

Die digitalen Zenitkamarasysteme TZK2-D und DIADEM zur hochpräzisen Geoidbestimmung

Christian HIRT, Günter SEEBER, Beat BÜRKI, Anna MÜLLER

Zusammenfassung

Am Institut für Erdmessung der Universität Hannover und am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich wurden mit Hilfe von CCD-Technologie zwei hochgenaue, feldverwendungsfähige und weitgehend automatisierte Echtzeit-Zenitkamarasysteme entwickelt. In Verbindung mit einem geeigneten GPS-Empfänger können Lotabweichungen sehr wirtschaftlich und mit einer Genauigkeit von etwa 0.10 bis 0.15 Bogensekunden online bereitgestellt werden. Die digitalen Zenitkamarasysteme TZK2-D und DIADEM wurden in verschiedenen Gebieten in Norddeutschland und in der Schweiz erfolgreich für die Bestimmung von Lotrichtungen und Lotabweichungen zur hochgenauen lokalen und regionalen Schwerefeldbestimmung eingesetzt.

Mit dem Zenitkamarasystem TZK2-D wurde eine dicht vermessene, hochpräzise lokale astrogeodätische Geoidprofilbestimmung über einem geophysikalischen Störkörper durchgeführt. Über Distanzen von einigen Kilometern kann der lokale Schwerefeldverlauf mit Millimetergenauigkeit bereitgestellt werden. Mögliche Einsatzbereiche für die hochaufgelöste astrogeodätische Erfassung von Schwerefeldfeinstrukturen mit den digitalen Zenitkamarasystemen liegen im Bereich der genauen Geoidbestimmung für Tunnelbauprojekte, des Anlagenbaus und der Geophysik.

1. Einleitung

Analoge astrogeodätische Messverfahren wurden verstärkt bis in die neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts für die Messung von Lotrichtungen und Lotabweichungen eingesetzt. Als besonders geeigneter astrogeodätischer Instrumententyp haben sich photographische Zenitkamaras erwiesen, die an verschiedenen Institutionen in Europa entwickelt und intensiv zur Schwerefeldbestimmung eingesetzt wurden (z.B. Gessler 1975, Wissel 1982, Chesi 1984, Wildermann 1988, Bürki 1989). Bei der Zenitkamarasymethode sind im Gegensatz zu visuellen Verfahren (z.B. Astrolabium) nur kurze Beobachtungszeiten erforderlich und der automatisierte, photographische Beobachtungsvorgang führt zu genauen und objektiven Resultaten. Die Ausmessung der analogen Messbilder wurde manuell an Präzisionskomparatoren durchgeführt, wodurch der eigentliche Beobachtungsaufwand – die Richtungsmessung zu Sternen – vom Feld ins Büro verlagert wurde. Die an heutigen Maßstäben gemessene sehr zeitintensive und daher unwirtschaftliche Prozessierung der Messbilder führte jedoch vor einigen Jahren zu einem rückläufigen Einsatz von photographischen Zenitkamaras für die Schwerefeldbestimmung.

In jüngerer Zeit hat die Verfügbarkeit von leistungsfähigen CCD-Sensoren astrogeodätische Verfahren wieder in das Blickfeld der Forschung gerückt und an der Universität

Hannover und ETH Zürich zur Entwicklung der beiden digitalen Zenitkamarasysteme TZK2-D (Transportable Zenitkamera 2 – Digitalsystem) und DIADEM (Digital Astronomical Deflection Measuring System) geführt, die die Online-Bereitstellung von Lotabweichungen ermöglichen (Müller et al. 2004, Bürki et al. 2004, Hirt 2004, Hirt und Bürki 2002). Durch Nutzung der CCD-Technologie für die Bilderfassung stehen die Beobachtungsdaten unmittelbar nach der Messung in digitaler Form zur Verfügung und können mit einer bildverarbeitenden Software vollautomatisiert ausgewertet werden (Hirt und Seeber 2002, Hirt 2001). Hierdurch wird der wesentliche konzeptionelle Nachteil der früheren photographischen Zenitkammermessung – der aufwändige manuelle Komparatoreinsatz – überwunden und die Wirtschaftlichkeit der astrogeodätischen Messung deutlich verbessert. Durch Kombination mit satellitengestützten Positionierverfahren (z.B. GPS) ist es zudem möglich geworden, Lotrichtungsmessungen auf prinzipiell frei wählbaren Beobachtungspunkten durchzuführen. Die unabhängig von Festpunkten durchführbare Lotabweichungsbestimmung erlaubt die flexible Anordnung der Messpunkte (Verteilung, Dichte) entsprechend der zu lösenden Aufgabenstellung. Mit der erfolgreichen Entwicklung und Erprobung von leistungsfähigen digitalen Zenitkamarasystemen wurde eine neue Ära der geodätischen Astronomie mit interessanten Perspektiven im Bereich der lokalen und regionalen Schwerefeldbestimmung eingeleitet.



Abb. 1: Die digitalen Zenitkamarasysteme DIADEM (links) und TZK2-D in Zimmerwald

Der Aufbau und die Leistungsdaten des an der ETH Zürich entwickelte Systems DIADEM und der in Hannover konstruierten TZK2-D sind sehr ähnlich (Abb. 1). Für Details zum di-

gitalen Messsystem DIADEM, das zusätzlich mit Servomotoren zur automatisierten Horizontierung ausgerüstet wurde und einen vollständig automatischen Messablauf ermöglicht, wird auf Bürki et al. (2004) sowie Hirt und Bürki (2002) verwiesen. In diesem Beitrag wird die instrumentelle Realisierung des in Hannover entwickelten Zenitkamarasystems TZK2-D vorgestellt. In den nachfolgenden Abschnitten wird der Mess- und Auswertablauf kurz skizziert und die Leistungsfähigkeit (Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit) der Zenitkamarasysteme für die Lotabweichungsbestimmung diskutiert. Einen Schwerpunkt des Beitrages bildet eine hochaufgelöste profilhafte Geoidbestimmung, die mit dem System TZK2-D in einem Testgebiet nahe Hannover durchgeführt wurde. Abschließend werden weitere Einsatzmöglichkeiten der Zenitkamarasysteme für verschiedene geodätische Fragestellungen aufgezeigt.

2. Instrumentelle Realisierung des Systems TZK2-D

Am Institut für Erdmessung wurde das digitale Zenitkamarasystem TZK2-D in den Jahren 2001 bis 2003 auf Grundlage der photographischen (analogen) Zenitkamera TZK2 entwickelt, die in Wissel (1982) ausführlich beschrieben ist. Das Objektiv Mirotar (Spiegellinsensystem, Brennweite = 1020 mm, Öffnung = 200 mm) und der Präzisionsdrehkreis der TZK2 bilden die Grundelemente für das neue digitale Messsystem, dessen konventionelle Sensorik vollständig durch hochgenaue Digitalsensorik ersetzt wurde.

Für die digitale Bilderfassung wird die CCD-Kamera KX2E (Firma Apogee) genutzt, die in der Fokalebene des Mirotar-Objektivs an einer neu konstruierten motorisierten Fokussiereinheit montiert ist und die früheren Fotoplatten ersetzt. Die Kamera verfügt über 1.5 Millionen Pixel. Bei einem Gesichtsfeld von etwa 0.42 Quadratgrad ($0.79^\circ \times 0.53^\circ$) ergibt sich ein Bildmaßstab von 1.86" pro Pixel. Bereits bei kurzen Belichtungszeiten von etwa 0.4 s wird die instrumentelle Grenzgröße von Magnitude 13 bis 14 erreicht, obwohl die Zenitkamera der scheinbaren täglichen Sternbewegung nicht nachgeführt wird.

Bei astrogeodätischen Messverfahren muss grundsätzlich der Bezug zur physikalischen Lotrichtung hergestellt werden. Hierfür kommen zwei neuartige hochauflösende Neigungssensoren vom Typ HRTM (Firma Lippmann Geophysikalische Messgeräte) zum Einsatz, die in orthogonaler Ausrichtung zueinander auf dem Drehkreis der TZK2-D montiert sind. Die Neigungssensoren werden zur genauen Einrichtung der Kameradrehachse in der Lotrichtung verwendet. Für die spätere rechnerische Korrektur registrieren die HRTM-Sensoren während der Akquisition der Zenitaufnahmen die verbleibende Restneigung der Kamera gegenüber der Lotrichtung. Die Neigungssensoren HRTM wurden umfassend von Hirt und Kahlmann (2004) untersucht. Sie erreichen im Feldebetrieb eine Genauigkeit von 0.05" und besser für die auf die Lotrichtung bezogenen Neigungskorrekturen.

Ein GPS-Empfänger (Typ Ashtech Z12) wird für die präzise Messung der Belichtungsepochen und die Bereitstellung von geodätischen Koordinaten verwendet. Die Belichtungssteuerung der CCD-Kamera ist über eine Hardwareverbindung mit dem Ereigniseingang (Event Marker) des GPS-Empfängers verbunden. Das elektronische Steuersignal (TTL) für die Belichtung wird synchron zum Verschluss der CCD-Kamera und zum GPS-Empfänger geleitet, der den Anfang der Belichtung auf der GPS-Zeitskala mit Mikrosekundengenauigkeit registriert. Die erreichbare Genauigkeit für die Zeitmessung ist jedoch aufgrund des Bewegungsverhaltens des Verschlusses begrenzt. Durch sorgfältige Verschlusskalibrierung

kann eine äußere Genauigkeit von 1 Millisekunde erreicht werden, die einem Fehleranteil der astronomischen Länge von umgerechnet 0.015" entspricht (Hirt 2004, Käker 2003). Die Bestimmung der geodätischen Koordinaten der Lotabweichungsstation wird mit GPS im differentiellen Modus unter Verwendung verfügbarer Satellitenpositionierungsdienste (z.B. SAPOS in Deutschland) durchgeführt.

Die Sensorik des digitalen Zenitkamarasystems wird über einen Industrierechner gesteuert, der auch zur Speicherung der Messdaten eingesetzt wird. Zur Überwachung des Messvorgangs dient ein kabelloser Tablett-PC, der über ein Funknetzwerk (WLAN) mit der Rechereinheit verbunden ist. Die Stromversorgung des Gesamtsystems wird über wechselbare 12 Volt Akkumulatoren realisiert. Zur Erleichterung der Feldarbeiten sind alle Komponenten des Zenitkamarasystems (Kamera, GPS, Sensorik und Rechereinheit) in einem rollbaren Stativwagen integriert, der auf dem Beobachtungspunkt durch ausfahrbare Motorzylinder die notwendige Standfestigkeit erhält (vgl. Abb. 1).

3. Datenakquisition

Lotabweichungsmessungen können mit den digitalen Zenitkamarasystemen bei klarem Himmel durchgeführt werden, wenn mindestens die bürgerliche Dämmerung erreicht ist. Das digitale Zenitkamarasystem TZK2-D wird mit einem Transportfahrzeug zu den Lotabweichungsstationen befördert und dort über Verladeschienen aus dem Fahrzeug gerollt. Das System DIADEM ist in einem speziell eingerichteten Autoanhänger installiert, wodurch das Ein- und Ausladen entfällt. An die Aufstellfläche werden keine besonderen Anforderungen gestellt: Beton, Kies, Asphalt oder Sandflächen eignen sich gleichermaßen. Auf der Lotabweichungsstation werden die Motorzylinder mit den Stativfüßen ausgefahren. Die anschließende Horizontierung der Kamera wird mit Hilfe der Neigungssensoren durchgeführt und gelingt in der Regel bis auf etwa 2". Da die Lage der Fokalebene des Objektivs trotz fester Brennweite von der Temperatur abhängt, ist die Fokussierung der Zenitkamera notwendig. Hierfür wird die neu entwickelte motorisierte Fokussiereinheit verwendet.

Nach Abschluss der Messvorbereitungen wird die Datenakquisition vollautomatisch in zwei Lagen durchgeführt, die sich azimuthal um 180° unterscheiden. Die Messung in zwei Lagen kommt zum Einsatz, um die instrumentellen Nullpunktfehler (Nullpunkte der Neigungssensoren und Exzentrizität der CCD-Kamera gegenüber der Kameradrehachse) zu eliminieren. Auf Grundlage eines konfigurierbaren Messprogramms (Anzahl von Wiederholungsmessungen und Zenitaufnahmen pro Lage) öffnet die Kamera ihren Verschluss und bildet das zenitale Sternfeld während kurzer Belichtungszeiten (≤ 1 s) auf den CCD-Sensor ab. Während der Belichtungsserie werden die Neigungswerte der HRTM-Sensoren aufgezeichnet, der Verschlusszustand registriert und die Zeitmessung mit GPS durchgeführt. Für die Zweilagenmessung dreht ein Servomotor die Kamera azimuthal zwischen Lage 1 und 2. Die Erfassung von 30 bis 60 Wiederholungsmessungen nimmt auf einer Station etwa 20 bis 30 Minuten in Anspruch.

4. Datenprozessierung

Für die vollautomatische Erfassung und Prozessierung der astrometrischen Datensätze wird das bildverarbeitende Softwaresystem AURIGA (Automatic Realtime Image Processing System for Geodetic Astronomy) eingesetzt, das am Institut für Erdmessung seit dem Jahr 2000 entwickelt wird. AURIGA erlaubt die Auswertung der akquirierten Zenitaufnahmen in wenigen Sekunden und ermöglicht somit die Online-Bereitstellung der Lotabweichungen in Echtzeit. An dieser Stelle wird nur ein kurzer Überblick über die grundsätzliche Abfolge der Auswerteschritte gegeben, für eine umfassende, vollständige Darstellung der Datenprozessierung von Zenitaufnahmen wird auf Hirt (2004) verwiesen.

Die Datenprozessierung beginnt mit der Detektion der in den Zenitaufnahmen abgebildeten Sterne, die mit einem Verfahren zur Bildsegmentierung durchgeführt werden kann. Die Bildkoordinaten der detektierten Segmente werden durch Schwerpunktberechnung oder durch Zentrierung mit einer Punktübertragungsfunktion bestimmt. Eine Zenitaufnahme enthält – je nach abgebildeter Himmelsregion – einige 10 bis 100 Bildsterne, deren gemessene Koordinaten als Richtungsbeobachtungen dienen und eine Genauigkeit von etwa 0.3" aufweisen.

Geeignete Referenzsterne, die in der Auswertekette die Funktion koordinatenmäßig bekannter Anschlusspunkte erfüllen, werden auf Grundlage der hochgenauen Sternkataloge Tycho-2 (Hog et al. 2000) und UCAC (Zacharias et al. 2004) mit einer Genauigkeit von wenigen 0.01" bereit gestellt. Beide Sternverzeichnisse stellen Verdichtungen des Hipparcos-Kataloges dar und ermöglichen damit den Anschluss an das zälestische Referenzsystem ICRS. Tycho-2 und UCAC enthalten Referenzkoordinaten für mehrere Millionen Sterne über die gesamte Sphäre. Geeignete Sternfelder aus dieser umfangreichen Referenzdatenbasis werden in Abhängigkeit genäherter Standortkoordinaten, der Belichtungsepoche und der Gesichtsfeldgröße selektiert.

Referenzsterne und Bildsterne werden im Rahmen der Sternidentifizierung mit einem Algorithmus zur Punktmustererkennung einander zugeordnet. Dieser Teilprozess der Auswertekette ist die notwendige Voraussetzung für die sich anschließende astrometrische Datenreduktion, die mit einfachen Transformationsmodellen (z.B. Helmert-Transformation) durchgeführt wird. Die Interpolation der Kameradrehrichtung in das astrometrisch reduzierte Sternfeld ist das zentrale Element in der Auswertekette und wird für beide Kameralagen getrennt in einem iterativen Verfahren durchgeführt.

Die Koordinaten der Kameradrehrichtung können durch Berücksichtigung kleinerer Korrekturen auf die physikalische Lotrichtung umgerechnet werden, die durch die astronomische Breite Φ und Länge Λ definiert ist. Zur Umrechnung gehört insbesondere die Neigungskorrektur, die der rechnerischen Korrektur des Stehachsfehlers entspricht. Die Lotabweichungen (\mathbf{x}, \mathbf{h}) im Beobachtungspunkt ergeben sich abschließend als Differenz der astronomischen Koordinaten (Φ, Λ) und der geodätischen Koordinaten (\mathbf{j}, \mathbf{l}):

$$\mathbf{x} = \Phi - \mathbf{j} \qquad \mathbf{h} = (\Lambda - \mathbf{l}) \cos \mathbf{j}$$

5. Leistungsfähigkeit

5.1 Genauigkeit der Lotabweichungen

Ein Schwerpunkt der bisherigen Arbeiten wurde auf die Beherrschung der wirksamen Fehlerquellen und Durchführung von Feldmessungen zur Bestimmung der inneren und äußeren Genauigkeit der Lotabweichungen gelegt. Durch umfassende instrumentelle Kalibrierung können die instrumentell bedingten, systematisch wirkenden Fehleranteile weitgehend reduziert werden. Zu den teilweise neu entwickelten und erprobten Kalibrierverfahren gehören die Kalibrierung des Verschlussverhaltens, die zälestische Kalibrierung der Maßstabsfaktoren und des Scherwinkels der Neigungssensoren sowie die Kalibrierung des azimutabhängigen Restfehlers. Eine detaillierte Darstellung dieser Verfahren, die eine umfassende Kalibrierung der Zenitkamarasysteme erlauben, wird von Hirt (2004) gegeben.

Die innere Genauigkeit der Lotabweichungen ergibt sich als Streuung wiederholt durchgeführter Beobachtungen und beträgt zwischen 0.15" und 0.3" für die (\mathbf{x}, \mathbf{h}) -Einzelwerte. Die wesentliche Fehlerquelle stellt die astrometrische Bestimmung der Drehrichtung dar. Durch Mittelwertbildung können die zufälligen Fehleranteile reduziert werden, so dass eine innere Genauigkeit für die (\mathbf{x}, \mathbf{h}) -Mittelwerte von 0.05" bis 0.1" erreicht wird.

Für den Nachweis der äußeren Genauigkeit wurden mit dem digitalen Zenitkamarasystem TZK2-D in über 30 Nächten umfangreiche Beobachtungen auf Lotabweichungsstationen in Hamburg, Hannover, Benthe und in der Schweiz durchgeführt, die über geeignete Vergleichswerte (direkt gemessen oder indirekt aus gravimetrischen Messungen berechnet) verfügen. Unter anderem konnte der ehemalige Standort des photographischen Zenitrohres (PZT) in Hamburg für Vergleichsmessungen in fünf Nächten genutzt werden. In Hannover wurden zudem auf einer neuen Referenzstation in 14 Nächten wiederholt Lotabweichungen bestimmt; die Messungen decken ein weites Spektrum an äußeren Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, Wetterlagen und daraus resultierende, wechselnde Refraktionseinflüsse) sowie unterschiedliche Sternfelder ab. Des Weiteren wurden die beiden Zenitkamarasysteme TZK2-D und DIADEM für Parallelbeobachtungen auf verschiedenen Stationen in der Schweiz eingesetzt. Als wesentliches Ergebnis der umfassenden Vergleichsbeobachtungen kann festgehalten werden, dass eine äußere Genauigkeit zwischen 0.10" und 0.15" für die Lotabweichungskomponenten erreicht wurde (z.B. Hirt et al. 2004, Hirt 2004). Dieses Genauigkeitsniveau liegt etwa eine halbe Größenordnung über der mit analogen Zenitkamaras erreichten äußeren Genauigkeit, die mit 0.5" angegeben wird (vgl. Bürki 1989, Seeber und Torge 1985, Wissel 1982).

5.2 Wirtschaftlichkeit

Mit den digitalen Zenitkamarasystemen können Lotabweichungen sehr wirtschaftlich bestimmt werden. Bei einer Rüstzeit von etwa 10 min für den Auf- und Abbau des Systems und einer Beobachtungsdauer unter 30 min für die Akquisition von 30 bis 60 Einzellösungen können in klaren Nächten 10 und mehr Lotabweichungsstationen gemessen werden. Insbesondere bei kurzen Stationsabständen ist es möglich, einen Durchschnitt von 1.5 bis 2 Stationen pro Stunde inklusiv Umsetzung zwischen den Stationen zu erreichen und dadurch profilhafte Schwerefeldbestimmungen zügig durchzuführen.

Während im Feldbetrieb mit photographischen Zenitkamaras ähnlich kurze Beobachtungszeiten erreicht wurden, ist die Online-Lotabweichungsbestimmung mit digitalen Messsystemen früheren Zenitkaramessungen insbesondere im Auswerteablauf deutlich überlegen: Für die frühere Auswertung einer Lotabweichungsstation wurde aufgrund der manuellen Ausmessung der Sternabbildungen am Komparator eine Bearbeitungszeit von mehreren Stunden angesetzt (Seeber und Torge 1985). Da die Lotabweichungen vom entwickelten Softwaresystem AURIGA online bereitgestellt werden und der Auswerteaufwand in der Praxis daher vernachlässigt werden kann, nimmt die Lotabweichungsbestimmung pro Station insgesamt etwa eine halbe Stunde in Anspruch. Im Vergleich zu früheren Beobachtungen ist mit der Nutzung digitaler Zenitkamarasysteme eine erhebliche Wirtschaftlichkeitssteigerung von etwa einer Größenordnung verbunden.

6. Anwendungsbeispiele

6.1 Lokale Geoidbestimmung

Ein besonders interessantes Anwendungsfeld für die neuen digitalen Instrumente der geodätischen Astronomie stellt das traditionelle astronomische Nivellement dar, das als einfaches und effizientes Verfahren für die Bestimmung lokaler Schwerefeldprofile nutzbar ist. Durch dichte, profilhafte Anordnung der Lotabweichungsstationen kann das lokale Lotabweichungsfeld und damit das lokale Schwerefeld hochauflösend erfasst werden. Eine exemplarisch durchgeführte lokale Geoidprofilbestimmung soll das Potenzial der astrogeodätischen Methode verdeutlichen. Im südlich von Hannover gelegenen Testgebiet Benthe befindet sich der Benthener Salzstock im Untergrund (z.B. Seeber und Torge 1985). Der Salzstock weist im Vergleich zu den umliegenden Gesteinen eine geringere Dichte auf und prägt somit als geophysikalischer Störkörper das lokale Schwerefeld. In der Örtlichkeit wurde an der Oberfläche ein 9 km langes Profil mit 26 Stationen vermarktet, das den etwa 4 km breiten Salzstock vollständig überdeckt. Im Frühjahr 2004 wurden auf den festgelegten Stationen mit dem Zenitkamarasystem TZK2-D in fünf Nächten insgesamt 39 Lotabweichungsbestimmungen durchgeführt. 11 Stationen wurden in unterschiedlichen Nächten wiederholt bestimmt, um Genauigkeitsaussagen treffen zu können. Die Doppelbesetzungen im Testgebiet Benthe zeigen eine Wiederholgenauigkeit in der Größenordnung von 0.1".

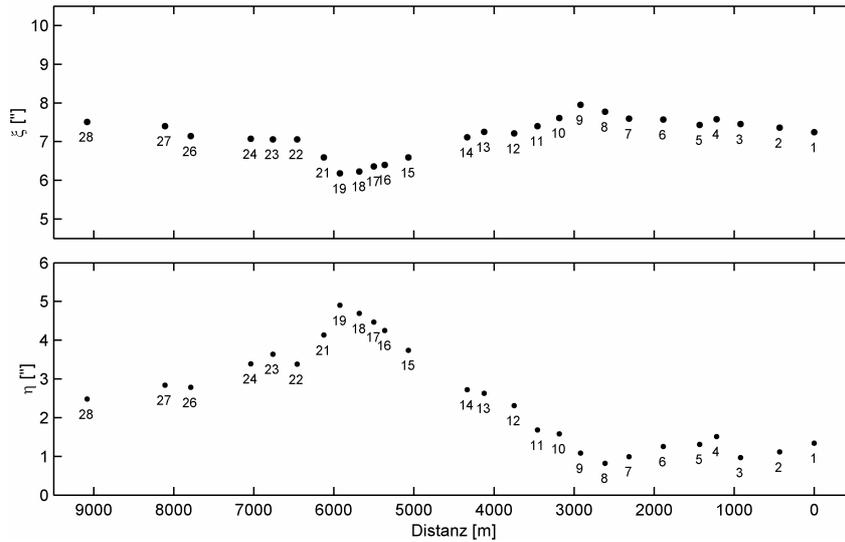


Abb.2: Verlauf der Lotabweichungen (x, h) im Profil Benthe

Abb. 2 zeigt einen glatten Verlauf der Lotabweichungskomponenten (x, h) im Profilverlauf. In der Variationsbreite von etwa 4" macht sich bereits der gravitative Einfluss des Salzstocks bemerkbar. Der Geoidverlauf kann nun in einfacher Weise mit den Gleichungen des astronomischen Nivellements berechnet werden. Ausgehend von der Lotabweichungskomponente

$$e_i = 0.5 (x_i + x_{i+1}) \cos a + 0.5 (h_i + h_{i+1}) \sin a,$$

die die gemittelte Neigung der Äquipotentialfläche zwischen zwei aufeinander folgenden Profilpunkten i und $i+1$ angibt, ergibt sich durch Summation der Geoidhöhenunterschiede

$$dN_i = e_i \cdot ds$$

die Differenz der Geoidundulation

$$DN = -\sum dN_i - E_{1n}$$

zwischen Anfangspunkt 1 und Endpunkt n des Profils. Dabei ist a das Azimut des Wegstücks der Länge ds zwischen je zwei benachbarten Stationen (nach Torge 2003). E_{1n} ist die orthometrische Korrektur zur Berücksichtigung der Lotlinienkrümmung. Bei weitgehend ebenem Geländeverlauf wie im Testgebiet Benthe oder bei Aufgabenstellungen, die Schwerfeldverläufe an der Oberfläche benötigen, spielt dieser Term nur eine untergeordnete Rolle.

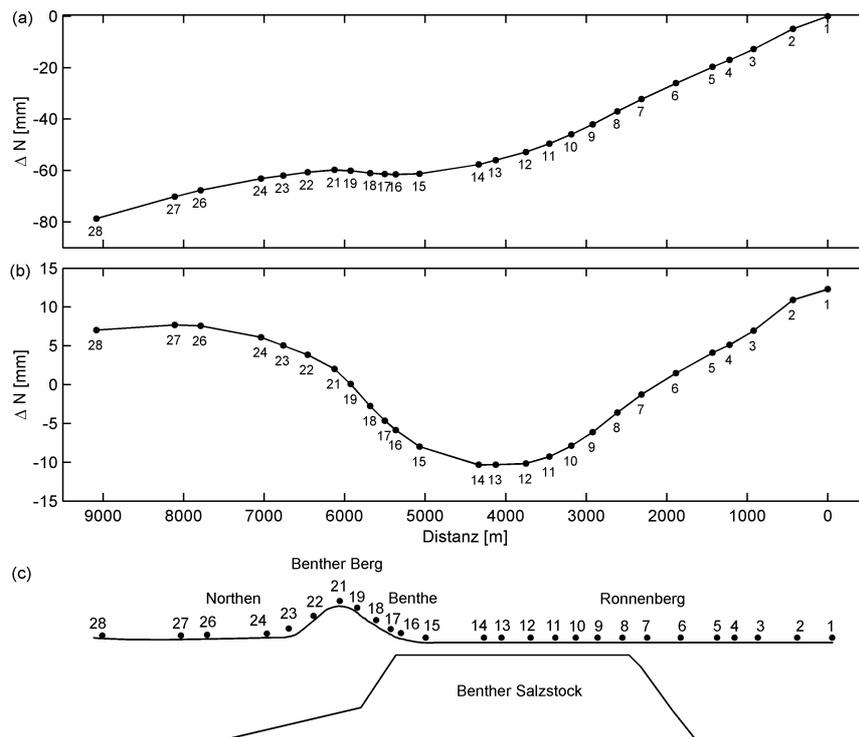


Abb.3: Astrogeodätisches Geoidprofil Benthe (a und b) und Lage des Salzstocks (c)

In Abb. 3a ist das Ergebnis der Geoidprofilberechnung dargestellt. Die Geoidhöhe ändert sich bei einem glatten Verlauf um etwa 8 cm über eine Profillänge von 9 km. Nach Reduktion des langwelligen Regionalanteils durch einfache Tiefpassfilterung (Trendabspaltung) zeigt sich deutlich eine typische Senke im Profilverlauf mit einer Amplitude von etwa 2 cm (Abb. 3b), die auf den gravitativen Einfluss des Salzstocks (Abb. 3c) zurückzuführen ist.

Einfache Fehlerfortpflanzung mit der Bogenformel ergibt, dass bei einer Genauigkeit von $0.15''$ ($0.10''$) für die azimutale Lotabweichungskomponente e und einem durchschnittlichen Stationsabstand von etwa 350 m der einzelne Geoidhöhenunterschied dN_i mit einer Standardabweichung von 0.25 mm (0.17 mm) ermittelt werden kann (vgl. Hirt 2004). Bei insgesamt 25 summierten Inkrementen folgt eine Standardabweichung des Geoidhöhenunterschiedes DN über das gesamte Profil von 1.3 mm (0.85 mm). Einerseits ist diese Genauigkeitsabschätzung aufgrund der vernachlässigten orthometrischen Korrektur E_{1n} etwas zu optimistisch. Andererseits verdeutlicht dieses Beispiel, dass das astronomische Nivellement für die Übertragung von Geoidhöhenunterschieden mit Millimetergenauigkeit über Distanzen von einigen Kilometern angewendet werden kann.

6.2 Regionale Geoidbestimmung

In Mittelgebirgen und im Hochgebirgsraum stellen astrogeodätische Lotabweichungen eine wertvolle Beobachtungsklasse dar, die nach aktuellem Kenntnisstand neben Schwereanomalien zum Erreichen der Zentimetergenauigkeit notwendig ist (z.B. Schödlbauer 2000 und Marti 1997). Im Herbst 2003 wurden die digitalen Systeme TZK2-D und DIADEM im Rahmen der Messkampagne CHGeo2003 für die Verdichtung des bestehenden Schweizerischen Lotabweichungsfeldes eingesetzt (Müller et al. 2004, Brockmann et al. 2004). Insgesamt konnten auf 68 regional gut verteilten Stationen Lotabweichungen bestimmt werden, die zu einer deutlichen Verbesserung des neuen Schweizer Geoidmodells auf dem Weg zur Zentimetergenauigkeit beigetragen haben (vgl. Marti 2002, 2004). Die Messung weiterer hochgenauer Lotabweichungen könnte daher auch für die Schwerefeldmodelle anderer Gebirgs- bzw. Alpenländer von Bedeutung sein.

7. Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass die lokale und regionale hochpräzise Lotabweichungsbestimmung mit den digitalen Zenitkamarasystemen TZK2-D und DIADEM sehr wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Ein besonderes Potenzial bietet die lokale astrogeodätische Geoidbestimmung nach dem Prinzip des astronomischen Nivellements. Der Abstand benachbarter Stationen bestimmt hierbei direkt die Auflösung und die erreichbare Genauigkeit. Durch ausreichend dichte Anordnung der astrogeodätischen Beobachtungsstationen ist es möglich, die Schwerefeldfeinstruktur sehr genau zu erfassen und damit den hochfrequenten Spektralbereich des Erdschwerefeldes zu erschließen, über den bislang nur wenig empirisch gewonnene Erkenntnisse vorliegen.

Mögliche Anwendungsfelder für die profilhafte lokale astrogeodätische Geoidbestimmung mit digitalen Zenitkamarasystemen liegen neben der Lokalisierung und Modellierung von geophysikalischen Störkörpern in der lokalen Validierung vorhandener gravimetrischer Schwerefeldmodelle. Ein weiteres Einsatzgebiet stellt der Bereich des Anlagenbaus dar. Insbesondere die Justierung zukünftiger Teilchenbeschleuniger (TESLA in Deutschland oder New Linear Collider NLC in den USA) erfordert hochpräzise und hochaufgelöste Informationen über den lokalen Schwerefeldverlauf mit Submillimetergenauigkeit über einige 100 m (z.B. Schwarz 1998, Schlösser und Herty 2002 und Becker et al. 2002) bis Kilometer. Hier könnte das hohe Potenzial von digitalen Zenitkamarasystemen durchaus genutzt werden, um die geforderten Schwerefeldinformationen hochaufgelöst – durch sehr dichte Anordnung der Lotabweichungsstationen – bereit zu stellen.

Ein weitere mögliche Anwendung für die digitalen Zenitkamarasysteme liegt in der Lotabweichungsbestimmung in ingenieurgeodätischen Netzen höchster Präzision, insbesondere mit Einbezug der Höhenkomponente (z.B. Portalnetze im Tunnelbau). Hier werden genaue Lotabweichungen für die Reduktion terrestrischer Messelemente auf das Ellipsoid benötigt. Es kann erwartet werden, dass die neuen digitalen Zenitkamarasysteme wie die TZK2-D oder DIADEM zukünftig verstärkt für hochpräzise und wirtschaftliche Lotabweichungsbestimmungen eingesetzt werden, um Lösungen für die skizzierten Aufgabenstellungen zu liefern.

Literatur

- Becker, F., Coosemans, W. und Jones, M. (2002). Consequences of Perturbations of the Gravity Field on HLS Measurements. Proc. of 7th Int. Workshop on Accelerator Alignment (IWAA): 327-342, SPring-8, Japan.
- Brockmann, E., Becker, M., Bürki, B., Gurtner, W., Haefele, P., Hirt, C., Marti, U., Müller, A., Richard, P., Schlatter, A., Schneider, D. und Wiget, A. (2004). Realization of a Swiss Combined Geodetic Network (CH-CGN). EUREF'04 Symposium of the IAG Commission 1 - Reference Frames, Subcommission 1-3a Europe (EUREF), Bratislava, Slovakia.
- Bürki, B. (1989). Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea-Zone und deren geophysikalische Interpretation. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Nr. 40. Schweizerische Geodätische Kommission.
- Bürki, B., Müller, A. und Kahle, H.-G. (2004). DIADEM: The New Digital Astronomical Deflection Measuring System for High-precision Measurements of Deflections of the Vertical at ETH Zurich. Electronic Proceed. of the IAG GGSM2004 Meeting in Porto, Portugal.
- Chesi, G. (1984). Entwicklung einer tragbaren Zenitkammer und ihr Einsatz im 47. Parallel. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Graz. Veröffentlicht in: DGK C 287.
- Gessler, J. (1975). Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen. Wiss. Arb. Lehrst. für Geod., Phot. und Kart. Techn. Univ. Hannover Nr. 60.
- Hirt, C. (2001). Automatic Determination of Vertical Deflections in Real-Time by Combining GPS and Digital Zenith Camera for Solving the GPS-Height-Problem. Proceed. 14th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation: 2540-2551, Alexandria, VA.
- Hirt, C. und Bürki, B. (2002). The Digital Zenith Camera - A New High-Precision and Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Deflections of the Vertical. Proceed. of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki (ed. I. Tziavos): 161-166.
- Hirt, C. und Seeber, G. (2002). Astrogeodätische Lotabweichungsbestimmung mit dem digitalen Zenitkamarasystem TZK2-D. ZfV 127: 388-396.
- Hirt, C., Reese, B. und Enslin, H. (2004). On the Accuracy of Vertical Deflection Measurements Using the High-Precision Digital Zenith Camera System TZK2-D. Proceed. of the IAG GGSM2004 Meeting in Porto, Portugal (im Druck).
- Hirt, C. und Kahlmann, T. (2004). Hochpräzise Neigungsmessung mit dem elektronischen Pendelneigungssensor HRTM. ZfV 129: 266-276.
- Hirt, C. (2004). Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 253.
- Høg, E., Fabricius, C., Makarov, V. V., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwendiek, P. und Wicenec, A. (2000c). The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars. Astronomy and Astrophysics 355: L27-L30.

- Käker, R. (2003). Instrumentelle Untersuchung des digitalen Zenitkamarasystems. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Marti, U. (1997). Geoid der Schweiz 1997. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Nr. 56. Schweizerische Geodätische Kommission.
- Marti, U. (2002). Modelling of Differences of Height Systems in Switzerland. Proceed. of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki (ed. I. Tziavos): 378-383.
- Marti, U. (2004). High Precision combined geoid determination in Switzerland. Proceed. of the IAG GGSM2004 Meeting in Porto, Portugal (im Druck).
- Müller, A., Bürki, B., Hirt, C., Marti, U. und Kahle, H.-G. (2004). First Results from New High-precision Measurements of Deflections of the Vertical in Switzerland. Proceed. of the IAG GGSM2004 Meeting in Porto, Portugal (im Druck).
- Schlösser, M. und Herty, A. (2002). High Precision Survey and Alignment of Large Linear Colliders - Vertical Alignment. Proc. of 7th Int. Workshop on Accelerator Alignment (IWAA): 343-355, SPring-8, Japan.
- Schödlbauer, A. (2000). Geodätische Astronomie - Aussichten an der Schwelle zum 21. Jahrhundert. 25 Jahre Institut für Geodäsie, Schriftenreihe Studiengang Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München, Heft 60-1, S. 27-56.
- Schwarz, W. (1998). Die Vermessung von Teilchenbeschleunigern unter besonderer Berücksichtigung des geplanten, über 30 km langen Linearbeschleunigers. In: Schriftenreihe des DVW -Ingenieurvermessung aktuell, Bd. 32: 127-140.
- Seeber, G. und Torge, W. (1985). Zum Einsatz transportabler Zenitkamas für die Lotabweichungsbestimmung. ZfV 110: 439-450.
- Torge, W. (2003). Geodäsie. 2. Auflage. W. de Gruyter, Berlin, New York.
- Wildermann, E. (1988). Untersuchungen zur lokalen Schwerefeldbestimmung aus heterogenen Daten dargestellt am Beispiel der Geotraverse venezolanische Anden. Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 155.
- Wissel, H. (1982). Zur Leistungsfähigkeit von transportablen Zenitkamas bei der Lotabweichungsbestimmung. Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 107.
- Zacharias, N., Urban, S. E., Zacharias, M. I., Wycoff, G. L., Hall, D. M., Monet, D. G. und Raferty, T. J. (2004). The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2). The Astronomical Journal 127: 3043-3059.