige Einrichten. Da im gegebenen Fall ein Bergkamm zu überwinden war, wurde wohl dort auch begonnen und dann am ehesten mit der Methode des gegenseitigen Einrichtens. Der Bergkamm ist in jedem Falle eine Fehlerquelle, und es ist zu zeigen, dass dort auch für den Nordstollen tatsächlich eine Abweichung von  $0,64^\circ$  resultierte. Ähnlich einfach ist die Bestimmung der Niveaus der beiden Eingänge zu bewältigen. Zwei Methoden bieten sich an – entweder das Austafeln oder ein Chorobath. Beide Methoden verlangen eine Messung auf horizontaler Ebene rings um den Berg. Welche Methode gewählt wurde, lässt sich nicht entscheiden, festzustellen ist jedoch, dass das Nivellement mit denkbar gutem Resultat bewältigt wurde. Unsere beiden willkürlich festgelegten Messpunkte differieren gerade um  $4\text{ cm}$ <sup>12</sup>.

Soweit die Grundlagen zu Beginn der Bauarbeiten. Die Übertragung der Waagerechten ins Bergesinnere verlangt keinerlei besondere Technik und bedarf folglich auch keiner eigenen Darstellung. Für die Übertragung der über den Berg abgesteckten Trasse muss jedoch eine Reihe von Dingen berücksichtigt werden. Von herausragender Bedeutung ist zunächst, dass die Anfangsstrecke des Tunnels exakt der vorgegeben Geraden folgt – sie ist maßgebend, im Wortsinn, für den gesamten Vortrieb; jede noch so kleine Abweichung summiert sich auf die beträchtliche Distanz zu fatalen Divergenzen. Die Übertragung der Flucht ins Bergesinnere ist umso einfacher und gelingt umso genauer, je länger die Gerade über den Eingangsbereich hinaus verfolgt werden kann. Auf der Nordseite gibt es diesbezüglich kein Problem, weil sich jenseits des Mundloches ein kleiner Hügel erhebt, der optimale Bedingungen für die Verlängerung der Fluchtlinie bietet. Auf der Südseite musste man dagegen wegen der starken Hangneigung einen Fluchtpunkt in den Tunnel projizieren, um so die Ausgangsgerade zu verlängern. Es ist der einzige senkrechte Schacht im Tunnel<sup>13</sup>, übrigens genau der, der Kastenbein einerseits und Peters andererseits zu ihren jeweiligen Überlegungen verleitet hat.

Nach Festlegung der Geraden konnte mit dem Aushub begonnen werden; für die Kontrolle des Vortriebes genügte ein Blick zurück auf die Fluchtstangen – und wenn der Stollen tief genug war, reichte auch das Tageslicht, da sich mit wachsender Länge die Richtung des Tunnelvortriebs automatisch kontrolliert. Sehr schön ist das vorzuführen an einer Stelle im Südstollen, an der die Hauer offensichtlich zu weit nach Westen geraten waren. Die Korrektur dieser Abweichung reichte offensichtlich nicht aus. Um die Fluchtgerade wieder herzustellen, musste die Ostwand nachträglich abraasiert werden – ein augenscheinlicher Beleg für die geschilderte Methode<sup>14</sup>.

Nach den bisherigen Darlegungen wäre das ganze Projekt ohne besondere Komplikationen zu bewältigen gewesen, und es hat auch den Anschein, dass Eupalinos einen Idealplan entworfen hatte, der genau diesen Richtlinien folgte. Ein Blick auf den Grundriss des entstandenen Tunnels erweckt den Eindruck, dass der südliche Stollen perfekt gelungen ist und einem solchen Plan folgt, während der nördliche von Unregelmäßigkeiten geprägt ist, die schnell als nachträgliche Korrekturen erkennbar sind. Eine Analyse des Südstollens lässt drei Entwurfsprinzipien erkennen, die offensichtlich bestimmend für die Planung waren.

Eupalinos war allem Anschein nach entschlossen, den Tunnel auf einer gemeinsamen Geraden aufzufahren – eine Lösung, die auch die kürzeste Vortriebsstrecke gewährleistet. Erste und wichtigste Voraussetzung für ein solches Vorgehen ist – wie schon betont –, dass die Gerade vor allem in ihrer Anfangsstrecke perfekt eingerichtet ist. Zweitens ist zu berücksichtigen, dass auch bei

<sup>12</sup> Samos XIX Pläne 3a und b; Die Meßwerte der Niveaus betragen im Norden (PP 59) + 55,22 und im Süden (PP 3) + 55,26 und belegen somit die genannte Differenz von  $4\text{ cm}$ .

<sup>13</sup> Samos XIX 137 f. mit Abb. 34 und 35

<sup>14</sup> Samos XIX 60 f. mit Abb. 19 und Taf. 25, 3

noch so gewissenhafter Messarbeit kleine Abweichungen nicht ausgeschlossen werden können, dass folglich gewisse Sicherheitsvorkehrungen zu treffen sind, um den Durchschlag zu gewährleisten. Aus diesem Grunde hat Eupalinos im unmittelbaren Bereich des geplanten Treffpunktes als zusätzliche Maßnahme einen Sicherheitsschild vorgesehen. So jedenfalls interpretieren wir die Abknickung im Südstollen rund 25 m vor dem Treffpunkt. Für diesen Sicherheitsschild gibt es mehrere Varianten, diejenige, die sowohl Ökonomie als auch Sicherheit auf's beste mit einander vereint, ist die von Eupalinos gewählte. Eine letzte Bedingung ist schließlich die Positionierung des Treffpunktes unter dem Scheitel des Berges – aus dem einfachen Grund, weil der Topograph mit seiner Visur zwar garantieren kann, dass die Fluchtstangen auf den beiden Hangseiten exakt einer Geraden folgen, er hat aber keine Möglichkeit sich zu vergewissern, ob beide Fluchten auch wirklich auf einer gemeinsamen Geraden liegen. Da der Scheitel von beiden Seiten anvisiert werden kann, beide Visurlinien also sich in jedem Falle am Scheitelpunkt treffen, ist eine Positionierung des Treffpunktes unter dem Scheitel in jedem Falle vorzuziehen. Bei einem Treffpunkt in der Mitte der Vortriebsstrecke, d. h. jenseits des Scheitelpunktes, hätte eine nicht zu kontrollierende Fehlerquelle in Kauf genommen werden müssen.

Akzeptiert man diese drei Bedingungen, ergibt sich zwangsläufig ein Masterplan mit zwei unterschiedlich langen Vortriebsstollen, die sich in einem Sicherheitsschild genau unter dem Scheitel treffen – so wie es die Abbildung zeigt (Abb. 3). Nicht erklärt ist damit freilich die merkwürdige Trassenführung im Nordstollen, die – wie schon angedeutet – am ehesten mit

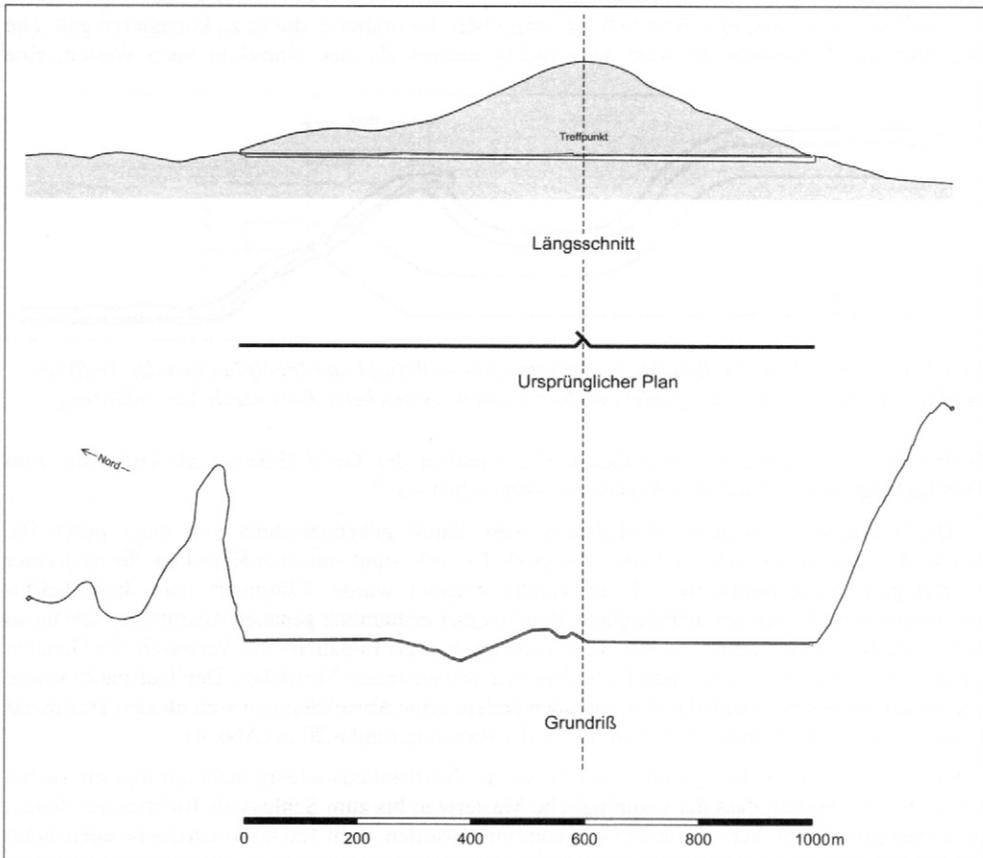


Bild 3: Die Position des Treffpunktes unter dem Scheitel des Berges.

gebirgstechischen Problemen zu erklären ist. Dazu eine kurze Bestandsaufnahme des nördlichen Teiles des Tunnels: Der Nordstollen verläuft auf eine Strecke von rund 260 m geradlinig auf einer Flucht, die offensichtlich dem des Südstollens entsprechen soll, aber um  $0,64^\circ$  abweicht. Die gesamte Strecke ist bis auf wenige Meter ausgebaut, rund 150 m sogar in archaischer Zeit. Das kann nur bedeuten, dass die Anfangsstrecke des Nordstollens schwieriges Gebirge durchfährt. Bei LM 263 macht der Tunnel dann einen klaren Knick nach Westen und weist auf eine Strecke von rund 270 m eine dreiecksförmige Trasse auf. Die einzig logische Erklärung für eine solche Trassenführung ist die, dass Eupalinos einer Problemzone ausweichen wollte.

So einleuchtend die Deutung des Dreiecks, so problematisch ist die Interpretation der folgenden Strecke bis zum Treffpunkt. Meiner Ansicht nach bleiben jedoch nur zwei Alternativen, um den Verlauf dieser Strecke zu erklären – entweder ein vages Suchen mit einem abschließenden Sicherheitsbogen auf's Geradewohl oder eine mit Bedacht gewählte Streckenführung. Da mir Ersteres wenig überzeugend scheint, bleibt als Interpretation nur, dass Eupalinos nach Fertigstellung seines Umgehungsdreieckes bemüht war, die ursprüngliche Richtung wieder aufzunehmen und seinen Tunnel nach Plan zu vollenden. So folgt nach der Umfahrung zunächst ein rund 30 m langer gerader Abschnitt und schließlich ein Bogen, der auf den Südstollen trifft. Diese letzte bogenförmige Trassenstrecke ist jedoch nicht als bloßer Sicherheitsbogen zu erklären, sie ist m. E. vielmehr Resultat des Versuches, den Nordstollen nach Plan zu vollenden. Die Schlussstrecke des Nordstollens ist mit anderen Worten so zu interpretieren, dass Eupalinos nach der Dreiecksumfahrung auf der gehaltenen Geraden weitermachen wollte, dass er bei einer letzten Bestandsaufnahme aber eine Abweichung nach Osten konstatierte, die es zu korrigieren galt. Die bogenförmige Schlussstrecke wäre dann nichts anderes als eine Korrektur nach Westen, eine

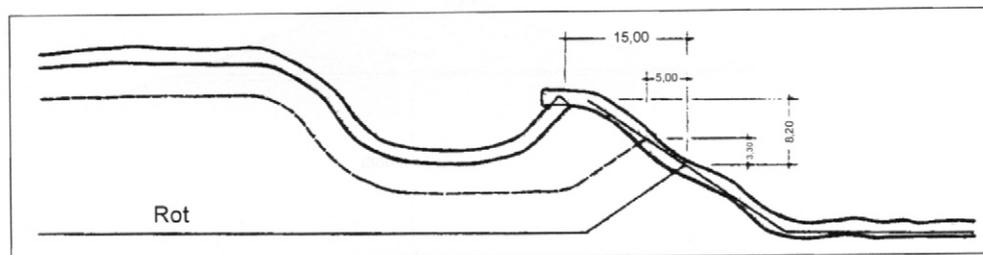


Bild 4: Der Bereich des Treffpunktes – der tatsächliche Befund, der Idealplan und der Treffpunkt bei Eliminierung des Vortriebsfehlers im Nordstollen (gestrichelt). Rot=ideale Linienführung.

Fortsetzung der angestrebten Geraden und schließlich der finale Haken nach Osten bis zum Durchschlag, so wie er auf dem Masterplan vorgesehen war<sup>15</sup>.

Die Trasse des gesamten Nordstollens wäre damit gekennzeichnet von einer durch die Felsstruktur erzwungenen Umgehung – das große Dreieck – und von einer Korrektur, die nach einer sorgfältigen Bestandsaufnahme als notwendig erachtet wurde. Eliminiert man diese beiden Änderungen ergibt sich der ursprüngliche Plan in einer erstaunlich genauen Ausführung, die umso bemerkenswerter ist, wenn man sich vergegenwärtigt, dass Eupalinos mit Verlassen der Geraden keine unmittelbare Kontrolle mehr hatte über den Verlauf seines Vortriebes. Der Treffpunkt wurde zwar nach wie vor innerhalb der Planvorgaben erzielt, seine Abweichungen vom idealen Treffpunkt betragen aber in der Länge rund 15 m und in der Richtung rund 8,20 m (Abb. 4).

Die hier entworfene Interpretation der Trasse des Nordstollens scheint nicht nur logisch, sie hat vor allem den Vorteil, dass der ursprüngliche Masterplan bis zum Schluss als Richtschnur diente, ohne dass prinzipielle Veränderungen vorgenommen wurden. Zum Teil lässt sich das belegen durch

<sup>15</sup> Samos XIX 143 f. mit Abb. 37

einen Befund, der bisher noch nicht zur Sprache kam, nämlich Messmarken, die im Tunnel gefunden wurden und eindeutig aus der Zeit der Erbauung stammen. Die Marken sind durchweg mit roter Farbe einfach auf die Felswand aufgemalt und haben sich z. T. noch sehr gut erhalten, z. T. aber waren sie lesbar und entzifferbar nur nach langwierigen Überlegungen. In ihrer Gesamtheit sind sie jedoch von herausragender Bedeutung – als originale Zeugnisse der damaligen Arbeit und noch mehr als Hinweise für Planung und Durchführung des Tunnels. Insgesamt wurden sieben verschiedene Längensysteme festgestellt und eine erstaunliche Menge von Nivellierlinien. Entscheidend für die Vermessung des Tunnels ist vor allem ein System, dessen Markierungen in beiden Stollen von außen nach innen messen und so den Vortrieb des Tunnels dokumentieren. Das betreffende System ist im Gegensatz zu allen anderen an der Westwand aufgetragen und besteht aus einem senkrechten Strich und einem rechts oder links daneben geschriebenen Buchstaben. Die Buchstaben geben sich eindeutig als Zeichen des milesischen Zahlensystems zu erkennen; die auftretenden Buchstaben bedeuten einfach eine Zehnerreihe – I = 10, K = 20, Λ = 30 usw.; der Abstand zwischen den Markierungen von durchschnittlich 20,60 m bedeutet demnach eine Zehnerheit<sup>16</sup>.

Mit diesen Messmarken ist nicht mehr nur der Tunnel als solcher zu beurteilen, es stehen darüber hinaus authentische Hinweise des verantwortlichen Ingenieurs zur Verfügung, deren Auswertung wichtige Aufschlüsse erwarten lassen, und dies umso mehr, als in beiden Stollen eine beträchtliche Zahl solcher Markierungen entdeckt werden konnte – 13 im Südstollen und 14 im Nordstollen. Interessant ist zunächst eine Beobachtung zu den Startpunkten an beiden Stollenmündern, die sich – ausgehend von den vorhandenen Markierungen – durch einfaches Zurückzählen rekonstruieren lassen. Beim Südstollen ergibt sich dabei ohne Umwege und sehr überzeugend ein Nullpunkt, der genau am Schnittpunkt von Hanglinie und Tunnelniveau liegt, genau an der Stelle, an der mit den Arbeiten begonnen wurde – ein zusätzlicher Beleg für die Bedeutung dieses Systems beim Vortrieb des Tunnels (Abb. 5). Beim Nordstollen zeigt sich dagegen, dass die zu beobachtenden Markierungen einen Nullpunkt ergeben, der rund 17 m innerhalb des Anstiches liegt. Eine Überprüfung aller Zusammenhänge führt schnell zu dem Ergebnis, dass im Nordstollen mit einer Ausnahme alle Markierungen auf der Dreiecksumgehung liegen und dass diese Gruppe von Markierungen ein versetztes Maßsystem repräsentiert. Die einzige Erklärung für diese Verschiebung liegt darin, dass Eupalinos offensichtlich bemüht war, die aus der Umgehung resultierende Verlängerung der Vortriebsstrecke durch eine

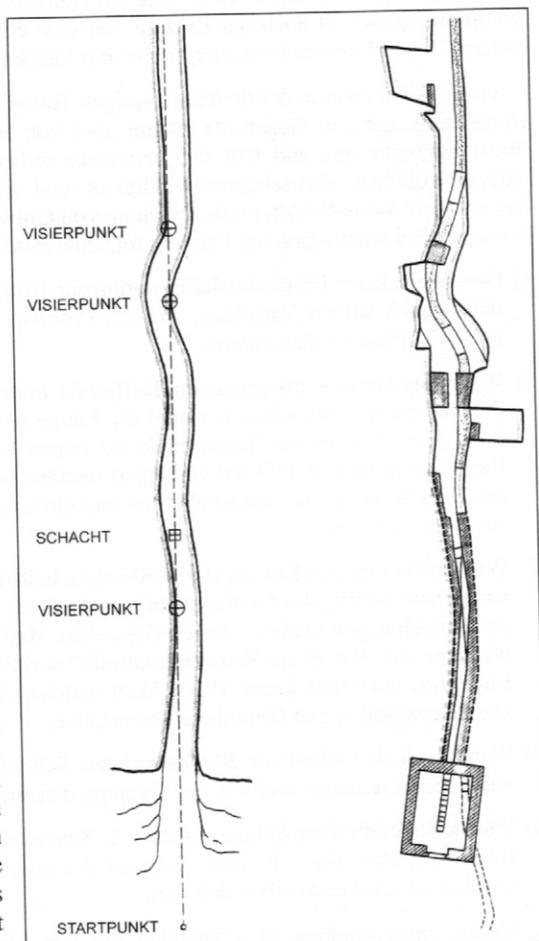


Bild 5: Das südliche Mundloch mit dem aus den Messmarken rekonstruierten Startpunkt.

<sup>16</sup> Samos XIX 150 f. mit Tab. 1

ebensolche Verschiebung seines Systems zu kaschieren, mit dem Ziel, dass nach Abschluß der Dreiecksumgehung altes und neues System wieder zusammenfallen. Zählt man von der Markierung an diesem Treffpunkt von ursprünglicher Gerader und nachträglicher Umfahrung zurück, ergibt sich jedenfalls ein Nullpunkt genau am Startpunkt der Arbeiten – so wie es auch am südlichen Mundloch beobachtet wurde. Bestätigt wird dieser Rückschluss im Übrigen durch eine Markierung, die sich als einzige innerhalb der geraden Strecke erhalten hat und genau in das ursprüngliche System passt.

Die hier umrissene Interpretation der Nordstollentrasse ist m. E. zwar überzeugend, lässt sich aber natürlich nicht zwingend beweisen. So waren die Rezensionen, die auf meine Publikation folgten, einhellig zustimmend<sup>17</sup>, nicht aber K. Grewe, dem als Geodät und vor allem auch wegen seiner allgemeinen Auseinandersetzung mit Tunnelbauten in dieser Diskussion besonderes Gewicht zukommt. Grewe ist auch der Einzige, der eine echte Alternative vorgeschlagen hat, ein völlig anderes Entwicklungsschema der Trasse, das hier kurz vorgestellt werden soll<sup>18</sup>.

Grewe sieht zwar in der dreiecksförmigen Trasse ebenfalls eine durch das Gebirge erzwungene Umfahrung, geht im Gegensatz zu mir aber von einem geplanten Treffpunkt in der Mitte der Vortriebsstrecke aus und hält den erreichten außermittigen Durchschlag für ein Resultat der unterschiedlichen Vortriebsgeschwindigkeit und mehrerer strategischer Planänderungen. Aus meiner Sicht kann der Alternativvorschlag von Grewe allerdings nicht überzeugen. M. E. bleiben bei seiner Rekonstruktion der Planung folgende Punkte ungelöst<sup>19</sup>:

- 1) Grewe gibt keine Erklärung dafür, warum der Treffpunkt unter dem Scheitel des Berges liegt und macht auch keinen Vorschlag, wie das Problem des Auseinanderdriftens der beiden Fluchtgeraden gelöst werden könnte.
- 2) Wenn das Dreieck im geplanten Treffpunkt münden soll, gibt es keinen Grund, eine zweite Planänderung vorzunehmen, zumal die Länge des Nordstollens zunimmt und der Treffpunkt doch perfekt in einem Schnittpunkt zu liegen käme. Warum sollen beide Stollen über die Basislinie hinaus nach Osten verlängert werden, um dann parallel aufeinander zuzuführen, wo doch ein Schnittpunkt anzustreben ist und ein solcher bei Tideal durch die eine Planänderung auch gegeben wäre.
- 3) Während bei meiner Lösung das Maßsystem beibehalten wird – die ursprüngliche Gerade zählt wie gehabt weiter, das Gerüst bleibt unangetastet, die Zählung wird nur verschoben innerhalb des Umgehungs-dreieckes – ändert Grewe das Maß der Grundlinie, ohne allerdings zu erklären, wie denn das „Raster zur Vortriebskontrolle“ wirklich kontrolliert werden könnte. Im Tunnel hat Eupalinos jedenfalls keine Möglichkeit welcher Art auch immer, eine Verbindung zwischen Dreiecksschenkel und Grundlinie herzustellen.
- 4) Warum soll die Einheit von 20,60 m auf dem Schenkel beibehalten, auf der idealen Geraden aber auf 19,53 m reduziert werden, ein Vorgang, den auch Grewe als Problem bezeichnet?
- 5) Was bedeutet die Feststellung, dass der 2. Schenkel nicht mehr den Knotenpunkten des Rasters folgt, dass aber alle 5 Punkte exakt auf der jeweils durchschnittenen Rasterlinie liegen? So wurden sie von Grewe eben definiert.
- 6) Völlig unverständlich ist schließlich die von Grewe gewählte Anlage des Dreieckes mit Anlaufecke zwischen 14 und 15, obwohl doch im Tunnel bei 14 orig. deutlich ein Knick zu sehen ist, der diese Ecke markiert. Der Umstand, dass Grewe dann auch noch das Maß auf der Basislinie ändert, führt übrigens bei 13–12 zu einer Differenz von  $2 \times 1,07$  m, obwohl dort genau 3 m zu messen sind. Das von ihm rekonstruierte Messsystem wirkt eher willkürlich, passt nicht zum Befund und würde die postulierte 2. Planungsänderung noch unverständlicher machen.

<sup>17</sup> Insgesamt 6 Rezensionen in: Verm. Ing. 4/1996, 175; AntCl LXVII, 1998, 541; AnzAW LI, 3/4, 1998, 255 ff.; AJA 103, 1999, 149 f.; CIRev 49, 1999, 214 f. und Gnomon 1999, 378 ff.

<sup>18</sup> K. Grewe, Licht am Ende des Tunnels - Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau (1998) 58 ff.

<sup>19</sup> ebenda 64 ff. mit Abb. 88 und 89

Soweit die Einwände zum Vorschlag von Grewe. Zusätzlich dazu soll hier noch ein Detail angeführt werden, das auch in meiner Publikation nicht richtig wiedergegeben ist und das erst durch neuere Beobachtungen überzeugend geklärt werden konnte. Dazu müssen erneut die Dreiecksumgehung und die Messmarken betrachtet werden. Tatsache ist, dass die Markierungen im Nordstollen – mit einer Ausnahme – durchweg in der Dreiecksumgehung zu beobachten sind; ihre Position zeigt eine Verschiebung des ursprünglichen Systems nach Innen. Eine solche Maßnahme erscheint logisch, angewandt wurde sie aber offensichtlich vor allem, um die Zusatzstrecke, um die der Tunnel gegenüber der Geraden länger wird, zu ermitteln – ein Problem, das Eupalinos allem Anschein nach mehr Kopfzerbrechen bereitete als die Bestimmung der Winkel.

Aufschlussreich ist diesbezüglich vor allem das  $\Sigma$  an der Dreiecksspitze, dessen Position keineswegs zufällig und nur durch eine besondere Konstruktion zu erreichen ist (Abb. 6): Ansetzend am Endpunkt des Umgehungsdreieckes, an dem altes und neues Meßsystem zusammengelegt wurden, wird mit einem Zirkel der Abstand bis zur Markierung  $\Sigma$  abgegriffen und mit einem Zirkelschlag auf den Dreiecksschenkel übertragen. Von der so definierten Dreiecksspitze kehrt die Umgehung dann wieder zur ursprünglichen Geraden zurück. Mit dieser Konstruktion war gewährleistet, dass der Abstand vom Endpunkt der Umfahrung zum  $\Sigma$  des ursprünglichen Systems identisch ist mit dem Abstand zum S auf dem Umgehungsdreieck – beide Strecken sind nichts anderes als Radien des gleichen Kreises. Da auf beiden Kreispunkten die Markierung  $\Sigma$  steht – beim einen als Bestandteil der ursprünglichen Messung und beim andern aufgrund einer neuen Planung -, ist auch gewährleistet, dass jenseits des Zirkelansatzes altes und neues Messsystem ohne

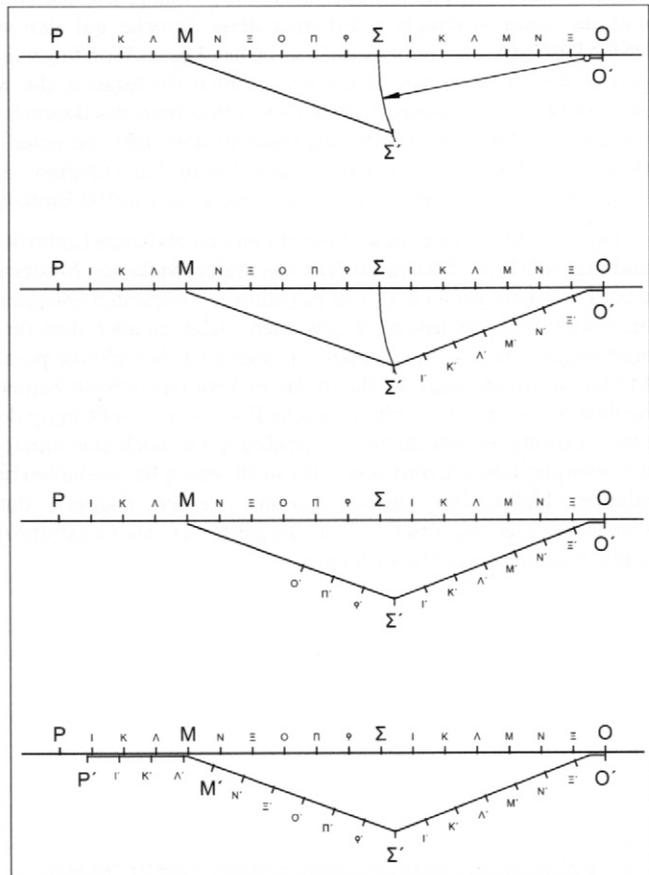


Bild 6:  
Das Umgehungsdreieck mit  
dem verschobenen System der  
Messmarken.

Abweichung ineinander übergehen. Südlich von der Umgehung bleibt die Zählung des ursprünglichen Systems also erhalten; die Arbeiten können an diesem Punkt fortgeführt werden, als ob es nie eine Planänderung gegeben hätte.

Nach Norden zurück zur ursprünglichen Trasse brauchte Eupalinos nur mehr seine Markierungen rückwärts aufzutragen, um dann automatisch die Differenz zu erhalten, um die sein Tunnel aufgrund der Umfahrung länger wurde. Entscheidend für diese Deutung sind zwei Markierungen, die als einzige innerhalb der geraden Strecke zu beobachten sind – ein  $\rho$ , das zur Dreiecksumfahrung gehört, und 3 m davon entfernt ein K, das noch von der geraden Zählung zeugt. Die Existenz dieser beiden Markierungen ist von herausragender Bedeutung – sie sind ein Beleg dafür, dass es zwei gegeneinander verschobene Systeme gibt und dass sie auch nebeneinander aufgetragen wurden, und zwar bevor die Umfahrung ansetzt. Sie geben darüber hinaus ein genaues Maß für den Betrag der Verschiebung – nämlich 20,59 m minus 3 m, also 17,59 m. Diese als Differenz direkt messbare Größe gibt die Strecke an, die Eupalinos ermittelt hat, um die aus der Umgehung sich ergebende Verlängerung auszugleichen. Sie entspricht übrigens mit erstaunlicher Genauigkeit dem tatsächlichen Längenunterschied zwischen idealer Geraden und Dreiecksumgehung – ein überzeugender Beleg dafür, dass es Eupalinos gelungen ist, das auf dem Reißbrett entworfene Dreieck sehr genau in den Tunnel zu übertragen<sup>20</sup>.

Dass die korrekte Bestimmung dieser Verlängerung von entscheidender Bedeutung war für das Gelingen des Durchschlages, steht außer Zweifel, für Eupalinos war es offensichtlich die Herausforderung schlechthin. Nur so ist zu erklären, dass er nach Vollendung seines gesamten Werkes, nach Abschluß auch der letzten Ergänzungsarbeiten erneut in seinen Tunnel gegangen ist und mit zwei senkrechten Strichen diese Strecke auf den Ausbau vermerkt und das Wort PARADEGMA dazwischen geschrieben hat. Dieses Wort taucht im Tunnel zum ersten Mal in seiner geschriebenen Form auf, ist mit den größten Buchstaben, die wir aus griechischer Zeit kennen, geschrieben und kann eigentlich nur als Vermächtnis des Baumeisters an seine Nachwelt verstanden werden. Von Interesse ist, dass die Inschrift dort steht, wo unter dem Ausbau der Zählbuchstabe  $\rho$  (Rho), also 100, zu liegen kommt. Bis dorthin hat Eupalinos offensichtlich seine Zählung nach rückwärts vorgenommen, um so eine runde Zahl von 100 Einheiten voll zu machen.

Die Entschlüsselung dieser Inschrift gibt zusätzlichen Einblick in den gesamten Planungsprozess und fügt sich m. E. bestens zu dem von mir entwickelten Masterplan. Ein stichfester Beweis dafür, dass dieser Plan genau dem von Eupalinos entwickelten entspricht, lässt sich natürlich auch durch die Paradesigma-Inschrift nicht gewinnen, sicher ist aber, dass für diese Inschrift in der von Grewe erarbeiteten These keine Deutung zu finden ist. Sowohl die parallel nebeneinander aufgetragenen Markierungen als auch die durch das rückwärtsgerichtete Zählen definierte Position der Inschrift bleiben bei seiner These ohne jegliche Erklärung. Unabhängig davon ist festzuhalten, dass bei der ersten Lösung die erforderliche Umfahrung nur noch eine einzige Korrektur nach sich zieht, dass der ursprüngliche Entwurf sonst aber in all seinen Bestandteilen bis zum erfolgreichen Durchschlag erhalten bleibt. Bei Grewes Lösung werden dagegen darüber hinaus auch regelrechte Planänderungen notwendig – ein Vorgang, der das Gesamtprojekt keineswegs vereinfacht und folglich auch weniger für sich hat.

<sup>20</sup> s. dazu meine ausführliche Darstellung des gesamten Sachverhaltes in: AM 119, 2004, 65 ff.

## Vermessungspräzision beim Bau antiker Aquädukte

Nicht ohne Grund sind die antiken Baumeister berühmt für Bauwerke großer Dimensionen und größter Präzision. Die 50 m hohen Brücken, wie der Pont du Gard bei Nîmes in Frankreich und die Tajo-Brücke bei Alcántara in Spanien, sind Musterbeispiele gewagter Konstruktionen, bei denen die Gesetze der Schwerkraft scheinbar schon überschritten wurden. Auch das Pantheon in Rom, dessen Kuppel einen Durchmesser von 43,3 m aufweist, gehört in eine Liste von Bauwerken, deren statische Grundlagen keinerlei Vorbilder hatten. Neben der architektonischen Schönheit wird in diesen Bauten ein Maß an Ingenieurgeist sichtbar, das den genialen Baugedanken und den



*Pont du Gard. Aquäduktbrücke über den Gardon bei Nîmes (Frankreich), sichtbares Zeugnis römischer Baukunst im Ingenieurbau*

Repräsentationswillen gleichermaßen ausdrückt. Die Sicherheit des Baumeisters beim Umgang mit Planungselementen und Baumaterialien manifestiert sich darüber hinaus noch einmal in der Standfestigkeit dieser Bauwerke. Der Umgang mit dem Planungselement Halbkreisbogen und dem Baumaterial Stein findet in der römischen Antike seine höchste Vollendung.

Nun waren Ingenieurbauten nie Selbstzweck, und technische Meisterleistungen, wie sie die römischen Wasserleitungen darstellen, werden bei unterirdischen Trassenführungen nicht einmal sichtbar. Gleichwohl sind auch hier Planungsideen umgesetzt worden, die heute noch verblüffen. „Großartige Vermessungskunst“ oder wie anders soll man es bezeichnen, wenn Aquädukttrassen mit einem Gefälle von bis zu 0,5 ‰ ausgebaut worden sind. Trassenlängen von bis zu 242 km Länge sind auch im Aquäduktbau die Ausnahme, aber es war durchaus normal, oftmals viele Kilometer lange Trassen auszubauen, um Trinkwasser von entfernten Quellen in die Städte und Legionslager zu führen.

Auch Tunnelbauten von unglaublichen Dimensionen sind in Angriff genommen worden. Aquäduktunnel, Straßentunnel und Tunnel zur Seeabsenkung waren gängige Bauwerkstypen des Ingenieurbaus. Und all diese Bauwerke – immerhin gibt es Tunnel von bis zu 6 km Trassenlänge – sind ohne Planung und Trassierung überhaupt nicht denkbar.

Bei all diesen beeindruckenden Dimensionen und der in den Bauwerken sichtbar werdenden Präzision ist aber doch die Frage gestattet, ob es nicht an verschiedenen Orten auch Belege für Ungenauigkeiten zu finden gibt. Also: Vermessungspräzision oder Messfehler in antiken Bauwerken!?

In antiken Tunnelbauten sind Vortriebsfehler sowohl bezüglich der Richtung als auch in der Höhenlage leicht nachzuweisen. Denn Änderungen der Vortriebsrichtung sind in den Wandungen und den Firsten der Tunnel nur selten ausgeglichen worden, so dass aufgrund dieser Korrekturstellen sogar die Planungsgedanken der antiken Ingenieure nachzuvollziehen sind. Aber nicht jeder Korrektur ist ein Messfehler vorausgegangen. Oftmals war es auch das einfachere Bauverfahren, nach kurzen Vortriebsstrecken die Richtung der Trasse zu kontrollieren und im anschließenden Streckenabschnitt auszugleichen. Es hätte viel mehr Aufwand erfordert, eine vorgegebene Planungslinie über die gesamte Trassenlänge fehlerfrei einzuhalten. So finden wir in den antiken Tunnelbauten beides: Richtungskorrekturen als Ergebnis eines zweckmäßigen Bauverfahrens, aber durchaus auch als Ausgleich gravierender Vortriebsfehler.

Aber Vorsicht! Man muss auch hinterfragen, ob die mancherorts sichtbar gewordenen Unstimmigkeiten tatsächlich das Ergebnis von Messfehlern sind oder ob darin vielleicht Auswirkungen von physikalischen Gesetzen sichtbar werden, die zur Zeit des Baus unbekannt

waren. Wenn sich nämlich die Auswirkungen derartiger Naturgesetze in manchen Bauwerken heute nachweisen lassen, so wäre als völlig überraschender Rückschluss nur zulässig, dem Baumeister gerade wegen dieses Befundes postum eine große Präzision seiner Vermessungsarbeit zu bescheinigen. Der gesicherte Beweis für eine äußerst präzise Vorgehensweise bei der Bauvermessung kann nämlich auch über den Nachweis geführt werden, dass es sich bei einem vermeintlichen Fehler tatsächlich um eine vom Baumeister nicht zu beeinflussende Abweichung gehandelt hat.

Ein Ergebnis in dieser Hinsicht haben die Untersuchungen aus dem Verlauf der Eifelwasserleitung hervorgebracht: Trassenabschnitte, in denen sich Gefälle von 0,298 % und 0,599 % nachweisen lassen, legen von vorneherein die Vermutung nahe, hier sei ein Sollgefälle von 0,3 % und 0,6 % abzustecken gewesen. Bei der Untersuchung zum Trassenverlauf hat sich gezeigt, dass diese kleinen Abweichungen aber nicht das Ergebnis ungenauer Vermessungen der antiken Baumeister sind, sondern vielmehr durch die angewendete Vermessungsmethode verursacht worden sind.

In römischer Zeit wurden die Gefälleabsteckungen nach der Methode des „Austafelns“ vorgenommen. Dabei wird die Gefällelinie ausgehend von zwei Festpunkten am Anfang eines Bauloses über die gesamte Baustelle verlängert. Bei diesem Verfahren findet – im Gegensatz zum geometrischen Nivellement mit Vor- und Rückblick, wie es heute angewendet wird – kein Ausgleich von Refraktion und Erdkrümmung statt. Und vermutlich ist es die Erdkrümmung, die sich in den untersuchten Trassenabschnitten in dieser Weise ausgewirkt hat, dass die abgesteckten Gefälle nicht den Sollwerten entsprachen. Bezieht man nämlich die Auswirkungen der Erdkrümmung in die Berechnung der Gefälle ein, so ergeben sich ziemlich exakt die planmäßigen Werte. Daraus zu schließen, die römischen Ingenieure hätten von der Kugelgestalt der Erde nichts gewusst, ist sicherlich unzulässig. Es scheint aber, als hätten sie nicht ahnen können, dass die Erdkrümmung sich auf kurze Strecken schon derart bemerkbar macht.

## **Aquäduktbau**

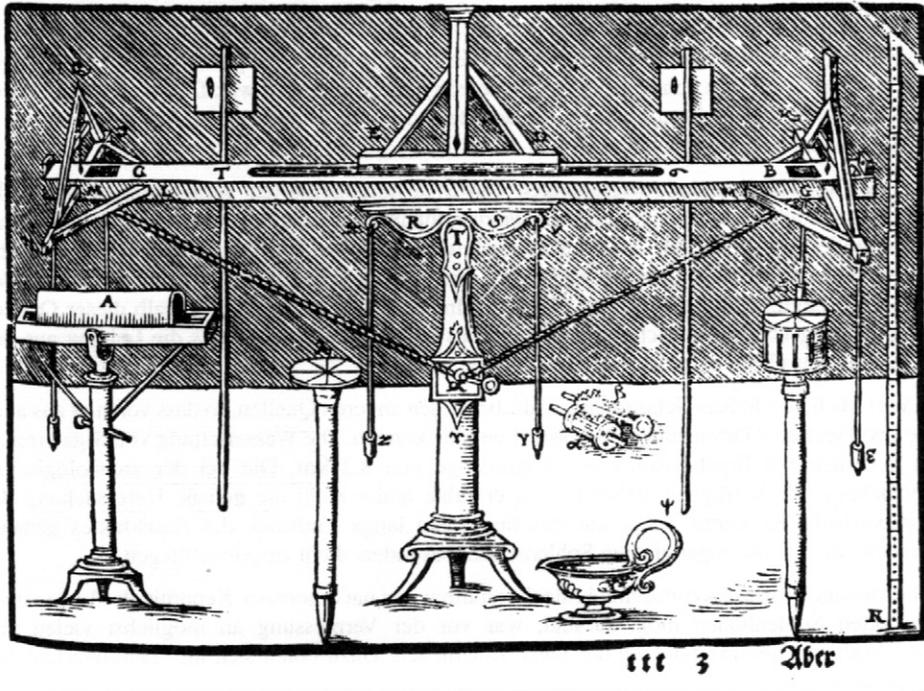
### *Methoden der präzisen Gefälleabsteckung*

Betrachtet man den Verlauf einer antiken Fernwasserleitung im Gelände oder in einer Karte, kann eigentlich der Gedanke, es habe eine ordentliche Trassenabsteckung in römischer Zeit nicht gegeben, gar nicht aufkommen. So einleuchtend, sinnvoll oder gar unverzichtbar eine solche Trassierung auch erscheinen muss, der Nachweis der Absteckungsmethoden konnte aufgrund der zeitgenössischen Literatur oder nach archäologischen Befunden bis zu den Befunden von Siga und Köln nicht geführt werden. Erst die Rückschlüsse aus den Ergebnissen der zwei archäologischen Untersuchungen an den Fernwasserleitungen von Siga und der Eifelwasserleitung nach Köln ergaben eine Vorstellung von den in antiker Zeit angewendeten Planungs- und Trassierungsmethoden, wobei ohne die Befunde von Siga die Kölner Befunde viel schwerer zu erklären gewesen wären.

Das Konzept zur Aufteilung des Gesamtgefälles eines Aquäduktes wurde auf der Grundlage eines über die gesamte Trasse geführten Hauptnivellements aufgestellt. Auf diese Weise war für den antiken Ingenieur zu klären, ob das Wasserdargebot überhaupt mit einem Versorgungsgebiet planerisch zu verbinden gewesen war.

Bei einem solchen Hauptnivellement bediente man sich sicherlich eines als Chorobat bei Vitruv beschriebenen Gerätes. Hierbei wurde ein sechs Meter langer Richtscheit mittels Loten und Wasserwaage horizontal gestellt und über dessen Oberkante und die auf diese Weise gebildete Ziellinie nivelliert. Das Verfahren ging, wie heute auch noch, über Rückblick und Vorblick vonstatten, es fehlte bei der Durchführung des Nivellements im Vergleich zu modernen Verfahren lediglich die optische Visierhilfe in Form eines Fernrohres mit Fadenkreuz.

**Egentliche Furrenssung mancherley Instrument  
der Wasserwagen vnd absehen der Feldmessung.  
Magst hierüber auch wol sehen die figur oben am 243. blat.**



*Chorobat. Römisches Nivelliergerät nach Vitruv in einer Rekonstruktion von W. Ryff*

Die Ausgrabungen von Siga und Köln haben gezeigt, dass auf diese Weise zwar recht genau Höhenunterschiede ermittelt werden konnten, die Absteckung von Soll-Gefällen innerhalb einer Baustelle oder einzelner Baulose ist auf diese Weise aber nicht durchgeführt worden. Hierzu bediente man sich vielmehr eines Verfahrens, das im Kanalbau vor wenigen Jahren noch üblich war, nämlich des „Austafelns“.

Dazu benutzt man drei T-förmig konstruierte Zieltafeln, von denen zwei über den Messpunkten aufgestellt wurden, die man vorher in „glattem“ Abstand in die Erde geschlagen hatte. Die beiden Messpfähchen hatte man am Anfang der auszutafelnden Strecke exakt so tief in die Erde eingeschlagen, dass sie zueinander einen Höhenunterschied aufwiesen, der dem Sollgefälle im anschließenden Trassenabschnitt entsprach. Durch Peilung über die Oberkanten der beiden T's wurde das Sollgefälle in Augenhöhe sichtbar gemacht und konnte mittels des dritten T's für den nächsten Gefällepunkt im Verlauf der Trasse markiert werden.

Auf diese Weise verfuhr man fortlaufend bis zum Ende des Bauloses oder bis zum nächsten Trassenfestpunkt, der wiederum durch ein einnivelliertes Holzpfähchen markiert war. Dieser Zwangspunkt musste höhenmäßig möglichst exakt getroffen werden, da ein zu tiefes Erreichen dieses Punktes zu einem Nacharbeiten (Auffüllen) der gesamten Wasserleitungssohle im vorangegangenen Abschnitt geführt hätte. Kam man in diesem Festpunkt jedoch zu hoch an, so musste die Sohle der Wasserleitung durch eine Stufe oder – bei größeren Differenzen – durch ein Tosbecken an das Anschlussbaulos angeschlossen werden.

Durch den archäologischen Nachweis von Gefälleknicken im Aquädukt von Siga sowie von Höhenstufen und Tosbecken in der Sohle der Kölner Leitung war es erstmals möglich, Aussagen über das in römischer Zeit angewendete Absteckverfahren für Aquäduktgefälle zu machen.

### *Der Aquädukt von Siga (Algerien)*

Die Leitung von Siga war deshalb für auf die Vermessungsmethoden gerichtete Untersuchungen so gut geeignet, weil ihre Sohle auf eine Strecke von 5 km zugänglich war. Damit unterschied sich der Befund von den meisten anderen Aquädukten, die nur in begrenzten Abschnitten oder in Aufschlüssen zu begutachten sind.

Bei den im Rahmen der Ausgrabungen von Siga durchgeführten Vermessungen wurde die römische Aquädukttrasse zunächst einer Bestandsaufnahme unterzogen. Dabei zeigte sich nicht nur, dass zumindest die Sohle des Aquäduktes über weite Strecken recht gut erhalten war, sondern überraschenderweise auch, dass der Kopf der Leitung nicht – wie bisher angenommen – bei den Quellen Ain Noubia oder Ain M'akma liegt. Vielmehr lassen sich noch oberhalb dieser Quellen weitere Leitungsabschnitte nachweisen, so dass es nunmehr sicher ist, dass die Leitung aus den Quellen von Râs el Ma gespeist wurde.

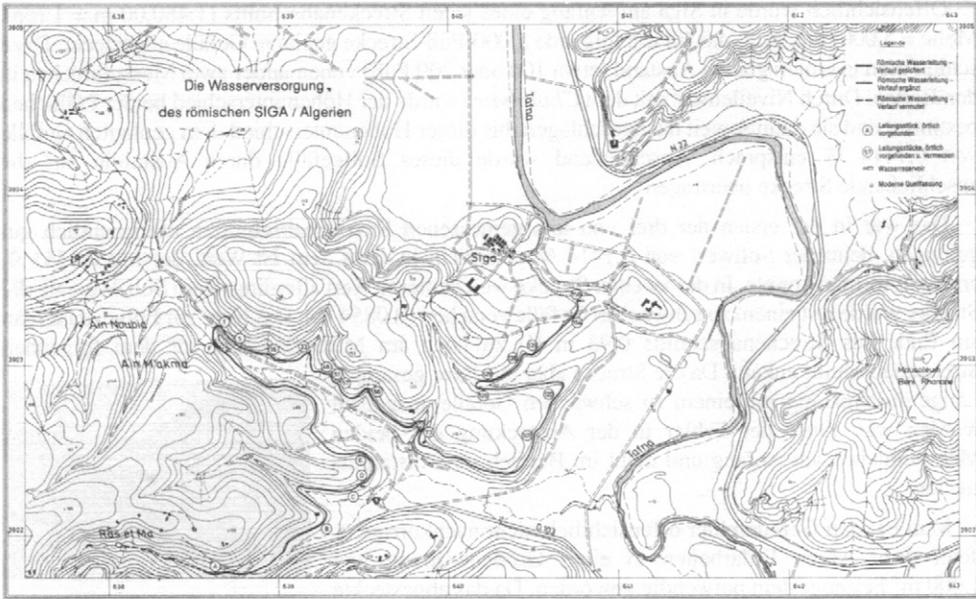
Râs el Ma liefert höhere Schüttmengen als die beiden anderen Quellen, so dass von hier aus auch heute noch größere Gartenanlagen bewässert werden können. Die Wasserleitung von Siga erreicht nach den neuesten Ergebnissen eine Gesamtlänge von 8,2 km. Die bei der archäologischen Untersuchung zur Verfügung stehende Zeit erlaubte leider nicht die genaue Untersuchung des Gesamtverlaufs. Es wurde daher nur das fast 5 km lange Endstück des Aquäduktes genauer untersucht, da hier die zugänglichen Sohlenstücke besonders dicht zusammenliegen.

Da Aussagen über das römische Absteckverfahren nur nach genauer Kenntnis der Lage sowie der exakten Sohlenhöhen möglich sind, war vor der Vermessung an möglichst vielen und aussagekräftigen Leitungspunkten die Sohle freizulegen. Dazu boten sich im Trassenverlauf fast 200 Punkte an.

Die Kartierung der durch ein geometrisches Nivellement gewonnenen Höhenpunkte ergab ein aussagekräftiges Diagramm des Leitungsverlaufs im Längsschnitt. Dabei zeigte sich für den untersuchten 5 km langen Trassenabschnitt, dass das Gefälle nicht über die gesamte Länge gleichmäßig verlief, sondern dass stattdessen drei Abschnitte mit jeweils gleichmäßigem, aber unterschiedlichem Gefälle zu erkennen waren.



*Die Methode des Austafelns;  
Gefälleabsteckung beim Bau  
römischer Wasserleitungen*



*Siga (Algerien). Lageplan mit Trassenverlauf der römischen Wasserleitung*

Im Längsprofil wurde von diesen drei Abschnitten auf graphischem Wege jeweils eine ausgleichende Gerade hergestellt, durch die die im Millimeterbereich liegenden Abweichungen der Punkte ausgeglichen wurden. Für diese geradlinig verlaufenden Abschnitte konnte danach ein gleichmäßig abgestecktes Gefälle festgestellt werden. Schon der erste Augenschein ließ erkennen, dass die jeweils gleichmäßigen Gefälleabschnitte in etwa gleich lang waren; die genaue Streckenermittlung ergab die Werte 1.449,17 m, 1.473,34 m und 1.504,07 m. Im arithmetischen Mittel lagen diese Strecken mit 1.475,53 m erstaunlich nahe bei einer festen römischen Maßeinheit, nämlich der Meile (= 5.000 Fuß = 1.480,00 m).

Diese Nähe zu einer amtlichen Maßeinheit ließ nur den einen Schluss zu, dass nämlich die Gesamtstrecke der Aquädukttrasse vor dem Ausbau in gleich lange Abschnitte von jeweils einer römischen Meile eingeteilt worden war.

Es fällt weiterhin auf, dass die für diese drei Trassenabschnitte ermittelten Gefälle mit 0,1341 %, 0,0854 % und 0,2009 % keine glatten %-Werte aufwiesen – sie nicht einmal nahezu glatte %-Werte erkennen ließen. Das lässt unter Berücksichtigung der bisher gewonnenen Erkenntnisse erkennen, dass glatte %-Werte bei der Gefälleabsteckung dieser Wasserleitung nicht geplant gewesen sind. Schon diese Tatsache deutet darauf hin, dass die 8,2 km lange Leitungsstrasse nicht in mehrere Baulose eingeteilt war, sondern in einem Zuge an der Quelle beginnend ausgebaut wurde. Bei im Abstand von 1.480 m nachgewiesenen Gefälleknickpunkten handelt es sich also nicht um die Begrenzung von Baulosen, sondern um Kontrollpunkte für die Gefälleabsteckung.

Der von uns zwischen der Quelle und dem *Castellum divisorium* ermittelte Höhenunterschied lässt für die Gesamtstrecke ein einheitliches Gefälle von 1,1414 % errechnen. Dieser Wert entspricht in etwa dem für die drei exakt ausnivellierten Streckenabschnitte ( $3 \times 1.480,00 = 4.440,00$  m) gemittelten Wert von 0,1401 %. Es liegt deshalb der Schluss nahe, man habe das Gefälle dieser relativ kurzen Wasserleitungsstrasse nicht mit glatten %-Werten geplant, sondern mit einem einheitlichen und durchgängigen Wert, der zuvor aus dem Höhenunterschied zwischen Quelle und Stadt ermittelt worden war.

Offensichtlich wurde in Siga am Anfang eines jeden Streckenabschnitts (1.480,00 m = 1 röm. Meile = 5.000 röm. Fuß) das für die folgende 5.000-Fuß-Strecke geplante Gefälle abgesteckt. Dazu schlug man in einem glatten Abstand (etwa 100 oder 200 Fuß) voneinander zwei Messpfähchen in den Boden. Durch Nivellement mit dem *Chorobates* wurde der Höhenunterschied beider Pfähchen bestimmt und sie dann soweit nachgeschlagen, bis dieser Höhenunterschied dem geplanten Gefälle von 0,1414 % entsprach. Anschließend wurde dieses Sollgefälle durch Austafeln auf die anschließende Strecke übertragen.

Das war in der ersten der drei von uns gemessenen Streckenabschnitten offensichtlich gut gelungen, denn der Sollwert von 0,1414 % entspricht in etwa dem Ist-Wert, der mit 0,1341 % ermittelt werden konnte. In der zweiten Strecke weicht dieser Wert allerdings vom Soll-Wert ab, die Strecke wurde mit einem zu schwachen Gefälle versehen (0,0854 %). Das hatte zur Folge, dass man am Ende des Streckenabschnitts 0,93 m (!) zu hoch am Messpfähchen vor dem folgenden Streckenabschnitt ankam. Da die Strecke aber auf ihrer gesamten Länge durchgängig mit einem zu schwachen Gefälle ausgebaut worden war, muss der Fehler in der Absteckung der beiden Messpfähchen am Anfang und nicht im Bereich des Austafelns stecken.

Man hat den Gefällefehler offensichtlich nicht nachkorrigiert, denn dazu wären Erdarbeiten in einer Größenordnung von 1.000 m<sup>3</sup> Felsengestein notwendig geworden. Da das abgesteckte Gefälle auch in seinem fehlerhaften %-Wert immer noch groß genug war, um den Durchfluss des Wassers zu gewährleisten, hat man auf ein Nacharbeiten in diesem Streckenabschnitt verzichtet und stattdessen im nächsten Streckenabschnitt ein entsprechend stärkeres Gefälle untergebracht. Durch Abstecken und den gelungenen Ausbau eines nunmehr auf 0,2009 % geänderten Gefälles wurde am Ende des dritten Streckenabschnitts der Messpunkt in seiner Soll-Höhe erreicht.



*Siga (Algerien). Quellgebiet  
Râs el Ma.*

Für uns erwies sich die Auswirkung eines Fehlers in den Vermessungsarbeiten bei der Absteckung der Aquäduktrasse von Siga als ein durchaus glücklicher Umstand, denn nur auf diese Weise trat in einer ansonsten durchgängig geplanten Gefällelinie eine Abnormität zutage. Nur so konnten wir überhaupt einen Einblick in die Methoden der Trassierung gewinnen. Wäre nämlich die Gesamttrasse fehlerlos abgesteckt worden, hätte sie sich in unserem Längsschnitt durch die Trasse als gerade Linie mit einheitlichem Gefälle gezeigt; zumindest die Trasseneinteilung in 5.000-Fuß-Abschnitte wäre nicht offensichtlich geworden.

Wir haben es in Siga mit einer relativ kurzen Wasserleitungstrasse zu tun und konnten nachweisen, daß die römischen Ingenieure derartige Trassen mit einheitlichem Gefälle zwischen Quelle und Stadt ausgebaut haben. Dabei wurde die Strecke offensichtlich nicht in mehrere Baulose eingeteilt, sondern an der Quelle beginnend in einem Zuge zur Stadt hin ausgebaut. Bei diesem Verfahren konnten bei den Zwischenpunkten festgestellte Höhenfehler im anschließenden Streckenabschnitt ausgeglichen werden.

### *Der römische Eifelwasserleitung nach Köln*

Die großen römischen Fernwasserleitungen, die Längen bis zu 95,4 km (Köln), 130 km (Karthago) und 242 km (Istanbul) erreichten, waren schon aus Baubetriebs- und Bauzeitgründen anders zu behandeln. Hier wurde die Gesamttrasse in mehrere Baulose eingeteilt, in denen von verschiedenen Bautrupps gleichzeitig gearbeitet werden konnte. Innerhalb der Baulose passte man sich mit dem Gefälle dem jeweiligen Gelände an.

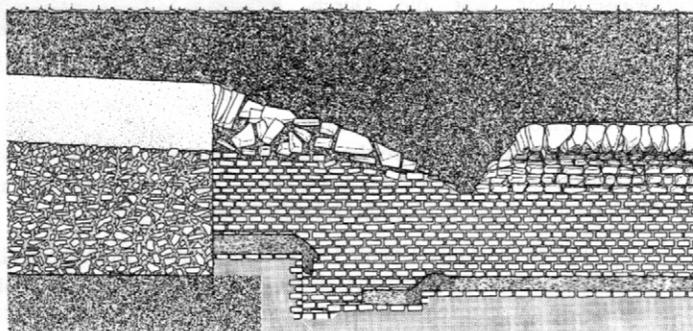
Bei der Bearbeitung der Trasse der Eifelwasserleitung für die COLONIA CLAUDIA ARA AGRIPPINENSIVM (CCAA) wurden zwei solcher Baulosgrenzen archäologisch nachgewiesen.

Diese waren erkennbar, weil in der Nahtstelle zweier Baulose aufgetretene Höhenfehler im anschließenden Baulos nicht mehr zu korrigieren waren, denn durch den gleichzeitigen Ausbau der Strecke traf man mit dem Ende eines Bauloses zwangsläufig immer auf den schon ausgebauten Anfang des Anschlussbauloses. In der Eifel hat sich gezeigt, dass beim Auftreten kleiner Differenzen (z. B. 15 cm) eine kleine Stufe in der Leitungssohle als Übergang von einem Baulos zum nächsten genügte. Für größere Differenzen (z. B. 38 cm) baute man stattdessen ein im Mauerwerk verstärktes Tosbecken in die Leitung, um auf diese Weise Zerstörungen durch die Kraft des Wassers zu vermeiden.

Da eine Fernwasserleitung wie der Eifel-Aquädukt wegen des schwierig zu durchfahrenden Geländes ohnehin nicht mit gleichmäßigem Gefälle auszubauen war, konnte man andere planerische Kriterien zugrunde legen und die einzelnen Gefälleabschnitte mit glatten %-Werten versehen. Im Bereich der von uns nachgewiesenen Baulose wurden sowohl die Gefällewerte als auch die Streckenabschnitte mit nahezu glatten Werten im römischen Maßsystem ermittelt. Es ergaben sich Streckenabschnitte von 5.000 Fuß, bzw. 13.000 Fuß Länge und Gefällewerte von 0,297 % und 0,298 %. Berücksichtigt man die in einer Baulosgrenze aufgetretene Höhendifferenz von 38 cm in der Berechnung des Gefälles, so rundet sich der Wert im vorhergehenden Streckenabschnitt sogar auf 0,3 %.

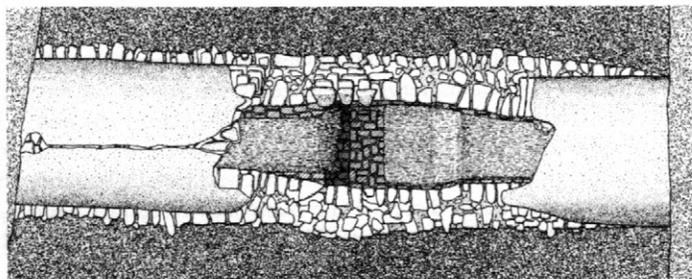
Das legt die Vermutung nahe, hier sei vom Planungsgedanken her ein „glattes“ Gefälle von 0,3 % abzustecken gewesen, also ein Gefälle von 3 römischen Fuß auf 1000. Das zu vorsichtig, also flacher als geplant abgesteckte Gefälle hat schließlich dazu geführt, dass man in der Baulosgrenze um 0,38 m zu hoch auf den schon fertigen Kanal des anschließenden Bauloses getroffen ist.

Es darf aber nicht unerwähnt bleiben, dass bei diesem Absteckverfahren die Einflüsse der Erdkrümmung nicht eliminiert wurden. Da deren Auswirkungen sich in jedem Fall als zu flach abgestecktes Gefälle darstellten, sind die Höhendifferenzen in den Trassennahtstellen zum Teil auch darauf zurückzuführen; die Gefälleabsteckung mittels Austafeln war also noch genauer, als es die Ergebnisse erscheinen lassen.



Fließrichtung —

*Eifelwasserleitung nach  
Köln. Tosbecken zum  
Ausgleich der  
Höhendifferenz im Bereich  
einer Baulosgrenze*



In Siga und in der Eifel haben wir zweimal das vergleichbare Problem einer auf den ersten Blick unerklärlichen Höhendifferenz im Verlauf einer Wasserleitungssohle vor uns. Während in Siga der Kanal mit seinem nächsten Abschnitt höhengleich anschließt, wurde in der Kölner Leitung eine Stufe in Form eines Tosbeckens installiert.

Die Ursache für die unterschiedliche Lösung eines vergleichbaren Problems könnte mit der Organisation auf jeder dieser Baustellen zusammenhängen: Die kleine Leitung von Siga ist von einem einzigen Unternehmer bei den Quellen Räs el Ma beginnend gebaut worden, während die 95 Kilometer der Eifelleitung erwiesenermaßen in mehrere Baulose aufgeteilt waren. Damit wird nun auch das Verfahren der Sohlen-Feinabsteckung offenbar, die offensichtlich innerhalb der Baulose, von deren oberen Enden ausgehend, vorgenommen worden ist.

Fassen wir zusammen: Erste grundlegende Arbeit zur Planung einer Fernwasserleitung war die Durchführung eines Hauptnivellements über die gesamte in Frage kommende Strecke. Dazu bediente man sich des bei Vitruv beschriebenen *Chorobates*. Auf diese Weise konnte geklärt werden, ob ein Quellgebiet mittels einer Gefälleleitung mit einem Versorgungsgebiet verbunden werden konnte. Danach wurde eine planerisch gefundene Trasse in das Gelände übertragen und durch Holzpfähchen markiert.

Im archäologisch nachweisbaren Fall in Siga hat man den Ausbau eines durchgängigen Gefälles, das sich aus der Höhendifferenz zwischen Quelle und Stadt (Energiehöhe) und der Länge der Trasse errechnete, geplant. Danach sind im Abstand von einer römischen Meile (= 1.480 m) die Festpunkte für das Sollgefälle abgesteckt worden. Innerhalb dieser Teilstrecken wurde das Gefälle durch Austafeln abgesteckt. Höhendifferenzen, die sich beim Ausbau am Ende eines Abschnittes ergaben, wurden durch Änderung des Anschlussgefälles korrigiert.

Bei größeren Leitungen konnte die Gesamttrasse in mehrere Baulose unterteilt sein, wobei die Markierungen der Baulosgrenzen gleichzeitig Festpunkte für das geplante Gefälle waren. In der Eifel sind Bauloslängen von 4.400 m (= 15.000 röm. Fuß) und 5.330 m (= 18.000 röm. Fuß) archäologisch nachgewiesen. Es ist aber auch nachgewiesen, dass innerhalb eines Bauloses mehrere geländebedingte Abschnitte mit unterschiedlichem Gefälle bestanden haben. Da die Zwangspunkte der Gefälleabschnitte in diesem Falle planerisch festgelegt wurden, konnte die Teilgefälle mit glatten %-Werten versehen werden. Die Gefälleabsteckung innerhalb der einzelnen Teilstrecken erfolgte auch hier wiederum durch Austafeln.



*Eifelwasserleitung nach Köln. Tosbecken im Grabungsbefund*

## Tunnelbau

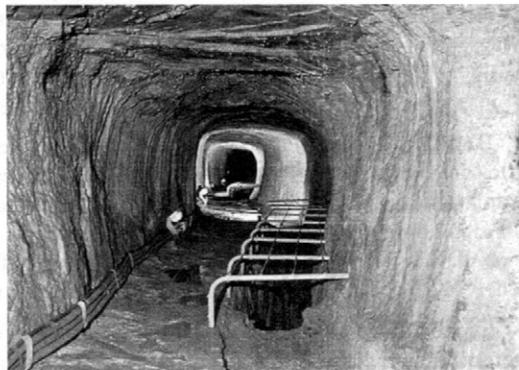
### *Der Tunnel des Eupalinos auf Samos (Griechenland)*

Dieses Bauwerk kann als erster Tunnel der Antike, der in allen Einzelheiten ingenieurmäßig durchdacht worden ist, bezeichnet werden. In der nachfolgenden Betrachtung wird versucht, aus dem Aufmaß des vorhandenen Tunnelbauwerks die Trassierungs-Strategie des Baumeisters zu rekonstruieren. (Die vollständige Fassung findet sich in K. Grewe, Licht am Ende des Tunnels, S. 58–69). Grundlage dieser Rekonstruktion sind der Aufmaßplan von K. Pestal und die von H. Kienast gefundenen und entschlüsselten Messmarken an der Tunnelwandung. Dass bei der Betrachtung einer solchen Rekonstruktion erhebliche Toleranzen zu akzeptieren sind, geht schon aus den messbaren Abweichungen zwischen den Festpunkt-Markierungen an der Tunnelwandung hervor: Das gefundene Grundmaß von 20,6 m musste als Mittelwert der einwandfrei bestimmbaren Markierungsabstände festgelegt werden, und diese schwanken immerhin zwischen 19,45 m und 21,85 m.

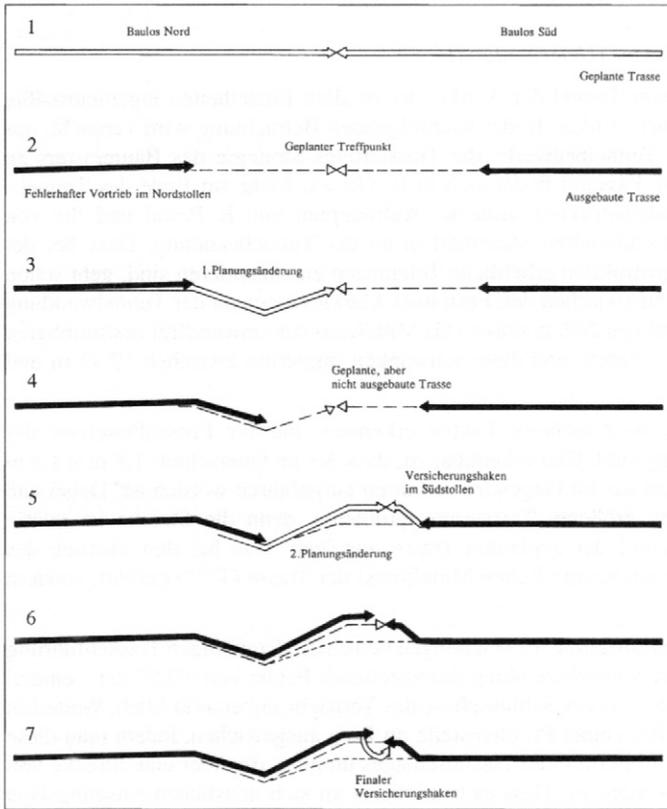
Der Grundriss des Tunnels lässt mehrere Fakten erkennen, die für Entschlüsselung der Bauwerksstrategie von Bedeutung sind. Klar erkennbar ist, dass der im Querschnitt 1,8 m x 1,8 m messende Tunnel von zwei Seiten aus im Gegenort-Verfahren aufgeföhren worden ist. Dabei gab es im Südstollen offenbar keine größeren Trassierungsprobleme, denn die Strecke ist relativ geradlinig und vor allem exakt auf der geplanten Trasse angelegt. Man hat den Vortrieb des Südstollens allerdings nicht bis zum rechnerischen Mittelpunkt der Trasse ( $T^{\text{ideal}}$ ) geföhrt, sondern bereits gut 100 m vorher beendet.

Der Nordstollen weist dagegen auffällige Abweichungen von einer planmäßigen Trassenführung auf. Dazu gehört einmal der in der Vortriebsrichtung festzustellende Fehler von  $\sim 0,5^\circ$ , der – einmal in die Trassierung eingeschlichen – bis zur Schlussphase des Vortriebs unbemerkt blieb. Weiterhin ist man im Vortrieb des Nordstollens einer Problemstelle im Berg ausgewichen, indem man diese mittels einer Umgehungsstrecke in Form eines Hakenschlages umging, der über eine Strecke von immerhin rund 250 m geföhrt worden ist. Dass es trotz dieser an sich misslichen Ausgangslage gelang, beide Stollen zu einem Tunnel zu vereinigen, ist als eine der großartigsten Ingenieurleistungen der Technikgeschichte zu bezeichnen.

Das Gelingen des Bauwerks setzte voraus, dass der Tunnel in allen Einzelheiten geplant war. Diese Planung musste so angelegt sein, dass sie – beispielsweise beim Auftreten geologischer Schwierigkeiten – Änderungen zuließ. Dabei durfte der Vortrieb in beiden Stollen zu keiner Zeit unkontrolliert sein, denn der Baumeister musste jederzeit wissen, wo er sich mit seinen beiden Suchorten gerade befand. Schließlich musste die Planung eine Versicherung aufweisen, durch die vermeidbare und unvermeidbare Vortriebsfehler eliminiert wurden, so dass schließlich ein Durchschlag an irgendeiner Stelle nahe dem Soll-Teffpunkt ( $T^{\text{soll}}$ ) gewährleistet war.



*Eupalinos-Tunnel auf Samos  
(Griechenland). Tunnelinneres mit Graben  
für die Verlegung der Tonrohrleitung*



*Eupalinos-Tunnel auf Samos (Griechenland). Die Bauphasen des Tunnels belegen eine geniale Strategie des Baumeisters, obwohl die geradlinig geplante Trassenführung und der anfänglich in der Trassenmitte geplante Treffpunkt während des Vortriebs wegen geologischer Probleme aufgegeben werden mussten.*

Eupalinos ist von keiner Schwierigkeit verschont geblieben, aber er hat offensichtlich alle Möglichkeiten gekannt, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Plan und Ausführung des Eupalinos-Tunnels lassen eine Strategie des Baumeisters erkennen, die bezüglich ihrer geometrischen Grundlagen zeitgleich keine Parallelen hat und erst in römischer Zeit wieder erreicht werden sollte.

Die Gesamttrasse ist offensichtlich als Gegenort-Tunnel mit zwei gleichlangen Baulosen, dem Nord-Stollen und dem Süd-Stollen, geplant gewesen. Wenn sich aus dem Aufmaß des Tunnels heute zwei unterschiedlich lang aufgefahrne Stollenvortriebe ergeben, kann daraus nicht geschlossen werden, diese seien von vornherein so geplant gewesen. Schon aus wirtschaftlichen und baubetrieblichen Gründen wird der Baumeister in seiner ersten Planung von gleich langen Baulosen ausgegangen sein, denn jede andere Planung hatte zur Folge, dass man mit einem Baulos bereits fertig war, während im anderen noch gearbeitet werden musste. Außerdem waren die Transportwege für den Aushub in einem der Baulose länger als notwendig.

Wenn hingegen angeführt wird, die Vortrieblängen seien entsprechend der äußeren Form des zu durchfahrenden Berges geplant gewesen und der geplante Treffpunkt hätte sich aus der Lage der Kammlinie des Berges ergeben, so ist das aus der Sicht des Ingenieurs nicht nachzuvollziehen. Da der Baumeister den geologischen Aufbau des Berges nicht kannte und nicht kennen konnte, wird er eine plausible Trassenlinie mit einem mittigen Treffpunkt ( $T^{ideal}$ ) geplant haben, wobei sein Plan jederzeit Änderungen aus Unwägbarkeiten zulassen musste.

Eupalinos muss eine topographische Aufnahme des für den Tunnelbau vorgesehenen Berges vorgenommen haben, und er wird dabei nicht mit einer Inaugenscheinnahme des Geländes

ausgekommen sein, sondern er hat zumindest einen groben Plan mit den wichtigsten Geländemerkmale anfertigen müssen. Auf dieser Grundlage hat er die Lage des Tunnels mitsamt den Mundlöchern planerisch bestimmt, wobei Richtung und Länge der Tunnelröhre wichtige Planungselemente waren. Das Aufmaß des fertigen Tunnels belegt ein exaktes Nivellement um oder über den Berg, denn die höhenmäßige Festlegung der Mundlöcher und damit die Ausgangslage der Stollen ist niveaugleich gelungen. Nun war zwischen den fixierten Mundlöchern noch einmal eine exakte Gerade über den Berg abzustecken, denn diese war die in das Gelände übertragene Planungslinie und damit die Basis für den gesamten Tunnelbau. Auf dieser Basis waren von den zwei Mundlöchern aus Stollen vorzutreiben, und je besser es gelang, die über den Berg abgesteckte Richtung in die Baustelle zu übertragen, um so genauer würde der geplante Durchstich gelingen. Ob der in der Nordbaustelle zu konstatierende Richtungsfehler von  $\sim 0,5^\circ$  bei der Signalisierung der Verbindungsgeraden zwischen den Mundlöchern über den Berg oder bei der Übertragung der Richtung in den Berg entstanden ist, lässt sich nicht mehr sagen. Vermutlich wies aber bereits die über den Berg abgesteckte Gerade einen Fehler auf, denn sie muss von ihm als fehlerfrei angesehen worden sein und wurde vermutlich bei allen Kontrollmessungen als Orientierung benutzt.

Die Übertragung der Vortriebsrichtung war allerdings nicht einfach durchzuführen, denn die Mundlöcher lagen zwangsläufig in einem Berghang. Da für die Übertragung nur eine visuelle Methode in Frage kam, waren zumindest zwei auf der Planungslinie liegende Festpunkte erforderlich, die vom Suchort in jeder Phase des Vortriebs einsehbar sein mussten. Die über den Berg verlaufende Basislinie musste also über die Mundlöcher hinaus verlängert und signalisiert werden, um sie aus den Suchstollen heraus einsehen zu können. Mindestens zwei Punkte auf dieser Linie mussten mit Fluchtstäben ausgesteckt sein, um die Richtung in den Berg hineinfluchten zu können. Einer dieser Punkte war in jedem Fall direkt vor dem Mundloch zu signalisieren. Da aber genügend Abstand zwischen den Punkten liegen musste, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, lag der zweite Punkt oftmals geländebedingt zu tief im Abhang und konnte von der Baustelle aus nicht mehr gesehen werden. Hier war Abhilfe zu schaffen, wenn das Mundloch auf einer Seite des Berges lag, an die sich ein Tal anschloss. In diesem Fall konnte man den zweiten Festpunkt im jenseits des Tales anschließenden Berghang platzieren, und alle Bedingungen für eine genaue Richtungsübertragung waren erfüllt. Stand ein solcher Gegenhang nicht zur Verfügung, z. B. weil das Mundloch in einem zum Meer hin abfallenden Berghang lag, so war auf der Basislinie im Bereich der Tunnelbaustelle ein Visierschacht abzuteufen. Mundloch und Visierschacht waren auf Tunnelniveau miteinander zu verbinden, wodurch gleichzeitig die Anfangsstrecke des Tunnels aufgefahren war. Ein im Visierschacht fixierter Punkt und der Festpunkt am Mundloch gaben nun die Richtung für den Vortrieb vor. Eupalinos hatte das Problem, beide Lösungen anwenden zu müssen.

Der Südstollen scheint dem Baumeister kaum Trassierungsprobleme bereitet zu haben. Sein Vortrieb ist relativ geradlinig und über die an der Westwand angebrachten Tunnelmarkierungen lässt sich das der Planung und Trassierung zugrunde liegende Grundmaß rekonstruieren. Da es Kienast gelang, nicht nur die Marken aufzufinden, sondern darüber hinaus auch die Zählung zu entschlüsseln, war hier in rückwärtiger Richtung sogar deren Nullpunkt zu bestimmen: Die erste Markierung findet sich anstelle der Messmarke „20“, so dass man 20 Maßeinheiten à 20,6 m zurückmessen muss, um den Nullpunkt der Vermessung im Südstollen zu finden.

Dem richtigen Vortrieb diene als Visurhilfe ein Schacht, der rund 20 m vom Mundloch entfernt exakt auf der Trassenlinie niedergebracht worden war. Die Visur der Vortriebsrichtung erfolgte über einen vor dem Mundloch platzierten Fluchtstab und ein im Visierschacht herabhängendes Schnurlot – so muss man es sich jedenfalls vorstellen. Je weiter der Vortrieb in den Berg aufgefahren war, um so mehr konnte man diese Visurhilfe vernachlässigen, denn nun genügte der einfache Rückblick zum Tunnelmundloch, um sich Klarheit über einen geradlinigen Vortrieb zu verschaffen. Das durch das Mundloch einfallende Licht war nun eine wichtige Orientierungshilfe für den Vortrieb, denn sobald der Lichtfleck im Mundloch aus dem Blickfeld der Arbeiter vor Ort verschwand, war klar, dass man von der geraden Vortriebslinie abgewichen war. Dabei muss man sich aber im Klaren

darüber sein, dass auf diese Weise nur die Geradlinigkeit des Vortriebs zu kontrollieren war – Abweichungen von der richtigen Trassenlinie waren auf diese Weise nicht zu kontrollieren, dafür waren von Zeit zu Zeit Kontrollmessungen notwendig.

Im Südstollen ist der Vortrieb nicht nur geradlinig, sondern darüber hinaus auch planmäßig auf der vorgesehenen Trassenlinie gelungen. Wäre man im Nordstollen gleichermaßen erfolgreich gewesen, so hätten sich beide Baulose ohne zusätzliche Versicherungen im anfänglich geplanten Treffpunkt ( $T^{ideal}$ ) getroffen.

Nun gab es aber im Nordstollen offensichtlich Probleme mit der Festigkeit des durchfahrenen Gesteins. Aus diesem Grunde änderte Eupalinos seine Vortriebsstrategie. Er wich mit dem Vortrieb von der planmäßigen Trasse ab, um einen nach Westen gerichteten Hakenschlag aufzufahren. Dabei teilte er die bis zum  $T^{ideal}$  verbliebene Trasse in zwei Teile: auf der ersten Hälfte wollte er sich von der planmäßigen Trasse entfernen, um danach im gleichen Winkel wieder zu ihr zurückzukehren. Im Endpunkt des Hakenschlages hätte er in  $T^{ideal}$  auf den Suchort vom Südstollen stoßen können.

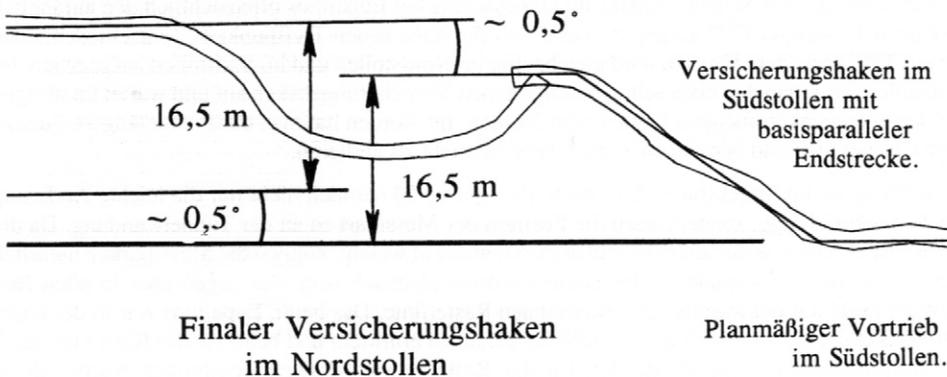
Geht man davon aus, dass der Vortrieb in beiden Stollen zeitlich etwa gleichmäßig aufgefahren worden sein dürfte, so werden beide Baulose stets ziemlich gleich tief in den Berg vorgedrungen sein. In nachträglicher Betrachtung wird klar, dass Eupalinos große Anstrengungen unternommen hat, um den durch Planänderung festgelegten Scheitelpunkt des Hakenschlages (Messmarke 20) zu erreichen. Die Planänderung einerseits und die Schwierigkeiten im weiteren Vortrieb andererseits haben aber vermutlich zu einer Verunsicherung des Baumeisters geführt. Er konnte sich nun nicht mehr sicher sein, den Treffpunkt  $T^{ideal}$  auch tatsächlich zu erreichen. Er ändert seine Strategie noch einmal.

Mit Erreichen des Scheitelpunktes in der Mitte des Hakenschlages im Nordstollen stellt er den geradlinigen Vortrieb im Südstollen ein. Beide Stollen sind in etwa gleich tief in den Berg vorgedrungen, als Eupalinos es vorzieht, seine Strategie auf „Nummer sicher“ umzustellen. Im Südstollen verlässt er seine Ausgangsrichtung, um eine schräge Versicherung anzulegen, die er so weit auffährt, bis er eine Parallele zur Basis im Abstand von acht Maßeinheiten erreicht. Danach knickt er in die Parallele zur Ausgangsrichtung ein und fährt noch einmal 5 m in Richtung Norden auf, ehe er mit dem Vortrieb endet.

In dieser Versicherungsmaßnahme ist ein kluger Schachzug des Baumeisters zu sehen, denn ihm ist klar geworden, dass man nicht von zwei Seiten aus suchend aufeinander zuarbeiten kann. Es ist vielmehr wesentlich unproblematischer und treffsicherer, von einer Seite aus einem festen Ziel zuzustreben. Da er durch Kontrollmessungen vermutlich längst selbst erkannt hat, dass sein Südstollen planmäßig aufgefahren war, stellt er den Vortrieb von Süden ein und konzentriert sich fortan darauf, die südliche Ortsbrust mit dem Vortrieb von Norden aus zu treffen.

Der Nordstollen hat Eupalinos von Anfang an die größeren Probleme verursacht. Das wird schon daran sichtbar, dass der komplette Eingangsbereich auf eine Strecke von 250 m ausgebaut werden musste, um die Tunnelröhre gegen Felseinstürze zu schützen. Dennoch gelingt es Eupalinos noch relativ gut, wenigstens eine geradlinige Strecke aufzufahren. Allerdings ist er mit seinem Vortrieb von der geplanten Trasse um  $\sim 0,5^\circ$  nach Osten abgewichen. Das Fatale für Eupalinos ist, daß offensichtlich all seine Kontrollmessungen diesen Fehler nicht aufgedeckt haben. Er glaubt, mit seinem Vortrieb an einer anderen Stelle zu sein, als er es in Wirklichkeit ist. Damit befindet sich Eupalinos in der anfangs beschriebene Situation, einer Phantomtrasse zu folgen. Sein Suchort liegt nicht auf dem Soll-Punkt ( $P^{soll}$ ), der ihn geradewegs zum angestrebten Treffpunkt führen würde. Er liegt auch nicht auf einem Ist-Punkt ( $P^{ist}$ ), wobei die Kenntnis der tatsächlichen Lage eine Vortriebskorrektur ermöglichen würde. Er liegt vielmehr auf einem fiktiven Punkt ( $P^{fiktiv}$ ), ohne sich dessen bewusst zu sein: Eupalinos muss im Nordvortrieb jederzeit geglaubt haben, er befände sich mit seinem Vortrieb auf  $P^{ist}$ , denn alle korrigierenden Maßnahmen die wir im Tunnelvortrieb erkennen können, lassen nur den Versuch erkennen, seinen jeweiligen Suchort von  $P^{ist}$  nach  $P^{soll}$  zurückzuführen.

Auswirkungen des fehlerhaften Anfangswinkels  $\alpha$  im Nordstollen ( $\sim 0,5^\circ$ ) führen zu einer Richtungsabweichung in der Größenordnung von 5 m.



Die basisparallelen Endstrecken im Vortrieb beider Baulose sind gleich ( $8 \text{ ME}^{\text{plan}} = 16,5 \text{ m}$ ). Im Nordstollen liegt der Suchort wegen des anfänglichen Richtungsfehlers allerdings in fiktiver Lage.

*Eupalinos-Tunnel auf Samos (Griechenland). Im Treffpunktbereich werden alle versteckten Vortriebsfehler mittels eines finalen Versicherungshakens eliminiert*

Unzweifelhaft hat Eupalinos aber befürchtet, dass er mit seinem Vortrieb einem solchen  $P^{\text{fiktiv}}$  gefolgt sein könnte, ansonsten hätten seine Versicherungsmaßnahmen, die im finalen Trassenbogen sichtbar werden, geringer ausfallen können. Eupalinos hatte im Nordstollen also nicht nur das Problem, durch kleine Korrekturen und einen großen Hakenschlag seinen tatsächlichen Vortrieb immer wieder auf die Solllinie zurückzuführen, er hatte sich zudem auch noch gegen versteckte Fehler zu versichern. Beides gelang ihm meisterhaft und bezeugt seinen hohen mathematischen, geometrischen und vermessungstechnischen Kenntnisstand.

Das Bemühen des Baumeisters, den planmäßigen Extrempunkt der Umfahrung (Messmarke 20) auch tatsächlich zu erreichen, ist in jeder Phase des Vortriebs zwischen den Messmarken 14 und 20 sichtbar: So führt er auf allen Zwischenstrecken leichte Richtungskorrekturen durch, um mit den Kontrollpunkten (Messmarken 15, 16, 17, 18, 19) innerhalb des Tunnelprofils zu liegen. Lediglich die Abweichung zwischen den Messmarken 17 und 18 ist so groß ausgefallen, dass er erst beim

übernächsten Kontrollpunkt (Messmarke 19) wieder zur Trasse zurückkommt. Messmarke 20, als Wechsellpunkt beim Vortrieb des Hakenschlages, wird bemerkenswert genau getroffen. Da dieser Punkt für die Absteckung der zur Basis zurückführenden Richtung von besonderer Bedeutung war, hat Eupalinos die Richtungsvermessung vor Messmarke 20 vermutlich mit besonderer Akribie durchgeführt.

Nun war eigentlich zu erwarten, dass die zweite Hälfte des Hakenschlages in der Art zur Basis zurückgeführt wurde, dass dieser Schenkel des Umgehungsdreiecks mit demselben Winkelmaß auf die Basis traf, mit dem er sie verlassen hatte. Möglicherweise haben aber die Schwierigkeiten, die in der ersten Hälfte der Umgehung sichtbar geworden sind, Eupalinos zu einer weiteren Änderung seiner Vortriebsstrategie veranlasst. In auffällig gerader Linienführung strebt der Vortrieb ab Messmarke 20 nicht mehr dem planmäßig angestrebten Treffpunkt  $T^{ideal}$  zu, sondern zielt östlich leicht daneben.

Mit Erreichen des Scheitelpunktes im Hakenschlag hat Eupalinos offensichtlich den anfänglich geplanten Treffpunkt  $T^{ideal}$  aufgegeben und sich für einen neuen Treffpunkt  $T^{soll}$  entschieden, denn der auf  $T^{ideal}$  gerichtete Vortrieb wird gleichzeitig im Nordstollen und im Südstollen aufgegeben. Im Südstollen fährt man den oben schon beschriebenen Versicherungshaken auf und wartet im übrigen auf den entgegenkommenden Stollen vom Norden. Im Norden hat man dafür eine längere Strecke Vortriebs vor sich und bemüht sich, die Übersicht nicht zu verlieren.

Auffällig ist im Streckenabschnitt nach Messmarke 20 nämlich nicht nur die leichte Änderung der Vortriebsrichtung, sondern auch die Position der Messmarken an der Tunnelwandung. Da die Vortriebsrichtung von der anfangs geplanten Richtung abweicht, können die Messmarken natürlich nicht mehr mit Knotenpunkten des Dreiecksrasters identisch sein. Sie liegen aber in allen fünf Punkten exakt auf der jeweils durchschnittenen Rasterlinie. Das heißt, Eupalinos war in der Lage, den Winkel der geänderten Vortriebsrichtung genau zu ermitteln und benutzte das Raster nur noch zur Kontrolle seiner Vortriebsstrecke. Da das Raster etwas schräger geschnitten wurde, als es planmäßig vorgesehen war, muss sich die Maßeinheit zwangsläufig ausdehnen. Eupalinos hat dem Rechnung getragen, denn es findet sich in diesem Streckenabschnitt ein einheitlich auf 20,7 m verlängertes Maß vor – der Bezug zur Basis, und damit die auf der Basis benutzte Maßeinheit  $ME^{red}$ , bleiben aber gleich, da er das Raster des Hakenschlages in der zweiten Hälfte der Umgehung nicht ändert.

Das Endstück des Südstollens war so angelegt, dass es 16,5 m ( $8 ME^{plan}$ ) östlich parallel der Basislinie lag. Damit ist die Strategie klar, nach welcher der Nordstollen ihm entgegenkommen sollte, nämlich ebenfalls  $8 ME^{plan}$  östlich der Basislinie. Vom Scheitelpunkt des Hakenschlages (Messmarke 20) aus war dazu im Nordstollen die Basislinie schräg zu schneiden, um die  $8 ME^{plan}$ -Parallele östlich davon zu erreichen. Da der Baumeister den neuen Vortriebswinkel selbst bestimmt hatte und da ihm weiterhin die Lage seines Ausgangspunktes (Messmarke 20) genau bekannt war, konnte er den nächsten Abschnitt des Nordstollens zielsicher angehen. Auf der gesamten Strecke dieses Abschnittes von fast 135 m Länge gelingt es ihm durch Richtungsausgleich immer wieder, eine Linie der (Schnur- oder) Sichtverbindung im Tunnel freizuhalten; lediglich zwischen den Messmarken 25 und 26 muss die Planungslinie durch eine kleine Korrektur im Wechselwinkel-Verfahren wieder erreicht werden. Eine neue Richtungsänderung erfährt der Vortrieb im Nordstollen mit Erreichen der Basisparallelen des Südstollens: Hier knickt man mit der Vortriebsrichtung ab, um – ebenfalls parallel zur Basis – auf den Südstollen zu zielen.

Im nachträglichen Aufmaß zeigt sich, dass man mit dem angestrebten Vortrieb auf einen Punkt zielte, der knapp 5 m zu weit östlich von  $T^{soll}$  lag: Man war zwar im Berg bemerkenswert planmäßig und äußerst exakt vorgegangen, hatte aber den Ausgangsfehler von  $\sim 0,50^\circ$ , der bei der Übertragung der obertägigen Tunnelachse in den Berg entstanden war, nie bemerkt und eliminiert. Die Abweichung der Vortriebsparallelen in der Schlussphase des Nordstollens zeigt die dem Winkelfehler von  $\sim 0,50^\circ$  genau entsprechende Größe.

Ob der Baumeister mit Erreichen des Endpunktes im basis-parallelen Vortrieb eine komplette Kontrollmessung seines gesamten Nordstollens einschließlich der über den Berg abgesteckten Geraden vorgenommen hat und dadurch die Abweichung schließlich doch noch aufdeckte, oder ob er eine solche Abweichung im Bereich des Möglichen einfach einkalkuliert hatte: zum endgültigen Zusammenführen der beiden Stollen bediente er sich eines finalen Versicherungsbogens in der Vortriebsstrecke des Nordstollens. Da die beiden Stollen planmäßig genau aufeinander zustreben sollten, konnte nur eine Abweichung des Nordstollens nach Osten zu einem Nicht-Zusammentreffen führen. Eine Abweichung nach Westen wäre von der Versicherung des Südstollens aufgefangen worden. Dessen muss Eupalinos sich bewusst gewesen sein, denn der weit ausladende Versicherungsbogen im Nordstollen buchtet nach Westen raumholend aus und trifft den Südstollen fast an dessen Spitze.

Auch bezüglich des höhenmäßigen Treffens beider Stollen versichert sich Eupalinos nachhaltig: Von Norden hebt er in der Schlussphase des Vortriebs die Firste des Stollens um 2,50 m kontinuierlich an, während er im Südstollen die Sohle auf die gleiche Weise um 0,6 m tieferlegt. Die auf beiden Seiten wie eine Schere geöffneten Vortriebe hätten sich auch bei einem Fehler in der Größenordnung der Tunnelhöhe nicht verfehlen können. Eine Vorsichtsmaßnahme, die eigentlich nicht nötig war, wie die nachträgliche Höhenbestimmung der Tunnelsohle zeigte: Im Süden lag man nur 0,3 m tiefer als im entgegenkommenden Baulos.

Zusammenfassend kann man sich also die Strategie des Eupalinos folgendermaßen vorstellen: 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 ein 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 ein Raster über seinen Bauplan, über welches er den schrägen Vortrieb auf seiner Basislinie verfolgen konnte.

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

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 Versicherungsbogen auf, der weit nach Westen ausbuchtete und den Versicherungsvortrieb des Südstollens genau an seiner Flanke traf.

### *Der Aquäduktunnel von Briord (Frankreich)*

Ein eindrucksvolles Beispiel für ein antikes Bauwerk, in welchem sich echte Fehler sowohl in der Höhenvermessung als auch in der Lagevermessung nachweisen lassen, kann der Aquäduktunnel von Briord in Frankreich gelten.

Der Tunnel von Briord zeigt in seinen Arbeitsspuren und in seiner Grundrissdarstellung nach der vermessungstechnischen Aufnahme deutliche Spuren seiner Planung und Trassierung. Sofort erkenn-

bar wird, dass dieser Tunnel von zwei Seiten aus im Gegenortverfahren ohne die Anlage von Bauschächten aufgeföhren worden ist. Der Treffpunkt beider Baulose ( $T^{ist}$ ) liegt nicht in der Mitte des 197,2 m langen Tunnels, sondern deutlich nach Osten versetzt: Zwei mit paralleler Linienföhierung gerade in den Berg vorgetriebene Stollen werden durch das schräg aufgefoöhrene Endstück des Westteils miteinander verbunden.

Diese Art der Tunneltrassierung ist in anderen Bauwerken bisher nicht aufgefallen, weshalb sich als erstes die grundsätzliche Frage stellt, ob dieser parallel versetzt geföhrt Vortrieb der beiden Stollen Teil der Strategie des Baumeisters war, oder ob er das Ergebnis einer fehlerhaften Tunnelabsteckung ist. Danach wären im Vortrieb tatsächlich Richtungsfehler zu konstatieren, wobei vorausgesetzt wird, dass nach dieser Strategie beabsichtigt gewesen wäre, von zwei Mundlöchern aus auf einer direkten und geradlinigen Verbindungslinie aufeinander zuzustreben.

Allerdings hätte bei einer solchermaßen fehlerhaften Richtungsabsteckung der vorgefundene Tunnelgrundriss nur schwerlich entstehen können. In diesem Fall hätte dem Bauleiter nämlich bei der Absteckung der Ausgangsrichtungen für beide Vortriebe derselbe Fehler, und zwar jeweils nach links gerichtet, unterlaufen müssen. Eine fehlerhafte Richtungsabsteckung hätte aber eher zu einer Schiefelage der Ausrichtung der beiden Vortriebsrichtungen zueinander geföhrt; denn zweimal genau denselben Absteckfehler zu machen, erscheint eher schwieriger, als die Richtungen von zwei Seiten aus richtig abzustecken. Zudem ist zu bedenken: Läge die Richtungsabweichung in einem fehlerhaften Vermessungspunkt im Verlauf der Trasse begründet, so würde das eher dazu geföhrt haben, dass die Vortriebsrichtungen nach einer Seite hin abdriften. Die beiden Suchstollen wären also auf einer Seite nach links abgedrifet, auf der anderen Seite hingegen nach rechts.

Auf diese Weise wären die beiden Vortriebe nicht parallel aneinander vorbeigelaufen, sondern hätten sich zwangsläufig irgendwo im Bereich der Solltreffpunktes ( $T^{soll}$ ) getroffen. Ein solchermaßen entstandener Schnitt war – wie wir in anderen Beispielen gesehen haben – oftmals sogar beabsichtigtes Trassierungselement, um ein Treffen mit Sicherheit herbeizuföhren.

Nun sind im Briord-Tunnel – wie wir weiter unten noch sehen werden – gravierende Fehler sowohl bei der Richtungs- als auch bei der Höhenübertragung nachweisbar. Ob das aber dazu berechtigt, auch in den in beiden Baulosen vorgefundene Vortriebsrichtungen die Auswirkungen von Absteckfehlern zu sehen, scheint aber dennoch nicht berechtigt zu sein: Die Exaktheit, mit der beide Baulose parallel zueinander aufgefoöhren wurden, ist verblüffend und scheint eher das Ergebnis einer durchdachten Planung zu sein.

Wie dem auch sei, vielleicht war sich der Baumeister seiner eingeschränkten Vermessungsmöglichkeiten durchaus bewusst und hat diese parallele Linienföhierung planmäßig in einer Tunnelstrategie untergebracht. Auf diese Weise wusste er während des Vortriebs jederzeit zumindest, auf welcher Seite von ihm sich die jeweils gegenüberliegende Baustelle befand. Als vorsichtiger Baumeister konnte er danach jederzeit planmäßig einen Schrägstollen aufföhren lassen, um den Gegenstollen zwangsweise zu treffen. Diese Hypothese hat viel für sich, wengleich sich

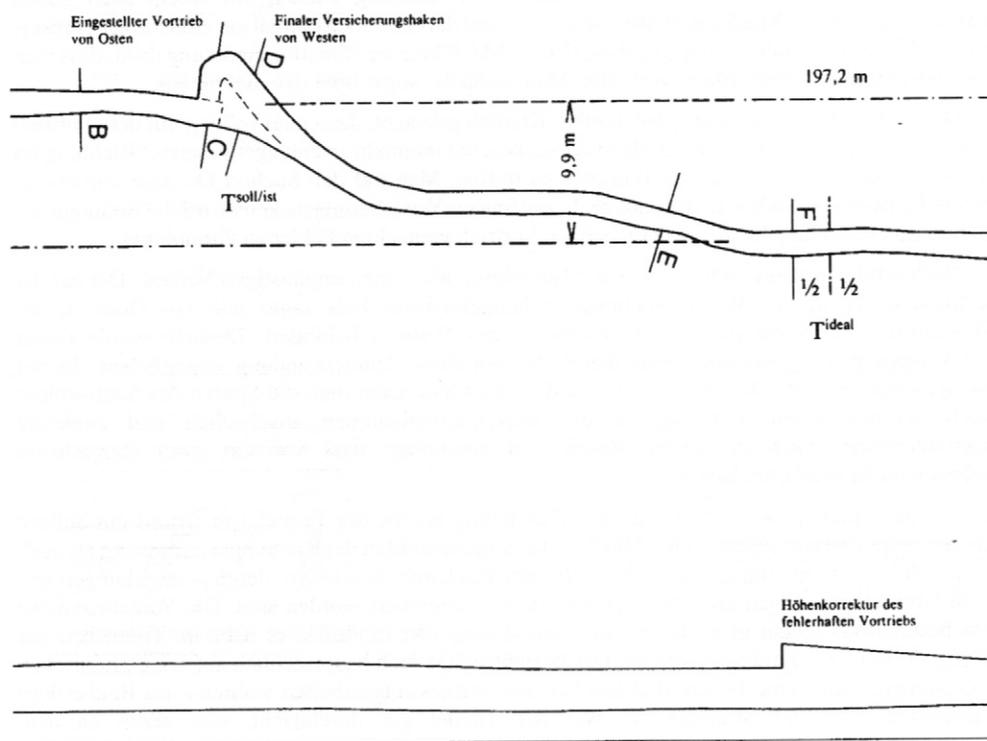


*Briord (Frankreich). Das Foto zeigt eine fehlerhaft aufgefoöhrene Vortriebsstrecke: Ein Höhenfehler wurde korrigiert, indem man den betroffenen Streckenabschnitt tieferlegte*

noch zeigen wird, dass er sich trotz dieser Vorsichtsmaßnahme nicht über den genauen Parallelabstand im Klaren gewesen sein muss. Dieser Abstand lässt sich im Aufmaß zu 9,9 m ermitteln.

Betrachten wir zunächst das östliche Baulos, denn hier zeigen sich nur die üblichen Schwierigkeiten beim Vortrieb eines Suchstollens. Der Stollen wurde zweispurig aufgeföhren, d. h. ein in Längsrichtung vorhandener Grat in der Firste zeigt die Arbeitsspuren zweier nebeneinander arbeitender Bergleute. Dabei hat der Stollen nicht von Anfang an seinen vollen Querschnitt erhalten, sondern ist nachträglich auf das planmäßige Niveau tiefergelegt worden. Diese Tieferlegung der Sohle ist in den Tunnelwandungen auf beiden Seiten erkennbar: sie beginnt 5 m vom östlichen Mundloch entfernt in einer Größenordnung von 0,7 m und erreicht kurz vor Ende des Oststollens 1,5 m. Da der Suchstollen an beiden Stellen 1,5 m bzw. 1,8 m hoch ist, wird eine auffällige Erweiterung des Querschnitts in der lichten Höhe von 2,2 m auf 3,3 m deutlich. Der Suchstollen hatte also ein rückläufiges Gefälle, während die Sohle nach dem endgültigen Bau ein Gefälle in Fließrichtung des Wassers erhielt. Das wurde erforderlich, da man den Suchstollen leicht schräg hoch oben föhrend angelegt hat, um Sickerwasser aus der Baustelle abzuleiten.

Am Ende des Suchstollens ist die ursprüngliche Situation zwar durch die Baumaßnahmen beim Zusammentreffen überprägt worden, dennoch ist in der Firste das Oberteil des alten Suchorts erhalten geblieben. Damit ist ein eindeutiger Hinweis auf das Ende dieses Suchstollens 56 m unterhalb ihres Mundlochs gegeben. In der Erkenntnis, dass man nicht von zwei Seiten aus suchend aufeinander zu arbeiten kann, hat man mit Erreichen dieses Punktes die Baustelle Ost verlassen. Von Westen aus wird man zu diesem Zeitpunkt mindestens gleich tief in den Berg vorgedrungen



Briord (Frankreich). Der Grundriss macht deutlich: Da man sich mit beiden geradlinigen Stollenvortriebe nicht getroffen hat, vollzieht der Baumeister aus einer Richtung einen finalen Versicherungshaken. Das Längsprofil zeigt den Höhenfehler.

sein, möglicherweise aber bereits etwas weiter, denn bei 60 m erkennt man eine deutliche Vortriebskorrektur.

Es ist bezeichnend, dass in beiden Suchstollen von den bis zu diesen Punkten vorgetriebenen Suchorten aus eine Sichtverbindung zum jeweils rückwärtigen Mundloch gegeben war. Eine Richtungsübertragung von außen in den Berg dürfte also eigentlich unproblematisch gewesen sein.

Offensichtlich wurde im westlichen Baulos mit Erreichen einer Vortriebsstrecke von ca. 80 m eine erneute Kontrollmessung durchgeführt. Das Ergebnis muss zu der (irrigen) Feststellung geführt haben, dass man sich höhenmäßig nicht auf der geplanten Trassenlinie befand. Man glaubte offensichtlich, im Westen etwa 2 m zu tief zu liegen. Deshalb begann man mit einer Korrektur im Bereich der Sohlenneigung, indem man den Suchstollen West im weiteren Vortrieb schräg nach oben führte. Diese schräg nach oben gerichtete Strecke hat immer noch die Anfangsausrichtung auf der Sichtlinie zum rückwärtigen Mundloch; sie wurde über einen Vortrieb von ca. 25 m geführt.

Eine erneute Kontrollmessung muss das Ergebnis gebracht haben, dass diese Höhenkorrektur unnötig war, da man sich mit der Anfangsstrecke tatsächlich auf der richtigen Höhe befunden hatte. Man legt das letzte Stück des Suchstollens auf das Anfangsniveau zurück, was einer Nacharbeitung der Sohle im Suchstollen um 1,6 m entspricht.

Im weiteren Vortrieb begann man mit der Suchphase zwecks Erreichen von T<sup>soll</sup>: Der Suchstollen wurde schräg nach Süden geführt. Hätte man die nun eingeschlagene Richtung beibehalten, so wäre man mit ziemlicher Sicherheit auf die Ortsbrust des Suchstollens Ost getroffen. Nach 10 m Vortriebs änderte man aber erneut die Richtung, indem man auf eine parallele Ausgangsrichtung einschwenkte. Nach rund 12 m verließ man diese Richtung wieder, um erneut nach Süden abzuknicken. Dieser Knick setzte aber zu früh an, und darin ist noch einmal ein eindeutiger Hinweis auf Fehler der Kontrollmessung gegeben. Dieses Mal führte die Richtungsänderung dazu, dass man die Ost-Trasse um einige Meter verfehlte. Man „schießt“ sogar über das Ziel hinaus.

Die nächste Kontrollmessung hat darüber Klarheit gebracht, denn man vollzog mit dem Vortrieb eine Kehrtwendung in Form einer Haarnadelkurve, um nunmehr in entgegengesetzter Richtung im rechten Winkel auf das Ende des Bauloses zu treffen. Man traf den Suchort Ost also seitlich auf einem Umweg von Süden. In der Anlage dieses finalen Versicherungshakens wird die Strategie des Baumeisters sichtbar, die im vorhergehenden Vortrieb gemachten Fehler zu eliminieren.

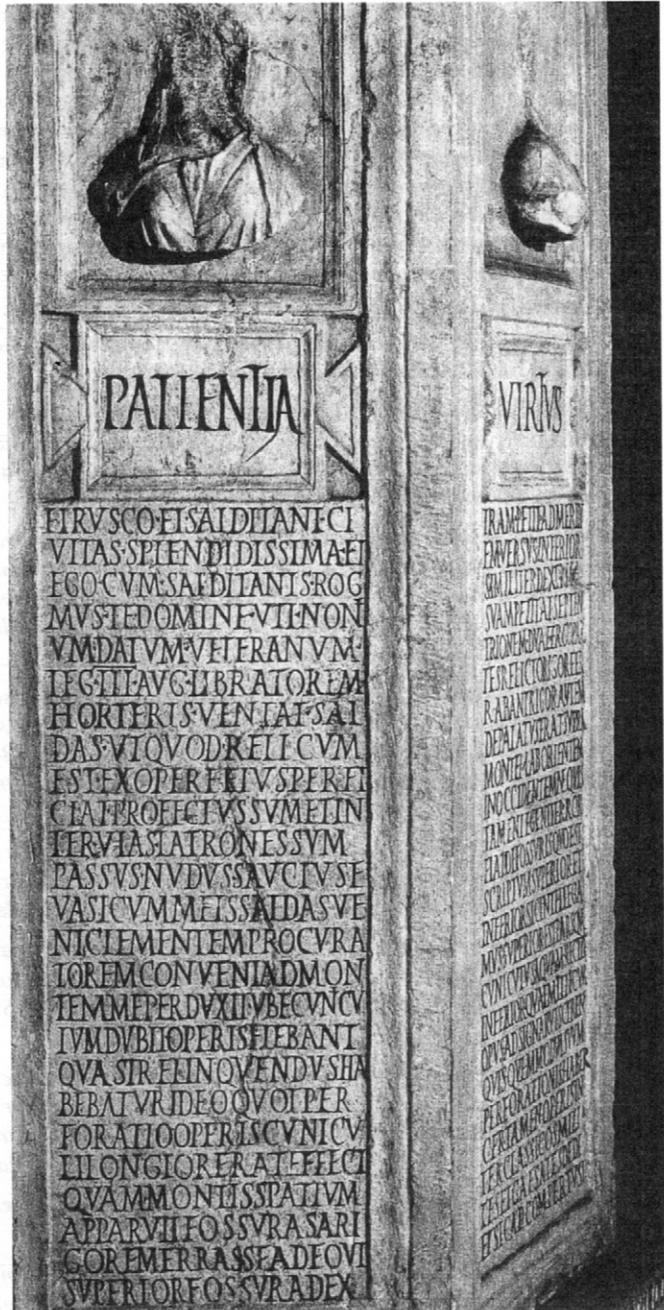
Nach erfolgreichem Durchschlag hatte der Tunnelgrundriss einen ungünstigen Verlauf: Der bei der Kehrtwendung in der Vortriebsrichtung stehengebliebene Fels ragte wie ein Dorn in die Tunneltrasse und hätte den freien Durchfluss des Wassers behindert. Deshalb wurde dieser Felsvorsprung weggenommen und damit die nördliche Tunnelwand abgeglichen. In der nachgearbeiteten südlichen Tunnelwand und in der Firste kann man die Spuren des Suchstollens noch deutlich sehen und dadurch die Korrekturmaßnahmen anschaulich und eindeutig nachvollziehen. Auch in diesem Bereich ist erkennbar, dass vor Ort zwei Bergarbeiter nebeneinander gearbeitet haben.

Von der Strategie seiner Planung und Trassierung her ist der Tunnel von Briord ein äußerst interessantes und aufschlussreiches Objekt. Man kann sowohl in der Richtungsvermessung als auch in der Höhenvermessung gravierende Fehler des Bauleiters feststellen, deren Auswirkungen erst nach Kontrollmessungen und Bauwerkskorrekturen eliminiert worden sind. Die Vorgehensweise des Baumeisters macht in nachträglicher Betrachtung den Eindruck, er habe im Tunnelbau nur wenig Erfahrung vorzuweisen gehabt. Das bezieht sich jedoch hauptsächlich auf seine praktischen Fähigkeiten, denn seine Fehler sind erst bei den Vermessungsarbeiten während des Baubetriebs aufgetreten. Von der Strategie her war der Tunnel gut durchdacht, was allein an dem unkonventionellen Konzept, zwei Tunnelbaulose parallel verschoben gegeneinander aufzufahren, um sich dann mittels eines Schrägstollens zu treffen, sichtbar wird.

Der Tunnel von Briord wird auch heute noch als Aquäduktunnel genutzt. Die moderne Wasserleitung ist allerdings als Rohrleitung im Boden des Tunnels verlegt worden.

*Nonius Datus und der Aquäduktunnel von Saldæ*

Das antike Saldæ (frz. Bougie; heute Bejaïa, Algerien) war eine Küstenstadt in Nordafrika, deren Ursprünge bis in die karthagische Zeit zurückreichen. Unter Augustus wurde hier für die Veteranen der 7. Legion eine Siedlung errichtet. Aber es sollte noch einmal 150 Jahre dauern, bis diese Stadt mittels eines Aquäduktes mit Trinkwasser versorgt wurde.



*Die Inschrift auf dem Stein des römischen Vermessungsingenieurs Nonius Datus ist ein beredtes Zeugnis für den Baubetrieb auf einer antiken Tunnelbaustelle.*

Was diese Wasserleitung interessant gemacht hat, ist ein Inschriftenstein, der im Jahre 1866 als Einzelfund in Lambaesis zutage trat. Er bestand aus einer dreiseitigen Halbsäule von 1,70 m Höhe und einem dazugehörigen sechsseitigen Sockel; beide Stücke waren als Spolien in einer Mauer verbaut worden und hatten dabei gelitten. So ist die Inschrift zwar weitgehend lesbar geblieben, die drei im oberen Teil der beschrifteten Flächen angebrachten Köpfe waren jedoch zerstört.

Der Wortlaut der erhaltenen Inschrift ist von überragender Bedeutung für die Technikgeschichte, denn er gibt nicht nur einige technische Details über den Bau des Tunnels von Saldae wieder, sondern er behandelt darüber hinaus auch Fragen aus dem technischen Umfeld. So erfahren wir aus diesem authentischen Bericht, wer die Planung fertigte und wer die technischen Grundlagen für einen Tunnelbau schuf. Wir erfahren am praktischen Beispiel, dass das technische Personal für die Ausführung derartiger Bauwerke nur bei der Legion vorhanden war. Denn auf die Bitte des Statthalters der Provinz MAURETANIA CAESARIENSIS an den Legaten von Numidien wird Nonius Datus, Librator und späterer Veteran der *legio III Augusta*, abgestellt. Wir erfahren von Nonius Datus auch etwas über das Hauptproblem des Tunnelbaus im Gegenortverfahren und seine Lösung, denn er beschreibt uns, wie sich die beiden Bautrupps im Berg verfehlt haben und wie er bei einem zweiten Einsatz die zuvor gemachten Fehler behebt.

Dieser Bericht geht also weit über den Inhalt einer Bauinschrift hinaus; da der Text von dem mit der Bauleitung des Tunnels Beauftragten selbst gefertigt wurde, steht uns hiermit eine einzigartige Primärquelle zur Technikgeschichte zur Verfügung:

*(Brief des Statthalters) Varius Clemens an (den Legionslegaten) Valerius Etruscus: „Sowohl die herrlichste Stadt Saldae als auch ich mit den Salditanern bitten Dich, Herr, dass Du Nonius Datus, Feldmesser und Veteran der legio III Augusta, aufforderst, nach Saldae zu kommen, um von seinem Werk fertigzustellen, was noch aussteht.“*

*Ich habe mich aufgemacht und bin auf dem Wege unter Räuber geraten; ausgeraubt und verwundet bin ich mit den meinen entronnen; ich bin nach Saldae gekommen und habe den Procurator Clemens aufgesucht. Er hat mich zu dem Berg geführt, wo man über den misslungenen Tunnelbau klagte; man glaubte, ihn aufgeben zu müssen, weil der Vortrieb der beiden Stollen bereits länger ausgeführt war, als der Berg breit war.*

*Es war offensichtlich, dass man mit den Vortrieben von der Trasse abgekommen war; so wie der obere Teil des Tunnels nach rechts, also nach Süden abwich, so ist in ähnlicher Weise der untere Teil ebenfalls nach rechts, also nach Norden abgewichen; beide Baulose haben also die Richtung verfehlt, weil man der Trasse nicht gefolgt war. Die exakte Trassenlinie war aber mit Pfählen von Ost nach West über den Berg abgesteckt worden.*

*Damit aber beim Leser kein Missverständnis bezüglich der Stollen entsteht, wenn es hier „oberer“ und „unterer“ heißt, so ist das so zu verstehen: Mit „oberer“ ist der Teil gemeint, in dem der Tunnel das Wasser aufnimmt, mit „unterer“ der Teil, wo das Wasser wieder herauskommt.*

*Als ich die Arbeiten zuteilte, damit sich jeder darüber im Klaren war, welche Strecken des Vortriebs er aufzufahren hatte, habe ich die classici (Flottensoldaten) und die gaesates (Soldaten aus gallischen Hilfstruppen) um die Wette arbeiten lassen (von beiden Seiten her), und so haben sie sich beim Durchstich des Berges getroffen.*

*Ich also war es, der zuerst das Nivellement gemacht und den Bau der Wasserleitung organisiert und in die Wege geleitet hatte nach den Plänen, die ich dem Procurator Petronius Celer gegeben hatte. Das vollendete Bauwerk hat der Procurator Varius Clemens durch die Einleitung des Wassers seiner Bestimmung übergeben. (?? Die Transportleistung des Aquäduktes beträgt ??) Fünf Scheffel.*

*Damit mein Bemühen um diesen Aquädukt von Saldae deutlicher erscheint, habe ich einige Briefe angefügt.*

*(Brief des Procurators) Porcius Vetustinus an (den Legaten) Crispinus: „Äußerst gütig und wie es Deiner sonstigen Freundlichkeit und Güte entspricht, hast Du gehandelt, Herr, indem Du den*

*Nonius Datus gebeten und zu mir geschickt hast, so dass ich mit ihm über ein Bauvorhaben verhandeln konnte, für dessen Ausführung er die Leitung übernahm. Deshalb habe ich, obwohl ich zeitlich recht gedrängt war und dringend nach Caesarea musste, dennoch einen Abstecher nach Saldae gemacht, um die glücklich begonnene Aquäduktbaustelle in Augenschein zu nehmen; ein großartiges Projekt, das ohne die treibende Kraft des Nonius Datus, der den Bau mit Sorgfalt und Zuverlässigkeit leitet, nicht zu Ende geführt werden kann. Darum hätte ich Dich bitten wollen, uns zuzugestehen, dass er einige Monate bei dieser Sache bleiben könne, wenn er sich nicht bei der Arbeit eine schwere Krankheit zugezogen hätte ... .“*

Der Ablauf der Ereignisse um diesen Tunnelbau stellt sich nach diesem Text wie folgt dar: In der ersten Hälfte des 2. Jahrhunderts n. Chr. planten die Bewohner von Saldae den Bau eines Aquäduktes zum Djebel Toujda, um das Wasserdargebot in der Stadt zu erhöhen. Sie wandten sich an den für sie zuständigen Prokurator von Mauretaniens, Petronius Celer, mit der Bitte, ihnen bei Suche nach einem fähigen Ingenieur behilflich zu sein. Der wendet sich an seinen Kollegen, den Legaten von Numidien, mit der Bitte, ihm aus dem Hauptquartier der *legio III Augusta* einen Fachmann für technische Aufgaben zur Verfügung zu stellen, damit er das Vorhaben der Salditaner prüfe.

Man wählt den Librator Nonius Datus aus, der nach Saldae reist und dort entsprechende Vermessungen durchführt; seine Pläne zum Bau des Aquäduktes übergibt er dem Prokurator Petronius Celer. Dies alles muss sich bis zum Jahre 138 n. Chr. abgespielt haben, denn Petronius Celer ist nur bis zum Ende der Herrschaft Hadrians Prokurator von Mauretaniens.

Die Arbeiten werden aber nicht sofort begonnen, sondern bis zur Prokurator unter Porcius Vetustinus 147–150 n. Chr. zurückgestellt. Zu dieser Zeit ist Crispinus Statthalter in Numidien; er weist Nonius Datus an, sich mit dem Prokurator Vetustinus in Verbindung zu setzen, um das Projekt erneut zu besprechen. Crispinus ist in den Jahren 147 und 148 n. Chr. im Amt, so dass der Baubeginn am Aquädukt in diese Zeit zu datieren ist. Nonius Datus verständigt sich mit den Bauleuten, die die Ausführung des Bauwerks übernommen haben, organisiert die Arbeiten und leitet für einige Zeit den Baubetrieb. Er wäre einige Monate in Saldae geblieben, wenn er nicht durch eine Krankheit zur Rückreise nach Lambaesis gezwungen gewesen wäre.

Auch während seiner Abwesenheit gingen die Arbeiten gut voran und schienen pünktlich fertig zu werden, wenn es nicht plötzlich Probleme in der Tunnelbaustelle gegeben hätte. Nonius Datus hatte den Bauleuten die Trasse des Tunnels über den Berg abgesteckt, und es war geplant, den Tunnel von zwei Seiten aus in Angriff zu nehmen. In seiner Abwesenheit hatten die Bauleute unter Tage aber Schwierigkeiten mit der Richtungsübertragung, denn in jedem der beiden Baulose war man von der geplanten Trasse nach rechts abgedriftet. Da man aus den Bauplänen die Streckenlänge der Baulose genau kannte, merkte man irgendwann, dass man den vorgesehenen Treffpunkt längst verfehlt hatte; man hatte aneinander vorbeigearbeitet. Diese Erkenntnis brachte die Bauleute zum Verzweifeln, und sie kamen an den Punkt, wo sie das gesamte Projekt am liebsten aufgegeben hätten.

Noch einmal wendet sich der Prokurator Mauretaniens, inzwischen ist Varius Clemens im Amt (151 n. Chr.), an den Legaten Numidiens, inzwischen M. Valerius Etruscus, damit er den Nonius Datus erneut schicke. Nonius Datus, inzwischen Veteran geworden, bricht noch einmal nach Saldae auf. Obwohl ihm eine Eskorte beigegeben ist, wird er unterwegs von Straßenräubern überfallen. Schwer verwundet und seiner Kleidung beraubt, kann er jedoch fliehen und erreicht Saldae. Da Nonius Datus in offizieller Mission reiste, wirft das ein besonderes Licht auf die Verhältnisse beim Reisen zumindest in Nordafrika.

In Saldae angekommen wird er sogleich zum Berg gebracht und mit den Problemen der Tunnelbaustelle konfrontiert. Durch Nachmessungen stellt er die Auswirkungen des fehlerhaften Vortriebs fest und lässt danach eine Querverbindung zwischen den beiden Baulosen herstellen. Mit dem wenig später erfolgten Durchschlag im Tunnel ist der Aquädukt fertig und einsatzbereit. Der Prokurator Varius Clemens reist nach Saldae, um die neue Wasserleitung einzuweihen.

Beim Bau des Aquäduktes von Saldae mit seinem problembeladenen Tunnel scheint es sich für Nonius Datus um die größte Herausforderung seines gesamten Berufslebens gehandelt zu haben. Er nutzt diese Aufgabe, um sich auf seinem Grabstein als Ingenieur, dem man ein herausragendes Bauprojekt übertragen hatte, darzustellen. Er rückt in dieser Inschrift seine Leistung beim Bau und zur Vollendung des Aquäduktunnels in den Vordergrund. Die Wiedergabe des Briefwechsels zwischen den Prokuratoren von Mauretaniien und den Legaten von Numidien stellte das Projekt auf die höchste Ebene und ließ dadurch Zweifel an seinem Bericht gar nicht erst aufkommen.

Derartige Inschriftensteine sind nicht selten, so haben die Besitzer der afrikanischen Landgüter oftmals ihren Schriftwechsel mit den kaiserlichen Behörden auf ihren Grabsteinen verewigen lassen. Als technischer Bericht steht der Text des Nonius Datus jedoch einzig da.

Der Bericht des Nonius Datus enthält noch den Hinweis auf die Herkunft der Bauleute, die beim Tunnelbau eingesetzt waren. Er beschreibt, dass er *classici* und *gaesates* in einer Art Wettstreit in den beiden Baulosen arbeiten ließ. Damit wird deutlich, dass auch die Bautrupps beim Militär ausgeliehen waren, denn die *classici* waren Marinesoldaten aus Caesarea (Cherchel), während die *gaesates* aus einer Auxiliarformation abkommandiert waren.

Zur Zeit der Entdeckung des Inschriftensteins, war über die Lage und die Existenz des salditaner Tunnels nichts bekannt. Er wurde erst später entdeckt und gegen Ende des 19. Jahrhunderts von den Franzosen nicht nur freigelegt, sondern für eine neue Wasserleitung wieder benutzbar gemacht. Dabei wurde auch seine genaue Länge ermittelt, die sich zu 428 m ergab; er durchfährt das Gebirge 86 m unterhalb seiner Kammlinie. Messungen der Abflussmengen an den Quellen von Toujda lassen für den insgesamt ca. 21 km langen Aquädukt eine Transportleistung von bis zu 10.000 m<sup>3</sup>/Tag errechnen.

Bemerkenswert sind die drei Schlagworte, unter die Nonius Datus seinen Bericht gestellt hat: PATIENTIA, VIRTUS und SPES. Vermutlich wollte er auf diese Weise weniger drei Gottheiten anrufen, als die drei Tugenden deutlich herausstellen, die einem mit derart schwierigen Aufgaben beauftragten Ingenieur abverlangt wurden, und vermutlich bezog er sich dabei besonders auf den Tunnelbau. Deshalb wäre es zu allgemein, diese Schlagworte einfach mit Geduld, Mut und Hoffnung zu übersetzen. Schon Mommsen ersetzte den Mut durch Tapferkeit. Wir wollen noch ein wenig weitergehen; die Schwierigkeit der gestellten Aufgabe verlangt im Tunnelbau nicht nach Mut oder Tapferkeit, sondern eher nach Tatkraft, und was die Hoffnung angeht, so lässt sie sich vielleicht als die Zuversicht des Fachmannes deuten, der auf seine Kenntnisse gestützt darauf vertraut, dass das schwierige Werk gelingen wird. Wenn also zu den Tugenden GEDULD und TATKRAFT dem Tunnelbauer noch die ZUVERSICHT – vielleicht angereichert um ein Quentchen Gottvertrauen – gegeben war, konnte das Werk wohl gelingen.

## Resümee:

Vermessungspräzision ist die Grundlage der großartigen Ergebnisse der antiken Baumeister. Was die frühen Ingenieure mit ihren zeitgenössischen Kenntnissen und Geräten zu erreichen vermochten, ist aus den Bauwerken dieser Zeit ablesbar. Die Beispiele antiker Wasserbauten von Eupalinos bis Nonius Datus zeugen vom überragenden fachlichen Können der antiken Vermessungskollegen. In der rückwärtigen Betrachtung dieser Leistungen wird uns deshalb nicht nur Hochachtung und Respekt abverlangt, sondern es werden uns auch Beispiele gegeben, die uns als Vorbilder dienen können.

Bei aller Präzision haben die antiken Ingenieure die Möglichkeiten von Fehlern in ihrer Arbeit nie ausgeschlossen. Sie haben sich stattdessen vielmehr stets gegen Auswirkungen von Messfehlern versichert oder waren aufgrund ihrer Fachkenntnisse in der Lage, Fehler festzustellen und durch Korrekturen im laufenden Baubetrieb zu beheben. Insofern waren die antiken Kollegen die modernen Ingenieure ihrer Zeit. Im Umkehrschluss sind die von Nonius Datus genannten Ingenieurstugenden Patientia, Virtus und Spes auch heute noch zeitgemäß.

## **Literatur:**

- KLAUS GREWE, Über die Rekonstruktionsversuche des Chorobates, eines römischen Nivelliergerätes nach Vitruv.  
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 88, 1981, 205 ff.
- KLAUS GREWE, Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen.  
Schriftenreihe der Frontinus Gesellschaft, Supplementband 1 (Wiesbaden 1985).
- KLAUS GREWE, Atlas der römischen Wasserleitung nach Köln, Rheinische Ausgrabungen 26 (Bonn 1986).
- KLAUS GREWE, Über den Nachweis von Baulosgrenzen im Verlauf römischer Fernwasserleitungen.  
Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, Heft 10 (Köln 1987) 53–66.
- KLAUS GREWE, Der Aquädukt von Siga (Algerien) – Nachweis der Methoden römischer Gefälleabsteckung.  
Antike Welt der Technik IX. Antike Welt 29, 1998, 409–420.
- KLAUS GREWE, Licht am Ende des Tunnels – Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau (Mainz 1998).
- FRONTINUS-GESELLSCHAFT (Hrsg.), Geschichte der Wasserversorgung, 6 Bde. (München 1983 bis Mainz 2004).
- H. J. KIENAST, Die Wasserleitung des Eupalinos auf Samos, Samos XIX (Bonn 1995).
- VITRUV, De architectura libri decem. Deutsch von C. Fensterbusch (Darmstadt 1964).  
CIL 8,1, 2728 (cf.18122). – ILS II,1, 5795.

## *Bildnachweis:*

Alle Abbildungen vom Verfasser.

## Erste Eisenbahnen – nicht ohne Feldmesser

### Anfänge der Eisenbahn

Als im Dezember 1835 die erste öffentliche Eisenbahn zwischen Nürnberg und Fürth eröffnet wurde, läutete dieses Ereignis auch in Deutschland den Wechsel von der Postkutsche zum Schienenverkehr ein. Vorbilder dafür gab es insbesondere in England, wo der Ingenieur George Stephenson bereits 1822 eine 13 km lange Kohlenbahn gebaut hatte, auf der die auch von ihm gebauten Lokomotiven bis zu 64 Tonnen Last mit einer Geschwindigkeit von 6,4 km/h beförderten. Stephensons Weitsicht und Unternehmergeist bildeten die Basis für die nächsten viel größeren Projekte. Dazu gehörte die Stockton-Darlington-Railway, die am 27. September 1825 eröffnet wurde. Hierfür hatte er zusammen mit seinem Sohn eine neue Trasse geplant und vermessen. Leider sind keine näheren Einzelheiten über die Vermessung ausfindig zu machen. Auf der 40 km langen Strecke fuhren George Stephenson und sein Bruder James auf der Plattform den langen Eröffnungszug. Sechs Güterwagen waren mit Kohle und Mehl beladen, ein auf Eisenbahnrädern laufender Kutschwagen nahm das Direktorium auf, 21 Güterwagen mit provisorischen Sitzen beförderten 450 Personen, und dann folgten nochmals sechs Kohlenwagen. Der Zug erreichte eine Höchstgeschwindigkeit von 19 km/h.

Den Endpunkt in der Vorgeschichte der Eisenbahn und damit gleichzeitig den Anfang des Eisenbahn-Zeitalters markiert die am 15. September 1830 eröffnete Eisenbahnstrecke zwischen Liverpool und Manchester, auf der sowohl Personen als auch Güter regelmäßig transportiert wurden. Die hierfür geplante Linienführung stieß jedoch bei den Liverpoolsen auf Widerstand; sie waren nicht bereit, ihre Grundstücke für das Projekt zu veräußern. Dies zwang Stephenson, das Stadtgebiet zwischen den Bahnhöfen Wapping und Edge Hill jetzt durch einen steil geneigten Tunnel zu unterfahren. Hier wurde ein Seilzug mit stationärer Dampfmaschine eingebaut, der den Zug den Berg hinaufzog.

Herausragendes Merkmal für diese Strecke war die konsequente Trassierung mit Ausnahme des steil geneigten Tunnels im Liverpoolsen Stadtgebiet. Im Grundriss weist die Trasse lange Geraden und wenige Bögen mit Halbmessern von 1990 m und mehr auf. Zu dieser gestreckten Linienführung kommt die großzügige Trassierung in der Gradienten, d.h. in ihrem Höhenverlauf, noch hinzu. Etwa 70 % der Strecke verlaufen horizontal oder schwach geneigt mit einem Gefälle bis zu 1,1 %. Lediglich der Rainhill wird mit beidseitigen Rampen von 10,4 ‰ überwunden. Die Steilrampe von 20,8 ‰ im Tunnel zu Liverpool bildet die aufgezwungene Ausnahme [1].

Die Folgen dieser großzügigen Trassierung waren ungewöhnlich umfangreiche Erdbewegungen und zahlreiche und schwierige Ingenieurbauwerke. Insgesamt mussten 63 Brücken, Über- und Unterführungen gebaut werden.

Der Bau der rund 50 km langen Strecke stellte höchste Anforderungen an George Stephenson und seine Assistenten. Dass beim Bau dieser Strecke auch Feldmesser beteiligt waren, zeigt Bild 1, auf dem Stephenson als der Eisenbahn-Unternehmer zusammen mit dem Feldmesser einen Plan betrachtet. Im Hintergrund ist eine Wasserwaage mit Höhenzielmarke sowie ein Feldzirkel zu sehen. Dieses Bild ist das früheste Bild eines Eisenbahn-Feldmessers.

Auf dem Festland konnte das damalige Österreich zwar mit der Eröffnung der 130 km langen Strecke zwischen Budweis und Linz am 1. August 1832 die Ehre beanspruchen, die älteste Überlandbahn des europäischen Kontinents gebaut zu haben. Aber sie verdiente noch nicht die Bezeichnung „Eisenbahn“, weil sie mit hölzernem Gleis und Flacheisenaufgabe sowie Pferdebespannung hinter dem englischen Prototyp Eisenbahn weit zurückblieb.

*Bild 1:  
G. Stephenson mit einem  
Eisenbahn-Feldmesser*



Einer der ersten Eisenbahnvorkämpfer in Deutschland war der Bayer Joseph Ritter von Baader, der bereits 1807 für eine Bahnverbindung zwischen Main und Donau anstelle erster Kanalpläne plädierte. Baader erhielt bereits 1815 das erste deutsche Eisenbahn-Patent für seine Trag- und Führungstechnik. Er war von 1787 bis 1793 als Civil-Engineer – und in dieser Eigenschaft natürlich auch für die Vermessungen zuständig – in England tätig und hatte dort die damaligen Mängel von Railroad und Tramroad erkannt. Seine Überlegungen ließen sich zwar nicht realisieren, aber sein unablässiges Eintreten für „eiserne Kunststraßen“ trug maßgeblich dazu bei, dass die erste deutsche Eisenbahn zwischen Nürnberg und Fürth und nicht anderswo fuhr.

Erfahrungen, einen Schienenweg zu bauen, fehlten, aber die beteiligten Ingenieure und der Wagemut der Bauherren und Unternehmer glichen diesen Mangel aus. Die englischen Bahnen dienten als Muster.

### **Vorarbeiten für die Linienführung**

Auch in den deutschen Ländern waren Feldmesser beim Bau der ersten Eisenbahnstrecken beteiligt, und zwar bereits bei den Vorarbeiten für die neuen Strecken. Ihre grundsätzliche Linienführung richtete sich zwar insbesondere nach dem Verkehrsbedarf, gleichwohl aber spielten politische Rücksichtnahmen, Forderungen und Einflüsse eine große Rolle, deren unheilvolle Folgen zum Teil noch heute sichtbar sind. Und natürlich gab auch die Topographie zwischen den Endpunkten einer Strecke einen Ausschlag. Ein bekanntes Beispiel für eine politisch begründete Linienführung ist die so genannte Schwarzwaldbahn von Offenburg über Triberg nach Singen.

Nicht die unter technischen Gesichtspunkten einfachste und auch billigste Trassenführung über Schiltach (Schiltachlinie) wurde realisiert, sondern die mit 39 Tunneln wesentlich aufwändigere Sommeraulinie. Einziger Grund für diese Trassenwahl war die Umgehung württembergischen Staatsgebiets. Die kürzeste Variante, die auch die Uhrmacherstadt Furtwangen berührt hätte, war die Bregtallinie. Sie erwies sich aber bei näherer Betrachtung mit fast 1 000 m Höhendifferenz und einem über 4 km langen Scheiteltunnel als zu teuer [2].

## Bereitstellung von Plänen und Karten

Wichtigste vermessungstechnische Grundlage für die Planung einer Strecke sind Karten und Pläne. Zunächst einmal sind es kleinmaßstäbige Karten, um einen Überblick über den grundsätzlichen Verlauf zu erhalten. Solche Karten, auch schon mit Geländedarstellung und Wasserläufen, waren zu Beginn des Eisenbahnzeitalters bereits in ausreichender Zahl vorhanden. Es fehlten jedoch weitgehend Karten beispielsweise im ungefähren Maßstab 1 : 50 000 bis 1 : 100 000, in denen der künftige Trassenverlauf präziser geplant und festgelegt werden konnte. In dieser Hinsicht waren die Verhältnisse ähnlich vielfältig wie die zahlreichen Ländchen, aus denen sich das damalige Deutschland zusammensetzte. Es fehlten in vielen Ländern auch die Grundlagen für die Herstellung der Kartenwerke, die trigonometrischen Landesvermessungen, bzw. sie waren gerade im Aufbau begriffen [3]. Als Beispiel für eine kleinmaßstäbige Karte mit einer Darstellung für eine Streckenplanung soll ein Kartenausschnitt (ungef. Maßstab 1 : 600 000) dienen, in die der aus Wetter an der Ruhr stammende Eisenbahnplaner Harkort bereits 1833, also zwei Jahre vor der Eröffnung der Strecke Nürnberg–Fürth, seine Trassenvarianten für eine Eisenbahnstrecke von Minden nach Köln eingetragen hat [Bild 2].

In einzelnen Ländern gab es bereits großmaßstäbige Karten, sie wurden für die Trassenplanung verkleinert und zusammengefügt, wobei das fehlende überörtliche trigonometrische Gerüst sich oftmals negativ auswirkte.



Bild 2: Harkorts Trassenvarianten für Minden–Köln 1833

Die Länder Bayern, Baden und Württemberg nahmen mit ihrer frühzeitigen Landesvermessung in der Kartenherstellung eine Vorreiterrolle ein. Sie stellten bereits in der ersten Hälfte des 19. Jh.s Flurkarten im Maßstab 1 : 2 500 bzw. 1 : 5 000 her, wobei Württemberg insofern den letzten Schritt tat, als es die Karten mit Höhenzahlen und Höhenlinien versah. Diese Ergänzungsmessungen geschahen im allgemeinen tachymetrisch, im dichten Wald aber barometrisch.

Um die Mitte der sechziger Jahre begannen unter der Oberleitung des Baudirektors Gerwig die Vorarbeiten für die Schwarzwaldbahn. Für diese ließ er die schwierigsten Geländeteile von Hausach über Hornberg und Triberg nach St. Georgen mit dem Messtisch in 1 : 5 000 topographisch vermessen, und zwar durch Topographen des damaligen badischen Kriegsministeriums. Auf Grund der von ihnen angefertigten Pläne mit 3 m Abstand der Höhenschichtlinien untersuchte Gerwig die verschiedenen Varianten zur Ermittlung der besten Linienführung [4].

In der Provinz Hannover sah die Situation weniger gut aus. Zum größten Teil lagen nur unzusammenhängende Flurkarten ohne Koordinatensysteme vor. Meistens waren es Kataster- und Verkoppelungskarten, die älter als die Landstriangulation waren. Die einzelnen Kartenblätter mussten zusammengefügt werden, und nicht selten erfuhr dadurch die Bahnachse einen Knick. Aufgabe der Feldmesser war es dann, über identische Punkte die Kartenblätter einander anzupassen.

In Sachsen dagegen taten die bereits fertigen Blätter der unter Lohrmanns Leitung von der Kameralvermessungsanstalt erstellten Karte des Königreichs Sachsen im Maßstab 1 : 12 000 gute Dienste für die Eisenbahntrassierung [5].

Für die Detailplanung der Eisenbahnstrecken schließlich waren großmaßstäbige Karten etwa 1 : 1 000 bis 1 : 10 000 notwendig. Hier wurde insbesondere auf Katasterkarten zurückgegriffen, sofern sie bereits vorhanden waren [6], [7].

## **Ermittlung der Höhenverhältnisse**

Die Höhenverhältnisse entlang einer Eisenbahnstrecke spielten in den ersten Jahrzehnten des Eisenbahnbaus eine ungleich größere Rolle als heute. Ein Grund dafür war die geringe Leistungsfähigkeit der frühen Lokomotiven. Daher finden wir heute noch viele Strecken in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Flüssen, weil hier keine besonderen Steigungen zu überwinden sind. Es sind bei der Streckenplanung nicht nur die Linienführung im Grundriss, sondern auch im Aufriss zu ermitteln. Dafür ist es notwendig, die Geländeoberfläche zu erfassen und durch den Bau von Tunneln, Brücken und Überführungen eine Gradienten, d. h. einen Höhenverlauf, zu finden, die die Zugkraft der Lokomotiven nicht überfordert und damit den erwarteten Zugverkehr überhaupt erst ermöglicht.

Bei der Planung der ersten Eisenbahnstrecke zwischen Nürnberg und Fürth lag die Linienführung relativ schnell fest. Sie lehnte sich eng an die bestehende geradlinige Landstraße an und hatte damit die kleinste Streckenlänge; und schon mit Rücksicht auf die Geländeverhältnisse war sie die bestmögliche Trasse. Wie günstig die Geländeverhältnisse waren, geht daraus hervor, dass zwischen Anfangs- und Endpunkt der 6 km langen Bahn bei ziemlich gleichmäßiger Geländeneigung nur ein Höhenunterschied von 20 Fuß (5,70 m) lag. So ergaben sich als größte Steigung nur 6 ‰ [Bild 3].

In diesem Situationsplan ist am unteren Rand das Längenprofil aufgetragen, und im rechten Kästchen ist dargestellt, dass die Strecke zwischen a und b bzw. c und d horizontal verläuft, während sie zwischen b und c um 20 Fuß „gesenkt“ ist. Dieser Abschnitt ist 10 000 Fuß lang.

Der bereits erwähnte Harkort schreibt in seiner Denkschrift für eine Eisenbahnlinie von Minden nach Köln, dass sein Vorschlag auf ausführlichen vermessungstechnischen Vorarbeiten beruht, insbesondere Höhenmessungen, und in einer Tabelle gibt er die von der Lippe zur Wupper gemessenen Streckenabschnitte mit ihrem jeweiligen Gefälle wieder. In einer besonderen Spalte

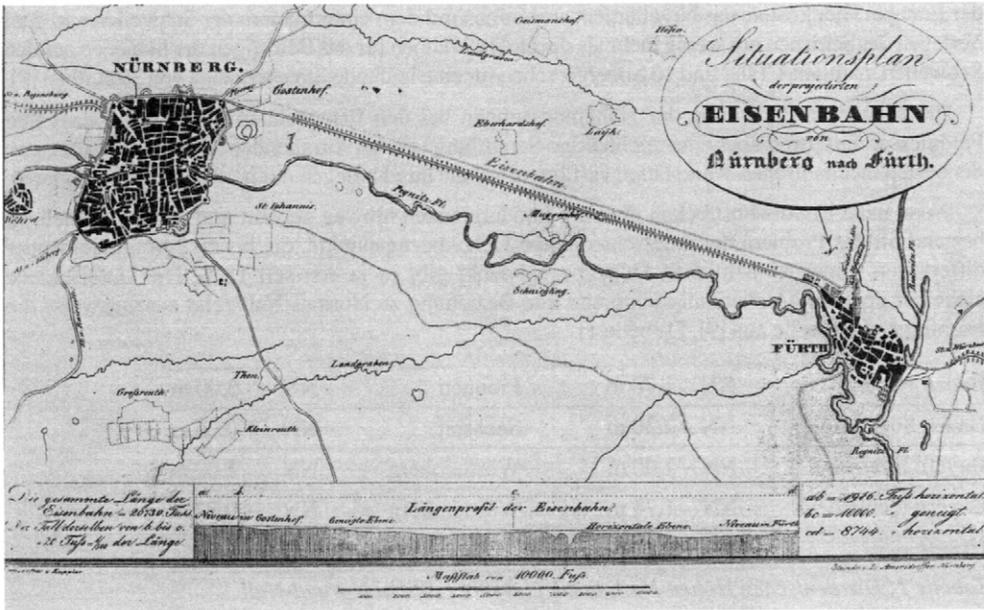


Bild 3: Situationsplan über die erste Eisenbahnstrecke zwischen Nürnberg und Fürth 1835

dieser Tabelle zieht er einen Vergleich zwischen dem ermittelten Gefälle und der Zugkraft der Lokomotiven, die der bei der Planung und bei den Vorarbeiten tätige Oberbergrat v. Oeynhausens herausgefunden hatte [Bild 4]. V. Oeynhausens gehörte mit zu den Verfechtern des Eisenbahnbaus. Er hatte die notwendigen Vermessungsarbeiten geleitet und Rentabilitätsberechnungen angestellt.

In einer anderen Tabelle vergleicht Harkort die Gefälle auf den englischen und französischen Strecken mit den von ihm ermittelten Verhältnissen. Dieser Vergleich macht deutlich: Wenn die englischen Lokomotiven, die nämlich auch für diese Strecke vorgesehen sind, das dort vorhandene Gefälle überwinden können, dann dürften sie es auch auf der Köln–Mindener Bahn. Bei dieser Bahn – wie auch bei allen anderen Eisenbahnen – spielten die Gefälleverhältnisse eine größere Rolle als die absoluten Höhenangaben.

Bei Harkort ist auch eine Angabe über die Kosten für das Nivellement zu finden, und zwar für die bereits 1832 in Betrieb genommene Kohlenbahn vom Schleibuscher Revier nach Harkorten an

19194 Ruth.		Von der Lippe zur Wupper.		Gefälle.		Bemerkungen.
Nro. 19.	3500	Lippe Spiegel oberhalb Berne bis Königsborn	1	in 600	Barometermessung.	nach v. Deunhausen zieht 1 in 250 der Dampfmaschinen noch die Hälfte der Last, welche er auf der Horizontale bewegt.
20.	2800	Königsborn bis Wasserscheide zwischen Brackel und Schüren	1	200		
21.	2930	von Schüren der Emscher entlang bis zum Rüpingssbach	1	260		nivellirt.
22.	2800	vom Rüpingssbach bis Wasserscheide bei Witten	1	309		
23.	1540	vom Wasserscheider bis zur Mühle bei Witten	1	184		nach Gefällen berechnet.
24.	2200	von Witten bis oberste Fährde bei Weiter	1	1300		
25.	1360	von der Fährde über Herdecke bis Weitebrücke	1	700		nivellirt.
26.	611	von der Weitebrücke bis Altenhagen	1	600		
27.	3000	von Altenhagen bis Niergen	1	200		1 in 104 103 nach v. Deunhausen ein Dampfswagen mit 1038 Centn.
28.	1200	von Niergen längs der Kräpenderger Dache bis zum Wasserscheider im Cronenthal	1	110		
Dabei wird angenommen, daß der Wasserscheider mit einem Stollen im Kallgebirge durchschnitten und die Linie rückwärts um 600 Ruth. bis Haus Rocholl verlängert; so vertheilt sich das Gefälle auf 1800 Ruthen.						
29.	1600	vom Stollen des Cronenthal bis Mittershausen 10 Fuß über dem Wupperfliegel	1	120	nivellirt.	1 in 25 zieht er nur sein eigenes Gewicht.
422725 Ruth.						

Bild 4: Harkorts Tabelle über die Gefälle-Verhältnisse zwischen der Lippe und der Wupper

der Ennepe. Hier kostete das Nivellement zusammen mit dem Untermauern der Schwellen und dem Verlegen der Schienen nur wenig mehr als die Holzschrauben für das Befestigen der Schienen auf den Schwellen, nämlich 1 Taler und 10 Silbergroschen für eine laufende Streckenlänge von 10 Ruthen [8].

Die besondere Bedeutung der Höhenmessungen bei den Eisenbahnen führte dazu, dass ihre Feldmesser durchweg über eine reichhaltige Sammlung von hervorragenden Nivellierinstrumenten der besten mechanischen Werkstätten verfügten, auf die ihre Kollegen nur neidisch blicken konnten.

Wenn neue Eisenbahnstrecken über die Ländergrenzen hinweg geplant und gebaut wurden, so bestand oft das Problem der unterschiedlichen Höhenbezugspunkte, die bis zu 2 m untereinander differierten. Einen einheitlichen Höhenbezugspunkt gibt es ja erst seit 1879. Die Unterschiede einzelner deutscher Höhennullpunkte und ihre Beziehung zu Normal-Null zeigt auszugsweise die nachfolgende Tabelle aus [9], [Tabelle 1].

Baden Nord	NN – 1,70 m	Preußen	NN +/- 0,00 m
Baden Süd	NN – 2,30 m	Sachsen	NN – 0,06 m
Bayern linksrhein.	NN – 2,00 m	Württemberg	NN – 2,02 m
Bayern rechtsrhein.	NN – 1,74 m	Württemberg	NN + 0,87 m
Hessen	NN – 0,12 m		

*Tabelle 1: Die deutschen Höhen-Nullpunkte und ihre Lage zu Normal-Null*

Unmittelbar nach der Einrichtung dieses Bezugspunktes in Berlin wurden mit einem Erlass die Königlichen Eisenbahndirektionen angewiesen, alle Höhenangaben auf diesen zu beziehen und ihre Nivellements an die Landesaufnahme anzuschließen. An den Stationsgebäuden waren Höhenmarken und Höhentafeln anzubringen, die gelegentlich heute noch zu sehen sind.

Wie wurden in den Jahren vor diesem Erlass die Höhen festgelegt? Bei der Absteckung der Trasse wurden neben den Stationspfählen so genannte Kreuzpfähle von etwa 1 m Länge verwendet, deren Höhen bestimmt wurden. Diese Pfähle waren aus Holz und hatten am unteren Ende zum besseren Halt in der Erde ein Holzkreuz. Leider haben sie selten die Bauausführung überstanden.

Für Höhenfestpunkte wurden oftmals Grenzsteine oder soweit vorhanden Türschwelle, Treppenstufen oder Deckplatten von Durchlässen benutzt, die aber in aller Regel den Nachteil hatten, dass sie nicht genau genug beschrieben wurden. Damit waren fehlerhafte Bauausführungen unvermeidlich, und sehr bald wurde der Ruf nach exakt definierten Höhenfixpunkten laut [10].

## **Detailplanung der neuen Strecke**

Lag die grundsätzliche Linienführung fest und war sie auch in den großmaßstäbigen Karten eingetragen, wurde möglichst nahe der voraussichtlichen Trasse ein Polygonzug in der Örtlichkeit gemessen. Die Höhen wurden zunächst mit Barometern, sehr bald aber wegen der höheren Genauigkeit mit Nivellierinstrumenten ermittelt. Zusätzlich wurden in regelmäßigen Abständen quer zur vorgesehenen Trasse Höhenprofile gemessen, die je nach Geländebeschaffenheit bis zu 250 m zu beiden Seiten ausgedehnt wurden. Für die Strecke Nürnberg–Fürth wurden insgesamt 79 Querprofile gemessen. Hier ist zusätzlich zu erwähnen, dass innerhalb von drei Monaten dieses Nivellement mit der Querprofilaufnahme, die genaue Berechnung über die Bewegung der Erdmassen, die Pläne für die Trassierung, die Pläne für die Durchlässe, die Überfahrten, die Ausweichplätze, die Drehscheiben und sämtliche Gebäude vollendet wurden. Außerdem wurden innerhalb dieser relativ kurzen Zeit alle Unterlagen mit einem Kostenvoranschlag versehen [11].

Die Höhen aus den Querprofilen wurden in die Karten eingetragen und daraus Höhenlinien abgeleitet, mit deren Hilfe das Projekt festgelegt und die voraussichtlichen Kosten im Wesentlichen ermittelt werden konnten.

Die endgültige Trasse schließlich wurde in der Örtlichkeit abgesteckt, stationiert und nivelliert, damit das zuständige Gremium die Genehmigung für die Bauausführung erteilen konnte.

Diese Vorgehensweise war die Regel, d. h. es gab auch Ausnahmen, wobei je nach Sorgfalt oder Zeitdruck der Geometer auch schon mal anders gearbeitet hat. So zum Beispiel bei der Absteckung der ersten großen Hauptbahn des europäischen Festlandes zwischen Leipzig und Dresden. Im Bericht des Direktoriums vom 31.12.1836 über das erste Baujahr dieser Strecke heißt es: „Mehrere in der Absteckung sich zeigende Differenzen machten nothwendig, das vom Comité dem Directorio übergebene Nivellement von Leipzig bis Borsdorf nochmals vornehmen zu lassen, und es fand sich dadurch, dass zwar die Hauptpunkte richtig waren, dass aber im Detail Unrichtigkeiten stattfanden, welche zur Folge hatten, dass auf dem bereits fertigen Planum Abänderungen gemacht werden mussten, wodurch das Niveau bis 28 Zoll theils tiefer theils höher gelegt wurde“ [5].

## **Grunderwerb mit und ohne Enteignung**

Spätestens mit der Festlegung der neuen Eisenbahnachse war der Grunderwerb durchzuführen, für den unterschiedlich die Feldmesser oder auch die Kauf- oder Verwaltungsleute zuständig waren. In jedem Fall hatten die Feldmesser die neuen Grenzen zu markieren, die zu erwerbenden Flächen zu vermessen und in die Pläne einzutragen. Eine Voraussetzung für den Grunderwerb war die Existenz von Enteignungsgesetzen, die es den Behörden, vor allem aber den Privatgesellschaften erlaubte, das benötigte Gelände auch gegen den Willen der Grundeigentümer zu erwerben. Entsprechende Expropriationsgesetze (Enteignungsgesetze) waren bereits vorhanden, gleichwohl wurden sie nicht von allen Ländern für den Eisenbahn-Grunderwerb für zulässig erklärt. Die ehemaligen hessischen Staaten beispielsweise bezeichneten ohne Ausnahme entweder die bestehenden Expropriationsgesetze auf den Eisenbahnbau anwendbar oder sie schufen speziell für diesen Zweck Enteignungsgesetze. Hessen-Darmstadt und Kurhessen erklärten ihre Enteignungsgesetze schon früh als für den Eisenbahnbau generell anwendbar. Die Stadt Frankfurt und das Herzogtum Nassau hingegen entschieden über die Anwendbarkeit der Enteignungsgesetze immer nur im Einzelfall.

In der Regel lief das Enteignungsverfahren in drei Phasen ab: Zunächst wurde der Versuch einer gütlichen Einigung mit den Grundbesitzern unternommen; dann setzte die Vermittlung einer Expropriationskommission zwischen Enteigner und Eigentümer ein, und wenn immer noch keine Einigung zustande gekommen war, führte man schließlich eine gerichtliche Entscheidung herbei.

In Bayern dagegen war die Regierung nicht bereit, das bestehende Expropriationsgesetz für anwendbar zu erklären. Die Bahngesellschaft Nürnberg-Fürth war daher auf den freien Erwerb der Grundstücke angewiesen, was sehr hohe Ausgaben verursachte; denn oftmals wandten die Grundeigentümer viele Tricks an, um die Abgabe ihrer Grundstücke hinauszuzögern oder zumindest soviel Profit wie möglich herauszuschlagen. Auf Druck der Eisenbahn-Unternehmer erließ der bayerische Staat erst 1837 ein zweckentsprechendes Enteignungsgesetz.

Die Enteignungen verliefen keineswegs problemlos. Oft gingen die Bahngesellschaften oder staatlichen Baubehörden und nicht zuletzt die Feldmesser recht ungestüm vor. Daraus resultierten viele Ressentiments in der Bevölkerung gegen die Eisenbahn. Die Widerstände oder kalkulierten Preistreibereien behinderten vielfach die Akquisition des benötigten Baugrundes und zogen die Verfahren in die Länge. Diese Probleme traten jedoch weniger beim Bau der Staatsbahnen hervor als bei den Privatbahnen. Vermutlich scheuten die Bürger beim Staatsbahnbau vor offenem Widerstand gegen die staatlichen Behörden zurück.

## **Spurweite 1435 mm – heute weltweit**

Das englische Vorbild für die Strecke Nürnberg-Fürth gab auch den Ausschlag für die Spurweite der zu bauenden Strecke, d. h. den Abstand zwischen den beiden Schienen; denn sehr früh stand

bereits fest, dass eine von dem Engländer Stephenson gebaute Lokomotive eingesetzt werden sollte. Bei ihrer Fertigung hatte sich Stephenson an der Spurweite (4 Fuß, 8 Zoll) der Killingworth-Strecke orientiert, die auch als Erprobungsstrecke für neue Lokomotiven diente. Er hatte keine Veranlassung, eine andere Spurweite zu wählen. Allerdings wurde auf der Strecke Liverpool-Manchester aus lauffechnischen Gründen die Spur um  $\frac{1}{2}$  Zoll auf 4 Fuß und 8  $\frac{1}{2}$  Zoll = 1435 mm erweitert. Heute haben mehr als 80 % aller Eisenbahnstrecken weltweit die von Stephenson vorgegebene Spurweite 1435 mm.

## Fahrdynamik in den Trassenelementen

Eines der wichtigsten Aufgabengebiete der Eisenbahn-Vermessungsingenieure war und ist auch heute die Berechnung, Absteckung und Überprüfung der Trassenelemente.

Die Eisenbahnlinien in der Grundrissgestaltung bestanden in den Anfangsjahren der Eisenbahn aus Geraden und Kreisbögen; und verfolgt man einmal die einschlägige Literatur über die Absteckung von Gleisen, so findet man eine Vielzahl von Vorschlägen, wie auch damals schon die einzelnen Punkte auf einem Kreisbogen möglichst einfach berechnet und in die Örtlichkeit übertragen werden konnten. Weil alle Kreise untereinander ähnlich sind, fiel es leicht, die jeweils gesuchten Absteckwerte in Tabellen zu erfassen. So gab es bis weit in das 20. Jh. hinein eine Reihe von Tabellenwerken [12].

Fährt ein Zug durch einen Kreisbogen, so wirkt auf ihn die nach außen gerichtete Zentrifugalkraft  $F = m \cdot v^2 / r$ , ( $m$  = Masse des Zuges,  $v$  = Geschwindigkeit,  $r$  = Radius). Sie wird durch die Überhöhung der bogenäußeren Schiene ausgeglichen, und je größer die Geschwindigkeit ist, umso mehr muss das Gleis überhöht werden, wenn nicht der Radius des Kreisbogens größer werden soll.

Die erste Forderung für eine Überhöhung taucht bei dem bereits genannten Harkort auf, der in seiner 1833 erschienenen Denkschrift auch die von Pferden gezogenen Kohlenbahnen beschreibt und u. a. fordert: „Bei Bogenwendungen ist stets darauf zu sehen, dass die äußere Seite des Gestänges höher liege, als wie die innere, damit die Reibung vermieden wird und die Räder nicht aus dem Gleise springen.“

Erste Überlegungen über die Beziehungen zwischen Zuggeschwindigkeit, Überhöhung und Gleisradius erschienen bereits 1844 [13]. Auf der Grundlage der in dem Beitrag entwickelten Formeln hat der Ingenieur de Pambour eine Tabelle berechnet, welche die Überhöhung in englischen Zoll für verschiedene Halbmesser und verschiedene Geschwindigkeiten in englischen Meilen pro Stunde angibt. Die Ansätze für die Formeln haben bis heute Eingang in die aktuellen Überhöhungsformeln gefunden, jedoch hat der Verfasser zusätzlich als Parameter die Durchmesser des jeweiligen inneren und äußeren Rades und den Halbmesser des äußeren Schienenkreises eingefügt, was die Anwendung der Formel nicht erleichtert.

Zehn Jahre später veröffentlicht der Feldmesser Garcke seine Zahlenangaben für die Überhöhung bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Radien [14]. Er schreibt u. a., „dass beim Bau der Eisenbahn die Überhöhung sich nach dem schnellsten Zug zu richten habe“ und entwickelt seine Überhöhungsformel  $X = b \cdot v^2 / g \cdot r$ , in der mit  $v^2$  und  $r$  zwei Komponenten für die Fliehkraft berücksichtigt sind.  $b$  ist die Spurweite und  $g$  die Schwerebeschleunigung, allerdings mit  $32,25 \text{ Fuß/sec}^2 = 10,12 \text{ m/sec}^2$  größer als der heute zu benutzende Wert, daher liegen seine Überhöhungswerte alle um etwa 3 % unter denen, die jahrelang noch bei der Deutschen Bundesbahn zur Anwendung kamen.

Garcke schreibt weiter, „dass das Maß der berechneten Schienen-Überhöhung sich auf die ganze Länge des Kreisbogens erstrecken muss und dass die Ausgleichung mit der angrenzenden geraden Strecke noch auf diese zu vermitteln ist“; heute meinen wir damit die Überhöhungsrampe, den

allmählichen Anstieg von der Überhöhung Null in der Geraden auf den im Kreisbogen zu haltenden Wert.

Garcke wollte also eine Überhöhung dort einbauen, wo sie noch gar nicht notwendig ist; denn in der Geraden gibt es ja keine Fliehkraft. Bei dieser Anordnung ergibt sich natürlich ein Widerspruch zwischen der Aufriss- und Grundrissgestaltung der Bögen, d. h. zwischen dem Überhöhungs- und Krümmungsverlauf. Dieser Widerspruch wird dadurch beseitigt, dass zwischen Gerade und Kreisbogen jeweils ein Übergangsbogen eingelegt wird, dessen Krümmung stetig von Null in der Geraden bis zur Krümmung im Kreisbogen zunimmt. Gleichzeitig muss in diesem Übergangsbogen die bogenäußere Schiene stetig von Null bis zum Wert  $u$  angehoben werden.

Einen frühen Hinweis auf Übergangsbögen liefert 1854 der Ingenieur Pressel. Er hat sehr wohl die Bedeutung des Übergangsbogens richtig eingeschätzt, allerdings kein brauchbares Absteckverfahren dafür gefunden. Das jedoch wurde 13 Jahre später bekannt, und zwar hatte der französische Vermessungsingenieur Nördling die These aufgestellt: „Zu der geradlinig ansteigenden Überhöhungsrampe gehört eine Anschlusskurve [Übergangsbogen], in der die Krümmung ebenso geradlinig anwächst. Diese Eigenschaft hat in gewissen Grenzen die kubische Parabel  $y = C \cdot x^3$ . Sie ist daher die für die Übergangsbögen geeignete Kurve.“

In zwei Abhandlungen gibt Nördling die Regeln für die Anwendung der kubischen Parabel als Übergangsbogen an, und zwar so klar und so vollständig, dass bis in den Anfang des 20. Jh.s hinein, nämlich bis zum Auftauchen des Winkelbildverfahrens nach Nalenz und Höfer, die kubische Parabel genau nach seiner Anleitung als Übergangsbogen verwendet worden ist.

Im Jahre 1872 veröffentlicht Helmert seine Schrift mit dem Titel „Die Übergangscurven für Eisenbahngeleise“, in der er mit großer Gründlichkeit alle möglichen Fälle der Übergangsbogeneinschaltung behandelt und als erster die Grenzen für die Anwendungsmöglichkeit der kubischen Parabel aufzeigt. Mit zunehmender Länge nämlich passt die Krümmung der kubischen Parabel nicht mehr mit der Krümmung des anschließenden Kreisbogens überein.

Gleichzeitig stellt Helmert dar, wie der Fehler bei UE, also beim Anschluss der kubischen Parabel an den Kreisbogen, vermieden werden kann, indem nämlich die erste Parabelhälfte von der Geraden und die zweite vom Kreisbogen aus abgesteckt wird. Diese Arbeitsweise fand keinen Eingang in der Praxis, weil bei den kurzen Übergangsbögen kein Bedarf dafür vorlag [15].

Die kubische Parabel mit ihrem geraden Krümmungsverlauf wurde viele Jahrzehnte lang als Übergangsbogen angewandt, gleichwohl war bereits bekannt, dass die Klothoide die ideale und damit bessere Übergangsbogenform ist. Aber bei den kurzen Übergangsbogenlängen stimmt die kubische Parabel mit der Klothoide überein, hat aber den enormen Vorteil, dass ihre Absteckwerte wesentlich leichter zu berechnen sind als die der Klothoide, für die eine Reihenentwicklung notwendig ist:

$$\text{Kubische Parabel: } y = x^3 / 6rl; \quad \text{Klothoide: } 1 \cdot r = c^2.$$

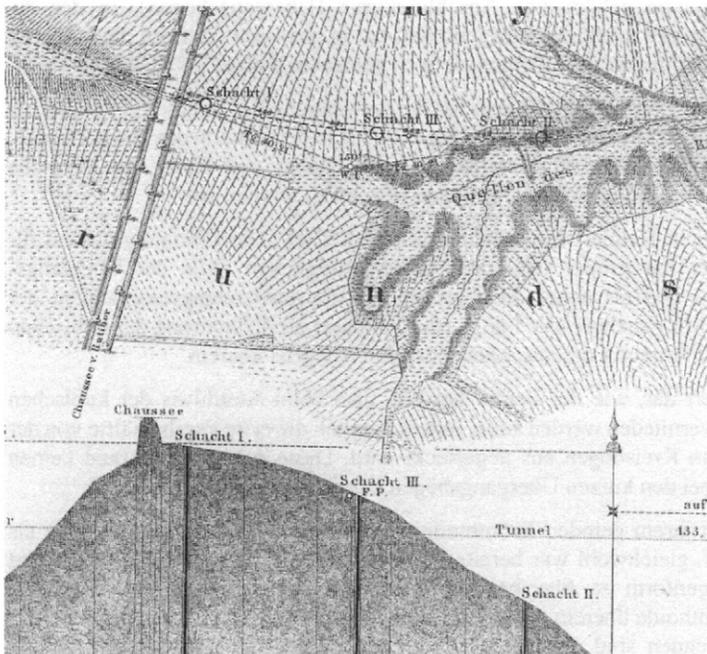
## Vermessung auch bei Tunneln und Brücken

Die Zugkraft der ersten Lokomotiven war nach unseren heutigen Maßstäben äußerst gering, so dass Steigungen vermieden wurden; daher ist es auch nicht verwunderlich, dass damals an Eisenbahnstrecken im Gebirge überhaupt nicht zu denken war. Lieber umfuhr man einen Berg, als eine große Steigung zu wagen. Wenn diese aber nicht zu vermeiden waren, so wurde durch Schleifen und Kehren in Verbindung mit Tunneln und Brücken der Schienenweg künstlich verlängert und damit die tatsächliche Steigung verringert.

Der erste Eisenbahntunnel in Deutschland wurde 1837 bei Oberau für die Leipzig-Dresdener Eisenbahn gebaut. Die Bauzeit betrug für den nur 512 m langen Tunnel drei Jahre.

Während heute in der Regel die Tunnel jeweils nur von ihren Endpunkten aus vorgetrieben werden, wurde in den ersten Jahrzehnten der Tunnelvortrieb – so auch in Oberau – dadurch unterteilt, dass von der oberirdisch abgesteckten Tunnelachse an geeigneten Stellen mehrere lotrechte Schächte bis zu der gerechneten Tunnelsohle abgeteuft wurden. Beim Oberauer Tunnel gab es vier Schächte.

Von diesen Schächten konnte der Tunnel jeweils in zwei Richtungen vorgetrieben werden, wobei der Feldmesser zuvor die oberirdisch festgelegte Richtung auf die Tunnelsohle zu übertragen hatte. Er hängte im Zwischenschacht zwei Lote auf, die genau in die oberirdisch markierte Richtung eingerichtet waren. Die damit festgelegte Richtung verlängerte er rückwärts. Vor dem Hintergrund der Fehlerfortpflanzung ist es sicher gut gewesen, wenn der nächste Schacht mit exakt bestimmten Achspunkten nicht sehr weit entfernt lag. Die oberirdische Absteckung und die Unterteilung der Tunnelstrecke veranschaulicht recht deutlich das Bild über den Tunnel bei Czernitz im ehemaligen Schlesien aus dem Jahr 1855 [Bild 5].



*Bild 5:  
Tunnelabsteckung und  
Zwischenschächte*

Die früheste Beschreibung einer Tunnelvermessung in Deutschland ohne Zwischenschächte enthält der 1854 veröffentlichte Bericht über die Vermessungen beim Bau des Tunnels bei Volkmarshausen in der Nähe von Hann-Münden [16]. Dieser Tunnel ist 336 m lang und liegt in einer Kurve mit einem Radius von 420 m.

Über den Bergrücken hinweg hatte der Geometer die Kurve im Abstand von jeweils 5 Ruthen = 23,35 m abgesteckt und verpflockt. Und ebenso ging er auch beim Vortrieb vor. Er wollte sicherstellen, dass jeder Absteckpunkt auf dem Berg auch mit dem entsprechenden Absteckpunkt in dem Berg übereinstimmt. Um die Achse in dem bereits vorgetriebenen Tunnelabschnitt exakt festzuhalten, fertigte er für jeden Absteckpunkt jeweils einen Betonquader, in den er zwei Kapseln, die durch eine Eisenstange mit dem genauen Maß der Pfeilhöhe verbunden waren, einbrachte. Diese Quader richtete er nach Lage und Höhe aus und mauerte sie fest ein. In beide Kapseln konnte er Visierstangen stecken und auf diesen Visierstangen jeweils eine Wachskerze befestigen, so dass er über sie die Tunnelachse jederzeit kontrollieren konnte.

Mit Stolz beschreibt der Geometer, dass der Tunneldurchschlag mit genügender Genauigkeit gelang. Über den genauen Durchschlagsfehler lässt er sich also nicht aus, diese Aussagen fehlten übrigens auch bei anderen Beschreibungen. Offensichtlich genügte es, sich überhaupt zu treffen.

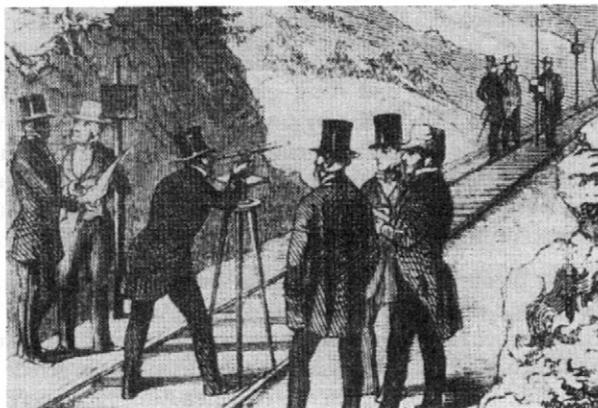
Die erste Tunnelvermessung mittels Triangulation wurde von Gelpke im Jahre 1869 und fünf Jahre später von Prof. Koppe zur Kontrolle und Bestätigung für den Bau des Gotthard-Tunnels vorgenommen.

Die Arbeiten im Tunnel waren für die Mineure und Feldmesser nicht einfach. So finden sich in den verschiedenen Berichten über Eisenbahntunnel immer wieder Klagen über die außerordentlich schlechten Sicht- und Luftverhältnisse, u. a. hervorgerufen durch den Pulverdampf bei den Vortriebsprengungen. Eindringendes Wasser bereitete den Arbeitern im Tunnel ebenfalls große Schwierigkeiten. Elektrisches Licht gab es noch nicht, so wurde bei offen brennenden Leuchten gearbeitet. Bei den geodätischen Zielungen wurden Kerzen mit möglichst kleinem Docht verwendet, um eine hohe Zielgenauigkeit zu erreichen. Ein gewisser Vorzug für die Feldmesser bestand lediglich darin, dass die Vortriebsarbeiten vor und während der Vermessungen in aller Regel eingestellt wurden.

Neben den Tunneln gehören die Brücken zu den Ingenieurbauwerken, bei denen Feldmesser tätig wurden. Zwar ist bereits seit Jahrhunderten bekannt gewesen, wie eine Flussbreite indirekt mittels trigonometrischer Verfahren ermittelt werden kann, doch bei einer Eisenbahnbrücke, die 1860 bei Dirschau in der Nähe von Danzig über die Weichsel gebaut werden sollte, vertrauten die Feldmesser offensichtlich ihrer trigonometrischen Messung bzw. Berechnung nicht. Um nämlich den Abstand der beiden Uferpfeiler zu kontrollieren, spannten sie zwischen ihnen einen Draht und markierten darauf die beiden Endpunkte. Dann legten sie den Draht an einem Ufer parallel zum Fluß unter derselben Spannung aus und maßen jetzt direkt die Länge des Drahtes und damit auch den gegenseitigen Pfeilerabstand. Es waren aber auch noch 2 Flusspfeiler abzustecken. Hier kam ihnen der Frost zu Hilfe. Auf dem zugefrorenen Fluß steckten sie durch direkte Messung die Flusspfeiler ab und fixierten ihre genaue Lage auf jedem Ufer durch mehrere in einer Visierlinie liegende Punktvermarkungen. Über die Schnittpunkte der Visierlinien ließen sich auch nach dem Tauwetter die Pfeilerpunkte wiederfinden bzw. wiederherstellen [17].

## Abnahme der fertigen Strecke

War schließlich die Eisenbahnstrecke fertiggestellt, so musste sie von der zuständigen Genehmigungsbehörde abgenommen werden, dazu gehörte insbesondere die Überprüfung der Höhenverhältnisse entlang der Strecke, damals hieß dies die „Approbierung“, und wie das nächste Bild zeigt, waren daran mehrere in elegantem Zwirn und Zylinder gekleidete Herren beteiligt [Bild 6].



*Bild 6:  
Die „Approbierung“  
der fertigen Strecke*

## Personelle und organisatorische Situation

So scheckig wie die deutsche Landkarte im Zeitalter der ersten Eisenbahnen war – Deutschland bestand aus 39 Einzelstaaten –, so bunt sah es im Lager der Vermessungsleute aus. Von einem Studium der Geodäsie konnte noch nicht gesprochen werden; neben tüchtigen praktischen Feldmessern wurden unter dem Zwang der Verhältnisse oft Nichtfachleute herangezogen. Gelegentlich kamen sie aus dem militärischen Bereich, wenn es beispielsweise um die Herstellung der Planungsunterlagen ging. Während für die Grundstücksvermessungen in aller Regel bereits Katastergeometer tätig waren, wurden die gleis- und bautechnischen Vermessungen im weitgespannten Rahmen der Bautechnik mitgeleistet. So darf sicher der Planer und Erbauer der Eisenbahn von Nürnberg nach Fürth, Paul Camille von Denis, der nicht nur ein vielseitig begabter königlich bayerischer „Bezirksgeometer“ für Hoch- und Tiefbau war, auch als der deutsche Eisenbahningenieur angesehen werden; er verantwortete die technischen Vermessungen.

Die Trennung zwischen den Aufgabenfeldern Grundstücksvermessung und technischer Vermessung wurde viele Jahre auch bei dem dafür zuständigen Personal deutlich. So wurden beispielsweise bei den bayerischen Bahnen relativ früh schon Geometer eingesetzt, die über eine fachliche Vorbildung verfügten, aber nur für katastertechnische Vermessungen zuständig waren. Sie waren in ihren Rechten und Pflichten den vom Staat eingesetzten vereidigten Bezirksgeometern gleichwertig und hatten auch die gleichen Instruktionen wie diese bei ihren Arbeiten zu beachten.

Waren die meisten Eisenbahnstrecken zunächst aus privater Initiative entstanden, so gingen etliche von ihnen im Laufe der Zeit in staatliche Regie über, und damit wurden auch bei den einzelnen Eisenbahnverwaltungen – nicht bei allen – Geometer angestellt und teilweise ins Beamtenverhältnis übernommen. In Bayern beispielsweise zählten die Geometer, wie später auch die preußischen Landmesser, zum damaligen mittleren Dienst in der Eisenbahn-Verwaltung.

Anders verlief die Entwicklung in Baden. Hier führten die Eisenbahngeometer etwa ab 1850 die Bezeichnung Baugeometer, was bereits erkennen lässt, dass sie nicht nur mit Grundstücksvermessungen, sondern auch mit der Absteckung von Bahn- und Bauwerksachsen sowie mit Nivellements und Arbeiten der Bauüberwachung betraut waren [18].

Wenige Jahre nach Eröffnung der Strecke Nürnberg–Fürth wurden in allen deutschen Ländern neue Eisenbahnstrecken gebaut, und zwar in einem für uns heute kaum vorstellbaren Ausmaß. Allein in Deutschland wurden in den siebziger Jahren mehrfach über 1 000 km neue Eisenbahnstrecken jährlich in Betrieb genommen. Bezüglich der Vermessungsarbeiten ging damit die Forderung einher, die Arbeitsweise und die Anforderungen an die Feldmesser in Dienstsanweisungen zu reglementieren. So wurde beispielsweise 1855 eine Anweisung zur Herstellung des Oberbaus auf den neuen hannoverschen Eisenbahnen erlassen, in der u. a. Hinweise zur Trassierung, zur Höhenlage der Gradienten und zur Überhöhung der bogenäußeren Schiene bei den verschiedenen Halbmessern zu finden sind [19].

Bereits ein Jahr früher wurden bei den österreichischen Staatsbahnen allgemeine Anforderungen für den Unterbau und darin eingebunden für die dafür notwendigen Vermessungsarbeiten veröffentlicht [20]. In diesem Zusammenhang muss auch erwähnt werden, dass im selben Jahr die schweizerische Zentralbahn eine Dienstsanweisung für ihre Sektions-Ingenieure erließ, in der detailliert die Ausführung der Vermessungsarbeiten, insbesondere bei Nivellements, Trassierungen und Absteckungen der Bahnachse vorgeschrieben sind. Auch werden dort in einer besonderen Dienstsanweisung die Aufgaben und Befugnisse des Obergeometers beschrieben [21].

Die Beschreibung der Eisenbahn-Vermessungsarbeiten in Dienstvorschriften war auch deshalb nötig, weil es etwa ab 1860 einen starken Andrang zu dem Beruf des Eisenbahnfeldmessers gab. Nicht immer zeichneten sich die damaligen Berufskollegen durch sorgfältige Arbeit und korrektes Verhalten aus. Beispielsweise hatten die Eisenbahnen gerade in Preußen jahrelang mit Prozessen zu kämpfen, die oftmals in den mangelhaften Aufnahmen bei den Vorarbeiten ihren Ursprung hatten.

So erklärt sich letztendlich wohl auch die Unzufriedenheit der Feldmesser bei der Entstehung der ersten Eisenbahnen. In verschiedenen Beiträgen führten sie Klage über eine unzureichende Bezahlung und strebten auch eine Besserung ihrer persönlichen Situation an. In dieser Diskussion richtete der Feldmesser Buttman von den Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahnen an seine Kollegen den Appell: „Der Feldmesser überhaupt muss aufhören, *Handwerker* zu sein, er muss aus jeder ihm aufgetragenen Arbeit dasjenige sublimieren, was als geistig wirkendes Element weiter lebt in seiner Wissenschaft!“ [23].

## **Benutzte Literatur:**

- [1] WEIGELT, H.: Die Vorgeschichte der Eisenbahn in Fünf Jahrhunderte Eisenbahntechnik Hestra-Verlag Darmstadt 1986
- [2] WALZ, W.: Die Eisenbahn in Baden-Württemberg Motorbuch Verlag Stuttgart, 2. Aufl., 1984
- [3] GROSSMANN, W.: Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung Wissenschaftliche Verlagsanstalt K.G. Hannover, 1949
- [4] KOPPE, C.: Die vermessungstechnischen Grundlagen der Eisenbahn-Vorarbeiten in Deutschland und Österreich Organ f. d. Fortschritte d. Eisenbahnwesens in techn. Beziehung 1912, Heft 8–11
- [5] STAMS, W.: Lohrmanns geodätische und kartographische Arbeiten Wissenschaftl. Zeitschrift d. Techn. Universität Dresden 39, 1990, H. 3
- [6] KOPPE, C.: Die neuere Landestopographie. Die Eisenbahn-Vorarbeiten und der Doctor-Ingenieur Verlag Friedrich Vieweg u. Sohn, Braunschweig 1900
- [7] HÖLSCHER, FR.: Streifzüge auf dem Gebiet des Eisenbahnwesens Zeitschrift für Vermessungswesen, 1907, S. 607
- [8] HARKORT, FR.: Die Eisenbahn von Minden nach Cöln Gedruckt bei A. Brune in Hagen 1833, 2. Aufl. herausgegeben von der Sparkasse Hagen 1961
- [9] HEYDE, H.: Die Höhennullpunkte der amtlichen Kartenwerke europäischer Staaten und ihre Lage zu Normal-Null Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e.V., Dortmund 1999, H. 28
- [10] SCHRÖDER: Die preußischen Eisenbahn-Nivellements Zeitschrift für Vermessungswesen, 1882, H. 3, S. 49
- [11] VERKEHRSMUSEUM NÜRNBERG: Projektierung und Bau der Eisenbahn Nürnberg–Fürth Ausarbeitung eines Mitarbeiters 1961
- [12] SARRAZIN, O., OBERBECK, H.: Taschenbuch zum Abstecken von Kreisbögen für Eisenbahnen, Straßen und Kanäle Verlag Springer Berlin, 1923, 40. Aufl.
- [13] POPPE: Über Eisenbahncurven Eisenbahnzeitung 1844, S. 51
- [14] GARCKE: Bestimmung über das Maß der ungleichen Schienenlage in den Bahncurven Zeitschrift für Bauwesen, 1854, S. 425
- [15] SCHRAMM, G.: Entwicklung und Stand der Übergangsbogenfrage Organ f. d. Fortschritte d. Eisenbahnwesens, 1937, LXXIV. Band, Heft 10

- [16] ANDRIESEN: Notiz über den Bau des Tunnels bei Volkmarshausen  
Notizblatt d. Architekten- u. Ingenieursvereins, 1853, Bd. III, H. 1, S. 23
- [17] BENOIT: Über das Verfahren des Absteckens von Brückenpfeilern  
Civilingenieur 1860
- [18] WILLMANN, E.: Die Entwicklung des Vermessungswesens bei den deutschen Eisenbahnen  
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 1939, Nr. 10, S. 264
- [19] BURESCH, DURLACH: Eisenbahn-Oberbau  
Eisenbahn-Zeitung, 1855, XIII. Jahrg., Nr. 12
- [20] ÖSTERREICHISCHE STAATS-EISENBAHNEN: Allgemeine Baubedingnisse für den  
Unterbau der k. k. Staats-Eisenbahn  
Eisenbahn-Zeitung, 1845, Nr. 41, S. 343
- [21] SCHWEIZERISCHE ZENTRALBAHN: Dienstanweisung für die Sektions-Ingenieure und  
für den Obergeometer  
Eisenbahn-Zeitung, 1845, XII. Jahrg.
- [22] BRAKE, L.: Die ersten Eisenbahnen in Hessen  
Selbstverlag der Historischen Kommission für Nassau, 1991
- [23] BUTTMANN: Über das Vermessungswesen bei den preußischen Eisenbahnen  
Zeitschrift für das Vermessungswesen 1875, Heft 2, S. 56

# Neue messtechnische Entwicklungen bei DESY für das Zukunftsprojekt TESLA

## 1 Einführung

Mit den grundlegenden Fragen zum Aufbau unserer Materie und ihrem Zusammenhalt hat sich die Menschheit schon immer beschäftigt. Bereits 400 v. Chr. im antiken Griechenland nahm der Philosoph Demokritos (Demokrit) an, dass alles Stoffliche aus kleinsten, unteilbaren Teilchen – den Atomen – besteht. Diese Idee geriet im Laufe der Zeit in Vergessenheit; sie wurde erst wieder um 1800 von John Dalton aufgenommen und im Jahre 1808 in seiner Atomhypothese ausformuliert. Wissenschaftler wie Becquerel, Rutherford, Bohr, Sommerfeld, Chadwick, Hahn, Straßmann, Meitner u. a. entwickelten in der Folgezeit das heute allgemein anerkannte, moderne Atommodell. Danach konnte die Auffassung, dass das Atom unteilbar sei, nicht bestätigt werden. Ein Atom besteht aus einer Hülle und einem im Vergleich zu seinem Gesamtvolumen winzigen Kern. Die Atomhülle, in der Elektronen um den Kern kreisen, hat einen Radius von etwa  $10^{-10}$  m, der Radius des Atomkerns hingegen beträgt nur  $10^{-14}$  m. Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen, die sich ihrerseits aus den so genannten Quarks zusammensetzen. Die Grundidee aber, dass es in unserer Welt unteilbare Teilchen gibt, wird weiter verfolgt. Für derartige Untersuchungen setzen die Physiker Teilchenbeschleuniger ein. Teilchenbeschleuniger sind „Super-Mikroskope“, mit denen sich dank modernster Techniken (extrem schnelle Elektronenschaltungen, Supraleitung, Hochvakuum usw.) Strukturen untersuchen lassen, die 100 000-mal kleiner sind als der Atomkern, also kleiner als  $10^{-19}$  m. Aufgrund der im Jahre 2004 von internationalen Gremien getroffenen Entscheidungen wird weltweit nunmehr ein *Internationaler Linearcollider ILC* geplant, der bei Energien von 500 bis etwa 1000 Giga-Elektronenvolt neue Perspektiven sowohl in der Grundlagenforschung als auch für anwendungsnahe Forschungen in verschiedenen Naturwissenschaften eröffnen sollen. Mit der über 30 km langen Anlage, in der Elementarteilchen (Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen) mit supraleitender Technologie auf quasi Lichtgeschwindigkeit beschleunigt zur Kollision gebracht werden, sollen die Frage nach dem Ursprung der Materie geklärt und Einblicke in die atomaren Dimensionen des Lebens gewonnen werden. Weitergehende Informationen zum Aufbau der Materie, zu den Grundkräften der Natur, zu den Beschleunigeranlagen und zu den Experimenten sowie zur Synchrotronstrahlung können unter der Internet-Adresse <http://www.desy.de> eingesehen werden. Interessante Informationen werden angeboten auf der Home-Seite unter *Infos & Services*, weiter mit *Presse- und Öffentlichkeitsarbeit* und abermals weiter mit *Presseseiten*. Im ersten Textabschnitt der dann erscheinenden Seite lassen sich weitere Seiten aufrufen zu *DESY, HERA, HASYLAB, XFEL* und *ILC*.

Bereits vor vier Jahren wurde vom Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg eine Projektstudie zu einem Linearcollider *TESLA* (*TESLA = TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator*) vorgelegt. Nach der Grundsatzentscheidung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Februar 2003 sollen aber die Arbeiten am *TESLA-Projekt* nur noch insofern weitergeführt werden, um die Beteiligung Deutschlands an einem späteren globalen Linearcolliderprojekt (z. B. beim mittlerweile initiierten *ILC-Projekt*) zu ermöglichen. Grünes Licht hingegen hat DESY bekommen für den Bau des *Röntgenlaserprojekts XFEL* (*XFEL = X-ray Free Electron Laser*).

Die weiteren Ausführungen in diesem Beitrag beziehen sich trotzdem auf das *TESLA-Projekt*, da die Genauigkeitsanforderungen in der Justierung von Linearbeschleunigeranlagen auch bei anderen Projektvarianten vergleichbar sind. Für den Betrieb des *TESLA-Beschleunigers* ist es erforderlich, dass die strahlführenden Komponenten der Anlage mit einer sehr hohen Genauigkeit

zueinander aufgestellt werden. Es wird gefordert, dass in jedem beliebigen Abschnitt, dessen Länge durch die Betatronwellenlänge (= 576 m) festgelegt wird, die Komponenten mit einer Nachbargenauigkeit (Standardabweichung) von

- 0,5 mm in der Lage quer zur Strahlrichtung und
- 0,2 mm in der Höhe

justiert werden. Die Betatronwellenlänge ist eine charakteristische Kenngröße eines Beschleunigers. Da im Beschleuniger mehrere Strahlführungswege mit eigenen Komponenten aufgebaut werden sollen, ist geplant, nicht jeden Strahlführungswege eigenständig zu vermessen, sondern es soll vielmehr eine Art Basisvermessung mit Referenzmarken an der Tunnelwand des Beschleunigers erfolgen, von denen dann die Komponenten eines jeden einzelnen Strahlführungsweges separat justiert werden können.

An der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Geodäsie und Photogrammetrie, wurden im Rahmen einer bis Ende 2003 bestandenen Kooperation mit dem DESY Messverfahren entwickelt und untersucht, die für die Justierung des geplanten Linearbeschleunigers unter Beachtung der Genauigkeitsforderungen eingesetzt werden können.

## 2 Klassische Messverfahren

Üblicherweise werden Beschleuniger mit Präzisionstachymetern oder anderen polarmessenden Systemen (z. B. Lasertracker) vermessen und justiert. Neben der Festlegung von Messpunkten an den zu justierenden Komponenten sind an der Tunnelwand in Abständen von z. B. 25 m bzw. 50 m Referenzpunkte mit dem Zwangszentrierungssystem nach Taylor-Hobson (Schwarz 1998) zu montieren. Die dreidimensionalen Koordinaten der Referenzpunkte werden durch redundante Polygonzugmessungen bestimmt. Da auf den dicht an der Tunnelwand montierten Punkten wegen des fehlenden Freiraums Vermessungsgeräte nicht direkt aufgebaut werden können, sollen die Instrumente auf einem längs der Tunnelachse verschiebbaren Wagen aufgestellt werden. Eine Genauigkeitsanalyse für dieses Messkonzept ergibt unter Annahme der mit Präzisionstachymetern üblicherweise erzielbaren Messgenauigkeiten, dass die geforderten Genauigkeiten erst dann erreicht werden, wenn für die vorgesehenen Punktabstände von jedem Standpunkt drei vor- und rückwärtige Referenzpunkte angemessen werden (Bild 1).

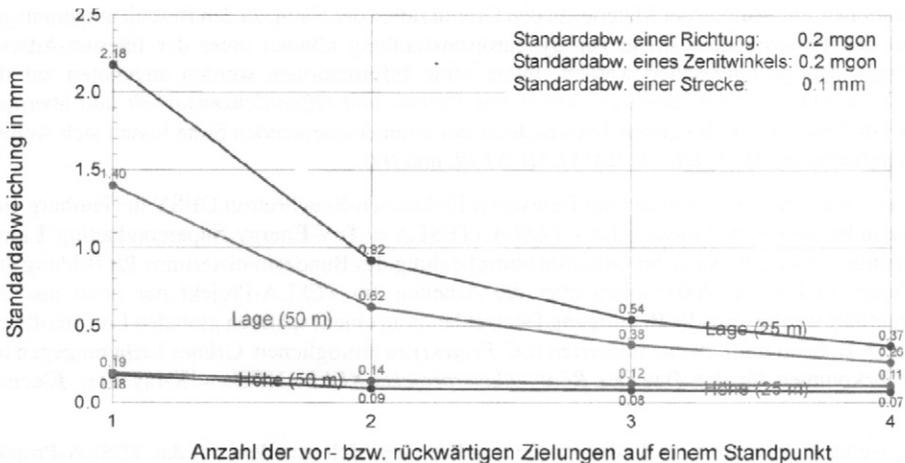


Bild 1: Zu erwartende Genauigkeit einer optischen Vermessung für die Mitte eines 600-m-Abschnitts

Bei dieser Genauigkeitsanalyse wurde nicht beachtet, dass die Messungen durch systematische Einflüsse beeinträchtigt werden können. Als besondere Einflussgröße ist hier die Zielstrahlkrümmung (Refraktion) näher zu betrachten. Sie wird durch Dichteunterschiede der vom Zielstrahl durchlaufenen Luftschichten hervorgerufen. Die Dichteunterschiede werden in erster Linie durch Inhomogenitäten in der räumlichen Verteilung der Lufttemperatur erzeugt. Schon ein als konstant angenommener Temperaturgradient von nur 0,1 K/m quer zur Tunnelachse lässt den Zielstrahl als leicht gekrümmten Kreisbogen verlaufen. Die maximale Abweichung von einer Geraden (Pfeilhöhe in der Bogenmitte) über den relevanten Entfernungsbereich von etwa 600 m beträgt dann 4,5 mm, ein Betrag, der die Genauigkeitsforderung um das 10fache übersteigt. Außerdem ist der der Modellrechnung zugrunde liegende Temperaturgradient sehr klein; tatsächliche Temperaturgradienten können in einem Tunnel wesentlich größer sein. Allerdings können sie auch vom Vorzeichen schwanken, so dass sich gegebenenfalls die Einzeleffekte teilweise wieder kompensieren können. Ein möglicher Ansatz, die Refraktionseinflüsse zu reduzieren, besteht darin, die Richtungsmessungen nach der Dispersionsmethode (Böckem 2001) auszuführen. Die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet sind aber zurzeit noch nicht abgeschlossen bzw. soweit entwickelt worden, dass praxisreife Instrumente zur Verfügung stehen. Aus diesen Gründen sind andere Methoden zu untersuchen und weiter zu entwickeln. Im Folgenden sollen für die Geradheitsmessungen in der Lage ein mit gespannten Drähten arbeitendes Verfahren und ein laserinterferometrisches Verfahren vorgestellt werden. Da der Beschleuniger der Erdkrümmung folgen soll, ist für die Höhenmessung das hydrostatische Nivellement prädestiniert.

### 3 Moderne Verfahren der Geradheitsmessung

#### 3.1 Drahtmessverfahren

Für horizontale Geradheitsmessungen wird ein auf überlappenden, gespannten Drähten als Geradlinigkeitsreferenz beruhendes Verfahren vorgeschlagen. Werden die jeweiligen Abstände von drei Tunnelpunkten in Bezug zu einer mechanisch realisierten Geradheitsreferenz, z. B. in Form eines gespannten Drahtes, gemessen, kann daraus der Brechungswinkel auf dem mittleren Punkt zu den beiden Nachbarpunkten ermittelt werden. Indem die Referenz in Intervallen der Punktabstände längs des Tunnels geführt wird, lassen sich nacheinander die Brechungswinkel auf den Referenzpunkten bestimmen (Bild 2).

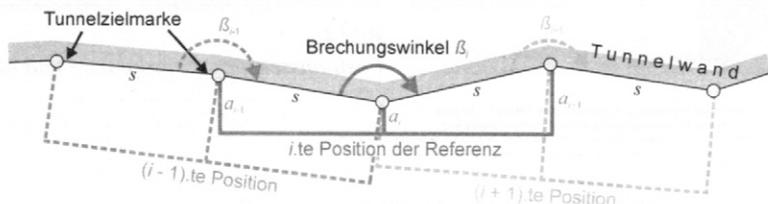


Bild 2: Grundprinzip des Drahtalignementverfahrens

Da dieses Verfahren nicht redundant ist, ist geplant, bei Punktabständen von 4,5 m einen insgesamt 22,5 m langen Draht als Geradheitsreferenz zu benutzen. In jeder Drahtposition werden dann die Abstände zu sechs Referenzpunkten gemessen (Bild 3). Die Genauigkeitsanalyse ergibt, dass die geforderte maximale Standardabweichung in der Lage von 0,5 mm über 600 m (für den ungünstigsten Fall in der Mitte eines 600-m-Abschnitts) eingehalten wird, wenn jede einzelne Abstandsmessung mit einer Standardabweichung von 5  $\mu\text{m}$  (Albert u. a. 2002) ausgeführt wird.

Das Messsystem soll im Endzustand aus sechs einzelnen Messwagen bestehen, die zu einem Messzug gekoppelt sind und voll automatisch auf einer Schiene entlang der Tunnelwand fahren. Der Draht wird zwischen dem ersten und letzten Messwagen frei gespannt.

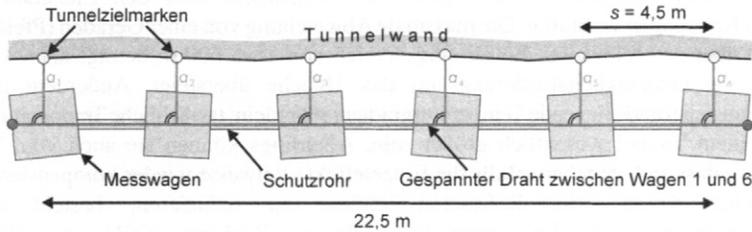


Bild 3: Konzept des Messzuges

Bei diesem Verfahren gibt es keine Refraktion wie bei optischen Messverfahren. Allerdings gibt es andere Faktoren, denen entsprechende Beachtung zu widmen ist. Durch entsprechende Vorkehrungen ist z. B. dafür zu sorgen, dass Luftströmungen im Tunnel den Draht nicht aus seiner Ruhelage einseitig auslenken. Auch ist sicherzustellen, dass der gespannte Draht tatsächlich als Geradenreferenz (nur für den Grundriss) angesehen werden kann. Zur Erhöhung der Redundanz ist vorgesehen, nicht nur mit einem Draht zu messen, sondern zwei einzusetzen.

Für die berührungslose Antastung des Referenzpunktes an der Tunnelwand und des gespannten Drahtes wurde an der Professur Geodäsie und Photogrammetrie der Bauhaus-Universität ein Positionssensor entwickelt, der den Zielpunkt über zwei vor dem Objektiv einer CCD-Kamera montierte spezielle Glasprismen als Doppelbild auf dem CCD-Sensor abbildet (Bild 4). Bewegt sich

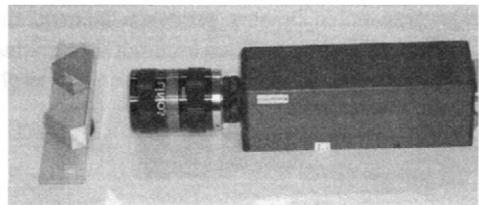
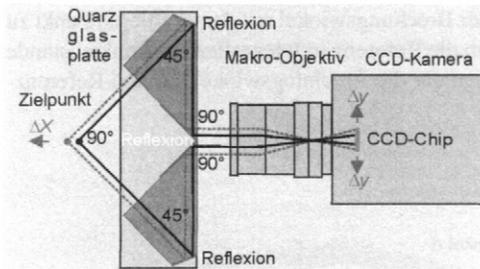


Bild 4: Positionssensor – Prinzipskizze und Abbildung

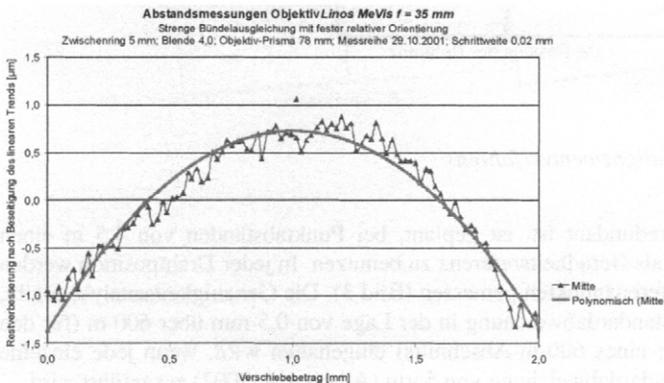


Bild 5: Kalibrierergebnis des Positionssensors

der Zielpunkt in Richtung der Kamera, so verändert sich der Abstand der beiden Bilder. Untersuchungen haben gezeigt, dass mit diesem Positionssensor Entfernungänderungen in einem Messbereich von ca. 2 mm mit einer Standardabweichung von  $<1 \mu\text{m}$  (Bild 5) erfasst werden können (Albert u. a. 2002). In jedem der sechs vorgesehenen, baugleichen Messwagen (Bild 6) ist jeweils ein Sensor für die Einmessung des Referenzpunktes und ein weiterer für die Erfassung der Drahtpositionen vorgesehen.

Im Bild 6 ist das Prinzip des Zusammenwirkens der Einzelkomponenten eines Messwagens dargestellt. Neben den angesprochenen Sensoren werden zusätzlich Neigungssensoren, CCD-Kameras für die Grobpositionierung usw. benötigt. Auch können die beiden Positionssensoren – einer misst den Referenzpunkt an der Tunnelwand an, der andere nacheinander die beiden Drähte – um größere Beträge in vertikaler Richtung und quer zur Tunnelrichtung verschoben werden, um mögliche Tunnelfehler in der Größenordnung von mehreren Zentimetern und den Durchhang der gespannten Drähte ausgleichen zu können. Diese Verschiebungen werden mit zwei Wegaufnehmern gemessen.

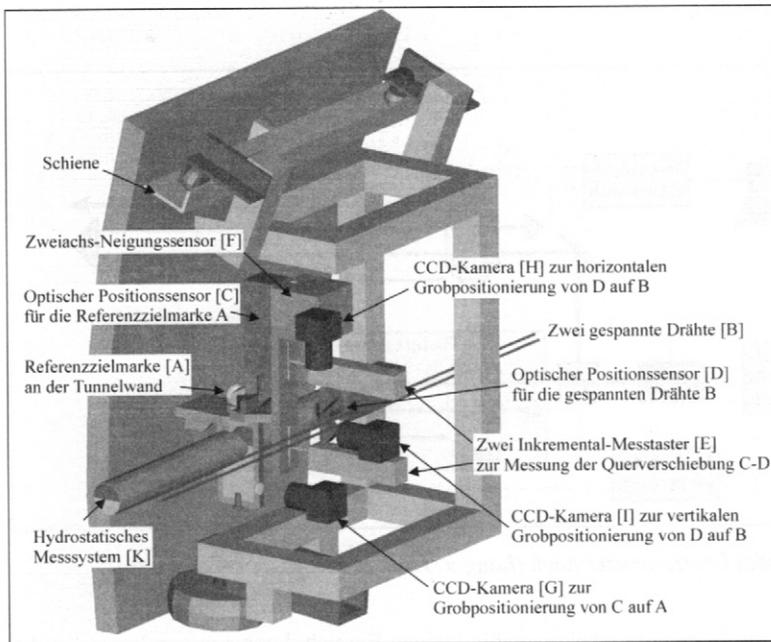


Bild 6:  
Prinzipskizze eines  
Messwagens

### 3.2 Lasermessverfahren

Das Lasermessverfahren, das für DESY von der Oxford University, Subdepartment of Particle Physics (UK) entwickelt wird, besteht aus den beiden Hauptkomponenten *Laser Straightness Monitors (LSM)* und *Frequency Scanning Interferometry (FSI)* (Prenting u. a. 2004; Grzelak u. a. 2004). Der Grundgedanke bei diesem System ist der gleiche wie beim Drahtmesssystem, nur dass als Geradheitsreferenz nicht Drähte sondern Laserstrahlen verwendet werden. Die Referenzpunkte an der Tunnelwand werden hierbei mit absolutmessenden Interferometern räumlich eingemessen. Zur Minimierung der bereits angesprochenen Refraktionseffekte soll das System im Vakuum aufgebaut werden.

Bei einem absolutmessenden Interferometer muss für eine Messung der Reflektor nicht mehr vom Anfangs- zum Endpunkt der auszumessenden Strecke verschoben werden. Ähnlich wie bei der optischen Distanzmessung wird auf dem Endpunkt der auszumessenden Distanz ein Reflektor fest

aufgebaut und das absolutmessende Interferometer bestimmt direkt die gesamte Distanz. Dazu wird das vom Laser emittierte Licht aufgeteilt und einem Referenzinterferometer sowie einem Messinterferometer zugeführt (Bild 7). Bei der eigentlichen Messung, bei der der Laser durchgestimmt wird (seine Frequenz und damit die Wellenlänge des ausgesendeten Lichtes wird kontinuierlich verändert), ergibt sich auf der Strecke des Mess- und Referenzinterferometers jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Interferenzänderungen. Das Verhältnis dieser Interferenzänderungen multipliziert mit der als bekannt vorausgesetzten Länge des Referenzinterferometers  $L_{Ref}$  ergibt die gesuchte Länge  $L_{Mess}$ :

$$L_{Mess} = L_{Ref} \cdot \frac{n_{Mess}}{n_{Ref}}$$

mit  $L_{Mess}$  : Länge des Messweges,

$L_{Ref}$  : Länge des Referenzweges,

$n_{Mess}$  : Anzahl der Interferenzänderungen auf dem Messweg,

$n_{Ref}$  : Anzahl der Interferenzänderungen auf dem Referenzweg.

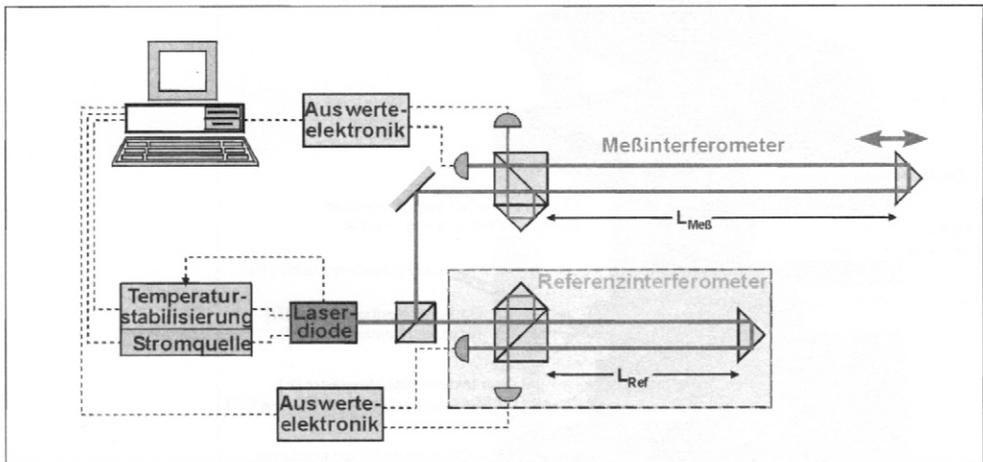


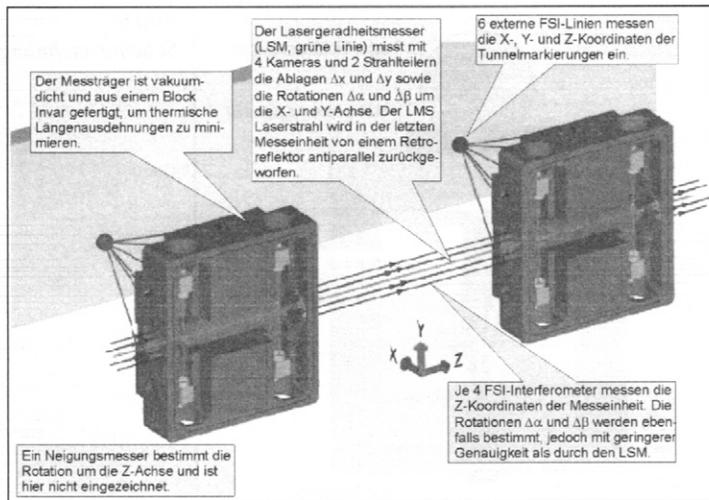
Bild 7: Absolutmessendes Interferometer nach (Lang u. Thiel 1993)

Da Laser sich aber nur in einem verhältnismäßig kleinen Bereich durchstimmen lassen, ist die bloße Zählung von Interferenzänderungen nicht ausreichend. Über eine Distanz von einem Meter ergeben sich gerade einmal nur ca. 1000 Interferenzänderungen, was einer Auflösung von 1 mm gleich käme. Erst durch eine zusätzliche Auswertung der Phasenlagen der Interferometerzustände gelingt es, wesentlich höhere Auflösungen zu erreichen. Um Drifterscheinungen zu reduzieren, werden zwei Laser mit unterschiedlichen Frequenzen in entgegengesetzter Richtung durchgestimmt (Grzelak u. a. 2004). Bei entsprechender Auslegung des Systems können einige Hundert Strecken gemessen werden.

Bei jedem Messwagen werden von sechs Punkten nach diesem Verfahren die Strecken zu dem Referenzpunkt an der Tunnelwand gemessen (Bild 8). Die Referenzpunkte werden also durch räumlichen Bogenschnitt auf die jeweiligen Messwagen eingemessen.

Bei der Geradheitsmessung nach dem LSM-Verfahren durchläuft ein Laserstrahl den gesamten Messzug im Vakuum. In den einzelnen Messwagen werden über Strahlteiler Anteile des Laserstrahls ausgekoppelt und auf CCD-Sensoren umgelenkt. Aus den Positionsänderungen der auf

*Bild 8:*  
**Prinzipieller Aufbau**  
**des Lasermessverfahrens**  
 (Ausschnitt mit  
 2 Messwagen) nach  
 (Karyotakis 2004)  
 und nach  
 (Grzelak u. a. 2004)



die CCD-Sensoren fallenden Laserpunkte können dann Rotationen und Translationen eines jeden Messwagens in Bezug zum ersten und letzten Wagen ermittelt werden.

Simulationsrechnungen haben ergeben, dass mit diesem Verfahren über einen Bereich von 600 m die Abweichungen unter 100  $\mu\text{m}$  liegen sollten (Grzelak u. a. 2004).

#### 4 Höhenmessverfahren

Für die Höhenmessung bietet sich, wie bereits erwähnt, das hydrostatische Messverfahren an, da der Beschleuniger der Erdkrümmung folgen und damit auf einer Niveaufläche verlaufen soll. Um Temperatureffekte von vertikalen Wassersäulen, die bei hydrostatischen Messsystemen von besonderer Bedeutung sind, zu minimieren, soll mit einer freien Wasseroberfläche gearbeitet werden. Hierbei wird ein näherungsweise horizontal verlegtes Rohr ungefähr bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt, so dass keine vertikalen Wassersäulen entstehen und der Druckausgleich innerhalb des Rohres selbst erfolgen kann, ohne einen zusätzlichen Luftschlauch verlegen zu müssen. Die Wasseroberfläche selbst wird berührungsfrei mit Ultraschall eingemessen (Schwarz 2002). Der Sensor des Typs USM25 der Firma Agfa NDT (ehemals Firma Krautkrämer), der ursprünglich für Aufgaben aus den Bereichen der Materialprüfungen entwickelt worden ist, befindet sich am Boden eines jeden Messtopfes; er misst nach dem Laufzeitverfahren den Abstand zur Wasseroberfläche durch das Medium Wasser (Bild 9). Der Sensor wird als Sender und als Empfänger eingesetzt.

Der Sensor mit einem Durchmesser von 5 mm sendet als Ultraschallsignal Nadelimpulse mit einer Frequenz von 10 MHz aus. Im Wasser mit einer Temperatur von z. B. 10 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit 1440 m/s und damit die Wellenlänge 0,144 mm. Die Laufzeit kann auf 4,2 ns genau aufgelöst werden. Damit ergibt sich im Wasser in der Abstandsbestimmung eine Auflösungsgenauigkeit von 3  $\mu\text{m}$ . Die Schallgeschwindigkeit in Wasser wird in erster Linie von der Temperatur des Wassers bestimmt. Um die Schallgeschwindigkeit stets aktuell und mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, wird sie aus dem Vergleich der Laufzeiten zu den Endflächen einer Referenzstrecke und deren mechanischer Länge, die mit übergeordneter Genauigkeit ausgemessen worden ist, abgeleitet. Die Endflächen der Referenzstrecke sollten nicht plan sein, sondern durch Kugeln mit einem Durchmesser von 2 mm bis 3 mm festgelegt werden (Helmholtz 2003). Nur bei Kugeln ist der Reflexionspunkt des Ultraschallsignals eindeutig definiert. Bei der aus Bild 9 ersichtlichen Anordnung der Referenzstrecke zum Messtopf wird das Messergebnis von lokalen

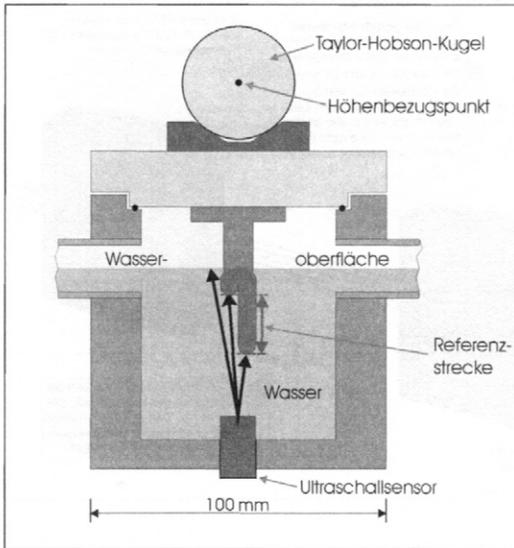


Bild 9:  
Schemazeichnung des Messtopfes

Instabilitäten des Sensors nicht beeinträchtigt. Es ist nur wichtig, dass die Referenzstrecke und der Höhenpunkt zueinander stabil sind.

Um das Messsystem zu untersuchen, ist in einem Tunnel im Thüringer Wald ein ein Kilometer langer Testaufbau installiert worden (Albert u. a. 2002). Seit April 2001 wurden mit insgesamt 11 Messtopfen dort Versuche durchgeführt, um z. B. das Ausbreitungsverhalten von künstlich induzierten Wellen der Wasseroberfläche mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen in Rohren mit verschiedenen Durchmessern kennen zu lernen, die Langzeitstabilität des Messsystems zu erproben, die Auswirkungen von einseitigen Temperaturänderungen zu studieren, das Einlaufverhalten der Wasseroberfläche bei plötzlichen Punktbewegungen zu erfahren usw. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in (Schlösser 2004) veröffentlicht.

Bei dieser Höhenbestimmung bildet die freie Wasseroberfläche (Niveaufläche) die Referenz. Um die eingangs angesprochenen Genauigkeitsforderungen einzuhalten, sind entlang der Trasse des Linearbeschleunigers die Geoidundulationen mit einer Standardabweichung von  $<0,2$  mm (als Nachbarschaftsgenauigkeit bezogen auf den Entfernungsbereich von 600 m) zu bestimmen, um gegebenenfalls damit die hydrostatisch bestimmten Höhenlage der Komponenten der Beschleuniger korrigieren zu können. Das Institut für Erdmessung der Universität Hannover führt derzeit entsprechende Untersuchungen durch; es werden Geodbestimmungen nach der gravimetrischen und nach der astronomischen Methode vorgenommen (Feest u. a. 2003). Erste Ergebnisse in einem Testgebiet in Norddeutschland mit einer Größe von 600 m x 600 m zeigen, dass Geoidundulationen von  $>0,2$  mm durchaus vorkommen können und dass sie besonders mit der astronomischen Methode mit der geforderten Genauigkeit in verhältnismäßig kurzer Zeit bestimmt werden können.

## 5 Resümee

Die Vermessung der Teilchenbeschleuniger mit ihren extremen Genauigkeitsforderungen hält für die Geodäsie immer wieder neue Herausforderungen bereit. Für den geplanten Linearbeschleuniger sind Messverfahren zu modifizieren und weiterzuentwickeln, um die geforderten Aufstellgenauigkeiten realisieren zu können. Bei der Bearbeitung des Projekts sind die unterschiedlichsten geodätischen Einzeldisziplinen heranzuziehen. Doppelarbeit lässt sich reduzieren, wenn interdisziplinär und international mit anderen Fachbereichen zusammengearbeitet

wird. Ein intensiver Erfahrungsaustausch ist auf den im Turnus von zwei Jahren stattfindenden internationalen Workshops über die Vermessung von Beschleunigern (IWAA = International Workshop on Accelerator Alignment) möglich. In der Ingenieurgeodäsie zeichnen sich aber auch neben dem Gebiet der Vermessung von Teilchenbeschleunigern in anderen Bereichen, wie z. B. im Fahrzeug- und Flugzeugbau, bei der Überwachung von Bauwerken durch Weiterentwicklungen in der Sensorik (z. B. faseroptische Sensoren) und im Instrumentenbau neue Möglichkeiten ab, die von den Geodäten unbedingt aufgegriffen werden sollten, um neue Aufgabenstellungen erschließen zu können.

## 6 Literatur

ALBERT, J. u. a. (2002): Measuring System for the high-precision Alignment of planned Linear Colliders.

In: Kahmen, H.; Niemeier, W.; Retscher, G. (Eds.): 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Berlin 2002, Seite 142–153.

ALBERT, J., SCHWARZ, W. (2004): Messtechnische Entwicklungen für die Zukunftsprojekte „Linearbeschleuniger“.

In: Ingenieurvermessung 2004 – 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zürich, Beiträge/Contributions, Herausgeber: H. Ingensand, ISBN 3-906467-46-5, Seite 39–50.

BÖCKEM, B. (2001): Development of a Dispersometer for the Implementation into Geodetic High-Accuracy Direction Measurement Systems.

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 73 (Dissertation), Zürich 2001.

FEEST, C. u. a. (2003): Hochpräzise Bestimmung von physikalischen Höhenbezugsflächen mit Zenitkamera, GPS und Gravimetrie für die Justierung von linearen Teilchenbeschleunigern.

Abschlussbericht Projektseminar Erdmessung 2002/2003, Hannover 2003, unveröffentlicht.

GRZELAK, G. u. a. (2004): Hochgenaue Vermessung und Justierung zukünftiger Linearbeschleuniger (Poster).

Ingenieurvermessung 2004 – 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zürich; [http://geo.desy.de/verffentlichungen/index\\_ger.html](http://geo.desy.de/verffentlichungen/index_ger.html)

HELMHOLTZ, P. (2003): Einsatz von Ultraschall bei hydrostatischen Messverfahren.

Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität Berlin in Zusammenarbeit mit der Professur Geodäsie und Photogrammetrie der Bauhaus-Universität Weimar, unveröffentlicht.

KARYOTAKIS, Y. (2004): WP 7: Metrology and Mechanical Stabilisation. EUROTeV Kick-Off Meeting, DESY, November 1st, 2004; <http://www-flc.desy.de/eurotev/desy011104.html>

LANG, M.; THIEL, J. (1993): Interferometrische Anwendungen. Vortrag im Rahmen des 30. DVW-Seminars „Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau“ vom 8. bis zum 10. März 1993 beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg.

Veröffentlicht in: SCHWARZ, W. (Herausgeber): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 28, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1995.

PRENTING, J. u. a. (2004): High Precision Survey and Alignment of Large Linear Accelerators.

8th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA), 4.–7. October 2004, CERN; [http://geo.desy.de/verffentlichungen/index\\_ger.html](http://geo.desy.de/verffentlichungen/index_ger.html)

SCHLÖSSER, M. (2004): Ein hydrostatisches Meßsystem mit in-situ-Kalibrierung.

Ingenieurvermessung 2004 – 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zürich, Tutorial; [http://geo.desy.de/verffentlichungen/index\\_ger.html](http://geo.desy.de/verffentlichungen/index_ger.html)

SCHWARZ, W. (1998): Die Vermessung von Teilchenbeschleunigern unter besonderer Berücksichtigung des geplanten, über 30 km langen Linearbeschleunigers.  
In: Schriftenreihe des DVW, Band 32, Seite 127–140, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart 1998.

SCHWARZ, W. (2002): Hydrostatisches Messsystem mit Ultraschall.  
In: Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH), Nr. I, 2002, Seite 163–170 und in Wasserwirtschaft 94 (2004) 1–2, Seite 61 – 64.

## **Anschriften**

### **Herausgeber**

Dr. phil. Kurt Kröger,  
Referent für Öffentlichkeitsarbeit des Förderkreises  
Vermessungstechnisches Museum e.V.  
Am Knie 2, D-44309 Dortmund

### **Autoren**

Dipl.-Ing. Dr. Klaus Grewe

Jahrgang 1944

Er studierte in Mainz Vermessungswesen und übernahm 1967 am Rheinischen Landesmuseum Bonn die neugeschaffene Stelle des Vermessungsingenieurs. Seine Tätigkeit galt der Erforschung römischer Wasserleitungen. Ende der 70er Jahre übernahm er die Leitung des Forschungsprojektes Eifelwasser. Daraus entstand als Publikation der „Atlas der römischen Wasserleitungen nach Köln“. Diesem folgte bald die populärwissenschaftliche Publikation zum Römerkanal-Wanderweg. Die Ergebnisse mehrerer archäologischer Forschungskampagnen in Algerien und Tunesien veröffentlichte er in der Frontinus-Schriftenreihe. Für diese Arbeiten wurde ihm 1988 die Frontinus-Medaille der Frontinus-Gesellschaft verliehen. Zurzeit ist er als Wissenschaftlicher Referent beim Amt für Bodendenkmalpflege beschäftigt. Zum Arbeitsgebiet gehören die Projekte „Römerstraßen im Rheinland“ sowie „Wasserversorgung der Burg Blankenheim“. 1997 hat er an der Universität Nimwegen promoviert; der Titel seiner Dissertation lautet: „Licht am Ende des Tunnels – Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau“.

Anschrift:

Tannenstraße 18, D-53913 Swisttal

Professor Dr.-Ing., Dr. h. c. Hermann Kienast

Jahrgang 1943

Hermann Kienast war bis zu seiner Pensionierung 2. Direktor des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) in Athen. Seine wissenschaftliche Tätigkeit galt vornehmlich der Erforschung des Tunnels des Eupalinos und des Heraions. 1993 habilitierte er sich am Lehrstuhl für Baugeschichte an der Universität München mit der wissenschaftlichen Auswertung seiner Grabungsarbeiten.

Dr. Kienast ist Ehrenmitglied der Griechischen Archäologischen Gesellschaft, Korrespondierendes Mitglied der Akademie der Wissenschaften von Athen und Ehrendoktor der Philosophischen Fakultät der Universität Athen.

Anschrift:

Arcisstraße 50, D-80794 München

Dr.-Ing. Erich Siems

Jahrgang 1935

Von 1956 bis 1961 Studium der Geodäsie an der Technischen Hochschule Hannover; 1964 Große Staatsprüfung. Eintritt in den Vermessungsdienst bei der Deutschen Bundesbahn. Von 1968 bis 1971 abgeordnet als Wissenschaftlicher Assistent an die Technische Hochschule Braunschweig, dort Promotion. Anschließend Vermessungsdezernent in verschiedenen Bundesbahndirektionen. Von 1973 bis 1988 Leitung des Sachgebiets Vermessung in der Bundesbahn-Zentrale. In dieser Funktion tätig in der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder. Von 1989 bis 1999 Leiter der Vermessungsabteilung Frankfurt bei der Deutschen Bahn AG. Von 1975 bis 1999 Prüfer beim Oberprüfungsamt für die höheren technischen Verwaltungsbeamten. Von 1985 bis 1997 Vorlesungen über Eisenbahnvermessung an der Fachhochschule Bochum.

Anschrift:

Fichtenstraße 18, D-65527 Niedernhausen

Prof. Dr. phil. habil. Volker Schmidtchen

Jahrgang 1945

Oberst d. Res., Studium der Geschichtswissenschaft, Romanistik, Politischen Wissenschaft und Sportwissenschaft, Staatsexamen 1974, Promotion 1976, Habilitation 1984, Rudolf-Kellermann-Preis für Technikgeschichte des VDI 1985.

Direktor und Wiss. Leiter von FIRMITAS, Institut für Wirtschafts- und Sicherheitsstudien im Forschungs- und Entwicklungszentrum Witten, Außerplanmäßiger Professor für Technikgeschichte und Militärgeschichte/Sicherheitspolitik an der Ruhr-Universität Bochum, Lehraufträge an deutschen und ausländischen Universitäten, Dozent Sicherheitspolitik im jährlichen Generalstabslehrgang der Bundeswehr-Führungsakademie und im Lehrgang Höhere Führung, Inhaber von VS-Management und VS-Publizistik, Medienarbeit als Autor und Moderator in Funk und Fernsehen (SWR, WDR, ZDF, RTL)

Anschrift:

Hoyerstraße 2, D-44265 Dortmund

Professor Dr.-Ing. Willfried Schwarz

Jahrgang 1948

Nach Schulbesuch Lehre als Vermessungstechniker, 1967 Besuch der Staatlichen Ingenieurschule in Recklinghausen, 1971 Geodäsie-Studium an der Universität Bonn. Nach dem Examen 1976 Referendariat in Nordrhein-Westfalen. 1978 Wissenschaftlicher Assistent an der Rheinisch-Westfälischen TH in Aachen. 1985 Wissenschaftlicher Angestellter beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Ende 1998 Berufung an die Bauhaus-Universität Weimar, auf die Professur „Vermessungskunde“, jetzt „Geodäsie und Photogrammetrie“.

Anschrift:

Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen,

Marienstraße 9, D-99406 Weimar