

# Die Erde hebt sich

## DIE FENNOSKANDISCHE LANDHEBUNG – EIN TEST- UND ANWENDUNGSGEBIET FÜR DIE SATELLITENMISSION GRACE

### Einführung

Die nordischen Länder Dänemark, Schweden, Finnland, Norwegen und auch die angrenzenden Gebiete Russlands heben sich seit der letzten Eiszeit vor 18.000 Jahren langsam, aber stetig. Das Institut für Erdmessung und acht weitere Vermessungs- und Forschungsinstitutionen aus fünf Ländern sind dieser Veränderung auf der Spur: Mit terrestrischen und satellitengestützten Methoden versuchen sie, die Veränderungen millimetergenau zu bestimmen.

Seit dem glazialen Maximum der letzten Eiszeit vor etwa 18.000 Jahren hebt sich in Fennoskandien (Dänemark, Norwegen, Schweden und Finnland) die Erdoberfläche kontinuierlich. Mit dem Abschmelzen der damals bis über zwei Kilometer mächtigen Eislast hat ein lang anhaltender Aufwölbungsprozess des Baltischen Schildes begonnen. Das leichtere, feste Material der Erdkruste, die Lithosphäre, schwimmt auf einer fließfähigen, dichteren Unterlage, der Asthenosphäre, und strebt ein Schwimmgleichgewicht, ähnlich einem Eisberg oder einem Floß im Wasser, an.

Die Erforschung der fennoskandischen Landhebung mit Hilfe geographischer, geophysikalischer und geodätischer Untersuchungen umfasst besonders das Gebiet mit den nordischen Ländern Norwegen, Schweden, Dänemark und Finnland. Zum Hebungsgebiet gehören aber auch die angrenzenden Gebiete Russlands mit der Halbinsel Kola und der Provinz Korelia. Die maximale Hebung liegt gegenwärtig bei etwa einem Zentimeter pro Jahr im Bereich des Bottnischen Meerbusens. Seit der Eiszeit ist hier das Land um circa 300 Meter angehoben worden. Damit sind allerdings auch Landsenkungen in den umliegenden Ländern verbunden, da aus dieser Peripherie Magma in Richtung Hebungszone abfließt.



Zur Senkungszone gehört auch Deutschland, wo Abwärtsbewegungen von bis zu 1.5 Millimetern pro Jahr angenommen werden (NOCQUET ET AL. 2005).

Die seit 2002 andauernde deutsch-amerikanische Satellitenmission GRACE – *Gravity Recovery and Climate Experiment* – beobachtet die großräumigen zeitlichen Variationen des Erdschwerefeldes, die aufgrund von Massenverlagerungen entstehen (siehe zum Beispiel SCHMIDT ET AL. 2005, TAPLEY ET AL. 2004, siehe Abbildung 1).

So ist GRACE auch für die hydrologische Zielsetzung konzipiert worden, den weltweiten Anstieg der Meeresoberflächen aufgrund der Klimaänderungen über einen Zeitraum von mindestens fünf Jahren millimetergenau zu bestimmen.

Zum Überprüfen der Satellitendaten und zu deren Weiterverarbeitung in Kombination mit anderen erdgebundenen Messverfahren (Meerespegelregistrierungen, Global Positioning System (GPS)-Messungen etc.) werden hochgenaue terrestrische Beobachtungen der Schwerebeschleunigung der Erde benötigt. Dafür eignet sich Fennoskandien als ein Test- und Anwendungsgbiet für die GRACE-Mission.

Das Landhebungsgebiet Fennoskandien gilt als ein natürliches Labor, das jetzt genutzt wird, um »Ground-Truth« für GRACE bereitzustellen.

Dazu läuft seit März 2003 am Institut für Erdmessung (IfE) der Universität Hannover ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Projekt. Das gesetzte Ziel ist, die nacheiszeitliche Landhebung in Nordeu-

ropa mit Hilfe von terrestrischen Absolutschweremessungen, kombiniert mit permanenten GPS-Registrierungen, über einen Zeitraum von fünf Jahren zu erfassen und die Ergebnisse zur Validierung der GRACE-Mission zu nutzen (TIMMEN ET AL. 2005).

Seit Januar 2004 findet dazu auch ein vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) geförderter wissenschaftlicher Personenaustausch mit Norwegen statt.

In dem vom IfE initiierten Landhebungsprojekt kooperieren neun nationale Vermessungs- und Forschungsinstitutionen aus fünf Ländern.

### Bestimmung der Fennoskandischen Landhebung

Geophysikalische Verfahren zur Untersuchung der Fennoskandischen Landhebung beruhen auf Altersbestimmungen von früheren Strandlinien und Ablagerungen sowie auf Annahmen und Informationen zur Mächtigkeit und Ausdehnung des früheren Eisschildes. Zusätzlich werden Erdmodellparameter zur Dicke der Lithosphäre und zur Viskosität des Erdmantels benötigt.

Trotz der jüngsten wissenschaftlichen Erfolge existiert bisher kein geophysikalisches Modell, das die Hebung seit dem letzten Eiszeitmaximum realistisch beschreibt (LAMBEC ET AL. 1998). Auch die regionalen Unterschiede in den Erdmodellparametern müssen verstärkt berücksichtigt werden (KAUFMANN ET AL. 2000).

Zur Beschreibung der gegenwärtigen Landhebung werden seit etwa 100 Jahren Meeresspiegelmessungen und geodätische Nivellements (Bestimmungen von Höhenunterschieden) durchgeführt. Von 1966 bis 2003 wurden gravimetrische Relativmessungen entlang von Ost-West orientierten Nivellementslinien vorgenommen. Am Bottnischen

Meerbusen wurde eine maximale Hebungsrates von etwa einem Zentimeter pro Jahr ermittelt. Damit ist eine Änderung der Schwerebeschleunigung von circa  $-20$  Nanometer je Sekunde zum Quadrat verbunden. Seit 1993 wurden permanente GPS-Stationen eingerichtet, die mit einer möglichst gleichmäßigen Verteilung das ganze Untersuchungsgebiet abdecken und kontinuierlich Messdaten liefern (SCHERNECK ET AL. 2003).

Abbildung 2 zeigt als Ergebnis eine maximale Höhenänderung von mehr als elf Millimetern pro Jahr.

Der Ort des Hebungszentrums und die geometrische

### Terrestrische Absolutgravimetrie

Die hochgenaue Bestimmung der Schwerebeschleunigung wurde erst durch den Einsatz eines neuartigen Freifall-Absolutgravimeters möglich (NIEBAUER ET AL. 1995). Ende 2002 konnte mit Unterstützung des Bundes und des Landes Niedersachsen über die VolkswagenStiftung für das IfE ein solches Instrument beschafft werden.

Innerhalb der Kooperation mit den nordischen Partnerländern wurde daraufhin auch in Norwegen und in Finnland jeweils ein solches Messinstrument erworben.

Abbildung 1 (links)  
Die Satelliten-Zwillinge GRACE werden während ihrer fünfjährigen Lebensdauer das Erdschwerefeld kartografieren.  
(Autor: Astrium GmbH, Quelle: Webseiten des GeoForschungsZentrum Potsdam)

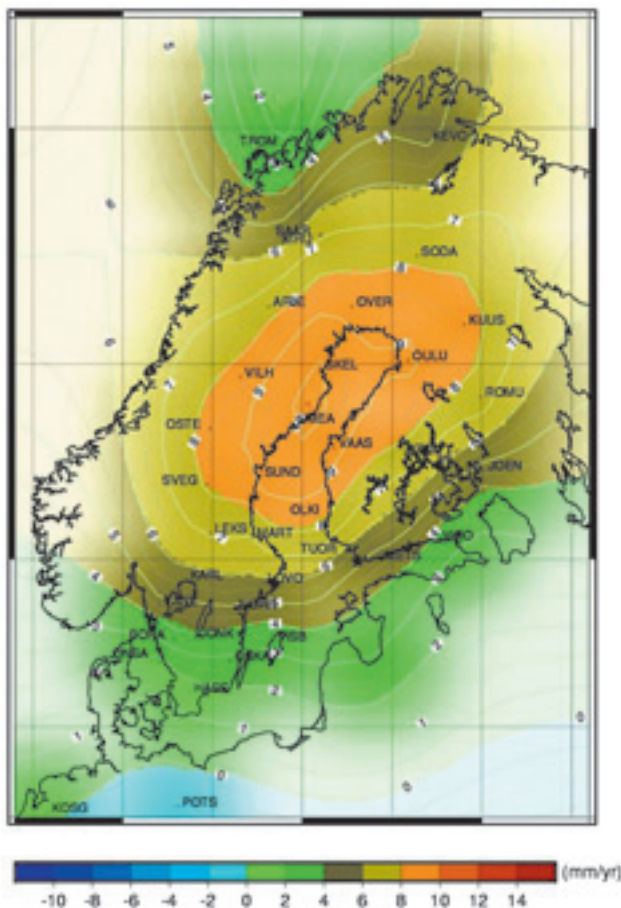


Abbildung 2  
Mit GPS beobachtete Höhenänderungen in Millimeter pro Jahr im Fennoskandischen Landhebungsgebiet (Scherneck et al. 2003).  
Mit freundlicher Genehmigung von H.-G. Scherneck.

Struktur des Phänomens unterscheiden sich allerdings von den klassischen geodätischen Messergebnissen. Es existiert keine klare Null-Hebungslinie und kleinere regionale Strukturen werden sichtbar, was das Ergebnis der flächenhaften Verteilung der Stationen ist.

Für jede Stationsbestimmung sind mehrere tausend Freifallversuche erforderlich. Dabei wird ein Glaskörper entlang eines Laserstrahls im Hochvakuum fallengelassen, um dabei die zurückgelegte Fallzeit und den Fallweg mit einem Bruchteil einer Nanose-



Abbildung 3 (links)  
Station Skefteå (Schweden) mit einem Absolutgravimetrie-Fundament in der Hütte und eine permanente GPS-Antenne daneben.



Abbildung 4 (rechts)  
Absolutgravimeter FG5-220 des Instituts für Erdmessung in der Station Östersund (Schweden).

Abbildung 5 (unten)  
Kombination von geodätischen Messtechniken zur Vermessung der zeitlichen Veränderung im Fennoskandischen Landhebungsgebiet.

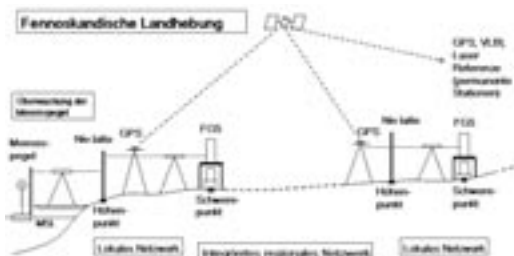


Abbildung 6 (rechts)  
Im Jahr 2004 beobachtete Absolutgravimetriestationen mit den Gravimetern FG5-220 (IfE), FG5-221 (FGI) und FG5-226 (UMB).

kunde beziehungsweise eines Nanometers zu messen. Die Temperaturbedingungen müssen über Tage im Raum sehr konstant bleiben; als Untergrund eignet sich am besten gewachsener Felsen mit einer fest angebundenen ebenen Betonfläche zum Aufstellen des Instrumentes.

Ein Vorteil der terrestrischen Absolutgravimetrie ist, dass nicht nur Schwereänderungen beobachtet werden, die aufgrund von Höhenänderungen auftreten, sondern dass auch unterirdische Massenverlagerungen gemessen werden. Die Genauigkeit eines Absolutgravimetrienetzwerkes

ist dabei unabhängig von der Größe des abgedeckten Gebietes. Gewöhnlich werden die geodätischen Messverfahren Absolutgravimetrie (geometrische und physikalische Veränderungen) und GPS (nur Geometrie) kombiniert.

Abbildungen 3 und 4 zeigen typische Stationsbedingungen für die Feldarbeiten in Fennoskandien.

**Projektrealisierung**

Die Arbeitsgruppe *Geodynamik der Nordischen Geodätischen Kommission (NKG)* stellt die Organisationsplattform des Vorhabens dar. Darin arbeitet das IfE eng mit folgenden For-

schungs- und Vermessungsinstitutionen zusammen:

- Finnish Geodetic Institute (FGI, Masala, Finland), Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, Frankfurt), Department of Mathematical Sciences and Technology (Norwegian University of Life Sciences (UMB), Ås), Onsala Space Observatory (Chalmers University of Technology, Onsala, Sweden), Norwegian Mapping Authority (Statens Kartverk (SK), Hønefoss), National Landsurvey of Sweden (Lantmäteriet, Gävle), National Survey and Cadastre (KMS, Copenhagen, Denmark), Danish National Space Center (DNSC, Copenhagen).*

seit 2003 jährlich durchgeführt und sollen in 2007 abgeschlossen werden. Imzweiten Kampagnenjahr 2004 wurden von den zwei Absolutgravimetrie-teams des IfE insgesamt 16 Absolutstationen in Fennoskandien mit dem Gravimeter FG5-220 besetzt und neu bestimmt. Die erste Kampagne dauerte vom 10. Mai bis 7. Juli 2004 und die zweite vom 16. Oktober bis 6. November 2004.

Abbildung 6 zeigt die Gesamtstationsverteilung des Absolutgravimetrienetzes und speziell auch die vom IfE und den Partnergruppen in 2004 neu vermessenen Stationen.

An fast allen Stationen werden permanent GPS-Daten registriert. Die Station Metsähovi (geodätische Fundamentalstation Finnlands) dient dem IfE als wichtige Referenzstation für das Projekt, weshalb sie während der Kampagnen 2004 zweimal besetzt wurde.

Zur Genauigkeitskontrolle fanden direkte Vergleichsmessungen mit anderen FG5 Absolutgravimetern in Onsala, Vaasa, Metsähovi und Ås statt, siehe Abbildung 7.

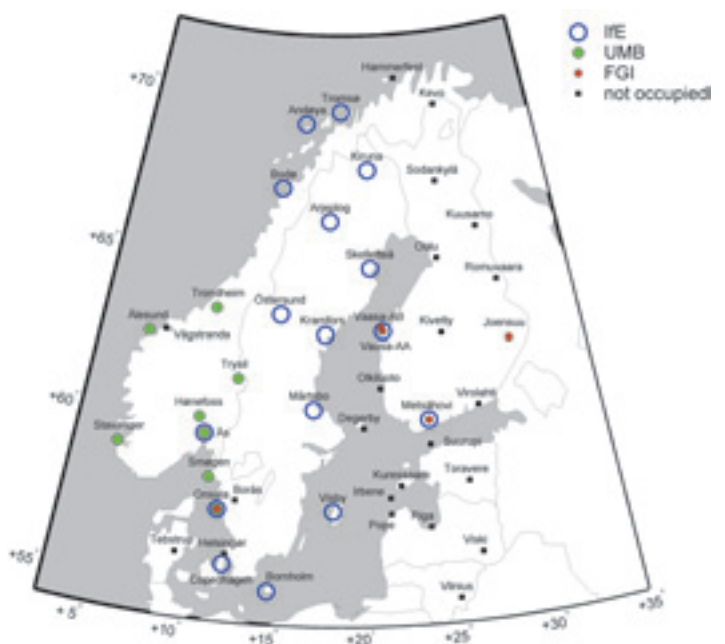


Abbildung 5 zeigt, wie die verschiedenen Messmethoden prinzipiell kombiniert werden. Die Messkampagnen werden

Durch die Nutzung des Klimadatenarchivs des ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) ist es



**Dr.-Ing. Ludger Timmen**  
Jahrgang 1962, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Erdmessung.



**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller**  
Jahrgang 1962, ist Direktor des Instituts für Erdmessung.



**Dipl.-Ing. Olga Gitlein**  
Jahrgang 1977, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Erdmessung.



**Dr.-Ing. Heiner Denker**  
Jahrgang 1959, ist Akademischer Direktor am Institut für Erdmessung.

am IfE möglich, die Schwereänderungen, die aufgrund atmosphärischer Luftmassenbewegungen auftreten, in den gravimetrischen Messdaten zu reduzieren. Dabei ist neben einer lokalen dreidimensionalen Atmosphärenmodellierung auch eine globale Berechnung der atmosphärischen Auflast auf die Erdkruste notwendig.

Die bisher erzielten Ergebnisse der beteiligten Gravimetrie-Arbeitsgruppen stimmen mit den gesetzten Genauigkeitszielen des Projektes über-

### Danksagung

Dieses Forschungsvorhaben des IfE wird finanziell wesentlich von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Mu 1141/3-1 und 3-2) unterstützt.

Auch die DAAD-Zuwendungen zum wissenschaftlichen Personenaustausch (D/04/04418) mit der Universität in Ås sind von großem Projektnutzen.

In Zusammenarbeit mit dem *Deutschen Klimarechenzentrum*

### Literatur

- Kaufmann, G., Wu, P. Li, G., 2000: Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia for a laterally heterogeneous Earth. *Geophys. J. Int.* 143: 262–273.
- Lambeck, K., Smither, C., Johnston, P., 1998: Sea level-change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe. *Geophys. J. Int.* 134: 102–144.
- Niebauer T.M., Sasagava G.S., Faller J.E., Hilt R., Klopffing F., 1995: A new generation of absolute gravimeters. *Metrologia* 32: 159–180.
- Nocquet, J.-M., Calais, E., Parsons, B., 2005 : Geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06308, doi:10.1029/2004GL022174.
- Scherneck, H.-G., Johansson, J., Koivula, H., van Dam, T., Davis, J., 2003: Vertical crustal motion observed in the BIFROST project. *J. of Geodyn.* 35: 425–441.
- Schmidt, R., Schwintzer, P., Flechtner, F., Reigber, Ch., Güntner, A., Döll, P., Rami-

lien, G., Cazenave, A., Petrovic, S., Jochmann, H., Wunsch, J., 2005: GRACE observations of changes in continental water storage, *Journal of Global and Planetary Change*, in print.

- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F., Watkins, M.M., 2004: GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science* 305: 503–505.
- Timmen, L., Gitlein, O., Müller, J., Denker, H., Mäkinen, J., Bilker, M., Pettersen, B.R., Lysaker, D.I., Omang, O.C.D., Svendsen, J.G.G., Wilmes, H., Falk, R., Reinhold, A., Hoppe, W., Scherneck, H.-G., Engen, B., Harsson, B.G., Engfeldt, A., Lilje, M., Strykowski, G., Forsberg, R., 2005: Observing Fennoscandian gravity change by absolute gravimetry. Accepted for IAG Symp. Proeed. »Geodetic deformation monitoring: from geophysical to engineering roles«, Jaén, Spain, March 2005.



Abbildung 7  
*Parallelmessungen mit den Gravimetern FG5-220 (IfE) und FG5-221 (FGI) in der finnischen Fundamentalstation Metsähovi.*

ein, so dass erwartet wird, im Jahr 2008 ausreichend genaue »Ground-Truth« Resultate für die GRACE-Mission vorlegen zu können.

(DKRZ) in Hamburg stellt das *Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität zu Köln* die benötigten meteorologischen Daten kostenlos bereit.