

Ist die Modellbildung in der Geodäsie hinreichend zukunftstauglich?

Erwin Groten

Zusammenfassung

Drei Tendenzen erscheinen für die moderne Geodäsie charakteristisch zu sein: 1) die Zahl der hochgenauen Anwendungen nimmt zu, 2) Satellitengeodäsie gewinnt dominierenden Einfluss und 3) Echtzeit-Aspekte werden immer wichtiger. Eine Vielzahl von Reduktionen wird notwendig, wobei die dabei gewählten Modelle oft und in zunehmendem Maße von der Realität abweichen. Diese Tendenz wird oft bei Interpretationen oder beim Zusammenfassen von unterschiedlichen Daten in Hybridsystemen ignoriert oder nicht hinreichend berücksichtigt. Im folgenden wird als ein Beispiel die Gezeitenreduktion (permanente Gezeiten $M(o)$ und $S(o)$) herausgegriffen, um die Argumentation zu veranschaulichen.

Summary

There are three clear tendencies in modern geodesy: (1) Geodesy is more and more dominated by satellite technology, (2) there is an increasing number of high-precision applications, and (3) real-time aspects are increasingly important. There are various reduction processes applied in geodesy which lead to models which tend away from reality to an extent which is not fully realized by the geodetic community. Tidal and other reductions are considered.

1 Einleitung

In einer Reihe vorausgegangener Artikel wurde im Rahmen der IAG-SC3 der Versuch unternommen, die Unterschiede zwischen verschiedenen in der Geodäsie angewandten Modellräumen und der Realität – bei Genauigkeiten von global $\pm 10^{-9}$ und besser – herauszuarbeiten. Die Sachlage in der Geodäsie ist analog zu vielen Fällen in Mathematik, Statistik und Physik, wo axiomatisch Modellräume als Bezug eingesetzt werden; man denke z.B. an das neue IAU-Himmelssystem, die quantenmechanischen Darstellungen von Heitz und die relativistischen Modellierungen von Moritz, Grafarend u. a. Das geht bis hin zu unseren Darlegungen von Erdrotationsvorgängen im Raum von »geodesic flow«. Ähnliches gilt für die zahlreichen geodätischen Abbildungen in linearen, Hilbert-, L^2 - oder Sobolev-Räumen. Für sphärische, sphäroidische, ellipsoidische und geoidische Bezugssysteme und Approximationen werden regelmäßig Abweichungen gerechnet, womit dort der Unterschied zwischen Modell und Realität klar ist. Damit stößt man aber oft auf Unverständnis in klassischen Ingenieurdisziplinen. Wir sind z.B. gerade dabei, ionosphärische

Schumann-Resonanzen in das geodätische Gesamtbild einzuordnen, ohne bis jetzt numerische Lösungen angeben zu können.

In Groten (2000) wurde darauf hingewiesen, dass wir uns in der Geodäsie seit langem damit abgefunden haben, dass wir geodätische Modelle tagtäglich einsetzen, die von der Realität ganz bewusst abweichen. Der Grund dafür sind mathematische oder andere Zwänge, wie z. B. beim Nivellement oder in der Gravimetrie, wo die zeitvariablen Gezeiten weggereduziert werden, um so gewissen mathematischen Notwendigkeiten, wie Harmonizität, zu entsprechen. Außerdem wären zeitabhängige Koordinaten u. ä. mit Perioden von einem Tag o. ä. natürlich nicht praktikabel. Ähnliches gilt für die Polschwankung. Diese Korrekturen und Reduktionen sind meistens klein und bislang spielten die daraus resultierenden Abweichungen von der Realität kaum eine praktische Rolle, weil die Geodäsie hauptsächlich »off-line« arbeitete und instantane »on-line«-Ergebnisse nicht so gefragt waren. Das ändert sich mit zunehmender Genauigkeit und mit der veränderten Rolle der Geodäsie, die sich bei Projekten wie »GRACE« und »GOCE« deutlicher als zuvor äußert. Charakteristisch dafür ist beispielsweise die atmosphärische Korrektion in der Physikalischen Geodäsie, die in hoch genauen Anwendungen (Groten 1979) an den Schwereanomalien anzubringen ist, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Normalschwere ein Atmosphärenmodell enthält, das aus rechnerischen Gründen bewusst realitätsfern gewählt worden ist. Moderne Atmosphärenmodelle ermöglichen die Übergänge vom Modell zur Realität nach »remove-restore-Prinzip« ohne Schwierigkeiten.

Es fragt sich auch, ob im jetzigen Stadium der Entwicklung der Numerik in der Physikalischen Geodäsie tatsächlich die Spektralanalyse fast gebetsmühlenartig auf FFT- (in der Ebene) und Kugelfunktionsanalyse (auf der Kugel) beschränkt sein muss, obwohl flexibler zu handhabende und effizientere Methoden greifbar sind, wie Freeden (Michel 1999), Belikov (Belikov and Groten 1995) und andere vielfach gezeigt haben. Lokale sampling- und Spektralfunktionen, genauer: ganz unterschiedliche Arten von Wavelets sind oft weit günstiger. Schließlich ist es mehr als 40 Jahre her, seitdem K. Jung, Tsuboi, Grafarend u. a. (Groten 1966) so viele effektive Modelle entwickelten. Es ist schade, dass die Vielfalt so nützlicher Verfahren derzeit so wenig Anwendung findet.

Im Grunde ist es kein Novum, was hier angesprochen werden soll. Beispielsweise haben wir schon früher festgestellt, dass – abgesehen von Gezeiteneffekten u. ä. – die Mehrzahl der früher terrestrisch gemessenen zeitlichen Schwereänderungen Fehlinterpretationen von Fehlern bei der Gangmodellierung im Fall der Relativgravimetrie, der überwiegende Teil der mit Absolutgravimetern gemessenen zeitlichen Änderungen Bias und viel von den mit supraleitenden Gravimetern gemessenen Effekten analog auf Kalibrier- und ähnliche Fehler zurückzuführen waren. Das qualitativ Neue ist dreifach: 1) Mit steigender Genauigkeit werden viele bislang insignifikante

Modellfehler zunehmend wichtiger, die Problematik erhält damit eine andere Qualität, 2) an die Stelle lokaler Messungen treten jetzt vielfach globale Beobachtungen, wie bei globalen Satellitenmessungen, so dass Effekte, die bislang im Rahmen der Nachbarschaftsgenauigkeit vernachlässigt werden konnten, nun im globalen Bezugsystem signifikant werden und 3) die Vielzahl der im Detail kaum mehr überschaubaren Modelle führt gerade bei Echtzeitanwendungen dazu, dass die Unterschiede zwischen Realität und Modellraum vielfach schlicht übersehen werden. Man denke auch beispielsweise daran, was alles in der Satellitenaltimetrie an Kreuzungs- oder Cross-over-Punkten infolge defizitärer Gezeitenmodelle in die ozeanischen Zirkulationsmodelle hereininterpretiert wird oder werden kann.

Im Folgenden sollen aus der Vielzahl der geodätischen Modellierungsprobleme einige herausgegriffen werden, ohne dass alle Details dabei diskutiert werden können. Am Beispiel der Reduktion der permanenten Tiden $S(o)$ und $M(o)$ in unterschiedlichen Varianten sollen dann Einzelheiten exemplarisch dargestellt werden.

2 Neue Aspekte der Geodäsie

Schon immer war man sich in der Geodäsie des Potentials der möglichen Genauigkeitssteigerungen bewusst. Aber in vielen Fällen erkannte man, dass der Markt für höhere Genauigkeiten um so kleiner wird, je genauer die Messergebnisse werden. Mit »GRACE« und »GALILEO« hat sich die Rolle der Geodäsie aber so verändert, dass sich zukünftig diese Feststellung zwar nicht grundlegend ändert; die Tendenz hin zu »remote-sensing« sowie Frühindikatoren, Frühwarnsystemen und »precursor-detection« (Vorläufererkundung), also Katastrophen-Vorhersage u. ä., öffnet aber neue Aspekte in einem Umfang, der ein Umdenken sinnvoll erscheinen lässt. Das wird auch an einem anderen Beispiel deutlich: Die klassische Geoidberechnung lieferte Geoide vornehmlich als Referenzflächen, die Mittelwerte (über die Zeit hinweg) darstellen, und zwar mit Genauigkeiten von Dezimetern oder besser. Seitdem die zeitlichen Variationen, wie etwa saisonale Effekte, etwa im Zusammenhang mit Schneebelastungen u. ä., mit Millimetergenauigkeiten erfasst werden konnten, ist das Interesse daran immens gestiegen und die Möglichkeiten neuer Interpretationen gewachsen (Wünsch et al. 2001). Das geht hin bis zu den bekannten Zusammenhängen zwischen Erdrotationsschwankungen und Schwerefeldvariationen, die sich beispielsweise auch zunehmend genau in den Harmonischen des Potentials vom Grade zwei ausdrücken. J. Wahr, A. Cazenave, B. Chao u. a. gelten als Pioniere auf diesem Gebiet. Je kürzer die Intervalle werden, für die diese zeitlich variablen Werte betrachtet werden, umso größer wird die Gefahr, dass Vergleichswerte, wie die oben erwähnten, in denen die zeitabhängigen Effekte heraus eliminiert wur-

den, von »Nicht-Fachleuten« herangezogen werden und dann Missverständnisse entstehen, weil man sich vielfach der zu Grunde liegenden unterschiedlichen geodätischen Modelle gar nicht bewusst ist.

Analoges trifft auch auf nicht-zeitabhängige Modelle zu: Ich selbst war Mitglied der IAG-Kommission, die die Resolution 16 der IAG ausarbeitete. Dabei wurde das »zero-tide«-Geoid der IAG empfohlen. Das war bei der IUGG-Generalversammlung in Hamburg 1983. Diese Resolution wurde von sehr kompetenten Fachleuten kritisiert (wie etwa Prof. Yurkina, Moskau). Die Resolution 16 wurde auch aus Unkenntnis von mehreren IAG-Arbeitsgruppen nicht eingehalten, so dass viele in ITRF enthaltene Beobachtungen nicht »sauber« reduziert wurden und in mancher Hinsicht ein »ziemlicher Verhau« besteht. Bedauerlicherweise hat sich die IAG darum nie richtig gekümmert. M. Kumar (DoD, Washington) hat dies vor der Tagung der IAG in Budapest (2001) kritisiert und es wurde darauf in Budapest eingegangen (Groten 2001). In Groten (2002) wurde dargelegt, warum das »zero-tide«-Geoid nicht der Realität entspricht und wieso die auf das »mean-tide«-Geoid bezogenen Altimettermessungen auf See gerade dann zu Missverständnissen führen, wenn man jetzt die bislang wegen zu großem »Rauschen« im Küstengebiet nicht einbezogenen Pegeldaten bei Zusammenfassungen von kontinentalen und maritimen Geoidstücken hinzuzieht. In Pegeldaten werden noch heute meistens die ozeanischen Gezeiten einfach durch Mittelbildung ohne Berücksichtigung der permanenten Tiden $M(o)$ und $S(o)$ eliminiert.

3 Die Geodäsie als Umweltfach

Mich stört es immer, wenn ich in diesem Zusammenhang für eine so gute und wichtige Sache wie hier das wenig aussagekräftige Wort »Umwelt« verwenden muss, um verstanden zu werden; der Begriff »environmental research« trifft die Sache viel besser.

Linguistisch betrachtet, ist das Wort »Umwelt« genau so wenig hilfreich wie das Wort »nachhaltig« (sustainable). Weil in Deutschland die führenden Leute in »environmental research« oft weder Experten noch umfassend genug ausgebildet sind, wurden im Deutschen solche irreführenden Schlagwörter (wie »nachhaltig«, das aus der Forstwirtschaft stammt) recht gedankenlos übernommen, und wir müssen damit leben.

Vor allem die in Umweltfragen viel kompetenteren Amerikaner haben uns gelehrt, wie wir Satellitenergebnisse von Missionen wie »CHAMP« und »GRACE« zur Vorhersage und zur instantanen Modellbildung in »Nahezu-Echtzeit« einsetzen können, noch bevor die entsprechenden Satelliten am Himmel waren. Mittlerweile wird die Breite des Anwendungsspektrums erkannt, die sich dabei auftut, wenn wir das Äußerste dessen an Genauigkeit ausschöpfen, was sich ermöglichen lässt. Das wird vor allem im ozeanischen und atmosphärischen Bereich

deutlich. Berücksichtigt man zusätzlich die Vielzahl der Sensoren und die Mannigfaltigkeit der Messdaten, die sich beispielsweise mit »ENVISAT« gewinnen lassen, dann wird deutlich, wie vielgestaltig die Möglichkeiten der Interpretation dieser Daten über die Zeitachse hinweg sind, wobei vom Wetter – über Klima – bis hin zum Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean (also etwa auch El Niño und La Niña-Effekten) Vorhersagen möglich werden. Im kurzzeitigen Bereich reicht das bis hin zu Unwetter- und Flut- oder Hochwasservorhersagen. Im Langzeitbereich stehen wir erst am Anfang, weil die Länge der vorhandenen Datenreihen hoher Genauigkeit bislang beschränkt ist.

4 »Zero-Tide« und »Mean-Tide«

Im Rahmen von EUREF haben sich vor allem M. Ekman (2000) und J. Mäkinen (2000) mit einer Fülle neuer Wortschöpfungen (wie etwa »mean crust«) auf den »Honkasalo-Term« der permanenten Gezeitenreduktion gestürzt. Sie haben dabei in ihren Arbeiten eine Anzahl von Verurteilungen formuliert, die erstens nicht unbedingt notwendig waren und zweitens nur aus der Sicht dessen richtig sind, der nur den Kontinentalbereich im Blick hat. Aber zunehmend muss der Ozeanbereich einbezogen werden, weil die Satellitenaltimetrie hoch interessante neue Ergebnisse liefert, und durch Projekte wie »GLOSS«, »WOCE« etc. die Verbindung zwischen Kontinenten und Ozeanen im Küstengebiet jetzt überbrückt werden können. Wenn wir die derzeit bei Pegelmessungen üblichen Reduktionen betrachten, entsprechen sie gemäß der IAG-Resolution 16 exakt der »mean-tide«-Reduktion. Um im Bereich der üblichen Verfahren der Physikalischen Geodäsie der Bedingung

$$\oint dW = 0 \text{ oder } \nabla W = -\vec{g} \quad (1)$$

für konservative Kräfte zu entsprechen, müssen wir explizite Zeitabhängigkeiten wie etwa die der zeitabhängigen Erdgezeiten eliminieren. Das ist nicht weiter schwierig, weil wir nach dem Prinzip »remove-restore«, z.B. mit Hilfe der Formel von Bruns, die so geschaffenen Abweichungen unseres Modells von der Realität wieder je nach Bedarf rückgängig machen können. Wir müssen uns nur je nach Anwendung über die genauen Abweichungen des von uns gewählten Modells von der Realität klar sein. Solche Überlegungen führten seinerzeit unter der Leitung von R. H. Rapp (1983) zur Resolution 16 der IAG. Folglich können wir die vorher genannte Elimination der zeitabhängigen Gezeiten bei Nivellementsergebnissen genauso gemäß »remove-restore« rückgängig machen wie die der permanenten Gezeiten $M(o)$ und $S(o)$. Denn die Realität enthält natürlich beide Arten von Gezeitentypen. Wenn bei Altimeterdaten, wie üblich, nur die zeitabhängigen Gezeiten in den »cross-over«-Stationen eliminiert werden, entspricht das zu Grunde gelegte

Modell der »mean-tide«-Reduktion. Somit entspricht das »zero-tide«-Geoid nicht dem Modell, das wir dem Nivellement üblicherweise zu Grunde legen und somit ist bei der Berechnung von Geoidhöhen aus Nivellement plus GPS-Daten Vorsicht angebracht, zumal die meisten GPS-Daten auch nicht wegen $M(o)$ und $S(o)$ reduziert sind.

Paradebeispiele für die Problematik konsistenter geodätischer Gesamtsysteme sowie der Kompatibilität verschiedenartiger geodätischer Beobachtungen und deren Zusammenschluss sind Hybrid-Systeme wie das TIGA-Projekt: Wenn (permanente) GPS-Beobachtungen an Pegelstationen durchgeführt werden, um dort die klare Trennung von Hebungen und Senkungen zu erreichen, ist normalerweise ein Nivellement zur Verbindung der Pegel mit den GPS-Stationen erforderlich (Kakkuri 1995). Zumeist wird bei der GPS-Messung nicht das »zero-tide«-Modell angewendet, d. h. die permanenten Tiden sind dort nicht komplett im Modell enthalten. Überwiegend wird (Woodworth, priv. Mitteilung, 2002) in Projekten wie WOCE, GLOSS usf. die Reduktion der Pegeldaten im Sinn von »mean-tide« durchgeführt. Die Reduktion der Nivellements spielt dann eine entscheidende Rolle, wenn der Abstand zwischen Pegelstation und GPS-Station relativ groß ist; denn dann wirkt sich die Gezeitenreduktion der Nivellementsdaten aus. Je nachdem, ob nur der direkte (»zero-tide«), auch der indirekte (»tide-free«) oder gar kein permanenter Gezeiteeffekt (für $M(o)$ und $S(o)$), also im Sinne von »mean-tide«, reduziert wird, erhält man dann Ergebnisse, die nur dann kompatibel sind, wenn alle drei Datensätze nach derselben Formel oder demselben Prinzip reduziert worden sind.

Analoges gilt natürlich auch z. B. beim ITRS, wo SLR-, VLBI-, GPS- u. a. Messungen global vereinigt wurden.

5 Das zeitvariable Geopotential

Beim Verständnis ergeben sich allgemein die größten Schwierigkeiten, wenn wir neben den zeitvariablen Gezeiteeffekten die »non-tidal«-Zeitabhängigkeiten berücksichtigen. Sie verursachen in den Gleichungen (1) dieselben Schwierigkeiten, wie die zeitvariablen Gezeitenanteile. Aber gerade im Umweltbereich, wie auch in der 4D-Geodäsie, finden sie zunehmend Interesse. In der Astronomie behilft man sich im analogen Fall damit, dass man alle Daten auf ein Bezugsdatum, wie etwa JD 2000.0 reduziert, welche über ein passend gewähltes Intervall konstant, d. h. zeitinvariant bleiben. Mit »remove-restore«-Techniken kann man dann stets zwischen Modell und Realität hin- und herrechnen. Das gilt natürlich nicht nur für das zeitvariable Geoid, sondern für jede beliebige Zeitreihe.

Auch das »tide-free«-Modell hat seine Daseinsberechtigung; beispielsweise bei Untersuchungen der Reaktion des Erdkörpers auf die (zeitvariable) Zentrifugalkraft, wie das z. B. G. J. F. MacDonald (1963) in mehreren vielbe-

achteten Arbeiten tat (vgl. dazu Molodensky und Groten 2002). Aber in vielen Fällen, wo GPS in Bezugssysteme unter Berücksichtigung der »tide-free«-Reduktion integriert wurde, war es die unpassende Wahl. Es kommt also auf den Fall an.

6 Schlussfolgerung

Die Modellbildung stellt heute im Prinzip kein Problem dar; sie muss aber zielorientiert sein und der zu Grunde gelegten Mathematik entsprechen. Auch dürfen keine Inkompabilitäten übersehen werden. Sie sollte nach dem Prinzip erfolgen: *Quidquid agis, prudenter agis, et respice finem*. Mit anderen Worten: Es erscheint oft unvermeidlich, parallel mehrere Modelle für dieselbe Sache zu verwenden, wie etwa das »tide-free«, das »zero-tide« und das »mean-tide« Geoid, obwohl mancher Nichtfachmann dadurch irritiert und zu Fehlinterpretationen verführt wird. Es wäre sinnvoll, jeweils gezielt auf den Modellraum hinzuweisen, damit z. B. speziell im Fall des von der IAG favorisierten »zero-tide«-Modells vor allem die Abweichungen von der Realität im ozeanischen Bereich dem Nutzer klar werden.

Literatur

- Belikov, M. V. and E. Groten: Pseudo-harmonic Regional Analysis in Space: Estimation of the Numerical Efficiency. *Allg. Verm. Nachr.* 102: 356–366, 1995.
- Ekman, M.: On the permanent tide in the European Vertical Reference System. *Intern. Assoc. Geod., Section I-Positioning, Comm. X., Sub-Commission for Europe (EUREF)*, Publ. 9, J. A. Torres and H. Hornik (eds.), Deutsche Geod. Komm., Heft A 61: 113–114, 2000.
- Groten, E.: Bestimmung der Schwere an der Erdoberfläche aus Fluggravimetriermessungen, *Deutsche Geod. Komm. C94*, München, 1966.
- Groten, E.: Geodesy and the Earth's gravity field. Vol 2, Dümmler Verlag Bonn, p. 410, 1979.
- Groten, E.: Modelle und Modellierung in der Geodäsie. *Festschrift Prof. B. P. Wrobel*, Schriftenreihe Fachr. Geodäsie, FB Bauingenieurwesen und Geodäsie, TU Darmstadt, Heft 10: 109–116, 2000.
- Groten, E.: Do we need a new reference system? In: *Int. Assoc. of Geodesy Symposia*, Vol. 125, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 2002, 108–113, 2001.
- Groten, E.: Benötigen wir eine neue $M(o)$, $S(o)$ -orientierte Definition des zeitabhängigen Geoides? Vortrag gehalten in der Geod. Woche der Intergeo, 2002, Frankfurt/M., 2002.
- Kakkuri, J.: The Baltic Sea Level Project. *Allg. Verm. Nachr.* 102: 331–336, 1995.
- MacDonald, G. J. F.: The deep structure of the oceans and continents. *Rev. Geophys.*, 1: 587–655, 1963.
- Mäkinen, J.: A note on the treatment of the permanent tidal effect in the European Vertical Reference System (EVRS). *Intern. Assoc. Geod., Section I-Positioning, Comm. X., Sub-Commission for Europe (EUREF)*, Publ. 9, J. A. Torres and H. Hornik (eds.), Deutsche Geod. Komm., Heft A 61: 111–113, 2000.
- Michel, V.: A Multiscale Method for the Gravimetry Problem: Theoretical and Numerical Aspects of Harmonic and Anharmonic Modelling. Diss. 386, Univ. Kaiserslautern, FB Mathematik, Shaker Verlag, 1999.
- Molodensky, S. M. and E. Groten: On the models of the lower mantle viscosity consistent with the modern data of core-mantle boundary flattening. *Stud. Geophys. Geod.* 46: 411–433, 2002.
- Rapp, R. H.: Tidal gravity computations based on recommendations of the Standard Earth Tide Committee. *Bull. Inf. Mares Terrestres*, 89: 5814–5819, 1983.
- Wünsch, J., M. Thomas and Th. Gruber: Simulation of oceanic bottom pressure, *RAS, Geophys. J. Intern.* 147: 428–434, 2001.

Anschrift des Autors

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Erwin Groten
Institut für Physikalische Geodäsie, Technische Universität Darmstadt
Petersenstr. 13, 64287 Darmstadt
groten@ipgs.ipg.verm.tu-darmstadt.de