

Heinz Kautzleben

Neue Ziele der Geowissenschaften *

1. Einführung

Es ist heute üblich, den Begriff Geowissenschaften in dreierlei Weise zu verwenden: einerseits umfassend zur Bezeichnung aller erdwissenschaftlichen Disziplinen, andererseits in der engsten Fassung als Synonym für die Gruppe der geologischen Wissenschaften und schließlich als zusammenfassende Bezeichnung für mehr oder weniger unterschiedliche Gruppierungen von erdwissenschaftlichen Disziplinen, die zwischen diesen beiden Extremen angesiedelt sind. Sehr häufig bezeichnet man mit diesem Begriff diejenige Gruppe von Disziplinen, die sich alle mit dem Erdkörper und der sog. „festen“ Erde befassen. In Übereinstimmung mit der Tendenz, die Erde als einheitliches Ganzes zu betrachten, wird im folgenden der Begriff Geowissenschaften in der umfassenden Bedeutung verwendet.

Die Geowissenschaften gehören zu den ältesten wissenschaftlichen Disziplinen. Sie entstanden aus dem Bedürfnis der menschlichen Gemeinschaft, in der natürlichen Umwelt zu bestehen und die Ressourcen der Erde zu nutzen, und dem damit verbundenen Streben nach Verständnis und wissenschaftlicher Erkenntnis der irdischen Umwelt. Die heutigen Ziele ergeben sich aus dem erreichten Stand der Nutzung der Erde und ihrer Ressourcen und andererseits aus den modernen Möglichkeiten zur Erkundung und Ausbeutung der Erde und ihrer Ressourcen.

Die Geowissenschaften verfolgen im Prinzip die Aufgaben, Informationen zu gewinnen und sie zu aktuellen Planungsunterlagen für das Handeln von menschlichen Gemeinschaften aufzubereiten. Das größte inhaltliche Problem ist die Mehrdeutigkeit der Beobachtungen.

Der heutige Stand der Geowissenschaften ist durch den Einsatz moderner Informationstechnologien, die globale Sicht auf die Probleme und die Behandlung komplexer Fragestellungen gekennzeichnet. Die wachsende

* Thesen eines Vortrages in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 16. Juni 1994

Formalisierung und Automatisierung zwingt dazu, die eingesetzten Methoden bestmöglich wissenschaftlich abzusichern.

Mit dem Vortrag soll ein Beitrag zu den laufenden wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussionen über die weitere Entwicklung der Geowissenschaften geleistet werden. Angaben über die bei der Ausarbeitung des Vortrages verwendeten Veröffentlichungen und Konferenzberichte können vom Verfasser angefordert werden.

2. Tradition und Wandel im System der Geowissenschaften

Die Geowissenschaften bilden ein System von sich einander ergänzenden und überdeckenden Arbeitsrichtungen. Ihre gemeinsamen Merkmale sind die unmittelbare Beobachtung der Natur, die räumliche Anbindung und Differenzierung der zu untersuchenden Objekte und die Synthese der Erkenntnisse zur detailgetreuen Darstellung. Die einzelnen Gebiete und Arbeitsrichtungen werden entscheidend durch ihren jeweiligen Gegenstand charakterisiert, wobei als Bezug der Betrachtung traditionell die menschliche Gemeinschaft gilt.

Das System der Geowissenschaften setzt sich unter dieser Sicht aus folgenden Gebieten und Arbeitsrichtungen zusammen:

- die Geographie als Wissenschaft vom Lebensraum der Menschen
- die Gruppe der Wissenschaften, die sich mit den natürlichen Komponenten des menschlichen Lebensraumes befassen; diese umfaßt: die Meteorologie, die sich mit dem Luftraum beschäftigt; die Ozeanologie als Wissenschaft von den Weltmeeren; die Hydrologie, die die Gewässer des Festlandes untersucht; die Pedologie als Wissenschaft von den Böden; schließlich die Geologie und die weiteren geologischen Wissenschaften, deren Gegenstand die Erdrinde und die mineralischen Ressourcen sind,
- die methodisch orientierten Arbeitsrichtungen: Geophysik, die alle irdischen Erscheinungen untersucht, die sich messen und mathematisch beschreiben lassen und allgemein gültigen Gesetzen unterliegen, und die speziell als Physik des Erdkörpers angesehen werden kann; Geochemie als Chemie der Erdrinde und Geodäsie, die auf die Orientierung im Lebensraum ausgerichtet ist,

- einige Arbeitsrichtungen, die die Wechselbeziehungen von Geosphäre und Biosphäre untersuchen.

In den Geowissenschaften vollzieht sich gegenwärtig inhaltlich und methodisch ein qualitativer und quantitativer Wandel.

Dabei bilden sich neue Ziele der Geowissenschaften heraus, die man in den folgenden drei Komplexen zusammenfassen kann:

- I. Den Planeten Erde besser verstehen
- II. Grundlagen für die bessere Nutzung der Ressourcen der Geosphäre
- III.a Grundlagen für den Schutz der Umwelt
- III.b Prognose von Naturkatastrophen

Es sind das nicht einfach neue Formulierungen für die traditionellen Aufgaben und Ziele der Geowissenschaften, die naturgemäß weiterwirken, sondern qualitativ neue Orientierungen unter den neuen Bedingungen für das Leben der auch zahlenmäßig stark gewachsenen Menschheit.

Zum Zielkomplex II ist zu bemerken, daß gegenwärtig zwei gegenläufige Tendenzen wirken. Einerseits ist das Bewußtsein gewachsen, daß die mineralischen und energetischen Ressourcen der Geosphäre prinzipiell begrenzt sind und die Menschheit deshalb sparsamer damit umgehen müsse. Andererseits sind die Preise für die mineralischen und energetischen Rohstoffe wegen übergroßer Angebote zur Zeit derart niedrig, daß die Erkundung und die Ausbeutung von neuen Lagerstätten nur mit äußerst rationellen Technologien ökonomisch rentabel sind. Hinzu kommen in vielen Ländern hohe Forderungen zum Umweltschutz.

Der Zielkomplex III.a und b bedeutet eine entscheidende Präzisierung der allgemeinen geowissenschaftlichen Zielstellung: Grundlagen für die Gestaltung des Lebens in der natürlichen Umwelt schaffen. Der neue Zielkomplex resultiert einerseits daraus, daß die moderne Gesellschaft auf die natürliche Umwelt nachhaltig und mit schädlichen Auswirkungen auf das menschliche Leben einwirkt, und wird zum anderen deshalb erforderlich, weil die Empfindlichkeit der Gesellschaft gegenüber Naturkatastrophen stark gewachsen ist und noch weiter wächst.

In Verbindung mit den Zielen ändert sich auch der Charakter der geowissenschaftlichen Methoden. Die neuen Kennzeichen sind vor allem:

- A. Generelle Nutzung moderner Informationstechnologien
- B. Systembetrachtung

C. Modellierung

Grundlegend für den Wandel der Ziele und Methoden ist, daß die traditionellen Disziplinen eine hohe Reife erreicht haben. Das drückt sich deutlich in der Kette Beobachtung-Messung-Präzision-Parametervielfalt-Datenflut aus. Die Probleme werden zunehmend aus der globalen Sicht auf den einheitlichen Planeten Erde betrachtet. Die aktuellen Fragestellungen betreffen zunehmend komplexe Probleme. Mit den neuen Methoden sind stets auch neue Konzepte verbunden.

In den Geowissenschaften, besonders in den messenden Arbeitsrichtungen wurden schon lange Zeit Modelle verwendet, und zwar im Sinne physikalisch begründeter Modelle, mit denen eine Situation näherungsweise beschrieben werden kann. Diese Modelle werden mathematisch-physikalisch beherrscht. Im gleichen Maße, wie Messungen in allen Teilgebieten der Geowissenschaften die traditionellen Beobachtungen ergänzen und erweitern, wächst auch die Anwendung dieser Modelle, wird dieser Modellbegriff vertieft und erweitert.

Qualitativ neu ist dagegen der systemanalytische Modellbegriff, der in den Geowissenschaften mit Einführung der Systembetrachtung in wachsendem Maße angewendet wird. Dabei wird das Modell als Ersatzvorstellung für komplizierte Systeme und Prozesse genutzt. Es ist nicht erforderlich, daß ein solches Modell mathematisch-physikalisch voll beherrscht wird.

Mit Hilfe dieses Modellbegriffs wurde es möglich, in überschaubarer Weise die Untersuchungen zur Dynamik der Erde zu erweitern bzw. neu zu beginnen.

3. Das System Erde, Ansätze zur Modellierung

Der Planet Erde ist ein komplexes dynamisches System. Als Ganzes ist dieses System gegenwärtig (noch) nicht oder lediglich mit einschneidenden Generalisierungen bzw. Vereinfachungen beherrschbar. Es zeigt jedoch in räumlicher und zeitlicher Hinsicht eine ausgeprägte Systemstruktur, so daß ausgewählte Aspekte relativ unabhängig voneinander behandelt werden können. Bei näherer Betrachtung müssen aber die vielfältigen Wechselwirkungen innerhalb des Systems berücksichtigt werden.

Zur schrittweisen Modellierung des dynamischen Gesamtsystems bietet sich die Aufspaltung entsprechend den charakteristischen räumlichen

und zeitlichen Maßstäben der Prozesse an. Deutlich ausgeprägt sind die folgenden Zeitmaßstäbe der globalen Änderungen des System Erde:

a) Jahrtausende bis Jahrmillionen, b) Jahrzehntausende, c) Jahrzehnte bis Jahrhunderte, d) Tage bis Jahreszeiten, e) Sekunden bis Stunden.

Am wenigsten voneinander abhängig bzw. am leichtesten in ihrer Wechselwirkung überschaubar sind die Vorgänge mit dem längsten Zeitmaßstab a (Jahrmillionen bis Jahrmillionen) einerseits und die mit den kürzesten Zeitmaßstäben d und e andererseits. Erstere sind mit der planetaren und geologischen Entwicklung der Erde verbunden. Für die letzteren sind diese ohne Einfluß; man kann für die Kurzzeitprozesse als Randbedingung eine zeitlich stabile Struktur des Planeten voraussetzen.

Das größte Interesse beanspruchen gegenwärtig die globalen Änderungen in den beiden mittleren Zeitmaßstäben b (Jahrzehntausende) und c (Jahrzehnte bis Jahrhunderte). Im Maßstab b sind es die Änderungen der sog. „festen“ Erde, im Maßstab c die globalen Änderungen der „Umwelt“ mit den Klimaänderungen als einer der wichtigsten Komponenten.

Bei der Modellierung der globalen Änderungen des Systems Erde in diesen beiden Zeitmaßstäben dürfte gegenwärtig die Modellbildung für die globalen Änderungen der Umwelt und speziell für die Klimaänderungen am weitesten fortgeschritten sein.

In ein solches Modell müssen als Hauptelemente des Klimasystems die Atmosphäre und ihre Unterlage Ozean und Festland (d.h. Wasser, Boden, Vegetation, Schnee und Eis) eingehen. Die Energiezufuhr erfolgt durch die Sonnenstrahlung und die Rückstrahlung von der Unterlage. Den Hauptteil der Untersuchungen bilden: die Physik und Dynamik der Atmosphäre, die dynamische Kopplung von Atmosphäre und Ozean, der Wasserkreislauf (Verdunstung, Bewölkung, Niederschlag, Abfluß) sowie die Chemie und Biogeochemie der Systemelemente. Von kritischer Bedeutung sind die biogeochemischen Kreisläufe, darunter der des Kohlendioxids. Als natürliche äußere Einwirkungen auf das Klimasystem sind Vulkanismus und Impakte von kosmischen Körpern zu analysieren. Das schwierigste, aber gesellschaftlich wichtigste Problem stellen die menschlichen Einflüsse durch die Landnutzung und die chemischen Einträge dar.

Mit der Modellierung der globalen Änderungen von Klima und Umwelt müssen der Ausbau und die Nutzung der meßtechnischen Möglichkeiten zum Nachweis solcher Änderungen einhergehen.

Aus offensichtlichen Gründen weniger weit fortgeschritten ist gegenwärtig die Modellierung der globalen Prozesse im System Erde im Zeitmaßstab von Jahrzehntausenden bis Jahrmillion. Sie betrifft die globalen Änderungen der „festen“ Erde.

Ein solches Modell muß als Hauptelemente den Erdmantel mit der Lithosphäre als äußerer Schale und dem eingeschlossenen Erdkern umfassen. Gewissen Einfluß dürfte das umschließende Klimasystem haben. Getrennt zu untersuchen sind die Prozesse bei der Entstehung und in der Frühphase der Entwicklung des Planeten Erde. Das überragende Interesse beanspruchen gegenwärtig die Prozesse im Subsystem Erdmantel mit Lithosphäre, die mit den Termini Konvektion im Erdmantel und Plattentektonik umschrieben werden könnten. Vielfach hypothetisch sind die Versuche zur Modellierung der Prozesse im Erdkern und der Wechselwirkung mit Ozean, Atmosphäre und Biosphäre, d.h. mit dem Klimasystem, berücksichtigt werden, die mit dem Begriff Paläoklima beschrieben werden kann.

Eine Modellierung der Entstehung und Entwicklung der Erdrinde (des Objektes der Geologie) ist gegenwärtig noch nicht möglich.

4. Orientierungen für die Forschungen zur „festen“ Erde

Die im Abschnitt 2 formulierten neuen Ziele der Geowissenschaften betreffen alle erdwissenschaftlichen Disziplinen. Für die Forschungen zur „festen“ Erde kann man sie in Übereinstimmung mit den Empfehlungen des National Research Council der USA wie folgt spezialisieren:

- I. Förderung des wissenschaftlichen Verständnisses für alle Prozesse im Teilsystem „Feste“ Erde und seine Wechselbeziehungen mit der flüssigen und gasförmigen Umhüllung und der Biosphäre
- II. Sicherung ausreichender Vorräte an Wasser, energetischen und mineralischen Ressourcen unter Beachtung ihrer Gewinnbarkeit mit umweltschonenden Technologien
- III.a Verminderung der Risiken von geologisch-geophysikalisch Katastrophen durch verbesserte Prognosen
- III.b Verminderung von Änderungen der (geologischen) Umwelt durch die Tätigkeit des Menschen

Als Forschungsgebiete hoher Priorität sind deshalb zu empfehlen:

- A. Globale Paläo-Umwelt und biologische Entwicklung, vorrangig in den letzten 2,5 Millionen Jahren
- B. Globale geochemische biogeochemische Kreisläufe
- C. Fluida innerhalb und auf der Erde, Druck und Zusammensetzung der Fluida in der Erdkruste, Strömung in Sedimentbecken
- D. Dynamik der Erdkruste im Bereich von Ozean und Kontinent, insbesondere aktive Deformationen der Erdkruste
- E. Dynamik von Erdmantel und Erdkern, insbesondere: Konvektion im Erdmantel, Entstehung und Veränderung des Erdmagnetfeldes, Natur der Kern-Mantel-Grenze

Bei der Ausarbeitung von Programmen für die Forschungen zur „festen“ Erde ist es gegenwärtig nur in Ansätzen möglich, in ähnlich konsequenter Weise wie bei den Untersuchungen zu den globalen Änderungen von Klima und Umwelt die Systembetrachtung und die damit verknüpfte Modell-Methode einzusetzen.

In den nächsten Abschnitten werden einige derartige Bemühungen für die Teilgebiete Geophysik und Geodäsie (selbstverständlich nur in Stichworten) vorgestellt.

5. Modellierung für Probleme der Geophysik und Geodäsie

Die Geophysik (im engeren Sinne) befaßt sich mit denjenigen Erscheinungen des Erdkörpers, die sich messend erfassen und mathematisch beschreiben lassen und die allgemein gültigen Gesetzen unterliegen. Ausgangspunkt und Zielstellung sind Modelle zur Entwicklung, Struktur und Dynamik der Erde als Ganzes oder von abgrenzbaren Teilen bzw. Teilerscheinungen der Erde.

Die Geodäsie befaßt sich (als eigenständige Disziplin der Geowissenschaften) mit der Orientierung im Lebensraum des Menschen. Sie benötigt dazu - ähnlich wie die Geophysik - mathematisch-physikalisch definierte Modelle zur Struktur und Dynamik der Erde. Die angestrebte Genauigkeit der Koordinaten (heute besser als 1 cm) bestimmt die Eigenschaften des jeweiligen Modells. Die Geodäsie liefert Grenzwerte und einschränkende Bedingungen für die Weiter- und gelegentlich Neuentwicklung relevanter geophysikalischer Modelle.

Modelle sind Werkzeuge (methodische Hilfsmittel) zur idealisierten Beschreibung der Wirklichkeit, zur Entwicklung von Beobachtungs- bzw. Meßverfahren oder zur Aufbereitung der Beobachtungen bzw. Meßdaten. Im Idealfall kann ein und dasselbe Modell für alle diese Aufgaben genutzt werden. Im Verlaufe der weiteren Untersuchungen werden die korrespondierenden Parameter der verschiedenen Modelle qualitativ und quantitativ miteinander verglichen.

Bewährt haben sich die folgenden Modell-Typen:

- theoretische Modelle zur Erklärung der geowissenschaftlichen Erscheinung; sie werden bei der Lösung der direkten Aufgaben entwickelt und verwendet,
- (physikalische) Modelle zur Messung und physikalisch begründeten mathematischen Beschreibung der Erscheinungen; ihre Parameter werden aus den Meßdaten durch die Lösung von inversen Aufgaben bestimmt,
- systemanalytische Modelle zur Verdichtung und sachdienlichen Aufbereitung der Meß- und Beobachtungsdaten, ohne daß es schon ausreichend fundierte theoretische Modelle gibt; auch hierbei sind inverse Aufgaben zu lösen.

Die Modell-Methode ist grundsätzlich als ein iterativer Prozeß anzuwenden. Zur Ableitung des Modells gehört in jedem Fall eine mathematisch-statistische und die geowissenschaftliche Bewertung. Die jeweilige Stufe der Modellierung ist erst dann vollständig, wenn auf Grund geeigneter Kriterien auch Vorschläge zur Weiterentwicklung des aktuell abgeleiteten Modells unterbreitet werden.

Im Bereich von Geophysik und Geodäsie ist gegenwärtig (insbesondere aus der Sicht der Geodäsie) die Modellierung von drei Klassen von geowissenschaftlichen Problemen vordringlich: a) geophysikalische Probleme mit besonderer Relevanz zur Geodäsie, b) Erdmodelle und c) dynamische Komplexprobleme.

Der Stand der Bearbeitung ist dabei schon beachtlich. Die relevanten Fragen können häufig so klar formuliert werden, daß mathematisch-physikalische Modelle angestrebt werden können.

Im einzelnen muß auf die umfangreiche Literatur verwiesen werden.

Als geophysikalische Probleme mit besonderer Relevanz zur Geodäsie wären zu nennen:

I. Entstehung und frühe Entwicklung der Erde

mit den inhärenten Fragen:

Entstehung der Sonne und des Planetensystems, Akkumulation von Masse und Energie, Bildung des Erdmondes, Bildung des Erdkerns, Bildung und Entwicklung der Erdrinde

Relevanz:

Figur der Erde, Dynamik des Erde-Mond-Systems

II. Struktur und Dynamik der Erde im großen

mit den Teilproblemen:

Grenze Erdkern - Erdmantel

Relevanz: Rotationsdynamik

Strömungen im Erdkern

Entstehung, Unterhaltung und Änderungen des Erdmagnetfeldes

Relevanz: Rotationsdynamik

Strömungen im Erdmantel

Wechselwirkung mit der Lithosphäre, Plattentektonik, plumes und hot spots

Relevanz: Auswirkungen im Schwerfeld

Lithosphäre und Isostasie

III. Dynamik der Lithosphäre im ozeanischen Bereich

Bildung, Ausbreitung

Relevanz: Belastungseffekte, Auswirkungen im Schwerfeld

IV. Entwicklung, Struktur und Dynamik der Kontinente

Erdkruste im kontinentalen Bereich,

Kollision, Subduktion, Riftbildung, Intraplattentektonik

Relevanz: Topographie, Schwereanomalien, rezente Bewegungen der Erdkruste

V. Wechselwirkungen der festen Erde mit Hydro-, Atmo- und

Kryosphäre

langfristige Veränderungen in Topographie, Meeresströmungen, Klima

Relevanz: Schwankungen des Meeresniveaus, Topographie der Meeresoberfläche, Gezeitenbelastungen

Als aktuelle Aufgaben bei der Ableitung und Präzisierung der Erdmodelle wären zu nennen:

I. Seismische Modelle des Erdinnern:

Ableitung voll-dreidimensionaler Strukturmodelle,
Entwicklung von voll-dreidimensionalen Strukturmodellen für einzelne Regionen und für einzelne Schichten im Erdinnern

Anmerkung:

Testung durch geodätische und gravimetrische Aussagen

II. Modelle der Konvektion im Erdmantel

mit den inhärenten Fragen:

physikalische Charakteristika, Ausbreitung bzw. Unterteilung der Strömung, plumes, Wechselwirkung mit der Lithosphäre

Anmerkung:

Bedeutung der gravimetrischen Daten, Integration seismischer Daten

III. Modelle zur Dynamik des Erdkerns

mit den inhärenten Fragen:

Dynamo-Modell des Erdmagnetfeldes, Strömung im Erdkern, Einfluß des Erdmantels

Anmerkung:

Bedeutung der Rotationsdynamik

Während man bei der Ableitung der bisher erwähnten Modelle von den geophysikalischen Daten ausgeht, bilden bei den folgenden dynamischen Komplexproblemen die geodätischen Beobachtungen den Ausgangspunkt:

A. Kurzzeitdynamik der rotierenden deformierbaren Erde

zur Erfassung, Erklärung und Vorhersage der Schwankungen der Erdrotation und der Erdzeiten

Vorgehensweise:

Wahl von Grundmodellen, Überlagerungen 1. Ordnung, Überlagerungen 2. Ordnung (rheologische Effekte)

B. „Langzeit“-Änderungen von Erdoberfläche und Schwerfeld

(im kontinentalen und im ozeanischen Bereich)

zur Erfassung und Deutung der rezenten Bewegungen der Erdkruste und verbundener Phänomene

Vorgehensweise:

Klassifikation nach Erscheinungsformen und vermuteten Ursachen, endogene Vorgänge, exogene Vorgänge.

6. Analyse der Beobachtungen, Lösung der inversen Aufgabe

In den Geowissenschaften ist die Rolle der Beobachtung der Naturerscheinung besonders hoch. Experimente im Sinne einer zielgerichteten Beeinflussung des Untersuchungsobjektes sind bekanntlich praktisch nicht möglich.

In der Vergangenheit war es üblich und durchaus zulässig, bei der Analyse der Beobachtungen empirische Methoden anzuwenden. Etwaige Fehler und Unzulänglichkeiten konnten noch relativ leicht bei der geowissenschaftlichen Bewertung der Ergebnisse erkannt und ausgemerzt werden. Im selben Maße, wie bei den Beobachtungen die Formalisierung und Automatisierung sich ausbreitet, müssen jedoch auch die Methoden zur Analyse der Beobachtungen mathematisch weiter qualifiziert werden.

Die Analyse der Beobachtungen bzw. Messungen erfordert ein sachgerechtes Modell und führt zur Lösung von inversen Aufgaben.

Es gibt mehrere Standardverfahren zur primären Analyse der Beobachtungen. Auch diese sind an Modelle für die zu untersuchende Erscheinung gebunden. Typische Beispiele sind die Zeitreihenanalyse und die sphärisch-harmonische Analyse.

Gewöhnlich treten zwei Typen von inversen Aufgaben auf: Einmal wird einfach die Kompression der Meßdaten angestrebt, um die Datenfülle zu reduzieren, die Meßfehler zu Eliminierung und die positive Information deutlich zu machen. Dazu sind mathematisch-statistische Modelle erforderlich. zum andern sollen, ausgehend von den Meßwerten, die numerischen Parameter im angesetzten Modell geschätzt werden. Das erfordert physikalisch begründete bzw. systemanalytische Modelle. Zur Lösung der inversen Aufgaben gehört in beiden Fällen, daß die Güte der erreichten Aussage und damit die Güte des Modells beurteilt wird.

Die Behandlung der inversen Aufgaben ist angewandte Mathematik mit theoretischen Problemen (Schlagwort: schlecht gestellte Aufgaben) und mit praktischen Zielen (Reduzierung des Rechenaufwandes). Es ist eigentlich verwunderlich, daß die Bedeutung dieser Problematik in der Geophysik und den anderen Geowissenschaften erst in jüngerer Zeit erkannt worden ist. Sie wird aber heute sehr tiefgründig bearbeitet.

Als inverse Aufgabe definiert man die indirekte Bestimmung der Parameter m , die in einem mathematischen Modell die Eigenschaften der

geowissenschaftlichen Erscheinung kennzeichnen, aus den Beobachtungen d durch Lösung der Gleichung $f(m, d) = 0$.

Dabei sind zumeist folgende Probleme zu überwinden:

- die Probleme des Modells: unzulängliche Beschreibung, Nichtlinearität
- die Probleme der Daten: relative Anzahl, Datenfehler
- die Probleme der Lösung: Existenz, Eindeutigkeit, Stabilität.

Die Verfahren zur Lösung der Probleme sind recht einfach bei den korrekt gestellten linearen Aufgaben $Am = d$.

Von der Vielzahl von Verfahren zur Lösung von komplizierteren Aufgaben sollen hier lediglich aufgezählt werden:

- Linearisierung/Parametrisierung
- verallgemeinerte Lösung durch Minimierung des Abstandes $\|Am - d\|$,
- Regularisierung mit Hilfe von Zwangsbedingungen zur Herstellung der Eindeutigkeit und zur Stabilisierung

Ansonsten muß auf die umfangreiche Literatur verwiesen werden.

Bei der geowissenschaftlichen Bewertung der erreichten Aussagen sollten die folgenden Grundsätze beachtet werden:

- Man muß davon ausgehen können, daß die Lösung der inversen Aufgabe für das betrachtete konkrete Problem mathematisch und physikalisch korrekt ist.
- Geowissenschaftliche Modelle sind immer nur Näherungsdarstellungen des natürlichen Phänomens. Ist die Lösung der inversen Aufgabe stabil auch gegenüber den Unzulänglichkeiten des Modells?
- Die Lösungen der inversen Aufgaben sind zumeist nicht eindeutig. Es werden zur Deutung zusätzliche Informationen benötigt, zumindest sind Beschränkungen des Modells nötig.
- Viele inverse Probleme sind nichtlinear. Die übliche Linearisierung hat zur Folge, daß zusätzliche Nicht-Eindeutigkeiten entstehen. Zu untersuchen sind deshalb möglichst viele Modelle, die alle mit den verfügbaren Daten verträglich sind.

7. Schlußbemerkung

Die gegenwärtigen Diskussionen zur weiteren Entwicklung der Geowissenschaften sind Teil der ständig wiederkehrenden Auseinandersetzungen zum Verhältnis von Wissenschaft und Gesellschaft. Sie umfassen natürlich den Streit um die Finanzierung der für die moderne Wissenschaft notwendigen Aufwendungen, aber ebenso den Streit um die Aussagen der Wissenschaft, die von einzelnen gesellschaftlichen Interessengruppen erwünscht, von anderen unerwünscht sind.

Die Geowissenschaften sind von diesen Auseinandersetzungen besonders betroffen, einmal wegen der beträchtlichen Aufwendungen z.B. beim Einsatz von Technologien der Raumfahrt, zum andern weil die Geowissenschaften sich mit den beiden grundlegenden Fragen jeder menschlichen Gemeinschaft befassen: dem Lebensraum (anders formuliert: der Umwelt) und den natürlichen Ressourcen, die direkt oder indirekt (durch Vermittlung der Biosphäre) genutzt werden.

Weitgehend akzeptiert wird der Standpunkt, daß die geowissenschaftliche Grundlagenforschung auf einem ausreichenden Niveau kontinuierlich fortzuführen ist, daß die anwendungsorientierten Forschungen in bezug auf die Ressourcen durch den mittelfristig überschaubaren Bedarf bestimmt werden und daß, der Schwerpunkt gegenwärtig auf der Ausarbeitung der geowissenschaftlichen Grundlagen für den Schutz der Umwelt liegt. Als lösbar wird in näherer Zukunft die Prognose von Naturkatastrophen betrachtet, weshalb die entsprechenden Forschungsprogramme ausreichend gefördert werden sollten.

Die wissenschaftsinternen Diskussionen zu den Zielen und Methoden der Geowissenschaften sind natürlich zu jeder Zeit sehr weit gefächert.

Im Vortrag wurde lediglich ein allgemein gültiger, methodologischer Aspekt angesprochen, der eng mit der wachsenden Anwendung der modernen Informationstechnologien verbunden ist. Dieser Aspekt betrifft die konsequente Systembetrachtung und als Teil dessen die durchgehende Einführung und Verwendung von Modellen. Die Verwendung von Modellen ist in einigen Zweigen der Geowissenschaften nicht neu. Als durchgehendes Konzept mit großen Erfolgsaussichten im Gesamtgebiet wird der Modellbegriff jedoch erst in jüngerer Zeit entwickelt. Die Einführung von Modellen bei geowissenschaftlichen Problemen ermöglicht es u.a., die Probleme stärker zu formalisieren und physikalisch zu durchdringen, erfordert aber auch exaktere mathematische Betrachtungen.

Abschließend sei noch angemerkt, ohne es näher ausführen zu können, daß die Geowissenschaften mit jedem neuen Forschungsproblem die interdisziplinäre Arbeit innerhalb ihres Gesamtgebietes und weit darüber hinaus mit den anderen Wissenschaften weiter ausbauen.