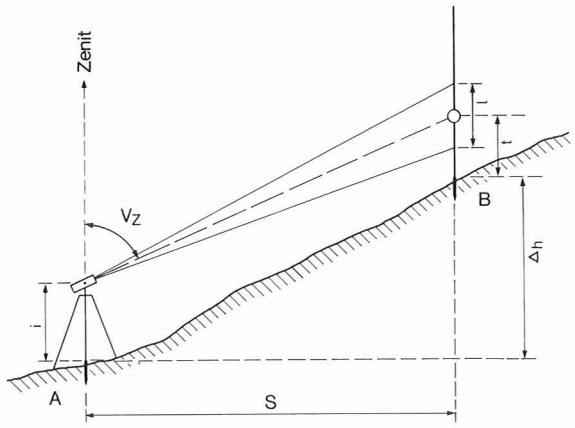
13.4 Kombinierte Lage- und Höhenmessung

Bei den meisten Verfahren zur Lage- und Höhenmessung werden Lage und Höhe eines Punktes in zwei Arbeitsgängen getrennt ermittelt. Da dieses Vorgehen sehr zeitaufwendig ist, werden bei Vermessungen, deren Ziel die dreidimensionale Erfassung und Beschreibung eines Objektes ist, Lage und Höhe in einem einzigen Messvorgang bestimmt.
Hauptanwendungsgebiet dieser sogenannten kombinierten Verfahren ist die Herstellung von topografischen Karten und Plänen. Da aber in der Regel auch archäologische Ausgrabungsbefunde auf dreidimensionale Koordinatensysteme bezogen werden, eignen sich die meisten dieser Verfahren grundsätzlich auch für die Grabungsvermessung und -dokumentation.
Kombinierte Verfahren lassen sich unterscheiden in
- terrestrische Verfahren, gewöhnlich als Tachymetrie bezeichnet,
- fotogrammetrische Verfahren,
- satellitengestützte Verfahren.



15 Entfernungs- und Höhenmessung mit Strichdistanzmesser bei schräger Sicht
A = Instrumentenstandpunkt, B = Lattenstandpunkt, Vz = Vertikalwinkel, l = Länge des Lattemabschnittes zwischen den Distanzfäden, i = Instrumentenhöhe (Höhe der Kippachse über dem Messpunkt, (Punkt A), t = Zielhöhe, d.h. Lattenablesung am mittleren Horizontalstrich des Strichkreuzes, s = Horizontalentfernung zwischen A und B. Berechnung nach der Formel s = 100 * l * sin2 Vz, _h = Höhenunterschied zwischen A und B. Berechnung nach der Formel _h = 100 * l * sin Vz * cos Vz + (i – t).

13.4.1 Tachymetrie

Bei den tachymetrischen Verfahren wird zur Bestimmung der Lage die Polaraufnahme benutzt, d.h. zum aufzunehmenden Punkt werden Richtungswinkel und Strecke, die sogenannten Polarkoordinaten, gemessen. Großer Vorzug der Tachymetrie ist, dass keine mechanischen Streckenmessungen notwendig sind. Winkel- und Streckenmessung erfolgen entweder optisch oder elektronisch. Die Höhe eines Punktes wird meist durch trigonometrische Höhenbestimmung ermittelt.
Nach Art der eingesetzten Instrumente lassen sich unterscheiden
- Messtischtachymetrie
- Bussolentachymetrie
- Tachymetrie mit selbstreduzierenden Tachymetern
- Theodolittachymetrie
- elektronische Tachymetrie.

Die ersten drei Verfahren spielen in der Vermessungspraxis kaum mehr eine Rolle und werden hier nicht behandelt.

13.4.1.1 Theodolittachymetrie

Jeder Theodolit, der mit einem sogenannten „Faden- oder Strichdistanzmesser" zur optischen Entfernungsmessung an einer Messlatte ausgerüstet ist (vgl. Kap. 13.2.2), kann als Tachymeter eingesetzt werden.
Die Polarkoordinaten eines zu bestimmenden Punktes ergeben sich durch Ablesung der Richtung am Horizontalkreis und optische Streckenmessung, wobei zu berücksichtigen ist, dass bei geneigter Ziellinie die Schrägstrecke gemessen wird, die mit Hilfe des ebenfalls abzulesenden Vertikalwinkels rechnerisch (Taschenrechner!) auf die Horizontalstrecke reduziert werden muss (vgl. Abb. 15).
Der Höhenunterschied zwischen Standpunkt und Messpunkt wird durch trigonometrische Höhenbestimmung ermittelt, wobei die Rechnung mit Näherungsformeln ausreichend genau ist.
Bei horizontaler Zielung des Fernrohres ergibt sich der Höhenunterschied zwischen dem Instrumentenstandpunkt und dem Lattenstandpunkt aus der Differenz von Instrumentenhöhe (d.h. Höhe der Kippachse über dem Standpunkt) und Lattenablesung am mittleren Horizontalstrich des Strichkreuzes.
Wie leicht zu erkennen ist, wird der Höhenunterschied in diesem Fall mit der Methode des geometrischen Nivellements bestimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass sich flache Objekte (d.h. horizontale Zielungen) auch mit Nivellierinstrumenten, die über Horizontalkreis und Distanzstriche verfügen, tachymetrisch vermessen lassen. In der Fachliteratur werden solche Instrumente deshalb als Tachymeternivelliere bezeichnet.
Das Protokoll einer Theodolit-Tachymeteraufnahme enthält, neben einer Geländeskizze (Kroki, Handriss), die Messdaten (Horizontalrichtung, Vertikalwinkel, Schrägstrecke, Instrumenten- und Zielhöhe), die berechnete Horizontalstrecke, den berechneten Höhenunterschied und – daraus abgeleitet – die Höhe des gemessenen Punktes.
Die Auswertung der Mess- und Rechendaten, d.h. die Herstellung eines maßstäblichen Planes, kann manuell durch Auftragen mit Winkeltransporteur und Maßstab

oder durch grafische Datenverarbeitung mit CAD-Systemen erfolgen (vgl. Kap. 14.3.3).
Die Genauigkeit der Theodolittachymetrie ist vor allem von der Genauigkeit der optischen Streckenmessung abhängig, die bei etwa 1/200 – 1/300 der gemessenen Strecke liegt. Daraus ergibt sich, dass mit diesem Verfahren, selbst bei kurzen Strecken in der Regel nur dm-Lagegenauigkeit erreicht werden kann. Größere Genauigkeiten, gewöhnlich ** 0,1 m, werden bei der Höhenbestimmung erreicht, solange die Zielungen nicht zu steil werden.

13.4.1.2 Elektronische Tachymetrie

Die Entwicklung der elektronischen Entfernungsmessung Ende der vierziger Jahre und ihre konsequente Weiterentwicklung in den letzten Jahrzehnten hat den Stellenwert der Tachymetrie in der Vermessungspraxis bedeutend erhöht. Sie ist heute das universelle terrestrische Messverfahren schlechthin.
Wird ein elektronisches Streckenmessgerät mit einem elektronischen Theodoliten kombiniert, so spricht man von einem elektronischen Tachymeter oder einer „Totalstation" (Abb. 16).
Instrumente dieser Art, die entweder in kompakter Bauweise (Winkel- und Streckenmessteil integriert in einem Gerät) hergestellt oder modular aufgebaut sind (Winkel- und Streckenmessteil sind selbständige Geräte), sind mittlerweile auch auf archäologischen Ausgrabungen im Einsatz. Da eine Reihe von digitalen Grabungsdokumentationssystemen, die derzeit auf dem Markt oder in der Entwicklung und Erprobung sind, elektronische Tachymeter zur Datenerfassung nutzen, ist zu erwarten, dass sie in Zukunft eine noch größere Rolle spielen werden.

16 Elektronisches Tachymeter mit externem Feldrechner.

Die Richtungs- und Winkelmessung mit elektronischen Tachymetern entspricht derjenigen von elektronischen Theodoliten (vgl. Kap. 13.2.3).
Unter den elektronischen Entfernungsmessern haben die elektro-optischen Geräte, die nach verschiedenen Messprinzipien arbeiten, die weiteste Verbreitung gefunden.
Bei allen Messprinzipien wird eine elektromagnetische Welle (Wellenlänge ca. 0,5 – 1,0 µm) von einem Sender über die zu messende Entfernung zu einem Reflektor gesandt, dort reflektiert, von einem Empfänger empfangen und dann aus der Laufzeit die Entfernung zwischen den beiden Punkten abgeleitet.
Die überwiegende Mehrheit der heute gebauten elektro-optischen Entfernungsmesser arbeitet nach dem sogenannten Phasenvergleichsverfahren, bei dem die Welle von einem Prismenreflektor reflektiert werden muss. Für verschiedene Praxisanwendungen (z.B. Bauaufnahme mit unzugänglichen Punkten, Höhlenvermessung usw.) ist aber auch das Impulsmessverfahren sehr interessant, bei dem unter bestimmten Voraussetzungen auf einen besonderen Reflektor verzichtet werden kann.
Zur Stromversorgung werden bei den meisten Instrumenten einschiebbare Nickel-Cadmium-Akkumulatoren verwendet.
Ein Messvorgang nimmt bei elektronischen Tachymetern, nach Einstellung des Zieles und Messungsauslösung (Knopfdruck), gewöhnlich weniger als 5 Sekunden in Anspruch. Mittlerweile sind sogenannte „Ein-Mann-Tachymetersysteme" mit Instrumenten auf dem Markt, die den Reflektor automatisch suchen und finden und die telemetrisch vom Zielpunkt aus bedient werden.
Gemessen werden Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und Schrägentfernung. Ein interner Rechner berechnet Horizontalentfernung und Höhenunterschied (über trigonometrische Höhenbestimmung) zwischen Instrument und Zielpunkt.
Alle Messergebnisse können als Dezimalzahlen auf Sichtanzeigen (Displays) abgelesen und, sofern das Feldbuch manuell geführt wird, in einem Messprotokoll festgehalten werden.
Die Möglichkeiten von elektronischen Tachymetern werden allerdings erst dann voll ausgeschöpft, wenn sie in Verbindung mit automatischen Datenregistriereinrichtungen betrieben werden.
Datenregistriereinrichtungen sind interne und/oder anschließbare externe elektronische Festkörperspeicher, in denen die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen zusammen mit Informationen zu ihrer eindeutigen Zu-

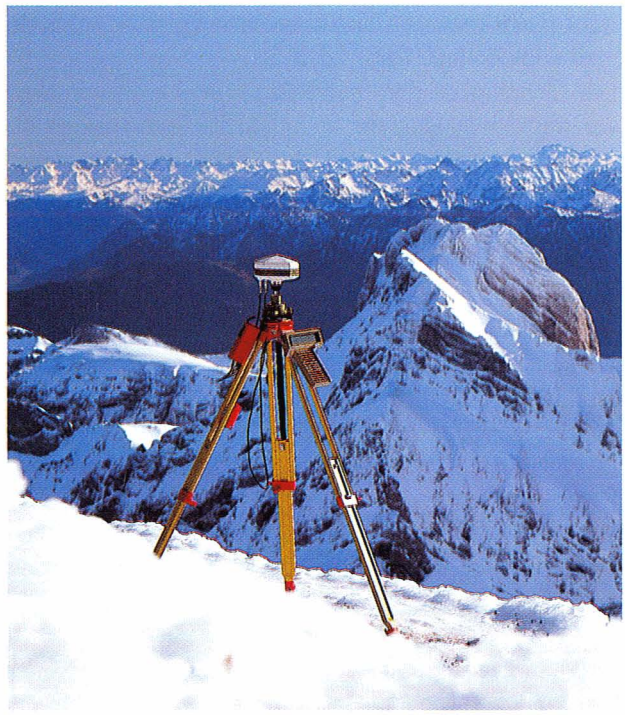
ordnung (Punktnummern, Codes usw.) abgespeichert werden. Sind die Datenspeicher mit einem Rechner kombiniert (z.B. externer Feldrechner, vgl. Abb. 16), so können die gemessenen Daten bereits im Feld aufbereitet und z.B. in Koordinaten umgewandelt werden. Sogenannte elektronische Feldbücher erlauben zudem die maßstäbliche grafische Darstellung von gemessenen Punkten während der Vermessung auf großflächigen Displays.
Für die Auswertung der durch elektronische Tachymetrie gewonnenen Daten bietet sich die interaktive grafische Datenverarbeitung durch CAD-Systeme an, d.h. die Herstellung eines digitalen Planes, der über Kartierautomaten (Plotter) oder Drucker in analoger Form ausgedruckt werden kann. In dieser Gerätekette ist der durchgängige automatische Datenfluss von der Aufnahme bis zum Plan realisiert.
Selbstverständlich ist aber auch eine manuelle oder halbautomatische Auswertung möglich.
Die Winkelmessgenauigkeit, d.h. Standardabweichung einer Richtung, liegt bei den meisten elektronischen Instrumenten bei ** 2 mgon, was bei 1000 m Messstrecke eine Querabweichung von etwa 3 cm bedeutet. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung liegt bei fast allen Geräten bei ** 1 cm auf 1000 m Messstrecke.
Daraus lässt sich ableiten, dass die elektronische Tachymetrie, unter günstigen Bedingungen und mit justierten Instrumenten, selbst bei Messungen über mehrere hundert Meter, Lagegenauigkeiten von ** 1 cm erlaubt.

13.4.2 Photogrammmetrische Verfahren

Vgl. Kap. 21.2

13.4.3 Satellitengestützte Verfahren zur Lage- und Höhenbestimmung

Mit dem sogenannten GPS (Global Positioning System), eigentlich NAVSTAR-GPS (NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System), einem von den US-Militärbehörden aufgebauten Navigationssystem, steht im Vermessungswesen seit einigen Jahren eine zusätzliche satellitengestützte Messmethode zur Lage- und Höhenbestimmung zur Verfügung. GPS-Verfahren, die bereits seit Beginn der achtziger Jahre zur Verdichtung des Dreiecksnetzes durch die Landesvermessungsbehörden Verwendung finden, werden heute zunehmend auch für Ingenieur- und Katastervermessungen genutzt. Es ist zu erwarten, dass GPS durch den Ausbau des Systems (in der Diskussion ist etwa der Aufbau eines zivilen Systems) und die Weiterentwicklung der Messgeräte (kürzere Beobachtungszeiten, Senkung der Gerätekosten usw.) in naher Zukunft auch für archäologische Vermessungen eine realistische Alternative zu den terrestrischen Messverfahren darstellen wird.



17 GPS-Empfänger beim Einsatz im Gebirge.

Die GPS-Verfahren nutzen Signale, die von den NAVSTAR-GPS-Satelliten in regelmäßigen Intervallen ausgesandt werden, zur genauen Positionsbestimmung. Diese Satelliten umkreisen die Erde in ungefähr 20000 km Höhe auf genau bekannten Bahnen.
Die Satellitensignale werden bei vermessungstechnischer Nutzung von speziellen geodätischen Empfängern (Receivern) empfangen, die über eine interne oder angeschlossene Tastatur bedient werden (Abb. 17). Voraussetzung für die Anwendung von GPS ist „freie Sicht nach oben" (keine Hindernisse zwischen Empfänger und Satelliten), was gewöhnlich nur bei archäologischen Freilandgrabungen gegeben ist.
GPS-Neupunkte werden – bildlich gesprochen – durch räumlichen Rückwärtsschnitt mit Hilfe von Entfernungen bestimmt, die aus der Zeitdifferenz zwischen dem Augenblick, in dem ein Signal den Satelliten verlässt und jenem, in dem es am Empfänger ankommt, abgeleitet werden. Die drei gesuchten Koordinaten eines Neupunktes ergeben sich aus gleichzeitigen Messungen zu mindestens vier Satelliten.
Genaue Punktbestimmungen (Zentimetergenauigkeit) sind nur durch sogenannte differentielle GPS-Verfahren mit mindestens zwei Empfängern möglich, wovon einer auf einer „Referenzstation" stehen muss. Die Vermessungsbehörden der Länder sind derzeit dabei, ein bundesweites Netz von multifunktionalen Referenzstationen aufzubauen, sodass GPS-Nutzer in Zukunft mit lediglich einem Receiver auskommen werden.

Unterscheiden lassen sich statische und kinematische Messmethoden, sowie einige Mischformen (Rapid Static, pseudokinematische Messmethode usw.).
Durch GPS-Messungen mit geodätischen Receivern und entsprechender Auswertungssoftware werden in der Regel Koordinaten im World Geodetic System (WGS 84) bestimmt, die durch geeignete Formeln in Landeskoordinaten überführt werden können.

Dipl.-Ing. Hermann Kerscher
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Unterer Graben 37
85049 Ingolstadt