

Konrad Peters, Münster

Nivelliergeräte des Altertums

1 Bestandsaufnahme der Überlieferungen

Ergebnisse von Nachmessungen an Großbauten des Altertums beweisen, daß deren Erbauer in der Lage waren, exakte Höhenmessungen durchzuführen. Welche Geräte und Verfahren sie dabei anwandten, ist schwieriger zu belegen, da die Überlieferung hierzu nur wenige und allgemeine Angaben vermittelt, die dazu auf kein bestimmtes Bauwerk zutreffen. Die bisherige Forschung zu den Nivelliergeräten des Altertums bestand im wesentlichen darin, Heron und Vitruv zu interpretieren. Dadurch entstand der Eindruck, daß die Kanalwaage Herons und der Chorobat Vitruvs die Nivelliergeräte des Altertums waren. Die Bedeutung der Setzwaage für die Bauhandwerker sowie als Bauelement von Nivelliergeräten wurde noch nicht richtig erkannt, obwohl auch Heron und Vitruv sie erwähnen.

Veröffentlichungen zu den Nivelliergeräten des Altertums zeigen, daß dieser Komplex noch nicht in einer umfassenden Gesamtdarstellung behandelt wurde. Die Autoren beschränken sich im allgemeinen auf die Beschreibung von einzelnen Geräten unter dem Aspekt ihres Fachgebietes. Selten gibt es hierzu Analysen. Das Experiment mit nachgebauten Geräten fehlt ganz.

Um diese Forschungslücke zu schließen, zeigt der erste Teil dieser Arbeit in einer Bestandsaufnahme die Überlieferungen zu den Nivelliergeräten des Altertums. Der zweite Teil behandelt den in Auswertung der Bestandsaufnahme erfolgten Nachbau der Geräte, der dritte Teil stellt die mit ihnen im Experiment durchgeführten Nivellements dar.

1.1 Kanalwaage des Heron

Das Lehrbuch „Dioptra“ des Physikers und Mathematikers Heron aus Alexandria (1. Jh. n. Chr.) behandelt umfassend die Ingenieurvermessung der Antike [1]. Dieses Dokument ist die einzige überlieferte Schrift für dieses Fachgebiet. Nach Expertenschätzungen gelangten nur etwa 5% des Schriftguts der Antike in unsere Zeit; darunter auch der 1903 in der Pariser Nationalbibliothek aufgefundene Urtext der Schriften Herons [2]. Er beschreibt darin ein von ihm gebautes Universalinstrument, mit dem man alle Aufgaben der Land- und Ingenieurvermessung lösen kann. Diese Aussage Herons steht bereits im ersten Abschnitt der „Dioptra“, in dem er seine Arbeitsmethode beschreibt:

„Da die Lehre von der Dioptra viele und unentbehrliche praktische Anwendungen bietet und viele über sie gehandelt haben, so halte ich es für nötig, das von meinen Vorgängern übergangene, das, wie gesagt, eine praktische Anwendung gestattet, der Darstellung zu würdigen, das schwierig Dargestellte in eine leicht faßliche Form zu bringen und das falsch Dargestellte zu verbessern. . . . Ferner haben auch diejenigen, welche über den Gegenstand geschrieben haben, sich zur Ausführung der Operationen nicht ein und desselben Instruments, sondern vieler und immer wieder verschiedener bedient, und doch haben sie vermittelst derselben nur wenige Aufgaben gelöst. Wir nun haben gerade auf diesen Punkt besonderen Wert gelegt, so daß durch ein und dasselbe Instrument die uns vorliegenden Aufgaben gelöst werden.“

Die Ausführungen Herons belegen, daß ihm eine Reihe von Vermessungslehrbüchern vorlag, die er kritisch untersuchte und teilweise in seine Arbeit einbezog. Das gilt besonders für die verschiedensten Vermessungsgeräte und den damit zu lösenden Aufgaben. Man kann davon ausgehen, daß zu diesen Geräten auch Wasser- und Setzwaagen in den verschiedensten Ausführungen gehörten.

Heron's Visierlineal (Kanalwaage), das auf das Stativ der Dioptra aufgesetzt wird, ist von der Ausführung und Konstruktion her den Nivelliergeräten seiner Zeit weit überlegen. Es arbeitet gegenüber der Wasser- und Setzwaage nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren. Weder aus der Antike noch aus der Renaissance ist ein Nivelliergerät überliefert, das nach diesem Prinzip arbeitet. Erst in der Neuzeit, ab 1700, scheint sich Herons Konstruktionsprinzip durchgesetzt zu haben. Die Kanalwaage ist seit dieser Zeit fester Bestandteil der Fachliteratur.

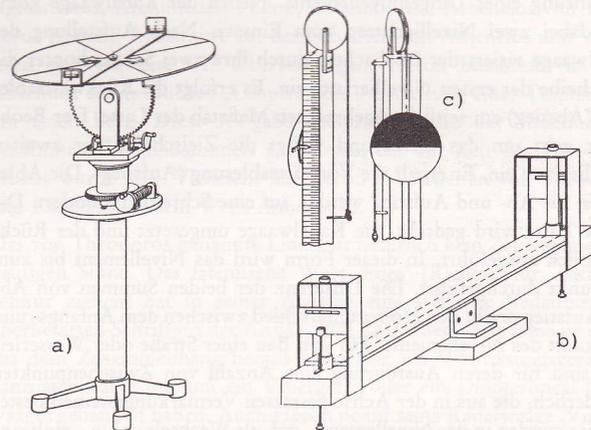


Bild 1

Vermessungsgeräte nach Heron

(a) Universalinstrument Dioptra (b) Nivellieraufsatz (Kanalwaage) (c) Nivellierlatte

In den Abschnitten III bis V der „Dioptra“ gibt Heron eine bis ins kleinste Detail gehende Beschreibung des Universalinstruments (Bild 1) mit der dazu gehörenden Kanalwaage und Nivellierlatte [3]. Die Konstruktionsbeschreibung der Kanalwaage zeigt deutlich Herons präzise Arbeitsweise:

„In die obere Fläche des Visierlineals ist eine Vertiefung von halbrundem oder quadratischem Querschnitt eingeschnitten, die so lang ist, daß sie eine Bronzeröhre, die um etwa 12 Daktylen kürzer ist als das Visierlineal, aufzunehmen vermag. An die Bronzeröhre schließen sich an ihren Enden zwei andere, senkrecht stehende Röhren an, so daß es aussieht, als sei die große Röhre nach oben aufgebogen. Die Höhe dieser aufgebogenen Stücke bemißt man auf nicht mehr als 2 Daktylen. Hierauf wird die Bronzeröhre mit einem langen Lineal, das auf die Vertiefung paßt, oben dergestalt zugedeckt, daß dieses sowohl die Bronzeröhre festhält als auch das Aussehen des Apparats wohlgefälliger macht. In die genannten Aufbiegungen der Röhre wird je ein kleiner Glaszylinder eingepaßt, der eine zu der Röhre passende Dicke und eine

Höhe von etwa 12 Daktylen hat. Sodann werden die Glaszylinder in die Aufbiegungen mit Wachs oder einem anderen Bindemittel hineingekittet, damit, wenn durch einen der Zylinder Wasser eingegossen wird, es nirgends durchlaufen kann.

Das querliegende Lineal wird an den Stellen, wo sich die Glaszylinder befinden, von zwei kleinen Gehäusen umgeben, so daß die Glasgefäße durch diese hindurchgehen und darin festgehalten werden. In diese Gehäuse werden Metallplättchen hineinverpaßt, welche in Führungen an den Wänden der Gehäuse auf und nieder laufen können; sie berühren dabei die Glaszylinder und haben in der Mitte Ausschnitte zum Visieren. An diesen Metallplättchen sind an ihren unteren Enden kleine Zylinder, die die Höhe von etwa $1/2$ Daktylos haben, befestigt und in diese paßt man drehbare Stifte aus Bronze ein, die so lang sind als das Gehäuse bei einem der Glaszylinder; sie gehen durch ein Loch in dem mit der Vertiefung versehenen Lineal. In die Stifte werden Schraubwindungen eingeschnitten, in welche kleine Zapfen, die mit dem Lineal fest verbunden sind, eingreifen. Dreht man nun an den nach unten überstehenden Teilen der Stifte, so wird man dadurch die mit Ausschnitten versehenen Metallplättchen nach oben und unten bewegen. Denn das dem Metallplättchen benachbarte Ende des Stiftes wird mit einem kleinen Wulst versehen sein, der in eine an der Innenfläche des kleinen Zylinders angebrachte Vertiefung eingreift.“

Heron's Beschreibung der Kanalwaage ist ausführlich und allgemein verständlich. Schöne, der Heron übersetzte, hatte daher keine Schwierigkeiten, die Kanalwaage eindeutig zu rekonstruieren. Bild 1 b zeigt diese Rekonstruktion, während Bild 1 c eine nach Heron gebaute Nivellierlatte darstellt.

Im Anschluß an die zum Nivellieren erforderlichen Geräte beschreibt Heron im VI. Abschnitt der „Dioptra“ ihre Anwendung bei der Ausführung eines Längennivellements. Neben der Kanalwaage kommen dabei zwei Nivellierlatten zum Einsatz. Nach Aufstellung der Kanalwaage visiert der Beobachter durch ihre zwei Schlitzdiopter die Zielscheibe der ersten Nivellierlatte ein. Es erfolgt die Rückwärtsablesung (Abstieg) am seitlich angebrachten Maßstab der Latte. Der Beobachter geht um das Gerät und visiert die Zielscheibe der zweiten Nivellierlatte ein. Er erhält die Vorwärtsablesung (Aufstieg). Die Ablesungen für Ab- und Aufstieg werden auf eine Schreibtafel notiert. Die zweite Latte wird gedreht, die Kanalwaage umgesetzt und der Rückwärtsblick ausgeführt. In dieser Form wird das Nivellement bis zum Endpunkt durchgeführt. Die Differenz der beiden Summen von Ab- und Aufstieg ergibt den Höhenunterschied zwischen dem Anfangs- und Endpunkt des Nivellements. Für den Bau einer Straße oder Wasserleitung sind für deren Ausführung eine Anzahl von Zwischenpunkten erforderlich, die aus in der Achse gesetzten Vermarkungssteinen bestehen. Sie werden in das Nivellement – ggf. als Wechsellpunkte – einbezogen. Nach Auftragen des Längenprofils und Festlegung der neuen Trasse ermittelt Heron die Sollhöhen der Zwischenpunkte. Sie werden an den Vermarkungssteinen festgelegt, „... damit die Arbeiter in keinem Punkt irren können“. Ausgrabungen an Wasserleitungen der Antike bestätigen Heron's Angaben. Heron ist übrigens der einzige Autor der Antike, der die Durchführung eines Längennivellements darstellt. Es wird auch heute noch in der Form ausgeführt, wie es Heron vor 2000 Jahren beschreibt.

In den Abschnitten X, XII und XIII nennt Heron den waagrechten Abstand zweier Punkte „Abstand nach der Setzwaage“. Er belegt damit, daß ihm die Setzwaage bekannt war und zu seiner Zeit benutzt wurde.

In Abschnitt XXXIII übt Heron Kritik an der Groma und gibt darin einen wichtigen Hinweis, wie man hängende Lote in Ruhestellung bringt, wenn ein starker Wind weht.

„Daher versuchen manche in dem Wunsche, diesem Übelstande abzu- helfen, hölzerne Hohlzylinder (wohl mit Wasser oder Öl gefüllt) herzustellen und die Gewichte (Lote) in diese hineinhängen zu lassen, so daß sie nicht vom Winde getroffen werden.“

In Abschnitt XX spricht Heron von einem Meßband, das vorher ausprobiert (geprüft) wurde, und in Abschnitt XXIII von einer Meßkette oder einem geprüften Bande. Beide Aussagen zeigen, daß Heron gewissenhaft arbeitete, und daß er eine Eichung seiner Meßgeräte und Nivellierlatten ausführte.

Die vorhergehend aufgeführten Überlieferungen Heron's enthalten wichtige Hinweise und Angaben für die Rekonstruktion von Nivelliergeräten sowie für die Ausführung eines Nivellements. Sie erhalten jedoch erst ihre volle Bedeutung, wenn sie im Zusammenhang mit weiteren Quellen aus der Antike gewertet werden.

1.2 Chorobat des Vitruv

Heron's einmalige Leistung für die Ingenieurvermessung seiner Zeit sowie seine Bedeutung für deren Entwicklung ist unbestritten. Dieses gilt auch für Vitruv (1. Jh. v. Chr.) mit seinem Beitrag über die Baukunst. Sein Werk „de architectura libri decem“ (Zehn Bücher über Architektur), das er im Ruhestand verfaßte, ist die einzige Schrift, die Architektur und Baukunst der Antike überliefert [4]. Ebenso wie Heron beschreibt er seine Arbeitsmethode (Vorrede 4. Buch):

„Da ich festgestellt habe, daß einzelne Baumeister über das Bauwesen Anweisungen und zusammenhanglose Abhandlungen nur in Anfängen oder losen Bruchstücken hinterlassen haben, hielt ich es für eine würdige und zweckdienliche Aufgabe, das gesamte Wissen eines so weit gespannten Tätigkeitsgebiets zusammenhängend zu ordnen und die kunstgerechten Regeln der Teilgebiete in einzelnen Büchern niederzulegen.“

Das ist Vitruv gut gelungen, denn spätestens seit der Renaissance gelangte sein Werk zu großer Bedeutung und Anerkennung. Jakob Burckhardt, einer der bedeutendsten Kulturhistoriker für die Zeit der Renaissance, macht dies besonders deutlich [5].

„Fortan glaubte man vor allem das Altertum nach seinen eigenen Aussagen richten zu können. – Vitruv nahm in der Baukunst bald eine ähnliche Stelle ein, wie vorher Cicero in der Latinität, und es bildete sich eine höchst eifrige Partei in seinem Namen.“

Baumeister und Architekten waren vom Altertum bis noch ins 19. Jahrhundert hinein für die Planung, Vermessung und Absteckung ihrer Bauwerke zuständig. Daher findet man auch bei Vitruv einige Hinweise, die für Forschungen zu den Nivelliergeräten der Antike wichtige Fakten enthalten. Vitruv beschreibt im 8. Buch die Planung und den Bau von Wasserleitungen sowie die dazu erforderlichen Nivelliergeräte. Für die Nivellierung hält er den Chorobaten – der bisher nur bei Vitruv nachzuweisen ist – für das am genauesten arbeitende Gerät. Die Beschreibung des Chorobaten durch Vitruv ist sehr allgemein gehalten und enthält nur einige Konstruktionsdaten, wie der nachfolgend zitierte Auszug zeigt:

„Die erste Arbeit ist das Nivellieren. Nivelliert aber wird mit dem Diopter oder der Wasserwaage oder dem Chorobat, weil Diopter- und Wasserwaage täuschen. Der Chorobat aber besteht aus einem etwa 20 Fuß langen Richtscheit. Dieses hat an den äußersten Enden ganz gleichmäßig gefertigte Schenkel, die an den Enden (des Richtscheits) nach dem Winkelmaß (im Winkel von 90 Grad) eingefügt sind, und zwischen dem Richtscheit und den Schenkeln durch Einzapfung festgemachte schräge Streben. Diese Streben haben genau lotrecht aufgezeichnete Linien, und jeder einzelnen dieser Linien entsprechend hängen Bleilote von dem Richtscheit herab, die, wenn das Richtscheit aufgestellt ist und alle Bleilote ganz gleichmäßig die eingezeichneten Linien berühren, die waagerechte Lage anzeigen.“

2. Wenn aber Wind störend einwirkt und durch die so hervorgerufenen Bewegungen der Bleilote die Linien keine zuverlässige Anzeige mehr bieten können, dann soll das Richtscheit am obersten Teil eine Rinne von 5 Fuß Länge, einem Zoll Breite und $1\frac{1}{2}$ Zoll Tiefe haben, und dort hinein soll man Wasser gießen. Wenn nun das Wasser in genau gleicher

Höhe die obersten Ränder der Rinne berührt, dann wird man wissen, daß die Länge waagrecht ist.“

Ebenso wie Heron erwähnt Vitruv zwei weitere Nivelliergeräte, wobei mit „Diopter“ ein nach dem Prinzip der Setzwaage arbeitendes Gerät gemeint ist. Die Bezeichnung „Diopter“ belegt, daß dieses Gerät mit einer Zielvorrichtung versehen war. In der Beschreibung des Chorobaten wird diese Zielvorrichtung von Vitruv nicht erwähnt. Sie war für ihn wohl selbstverständlich. Die Aussage Vitruvs, „weil Diopter und Wasserwaage täuschen“, beweist, daß diese Geräte zu seiner Zeit häufig benutzt wurden. Sie ist ein wichtiger Hinweis zu den Nivelliergeräten des Altertums, der in der Forschung bisher weder richtig erkannt noch gewertet wurde.

Von der Renaissance bis heute liegen zahlreiche Übersetzungen der Bücher Vitruvs vor [6]. Vom deutschen Wortlaut her sind sie teilweise sehr unterschiedlich, wie ein Vergleich zeigt. Die Angaben über den Chorobaten stimmen jedoch in allen Übersetzungen im wesentlichen überein. Danach besteht er aus einem etwa 20 Fuß (592 cm) langen Richtscheit, an dessen Enden zwei Schenkel nach dem Winkelmaß (90 Grad) eingefügt sind. Zwei Streben verbinden zur Stabilisierung Schenkel und Richtscheit. Behindert ein zu starker Wind das Einspielen der Lote, dann wird der Chorobat durch Wasser in die Waage gebracht. Dazu dient eine Wasserrinne auf dem Richtscheit von fünf Fuß (148 cm) Länge, einen Zoll (18,5 mm) Breite und eineinhalb Zoll (27,8 mm) Tiefe.

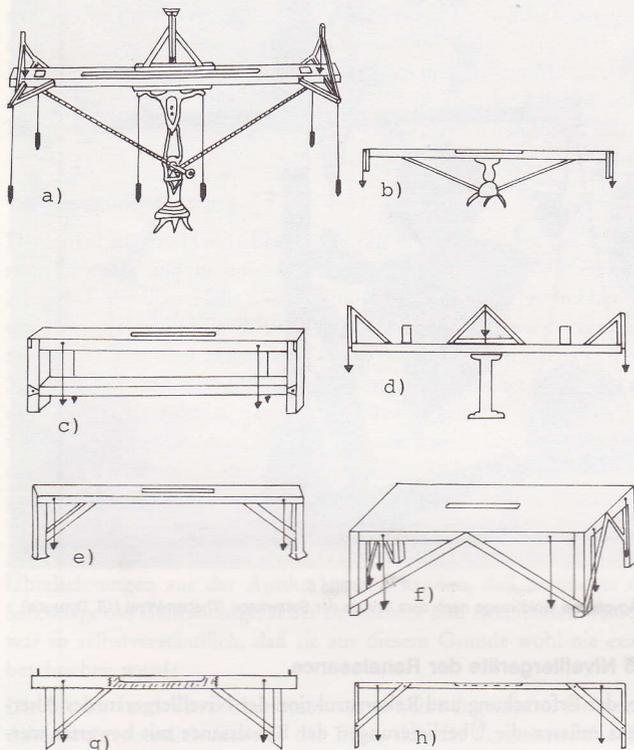


Bild 2

Rekonstruktionsversuche des Chorobaten seit der Renaissance

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| (a) Cesariano 1521 und Rivius 1548 | (e) Poleni und Straticio um 1825 |
| (b) Rusconi 1590 | (f) Neuburger 1921 |
| (c) Barbarus 1567 und Perrault 1673 | (g) Kretschmer 1978 |
| (d) Cardano 1570 | (h) Veenhuis 1984 |

Zusammenfassend kann man feststellen, daß der Chorobat in seiner Konstruktion eine Verbindung von Setz- und Wasserwaage an einer langen Basis (Richtscheit) darstellt. Mit dem langen Richtscheit wollte der Baumeister wahrscheinlich den Aufstellungs- und Zielfehler verringern. Die zu allgemein gehaltene Chorobatbeschreibung durch Vitruv führte dazu, daß seine Übersetzer erhebliche Schwierigkeiten hatten, das Gerät zu rekonstruieren und seine Funktionsweise zu erfassen. Bild 2 zeigt die bedeutendsten Rekonstruktionsversuche des Chorobaten seit der Renaissance.

Das Wort „Chorobat“ stammt aus dem Griechischen und bedeutet in der freien Übersetzung „das über den Boden Dahinschreitende“, ein Begriff, der den Nivelliervorgang beschreibt [7]. Das griechische Wort Chorobat sowie eine Vielzahl von griechischen Schriftstellern, auf die Vitruv im 7. Buch hinweist, belegen das Einbeziehen griechischen Wissens in seine Arbeit. Der Chorobat war nach Vitruv ein Nivelliergerät, das beim Bau der römischen Wasserleitungen eingesetzt wurde. Ob er in der Renaissance und der folgenden Zeit noch zum Nivellieren benutzt wurde, ist bisher nicht bekannt.

Vitruvs Chorobatbeschreibung ist eine der bedeutendsten Quellen zu den Nivelliergeräten der Antike. Sie wird ergänzt durch seine Angaben über die Absteckung von Bauwerken und den dazu erforderlichen Geräten. Im 1. Buch führt Vitruv Richtscheit, Zirkel, Winkelmaß, Schnur und Setzwaage als Geräte der Baumeister auf und erwähnt Richtscheit und Setzwaage als Hilfsmittel, um eine marmorne Scheibe, die bei einer Stadtgründung deren Mitte festlegt, in die Waage zu bringen. Diese Hinweise belegen, daß besonders die Setzwaage zur Zeit Vitruvs von den Baumeistern allgemein benutzt wurde.

1.3 Theodoros von Samos

Theodoros von Samos (6. Jh. v. Chr.) wird als Bildhauer, Toreut und Mechaniker (Herodot I. 51; III. 41; VII. 27) sowie als Erfinder von Drehbank, Schlüssel, Zentralheizung, Winkelmaß, Wasserwaage und Lineal vielfach in der Literatur der Antike benannt [8]. Er baute mit Winkelmaß, Wasserwaage und Lineal drei Vermessungsgeräte, die von der Konstruktion her ihrer Zeit weit voraus waren. Das Winkelmaß kann als Vorläufer der Groma oder Dioptra betrachtet werden. Ob Theodoros die Wasserwaage nach dem Prinzip der Kanalwaage baute, wissen wir nicht, da Heron ihn nicht benennt [9]. Aber vielleicht hat Heron, ebenso wie Vitruv, aus zweiter Hand durch die Schriften von Agesistratos, Archimedes, Philon, Ktesibios und Atheneios von Theodoros gewußt. Abschnitte aus den Schriften von Atheneios und Vitruv lesen sich teilweise wie Übersetzungen. Heron beschreibt im XV. Abschnitt seines Buches „Dioptra“ die Absteckung einer Tunnelachse um einen Berg. Diese Aufgabe entspricht genau der Situation des berühmten Eupalinostunnels auf Samos, der zur Zeit des Theodoros gebaut wurde [10]. Vielleicht hat Heron die Arbeiten von Theodoros und Eupalinos in sein Werk einbezogen.

Das von Theodoros benannte Lineal ist natürlich kein Zeichenlineal im heutigen Sinne. Das lateinische Wort ‚linea‘ (Richtschnur, nach der Schnur ziehen) hat in seiner Aussage eine vielfache Bedeutung im überlieferten Schriftgut der Antike. Das Lineal des Theodoros ist daher aus dem Zusammenhang heraus betrachtet ein Vermessungsgerät. Es kann sich dabei nur um ein Visiergerät oder ein Diopterlineal (Setzwaage) gehandelt haben. Auch Heron nennt seine Kanalwaage ‚Visierlineal‘.

Ein glücklicher Zufall hat uns durch Heron die Vermessungskunst der Antike überliefert. Leider trifft das für Theodoros nicht zu. Was wir bisher über ihn wissen, wurde vorhergehend aufgezeigt und im Zusammenhang mit seiner Zeit dargestellt. Im Fazit bleibt zu sagen, daß Theodoros ein großer Mechaniker und Hersteller von Vermessungsgeräten war, der mangels geringer Überlieferung wenig bekannt wurde.

1.4 Setz- und Wasserwaage

Setz- und Wasserwaage waren zunächst nur ein Gerät der Handwerker für die Herstellung der Horizontalen. Irgendwann in vorgeschichtlicher Zeit erfand man das Lot (Senkrechte) und stellte außerdem fest, daß stehendes Wasser in der Waage liegt (Waagrechte). Man erkannte, daß ein an einem mit Wasser gefüllten Hohlkörper hängendes Lot mit dem stehenden Wasser einen rechten Winkel bildet, den man auf ein Holzdreieck dauerhaft übertragen konnte. Vielleicht wurde so im Experiment des Messens entdeckt, daß sich ein rechter Winkel im Verhältnis seiner Seiten mit 3, 4 und 5 konstruieren läßt.

Die einfache Geometrie lehrte sie, daß im gleichschenkligen Dreieck die Grundlinie durch die Höhe halbiert wird. Überträgt man dieses Drei-

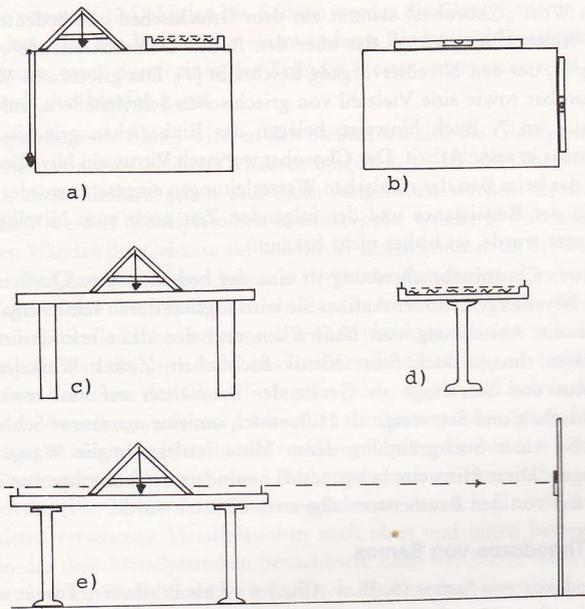


Bild 3

Von der Setz- und Wasserwaage zum Nivelliergerät

- (a) Setz- und Wasserwaage vor 5000 Jahren
- (b) Wasserwaage heute
- (c) Setzwaage mit Setzlatte
- (d) Offene Wasserwaage als Nivelliergerät
- (e) Setzwaage mit Setzlatte auf zwei Stützen als Nivelliergerät

eck auf Holz und ersetzt die Höhe durch ein Lot, das auf einer Kerbmarke in der Mitte der Grundlinie einspielt, dann steht das Holzdreieck in der Waage. Die Bauhandwerker nannten das Dreieck Setzwaage, da sie es zur Feststellung der Waagrechten auf den Baukörper setzten. In Verbindung mit dem Lot (Senkrechte) erfüllte sie 5000 Jahre lang die Funktion der heutigen Wasserwaage (Bild 3). Durch Aufsetzen der Setzwaage auf ein Richtscheit (Setzlatte) überbrückten sie größere Abstände. Vielleicht bestand auch der erste Nivelliervorgang darin, mit Hilfe von in einer langen Tonrohrleitung stehendem Wasser eine Waagrechte zu bilden und von dieser die Höhenlage des Bauwerks abzusetzen. Ein sicheres und genaues Verfahren, das sehr zeit- und materialaufwendig war. Wann der erste Schritt erfolgte, mit Hilfe der Setzwaage ein Nivelliergerät zu bauen, ist nicht nachweisbar. Die Setzwaage als Werkzeug des Bauhandwerkers ist im Original sowie auf Bildern, Grabsteinen und als Grabbeilagen vielfach überliefert (Bild 4). Demgegenüber wird die Setz- und Wasserwaage als Nivelliergerät nur in der Literatur, z. B. bei Theodoros, Heron, Vitruv, Cato und Plinius, erwähnt. Letzterer führt die Setzwaage, wie auch alle anderen Werkzeuge der Bauleute, auf Dädalus und Thalus zurück, die vor dem Trojanischen Krieg lebten [11]. Näher beschrieben werden sie nicht. Heron und Vitruv lassen aus ihren Termini erkennen, daß die Setzwaage ein wichtiges Bauelement der Nivelliergeräte des Altertums war. Wegen seiner einfachen Bauweise war dieses Nivelliergerät von jedem Baumeister leicht herzustellen. Es wurde wohl aus diesem Grunde nie ausführlich beschrieben. Letztlich ist auch der Chorobat Vitruvs eine Setzwaage, die er eben deswegen beschreibt, weil er sie als Sonderkonstruktion verbessert hatte. Die Wasserrinne im Chorobat ist ja nur ein Hilfsmittel, um damit bei starkem Wind arbeiten zu können.

Bilder auf den Wänden ägyptischer Grabkammern sind besonders für das Handwerk und die Technik das älteste Realienbuch der Welt. Eigentlich müßte hier ein Nivelliergerät nachzuweisen sein. Leider war das bisher nicht möglich. Allerdings findet man dort mehrfach Goldwaagen dargestellt, die von ihrer Konstruktion her praktisch ein Nivelliergerät sein könnten (Bild 5). Das Gleichgewicht der Waage wird durch eine hängende Setzwaage hergestellt, indem ein Lot auf eine Marke einspielt. Diese Waagen sind ein wichtiger Hinweis für den Nachbau von Nivelliergeräten auf der Basis der Setzwaage.

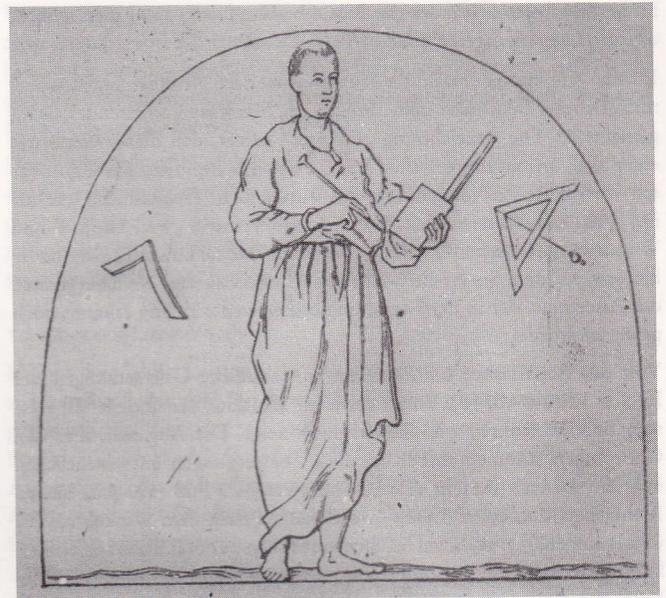


Bild 4

Setzwaage am Grabmal eines Architekten. Wandgemälde an der Via Appia in Rom



Bild 5

Ägyptische Goldwaage nach dem Prinzip der Setzwaage. Theben-West (18. Dynastie)

1.5 Nivelliergeräte der Renaissance

Bei der Erforschung und Rekonstruktion der Nivelliergeräte des Altertums müssen die Überlieferungen der Renaissance mit bewertet werden, denn sie ist die Neuentdeckung und direkte Anknüpfung an die Antike. In der Renaissance wird wieder sichtbar, was 2000 Jahre früher im griechischen Ionien und in Alexandria gedacht und gelehrt wurde, denn es ist nur ein kleiner Schritt von Aristarchos zu Kopernikus, von Hippokrates zu Paracelsus, von Archimedes zu Galilei, von Heron zu Leonardo da Vinci und von Ptolemaios zu Regiomontanus. Ein vergleichendes Studium zeigt, daß zwischen den aus der Antike – zwar nur in ‚Fragmenten‘ – überlieferten Vermessungsgeräten und den aus der Renaissance vorliegenden wesentliche Übereinstimmungen bestehen. Sie lassen sich für Winkelkopf und Kreuzscheibe, für Setz- und Wasserwaage ebenso wie für die Dioptra des Heron, die ja als Vorläufer des Theodoliten gilt, in der Literatur nachweisen. Eine Ausnahme bildet die Groma der römischen Agrimensoren, die weder in der Renaissance noch später in Erscheinung tritt. Auch Herons Kanalwaage findet sich nicht in der Literatur der Renaissance. Erst ab 1700 wird sie in vielen

Vermessungsbüchern dargestellt, die häufig unter dem Titel „Wasserwägen oder Nivellieren“ erschienen sind: z. B. Sturm (1715), Meinig (1724), Leupold (1727), Picard (1749), Le Febvre (1753), Brander (1763), Mueller (1799), Gilly (1801) und Netto (1826) [12].

Um 1846, in einer Zeit, in der sich das Fernrohr bereits durchgesetzt hatte, schreibt Theimert noch ein Lehrbuch unter dem Titel „Praktische Geometrie und Anweisung über den Gebrauch der Kanal- und Setzwaage“ [13]. Meyers Konversationslexikon von 1877 sagt zu dem Begriff ‚Nivellieren‘: „Das einfachste Nivellierinstrument ist die Kanalwaage (1 m lang) . . . Sie wird daher, wie auch die genauer arbeitenden Niveau- und Nivellierdioptra (Setzwaage), immer mehr durch das Nivellierfernrohr verdrängt“.

Vitruvs Chorobat nimmt eine Sonderstellung in der Geschichte der Nivelliergeräte ein, die mit den ersten Vitruvübersetzungen in der Renaissance beginnt. Kein Nivelliergerät der Antike ist in der Literatur so oft behandelt worden wie Vitruvs Chorobat, obwohl dieses Gerät seit der Renaissance in der Praxis nicht mehr benutzt wurde. Im Gegensatz zu Heron (nur ein Urtext) sind von Vitruv aus dem Mittelalter 55 Handschriften bekannt, die jedoch keine Zeichnungen enthalten. Dieser Umstand ist wohl die Ursache dafür, daß die Vitruvforscher und -übersetzer den Chorobaten sehr unterschiedlich und nur zeichnerisch rekonstruierten (Bild 2). Er wurde von ihnen weder nachgebaut noch in der Praxis auf seine Brauchbarkeit getestet [14]. So zeigen die Rekonstruktionen von Cesariano, Rivius, Rusconi, Cardano und Neuburger, daß sie für die Praxis nur schwer oder überhaupt nicht zu benutzen sind. Es ist für den Ingenieur kaum vorstellbar, daß z. B. mit dem von Rivius rekonstruierten Chorobaten – 9 Lote und nur ein Mittelstativ – die Trassierung der römischen Wasserleitung von der Eifel bis nach Köln, dazu noch in stark bewaldetem Gelände, durchzuführen war.

1.6 Zusammenfassung

Der Zufall hat die Handschriften Herons und Vitruvs vor der Zerstörung bewahrt und in unsere Zeit überliefert. Sie sind die einzigen Zeugnisse, die über Meß- und Baukunst der Antike umfassend berichten. Entsprechend ist ihr Stellenwert in der Forschung, wie die umfangreiche Literatur über Heron und Vitruv belegt. Sie überliefern in ihren Schriften mit Kanalwaage und Chorobat zwei Nivelliergeräte, die sie deswegen so ausführlich beschreiben, weil es sich bei diesen Geräten um Sonderkonstruktionen handelt. Herons Kanalwaage ist Bestandteil des Universalgeräts ‚Dioptra‘, während Vitruvs Chorobat ein Nivelliergerät für den Bau der römischen Wasserleitungen darstellt. Heron und Vitruv erwähnen mehrfach die Setzwaage als Nivelliergerät, ohne sie jedoch ausführlich zu beschreiben. Ihre Termini hierzu sowie weitere Überlieferungen aus der Antike lassen erkennen, daß besonders die Setzwaage das Gebrauchsgeschäft der Baumeister und Architekten war. Sie war so selbstverständlich, daß sie aus diesem Grunde wohl nie exakt beschrieben wurde.

Die Heron- und Vitruvübersetzer waren keine Ingenieure. Sie waren daher wahrscheinlich nicht in der Lage, sich die Funktionsweise der Geräte richtig vorzustellen, wie die verschiedensten Rekonstruktionsversuche des Chorobaten deutlich zeigen (Bild 2). Es bleibt fraglich, ob beide Geräte in der Antike wirklich benutzt wurden, denn die Vermessungslehrbücher der Renaissance belegen, daß in dieser Zeit nur Setz- und Wasserwaagen in Gebrauch waren. Auch das als Chorobat bezeichnete Nivelliergerät Leonardo da Vincis (Bild 6) ist von der Konstruktion her ein einfaches Setzwaagengerät.

Eine endgültige Aussage über die Bauausführung und Funktionsweise sowie über die Meßgenauigkeit der Nivelliergeräte des Altertums ist nur möglich, wenn man sie nachbaut und im Experiment erprobt.

2 Nachbau in Auswertung der Bestandsaufnahme

Die Bestandsaufnahme zeigt, daß keine vollständig erhaltenen Nivelliergeräte aus dem Altertum bekannt sind. Sie müssen daher nach den

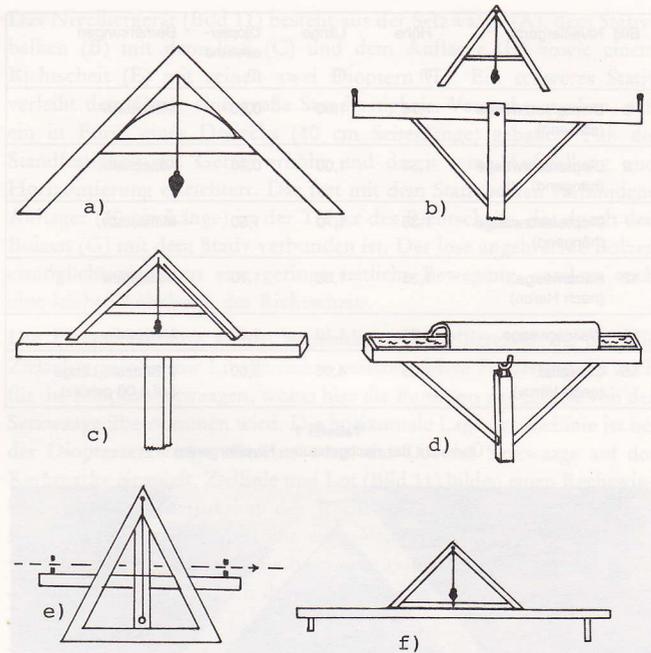


Bild 6
Setz- und Wasserwaagen im Wandel der Zeit
(a) Altägyptische, Museum Kairo
(b) Leonardo da Vinci um 1500
(c) Giovanni da Verona 1522
(d) Cesariano 1521, da Verona 1522 und Rivius 1548
(e) Setzwaage um 1700
(f) Setzwaage mit Setzlatte nach Pertl; gärtnerisches Feldmessen. München 1951

überlieferten Quellen rekonstruiert und nachgebaut werden, wenn man mit ihnen experimentieren und messen will. Hierzu bilden Wasser, Lot und Rechtwinkel ebenso wie die Lehrsätze über die kommunizierenden Röhren und des Pythagoras sowie der Satz, daß im gleichschenkligen Dreieck die Grundlinie durch die Höhe halbiert wird, die wichtigsten Konstruktionshilfen. Die Überlieferung enthält keine Angaben über die Bauhöhe der Nivelliergeräte. Sie ergibt sich jedoch zwangsläufig aus der Körpergröße des Messenden sowie aus der Länge der Geräte. Die Menschen des Mittelmeerraumes waren im Altertum wesentlich kleiner als heute. Die Länge der Geräte spielt insofern eine Rolle, da in der Regel in stark hügeligem Gelände nivelliert wurde. Bei Berücksichtigung beider Punkte (Bild 7) kann man für einen Chorobaten von 6 m Länge nur eine maximale Bauhöhe von 1,25 m ansetzen. Für die Geräte mit einem Mittelstativ und einer Länge bis zu 2 m wurde eine Bauhöhe von 1,35 m ermittelt. Die Länge der Nivelliergeräte dürfte, je nach Aufgabenstellung, Gelände und individueller Auffassung des Erbauers, sehr unterschiedlich gewesen sein. Zwei Daten sind hierzu überliefert: Vitruvs Chorobat mit etwa 6 m und Herons Kanalwaage mit 2 m Länge. Als Baumaterial diente im allgemeinen gut abgelagertes und maßhaltiges Nutzholz. Heron verwendete bei der Kanalwaage neben Holz noch Metall und Glas. Von dem Mechaniker Theodoros muß man annehmen, daß er mit Metall arbeitete. Die Auswertung der Bestandsaufnahme ergab, daß für die Experimente die in Tabelle 1 angeführten Nivelliergeräte nachzubauen waren.

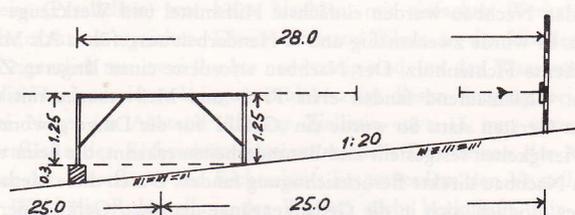


Bild 7
Ermittlung der Bauhöhe des Chorobaten

Bild	Nivelliergerät	Höhe m	Länge m	Diopter- abstand m	Bemerkungen
8	Dioptersetzwaage (stehend)	1,35	1,00	0,90	Mittelstativ
9	Dioptersetzwaage (hängend)	1,35	1,00	0,90	Mittelstativ
	Dioptersetzwaage (hängend)	1,35	1,70	1,50	Mittelstativ
12	Kanalwaage (nach Heron)	1,35	1,80	1,70	Mittelstativ
13	Wasserwaage	1,35	1,10	1,00	Mittelstativ
15	Chorobat (nach Vitruv)	1,25	4,00	3,60	2 Stützen; Länge auf 4,00 gekürzt

Tabelle 1
Übersicht der nachgebauten Nivelliergeräte

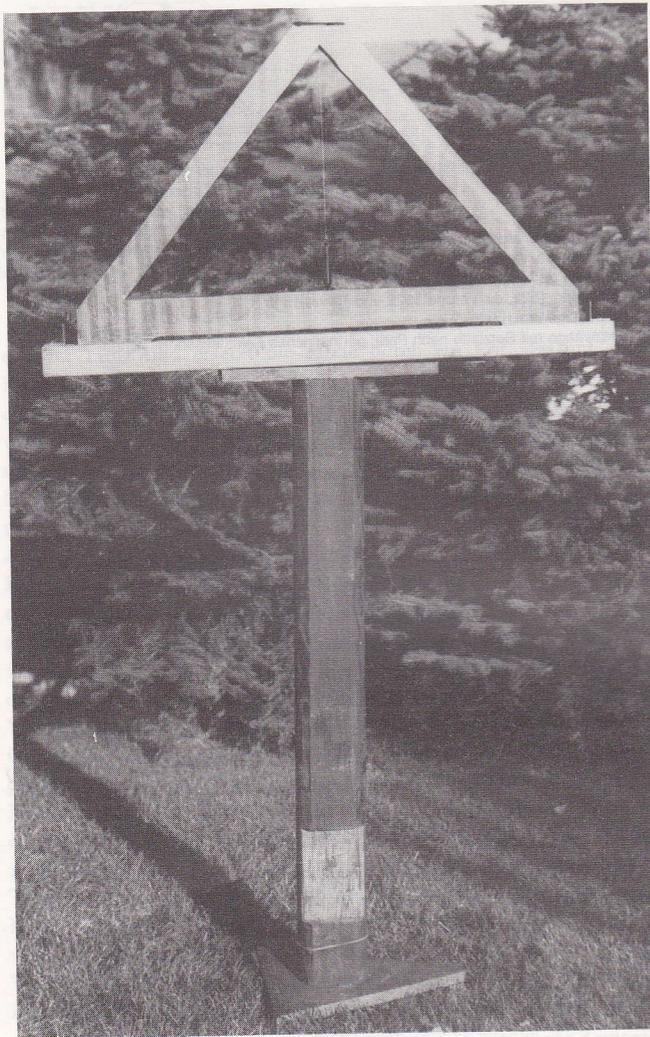


Bild 8
Dioptersetzwaage (stehend)

Für den Nachbau wurden einfachste Hilfsmittel und Werkzeuge benutzt. Er wurde zweckmäßig und in Handarbeit ausgeführt. Als Material diente Fichtenholz. Der Nachbau erforderte einen längeren Zeitraum. Gleichlaufend fanden erste Prüf- und Meßversuche mit den neuen Geräten statt. So wurde ein ‚Gefühl‘ für die Dinge gewonnen, Schwierigkeiten festgestellt und Besonderheiten erkannt, die beim weiteren Nachbau direkte Berücksichtigung fanden. Durch diese Methode war es möglich, sich in die Gedankengänge der alten Gerätebauer zu versetzen und auf Bau- und Konstruktionsprobleme zu stoßen, mit denen auch sie sich auseinandergesetzt haben müssen. Ihr handwerkli-

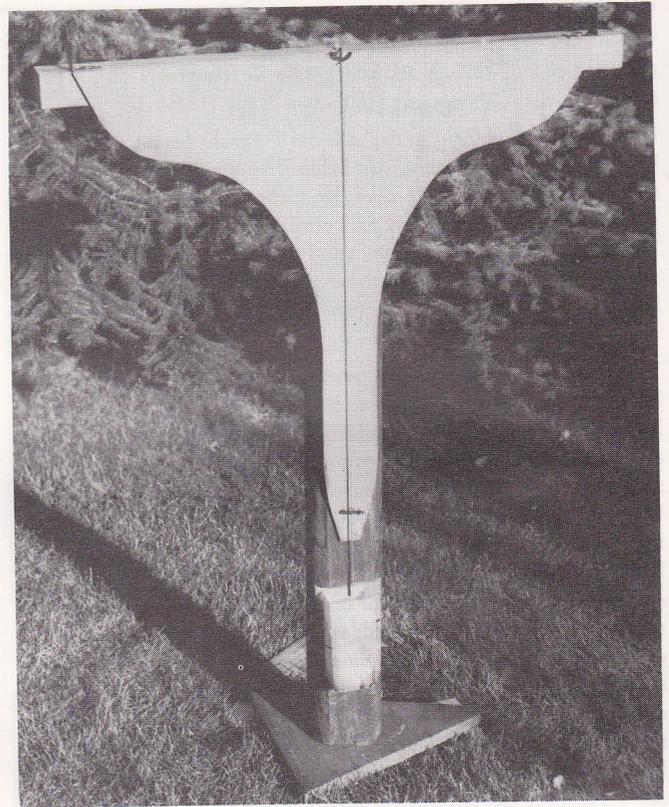


Bild 9
Dioptersetzwaage (hängend)

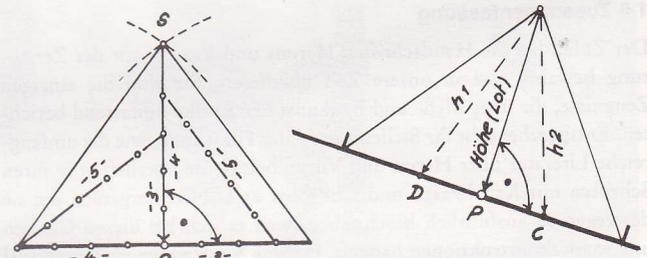


Bild 10
Konstruktion der Setzwaage

ches Geschick beim Bau der Geräte sowie ihre Erfahrung bei deren Einsatz ist heute nicht mehr zu erreichen. Das bedeutet: Ihre Nivelliergeräte waren mit Sicherheit genauer und kunstfertiger als die nachfolgend vorgestellten Nachbauten.

2.1 Setzwaagen mit Diopterzielvorrichtungen

In der Bestandsaufnahme wurde bereits nachgewiesen, daß die Dioptersetzwaagen (Bilder 8 und 9) die am häufigsten benutzten Nivelliergeräte des Altertums waren. Hauptkonstruktionselement dieser Nivelliergeräte war die stehend, hängend oder auch mittig angebrachte Setzwaage. Ihre exakte Konstruktion ist der entscheidende Vorgang für den Bau der Geräte, denn Grundseite und Lot der Setzwaage müssen einen Rechtwinkel bilden. Bild 10 zeigt die Konstruktion einer Setzwaage. Danach kann sie durch Bogenschlag mit Zirkel und Maßstab oder nach dem Satz des Pythagoras konstruiert werden. Beide Verfahren können parallel angewandt werden (Kontrolle). Eine weitere Konstruktionsmöglichkeit bildet die schiefe Ebene. Die Setzwaage wird aufgestellt und das eingespielte Lot auf der Grundseite im Punkt C markiert. Nach Drehung der Setzwaage um 180° wird das eingespielte Lot auf der Grundseite im Punkt D markiert. Die Mitte zwischen den beiden Markierungen bildet im Punkt P den Rechtwinkel zwischen dem Lot

und der Grundseite. Die in den Bildern 8 und 9 dargestellten Setzwaagen wurden mit Hilfe des Bogenschlags sowie einer Kontrolle nach dem Satz des Pythagoras konstruiert.

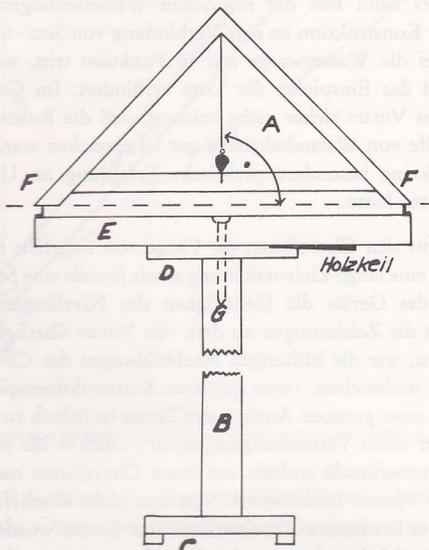


Bild 11
Bauelemente der Dioptersetzwaage



Bild 12
Kanalwaage nach Heron

Das Nivelliergerät (Bild 11) besteht aus der Setzwaage (A), dem Stativbalken (B) mit dem Fuß (C) und dem Auflager (D) sowie einem Richtscheit (E) mit seinen zwei Dioptern (F). Ein schweres Stativ verleiht dem Gerät eine große Standfestigkeit. Versuche ergaben, daß ein in Form eines Dreiecks (40 cm Seitenlänge) gebauter Fuß die Standfestigkeit des Geräts erhöht und damit seine Aufstellung und Horizontierung erleichtert. Das fest mit dem Stativbalken verbundene Auflager (40 cm Länge) ist der Träger des Richtscheits, das durch den Bolzen (G) mit dem Stativ verbunden ist. Der lose angebrachte Bolzen ermöglicht nicht nur eine geringe seitliche Bewegung, sondern auch eine leichte Anhebung des Richtscheits.

Die Hauptforderung an ein neuzeitliches Nivelliergerät ist, daß die Zielachse parallel zur Libellenachse verläuft. Diese Forderung gilt auch für die Dioptersetzwaagen, wobei hier die Funktion der Libelle von der Setzwaage übernommen wird. Die horizontale Lage der Ziellinie ist bei der Dioptersetzwaage erreicht, wenn das Lot der Setzwaage auf der Kerbmarke einspielt. Ziellinie und Lot (Bild 11) bilden einen Rechtwinkel. Bei der Konstruktion des Rechtwinkels wird es immer einen kleinen Fehler geben, der, wie erste Versuche ergaben, mit maximal $\pm 0,5$ mm anzusetzen ist. Er bestimmt zwangsläufig die Genauigkeit der Messung, kann jedoch durch Messung in zwei Lagen weitgehend ausgeschaltet werden.

Das Gerät wird durch Holzkeile am Gerätefuß horizontiert. Ein zwischen Auflager und Richtscheit eingefügter Holzkeil (Bild 11) erleichtert die Horizontierung. Experimente mit stehender Setzwaage zeigen, daß diese schon bei leichtem Wind sehr instabil ist. Eine Ruhestellung des Lotes ist nur schwer oder kaum zu erreichen. Im Gegensatz hierzu sind die Geräte mit einer fest am Richtscheit montierten hängenden Setzwaage (Bild 9) wesentlich leichter zu horizontieren, da das hängende Lot durch das Stativ vor dem Wind geschützt wird. Durch Eintauchen des Lotes in einen am Stativ angebrachten Wasserbehälter, wie bei Heron beschrieben, wird es vor dem Wind geschützt und kommt schneller in Ruhestellung.

2.2 Kanal- und Wasserwaage

Der Nachbau der Kanalwaage bot keine besonderen Schwierigkeiten. Ihre bis ins kleinste Detail gehende Konstruktionsbeschreibung ist durch Heron überliefert. Bild 12 zeigt eine in Anlehnung an Heron gebaute Kanalwaage. Nach Grobhorizontierung des Stativs spielt das Wasser in der kommunizierenden Röhre der Kanalwaage automatisch ein. Die beiden Dioptr werden auf dem Wasserspiegel eingestellt. Das Gerät ist einsatzbereit.

Wesentlich schwieriger war die Rekonstruktion der Wasserwaage. Im Gegensatz zur Kanalwaage liegen für sie weder Daten noch eine Beschreibung aus dem Altertum vor. Erst die Renaissance überliefert einfache Skizzen von Wasserwaagen. Nach Aussagen von Heron und Vitruv hat es sie auf jeden Fall gegeben. Die Wasserrinne, die Vitruv bei seinem Chorobaten beschreibt, ist letztlich auch eine Wasserwaage.

Die Wasserwaage (Bild 13) ist das einfachste Nivelliergerät des Altertums und von der Konstruktion her leicht nachzubauen. Nur die handwerkliche Herstellung der glatten Oberfläche des Richtscheits gestaltet sich schwierig, denn sie muß als Oberkante der Wasserrinne auf ihrer ganzen Länge parallel zur Zielachse laufen, damit das Gerät in der Waage steht. Die Herstellung der glatten Oberfläche des Richtscheits (Parallelität) war beim Nachbau mit einfachen Werkzeugen nicht exakt zu erreichen. Dieser Umstand führte zu der Überlegung, daß eigentlich nur zwei Punkte notwendig sind, um den Wasserspiegel in die Horizontale zu bringen. Bild 14 zeigt diesen Vorgang, bei dem zwei Nägel im Abstand Δh zur Ziellinie etwa 15 mm unter der Oberfläche des Richtscheits justiert werden. Das Setzen der Nägel unter der Oberfläche des Richtscheits hat außerdem den Vorteil, daß der Wind die Ruhestellung des Wassers nicht beeinflusst. Für diese Konstruktionsidee gibt es keinen Beweis, daß sie bereits im Altertum bekannt war. Man kann jedoch davon ausgehen, daß die alten Baumei-



Bild 13
Offene Wasserwaage

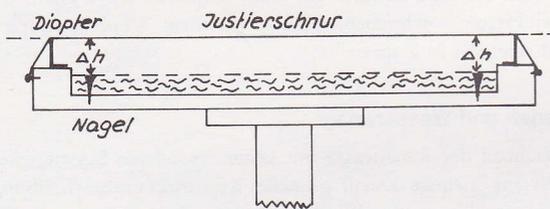


Bild 14
Justierung der Wasserwaage

ster zwangsläufig diese Erfahrung machten. Natürlich waren die Spezialisten des Altertums in der Lage – im Gegensatz zu uns heute –, bei entsprechendem Zeitaufwand mit ihrem Werkzeug eine glatte Oberfläche herzustellen.

2.3 Der Chorobat

Kein Nivelliergerät des Altertums ist seit der Renaissance in der Literatur so häufig behandelt worden wie Vitruvs Chorobat. Die in den Übersetzungen nur skizzenhaft dargestellten Rekonstruktionen des Geräts zeigen, daß die Autoren – wohl weil sie keine Vermessungspraktiker waren – erhebliche Schwierigkeiten hatten, sich das Gerät richtig

vorzustellen und seine Funktionsweise zu erfassen. Der Chorobat wurde bisher weder nachgebaut noch im Experiment erprobt. Nur so ist zu erklären, daß die Diskussion über den Chorobaten bis heute noch nicht beendet ist. Er war nach Aussage von Vitruv ein Nivelliergerät, das besonders beim Bau der römischen Wasserleitungen eingesetzt wurde. Seine Konstruktion ist eine Verbindung von Setz- und Wasserwaage, wobei die Wasserwaage nur in Funktion tritt, wenn ein zu starker Wind das Einspielen der Lote verhindert. Im Gegensatz zu Heron war es Vitruv sicher nicht bekannt, daß die Ruhestellung der Lote mit Hilfe von Wasserbehältern gut zu erreichen war. Das zeigt, daß Vitruv keine besondere praktische Erfahrung im Umgang mit Nivelliergeräten hatte.

Vitruv, der für den Chorobaten die Länge von ungefähr 6 m angibt, wollte durch eine lange Zielvorrichtung sowie jeweils eine Setzwaage an den Enden des Geräts die Genauigkeit des Nivellements steigern. Leider fehlen die Zeichnungen zu dem von Vitruv überlieferten Text. Dieser scheint, wie die bisherigen Nachbildungen des Chorobaten in der Literatur nachweisen, einen gewissen Konstruktionspielraum zuzulassen. Bei einer genauen Analyse des Textes ist jedoch zu erkennen – zumindest für einen Vermessungsingenieur –, daß er die wesentlichen Konstruktionsmerkmale enthält, um einen Chorobaten nachzubauen, der im Sinne Vitruvs funktioniert. Von ihm nicht überlieferte Detailangaben sowie bestimmte Arbeitsweisen des Geräts wurden während des Nachbaus sichtbar, konnten im Experiment untersucht und beim weiteren Bau des Geräts berücksichtigt werden. Versuche machten deutlich, daß Vitruv mit 6 m eine Länge wählte, die sowohl für den Zielvorgang als auch für den Transport des Geräts gerade noch möglich war. Die Höhe des Chorobaten ermittelte sich mit 1,25 m, wie der praktische Versuch in Bild 7 belegt. Die Überprüfung der Standfestigkeit des Geräts ergab, daß die Fußbreite der beiden Stützen mindestens 25 cm betragen muß. Bild 15 zeigt den nachgebauten Chorobaten, der zum Zwecke eines besseren Transports nur eine Länge von 4 m aufweist. Das eigentliche Problem beim Nachbau ist die Konstruktion der Setzwaage an den Enden des Geräts sowie die Erreichung der Parallelität der Wasserrinne zur Ziellinie. Die Konstruktion der Setzwaage kann mit Hilfe eines vorgefertigten rechtwinkligen Dreiecks, das an der Ziellinie angelegt wird, erfolgen. Sie kann auch am Gerät direkt vorgenommen werden, indem man von der Ziellinie aus einen Rechtswinkel (Bild 16) im Verhältnis 3, 4 und 5 absetzt. Beim Bau des Chorobaten ist zu beachten, daß Stütze, Strebe und Richtscheit absolut fest miteinander verbunden sind, damit das hängende Lot (Dreiecksseite AB) bei der Aufstellung des Geräts auf der Marke B einspielen kann.

Im Gegensatz zu den Geräten mit einem Mittelstativ ist die Aufstellung des Chorobaten, bedingt durch seine Überlänge sowie den festen Verbund zwischen Richtscheit und Stützen, wesentlich schwieriger durchzuführen. Im hügeligen Gelände wird zunächst die höherliegende Seite des Chorobaten standsicher aufgestellt. Seine tieferliegende Seite wird durch eine feste Unterlage (Steine usw.) so weit hochgebockt, bis eine Grobhorizontierung erreicht ist (Bild 7). Dieser Vorgang ist nur bis zu einer Höhe von 30 cm möglich, da sonst der Beobachter (Körpergröße) nicht mehr visieren kann. Die Feinhorizontierung wird mit Hilfe von an beiden Stützen untergelegten Holzkeilen durchgeführt. Spielen

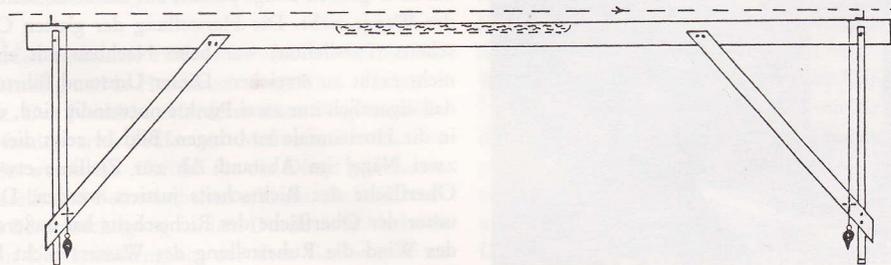


Bild 15
Chorobat nach Vitruv

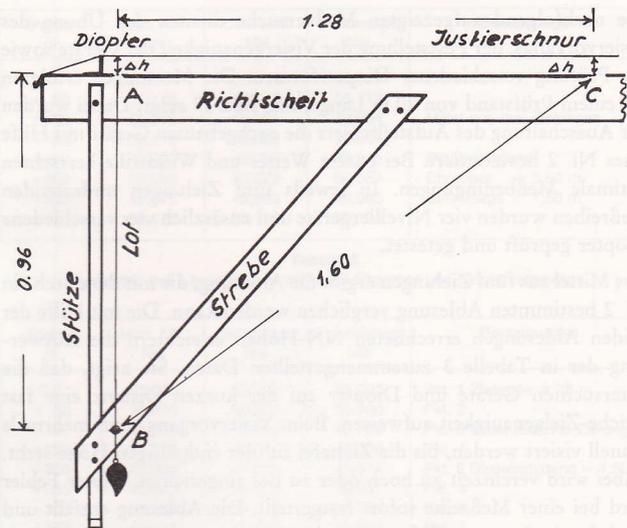


Bild 16

Konstruktion des Rechtwinkels am Chorobaten im Seitenverhältnis 3, 4 und 5

beide Lote auf der Marke ein, dann steht der Chorobat horizontal. Die Aufstellung des Chorobaten ist zeitraubend und schwierig.

Die Wasserinne des Chorobaten, von Vitruv mit einer Länge von 1,48 m angegeben, wurde in der schon bei der Wasserwaage beschriebenen Form konstruiert. Das Anbringen der Wasserinne über die ganze Länge des Geräts würde seine Genauigkeit steigern. Die kurze Wasserinne belegt deutlich, daß Vitruv sie nur als Hilfsmittel betrachtet, um auch bei starkem Wind mit dem Gerät arbeiten zu können.

Der nachgebaute Chorobat wurde am 18. 9. 1985 vom WDR in dem Fernsehfilm „Technologie der alten Römer“ vorgestellt und im praktischen Einsatz an der römischen Eifelwasserleitung gezeigt.

3 Experimente mit nachgebauten Nivelliergeräten

„Alles was meßbar ist messen, und was nicht meßbar ist, meßbar machen“

Nachdem die Nivelliergeräte des Altertums durch Nachbau im Sinne Galileis ‚meßbar gemacht‘ wurden, gilt für die folgenden Experimente der Ausspruch Leonardo da Vincis: „Das Experiment irrt nie, sondern es irren nur eure Urteile.“ Für ihn ist das Experiment in Verbindung mit einer mathematischen Betrachtungsweise der Ausgangspunkt und Prüfstein jeder naturwissenschaftlichen Erkenntnis.

Mit Nivelliergeräten experimentieren bedeutet: sie zunächst zu prüfen und dann mit ihnen zu messen. Wie im Altertum nivelliert wurde, hat Heron überliefert. Aber auch ohne Heron wissen wir, daß ein Nivellement nur in der von ihm beschriebenen Form ausgeführt werden

konnte. Nivellieren beinhaltet die Aufnahme von Längs- und Querprofilen, die Durchführung eines Flächennivellements sowie die Absteckung und Prüfung von Bauhöhen. Diese Grundaufgaben des Nivellierens waren im Altertum im allgemeinen nur in Form eines Längsprofils zu lösen, da die alten Nivelliergeräte nur einen geringen seitlichen Spielraum beim Visiervorgang zulassen. Es ist jedoch vorstellbar, daß einige Sonderkonstruktionen bedeutender Mechaniker (z. B. Heron und Theodoros) eine Drehung des Geräts um seine Achse ermöglichten.

Im Experiment wurden folgende Messungen, die mit einem modernen Nivelliergerät (Ni 2) begleitet wurden, ausgeführt:

- Prüfung der Aufstellgenauigkeit der Nivelliergeräte
- Meßversuche mit verschiedenen Geräten und Dioptern auf einem Prüfstand
- Längennivellement von 420 m Länge mit Chorobat und Dioptersetzwaage
- Längennivellement mit Dioptersetzwaage (Hin- und Rückweg = 200 m Länge)
- Höhenmessung in steilem Gelände.

3.1 Prüfung der Aufstellgenauigkeit der Nivelliergeräte

Die Konstruktion der Setzwaage oder des Rechtwinkels ist selbst bei sorgfältigster Ausführung mit einem kleinen Fehler behaftet. Man horizontalisiert die Nivelliergeräte, indem man das Lot, beim Chorobaten die beiden Lote, auf die Kerb- oder Strichmarke der Geräte mit dem Auge einvisiert. Auch dieser Vorgang kann eine kleine Ungenauigkeit beinhalten. Beide Fehler beeinflussen die Aufstellgenauigkeit der Geräte. Dieser Aufstellfehler wurde in einer Meßreihe ermittelt, bei der die untersuchten Geräte jeweils viermal neu horizontalisiert wurden. Ein auf beiden Dioptern aufgestellter Zollstock diente als Ablesemaßstab. Abgelesen wurde mit einem im Abstand von 5 m aufgestellten Ni 2. Tabelle 2 stellt die Meßergebnisse dar. Sie belegen, daß der Aufstellfehler für alle untersuchten Geräte fast gleich ist. Er beträgt maximal ±0,5 mm. Im Gegensatz zu allen anderen Nivelliergeräten stellt die Kanalwaage die Höhe ihres Wasserspiegels ohne Fehler ein. Untersuchungen ergeben, daß die Horizontalisierung ihrer beiden Diopter auf den Wasserspiegel ebenfalls im Fehlerbereich der untersuchten Geräte liegt. Der Aufstellfehler beeinflusst zwangsläufig die Genauigkeit des Nivellements. Er kann durch Messung in zwei Lagen – Drehung des Geräts um 180° – weitgehend ausgeschaltet werden. Die große Genauigkeit, mit der die Bauwerke des Altertums errichtet wurden, führt zu den Schluß, daß diese Methode den Baumeistern bekannt war. Die Auswirkungen der Aufstellgenauigkeit von ±0,5 mm beträgt bei einem Nivelliervorgang mit einer Zielweite von 30 m für ein Gerät mit 1,0 m Diopterabstand etwa ±15 mm und für den Chorobaten mit 6 m Diopterabstand nur ±2,5 mm. Diese Daten belegen, daß die Länge des Geräts die Genauigkeit des Nivellements beeinflusst.

Aufstellung	Dioptersetzwaage Abstand Diopter 0,90 m			Dioptersetzwaage Abstand Diopter 1,50 m			Bemerkungen
	Ablesung links	Diopter rechts	Diff.	Ablesung links	Diopter rechts	Diff.	
1	31,1	30,7	+0,4	11,8	12,2	-0,4	alle Maße in mm Ablesung am Zollstock
2	5,3	5,6	-0,3	21,2	21,0	+0,2	
3	52,0	52,4	-0,4	36,7	36,4	+0,3	
4	6,4	6,1	+0,3	11,9	12,2	-0,3	
	Chorobat Abstand Diopter 3,60 m			Wasserwaage Abstand Diopter 1,00 m			
1	21,3	21,0	+0,3	5,2	5,0	+0,2	
2	36,7	36,4	+0,3	11,1	10,9	+0,2	
3	15,2	15,0	+0,2	7,9	7,6	+0,3	
4	46,6	47,1	-0,5	12,0	12,1	-0,1	

Tabelle 2
Meßdaten zur Prüfung der Aufstellgenauigkeit

3.2 Meßversuche mit verschiedenen Geräten und Dioptern auf einem Prüfstand

Es wurde vorhergehend der Fehler festgestellt, der bei der Aufstellung der Nivelliergeräte auftritt. Ein weiterer Fehler entsteht bei der Ausführung des Nivellements durch das Einvisieren der Zieltafel. Dieser Vorgang verlangt Meßerfahrung und ein geübtes Auge. Der Nachbau der Nivelliergeräte, bei dem über einen längeren Zeitraum experimentiert wurde, machte schon eine Reihe von Meß- und Visierübungen notwendig. Dabei zeigte sich, daß es auch für einen Vermessungsingenieur nicht leicht ist, sich mit den zunächst ungewohnten Geräten vertraut zu machen. Bei den Versuchen wurde deutlich, daß die Fertigkeit der alten Baumeister im Umgang mit ihren Geräten heute nicht mehr zu erreichen ist. Das heißt: sie konnten genauer nivellieren als wir es mit nachgebauten Geräten können.

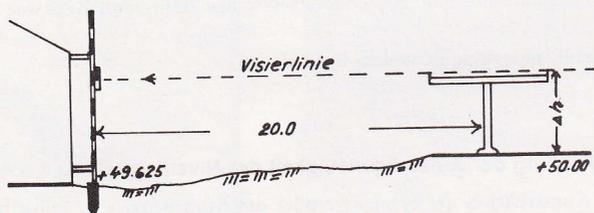


Bild 17
Prüfstandsskizze

Die nachfolgend aufgezeigten Meßversuche dienten der Übung des Visiervorgangs, der Feststellung der Visiergenauigkeit der Geräte sowie der Prüfung verschiedener Diopterformen. Die Messungen erfolgten auf einem Prüfstand von 20 m Länge, den Bild 17 zeigt. Dabei wurden zur Ausschaltung des Aufstellfehlers die nachgebauten Geräte mit Hilfe eines Ni 2 horizontalisiert. Bei gutem Wetter und Windstille herrschten optimale Meßbedingungen. In jeweils fünf Zielungen umfassenden Meßreihen wurden vier Nivelliergeräte und zusätzlich vier verschiedene Diopter geprüft und getestet.

Das Mittel aus fünf Zielungen ergibt die Ablesung, die mit der durch ein Ni 2 bestimmten Ablesung verglichen werden kann. Die mit Hilfe der beiden Ablesungen errechneten NN-Höhen erleichtern die Auswertung der in Tabelle 3 zusammengestellten Daten. Sie zeigt, daß die untersuchten Geräte und Diopter auf der kurzen Distanz eine fast gleiche Zielgenauigkeit aufweisen. Beim Visiervorgang muß mehrmals schnell visiert werden, bis die Zieltafel auf der endgültigen Höhe steht. Dabei wird vereinzelt zu hoch oder zu tief eingerichtet. Dieser Fehler wird bei einer Meßreihe sofort festgestellt. Die Ablesung entfällt und wird durch eine neue Ablesung ersetzt. Die Untersuchung der einzelnen Diopter ergab, daß ein Nutdiopter – Breite 4 mm, Tiefe 15 mm – den Visiervorgang erleichterte, während ein Lochdiopter ihn schwieriger gestaltete.

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß mit allen Geräten eine Zielgenauigkeit erreicht wurde, die im Bereich von maximal ±5 mm liegt. Ein Ergebnis, das durch seine Genauigkeit überrascht und vor der Messung nicht für möglich gehalten wurde.

Niv. Gerät	Diopter	Diopterabstand	Zielungen mit Ablesungen					Mittel 1-5	Sollablesung	Höhe Ziellinie	NN	
			1	2	3	4	5				Ist	Soll
Wasserwaage	a	1,0 m	1,735	1,738	1,739	1,738	1,742	1,738	1,733	1,358	49,620	49,625
Diopter-setzwaage	a	0,90 m	1,741	1,737	1,744	1,738	1,739	1,740	1,743	1,363	49,629	
	a	1,50 m	1,725	1,727	1,730	1,733	1,728	1,729	1,725	1,350	49,621	
	b	1,50 m	1,698	1,690	1,695	1,701	1,694	1,696	1,703	1,328	49,632	
	c	1,50 m	1,723	1,726	1,722	1,723	1,725	1,724	1,725	1,350	49,626	
	d	1,50 m	1,724	1,728	1,726	1,728	1,729	1,727	1,726	1,351	49,624	
Chorobat	a	3,60 m	1,642	1,643	1,641	1,640	1,642	1,642	1,644	1,269	49,627	

Tabelle 3
Daten der Meßversuche auf dem Prüfstand
a = Volldiopter, b = Lochdiopter, c = Kimme mit Korn, d = Nutdiopter

Station	Rückblick		Vorblick		Steigen + Fallen -	Höhe NN	Bemerkungen
	3 Abl.	Mittel	3 Abl.	Mittel			
0,0	1,375 1,381 1,378		1,238 1,237 1,240			50,000	Höhe der Pkt. mod. Niv. 50,148
+ 60	1,261 1,257 1,256	1,258	1,404 1,406 1,410	1,238	+0,140	50,140	
+120	1,382 1,388 1,391		1,277 1,284 1,286	1,407	-0,149	49,991	50,003
+180	1,280 1,286 1,276	1,281	1,424 1,418 1,425	1,282	+0,105	50,096	50,112
+240	1,406 1,402 1,396	1,401	1,273 1,280 1,279	1,422	-0,141	49,955	49,963
+300	1,301 1,297 1,294	1,297	1,408 1,413 1,412	1,277	+0,124	50,079	50,094
+360	1,426 1,435 1,430	1,430	1,282 1,281 1,287	1,411	-0,114	49,965	49,975
+420				1,283	+0,147	50,112	50,126

Tabelle 4
Nivellementsfieldbuch der Chorobatmessung

Station m	Mod. Niv. NN	Chorobat NN	Setzwaage NN	Bemerkungen
0,0	50,000	50,000	50,000	Zielweite = 30 m
+ 60	50,148	50,140	50,118	
+120	50,003	49,991	49,994	Mittel aus drei Zielungen
+180	50,112	50,096	50,097	
+240	49,963	49,955	49,948	Diopterabstand:
+300	50,094	50,079	50,067	Chorobat = 3,60 m
+360	49,975	49,965	49,963	Setzwaage = 1,50 m
+420	50,126	50,112	50,104	

Tabelle 5

Ergebnisse des Längennivellements mit Chorobat und Dioptersetzwaage

Station m	Mod. Niv. NN	Setzwaage NN	mit Fehlervert. NN	Bemerkungen
0,0	50,000	50,000	50,000	Pkt. 1 Zielweite = 25 m
+ 50	50,010	50,003	50,006	Pkt. 2
+100	49,780	49,758	49,764	Pkt. 3 Mittel aus drei Zielungen
+150	49,646	49,621	49,630	Pkt. 4
+200	49,609	49,602	49,614	Pkt. 5 Diopterabstand = 1,50 m
+250	49,646	49,616	49,631	Pkt. 4
+300	49,780	49,744	49,761	Pkt. 3
+350	50,010	49,993	50,010	Pkt. 2
+400	50,000	49,981	50,000	Pkt. 1

Tabelle 6

Ergebnisse des Längennivellements mit der Dioptersetzwaage (Hin- und Rückweg)

3.3 Längennivellements mit Chorobat und Dioptersetzwaage

Die Ergebnisse aus der Prüfung der Aufstell- und Visiergenauigkeit belegen, daß auch für ein längeres Nivellement eine gute Genauigkeit zu erwarten war. Ein Nivellement von 420 m Länge mit Chorobat und Dioptersetzwaage sowie ein Nivellement von 400 m Länge (Hin- und Rückweg 200 m) mit der Dioptersetzwaage sollten die Daten für eine Genauigkeitsuntersuchung liefern. Das Nivellement mit Hin- und Rückweg bot die Möglichkeit, es auf seinen Anfangspunkt durch eine Fehlerverteilung auszugleichen. Beim Nivelliervorgang wurden die Geräte in jeder zweiten Aufstellung um 180° gedreht, um den Aufstellfehler weitgehend auszuschalten. Wie das Nivellementsfeldbuch (Tabelle 4) zeigt, wurden für jeden Meßpunkt drei Zielungen mit den entsprechenden Ablesungen an der Nivellierlatte durchgeführt. Das Mittel aus den drei Ablesungen stellte jeweils den Vor- und Rückblick für die Ausrechnung des Nivellements. Die in Tabelle 5 aufgeführten Daten beweisen, daß mit dem Chorobaten eine größere Genauigkeit als mit der Dioptersetzwaage erreicht wurde, denn der Abschlußfehler beträgt beim Chorobaten - 14 mm und bei der Dioptersetzwaage - 22 mm. Für die Zwischenpunkte weist die Messung mit dem Chorobaten einen maximalen Fehler von -16 mm auf, während er bei der Diopter-

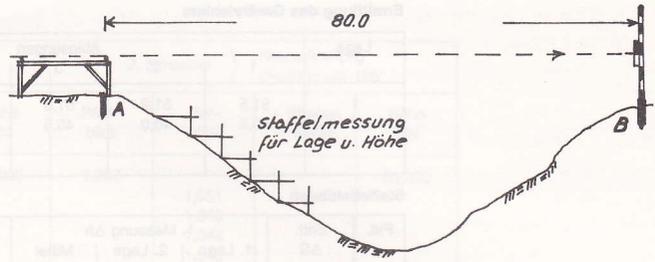


Bild 18

Darstellung der Höhenmessung zur Überbrückung eines Tales

setzwaage - 30 mm beträgt. Tabelle 6 zeigt die Daten des Nivellements (Hin- und Rückweg) mit der Dioptersetzwaage. Sein Abschlußfehler von - 19 mm sowie der maximale Fehler bei den Zwischenpunkten von - 36 mm bestätigt, daß in beiden Nivellements mit der Dioptersetzwaage eine fast gleiche Genauigkeit erreicht wurde. Durch Verteilung des Abschlußfehlers von - 19 mm auf alle Zwischenpunkte wird die Genauigkeit des Nivellements (Hin- und Rückweg) gesteigert. Die Addition der Abschlußfehler (ohne Ausgleich) aus den drei Nivellements beträgt für die nivellierte Strecke von 1 240 m nur - 55 mm. Rechnet man den Abschlußfehler von Chorobat und Dioptersetzwaage, jeweils auf das einzelne Gerät bezogen, für eine Strecke von 1 000 m um, dann ergibt er sich für den Chorobaten mit - 35 mm und für die Dioptersetzwaage mit - 60 mm. Die beiden Daten belegen, daß hierfür wahrscheinlich der Aufstell- und Visierfehler, bedingt durch den unterschiedlichen Diopterabstand der beiden Geräte, die Ursache ist.

3.4 Höhenmessung in steilem Gelände

Überlieferte altrömische Baukunst stellt sich dem Betrachter heute in den oftmals noch gut erhaltenen Wasserleitungsbauten mit ihren zahlreichen Aquäduktbrücken dar. Die große Perfektion, mit der diese Brücken gebaut wurden, stellt die Frage, welche Höhenmessungen für ihre Planung und Bauausführung notwendig waren. Nach Bild 18 überquert die Wasserleitung das Tal mit einer Aquäduktbrücke. Für deren Bauausführung ist eine genaue Aufnahme des Talprofils erforderlich. Es kann wegen der steilen Talhänge nicht in der üblichen Form eines Längennivellements und nicht mit den bisher untersuchten Nivelliergeräten aufgenommen werden. Seine Längen- und Höhenmessung gestaltet sich nach einem besonderen Verfahren, das nur als Staffelmessung möglich ist. Das Spezialgerät hierzu besteht aus Richtscheit, Setzwaage und Stativ. Die Messung wird zur Ausschaltung des Geräte-

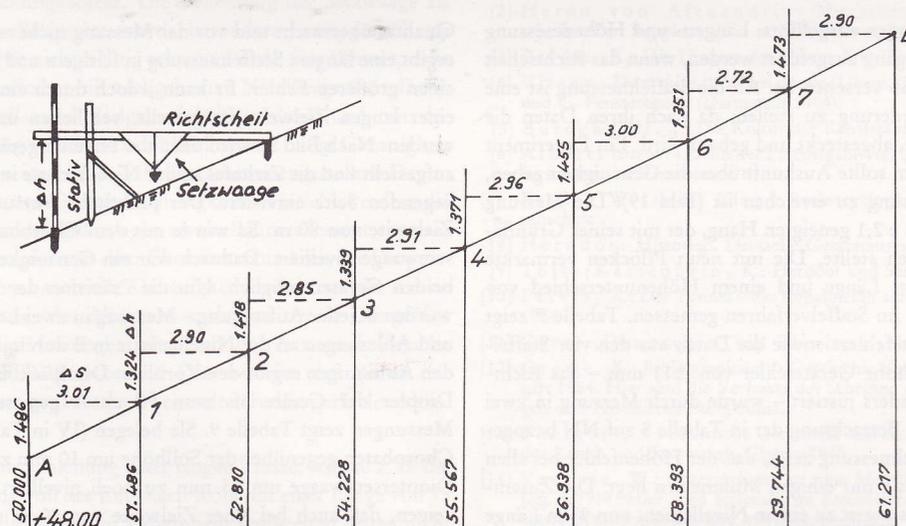


Bild 19

Längennivellement mit einem Staffelmessgerät

Ermittlung des Gerätefehlers

Lage	Ablesungen					Mittel 1-5	Bemerkungen
	1	2	3	4	5		
1	51,5	51,2	51,0	51,8	51,2	51,34 <u>40,44</u>	alle Maße in mm
2	40,5	40,0	40,5	41,0	40,2		
Gerätefehler 10,90							

Staffelfeldbuch

Pkt.	Entf. ΔS	1. Messung Δh			Höhe NN	2. Messung Δh			Höhe NN
		1. Lage	2. Lage	Mittel		1. Lage	2. Lage	Mittel	
A	3,01	1,481	1,491	1,486	50,000	1,481	1,494	1,487	50,000
1	2,90	1,319	1,330	1,324	51,486	1,318	1,331	1,325	51,487
2	2,85	1,413	1,423	1,418	52,810	1,415	1,426	1,420	52,812
3	2,91	1,332	1,346	1,339	54,228	1,330	1,340	1,335	54,232
4	2,96	1,366	1,376	1,371	55,567	1,364	1,373	1,368	55,567
5	3,00	1,450	1,460	1,455	56,938	1,450	1,460	1,455	56,935
6	2,72	1,346	1,356	1,351	58,393	1,344	1,355	1,349	58,390
7	2,90	1,469	1,478	1,473	59,744	1,470	1,480	1,475	59,739
E					61,217				61,214
ΣS	23,25			Soll	61,212			Soll	61,212

Pkt.	Entf. ΔS	3. Messung Δh			Höhe NN	4. Messung Δh			Höhe NN
		1. Lage	2. Lage	Mittel		1. Lage	2. Lage	Mittel	
A	3,01	1,481	1,493	1,487	50,000	1,481	1,491	1,486	50,000
1	2,90	1,320	1,332	1,326	51,487	1,321	1,333	1,327	51,486
2	2,85	1,412	1,423	1,418	52,813	1,413	1,424	1,419	52,813
3	2,91	1,332	1,342	1,337	54,231	1,331	1,342	1,336	54,232
4	2,96	1,363	1,374	1,368	55,568	1,362	1,374	1,368	55,568
5	3,00	1,450	1,459	1,455	56,936	1,450	1,460	1,455	56,936
6	2,72	1,346	1,358	1,352	58,391	1,345	1,357	1,351	58,391
7	2,90	1,469	1,480	1,474	59,743	1,468	1,479	1,473	59,742
E					61,217				61,215
ΣS	23,25			Soll	61,212			Soll	61,212

Tabelle 7
Ermittlung des Staffelgerätefehlers mit dem Feldbuch der vier Staffelmessungen

Pkt.	Entf.	Höhe Niv.	Höhen aus der Staffelmessung				Bemerkungen
			1	2	3	4	
A	0,00	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	Ergebnisse der Einzelmessungen
E	23,25	61,212	61,217	61,214	61,217	61,215	
Δh		11,212	11,217	11,214	11,217	11,215	
		4 × Δh = 44,848			h = 44,863		
Pkt.	4 × Entf.	Höhe 4 × Δh	Höhe Δh der 4 Staffelmess.				Ergebnisse der Messung für 93 m Länge
A	0,00	50,000	50,000				
		<u>+44,848</u>	<u>+44,863</u>				
D	93,00	94,848	94,863	Diff. = 15 mm			

Tabelle 8
Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Staffelmessungen

fehlers jeweils in zwei Lagen ausgeführt. Längen- und Höhenmessung können in einem Arbeitsgang ausgeführt werden, wenn das Richtsicht mit einem Längenmaßstab versehen ist. An die Staffelmessung ist eine große Genauigkeitsanforderung zu stellen, da nach ihren Daten die Aquäduktbrücke geplant, abgesteckt und gebaut wird. Ein Experiment mit nachgebauten Geräten sollte Auskunft über die Genauigkeit geben, die mit einer Staffelmessung zu erreichen ist (Bild 19). Die Messung erfolgte auf einem etwa 1 : 2,1 geneigten Hang, der mit seiner Grünfläche einfache Bedingungen stellte. Die mit neun Pflöcken vermarkte Teststrecke von 23,25 m Länge und einem Höhenunterschied von 11,212 m wurde viermal im Staffelfeldbuch gemessen. Tabelle 7 zeigt die Ermittlung des Gerätefehlers sowie die Daten aus den vier Staffelmessungen. Der relativ hohe Gerätefehler von ±11 mm – das Richtsicht wurde nicht besonders justiert – wurde durch Messung in zwei Lagen ausgeschaltet. Die Betrachtung der in Tabelle 8 auf NN bezogenen Ergebnisse der Staffelmessung zeigt, daß der Höhenfehler bei allen Messungen im Bereich von nur einigen Millimetern liegt. Die Zusammenfassung der vier Messungen zu einem Nivellement von 93 m Länge bei einem Höhenunterschied von 44,848 m zeigt im Ergebnis nur eine Differenz von +15 mm zur Sollhöhe; ein Ergebnis, das durch seine

Qualität überrascht und vor der Messung nicht erwartet wurde. Sicher ergibt eine längere Staffelmessung in felsigem und schwierigem Gelände einen größeren Fehler. Er kann jedoch durch eine Zusatzmessung mit einer langen Zielweite festgestellt, verglichen und auch ausgeglichen werden. Nach Bild 18 wird dazu das Nivelliergerät auf der Talseite in A aufgestellt und die Zieltafel an der Nivellierlatte in B auf der gegenüberliegenden Seite einvisiert. Der praktische Versuch erfolgte mit einer Zielweite von 80 m. Es wurde mit dem Chorobaten und der Diopterstaffelwaage nivelliert. Dadurch war ein Genauigkeitsvergleich zwischen beiden Geräten möglich. Um die Präzision der Messung zu steigern, wurden in jeder Aufstellung – Messung in zwei Lagen – zehn Zielungen und Ablesungen an der Nivellierlatte in B durchgeführt. Das Mittel aus den Ablesungen ergibt den Vorblick. Der Rückblick wurde direkt vom Diopter der Geräte bis zum Pflöck A gemessen. Die Daten aller Messungen zeigt Tabelle 9. Sie belegen (IV in Tabelle 9), daß mit dem Chorobaten gegenüber der Sollhöhe um 10 mm zu niedrig und mit der Diopterstaffelwaage um 15 mm zu hoch nivelliert wurde. Beide Daten zeigen, daß auch bei einer Zielweite von 80 m noch gute Ergebnisse möglich sind. Eine Genauigkeitssteigerung der Messung wird erreicht, wenn von Punkt B aus der vorhergehend dargestellte Meßvorgang

I. Chorobat mit 3,60 m Diopterabstand

Punkt	1. Messung				2. Messung } Neuaufstellung Drehung um 180°			
	Rückblick	Vorblick	+ Steigen - Fallen	Höhe NN	Rückblick	Vorblick	+ Steigen - Fallen	Höhe NN
A	1,268	1,018 1,031 1,040 1,022		50,000	1,287	1,051 1,049 1,048 1,040		50,000
B		1,025 1,023 1,015 1,023 1,022 1,025			B	1,045 1,055 1,045 1,053 1,048 1,048		
Mittel B		1,024	+0,244	50,244	Mittel	1,048	+0,239	50,239

II. Dioptersetzwaage mit 1,50 m Diopterabstand

Punkt	1. Messung				2. Messung } Neuaufstellung Drehung um 180°			
	Rückblick	Vorblick	+ Steigen - Fallen	Höhe NN	Rückblick	Vorblick	+ Steigen - Fallen	Höhe NN
A	1,338	1,083 1,067 1,064 1,068		50,000	1,337	1,079 1,065 1,057 1,058		50,000
B		1,084 1,068 1,074 1,081 1,084 1,069			B	1,067 1,070 1,061 1,068 1,062 1,071		
Mittel B		1,074	+0,264	50,264	Mittel	1,066	+0,271	50,271

III. Modernes Nivellement

IV. Ergebnisse

					Gerät	1. Mess.	2. Mess.	Mittel
A	1,514			50,000	Chorobat	50,244	50,239	50,242
B		1,262	+0,252	50,252	Setzwaage	50,264	50,271	50,267
					Mod. Niv.	50,252	50,252	50,252

Tabelle 9
Messung einer langen Zielweite mit Chorobat und Dioptersetzwaage

nochmals in Richtung auf den Punkt A ausgeführt wird. Das Mittel aus beiden Messungen verkleinert den Fehler.

4 Zusammenfassung und Ausblick

„Nivelliergeräte des Altertums“ behandelt erstmals umfassend und analytisch dieses Forschungsobjekt. Die Bedeutung der Setzwaage als Bauelement alter Nivelliergeräte wurde besonders herausgestellt, da dieser Sachverhalt bisher nicht richtig erkannt wurde. Der Schwerpunkt der Arbeit lag im Experiment mit nachgebauten Nivelliergeräten. Darin wurden deren Aufstell- und Zielgenauigkeit ermittelt und mit der praktischen Ausführung verschiedener Nivellements deren Genauigkeit getestet. Im Ergebnis zeigen die in Tabellen zusammengestellten Daten, daß mit den nachgebauten Geräten Genauigkeiten erreicht werden, die teilweise auch heutigen Anforderungen an ein Baunivellement entsprechen. Sie belegen ferner, daß mit dem Chorobaten und mit der Dioptersetzwaage im Experiment auch eine Genauigkeit erreicht wurde, wie sie bei einzelnen Großbauten des Altertums nachzuweisen ist. Die größte Genauigkeit weisen die Messungen mit dem Chorobaten auf. Ursache hierfür ist sein großer Diopterabstand. Dies beweist, daß Vitruv mit dem Chorobaten das am genauesten arbeitende Nivelliergerät des Altertums überliefert.

Für die Genauigkeitsuntersuchung einer langen Trasse, wie sie z. B. die römische Wasserleitung von der Eifel nach Köln mit einer Länge von 95 km darstellt, reichen die bisher im Experiment ermittelten Daten nicht aus. Sie lassen jedoch vermuten, daß sich der Abschlußfehler für diese Trasse im Bereich von mehreren Metern bewegt. Hier ist noch ein

Problem zu lösen, das für die Erforschung der alten Wasserleitungen von Bedeutung ist. Es könnte mit einem längeren Nivellement gelöst werden, das mit Hilfe des Chorobaten ausgeführt wird.

ANMERKUNGEN und LITERATUR

- [1] Schöne, H.: Herons von Alexandria Vermessungslehre und Dioptra. Leipzig 1903.
- [2] Heron von Alexandria: Mynascodex der griechischen Kriegsschriftsteller. Supplem. grec. n. 607. Louvre, Paris.
- [3] Peters, K.: Die Dioptra des Heron. Der Fluchtstab 3/1960.
- [4] Vitruv: De architectura libri decem. Übers.: E. Stürzenacker (Essen 1938) und C. Fensterbusch (Darmstadt 1964).
- [5] Burckhardt, J.: Die Kultur der Renaissance in Italien. Basel.
- [6] Alberti leitete 1450 mit der Erstausgabe von „De architectura“ die Vitruvforschung der Renaissance ein.
- [7] Pauly, Wissowa (Hrsg.): Realencyclopädie der class. Altertumswissenschaft.
- [8] Herodot: Historien. Deutsche Gesamtausgabe. Stuttgart 1955.
- [9] Tölle-Kastenbein, R.: Herodot und Samos. Bochum 1976.
- [10] Peters, K.: Der Tunnel – das Eupalineion auf der Insel Samos. Dortmund 1984.
- [11] Cato: „De agricultura“ und Plinius: „Naturalis historia“.
- [12] Grewe, K.: Bibliographie zur Geschichte des Vermessungswesens. Stuttgart 1984. Hier sind die Verfasser der Schriften unter dem Titel „Wasserwägen und Nivellieren“ aufgeführt.
- [13] Theinert, A.: Praktische Geometrie und Anweisung über den Gebrauch der Kanal- und Setzwaage. Glogau 1846.
- [14] Veehuis, W.: Untersuchung zu zwei Nivellieren des Altertums. Verm.-Ing. 1/1984. Hier wird erstmalig im Experiment gemessen. Leider nur von einem Standpunkt aus und mit ‚improvisierten Geräten‘.

Anschrift des Verfassers

Dipl.-Ing. Konrad Peters, Wiegandweg 63, 4400 Münster.