

# Alfred Wegener und die moderne Polarforschung

Von F. Loewe \* †

**Summary:** Alfred Wegener initiated many of the modern methods of transport and research in polar regions; he started the study of many problems of polar nature which are now extensively tackled and have in the meantime been partly solved. The article sketches the state of scientific polar exploration at the time of Wegener's activity; it deals briefly with his contributions to the knowledge of polar nature and summarises some recent activity in Greenland and Antarctica which is a continuation and expansion of Wegener's pioneer work in polar exploration and polar research.

Es sind gerade 90 Jahre vergangen, seit Alfred Wegener in Berlin geboren wurde, 65 Jahre, seit er auf einer dänischen Expedition zum ersten Male das Polargebiet betrat, 40 Jahre, seit er als Leiter der nach ihm benannten „Deutschen Grönlandexpedition Alfred Wegener“ auf dem Inlandeise Grönlands einen allzufrühen Tod fand. Wegener war als Polarforscher ein Bahnbrecher, nicht nur durch körperlichen Einsatz in anstrengenden und manchmal gefährvollen Unternehmungen, sondern auch und besonders in seinen wissenschaftlichen Gedanken und Leistungen. Noch heute bauen wir in der Polarforschung in vielem weiter auf den Grundmauern, die er einst gelegt hat. Für ihn gilt wie für wenige das Wort: Wenn die Könige bau'n, haben die Kärner zu tun.

Als Wegener seine Forschungen im Polargebiet begann, waren Dauerstationen für die Beobachtungen von Wetter und Klima nur an leichter zugänglichen Stellen der arktischen Küsten vorhanden. Jedoch lagen die polnächsten Stationen nur gerade jenseits von 70° N; im Südpolargebiet lag nur eine Station jenseits von 55° Breite, die argentinische Station auf der Laurie-Insel der Südorkneyinseln in 61° S. Im eisbedeckten Meer fern vom Land hatte nur Nansens „Fram“ freiwillig mehr als ein Jahr zugebracht; unfreiwillig ein Jahr die „Belgica“ von de Gerlache, und die „Gauss“ der Südpolarexpedition von Drygalskis etwa 60 Kilometer vom Rande des antarktischen Festlandes. Eilige Schlittenreisen hatten im Sommer dreimal das Inlandeise Grönlands gequert, und Scotts erste Expedition hatte als erste den Rand des antarktischen Inlandeises überschritten. Wegener überwinterte dreimal in Grönland, zweimal 1906—1908 während der „Danmark“-Expedition Mylius-Erichsens, einmal 1912—1913 mit Johan Peter Koch vor der Durchquerung Grönlands von Osten nach Westen. Bei der Bearbeitung der Ergebnisse der Durchquerung war Wegener zu der Erkenntnis gekommen, daß eilige Sommerreisen nicht ausreichten, um den Fragen der Inlandeisenatur, vom Boden des Eises bis zur freien Atmosphäre darüber, wirklich näherzutreten. Er war überzeugt, daß man die Inlandeise nur von länger besetzten Stationen aus gründlich erforschen könne. Auch Meinardus hatte auf Grund der Ergebnisse der „Gauss“ die Errichtung von Beobachtungsstationen fern von der Küste als die dringendste Aufgabe künftiger Südpolarforschung erklärt. So entstand bei Wegener der Plan, auf dem Inlandeise Grönlands zwei Stationen mindestens ein Jahr lang aufrechtzuerhalten. Gleichzeitig hatte Wegeners Schüler in Marburg und späterer Mitarbeiter an der Deutschen Seewarte in Hamburg, Johannes Georgi, eine Station auf dem grönländischen Inlandeise für meteorologische Zwecke ins Auge gefaßt. Etwas später lag es auch im Plane eines jungen Engländers, Henry George Watkins, im Süden des Inlandeises Grönlands eine Beobachtungsstelle ein Jahr lang zu unterhalten. Doch wurde die Station, die gleichzeitig mit denen der Wegenerexpedition arbeitete, aus nicht ganz verständlichen Gründen schon nach acht Monaten aufgegeben. Wegeners Expedition glückte es, die Stationen über ein Jahr lang in Gang zu halten,

\* Dr. Fritz Loewe, Dept. of Meteorology, University, Parkville 3052, Australien;  
Institute of Polar Studies, Columbus, Ohio 43210, U.S.A.

† Contribution No. 227 from the Institute of Polar Studies, Ohio State University

eine Leistung, die erst 20 Jahre später von den Expéditions Polaires Françaises unter der Leitung von Paul-Emile Victor wiederholt wurde. Die Station „Eismitte“ der Wegenerexpedition unter der Leitung von Georgi mußte ihre Arbeit unter sehr harten Bedingungen durchführen. Die Überwinterer lebten in einer Firnhöhle, in der die Temperatur ständig um  $-10^{\circ}$  lag; viele der Gerätschaften und wissenschaftlichen Instrumente mußten improvisiert werden. Trotzdem gelang es, wohl zum ersten Mal in der Polarforschung, auch bei äußerst niedrigen Temperaturen lückenlose Aufzeichnungen der meteorologischen Werte zu erhalten. Bemerkenswert ist, daß die Besatzung trotz sehr geringer Vorräte an Frischfleisch und Zitronensaft von Skorbut völlig verschont blieb.

Unter ähnlichen Verhältnissen überwinternten sieben Jahre später die Russen in einem Zelt auf treibender Eisscholle im Nordpolarmeer. Die Drift war allerdings so schnell, daß die Scholle, am Pol besetzt, das Polarmeer schon nach neun Monaten verließ. In der Antarktis war die erste Winterstation fern von der Küste Byrds Überwinterung an der Bollingstation auf dem Ross-Schelfeis 1934. Die erste Station auf dem eigentlichen antarktischen Inlandeis, die wenigstens ein Jahr lang tätig war, ist die Sowjetstation Pionerskaja, die 1956 eröffnet wurde.

Heute finden sich im Innern des von Alfred Wegener erschlossenen grönländischen Inlandeises mehrere Dauerstationen; in den meisten Fällen nicht in erster Linie für wissenschaftliche Zwecke. Einige sind gewaltige Kästen, die auf Stelzen einige Meter über der Schneeoberfläche stehen. Der Fegschnee treibt dann unter ihnen durch. Sie können von Zeit zu Zeit gehoben werden, um die Schneeablagerung im Zuwachsgebiet auszugleichen. Andere Stationen in Grönland und im Südpolargebiet bilden wahre Untergrundsiedlungen. Wohn- und Arbeitshütten, Werkstätten und Kraftanlagen stehen im Eis in weiten Gängen, die von riesigen Schneepflügen und Schneebläsern ausgeschachtet sind. Eine der Inlandstationen in Grönland hatte sogar ein Kernkraftwerk, und die Hauptschwierigkeit war, wie man der überschüssigen Wärme Herr werden könnte, ohne eine bedenkliche Schmelzung des Firns einzuleiten. Die Schmelzwässer wurden in einem innereisigen See gesammelt, der 80 000 t Wasser enthielt, soviel wie ein quadratischer See mit einer Seitenlänge von 200 m und einer mittleren Tiefe von 2 m. Auch die amerikanische Station am McMurdosund des Rossmeeres, einst die Überwinterungsstelle von Scott und Shackleton, hat ein Kernkraftwerk. Hier überwintern Jahr für Jahr etwa 200 Leute.

Bis in die dreißiger Jahre dieses Jahrhunderts blieb Nansens Treibfahrt 1893—1896 durch das Polarbecken ohne Wiederholung. Dann kamen die russischen Treibfahrten auf Eisschollen und die halb unfreiwillige Drift des Sowjetschiffes „Sedoff“. Heute sind im Nordpolarbecken ständig eine Reihe von Stationen tätig. Die Stationen der Vereinigten Staaten von Amerika finden sich meistens auf Tafelgebirgen, die von einem Schelfeis auf der Nordseite der Ellesmereinsel stammen. Diese flachen Eisberge, ganz verschieden von den üblichen der grönländischen Gletscher, erregten bei ihrer Entdeckung nach dem letzten Kriege große Aufmerksamkeit. Doch ist solch ein Schelfeisberg schon vor 80 Jahren von dem deutschen Anthropologen Franz Boas beschrieben worden. Die Stationen der Sowjetunion werden auf ausgedehnten, langlebigen Meereisschollen errichtet. Diese treibenden Stationen werden ausschließlich auf dem Luftwege errichtet und versorgt.

Seit Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts wurden im Schneegebiet die meisten erfolgreichen Polarreisen mit Hundeschlitten ausgeführt. Peary war der große Vorkämpfer dieses Brauches, Scott und Shackleton im Südpolargebiet sind die wesentlichen Ausnahmen. Auch Wegener hatte auf der Danmarkexpedition Hunde benutzt. Der große Vorteil ist im belebten Küstengebiet das Vorhandensein von Jagdwild zur Fütterung. Bei der Durchquerung Grönlands im Jahre 1913 hatten sich Koch und Wegener der Pferde bedient, wie vor ihnen Scott und Shackleton im Südpolargebiet. Scotts zweite

Expedition benutzte auch Maultiere. Auch Wegeners Expedition von 1930 nutzte noch mit Erfolg Pferde, allerdings nur im Randgebiet des Inlandeises und meist auf Land und blankem Eis.

Wegener leitete dann nach mißglückten Versuchen von Shackleton, Scott, Mawson und Byrds erster Expedition die Zeit mechanischer Antriebsmittel an der Oberfläche in die Polarforschung ein. Er benutzte zum ersten Male auf dem Inlandeis von Luftschrauben getriebene Schlitten. Wenn auch die Kinderkrankheiten eines so unerprobten Fahrzeuges im ersten Jahr die Expedition in Schwierigkeiten brachten, muß der Versuch im ganzen als erfolgreich bezeichnet werden. Allerdings sind Propellerschlitten später in der Polarforschung nicht mehr in nennenswertem Umfang benutzt worden. Dagegen verzichtete Wegener 1930 bewußt auf Flugzeuge, etwas überraschend bei seiner Vertrautheit mit der freien Atmosphäre, hatte er doch in jungen Jahren zusammen mit seinem Bruder Kurt eine Welthöchstleistung im Dauerflug mit einem Ballon aufgestellt. Die Gründe waren teilweise geldlicher Art, teilweise fürchtete er, daß der Schwerpunkt der Expedition zu sehr auf die fliegerische Seite fallen würde. Ja, er verbat sich sogar einen Fliegerbesuch durch andere bei der Expedition, weil er fürchtete, daß Flugzeuge mit ihrer scheinbar mühelosen Raumüberwindung die gleichzeitig an der Oberfläche entlangkriechenden Schlittenabteilungen entmutigen könnten. Die Haltung des damals erfahrensten deutschen Polarforschers zeigt, wie sehr sich die Verhältnisse in einem Menschenalter gewandelt haben.

Heutzutage ist der Transport im Polargebiet völlig mechanisiert. Hundeschlitten werden zu Forschungszwecken nur noch ausnahmsweise benutzt. Der große Vorteil mechanischer Transportmittel ist, daß wissenschaftliche Arbeit gewöhnlich längeren Aufenthalt an derselben Stelle erfordert, und daß Zugtiere im Gegensatz zu Maschinen auch während solcher Liegetage gefüttert werden müssen.

Die russische Nordpolstation von 1937—1938 war die erste, deren Lasten ausschließlich mit Flugzeug an Ort und Stelle gebracht wurden. Die Gesamtlast für ein Jahr betrug 10 Tonnen. Gleichzeitig begann der ausgiebige Gebrauch von Flugzeugen in der Antarktis, gekennzeichnet durch die Namen des Australiers Wilkins, der Amerikaner Byrd und Ellsworth, des Norwegers Riiser-Larsen und des Deutschen Ritscher.

Die Dauerstationen im Innern der Polargebiete werden jetzt vielfach auf dem Luftwege errichtet und versorgt. Das gilt für die Stationen im Treibeis des Nordens und die Stationen der Expéditions Polaires Françaises auf dem Inlandeis Grönlands ebenso wie für die Station Amundsen-Scott am Südpol, die nun schon 15 Jahre ununterbrochen tätig ist. Um welche Beförderungsmengen es sich dabei handelt, sei gezeigt am Beispiel der verhältnismäßig kleinen Station Plateau in 79° S und 40° E in 3620 m Höhe, übrigens mit einem Jahresmittel von  $-56^{\circ}$  die kälteste Stelle, die für wenigstens ein Jahr besetzt gewesen ist. Die Station mit 8 Mann Besatzung besteht aus 4 je 11 Meter langen Einheiten, die 2,60 m breit und hoch sind. Jeder Teil wiegt 11 Tonnen, ist aber als Ganzes im Lastflugzeug an Ort und Stelle geschafft worden. Im Südsommer 1967 haben dann 36 Versorgungsflüge 190 Tonnen Nutzlast zur Station gebracht. Davon waren nicht weniger als 120 Tonnen Brennstoff. Bei einer mittleren Temperatur des Winterhalbjahres von  $-68^{\circ}$  muß der Brennstoff ständig erwärmt werden, um nicht zu erstarren.

In anderen Fällen erfolgt die Errichtung und Versorgung der Stationen in der Antarktis durch Raupenschlepper. Das ist im besonderen die Art, in der die Stationen der Sowjetunion im Innern des Südpolargebiets nun schon im 15. Jahr aufrechterhalten werden. Dabei handelt es sich zum Teil um riesige Fahrzeuge, leer bis zu 30 Tonnen schwer, die eine Nutzlast von 50 Tonnen befördern können. Diese Traktoren haben sechs Schlafplätze, Küche und Trockenraum. Allerdings verbrauchen sie etwa 7 Liter Dieselöl für

den Kilometer. Andererseits sind jetzt für leichtere Transporte Motorräder mit Kettenantrieb weitgehend in Benutzung.

Bei all seinen vielfältigen Interessen war Alfred Wegener doch in seinem Beruf in erster Linie Meteorologe. So hat er auf seiner ersten Expedition mit dem Dänen Mylius Erichsen nach Nordostgrönland 1906—1908 die ersten ausgedehnten Studien der freien Atmosphäre im Polargebiet unternommen. Dabei wurden die Meßgeräte je nach dem Wind mit Drachen oder Fesselballons in die Luft gehoben. Die erreichten Höhen waren naturgemäß auf 2—3 Kilometer beschränkt. Wegeners Messungen zeigten eine Zunahme der Temperatur mit der Höhe im Winter; das haben weiter südlich im Scoresbysund Ostgrönlands die Messungen der Oststation von Wegeners letzter Grönlandexpedition bestätigt. Jetzt sind Fesselaufstiege so gut wie ganz aufgegeben. Sie sind ersetzt durch Radiosonden und Radiowindgeräte. Sie melden auf drahtlosem Wege Temperatur, Luftdruck, Feuchte und Wind bis in große Höhen, im Mittel etwa 20 Kilometer. Heute sind im Polargebiet nicht weniger als 40 solcher Stationen mit regelmäßigen Aufstiegen tätig. Ja, mit Hilfe von Raketen erstreckt sich die Forschung auch im Polargebiet in noch viel größere Höhen.

Wegener, im wesentlichen Augenmensch und ein ausgezeichneter Beobachter, hat auch zur Deutung der polaren Lichterscheinungen, Dämmerung und Zodiaklicht in der hohen Atmosphäre beigetragen; heute ist die Erforschung des Polarlichtes und der Ionosphäre ein ausgedehnter Wissenschaftszweig. Von noch höherer Warte aus erweitern jetzt Forschungssatelliten auf polarer Umlaufbahn unsere Kenntnis der Polarwelt in von Wegener nicht geahnter Weise.

Wegener führte auf seiner Grönlandquerung mit Koch zum ersten Male eingehende Untersuchungen über die Schneedecke und die obersten Firnschichten im Innern eines Inlandeises durch. Seit dieser grundlegenden Arbeit Wegeners und Kochs hat sich daraus ein ganzer Wissenschaftszweig polarer Eis- und Schneekunde entwickelt. So gut wie jede Schlittenreise zu wissenschaftlichen Zwecken und jede Überwinterungsstation machen jetzt Beobachtungen der Firnschichtung und der Firn- und Eistemperaturen. Es ist keine Übertreibung zu sagen, daß diese Verhältnisse nun an vielen hunderten von Stellen in allen Teilen Grönlands und der Antarktis bekannt sind.

Während seiner Überwinterung mit Koch auf Storstrømmen in Nordostgrönland hat Wegener zum ersten Male eine Bohrung auf einem bewegten Gletscher des Polargebiets ausgeführt. Ihr war nur eine Bohrung von Drygalskis in einem eingefrorenen Eisberg der Antarktis vorangegangen. Seitdem gehören Bohrungen zu den regelmäßigen Arbeiten von Polarexpeditionen. Viele dieser Bohrungen haben Tiefen von 100 Metern erreicht und überschritten. Ja, an einer Stelle im Innern des grönländischen und einer des antarktischen Inlandeises wurde das Eis bis zum Grunde durchbohrt. In Grönland fand sich an der Bohrstelle, Camp Century, in 1900 Meter Höhe eine Eisdicke von 1360 Metern, in der Antarktis, Byrd Station, in 1500 Meter Höhe eine Dicke von 2160 Metern. Diese Bohrungen wurden mit elektrisch angetriebenen Kernbohrgeräten ausgeführt. Da der jährliche Zuwachs im Innern der Inlandeise nur gering ist, reichen diese Bohrungen bis in Eis, das vor hunderten und tausenden von Jahren an der Oberfläche abgelagert ist. Die Eigenschaften, die wir an den Bohrkernen studieren können, geben uns also Aufschlüsse über weit zurückliegende Vorgänge.

Schon Wegener hatte auf seiner Grönlanddurchquerung 1913 zum Studium der Firnverhältnisse zwei Gruben bis zu 7 Metern Tiefe ausgehoben. Tiefer zu gehen, verbot der Zeitmangel auf eiliger Querung. Während Wegeners Expedition 1930—1931 wurden an zwei Stellen des Inlandeises Schächte zum Studium der Firn- und Eisverhältnisse gebaut; spätere Expeditionen haben die Schachttiefen an der Station Dumont-Jarl Joset des

grönländischen Inlandeises auf 40 m ausgedehnt. Im Schacht der Station Eismitte der Wegenerexpedition wurde zum ersten Mal eine Jahresschichtung im Firn festgestellt, was Wegener im Zentralgebiet, wo sommerliche Schmelzschichten fehlen, als unmöglich betrachtet hatte; ein guter Beweis für die besseren Erkenntnismöglichkeiten an den von Wegener zum ersten Mal ins Leben gerufenen Dauerstationen auf dem Inlandeis. Das gestattete, das Alter der Firnschichten und den Jahreszuwachs zu bestimmen, was für die Feststellung des Massenhaushalts der Inlandeise unerlässlich ist. Spätere Expeditionen haben in Schachtbauten und Bohrungen die Schichtung bis in größere Tiefen verfolgen können. So wurde am Südpol aus der Kristallstruktur der jährliche Zuwachs lückenlos für die letzten 200 Jahre gemessen, mit Lücken bis auf 400 Jahre. Das reicht soweit zurück wie die ältesten zuverlässigen Niederschlagsbeobachtungen in Europa, eine ganz wesentliche Erweiterung unserer Kenntnis früherer Klimate.

Seitdem sind neue Methoden entwickelt worden, die erlauben, den Massenzuwachs im Innern der Inlandeise noch viel weiter zurückzubestimmen. Es handelt sich dabei um die Messung des Gehalts an Isotopen, Sonderformen der gewöhnlichen Elemente, vor allem Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff und Blei. Die Menge der Isotope hängt beim Wasserstoff und Sauerstoff von der Temperatur ab, bei der sich der Schnee in der Luft aus dem atmosphärischen Wasserdampf gebildet hat. So kann man aus dem Gehalt an zweiatomigem Wasserstoff, Deuterium genannt, oder an Sauerstoff mit dem Atomgewicht 18 erfahren, ob der Schnee im Sommer oder Winter abgelagert worden ist, und gegebenenfalls, ob sich die Mitteltemperaturen des Jahres im Verlauf längerer Zeit geändert haben. Das ist auch noch in solchen Fällen möglich, in denen der Schnee schon in Eis übergegangen ist und sich äußerlich keine Schichtung mehr feststellen lässt.

Das Isotop des Kohlenstoffs, Kohlenstoff 14, ist dem Kohlenstoff beigemischt, der sich in der Kohlensäure findet, die einen Bestandteil der Luft bildet. Auch die Luft, die im abgelagerten Schnee enthalten ist, enthält dieses Isotop des Kohlenstoffs. Nach einiger Zeit sperrt im Zuwachsgebiet der Gletscher der fortwährende Zuwachs an der Oberfläche die tieferen Schichten vom Austausch mit der Luft und dem Kohlenstoff 14 in ihr ab. Da Kohlenstoff 14 im Laufe der Zeit radioaktiv zerfällt, findet sich mit zunehmender Dauer der Abschließung weniger und weniger davon. Der Gehalt ist in etwa 5000 Jahren auf die Hälfte gefallen. Man kann also aus dem Gehalt an Kohlenstoff 14 bei einer Probe aus der Tiefe feststellen, wieviel Zeit seit ihrer Ablagerung, oder genauer seit ihrer Abschließung von der Oberfläche verflossen ist. Diese neuen Verfahren sind ganz unglaublich empfindlich. Das grönländische Inlandeis enthält etwa 2,5 Millionen Kubikkilometer Eis, das ist fünfmal das Volumen der Alpen und annähernd das Volumen ganz Europas oberhalb des Meeresspiegels. Im Eis des Inlandeises findet sich eingeschlossene Luft, an Masse etwa 1/10 000 des Eises. In der Luft ist Kohlensäure, etwa 1/1000 der Luft, in der Kohlensäure Kohlenstoff, etwa ein Drittel. Im Kohlenstoff findet sich das Isotop Kohlenstoff 14, ursprünglich etwa ein Billionstel des Kohlenstoffs. Die Gesamtmasse dieser Sonderform des Kohlenstoffs 14 im ganzen Inlandeis ist also weniger als ein Kohlebrikett, und doch ist es möglich, in einigen Tonnen Eis die verbleibende Menge Kohlenstoff so genau zu bestimmen, daß sich daraus das Alter der Eisprobe feststellen lässt. Durch Verbindung dieser Isotopenmethoden können wir in Bohrkernen mit guter Sicherheit Alter und Bildungstemperatur des Gletschereises bis zum Ende der Eiszeit vor 10 000 Jahren festlegen. Eine annehmbare Extrapolation gibt uns durch den Gehalt an Deuterium und Sauerstoff 18 im Eis tieferer Bohrkern Temperaturdaten, die mit einiger Sicherheit bis zum Anfang der letzten Glazialzeit vor 80 000 Jahren zurückreichen. Eine solche Erweiterung unserer Kenntnis der Temperatur bis in die Eiszeit hätte Wegener, den Mitverfasser des Buches „Die Klimate der geologischen Vorzeit“, in Begeisterung versetzt.

Zur Zeit, als Wegener seine Polarforschung begann, waren die Höhen im Innern der

Inlandeise noch fast unbekannt. Nansen und Peary hatten das Inlandeis Grönlands im Süden und äußersten Norden gequert; Nansen hatte dabei eine größte Höhe von 2700 Metern erreicht. Scotts erste Expedition war 1902 in der Antarktis bis an den Rand des Inlandeises gelangt. Das Kerngebiet der Antarktis ist erst 1956 betreten worden. Alle Höhenbestimmungen beruhen auf Luftdruckmessungen, und diese geben unter den besonderen Temperaturverhältnissen der Inlandeise etwas unsichere Ergebnisse. Man braucht zur Berechnung der Höhe die Temperatur der zwischen zwei Meßpunkten liegenden Luftschicht; diese ist aber wegen der häufigen Zunahme der Temperatur mit der Höhe nicht leicht genau genug zu bestimmen. Die Genauigkeit reicht jedenfalls nicht hin, um bei wiederholten Messungen zeitliche Änderungen in der Höhe der Schneeoberfläche festzustellen. Andererseits wäre eine Kenntnis darüber, ob die Inlandeise in der Gegenwart ihre Höhe ändern, von größtem Interesse.

Alfred Wegener schlug daher vor, ein genaues Höhenprofil des Inlandeises mittels gegenseitiger Peilung von Markierungsstangen und Abstandsmessungen mit dem Meßrad zu gewinnen. Das Verfahren, das dann auf Wegeners letzter Grönlandexpedition wirklich angewandt wurde, war trigonometrisch. Es erforderte zuverlässige Messungen von Höhen- und Seitenwinkeln zwischen Pegeln, die auf dem Inlandeis in geringem Abstand voneinander aufgestellt wurden. Eine solche Messungsreihe ist 1931 als erste im Polargebiet über 400 Kilometer mit nur einer kleinen Lücke durchgeführt worden. Die Ergebnisse dieser sehr mühseligen Arbeit sind leider bisher nicht bekanntgeworden.

Seitdem sind solche Profilmessungen von Abstand und Höhe auf den Inlandeisen in großem Umfang ausgeführt worden. Für die Entfernungsmessung werden jetzt sogenannte Tellurometer verwandt. Sie beruhen auf dem Radarprinzip. Eine elektrische Schwingung wird ausgesandt, an anderer Stelle zurückgeworfen, und der Zeitunterschied zwischen Aussendung und Rückkehr wird auf weniger als ein Milliardstel Sekunde bestimmt. Die erzielte Genauigkeit ist außerordentlich hoch; sie ergibt bei einem Abstand von 10 Kilometern zwischen Sender und Ziel die Entfernung auf ein Dezimeter; die Unsicherheit des Abstandes zwischen West- und Ostrand des grönländischen Inlandeises beträgt bei den Messungen der Expéditions Polaires Françaises nur einige Meter. Die Höhen werden bestimmt durch Horizontalsichten zu Pegeln, die in geringem Abstand voneinander aufgestellt sind; das verringert die Unsicherheit wegen der abnormen Brechung der Lichtstrahlen unter den ungewöhnlichen Temperaturverhältnissen der Luft nahe der Eisoberfläche. Die Höhe eines bestimmten Punktes mehrere hundert Kilometer vom Eisrand ist auf diese Weise auf weniger als einen Meter gesichert. Das reicht aus, um festzustellen, ob und in welchem Sinne sich die Höhe des Inlandeises geändert hat. Die ersten Ergebnisse wiederholter Messungen der Internationalen Glaziologischen Grönlandexpedition liegen für eine Querlinie des grönländischen Inlandeises vor. Danach hat sich auf diesem Profil in den neun Jahren seit 1959 die Oberfläche im Randgebiet gesenkt. Sie ist aber im Innern höher als vorher; hier ist der Zuwachs im letzten Jahrzehnt nicht durch die Eisabfuhr aufgewogen worden. In der Antarktis sind die Ergebnisse von Wiederholungen genauer Höhenprofile noch nicht bekanntgegeben.

Wie dick sind nun die Gletscher und Inlandeise, und wie mächtig waren die Eismassen der Eiszeit, deren Vorhandensein vor geologisch kurzer Zeit gerade vor 100 Jahren allgemeine Anerkennung fand? Bis zum Jahre 1929 waren die Eisdicken der bestehenden Inlandeise ganz unbekannt, und die Schätzungen gingen weit auseinander, wenn auch die Spuren des nordischen Inlandeises der Vorzeit auf eine große Dicke schließen ließen. Die unmittelbarste Methode, die Dicke festzustellen, ist eine Durchbohrung bis zum Grund. Aber sie erfordert einen großen Arbeitsaufwand und erhebliche Energiemengen; sie ist daher im Polargebiet entfernt vom Eisrand bisher nur je einmal in Nordwestgrönland und in der Westantarktis durchgeführt worden.

Glücklicherweise brauchen wir das Eis nicht jedesmal zu durchbohren, um seine Dicke festzustellen. Auf Veranlassung von Professor Meinardus leitete Wegener von 1929 an in Grönland Messungen der Eisdicke durch künstliche Erschütterungen an der Oberfläche des Eises ein, deren Laufzeit bis zum Felsuntergrund und zurück festgestellt wurde. Die Messungen 1929 und 1931 ergaben sehr erhebliche Eisdicken. Solche seismischen Messungen wurden dann 5 Jahre später auf Byrds zweiter Südpolarexpedition auch im Südpolargebiet begonnen, allerdings damals fast nur auf einem Schelfeis geringer Mächtigkeit. Die zunächst sehr zeitraubenden Messungen sind später wesentlich vereinfacht worden. Die größten gemessenen Eisdicken betragen in Grönland über 3 Kilometer, in der Antarktis über 4 Kilometer. Die Antarktis enthält etwa 25 Millionen Kubikmeter Eis, fast soviel wie das Volumen Nord- und Südamerikas über dem Meeresspiegel.

Da Eis weniger dicht ist als Fels, ist über einer mächtigen Eismasse die Schwereanziehung geringer als in gleicher Höhe über Fels. So lassen Messungen der Schwereanziehung Schlüsse über die Dicke der unterliegenden Eismasse zu. Solche Messungen sind auf den Inlandeisen zum ersten Mal auf Wegeners Expedition 1931 vorgenommen worden. Sie deuteten auch auf große Eisdicke. Allerdings dienten diese Messungen nicht in erster Linie der Bestimmung der Eisdicke. Sie zeigten als wesentliches Ergebnis, daß die Masse des aufliegenden Eises durch ihr Gewicht den darunterliegenden Felssockel in die Tiefe gedrückt hat. Das stützt die Auffassung, daß die augenblickliche Hebung des Landes in den früher vom Inlandeis bedeckten Teilen Nordeuropas und Kanadas als eine Wiederherstellung des Gleichgewichts nach Verschwinden der eiszeitlichen Eislast aufzufassen ist. Die Schwere wurde damals durch die Schwingungsdauer von Pendeln bekannter Länge bestimmt, ein zeitraubendes Unternehmen. Heute wird die Erdanziehung in wenigen Minuten gemessen durch die Längenänderung einer Feder, an der ein Gewicht hängt. Die Feder wird durch die Kraft der Erdanziehung mehr oder weniger stark auseinandergezogen.

Während der letzten Jahre ist dann ein Verfahren der Eisdickenmessung entwickelt worden, das gestattet, in kurzer Zeit beliebig viele Messungen vorzunehmen. Gletschereis ist für elektrische Wellen gewisser Wellenlänge, etwa 10 Meter, durchlässig. Die elektrische Schwingung wird aber von Unstetigkeiten in der Zusammensetzung des Eises, besonders aber vom Felsboden, zurückgeworfen. Der Zeitunterschied zwischen Aussendung und Rückkehr der elektrischen Schwingung gibt den Abstand zum Untergrund und damit die Eisdicke. Es ist das elektromagnetische Gegenstück zur seismischen Dickenmessung. Diese Eisdickenmessungen können auch vom Flugzeug aus vorgenommen werden; eine einzige Flugstunde gibt das Hundertfache der Ergebnisse, die ursprünglich aus der Arbeit eines ganzen Sommers gewonnen wurden. Die Unsicherheit der Messung vom Flugzeug liegt heute weniger in der Bestimmung der Eisdicke selbst als in der Kenntnis der genauen Stelle, an der sich das Flugzeug in jedem Augenblick der Messungsreihe befindet. Dabei ist weiter günstig, daß die Radarmethode sichere Ergebnisse gerade in den Gebieten mit dicker Firndecke liefert, in denen die Methode der Erschütterungswellen mit Schwierigkeiten zu kämpfen hat. Es handelt sich dabei um die kältesten Teile der Inlandeise. Hier wird die mächtige lufthaltige Deckschicht durch die Explosion an der Oberfläche in Schwingungen versetzt, die das zurückgeworfene Echo in der Aufzeichnung verdecken können.

Koch und Wegener haben auf ihrer Durchquerung Grönlands 1913 an verschiedenen Stellen die Firntemperatur durch Aufgrabung bis 7 Meter Tiefe gemessen. In dieser Tiefe ist die jährliche Temperaturschwankung bereits auf weniger als ein Grad verringert. Sie nimmt mit der Tiefe weiter ab, und in einem einfachen Bohrloch bis 10 Meter Tiefe läßt sich die Mitteltemperatur des Jahres an der Schneeoberfläche mit guter Genauigkeit

bestimmen. Die Lufttemperatur weicht davon nicht wesentlich ab. Auf diese Weise ist seit Wegeners Zeit auf Schlittenreisen die Mitteltemperatur an hunderten von Stellen Grönlands und der Antarktis gemessen worden; die Karten der Jahresmitteltemperaturen beruhen ganz überwiegend auf Messungen in 10 Meter Tiefe, die mit den neuen Bohreräten keinerlei Schwierigkeiten bereiten.

Schon Wegener hatte vorgeschlagen, zur Messung der Tiefentemperaturen auf dem Inlandeis Bohrungen bis in größere Tiefen vorzutreiben. Die Temperaturen der Tiefe waren geeignet, auch über die sonst unzugänglichen Bewegungsverhältnisse in der Tiefe Aufschluß zu geben. Wegener plante für seine letzte Expedition ein Bohrloch bis zur Tiefe von 100 Metern; doch ist es auf der Expedition zu keiner Tiefbohrung gekommen. Heute liegen auf den Inlandeisen eine ganze Reihe von Bohrungen bis zu 100 und mehr Meter Tiefe vor.

Da ständig ein Wärmestrom aus der Erde tritt, und da außerdem die Bewegung des Eises in der Tiefe Wärme erzeugt, hatte Wegener als selbstverständlich angenommen, daß die Temperatur in Firn und Eis ständig mit der Tiefe zunehmen müßte. Überraschenderweise ergab sich auf Wegeners letzter Expedition in einem 16 Meter tiefen Schacht in Eismitte, daß die Temperatur bis zur größten erreichten Tiefe etwas abnahm. Allerdings lag das Ergebnis gerade an der Grenze der Meßgenauigkeit. Es wurde dann nach 20 Jahren durch die Messungen der französischen Station Centrale der Expéditions Polaires Françaises nahe Eismitte bestätigt. Seitdem hat sich durch Bohrungen in Inlandeisen bis zur Tiefe von 100 und mehr Metern gezeigt, daß die Temperatur in der Tat meist mit der Tiefe abnimmt, im Bohrloch an der Byrdstation in der Antarktis bis zu 800 Meter. Wir sind nun auch in der Lage, diese Temperaturabnahme zu erklären. Die Wärme, die am Boden des Eises austritt und durch Reibung nahe dem Grunde entsteht, wird mit dem abfließenden Eis der untersten Schichten nach außen befördert; sie gelangt gar nicht bis in die obersten Eisschichten, die infolgedessen eine gleichmäßige, durch die Oberflächentemperatur bestimmte Temperatur haben können. Für die Temperaturabnahme mit der Tiefe bestehen dann zwei Möglichkeiten. Der Firn unterhalb der Oberfläche kann kälter sein, weil er zu einer Zeit an der Oberfläche abgelagert worden ist, in der die Temperatur niedriger war. Diese Erklärung liegt nahe in einem großen Teil der Arktis, wo in der Tat die erste Hälfte dieses Jahrhunderts eine Periode erhöhter Temperatur war. Die andere Erklärung ist, daß der Firn, der sich an einer bestimmten Stelle in der Tiefe befindet, ja nicht an dieser Stelle an der Oberfläche abgelagert worden, sondern von einer höheren Stelle dorthin geflossen ist. Da die Temperatur mit der Höhe abnimmt, kann der Firn diese ursprüngliche tiefere Temperatur zum Teil beibehalten haben. Nahe der Unterfläche des Eises nimmt dann die Temperatur in jedem Falle stark zu.

Wegener hatte auch erwartet, daß die Kenntnis der Tiefentemperaturen im Eis dazu helfen würde, die Bewegungsverhältnisse der Eismassen zu verstehen. Theoretische Studien haben jetzt ergeben, daß Bewegung der Gletscher, Gleiten am Untergrund und Verschiebungen innerhalb der Eismasse, Temperaturverteilung mit der Tiefe und Temperatur am Boden sich gegenseitig bedingen. Wir dürfen annehmen, daß beide Inlandeise der Erde auf dem größten Teil ihrer Fläche am Untergrund angefroren sind, was ihre Gleitung erschwert. Es ist denkbar, daß es weitreichende Folgen für Eisbewegung und Eisausdehnung hätte, wenn die Bodenschicht des Eises den Schmelzpunkt erreichte und sich am Boden Wasser als Gleitschicht ansammelte. Das könnte z. B. durch eine Dickenzunahme des Eises verursacht sein. Es könnte zu schnellen Eisvorstößen bis weit auf den Ozean hinaus führen. Bei der Größe des antarktischen Inlandeises könnte ein solcher Vorstoß den Meeresspiegel merklich heben, und durch die erhöhte Rückstrahlungskraft von Eis und Schnee statt Wasser könnte der Wärmehaushalt der ganzen Erde beeinflusst werden.



Wegeners weitreichendste und am meisten angefochtene Theorie war wohl die der Kontinentalverschiebung. Der Gedanke kam ihm 1910 beim Anblick des Gleichlaufs der Küstenumrisse von Afrika und Südamerika, lag also außerhalb seiner polaren Interessen. Aber es schien eine Zeitlang, daß die sicherste Bestätigung der Theorie sich aus Messungen im Polargebiet ergäbe, an denen Wegener selbst beteiligt gewesen war. Nach Wegeners Meinung hatte sich der Atlantische Ozean allmählich von Süden her geöffnet; die stärkste gegenseitige Verschiebung in der Gegenwart war also im Norden, im Bereich von Grönland, zu erwarten. Im Jahre 1870 hatte die Deutsche Nordpolarexpedition auf der Sabineinsel vor Ostgrönland eine Längenbestimmung vorgenommen. Auf der Danmarkexpedition wiederholte dann Johan Peter Koch unter Mithilfe von Wegener die Messung. Sie schien in der Tat eine erhebliche Verschiebung westwärts zu ergeben, in Übereinstimmung mit Wegeners Theorie. Der Vergleich älterer und neuerer Messungen in Westgrönland deutete gleichfalls auf eine Westwanderung. Leider hat sich nun kurz nach Wegeners Tode herausgestellt, daß die alten Beobachtungen, bei denen die Längen mit Hilfe von Sternbedeckungen durch den Mond ermittelt wurden, mit einem systematischen Fehler behaftet sind. Wiederholte neue Beobachtungen mit Hilfe drahtloser Zeitzeichen haben ergeben, daß die Lage Grönlands zu Europa und Nordamerika innerhalb der Meßgenauigkeit von einigen Metern unverändert ist.

Aber in anderer Weise hat in den letzten Jahren die Polarforschung wesentlich dazu beigetragen, Wegeners Auffassung von der Ortsveränderung der Kontinente zu stützen. Dabei handelt es sich zunächst um den Magnetismus der Bodenablagerungen im subarktischen und subantarktischen Ozean. Man weiß, daß viele Gesteine bei der Verfestigung aus dem flüssigen Zustand durch das damals bestehende Feld des Erdmagnetismus einen Magnetismus aufgeprägt erhielten, den sie in der Folge über Jahrtausende beibehalten. Weiter hat sich in den letzten Jahren herausgestellt, daß das Magnetfeld der Erde im Verlauf geologisch kurzer Perioden wiederholt seine Richtung umgekehrt hat. Diese Umkehrzeiten sind offenbar auf der ganzen Erde gleichzeitig. Wenn wir uns auf die Betrachtung der polnahen Gebiete beschränken, so erstreckt sich zwischen dem östlichen Indischen Ozean, Australien und dem westlichen Stillen Ozean einerseits, dem antarktischen Festland andererseits ein untermeerischer Rücken, der ebenso wie der Reykjanesrücken südlich Island ein Teil der alle Ozeane durchziehenden Schwelle ist. Nun zeigt eine magnetische Vermessung, daß beiderseits des Rückens parallele Streifen entgegengesetzter Magnetisierung angeordnet sind. Weiter zeigt sich, daß die Dicke der Sedimentdecke vom Rücken gegen die Festländer hin zunimmt. Die Erklärung ist wahrscheinlich, daß der Rücken nördlich der Antarktis wie an anderen Stellen ein Gebiet aufquellender Lava ist. Die Streifen mit gleicher Magnetisierung auf beiden Seiten des zentralen Rückens sind zu gleicher Zeit emporgedrungen und verfestigt worden; sie haben dabei den zu dieser Zeit herrschenden Magnetismus angenommen. Sie sind dann durch jüngeres aufquellendes Magma zur Seite geschoben worden. Aus dem zeitlichen Abstand der Umkehrungen des irdischen Magnetfeldes und dem Abstand der Streifen entgegengesetzter Magnetisierung läßt sich berechnen, mit welcher Geschwindigkeit der Ozeanboden zur Seite geschoben worden ist. Nimmt man ferner an, daß die starren Platten des unterseeischen Bodens die benachbarten Kontinentalschollen zur Seite drücken, so läßt sich angeben, wie schnell sich z. B. Australien und die Antarktis voneinander entfernen und vor wie langer Zeit sie sich noch in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander befunden haben. Die Messungen führen zu annehmbaren Werten für diese Kontinentalverschiebung. Die Entfernung nimmt in einigen zehntausend bis hunderttausend Jahren um einen Kilometer zu. So hat die Erforschung des antarktischen und subarktischen Meeres dazu beigetragen, Wegeners Auffassung von der gegenseitigen Verschiebung der Kontinente zu bestätigen.

Auch andere neue Entdeckungen der polaren Geologie bringen Bausteine zum Gebäude

der Kontinentalverschiebung. Es ist seit 80 Jahren bekannt, daß die spätpalaeozoischen Ablagerungen der Südkontinente und Indiens starke Ähnlichkeit miteinander haben. Das deutete darauf hin, daß sie damals Teile eines einzigen Übererdteils, des Gondwanalandes, bildeten. Teile dieses Gondwanalandes zeigen an der Wende von Perm und Karbon weitreichende Anzeichen einer kontinentalen Vereisung. Bei der jetzigen Verteilung der Spuren läßt sich keine Lage des Pols finden, bei der nicht einige dieser Spuren in Äquatornähe kommen, was schwer vorstellbar ist. Wegener entwarf die Umrisse dieses Kontinents unter der Annahme, daß die Glieder Teile damals nahe beieinander lagen; das brachte alle Vereisungsspuren in höhere Breiten. Zu Wegeners Zeit war nichts von einer solchen palaeozoischen Eiszeit auf dem antarktischen Kontinent bekannt. Seitdem sind Ablagerungen dieser frühen Eiszeit auch an verschiedenen Stellen der Antarktis gefunden worden, eine Bestätigung von Wegeners Ansicht, daß die Süderdteile einschließlich der Antarktis bis zur Trias in enger Nachbarschaft zueinander gelegen haben.

Funde von Fossilien lieferten in allerletzter Zeit eine wesentliche Stütze für Wegeners Theorie. Schon seit den Expeditionen von Scott und Shackleton war bekannt, daß eine kennzeichnende Pflanzengemeinschaft des Perm, die Glossopterisflora, in Südamerika, Afrika, Indien, Australien und auch in der Antarktis vorkam. Das deutete auf einen engen Zusammenhang der Antarktis mit den anderen Südkontinenten und auf ein viel milderes Klima der Antarktis im Perm. Nun sind kürzlich in der Antarktis fossile Wirbeltiere gefunden worden, die Wegeners Anschauung von einem früheren Zusammenhang der Antarktis mit den anderen Südkontinenten nahezu gewiß machen. In Afrika und Indien ist Leitfossil für die frühe Trias ein auf dem Land lebendes Reptil, *Lystrosaurus*. Nun sind *Lystrosaurus*-skelette, neben anderen Resten aus der Trias, auch in der Antarktis gefunden worden, und zwar in 85° S, nahe dem Pol, in der Nähe des von Scotts und Shackletons Expeditionen bekannten Beardmoregletschers. Diese Reptilien können größere Meeresflächen nicht überschreiten. Ihr gleichzeitiges Vorkommen an heute durch weite Meere getrennten Stellen ist ein starker Hinweis darauf, daß diese Landflächen zur Zeit ihres Vorkommens nahe beieinander gelegen oder sich berührt haben. Das ist eine starke Stütze für Wegeners Auffassung, daß die Südkontinente einschließlich der Antarktis und Indien bis zur Trias das einheitliche Gondwanaland gebildet haben und dann später mehr und mehr auseinandergetrieben sind.

So sehen wir, daß von den neuen Verfahren und Ergebnissen der Polarforschung viel auf Anregungen Alfred Wegeners beruht und seine Gedanken bestätigt. Hätte er das Alter seines berühmten Schwiegervaters Wladimir Köppen erreicht, so würde er noch heute tätig und richtungweisend unter uns weilen. Ein hartes Geschick hat uns seiner zu früh beraubt, zu früh für die Polarforschung, zu früh für das weite Feld der Naturwissenschaft. Aber die Samen, die er einst so reichlich ausgestreut hat, sind zu kräftigen Bäumen herangewachsen. Wohin wir im Gebiet der Polarforschung und der Erdwissenschaften im allgemeinen blicken, von den Tiefen der Kontinentalblöcke und dem Boden der Inlandeise zu den hohen Schichten des Zodiakallichts, überall begegnen wir seinen Gedanken und Leistungen. So bleibt der Name Alfred Wegener unvergänglich in der Geschichte der Polarforschung und der Wissenschaft von der Erde, und wir können von ihm sagen, wie von einem anderen zu früh Vollendeten im Reiche des Geistes:

„So glänzt er fort, wie ein Komet entschwindend,  
Unendlich Licht mit seinem Licht verbindend.“