

Citation: Hirt C. (2010) Anmerkungen zum Beitrag "Vergleichende Betrachtungen zur Höhenbestimmung mittels Digitalnivellement und DGPS in einem Vertikalprofil am Wendelstein" (Gedon, R., Heunecke, O, und Krack, K.), erschienen in Mitteilungen DVW Bayern 1/2008, pp 38-52. *Mitteilungen DVW Bayern* 1/2010, 113-120.

Anmerkungen zum Beitrag
“Vergleichende Betrachtungen zur Höhenbestimmung mittels
Digitalnivellement und DGPS in einem Vertikalprofil am
Wendelstein” (Gedon, R., Heunecke, O, und Krack, K.),
erschieden in Mitteilungen DVW Bayern 1/2008, pp 38-52.

von
Dr. Christian Hirt
Western Australian Centre for Geodesy,
Curtin University of Technology,
Perth, Australia

1. Einleitung

Im vorgenannten Beitrag beschäftigen sich die Autoren Richard Gedon, Otto Heunecke und Klaus Krack mit dem Vergleich vom Digitalnivellement und DGPS zur Höhenbestimmung entlang eines Vertikalprofiles. Der Beitrag stellt Ergebnisse von praktischen Höhenmessungen entlang einer 5 km langen Teststrecke mit einer Gesamthöhendifferenz von etwa 500 m vor. Die erzielten Ergebnisse sind besonders im Zusammenhang mit der gegenwärtigen Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) relevant (z.B. [6]) und vermitteln einen empirischen Einblick in die Genauigkeiten aktueller Höhenbestimmungen in bewegtem Gelände. Der Beitrag von Gedon et al. (2008) basiert auf einer Diplomarbeit, die mit materieller und logistischer Unterstützung durch das Bayerische Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG) durchgeführt wurde (Heunecke 2009, persönliche Mitteilung).

Abschnitt 9 des Beitrages von Gedon et al. (2008) widmet sich der Überprüfung des für die Untersuchungen verwendeten Quasigeoidmodells „BayernSatNiv“ des Bayerischen Landesamtes für Vermessung und Geoinformation. Dieses Quasigeoidmodell kann für die Zusammenführung der Höhensysteme (ellipsoidische DGPS-Höhen sowie nivellierte Gebrauchshöhen) genutzt werden. Zur Validierung des „BayernSatNiv“ Quasigeoides wenden die Autoren das astronomische Nivellement entlang kurzer Teilstücke ihres Vertikalprofiles an. Als Beobachtungen werden hierzu Lotabweichungen verwendet, die mit dem ICARUS Messsystem der ETH Zürich auf 6 Stationen aus Almkantaratdurchgängen bestimmt wurden.

Es ist erfreulich, dass die Autoren die Anstrengungen unternommen haben, das für ihre Untersuchungen verwendete Quasigeoidmodell „BayernSatNiv“ mit unabhängigen Lotabweichungsbeobachtungen zu überprüfen. Im Folgenden sollen einige kritisch-konstruktive Anmerkungen zu der im Aufsatz beschriebenen Methodik des astronomischen Nivellements und zur Darstellung von Messungen und Ergebnissen gemacht werden. Daran schließen sich einige Vorschläge zu ergänzenden Untersuchungen an, mit denen die Untersuchungen im Vertikalprofil Wendelstein weitergeführt werden könnten.

2. Anmerkungen zum Beitrag

1. Die Autoren machen keine Angaben zur Genauigkeit der Lotabweichungsbestimmung mit dem Messsystem ICARUS. Es finden sich auch keine Informationen über die Anzahl beobachteter Sterndurchgänge. Entsprechende Informationen wären jedoch zur Beurteilung der Vergleiche ICARUS vs. BayernSatNiv sinnvoll. Das Messsystem ICARUS kann zur Lotabweichungsbestimmung mit einer Genauigkeit etwa zwischen 0.2“ und 0.5“ benutzt werden, die von der Sternanzahl sowie der Größe von Refraktionsanomalien anhängig ist.

2. Die Autoren geben auf Seite 50 vereinfachte Formeln des astronomischen Nivellements an, weisen allerdings nicht darauf hin, dass sie die Korrekturterme der normalen Korrektion (auch als Normalhöhenreduktion bekannt, siehe Torge (2003) [17], S. 228) vernachlässigt haben. Es findet sich auch keine Abschätzung, wie groß die Auswirkungen dieser Vereinfachung auf die Resultate sind.

3. Die Autoren verwenden ihre Lotabweichungsbeobachtungen, punktbezogene Größen, zur Berechnung von Differenzen von Quasigeoidhöhen entlang kurzer Teilstrecken. Formal wird jedoch ein für die Teilstrecke repräsentativer Lotabweichungswert gebraucht, der – insbesondere im Gebirge – nicht notwendigerweise der Lotabweichung an einem der Endpunkte entspricht. Auf die vorgenommene Vereinfachung und deren mögliche Auswirkungen auf die Resultate wird im Beitrag nicht hingewiesen. Im einfachsten Fall können die Lotabweichungen zwischen Anfangs- und Endpunkt eines kurzen Geradenstückes gemittelt werden, siehe [17]. S. 270. Da nur wenige Beobachtungen der Lotabweichung vorliegen, ist dies im Beitrag von Gedon et al. (2008) nicht direkt möglich (eine Lösung besteht in der Hinzunahme von hochauflösenden digitalen Geländemodellen zur Bereitstellung der fehlenden Information).

4. Auf Seite 50 ihres Beitrages stellen die Autoren die Vergleiche zwischen Differenzen von Quasigeoidhöhen aus Lotabweichungen und solchen aus der BayernSatNiv Datei vor. Die Vergleiche werden dabei stückweise entlang von 10 Profilabschnitten zwischen 64 m und 112 m Länge vorgenommen. Die GPS-gestützte Gebrauchshöhenbestimmung wird allerdings nur in seltenen Ausnahmefällen entlang solch sehr kurzer Distanzen zur Anwendung kommen. Daher sind die Ergebnisse dieser Vergleiche nur von geringer Bedeutung für die Bewertung und Anwendung des verwendeten Quasigeoidmodels in der Praxis. Insbesondere lassen die durchgeführten Vergleiche mit astrogeodätischen Lotabweichungen keine

fundierte Rückschlüsse auf die Genauigkeit des verwendeten Quasigeoidmodells für die GPS-gestützte Gebrauchshöhenübertragung über die gesamte Länge ihres Vertikalprofils zu.

5. Statt einer stichprobenartigen Überprüfung des Quasigeoides auf sehr kurzen Profilstrecken (wie im Beitrag vorgenommen) wäre daher eine linienhafte Validierung entlang der Nivellementstrecke aussagekräftiger, besonders zur besseren Lokalisierung und Interpretation von Widersprüchen zwischen astronomischen Nivellement und Quasigeoid. Für die genaue Rekonstruktion des Lotabweichungsfeldes zwischen den Messpunkten stehen geeignete topographiebasierte Verfahren zur Verfügung, auf die am Ende noch eingegangen wird.

6. Aus Vergleichen entlang von 10 kurzen Profilabschnitten erhalten die Autoren maximale Differenzen von 2.8 mm zwischen Differenzen von Quasigeoidundulationen aus Modell (BayernSatNiv) und Beobachtung (ICARUS- Lotabweichungen). Die Autoren stellen auf Seite 51 fest, dass es sich um „ein wirklich erstaunliches Ergebnis!“ handelt. Das ist es in der Tat, da durch einige der mitgeteilten Differenzen (Tab. 5 auf Seite 50 im Beitrag von Gedon et al. 2008) erhebliche Widersprüche zum Ausdruck kommen. Diese werden im Beitrag nicht geklärt. Auf den ersten Blick mögen die Beträge der Abweichungen klein erscheinen und auf mm-Genauigkeit des verwendeten Quasigeoidmodells hinweisen. Die Grösse der Differenzen sollte jedoch in Relation zu den kurzen Bezugsstrecken von teilweise nur 70 m gesetzt werden. Dies kann auf einfache Weise geschehen, indem die Differenzen in Winkelabweichungen ausgedrückt werden. Tabelle 1 zeigt, welchen Winkelabweichungen die in Tabelle 5 (Gedon et al. 2008) gezeigten Differenzen entsprechen.

Tabelle 1: Resultate des Vergleiches zwischen astronomischem Nivellement und Quasigeoidmodell, ausgedrückt in metrischen Differenzen und Winkelabweichungen

Aus Gedon et al. 2008, Tab. 5			Umrechnung	
Teilstück Von-Nach	Distanz [m]	Differenz [mm]	Differenz [mm] auf 1000 m	Winkelabweichung [Bogensekunden]
SN38-LB36	110	-0.4	-3.6	-0.8
LB30-LB34	68	2.8	41.2	8.6
LB30-LB29	67	-2.2	-32.8	-6.8
PP108-LB28	110	2.7	24.5	5.1
PP108-LB27	64	0.5	7.8	1.6
PP117-LB21	85	1.4	16.7	3.4
PP117-LB20	112	-0.4	-3.6	-0.7
SB17-PP120	92	0.8	8.7	1.8
SB17-PP121	67	0.0	0.0	0.0
LB15-PP124	104	0.1	1.0	0.2

Die nun etwas abgewandelte Form der Widerspruchsdarstellung macht deutlich, dass auf drei Teilstücken Winkeldifferenzen zwischen Modell und Beobachtung von 5.1“ bis 8.6“ auftreten. Hier wären weitere Untersuchungen wünschenswert, um die Ursache der

Differenzen (ICARUS-Beobachtung, Auswertung und vorgenommene Vereinfachungen oder Quasigeoidmodell) zu klären. Dies gilt insbesondere für die beiden Teilstücke um Punkt LB30 mit Widersprüchen von 8.6“ und -6.8“. Sicherlich ist der Umstand, dass das BayernSatNiv mit mm-Auflösung verwendet wurde, von Bedeutung. Unter der „worst-case“ Annahme maximaler Rundungsfehler von knapp 0.5 mm je Endpunkt der Teilstücke, ergibt sich theoretisch ein maximal möglicher Einfluss auf die Winkelabweichungen von etwa 3“ bei kurzen Strecken von 67 m. Dies alleine vermag die Größe der aufgetretenen Widersprüche jedoch nicht erklären.

7. Die von Gedon et al. (2008) vorgenommene Feststellung „das BayernSatNiv [Quasigeoid] weist demnach im Bereich der Messlinie eine sehr hohe Nachbarschaftsgenauigkeit auf“ ([4], S. 51) ist nur von geringer Aussagekraft. Deutlich wird das vor der Tatsache, dass jedes neuere Quasigeoidmodell Differenzen von Quasigeoidundulationen mit mm-Genauigkeit liefern wird, wenn die Bezugsdistanz (wie im Beitrag) nur klein genug gewählt wird!

3. Mögliche ergänzende Untersuchungen

Vor dem Hintergrund der DHHN-Erneuerung wird insbesondere das Quasigeoidmodell als verbindendes Element zwischen ellipsoidischen GNSS-Höhen und Gebrauchshöhen (Normalhöhen) eine besondere Bedeutung haben. Über die Validierung des offiziellen Quasigeoides German Combined Quasigeoid GCG05 [14] der AdV (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland) durch astronomisches Nivellement in verschiedenen Gebieten wurde bereits mehrfach in der aktuellen Literatur berichtet [8,9,10,18]. Es wäre von Interesse, die Überprüfung der Quasigeoidhöhen im Vertikalprofil Wendelstein mit einer etwas verbesserten Methodik zu wiederholen sowie das Untersuchungsspektrum von Gedon et al. [4] zu erweitern, um Antworten zu noch offenen Fragen zu liefern. Einige Aspekte hierzu sollen als Anregung kurz skizziert werden.

A. Einbeziehung weiterer Quasigeoidmodelle Neben dem von den Autoren verwendeten BayernSatNiv Quasigeoid ist die Einbeziehung des Quasigeoides GCG05 als derzeit offizielles AdV-Modell sinnvoll. Daneben könnte auch ein am IAPG (Institut für Astronomische und Physikalisch Geodäsie) der Technischen Universität München berechnetes lokales Modell [5] vergleichend mit einbezogen werden. Dieses hat bei Validierungen mit astrogeodätischen Lotabweichungen im Isartal sehr gute Resultate gezeigt (4 mm mittlere quadratische Differenzen entlang eines 23 km langen Testprofils, [8]).

B. Linienweises astronomisch-topographisches Nivellement Das astronomische Nivellement könnte – statt auf kurzen Teilstrecken – entlang einer Linie, die die vorhandenen ICARUS-Lotabweichungsstationen verbindet, angewendet werden. Hierdurch könnte das Quasigeoid über einen Bereich von mehreren Kilometern Länge linienweise validiert werden, was für die zukünftige satellitengestützte Gebrauchshöhenbestimmung von Interesse wäre. Für die Interpolation des Lotabweichungsfeldes zwischen gemessenen ICARUS-Stationen sollten Sekundärdaten hinzugezogen werden, die Informationen zum i.d.R. unruhigen

Schwerefeldverlauf in bergigen Gebieten wie dem Wendelstein liefern. Sekundärdaten können beispielsweise digitale Geländemodelle (DGM) sein. Die zugehörige Variante des astronomischen Nivellements ist in der Literatur als astronomisch-topographisches Nivellement bekannt [1,3,9,12]. Neben nationalen Datenquellen wird das hochauflösende, frei verfügbare 3“ SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Modell, Version V4.1 [13] zur Interpolation geeignet sein.

C. Normale Korrektur Die im Beitrag vernachlässigte normale Korrektur E_{1n}^N , die zur Überführung der Lotabweichungen in Quasigeoidhöhen und zur Reduktion nivellitischer Höhendifferenzen ins Normalhöhenystem notwendig ist, kann mit den bekannten Formeln zwischen den Punkten P_1 und P_n berechnet werden ([17], S 228 sowie [10]):

$$E_{1n}^N \approx \sum_{i=1}^{n-1} \frac{g - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} dn + \frac{\bar{\gamma}_1 - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} H_1 - \frac{\bar{\gamma}_n - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} H_n$$

mit γ_0^{45} konstanter Normalschwerewert, $\bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_n$ mittlere Normalschwere entlang der Lotlinie und H_1, H_n Gebrauchshöhen der Punkte P_1 und P_n . Die notwendigen inkrementellen Höhendifferenzen dn entlang der Strecke liegen entweder direkt vor oder können aus digitalen Geländemodellen berechnet werden. Schwerewerte g entlang der Strecke müssen nicht notwendigerweise direkt gemessen werden, sondern können auf Basis vorhandener Prädiktionsprogramme, wie dem öffentlich zugänglichen Schwereinformationssystem SIS der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB [16] mit ausreichender Genauigkeit (etwa 1-2 mgal) berechnet werden. In einem anderen Testgebiet (Harz) wurde auf diese Weise die normale Korrektur entlang eines 65 km Profils und 600 m Höhendifferenz mit Submillimetergenauigkeit berechnet [10]. Dies mag als Hinweis für ähnliche Berechnungen im Vertikalprofil Wendelstein dienen.

Die Berücksichtigung der normalen Korrektur ist relevant bei allen Vergleichen zwischen Lotabweichungen und dem Quasigeoid nach Molodenskys Theorie [7,17]. Es versteht sich, dass die normale Korrektur durch die normalorthometrische Reduktion für alle Vergleiche zu ersetzen wäre, die sich auf das vorherige Bayerische Höhensystem beziehen, z.B. [5].

D. Klärung der Widersprüche zwischen Modell und Beobachtungen Die bisherigen Analysen zeigen Widersprüche zwischen dem Modell „BayernSatNiv“ und den ICARUS-Lotabweichungen zwischen 5“ und knapp 9“ auf drei kurzen Teilstücken des Profils. Die Ursache dieser nicht unerheblichen Widersprüche kann einerseits durch Vergleiche mit anderen Quasigeoidmodellen (GCG05 oder IAPG Modell) untersucht werden. Andererseits können mit einem neuen Verfahren Lotabweichungen unabhängig von Sternbeobachtungen präzisiert werden [11]. Der Ansatz verwendet das Earth Gravitational Model EGM2008 [15] zur Prädiktion von niedrig- und mittelfrequenten Lotabweichungsanteilen, ergänzt durch hochfrequente Anteile der Lotabweichung, die aus hochpassgefilterten SRTM Geländedaten berechnet werden können [11]. Auch für bergige Gebiete kann eine durchschnittliche

Prädiktionsgenauigkeit auf dem 1-Bogensekunden-Niveau erwartet werden, was zur Klärung der genannten Differenzen an den ICARUS Messpunkten ausreichen dürfte. Alle notwendigen Datensätze zur Anwendung des Verfahrens (EGM2008 und Geländedaten) sind frei verfügbar.

E. Quasigeoidinformation höchster Genauigkeit Zur hochpräzisen Anwendung des astronomischen bzw. astronomisch-topographischen Nivellements könnte in Betracht gezogen werden, astronomische Lotabweichungsbeobachtungen mit digitalen Zenitkamarasystemen [2,9] durchzuführen. Mit solchen Instrumenten werden Genauigkeiten von 0.1“ für die Lotabweichungsmessung erreicht. Bereits abgeschlossene Studien haben gezeigt, dass das astronomisch-topographische Nivellement mit Zenitkamera-Messpunkten im Abstand von 500-1000 m zur Bestimmung von lokalen Quasigeoidprofilen mit hohen Genauigkeiten von etwa 1 mm pro 10 km angewendet werden kann, auch im Gebirge [8,9,10]. Damit wäre nicht nur eine Validierung von Quasigeoidmodellen im Wendelsteinprofil möglich, sondern auch die Bereitstellung hochpräziser astrogeodätischer Quasigeoidinformation als Referenz.

Ein solches hochgenaues astrogeodätisches Quasigeoid wäre außerordentlich wertvoll für Folgeuntersuchungen zur Höhenbestimmung im Vertikalprofil Wendelstein. Hier sei an Untersuchungen von unsymmetrischen Refraktionseinflüssen beim Digitalnivellement oder Modellierung höhenabhängiger Fehlereinflüsse bei DGPS-Messungen gedacht. Es versteht sich, dass für die Umsetzung dieser eher aufwändigen Untersuchungen geeignete Ressourcen (z.B. Personal) notwendig sind.

Nicht nur aus wissenschaftlichen Erwägungen heraus, sondern auch für die Praxis wäre ein zukünftiger Ausbau und Nutzung des Vertikalprofils Wendelstein im Zusammenhang mit der wohl letztmaligen großräumigen Erneuerung des DHHN begrüßenswert.

4 Literatur

- [1] *Bosch W., Wolf H.* (1974): Über die Wirkung von topographischen Lokal-Effekten bei profilweisen Lotabweichungs-Prädiktionen. Mitteilungen aus dem Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn Nr. 28
- [2] *Bürki, B., Müller, A., 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 Proc. IAG GGSM2004 Meeting in Porto, Portugal. Published also in: CHGeoid 2003, Report 03-33 A (ed. U. Marti et al.), *Bundesamt für Landestopographie (swisstopo)*, Wabern, Schweiz
- [3] *Elmiger A.* (1969): Studien über Berechnung von Lotabweichungen aus Massen, Interpolation von Lotabweichungen und Geoidbestimmung in der Schweiz. Mitt. Inst. Geod. Phot. ETH Zürich Nr. 12
- [4] *Gedon, R., Heunecke, O., Krack, K.* (2008): Vergleichende Betrachtungen zur Höhenbestimmung mittels Digitalnivellement und DGPS in einem Vertikalprofil am Wendelstein” , Mitteilungen DVW Bayern 1/2008, pp 38-52

- [5] *Gerlach, C.* (2003): Zur Höhensystemumstellung und Geoidberechnung in Bayern. DGK C 571
- [6] *Feldmann-Westendorff, U.* (2009): Von der See bis zu den Alpen: Die GNSS-Kampagne. 2008 im DHHN 2006-2011. DVW Schriftenreihe Nr. 57: 95-111
- [7] *Heiskanen, W.A., Moritz, H.* (1967): Physical geodesy. Freeman and Co., San Francisco
- [8] *Hirt C., Denker H., Flury J., Lindau A., Seeber G.* (2007): Astrogeodetic validation of gravimetric quasigeoid models in the German Alps — first results. In: Proceedings of 1st international symposium of the international gravity field service, Istanbul, Turkey, Harita Dergisi, Special Issue, vol 18, pp 84–89
- [9] *Hirt, C., Flury, J.* (2008): Astronomical-topographic levelling using high-precision astrogeodetic vertical deflections and digital terrain model data. *Journal of Geodesy* 82: 347-356. DOI:10.1007/s00190-007-0173
- [10] *Hirt, C., Feldmann-Westendorff, U., Denker, H., Flury, J., Jahn, C.-H., Lindau, A., Seeber, G., Voigt, C.* (2008): Hochpräzise Bestimmung eines astrogeodätischen Quasigeoidprofils im Harz für die Validierung des Quasigeoidmodells GCG05. *Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv)* 133: 108-119
- [11] *Hirt, C.* (2009): Prediction of vertical deflections from high-degree spherical harmonic synthesis and residual terrain model data. *Journal of Geodesy*, online first. DOI 10.1007/s00190-009-0354-x
- [12] *Heitz S.* (1968): Geoidbestimmung durch Interpolation nach kleinsten Quadraten aufgrund gemessener und interpolierter Lotabweichungen. Deutsche Geodätische Kommission C 124
- [13] *Jarvis A., Reuter H.I., Nelson, A., Guevara, E.* (2008): Hole-filled SRTM for the globe Version 4. CGIAR-SXI SRTM 90m Database. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>
- [14] *Liebsch, G., Schirmer, U., Ihde, J., Denker, H. Müller, J.* (2006): Quasigeoidbestimmung für Deutschland. DVW-Schriftenreihe, No. 49, 127–146
- [15] *Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K.* (2008): An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. Presented at the 2008 General Assembly of the European Geoscience Union, Vienna, Austria, 13–18 April 2008
URL: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>
- [16] *PTB* (2007): Schwereinformationssystem SIS. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig. URL: <http://www.ptb.de/de/org/1/11/115/index.htm>
- [17] *Torge, W.* (2003): Geodäsie. 2. Auflage. W. de Gruyter, Berlin, New York
- [18] *Voigt, C., Denker, H., Hirt, C.* (2007): Regional Astrogeodetic Validation of GPS/Levelling Data and Quasigeoid Models. Paper presented at IUGG General Assembly, Perugia 2007. Proc. IAG Symposia 133 (ed. M. Sideris): 413-420

Anschrift des Autors

Dr. Christian Hirt
 Western Australian Centre for Geodesy,
 Curtin University of Technology,
 GPO Box 1987
 Perth, WA 6845, Australia
 Phone: 00 61 8 9266 2218
 Email: [c.hirt \(AT\) curtin.edu.au](mailto:c.hirt@curtin.edu.au), [chris.hirt \(AT\) web.de](mailto:chris.hirt@web.de)