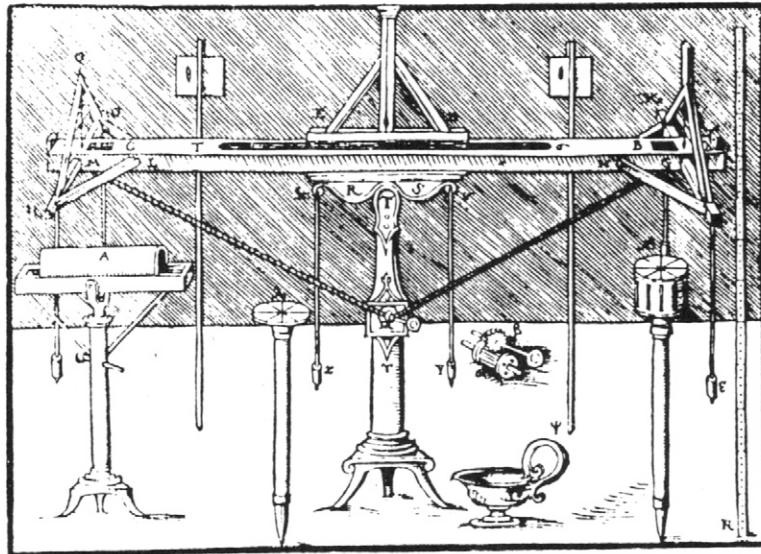


Konrad Peters

Im Lot und in der Waage

Nivelliergeräte des Altertums
im Spiegel experimenteller Archäologie



Dortmund 1994

SCHRIFTENREIHE DES FÖRDERKREISES
VERMESSUNGSTECHNISCHES MUSEUM E.V.

Band 20

Konrad Peters

Im Lot und in der Waage

Nivelliergeräte des Altertums im Spiegel experimenteller Archäologie

Dortmund 1994

SCHRITTFÖHRUNG DES FÖRDERKREISES
VERMESSUNGSTECHNISCHES MUSEUM E.V.

Band 20

Konrad Peters

Im Lot und in der Waage

Nivelliergeräte des Altertums
im Spiegel experimenteller Archäologie

Herausgegeben vom Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e.V.
Postfach 10 12 33, D - 44012 Dortmund

© 1994

Anschrift des Verfassers:
Dipl.-Ing. Konrad Peters, Wiegandweg 63, D - 48167 Münster

Abbildung auf dem Umschlag nach Ravius, Vitruvius Teutsch, Nürnberg 1548

Inhalt

	Seite
Einleitung	1
Teil I: Bestandsaufnahme der Überlieferungen zu den Nivelliergeräten des Altertums	2
Das Lot	2
Lotwaage und Setzwaage	2
Von der Setzwaage zum Nivelliergerät	2
Die Kanalwaage des Heron	5
Der Chorobat des Vitruv	6
Nivelliergeräte der Renaissance	8
Arabische und fernöstliche Nivelliergeräte	9
Teil II: Nachbau der Nivelliergeräte. Auswertung der Bestandsaufnahme	12
Setzwaagen mit Diopterzielvorrichtungen	12
Kanalwaage und Wasserwaage	15
Der Chorobat	15
Teil III: Experimente mit nachgebauten Nivelliergeräten	19
Der Nivelliervorgang nach Heron	19
Prüfung der Aufstellgenauigkeit	20
Versuchsmessungen mit verschiedenen Geräten und Dioptern auf einem Prüfstand	20
Nivellements mit Chorobat und Dioptersetzwaage	23
Höhenmessung in steilem Gelände	23
Schlußbetrachtung	27
Anmerkungen und Literatur	28
Bildnachweis	29

Einleitung

Der Widerstreit ist der Vater aller Dinge
(Heraklit)

Bauwerke müssen "im Lot" (senkrecht) und "in der Waage" (waagrecht) stehen oder wie bei einem Aquädukt ein bestimmtes Gefälle aufweisen. Es ist ein Kriterium für die Qualität der Bauausführung und das Können der Baumeister, wie genau diese Bedingung erfüllt sind. Nachmessungen an Großbauten des Altertums, die über Jahrtausende der Zerstörung durch Mensch und Natur widerstanden, belegen, daß die Erbauer in der Lage waren, exakte Höhenmessungen durchzuführen. Hierfür ist die große Pyramide bei Gizeh ein gutes Beispiel; denn ihr Grundsteinpflaster liegt auf einer Fläche von ca. 230 x 230 m nur um maximal 20 mm aus der Waage [1].

Diese Genauigkeit, die sich auch für andere Bauwerke des Altertums nachweisen läßt, führt zu der Frage: Wie und mit welchen Geräten wurde sie erreicht? Neben Heron und Vitruv, die mit der Kanalwaage und dem Chorobaten zwei Nivelliergeräte beschreiben, geben noch einige archäologische Funde und wenige kurze Literaturangaben Hinweise zu den Nivelliergeräten des Altertums.

Die bisherige Forschung begnügte sich im wesentlichen damit, Heron und Vitruv zu übersetzen und zu interpretieren. Dadurch entstand der Eindruck, daß Herons Kanalwaage und Vitruvs Chorobat die Nivelliere des Altertums waren. Die Bedeutung der Setzwaagen-Nivelliere wurde nicht richtig erkannt, obwohl auch Heron und Vitruv sie besonders erwähnen. Bisherige Veröffentlichungen zeigen, daß dieser Komplex noch nicht in einer Gesamtdarstellung behandelt wurde. Die Autoren beschränkten sich im allgemeinen auf die Beschreibung der beiden Geräte unter dem Aspekt ihres Fachgebiets. Selten gibt es hierzu Analysen. Das Experiment mit nachgebauten Geräten fehlt ganz.

Um diese Forschungslücke zu schließen, werden im ersten Teil dieser Arbeit die Überlieferungen zu den Nivelliergeräten des Altertums aufgezeigt. Der zweite Teil behandelt nach Auswertung der Bestandsaufnahme den Nachbau der Geräte. Der dritte Teil stellt die mit ihnen im Experiment erzielten Ergebnisse dar.

Teil I: Bestandsaufnahmen der Überlieferungen zu den Nivelliergeräten des Altertums

*Wer zu den Quellen will, muß gegen den Strom schwimmen
(Martin Luther)*

Das Lot

Am Anfang der Geschichte der Vermessungsgeräte existiert bereits das Lot. Schon in der Frühzeit, noch vor dem Bau der Pyramiden, erkannten die Menschen, daß eine Schnur, an der ein Stein hängt, eine Senkrechte mit einer Ebene bildet. Mit fortschreitender Technik traten an die Stelle eines Steins "Lote" aus Blei-Lot, Bronze oder Eisen in Form eines Kegels, dessen Spitze nach unten zeigt. Dadurch konnte das Lot auf einen bestimmten Punkt einpendeln. Es diente den Handwerkern als Hilfsmittel, um die Senkrechte von Mauern, Säulen usw. zu bestimmen.

Zahlreiche Funde und Darstellungen zeigen Lote in den unterschiedlichsten Ausführungen und Größen, am häufigsten in Kegelform (Bild 1). Das Lot an einer kurzen Schnur diente zum Einfluchten einer Gerade, zum Abloten bei der Staffelmessung, als Bauteil von Vermessungsgeräten und bei der Groma sogar als Visiervorrichtung (vier hängende Lote).

Lotwaage und Setzwaage

Mit der Lotwaage und der Setzwaage fertigten wahrscheinlich die ägyptischen Baumeister die ersten Meßgeräte. Dabei diente die Lotwaage, bei der ein Lot in oder an einem Brett hängend (parallel zu dessen Außenkante justiert) angebracht ist, zur Herstellung und Prüfung einer kurzen Senkrechten (Bild 2). Die Angabe der Waagerechten erfolgte durch eine mit Wasser gefüllte Rinne. Da diese "offene Wasserwaage" sehr umständlich zu handhaben war, entwickelten die Baumeister die Setzwaage. Vielleicht erkannten sie im Experiment, daß ein an der Wasserrinne hängendes Lot mit stehendem Wasser einen rechten Winkel bildet. Indem sie den Winkel auf ein Holzdreieck übertrugen, stellten sie eine Setzwaage her. Später lehrte die einfache Geometrie, daß im gleichschenkligen Dreieck die Grundlinie durch die Höhe halbiert wird. Wird dieses Dreieck auf Holz übertragen und die Höhe durch ein Lot ersetzt, das auf einer Kerbmarke in der Mitte der Grundlinie einpendelt, dann steht das Holzdreieck in der Waage. Die Bauhandwerker nannten das Dreieck Setzwaage, weil sie es zur Feststellung der Waagerechten auf den Baukörper setzten (Bild 2). In Verbindung mit der Lotwaage erfüllte die Setzwaage 5000 Jahre lang die Funktion der heutigen Wasserwaage. Durch Aufsetzen des Geräts auf ein Richtscheit (Setzlatte) konnten größere Abstände überbrückt werden (vgl. Vitruv, 1. Buch) [9].

Von der Setzwaage zum Nivelliergerät

Möglicherweise bestand der erste Nivelliervorgang darin, daß in einer langen Tonrohrleitung stehendes Wasser eine Waagerechte bildete, und daß von dieser die Höhenlage des Bauwerks abgesetzt wurde - ein sicheres und genaues Verfahren, das aber sehr zeit- und materialaufwendig ist. Wann der erste Schritt getan wurde, um ein Nivelliergerät zu bauen, ist nicht festzustellen. Wahrscheinlich war es eine Setzwaage mit Richtscheit, das auf zwei Stützen aufgesetzt wurde. Damit konnte durch Visieren über das in der Waage liegende Richtscheit eine längere Höhenübertragung durchgeführt werden (Bild 3).

Die Setzwaage als Werkzeug des Bauhandwerkers ist vielfach im Original sowie auf Bildern, Grabsteinen und als Grabbeigaben überliefert (Bild 4). Als Nivelliergeräte werden die Setzwaage und die Wasserwaage jedoch nur in der Literatur erwähnt, z.B. bei Theodoros [2], Cato [3], Plinius [4], Heron [5] und Vitruv [9]. Plinius führt die Setzwaage, wie auch alle anderen Werkzeuge der Bauleute, auf Daedalus und Thalys zurück, die vor dem Trojanischen Krieg lebten. Näher beschrieben werden die Geräte nicht.

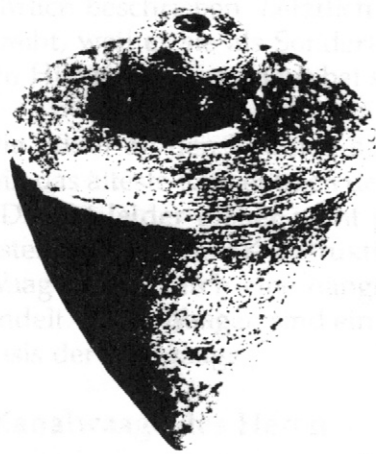


Bild 1
 Lotfund aus Aquincum
 (3. Jh. n.Chr.),
 Museum Budapest

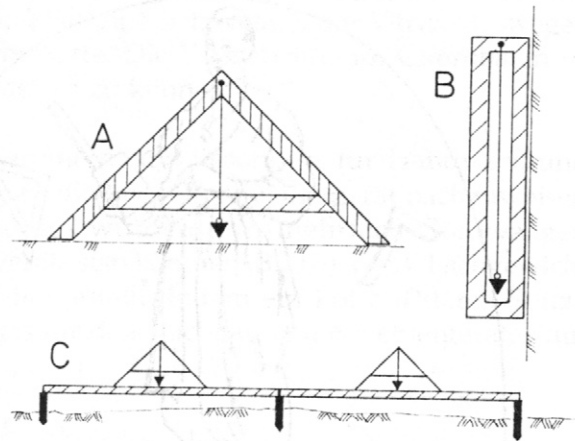


Bild 2
 (A) Setzwaage, (B) Lotwaage,
 (C) Richtscheit mit Setzwaage

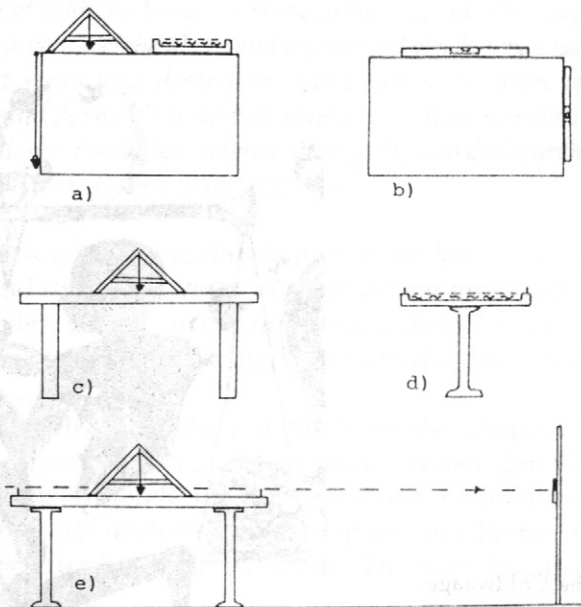


Bild 3
 Von der Setzwaage und Wasserwaage
 zum Nivelliergerät

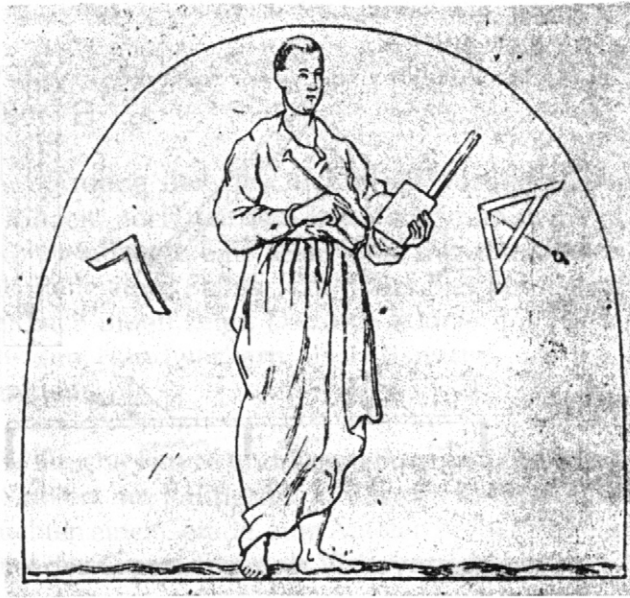


Bild 4
Setzwaage am Grabmal eines Architekten.
Wandgemälde an der Via Appia in Rom.



Bild 5
Ägyptische Goldwaage,
Theben-West, 18. Dynastie

Heron und Vitruv erwähnen in ihren Schriften mehrmals Nivelliergeräte, bei denen die Waagerechte durch die Setzwaage hergestellt wird. Wegen der einfachen Bauweise waren diese Geräte von jedem Baumeister leicht herzustellen. Aus diesem Grunde wurden sie wohl nie ausführlich beschrieben. Letztlich ist auch der Chorobat eine Setzwaage, die Vitruv deswegen beschreibt, weil er sie als Sonderkonstruktion verbesserte. Die Wasserrinne im Chorobaten ist nur ein Hilfsmittel, um damit bei starkem Wind arbeiten zu können.

Die Bilder an den Wänden ägyptischer Grabkammern sind besonders für Handwerk und Technik das älteste Realienbuch der Welt. Eigentlich müßte hier ein Nivelliergerät nachzuweisen sein. Das ist leider bisher nicht gelungen. Allerdings wurden dort mehrfach Goldwaagen dargestellt, die von ihrer Konstruktion her Nivelliergeräte sein könnten (Bild 5). Das Gleichgewicht der Waage wird durch eine hängende Setzwaage hergestellt, indem ein Lot auf deren Spitze einpendelt. Diese Waagen sind ein wichtiger Hinweis für den Nachbau von Nivelliergeräten auf der Basis der Setzwaage.

Die Kanalwaage des Heron

Das Lehrbuch "Dioptra" des Physikers und Mathematikers Heron aus Alexandria (1. Jh. n.Chr.) behandelt umfassend die Ingenieurvermessung der Antike [5]. Es ist die einzige überlieferte Schrift dieses Fachgebietes. Nach Expertenschätzungen gelangten nur etwa 5 Prozent des Schriftgutes der Antike in unsere Zeit, darunter auch der 1903 in der Pariser Nationalbibliothek aufgefundene Urtext der Schriften Herons [6]. Er beschreibt darin ein von ihm gebautes Universalinstrument, mit dem alle Aufgaben der Land- und Ingenieurvermessung gelöst werden können. 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 eines und desselben Instruments, sondern vieler und immer wieder verschiedener bedient, und doch haben sie vermittelt 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 mehrere Vermessungslehrbücher vorlagen, die er kritisch untersuchte und die er teilweise in seine Arbeit einbezog. Das gilt besonders für die Vermessungsgeräte und den damit zu lösenden Aufgaben. Es ist davon auszugehen, daß zu diesen Geräten auch Wasser- und Setzwaagen in unterschiedlichen Ausführungen gehörten.

Hérons Visierlineal (Kanalwaage), das auf das Stativ der Dioptra aufgesetzt wird, ist von der Ausführung und Konstruktion her den Nivelliergeräten seiner Zeit weit voraus. Es arbeitet 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 Konstruktion durchgesetzt zu haben. Die Kanalwaage ist seit dieser Zeit fester Bestandteil der Fachliteratur.

In den Abschnitten III bis V der "Dioptra" gibt Heron eine bis ins kleinste Detail gehende Beschreibung des Universalinstruments (Bild 6) mit der dazu gehörenden Kanalwaage und Nivellierlatte [6] [7]. Herons Beschreibung der Kanalwaage ist ausführlich und verständlich [8]. Schöne, der Heron übersetzte, hatte daher keine Schwierigkeiten, die Kanalwaage zu rekonstruieren [5]. Bild 6 b zeigt diese Rekonstruktion, während Bild 6 c eine nach Heron gebaute Nivellierlatte darstellt.

In den Abschnitten X, XII und XIII nennt Heron den waagerechten Abstand zweier Punkte "Abstand nach der Setzwaage". Er belegt damit, daß die Setzwaage bekannt war und zu seiner Zeit benutzt wurde. In Abschnitt XXXIII übt Heron Kritik an der Groma und gibt darin den wichtigen Hinweis, wie hängende Lote in Ruhestellung zu bringen sind, wenn starker Wind weht.

"Daher versuchen manche in dem Wunsche, diesem Übelstande abzuhelpfen, hölzerne Hohlzylinder (wohl mit Wasser oder Öl gefüllt. Verf.) 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 Band. Diese Aussagen belegen, daß Heron eine Eichung seiner Meßgeräte durchführte.

Die angeführten Überlieferungen enthalten wichtige Hinweise und Angaben für die Rekonstruktion von Nivelliergeräten auf der Basis der Setzwaage. Ihre volle Bedeutung erhalten sie jedoch erst, wenn sie im Zusammenhang mit weiteren Quellen aus der Antike gewertet werden.

Der Chorobat des Vitruv

Heron's einmalige Leistung für die Ingenieurvermessung seiner Zeit sowie 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 in seinem Ruhestand verfaßte, ist die einzige Schrift, die Architektur und Baukunst der Antike umfassend überliefert [9]. In der Vorrede zum 4. Buch beschreibt er seine Arbeitsmethode:

"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 Anerkennung und großer Bedeutung.

Baumeister und Architekten waren vom Altertum bis ins 19. Jahrhundert hinein für die Planung, Vermessung und Absteckung von Bauwerken zuständig. Daher finden sich auch bei Vitruv Hinweise, die für Forschungen zu den Nivelliergeräten wichtige Fakten enthalten. Im 8. Buch beschreibt Vitruv die Planung und den Bau von Wasserleitungen sowie die dazu erforderlichen Nivelliergeräte. Er hält den Chorobaten, der bisher nur bei ihm nachzuweisen ist, für das zuverlässigste Gerät. Die Beschreibung des Chorobaten ist sehr allgemein gehalten und enthält nur einige Konstruktionsdaten [8].

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

Seit der Renaissance bis heute liegen zahlreiche Übersetzungen der Bücher Vitruvs vor [10]. Vom deutschen Wortlaut her sind sie teilweise sehr unterschiedlich, wie ein Vergleich zeigt. Die Daten über den Chorobaten stimmen jedoch in allen Übersetzungen im wesentlichen überein.

Diese Geräte sind in der Abbildung 6 dargestellt. Das Universalgerät Dioptra (a) besteht aus einem horizontalen Kreisbogen, der an einem vertikalen Ständer montiert ist. Die Nivellieraufsätze (b) sind als Kanalwaage (Kanalwaage) und als Nivellierlatte (c) dargestellt. Die Kanalwaage besteht aus einem horizontalen Balken, der an einem vertikalen Ständer montiert ist. Die Nivellierlatte besteht aus einem horizontalen Balken, der an einem vertikalen Ständer montiert ist.

Bild 6

Vermessungsgeräte nach Heron:

a) Universalgerät Dioptra

b) Nivellieraufsatz (Kanalwaage)

c) Nivellierlatte

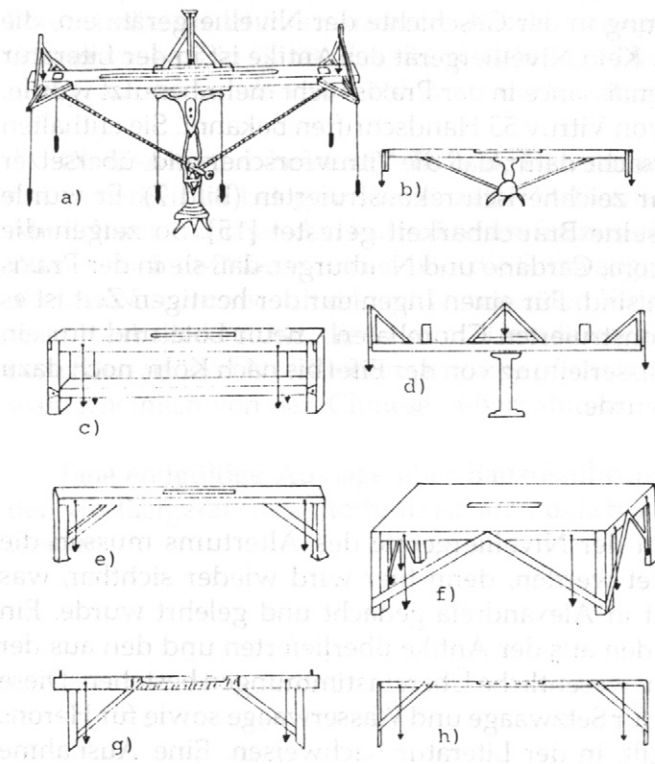
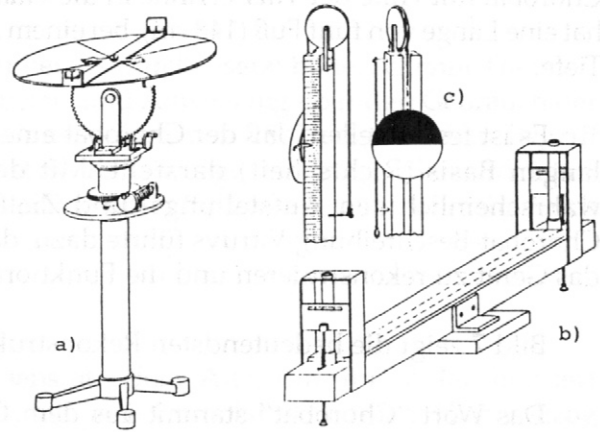


Bild 7

Rekonstruktionsversuche des Chorobaten seit der Renaissance

a) Cesariano (1521), Rivius (1548)

b) Rusconi (1590)

c) Barbarus (1567), Perrault (1673)

d) Cardano (1570)

e) Poleni und Stratico (um 1825)

f) Neuburger (1921)

g) Kretschmer (1978)

h) Veenhuis (1984)

Danach besteht er aus einem etwa 20 Fuß (592 cm) langen Richtscheit, an dessen Enden zwei Schenkel rechtwinklig eingefügt sind. Zur Stabilisierung sind Schenkel und Richtscheit durch zwei Streben verbunden. Behindert ein zu starker Wind das Einpendeln der Lote, dann wird der Chorobat mit Hilfe der Wasserrinne in die Waage gebracht. Die Wasserrinne auf dem Richtscheit hat eine Länge von fünf Fuß (148 cm), bei einem Zoll (18,5 mm) Breite und eineinhalb Zoll (27,8 mm) Tiefe.

Es ist festzustellen, daß der Chorobat eine Verbindung von Setz- und Wasserwaage an einer langen Basis (Richtscheit) darstellt. Mit dem langen Richtscheit wollten die Baumeister wahrscheinlich den Aufstellungs- und Zielfehler verringern. Die sehr allgemein gehaltene Chorobat-Beschreibung Vitruvs führte dazu, daß die Forscher erhebliche Schwierigkeiten hatten, das Gerät zu rekonstruieren und die Funktionsweise zu erfassen.

Bild 7 zeigt die bedeutendsten Rekonstruktionsversuche seit der Renaissance.

Das Wort "Chorobat" stammt aus dem Griechischen und bedeutet in freier Übersetzung "das über den Boden Dahinschreitende"; ein Begriff, der den Nivelliervorgang beschreibt [1]. Nach Vitruv war der Chorobat ein Nivelliergerät, das beim Bau der römischen Wasserleitungen zum Einsatz kam. Ob er in der Renaissance und der folgenden Zeit noch benutzt wurde, ist nicht bekannt.

Vitruvs Chorobat-Beschreibung 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 als Geräte der Baumeister Richtscheit, Zirkel, Winkelmaß, Schnur und Setzwaage auf. Um z.B. eine marmorne Scheibe, die bei einer Stadtgründung die Mitte festlegte, in die Waage zu bringen, erwähnt er Richtscheit und Setzwaage als Hilfsmittel.

Vitruvs Chorobat nimmt eine Sonderstellung in der Geschichte der Nivelliergeräte ein, die mit den ersten Vitruv-Übersetzungen beginnt. Kein Nivelliergerät der Antike ist in der Literatur so oft behandelt worden, obwohl es seit der Renaissance in der Praxis nicht mehr benutzt wurde. Im Gegensatz zu Heron (nur ein Urtext) sind von Vitruv 55 Handschriften bekannt. Sie enthalten jedoch keine Zeichnungen. Dies ist wohl die Ursache dafür, daß die Vitruvforscher und -übersetzer den Chorobaten sehr unterschiedlich und nur zeichnerisch rekonstruierten (Bild 7). Er wurde weder nachgebaut noch in der Praxis auf seine Brauchbarkeit getestet [15]. So zeigen die Rekonstruktionen von Cesariano, Rivius, Rusconi, Cardano und Neuburger, daß sie in der Praxis nur schwer oder überhaupt nicht zu benutzen sind. Für einen Ingenieur der heutigen Zeit ist es kaum vorstellbar, daß mit dem von Rivius konstruierten Chorobaten - neun Lote und nur ein Mittelstativ - die Trassierung der römischen Wasserleitung von der Eifel bis nach Köln, noch dazu in stark bewaldetem Gelände, durchgeführt wurde.

Nivelliergeräte der Renaissance

Bei der Erforschung und Rekonstruktion der Nivelliergeräte des Altertums müssen die Überlieferungen der Renaissance mitbewertet werden; denn hier wird wieder sichtbar, was 2000 Jahre früher im griechischen Ionien und in Alexandria gedacht und gelehrt wurde. Ein vergleichendes Studium zeigt, daß zwischen den aus der Antike überlieferten und den aus der Renaissance vorliegenden Vermessungsgeräten wesentliche Übereinstimmungen bestehen. Diese lassen sich für Winkelkopf und Kreuzscheibe, für Setzwaage und Wasserwaage sowie für Herons Dioptra, die 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 der Fachliteratur oft unter dem Titel "Wasserwägen oder Nivellieren" erwähnt, z.B. Sturm (1715), Meinig (1724), Leupold (1727), Picard (1749), Le Febvre (1753),

Brander (1763), Mueller (1799), Gilly (1801), und Netto (1826) [12]. Bild 9 zeigt die bei Leupold angeführten Setzwaagen (Fig. 3, 4, 5, 7) die wesentliche technische Verbesserungen gegenüber denen des Altertums aufweisen. Das gilt auch für die in den Fig. 1 und 9 dargestellten Setzwaagen-Nivelliere [13].

Um 1846, in einer Zeit, in der sich das Fernrohr bereits durchgesetzt hatte, schreibt Theimert noch ein Lehrbuch mit dem Titel "Praktische Geometrie und Anweisung über den Gebrauch der Kanal- und Setzwaage" [14]. 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 Nivellierdiopter (Setzwaage), immer mehr durch das Nivellierfernrohr verdrängt."

Arabische und fernöstliche Nivelliergeräte

Die Araber gelten als die Bewahrer des Wissens aus dem Altertum. Im 10. Jahrhundert verlagerte sich der Schwerpunkt arabischer Forschung nach Cordoba in Spanien. Hier vollzog sich im 12. und 13. Jahrhundert mit der Übersetzung des arabischen Schriftgutes durch abendländische Gelehrte der Beginn der Frührenaissance. Bedeutende Männer, wie der Mönch Adelard de Bath, Gerhard von Cremona, Wilhelm von Moerbeke und Johann von Sevilla, um nur einige zu nennen, betrachteten es als ihre Lebensaufgabe, das von den Arabern bewahrte Erbe nutzbar zu machen. In Byzanz, der Hauptstadt des oströmischen Reiches, trafen Jahrhunderte lang griechisches, römisches und islamisches Wissen zusammen. Als die Stadt im Jahre 1204 im vierten Kreuzzug erobert wurde, fiel den Kreuzrittern und Venetianern eine gewaltige materielle und wissenschaftliche Beute in die Hände, die durch sie nach Europa und hier besonders nach Italien gelangte.

Im Schriftgut der Araber finden sich beachtliche Angaben über die von ihnen benutzten Nivelliergeräte, deren Konstruktion eindeutig auf Vorläufer aus dem Altertum hinweist (Bild 10). Die Schriften enthalten mehrere Beschreibungen über das Nivellieren mit der Setz- und Wasserwaage. Ein Gerät, das der Kanalwaage Herons entspricht, konnte bei den Arabern nicht nachgewiesen werden, obwohl ihnen die Schriften Herons bekannt waren [16].

Ob im Altertum bereits ein Technik-Transfer aus oder nach Fernost (China) stattfand, ist nicht mit Sicherheit zu belegen. Für einzelne Meßverfahren und Geräte ist jedoch eine verblüffende Ähnlichkeit zwischen den Kulturkreisen festzustellen. Die Chinesen benutzten neben stehendem Wasser auch die Wasserwaage und die Setzwaage. Die Wasserwaage (Bild 11) bestand aus einer offenen Wasserrinne mit drei schwimmenden Visiervorrichtungen. Eine Setzwaage, die die Form eines Winkelhakens hat, diente zum "Gerademachen" (Ebnen) einer Fläche [17]. Auch die Japaner benutzten für den Nivelliervorgang eine offene Wasserwaage mit zwei Dioptern (Bild 12), die sie wahrscheinlich von den Chinesen übernahmen.

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

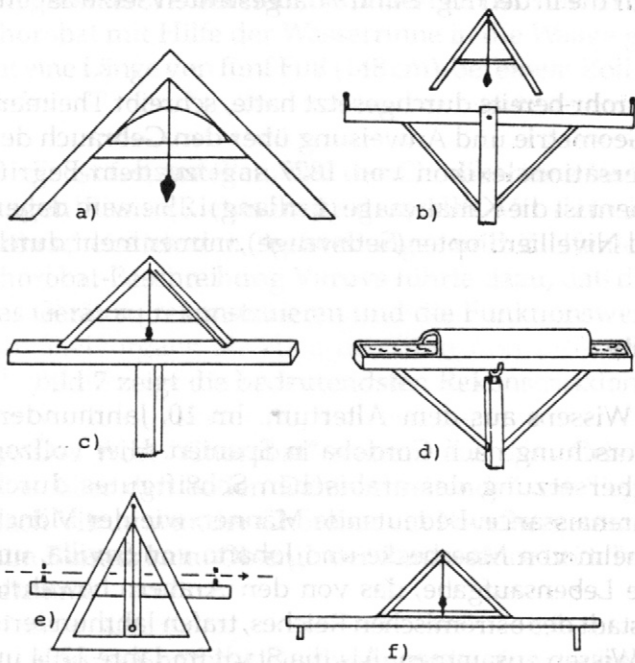


Bild 8

Setzwaagen und Wasserwaagen
im Wandel der Zeit:

- a) Altägyptisch, 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 Perti,
Gärtnerisches Feldmessen, München 1951

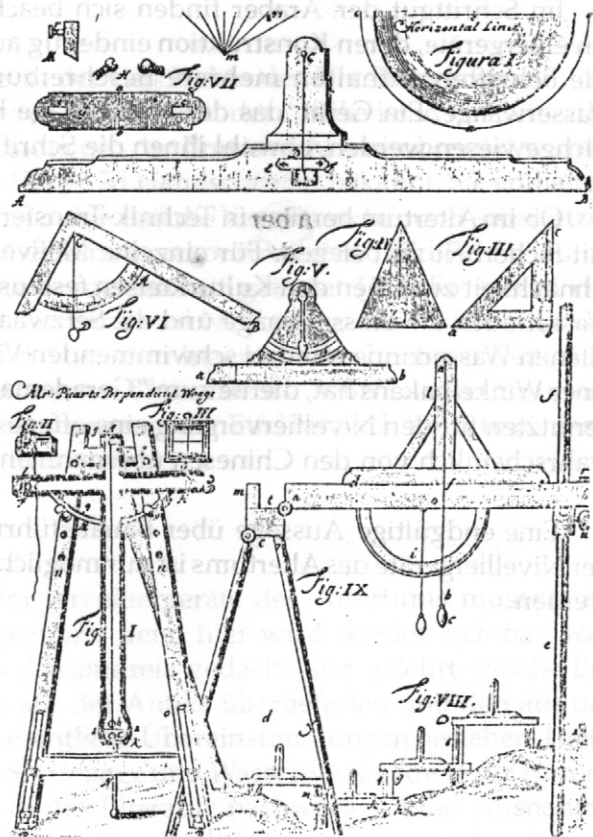


Bild 9
Setzwaagen und Setzwaagen-Nivelliere
nach Leupold (1727)

Bild 10
 Arabisches Nivellier
 (Kupferstich, 16. Jh.)

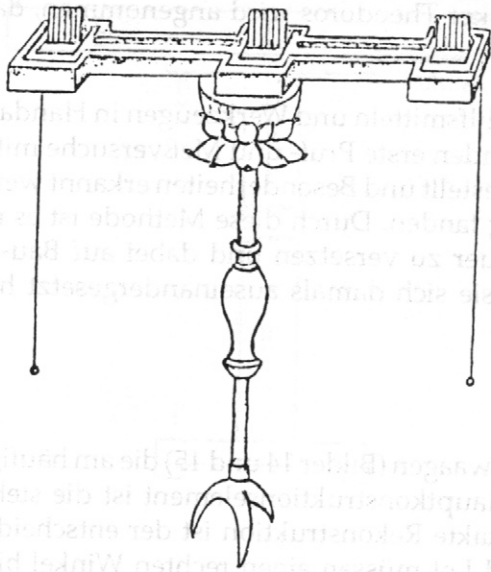


Bild 11
 Chinesisches Wasserwaagen-Nivellier
 mit drei schwimmenden Dioptern (8. Jh.)

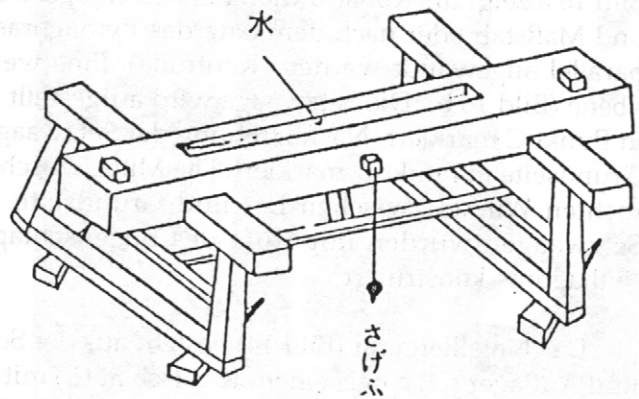


Bild 12
 Japanisches Wasserwaagen-Nivellier
 (Edo-Periode, 17. Jh.)

Teil II: Nachbau der Nivelliergeräte. Auswertung der Bestandsaufnahme

*Alles was meßbar ist, messen,
und was nicht meßbar ist, meßbar machen.*
(Galilei)

Die Bestandsaufnahme zeigt, daß keine vollständig erhaltenen Nivelliergeräte aus dem Altertum bekannt sind. Sie müssen nach den überlieferten Quellen rekonstruiert und nachgebaut werden, wenn mit ihnen im Experiment gemessen werden soll. Hierzu geben Wasserspiegel, Lot und Rechter Winkel, die Lehrsätze über die kommunizierenden Röhren und der Satz des Pythagoras sowie der Lehrsatz, daß im gleichschenkligen Dreieck die Grundlinie durch die Höhe halbiert wird, die wichtigsten Konstruktionshilfen. Die Überlieferungen enthalten keine Angaben über die Bauhöhe der Nivelliergeräte. Sie ergibt sich jedoch aus der Körpergröße des Messenden und aus der Länge der Geräte. Dies spielt insofern eine Rolle, als in der Regel in stark hügeligem Gelände nivelliert wurde. Bei Berücksichtigung beider Voraussetzungen (Bild 13) kann für einen Chorobaten von 6 m Länge eine maximale Bauhöhe von 1,25 m angenommen werden. Für 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 auch Metall und Glas. Von dem Mechaniker Theodoros wird angenommen, daß er mit Metall arbeitete.

Der Verfasser führte den Nachbau mit einfachen Hilfsmitteln und Werkzeugen in Handarbeit aus; als Material diente Fichtenholz. Gleichlaufend fanden erste Prüf- und Meßversuche mit den neuen Geräten statt. So konnten Schwierigkeiten festgestellt und Besonderheiten erkannt werden, die beim weiteren Nachbau direkte Berücksichtigung fanden. Durch diese Methode ist es möglich, sich in die Gedankengänge der alten Gerätebauer zu versetzen und dabei auf Bau- und Konstruktionsprobleme zu stoßen, mit denen auch sie sich damals auseinandergesetzt haben müssen.

Setzwaagen mit Diopterzielvorrichtungen

Es konnte nachgewiesen werden, daß Diopter-Setzwaagen (Bilder 14 und 15) die am häufigsten benutzten Nivelliergeräte des Altertums sind [18]. Hauptkonstruktionselement ist die stehend, hängend oder mittig angebrachte Setzwaage. Ihre exakte Rekonstruktion ist der entscheidende Vorgang beim Bau der Geräte; denn Grundseite und Lot müssen einen rechten Winkel bilden. Bild 16 a zeigt die Konstruktion der Setzwaage. Demnach 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 ist die schiefe Ebene (Bild 16 b). Die Setzwaage wird aufgestellt und das eingependelte Lot auf der Grundseite in Punkt C markiert. Nach Drehung der Setzwaage um 180° wird das eingependelte Lot auf der Grundseite in Punkt D markiert. Die Mitte zwischen beiden Markierungen bildet in Punkt P den rechten Winkel zwischen Lot und Grundseite. Die in den Bildern 14 und 15 dargestellten Setzwaagen wurden mit Hilfe des Bogenschlags sowie einer Kontrolle nach dem Satz des Pythagoras konstruiert.

Das Nivelliergerät (Bild 14) besteht aus der Setzwaage (A), dem Stativbalken (B) mit Fuß (C) und Auflager (D) sowie einem Richtscheit (E) mit zwei Dioptern (F). Ein schweres Stativ verleiht dem Gerät Standfestigkeit. Versuche ergaben, daß der in Form eines Dreiecks (40 cm Seitenlänge) gebaute Fuß die Standfestigkeit des Geräts erhöht und damit die Aufstellung und Horizontierung erleichtert. Das am Stativbalken befestigte Auflager (40 cm Länge) trägt das Richtscheit. Dieses

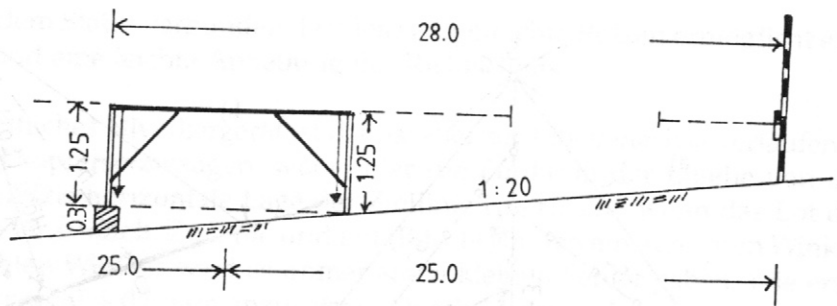


Bild 13

Ermittlung der Bauhöhe des Chorobaten

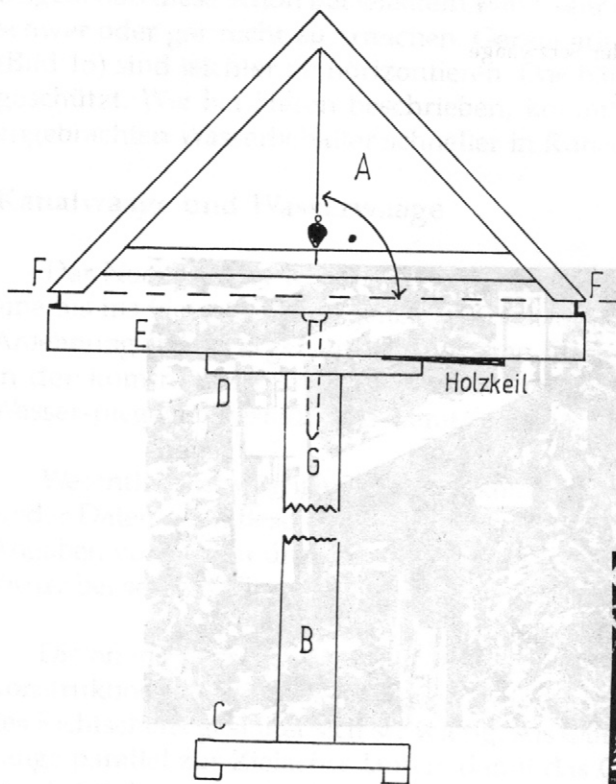


Bild 14

Bauelemente der Dioptersetzwaage

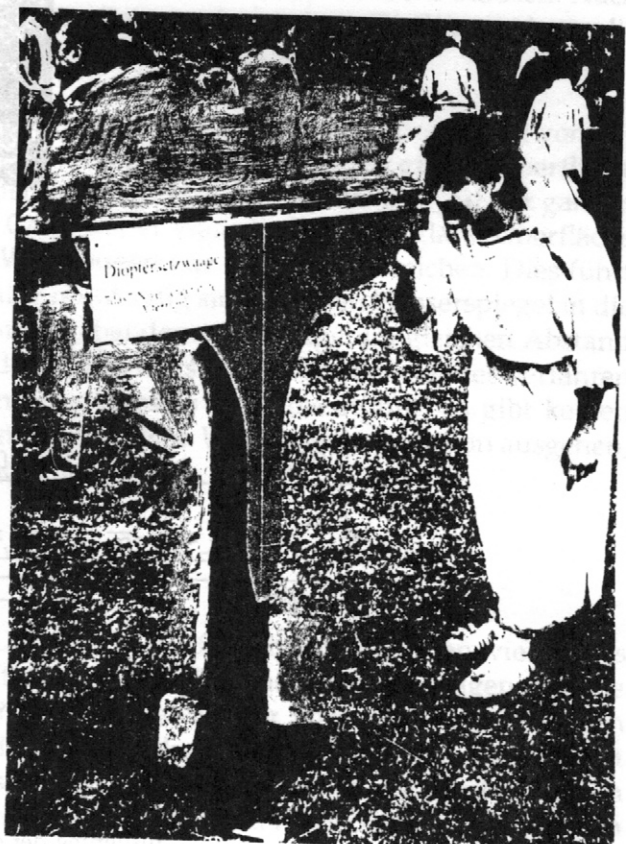


Bild 15

Meßvorgang mit der Dioptersetzwaage

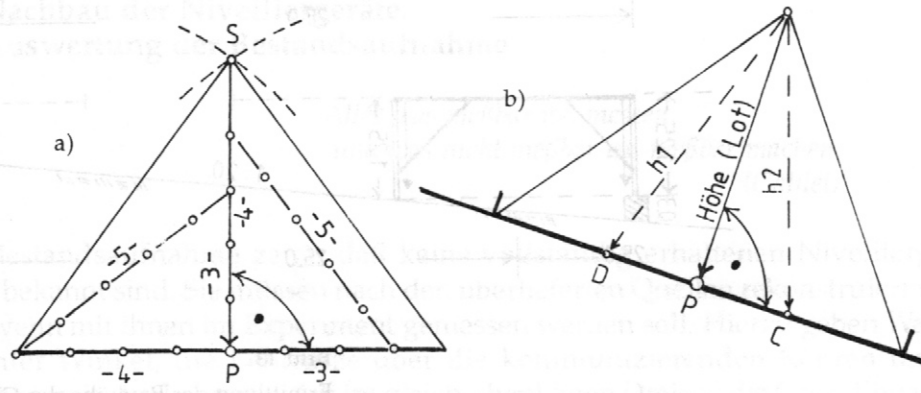


Bild 16
Konstruktion der Setzwaage

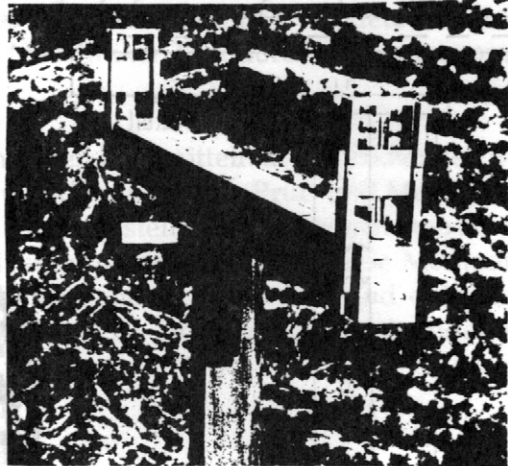


Bild 17
Kanalwaage nach Heron

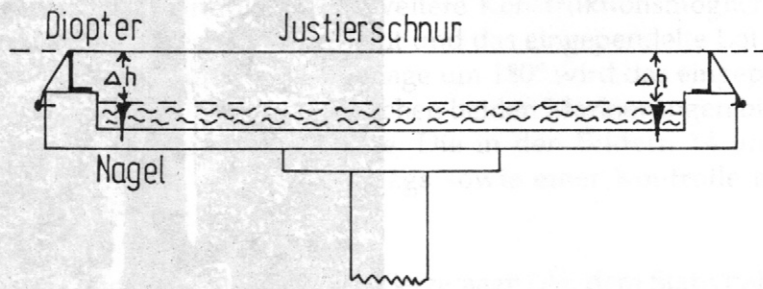


Bild 18
Justierung der offenen Wasserwaage

ist durch den Bolzen (G) mit dem Stativ verbunden. Der lose angebrachte Bolzen ermöglicht eine geringe seitliche Bewegung und eine leichte Anhebung des Richtscheits.

Hauptforderung an ein neuzeitliches Nivelliergerät ist die parallel zur Libellenachse verlaufende Zielachse. Die gilt auch für Dioptersetzwaagen, wobei hier die Funktion der Libelle von der Setzwaage übernommen wird. Die horizontale Lage der Ziellinie ist erreicht, wenn das Lot der Setzwaage auf der Kerbmarke einpendelt. Ziellinie und Lot (Bild 14) bilden einen rechten Winkel. Bei der Konstruktion des rechten Winkels wird es immer einen kleinen Fehler geben. Wie erste Versuche zeigen, ist er mit maximal $\pm 0,5$ mm anzusetzen. Durch Messung in zwei Lagen kann der Fehler jedoch ausgeschaltet werden.

Das Gerät wird durch Holzkeile am Fuß horizontiert. Ein zwischen Auflager und Richtscheit eingefügter Keil (Bild 14) erleichtert die Horizontierung. Experimente mit stehender Setzwaage zeigen, daß diese schon bei leichtem Wind sehr instabil wird. Eine Ruhestellung des Lots ist nur schwer oder gar nicht zu erreichen. Geräte mit einer fest am Richtscheit montierten Setzwaage (Bild 15) sind leichter zu horizontieren. Das hängende Lot wird hier durch das Stativ vor Wind geschützt. Wie bei Heron beschrieben, kommt das Lot durch Eintauchen in einen am Stativ angebrachten Wasserbehälter schneller in Ruhestellung.

Kanalwaage und Wasserwaage

Der Nachbau der Kanalwaage machte keine besonderen Schwierigkeiten. Durch Heron ist eine bis ins kleinste Detail gehende Konstruktionsbeschreibung überliefert. Bild 17 zeigt die in Anlehnung an Heron gebaute Kanalwaage. Nach Grobhorizontierung des Stativs spielt das Wasser in der kommunizierenden Röhre automatisch ein. Die beiden Diopter werden auf dem Wasserspiegel eingestellt. Das Gerät ist einsatzbereit.

Wesentlich schwieriger ist die Rekonstruktion der Wasserwaage. Aus dem Altertum liegen weder Daten noch Beschreibungen vor. Erst die Renaissance überliefert einfache Skizzen. Nach Angaben von Heron und Vitruv muß es sie auf jeden Fall gegeben haben. Die Wasserrinne, die Vitruv bei seinem Chorobaten beschreibt, ist letztlich auch eine Wasserwaage.

Die offene Wasserwaage (Bild 18) 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. Als Oberkante der Wasserrinne muß sie auf der ganzen Länge parallel zur Zielachse laufen, damit das Gerät in der Waage steht. Eine glatte Oberfläche des Richtscheits (Parallelität) ist mit einfachen Werkzeugen nur schwer zu erreichen. Dies führt zu der Überlegung, daß eigentlich nur zwei Punkte notwendig sind, um den Wasserspiegel in die Horizontale zu bringen. Bild 18 zeigt diesen Vorgang, bei dem zwei Nägel im gleichen Abstand zur Ziellinie etwa 15 mm unter der Oberfläche des Richtscheits justiert werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß der Wind die Ruhestellung des Wassers nicht beeinflusst. Es gibt keinen Beweis, daß diese Konstruktionsidee im Altertum bekannt war. Wir können nur davon ausgehen, daß die alten Baumeister diese Erfahrung gemacht haben.

Der Chorobat

Kein Nivelliergerät des Altertums ist in der Literatur so häufig behandelt worden wie Vitruvs Chorobat. Die in den Übersetzungen skizzenhaft dargestellten Rekonstruktionen zeigen, daß die Autoren erhebliche Schwierigkeiten hatten, sich das Gerät richtig vorzustellen und dessen Funktionsweise zu erfassen. Der Chorobat wurde bisher weder nachgebaut noch im Experiment erprobt. Nur so ist zu erklären, daß die Diskussion darüber bis heute andauert. Nach Angaben Vitruvs ist der Chorobat ein Nivelliergerät, das besonders beim Bau der römischen Wasserleitungen zum Einsatz kam. Die Konstruktion ist eine Verbindung von Setzwaage und Wasserwaage, wobei

die Wasserwaage nur in Funktion tritt, wenn zu starker Wind das Einpendeln der Lote verhindert. Im Gegensatz zu Heron war es Vitruv vielleicht nicht bekannt, daß die Ruhestellung der Lote durch Wasserbehälter gut zu erreichen ist.

Vitruv wollte die Genauigkeit des Nivellements durch eine lange Zielvorrichtung und durch Setzwaagen an den Enden des Geräts steigern. Leider fehlen die Zeichnungen zu dem von Vitruv überlieferten Text. Dieser scheint, wie die bisherigen Nachbildungen belegen, einen gewissen Konstruktionspielraum zuzulassen. Bei der genauen Analyse des Textes ist jedoch zu erkennen, daß er wesentliche Konstruktionsmerkmale zum Bau eines Chorobaten enthält, der im Sinne Vitruvs funktioniert. Nicht überlieferte Detailangaben sowie bestimmte Arbeitsweisen des Geräts wurden während des Nachbaus sichtbar, im Experiment untersucht und beim Weiterbau berücksichtigt. Versuche machten deutlich, daß Vitruv mit 6 m eine Länge wählte, die sowohl den Zielvorgang als auch den Transport des Geräts gerade noch ermöglichte. Die Höhe des Chorobaten ergab sich mit 1,25 m, wie der praktische Versuch (Bild 13) belegt. Die Überprüfung der Standfestigkeit ergab, daß die Fußbreite der beiden Stützen mindestens 25 cm betragen haben muß.

Die Bilder 19 und 20 zeigen den nachgebauten Chorobaten. Zum besseren Transport wurde eine Länge von nur 4 m gewählt. Das eigentliche Problem beim Nachbau ist die Konstruktion der Setzwaage an den Enden des Geräts sowie das Erreichen 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 von der Ziellinie aus ein rechter Winkel (Bild 21) im Verhältnis 3:4:5 abgesetzt wird. Es ist zu beachten, daß Stütze, Strebe und Richtscheit fest miteinander verbunden sind, damit das hängende Lot (Dreiecksseite AB) bei der Aufstellung des Geräts auf der Marke B einpendeln kann.

Im Gegensatz zu den Geräten mit einem Mittelstativ ist die Aufstellung des Chorobaten, bedingt durch die Überlänge und den festen Verbund zwischen Richtscheit und Stützen, wesentlich schwieriger durchzuführen. Im hügeligen Gelände wird zunächst die höherliegende Seite des Chorobaten standsicher aufgestellt. Die tieferliegende Seite wird durch eine feste Unterlage (Steine, usw.) so weit hochgebockt, bis eine Grobhorizontierung erreicht ist (Bild 13). 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. Pendeln beide Lote auf der Marke ein, steht der Chorobate horizontal (Bild 22).

Die von Vitruv mit einer Länge von 1,48 m angegebene Wasserrinne wurde in der beschriebenen Form konstruiert. Eine Rinne über die ganze Länge des Geräts würde die Genauigkeit steigern. Die kurze Wasserrinne legt die Vermutung nahe, daß Vitruv sie nur als Hilfsmittel betrachtete, um auch bei starkem Wind arbeiten zu können.

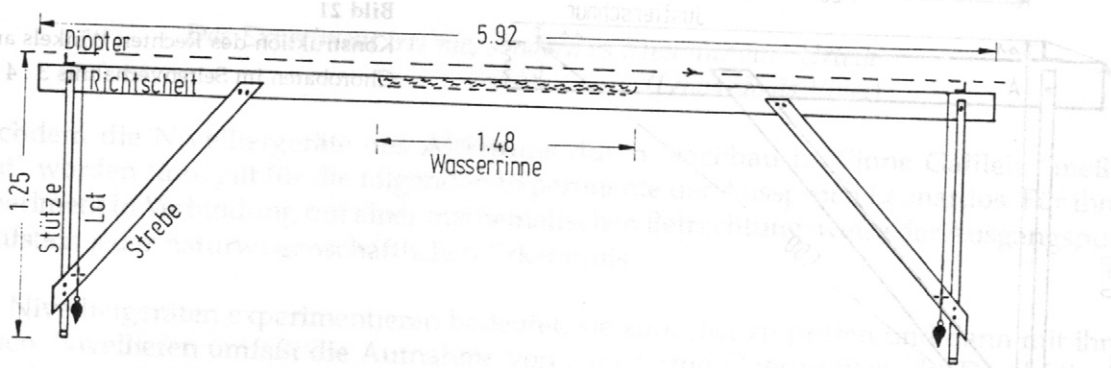
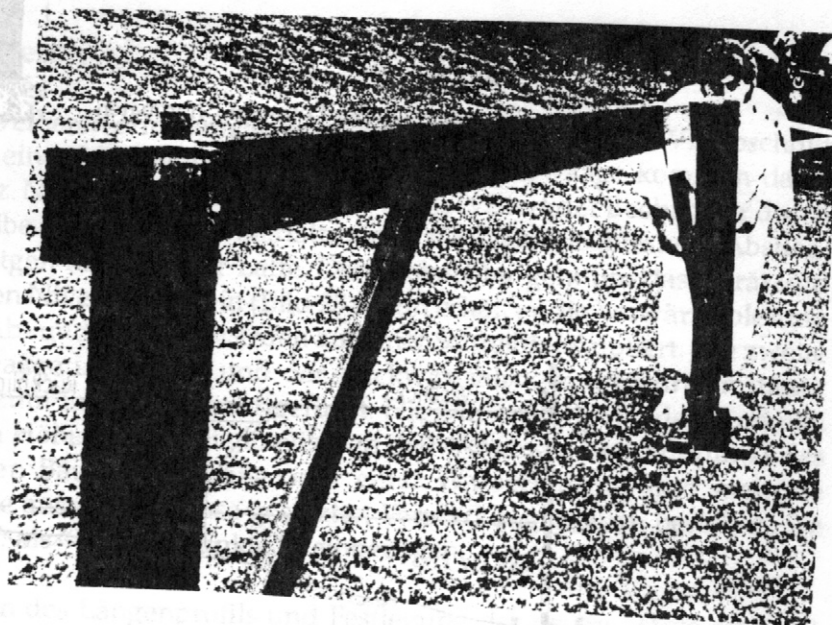


Bild 19
Chorobat nach Vitruv



Bild 20
Messvorgang mit dem Chorobaten



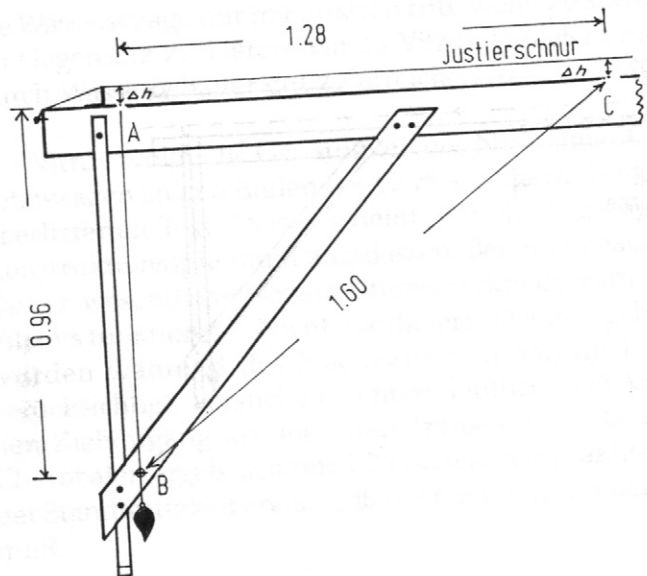


Bild 21
Konstruktion des Rechten Winkels am Chorobaten im Seitenverhältnis 3 : 4 : 5

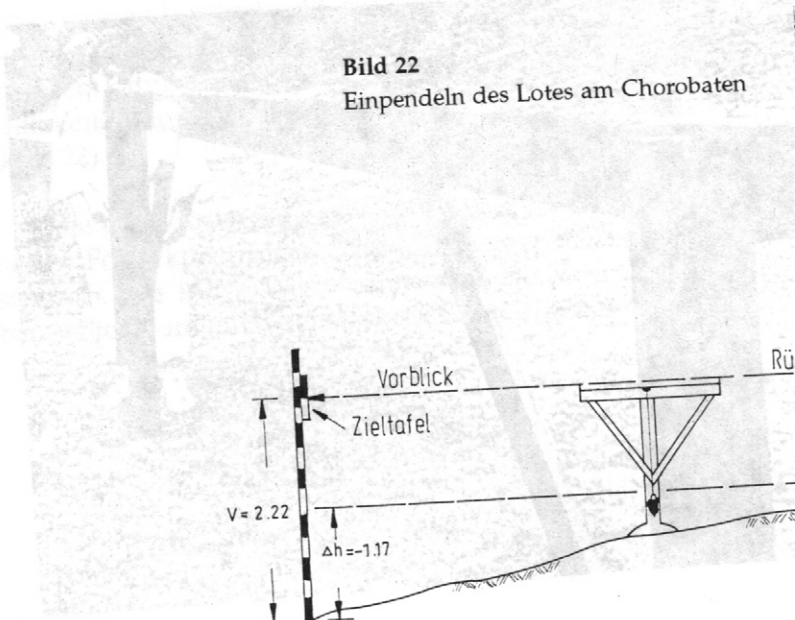
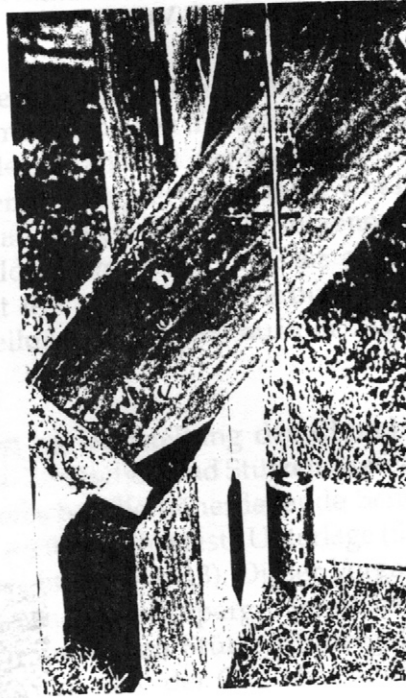


Bild 22
Einpendeln des Lotes am Chorobaten

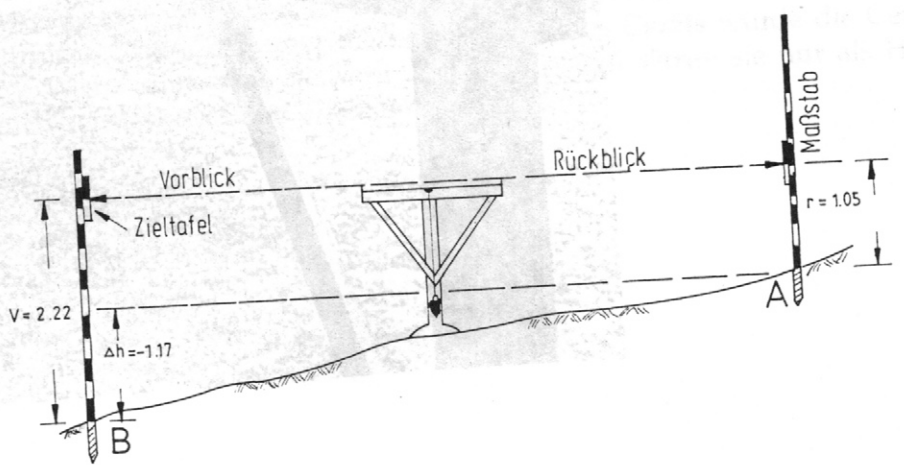


Bild 23
Der Nivelliervorgang

Teil III: Experimente mit nachgebauten Nivelliergeräten

Das Experiment irrt nie, sondern es irren nur eure Urteile
(Leonardo da Vinci)

Nachdem die Nivelliergeräte des Altertums durch Nachbau im Sinne Galileis "meßbar gemacht" worden sind, gilt für die folgenden Experimente der Ausspruch Leonardos. 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. Nivellieren umfaßt die Aufnahme von Längs- und Querprofilen, die Durchführung eines Flächennivellements sowie die Absteckung und Prüfung von Bauhöhen. Diese Grundaufgaben waren im Altertum nur in Form eines Längenprofils zu lösen, da die damaligen Nivelliergeräte beim Visiervorgang nur einen geringen seitlichen Spielraum zuließen. Es ist jedoch vorstellbar, daß Sonderkonstruktionen bedeutender Mechaniker (z.B. Heron und Theodoros) eine Drehung der Geräts um seine Achse ermöglichten.

In einem vom Verfasser durchgeführten 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
- Nivellement von 420 m Länge mit Chorobat und Dioptersetzwaage
- Nivellement mit Dioptersetzwaage (Hin- und Rückweg = 200 m Länge)
- Höhenmessung in steilem Gelände

Der Nivelliervorgang nach Heron

Im Anschluß an die zum Nivellieren erforderlichen Geräte beschreibt Heron im VI. Abschnitt der "Dioptra" die Ausführung eines Nivellements [5]. Neben der Kanalwaage kommen dabei zwei Nivellierlatten zum Einsatz. Nach Aufstellung der Kanalwaage visiert der Beobachter durch zwei Schlitzdiopter die Zielscheibe der ersten Nivellierlatte ein. Die Rückwärtsablesung (Abstieg) geschieht am seitlich angebrachten Maßstab der Latte. Der Beobachter geht um das Gerät und visiert die Zielscheibe der zweiten Nivellierlatte ein (Bild 23). Nun erhält er die Vorwärtsablesung (Aufstieg). Die Ablesungen für Ab- und Aufstieg werden auf einer 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 (Bild 24). Für den Bau einer Straße oder einer Wasserleitung sind mehrere Zwischenpunkte erforderlich, die aus in der Achse gesetzten Vermarkungssteinen bestehen. Sie werden in das Nivellement - ggf. als "Wechselpunkte" - einbezogen.

Nach graphischem 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" [5]. Ausgrabungen an Wasserleitungen der Antike bestätigen Herons Angaben. Er ist der einzige Autor des Altertums, der die Durchführung eines Nivellements beschreibt. Wie Heron es vor 2000 Jahren darstellte, so kann es heute noch ausgeführt werden.

Prüfung der Aufstellgenauigkeit

Die Konstruktion der Setzwaage oder des rechten Winkels ist selbst bei sorgfältigster Ausführung mit einem kleinen Fehler behaftet. Die Nivelliergeräte werden horizontiert, indem das Lot oder (beim Chorobaten) die beiden Lote auf die Kerb- oder Strichmarke der Geräte einvisiert werden. Auch dieser Vorgang kann eine kleine Ungenauigkeit ergeben. Beide Fehler beeinflussen die Aufstellgenauigkeit. Der Aufstellfehler wurde in einer Meßreihe ermittelt, bei der Chorobat, Diopteretz- und Wasserwaage jeweils viermal neu horizontiert wurden. Abgelesen wurde mit einem im Abstand von 5 m aufgestellten Ni. 2 an einem auf den Dioptern der Geräte aufgesetzten Maßstab (Bild 25).

Die Meßergebnisse zeigen, daß der Aufstellfehler bei den untersuchten Geräten fast gleich ist. Er beträgt maximal $\pm 0,5$ mm. Im Gegensatz zu allen anderen Nivelliergeräten stellt sich bei der Kanalwaage die Höhe des Wasserspiegels ohne Fehler ein. Untersuchungen ergaben, daß die Horizontierung der beiden Diopter auf den Wasserspiegel ebenfalls im oben genannten Fehlerbereich liegt. Der Aufstellfehler beeinflußt die Genauigkeit des Nivellements. Dieser kann jedoch durch Messung in zwei Lagen - Drehung des Geräts um 180° - ausgeschaltet werden. Die große Genauigkeit, mit der die Bauwerke der Antike errichtet wurden, läßt vermuten, daß diese Methode den Baumeistern bekannt war.

Versuchsmessungen mit verschiedenen Geräten und Dioptern auf einem Prüfstand

Im vorigen Abschnitt wurde der Fehler festgestellt, der beim Aufstellen 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 machte schon einige Meß- und Visierübungen notwendig. Dabei wurde klar, daß es nicht leicht ist, sich mit den ungewohnten Geräten vertraut zu machen. Die Fertigkeit der alten Baumeister im Umgang mit diesen Geräten ist heute nur schwer zu erreichen.

Die nachfolgend aufgeführten Meßversuche dienten der Übung des Visiervorgangs, der Feststellung der Visiergenauigkeit und der Prüfung verschiedener Diopterformen. Gemessen wurde auf einem Prüfstand von 20 m Länge (Bild 26). Zur Ausschaltung des Aufstellfehlers wurden die nachgebauten Geräte mit Hilfe eines Ni. 2 horizontiert. Bei gutem Wetter und Windstille herrschten optimale Bedingungen. In Meßreihen, die jeweils fünf Zielungen umfaßten, wurden vier Nivelliergeräte und zusätzlich vier verschiedene Diopter getestet (Bild 27, Diopter C, D, F und G).

Das Mittel aus fünf Zielablesungen ergibt den Wert, der mit der durch einen Ni. 2 bestimmten Ableseung verglichen werden kann. Die errechneten "NN-Höhen" erleichtern die Bewertung der Daten. Die Auswertung ergibt, daß die untersuchten Geräte und die Diopter auf der kurzen Distanz eine fast gleiche Zielgenauigkeit aufweisen. Beim Visiervorgang muß mehrmals hintereinander 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 Ableseung entfällt dann und wird durch eine neue ersetzt. Die Untersuchung der einzelnen Diopter ergab, daß ein Nutdiopter (C) - Breite 4 mm, Tiefe 15 mm - den Visiervorgang erleichtert, während ein Lochdiopter (D) ihn schwieriger gestaltet.

Es kann festgestellt werden, daß bei allen Geräten eine Zielgenauigkeit von maximal ± 5 mm erreicht wurde.

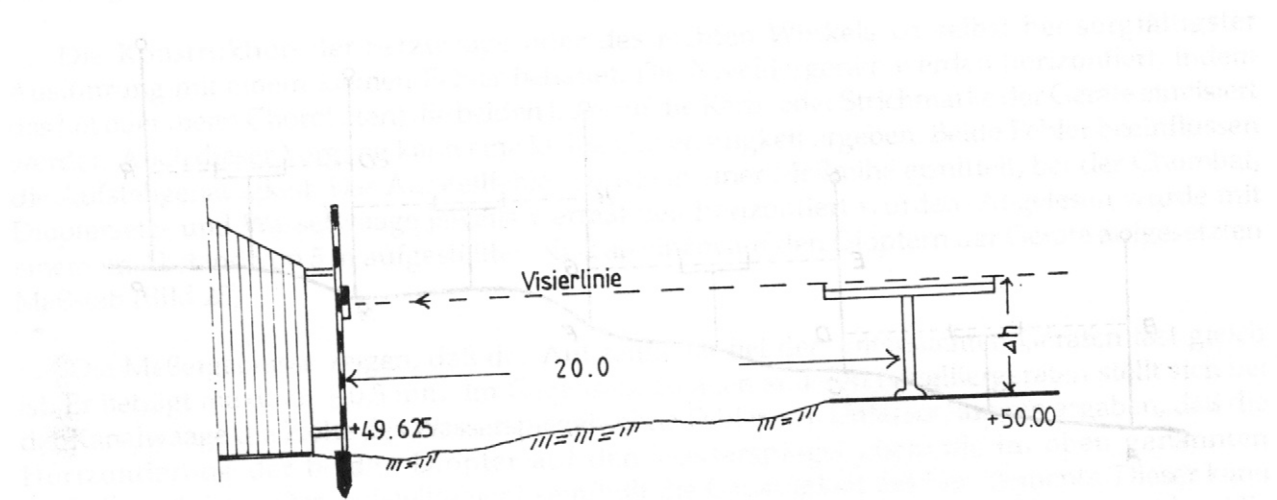


Bild 26
Prüfstandsskizze für die Meßversuche
mit verschiedenen Geräten und Dioptern

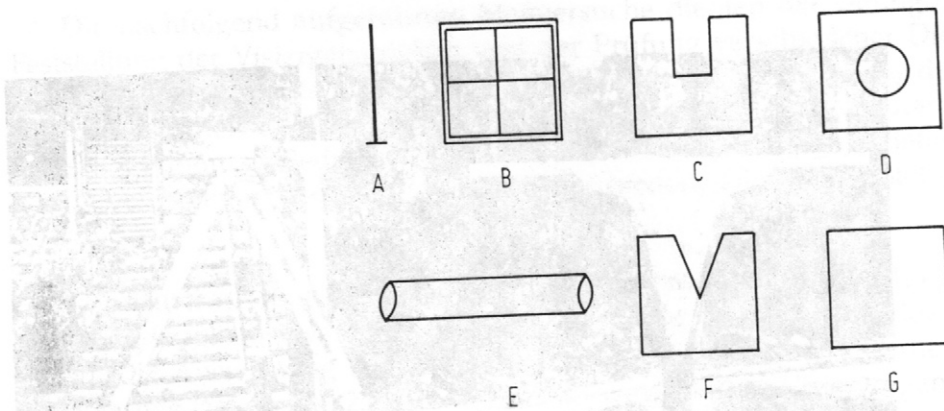


Bild 27
Diopterzielvorrichtungen:
(A) Stab-, (B) Kreuz-, (C) Nut-, (D) Lochdiopter,
(E) Röhren, (F) Kimme und (G) Volldiopter

Nivellements mit Chorobat und Dioptersetzwaage

Die Ergebnisse aus der Prüfung der Aufstell- und Visiergenauigkeit belegen, daß auch für längere Nivellements eine genügende Genauigkeit zu erwarten ist. 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 lieferten die Daten für die Genauigkeitsuntersuchung. Das Nivellement mit Hin- und Rückweg bot die Möglichkeit, es durch eine Fehlerverteilung auszugleichen. Beim Nivelliervorgang werden die Geräte bei jeder zweiten Aufstellung um 180° gedreht, um den Aufstellfehler auszuschalten. Für jeden Meßpunkt wurden drei Zielungen mit Ablesungen an der Nivellierlatte durchgeführt. Das Mittel aus drei Ablesungen bildete jeweils den Vor- und Rückblick für die Ausrechnung des Nivellements. Dabei wurde mit dem Chorobaten eine größere Genauigkeit erreicht als mit der Dioptersetzwaage. Der Abschlußfehler beträgt beim Chorobaten - 14 mm, 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 Dioptersetzwaage - 30 mm beträgt (Bild 28). Das Nivellement (Hin- und Rückweg) mit der Dioptersetzwaage zeigt einen Abschlußfehler von - 19 mm sowie einen maximalen Fehler bei den Zwischenpunkten von - 36 mm. Ein Vergleich der beiden Nivellements macht deutlich, daß 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 (Bild 29). Die Addition der Abschlußfehler (ohne Ausgleich) aus den drei Nivellements ergibt für die nivellierte Strecke von 1240 m nur - 55 mm. Rechnet man den Abschlußfehler von Chorobat und Dioptersetzwaage - jeweils auf das einzelne Gerät bezogen - für eine Strecke von 1000 m um, dann ergibt er für den Chorobaten - 35 mm und für die Dioptersetzwaage - 60 mm. Die beiden Daten belegen, daß hierfür wahrscheinlich der Aufstell- und Visierfehler, bedingt durch den unterschiedlichen Diopterabstand der beiden Geräte, die Ursache ist.

Höhenmessung in steilem Gelände

Für die Höhen- und Längenmessung in steilem Gelände setzen die Landmesser und Baumeister im Altertum und teilweise noch im 19. Jahrhundert das Staffelverfahren ein (vgl. Bild 9, Fig. VIII und Bild 30) [19]. Eine Beschreibung hierzu ist erstmals in den Schriften der römischen Agrimensoren zu finden [20]. Danach wurde es eingesetzt, um die Größe eines Grundstücks in Hanglage zu ermitteln. Die Planung und der Bau von Brücken, Tunnelbauwerken und Aquädukten erforderte ebenfalls eine Staffelmessung, die eine große Genauigkeit verlangt.

Bild 31 zeigt die Durchführung einer Staffelmessung (Höhe und Länge) für die Planung und den Bau einer Aquäduktbrücke. Dazu ist die genaue Aufnahme des Talprofils erforderlich. Wegen der steilen Talhänge kann es nicht als Nivellement mit den bisher untersuchten Geräten aufgenommen werden. Die Längen- und Höhenmessung gestaltet sich nach einem besonderen Verfahren, das nur als Staffelmessung möglich ist. Die hierzu erforderliche Ausrüstung besteht aus Richtscheit, Setzwaage und Stativ. Zur Ausschaltung des Gerätefehlers wird die Messung jeweils in zwei Lagen ausgeführt. Längen- und Höhenmessung können in einem Arbeitsgang durchgeführt werden, wenn das Richtscheit mit einem Längenmaßstab versehen ist.

Ein vom Autor durchgeführtes Experiment mit nachgebauten Geräten sollte Auskunft über die Genauigkeit geben, die mit einer Staffelmessung zu erreichen ist. Gemessen wurde auf einem etwa 1:2 geneigten Hang, der mit seiner Grünfläche einfache Bedingungen stellte. Die mit neun Pflöcken vermarkte Teststrecke von 23,25 m Länge und mit einem Höhenunterschied von 11,212 m wurde viermal im Staffelverfahren gemessen. Der relativ hohe Gerätefehler von 11 mm (das Richtscheit wurde nicht besonders justiert) wurde durch Messung in zwei Lagen ausgeschaltet. Die in Bild 32 auf "NN" bezogenen Ergebnisse der Staffelmessung zeigen, daß der Höhenfehler 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

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	Mittel aus drei Zielungen
+120	50,003	49,991	49,994	
+180	50,112	50,096	50,097	Diopterabstand: Chorobat = 3,60 m Setzwaage = 1,50 m
+240	49,963	49,955	49,948	
+300	50,094	50,079	50,067	
+360	49,975	49,965	49,963	
+420	50,126	50,112	50,104	

Bild 28
Ergebnisse der Nivellements 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

Bild 29
Ergebnisse des Nivellements mit der
Dioptersetzwaage (Hin- und Rückweg)

eine Differenz von +15 mm zur Sollhöhe; ein Ergebnis, das durch seine Qualität überrascht. Wahrscheinlich ergibt eine längere Staffelmessung in felsigem und schwierigem Gelände einen größeren Fehler. Dieser kann jedoch durch eine Zusatzmessung mit langer Zielweite festgestellt und ausgeglichen werden. Nach Bild 31 wird dazu das Nivelliergerät auf der Talseite in A aufgestellt und die Zieltafel an der Nivellierlatte in B auf der gegenüberliegenden Seite einvisiert. Der Versuch wurde bei einer Zielweite von 80 m mit dem Chorobaten und der Dioptersetzwaage durchgeführt. Dadurch war ein Genauigkeitsvergleich zwischen beiden Geräten möglich. Um die Genauigkeit der Messung zu steigern, wurden in jeder Aufstellung - Messung in zwei Lagen - zehn Zielungen und Ablesungen an der Nivellierlatte in B ausgeführt. Das Mittel aus den Ablesungen ergibt den Vorblick. Der Rückblick wurde direkt vom Diopter der Geräte bis zum Pflock A gemessen. Die Meßergebnisse zeigen, daß (gegenüber der Sollhöhe) mit dem Chorobaten um 10 mm zu niedrig und mit der Dioptersetzwaage um 15 mm zu hoch nivelliert wurde. Eine Genauigkeitssteigerung wird erreicht, wenn von Punkt B aus der dargestellte Meßvorgang nochmals in Richtung auf Punkt A ausgeführt wird. Das Mittel aus beiden Meßergebnissen verkleinert den Fehler.

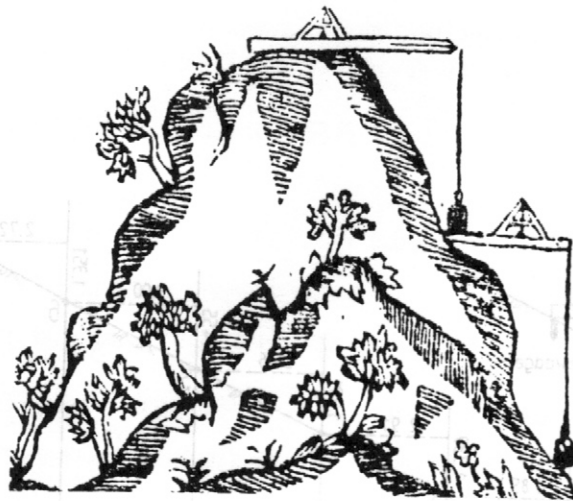


Bild 30
Nivellieren mit Setzwaage und
Setzlatte (Holzschnitt, 1697)

Schlußbetrachtung

*Ich möchte lieber einen einzigen ursächlichen Zusammenhang entdecken
als König der Perser werden.*
(Demokrit)

Die aus dem Altertum, von den Arabern, aus der Renaissance und aus fernöstlichen Kulturkreisen bekannten Überlieferungen zu den Nivelliergeräten wurden angeführt, in Zusammenhang gebracht und ihre Entwicklung aufgezeigt. Die Geräte wurden nach Auswertung aller Überlieferungen nachgebaut. Dabei war die Berufserfahrung als Vermessungsingenieur eine wertvolle und notwendige Hilfe. Schwerpunkte der Arbeit waren die Experimente mit den nachgebauten Geräten. Hierbei wurden die Aufstell- und Zielgenauigkeit ermittelt sowie mehrere Nivellements und eine Staffelmessung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen Genauigkeiten, die den heutigen Anforderungen an ein einfaches Nivellement entsprechen und in dem Fehlerbereich liegen, wie ihn das Grundsteinpflaster der großen Pyramide aufweist. Mit den Meßergebnissen steht der Forschung erstmals ein "Maßstab" zur Verfügung, nach dem die Genauigkeit der Höhenlage von Bauwerken des Altertums analysiert werden kann.

Es konnte nachgewiesen werden, daß Herons Kanalwaage und Vitruvs Chorobat jeweils Sonderkonstruktionen waren, die in der Praxis kaum zum Einsatz kamen. Die vorliegende Arbeit zeigt auch, daß im Altertum die von jedem Baumeister einfach herzustellende Dioptersetzwaage das am häufigsten benutzte Gerät zur Durchführung von Höhenmessungen war.

Anmerkungen und Literatur

- [1] Borchardt, L.: Längen und Richtungen der vier Grundkanten der großen Pyramide bei Gise. Berlin 1926
- [2] Herodot: Historien. Deutsche Gesamtausgabe. Stuttgart 1955.
Theodoros von Samos (6. Jh.v.Chr.), ein Bildhauer, Erfinder und Mechaniker, fertigte mit Winkelmaß, Wasserwaage und Lineal drei Vermessungsgeräte.
- [3] Cato: De agri cultura (Über die Landwirtschaft)
- [4] Plinius: Naturalis historia (Naturkunde)
- [5] Schöne, H.: Herons von Alexandria Vermessungslehre und Dioptra. Leipzig 1903
- [6] Heron von Alexandria: Mynascodex der griechischen Kriegs-Schriftsteller. Supplem. grec. n. 607. Louvre, Paris 1903
- [7] Peters, K.: Die Dioptra des Heron. In: Der Fluchtstab. 3/1960, S. 48-50
- [8] Die Beschreibung der Kanalwaage und des Chorobaten wurde nicht besonders gebracht, da sie in der Fachliteratur häufig zu finden ist, z.B. [5] und [9].
- [9] Vitruv: De architectura libri decem. Übers.: E. Stürzenacker (Essen 1938) und C. Fensterbusch (Darmstadt 1964)
- [10] Alberti leitete 1450 mit der Erstausgabe von "De architectura" die Vitruvforschung der Renaissance ein. Florenz 1485
- [11] Pauly/Wissowa (Hrsg.): Realencyclopädie der class. Altertumswissenschaft. Stuttgart 1913
- [12] Grewe, K.: Bibliographie zur Geschichte des Vermessungswesens. Stuttgart 1984.
Hier sind die Verfasser der Schriften mit dem Titel "Wasserwägen und Nivellieren" aufgeführt.
- [13] Leupold, J.: Theatrum Arithmetico-Geometricum. Das ist: Schau-Platz der Rechen- und Meßkunst. Leipzig 1727
- [14] Theinert, A.: Praktische Geometrie und Anweisung über den Gebrauch der Kanal- und Setzwaage. Glogau 1846
- [15] Veenhuis, W.: Untersuchung zu zwei Nivellieren des Altertums.
In: Verm.-Ing. 1/1984, S. 28-30.
Hier wird erstmalig im Experiment gemessen. Leider nur von einem Standpunkt aus und mit "improvisierten" Geräten.
- [16] Minow, H.: Der Beitrag der Araber zur Entwicklung des Vermessungswesens im Mittelalter.
In: Verm.-Ing. 3/1979, S. 50-67
- [17] Minow, H.: Vermessung im alten China. In: Verm.-Ing. 2/1981, S. 50-62

- [18] Da für dieses Gerät in der Literatur verschiedene Bezeichnungen zu finden sind, wird es zur besseren Identifizierung nachfolgend "Dioptersetzwaage" genannt.
- [19] Hecht, K.: Maß und Zahl in der gotischen Baukunst. Hildesheim 1979.
Das Buch zeigt zahlreiche Darstellungen von Lotwaagen und Setzwaagen, die den im Handwerk stattgefundenen Techniktransfer vom Altertum ins Mittelalter belegen.
- [20] Blume, F., Lachmann, K., und Rudorff, A.: Die Schriften der römischen Feldmesser. Berlin 1848

Bildnachweis

- Bild 1: Foto Vagács, Budapest
- Bilder 4 und 5: aus Verm.-Ing. 3/1987, S. 100
- Bild 6: Zeichnung Verfasser nach [5]
- Bild 9: aus [13]
- Bild 10: Kupferstich, 16. Jahrhundert
- Bild 11: aus [17]
- Bild 12: aus einer japanischen Zeitschrift für Meßgeräte
- Bilder 15 und 20: Foto Schanné, Saarbrücken
- Bilder 17 und 25: Foto Schröder, Münster
- Bild 22: Foto Orlogi, München
- Bild 30: aus [19]
- Alle übrigen Bilder: Entwurf und Zeichnung durch Verfasser