

GEOWISSENSCHAFTEN

Geographische Finsternisse vertreiben

DAS SYSTEM ERDE: LANGZEIT- UND GRUNDLAGENFORSCHUNG IN DER GEODÄSIE UND DEN ERDWISSENSCHAFTEN AN DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.

VON REINHARD RUMMEL,
HERMANN DREWES,
HANS KEPPLER UND
CHRISTOF VÖLKSEN

Dominikus von Linprun (1714–1787), Gründungsmitglied der Bayerischen Akademie und erster Direktor der Philosophischen Klasse, schrieb 1764, dass der prominente französische Astronom und Geodät César Cassini de Thury – 1761 Ehrenmitglied der Akademie – den Anstoß gab, Bayern trigonometrisch zu vermessen „um hierdurch diejenigen geographischen Finsternisse zu vertreiben, die ... über diesen Theil von Deutschland noch herrschen sollen“ (M. Kneißl, *Geodäsie*, in: *Geist und Gestalt*, Bd. 2, S. 53–61, 1959). So wurden geodätische Vorhaben von der ersten Stunde an fester Bestandteil der wissenschaftlichen Arbeiten der Akademie, und aus den Werkstätten der Akademiemitglieder Fraunhofer und Reichenbach kamen herausragende Messinstrumente für die astronomischen und geodätischen Aufgaben. Erster Höhepunkt dieser Entwicklung war Soldners Landesaufnahme von Bayern. Über dieses Werk schreibt 1841 die Royal Geographical Society zu London: „the Cadastral Map of Bavaria as probably the most perfect ever attempted“.

Teilnahme an der Mitteleuropäischen Gradmessung

Die geodätischen Arbeiten wurden beträchtlich intensiviert, als die Akademie 1867 an der von J. J. Baeyer, preußischer General und 1868 Ehrenmitglied der Akademie, initiierten Mitteleuropäischen Gradmessung teilnahm. Aus ihr entwickelten sich die Europäische Gradmessung und schließlich die Internationale Erdmessung.

Die älteste naturwissenschaftliche Kommission

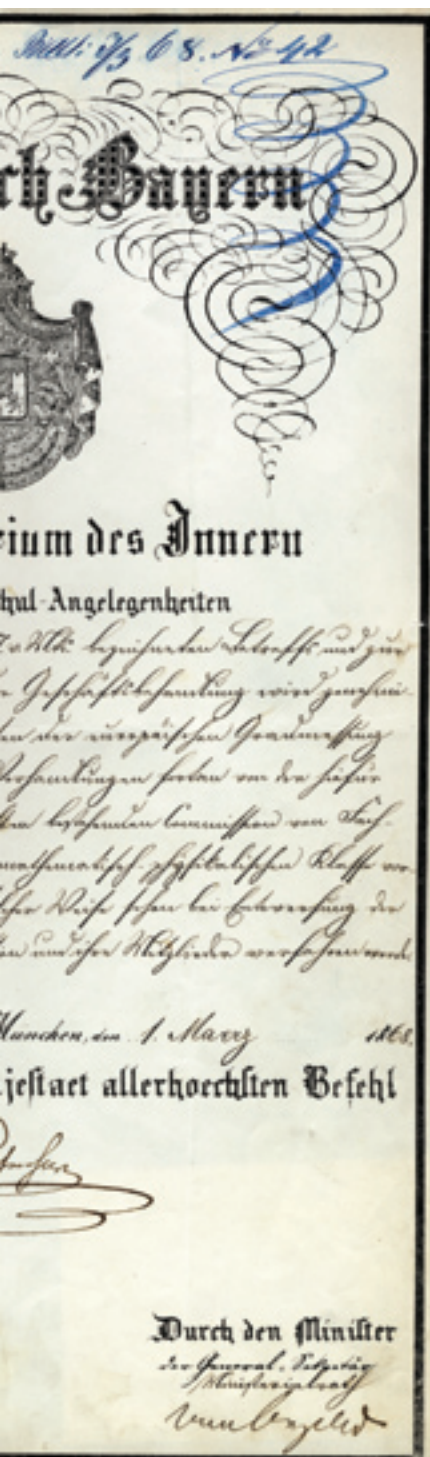
Nach anfänglichem Zögern schloss sich die Akademie dem Vorhaben an und gründete am 1. März 1868 die Königlich Bayerische Kommission für die Europäische Gradmessung, die heutige Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK). Sie ist die älteste bis heute bestehende Kommission der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse, Carl Max von Bauernfeind war ihr erster Ständiger Sekretär.

Ihre astronomisch-geodätischen Arbeiten zur Bestimmung der Erdfigur und ihr Beitrag zum Aufbau eines europäischen Nivellements machten sie zum wichtigsten Partner dieser preußischen Initiative. Die wissenschaftliche Zielstel-



lung des Nivellements war auch aus heutiger Sicht sehr modern, nämlich der Vergleich der mittleren Wasserstände aller an Europa angrenzenden Meere.

Nach dem Ersten Weltkrieg wurde die deutsche Geodäsie aus den internationalen Aktivitäten verbannt,



Engagement von Max Kneißl

Nach dem Zweiten Weltkrieg drohte eine noch größere Isolation. Durch die Teilung Deutschlands war der Zugang zum preußischen Geodätischen Institut, der nationalen geodätischen Forschungsstätte auf dem Telegraphenberg in Potsdam, verwehrt. Es entstand unter dem Dach der Akademie die Deutsche Geodätische Kommission und unter ihr 1952 als neues wissenschaftliches Zentrum das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI). Dies war das große Verdienst von Max Kneißl, dem es auch gelang, die deutsche Geodäsie in die internationale wissenschaftliche Gemeinschaft zurückzuführen.

Moderne Satellitengeodäsie

Die Arbeiten der BEK und des DGFI zur europäischen Triangulation und zum europäischen Nivellement und Schwerenetz gelten als wegweisend. Sehr früh erkannte man auch die großartigen Möglichkeiten, die sich der Geodäsie durch die Verwendung von Satelliten auftraten. Schon in den 1960er Jahren entstand das europäische Satellitentriangulationsnetz WEST, mit BEK und DGFI als Rechenzentrum. Der Akademie gelang also sehr umfassend, die „geographischen Finsternisse“ nicht nur aus Bayern zu vertreiben.

Im Erdinnern

Wie steht es jedoch um das Innere unseres Planeten, das sich direkter Beobachtung entzieht? Die Geowissenschaften haben sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert – vergleichbar mit der Transformation der Biowissenschaften seit dem Aufkommen der molekularen Biologie. Vor etwa 50 Jahren waren die Geowissenschaften noch weitgehend deskriptiv. Das moderne Bild wird dagegen geprägt von einem tiefen

Verständnis physikalischer Zusammenhänge. Wesentlich beteiligt an der Entwicklung waren experimentelle Methoden. Der größte Teil des Erdinnern ist direkter Beobachtung nicht zugänglich. Nur durch Vergleich geophysikalischer Messungen mit Untersuchungen von Materialeigenschaften unter hohem Druck und hoher Temperatur kann man den Aufbau und die Dynamik des Erdinnern verstehen. Der gesamte Druck- und Temperaturbereich des Erdinnern ist mittlerweile experimentell zugänglich, und viele Prozesse, die im tiefen Erdinnern ablaufen, lassen sich im Labor simulieren (Abb. 2). So bedient sich zum Beispiel die seismische Tomographie der Erkenntnisse dieser experimentellen Forschung.

Das Bayerische Geoinstitut

Die Bayerische Akademie der Wissenschaften hat früh die Bedeutung experimenteller Methoden für die modernen Geowissenschaften erkannt. Das Bayerische Forschungsinstitut für Experimentelle Geochemie und Geophysik (Bayerisches Geoinstitut) wurde 1986 in Bayreuth gegründet. Es ist mittlerweile auf dem Gebiet der experimentellen Geowissenschaften die führende Einrichtung in Europa und eine der drei führenden Institutionen weltweit. Die Akademie unterstützt und berät das Institut seit seiner Gründung ständig durch eine wissenschaftliche Kommission.

Aktuelle Forschungsergebnisse

Die Eigenschaften von Substanzen unter hohem Druck und hoher Temperatur sind oft sehr verschieden von ihren Eigenschaften bei Normalbedingungen. Untersuchungen am Bayerischen Geoinstitut zeigten beispielsweise, dass Silikatschmelzen (Magmen) und wässrige Fluide unter hohem Druck vollständig miteinander mischbar werden. Eine ähnliche überraschende Entdeckung

Abb. 1: Gründungsurkunde der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, 1. März 1868, unterzeichnet von Kultusminister Franz von Greßner. Der Text lautet: „Auf den gutachterlichen Bericht vom 27. v. Mts. bezeichneten Betreffs und zur Erleichterung und Abkürzung der Geschäftsbehandlung wird genehmigt, daß die auf die Angelegenheiten der europäischen Gradmessung bezüglichen Geschäfte und amtlichen Verhandlungen fortan von der hiefür bei der k. Akademie der Wissenschaften bestehenden Commission von Fachmännern ohne Einvernehmung der mathematisch-physikalischen Klasse vorgenommen werden und daß in solcher Weise schon bei Entwerfung der Geschäftsinstruction für die Commission und ihre Mitglieder verfahren werde.“

trotz ihrer führenden Stellung. Die Kommission konzentrierte sich daher auf die Entwicklung neuer Verfahren; es entstanden auch erste Arbeiten zur Schweremessung. Sebastian Finsterwalder leistete in dieser Periode methodische Pionierarbeit in der Photogrammetrie und im Bereich der Gletscherforschung.

am Geoinstitut war die Beobachtung, dass Eisen in Mineralen des tiefen Erdmantels bei Drücken oberhalb von einer Viertel Million Atmosphären überwiegend im dreiwertigen Zustand vorliegt, selbst wenn es im Gleichgewicht mit metallischem Eisen ist. Eine Konsequenz hiervon ist wahrscheinlich, dass der untere Erdmantel einige Prozent von Eisen-Metall enthält.

Forschungen am Bayerischen Geoinstitut haben in den letzten Jahren auch gezeigt, dass sich wahrscheinlich nur etwa die Hälfte des Wassers unseres Planeten in den Ozeanen befindet. Die andere Hälfte ist tief im Erdinnern in Mineralen gelöst. Das Wasser, das in die Kristallstruktur dieser Minerale eingebaut ist, hat einen drastischen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Erdmantels, und es erscheint mehr und mehr wahrscheinlich, dass es Plattentektonik auf der Erde nur gibt, weil Wasser im Erdmantel vorhanden ist. Dies würde auch den Unterschied zu Venus und Mars erklären, deren Kruste im Wesentlichen starr ist.

Aus der Frühgeschichte der Erde sind keinerlei Gesteine überliefert. Lange Zeit erschienen die Ereignisse in den ersten 500 Millionen Jahren der 4,6 Milliarden Jahre

alten Erdgeschichte daher völlig unzugänglich. Durch Vergleich der beobachteten chemischen Zusammensetzung mit Ergebnissen aus Hochdruckexperimenten kann man heute jedoch viele Ereignisse der frühen Erdgeschichte rekonstruieren. So wurde in Bayreuth u. a. gezeigt, dass die Erde kurz nach ihrer Entstehung wahrscheinlich vollkommen durchgeschmolzen war, mit einem flüssigen Magmoozean aus Silikatschmelze, der einen flüssigen Kern aus Nickel-eisen umhüllt hat.

Geodäsie

Geodätische Messungen von Topographie, Erdkrustenbewegungen, Meeresspiegel oder Massenverlagerungen liefern wichtige indirekte Erkenntnisse zur Dynamik des Erdinnern. Durch einen enormen Genauigkeitsschub der geodätischen Beobachtungsverfahren in jüngster Zeit, sowohl bei Satellitentechniken als auch bei terrestrischen Verfahren, werden die Veränderungen der Erdfigur, des Gravitationsfelds der Erde und der Kreisbewegung unseres Planeten im Raum als Prozesse des Erdsystems messbar. Dennoch, die Veränderungen gehen sehr langsam vor sich und ihr experimenteller Nachweis erfordert lange, genaue und sehr homogene

Messreihen. Nur durch eine gleichzeitige Realisierung eines globalen Referenzsystems offenbaren sich regionale tektonische Bewegungsprozesse, isostatische Ausgleichsvorgänge oder Veränderungen des Meeresspiegels als Teile globaler Abläufe. Hierauf richten sich wesentliche Teile der heutigen Forschungsarbeiten der Erdmessungskommission (BEK) und des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI); und von diesen beiden geodätischen Einrichtungen der Akademie kamen auch wichtige Impulse zur Entwicklung der modernen Erdmessung.

Um die Brücke zwischen terrestrischer Gravimetrie und moderner Satellitengravimetrie zu schließen, arbeitet man in der BEK an der Entwicklung eines neuartigen Fluggravimeters, das mit höherer Auflösung als bestehende Sensoren noch nicht erfasste Gebiete, wie z. B. die Meeres- oder Eisoberflächen, gravimetrisch vermessen soll.

Langzeitvorhaben dokumentieren den Wandel

Als Beitrag zur globalen Erfassung von tektonischen Bewegungsprozessen analysiert die BEK seit 1995 ununterbrochen die Messreihen einer großen Anzahl von festen GPS-Stationen. Millimetergenau werden die Bewegungsraten in der tektonischen Kollisionszone in Island, um den Mittelmeerraum und neuerdings des Alpenbereichs erfasst. Hebungen von jährlich 1 bis 2 mm werden über den gesamten Alpenbogen erwartet. Sie nachzuweisen ist eine große Herausforderung, während die Bestimmung der horizontalen Deformationen, insbesondere im Bereich des Friauls, einem seismisch sehr aktiven Gebiet, nicht mehr schwerfällt. Die geodätischen Beobachtungen weisen auf signifikante Kompressionen in der oberen Kruste. Kann die Kruste die aufgestauten Span-

Abb. 2: Zwei Mitarbeiter des Bayerischen Geoinstituts vor einer Mehrstempel- presse. In diesen Pressen wird die Probe zwischen acht Stempeln aus Wolframcarbid komprimiert. Die Probe kann über eine elektrische Widerstandsheizung auch geheizt werden, wobei die Temperatur mit einem Thermoelement gemessen wird. Mit diesen Apparaturen lassen sich Drücke bis zu 260.000 Atmosphären und Temperaturen über 3.000° C erreichen.



BAYERISCHES GEOINSTITUT

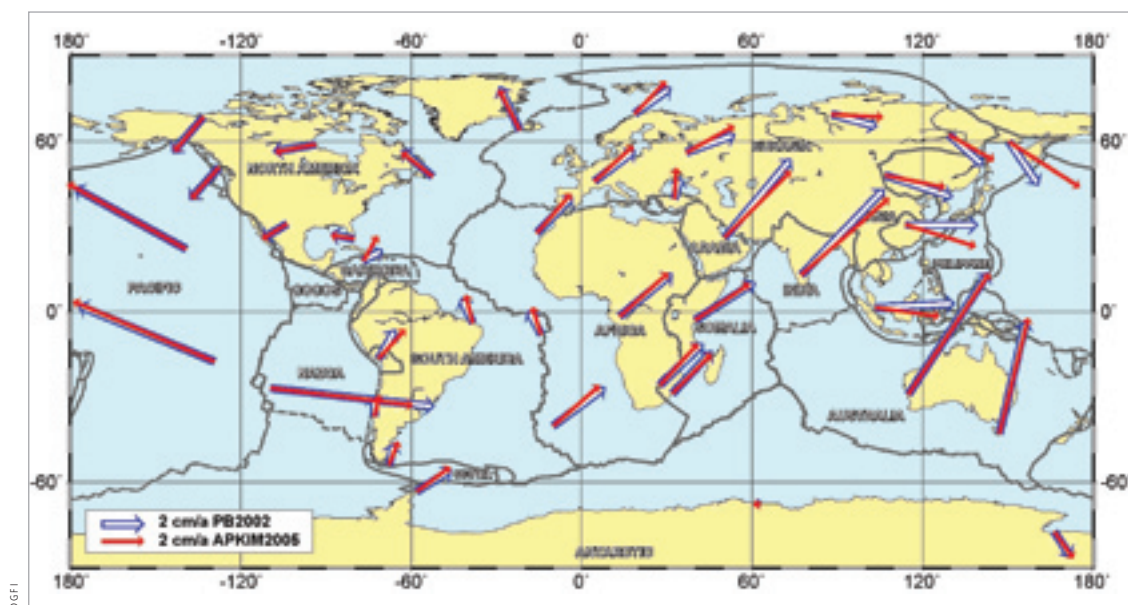


Abb. 3: Die Bewegungsraten der tektonischen Platten, abgeleitet aus geodätischen Messverfahren im Vergleich zu den Bewegungsraten über geologische Zeiträume aus geophysikalischen Verfahren.

nungen nicht mehr halten, entladen sich die Spannungen in Form von Erdbeben.

Aus den beinahe sechs Jahrzehnte umfassenden Arbeiten des DGFI lässt sich sehr schön der Wandel von klassischen astronomisch-geodätischen Messmethoden zu den modernen Raumverfahren und von einem regional auf Bayern und den Alpenraum ausgerichteten Arbeitsgebiet auf globale, für das Verständnis des Erdsystems relevante Forschungsarbeiten ablesen. So konnte schon sehr früh mit Verfahren der Satellitengeodäsie das globale Bewegungsmuster der tektonischen Platten rekonstruiert werden. Es lässt sich vergleichen mit den Bewegungsraten über geologische Zeiträume, wie sie sich aus geophysikalischen Methoden ergeben (Abb. 3). Die Übereinstimmung ist im Allgemeinen überraschend gut. Die Ursache einiger regionaler Abweichungen gilt es nun zu erforschen. Exemplarisch baute das DGFI ein geodätisches Grundlagennetz für Südamerika auf, sowohl für die dortige Landesvermessung als auch zur Analyse der Geodynamik der Subduktionszone entlang der Anden. Der Schwer-

punkt der Arbeiten verlagert sich jedoch zunehmend auf die Erforschung globaler Prozesse im Erdsystem. Das DGFI gehört zu den bedeutendsten Datenanalysezentren der Internationalen Assoziation für Geodäsie und ist treibende Kraft beim Aufbau eines globalen geodätisch-geodynamischen Beobachtungssystems. Eines der zentralen Forschungsthemen des DGFI ist der globale Wasserkreislauf. Dazu gehört die Erfassung der Bilanz der großen Flusseinzugsgebiete ebenso wie die der Veränderungen der jahreszeitlichen Schwankungen des atmosphärischen Teils des Wasserkreislaufs oder die Trendanalyse des globalen Meeresspiegels. Es zeigt sich zum Beispiel, dass der durchschnittliche jährliche Anstieg des Meeresspiegels 3,4 mm beträgt, die regionalen Abweichungen von diesem Trend jedoch beträchtlich sind. Die wesentlichen Ursachen, thermische Expansion der Ozeane und das Abschmelzen einiger Eisschilde, werden zurzeit untersucht. Die geodätischen Verfahren erlauben wichtige Querkontrollen. Die Massenverlagerungen im Wasserkreislauf zeigen sich sowohl im Gravitationsfeld, wie auch durch die Auflast dieser Massen, in mess-

baren Verformungen der Erdfigur. Sie resultieren aber auch in Oszillationen der Kreiselbewegungen unserer Erde, das heißt in messbaren Variationen der Erdrotation.

Schlussbemerkung

Mit den geodätischen und experimentell-geowissenschaftlichen Arbeiten in der Akademie gelang es seit dem Gründungsjahr 1759 nicht nur sehr schnell, die „geographischen Finsternisse“ aus Bayern zu vertreiben. Wichtige Beiträge der Grundlagenforschung bringen bis heute mehr Licht in das Verständnis unserer Erde.



Reinhard Rummel ist Lehrstuhlinhaber für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der TU München und Vorsitzender der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung. Hermann Drewes ist Direktor des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts. Hans Keppler ist Direktor des Bayerischen Geoinstituts in Bayreuth. Christof Völksen ist Organisatorischer Leiter der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung.