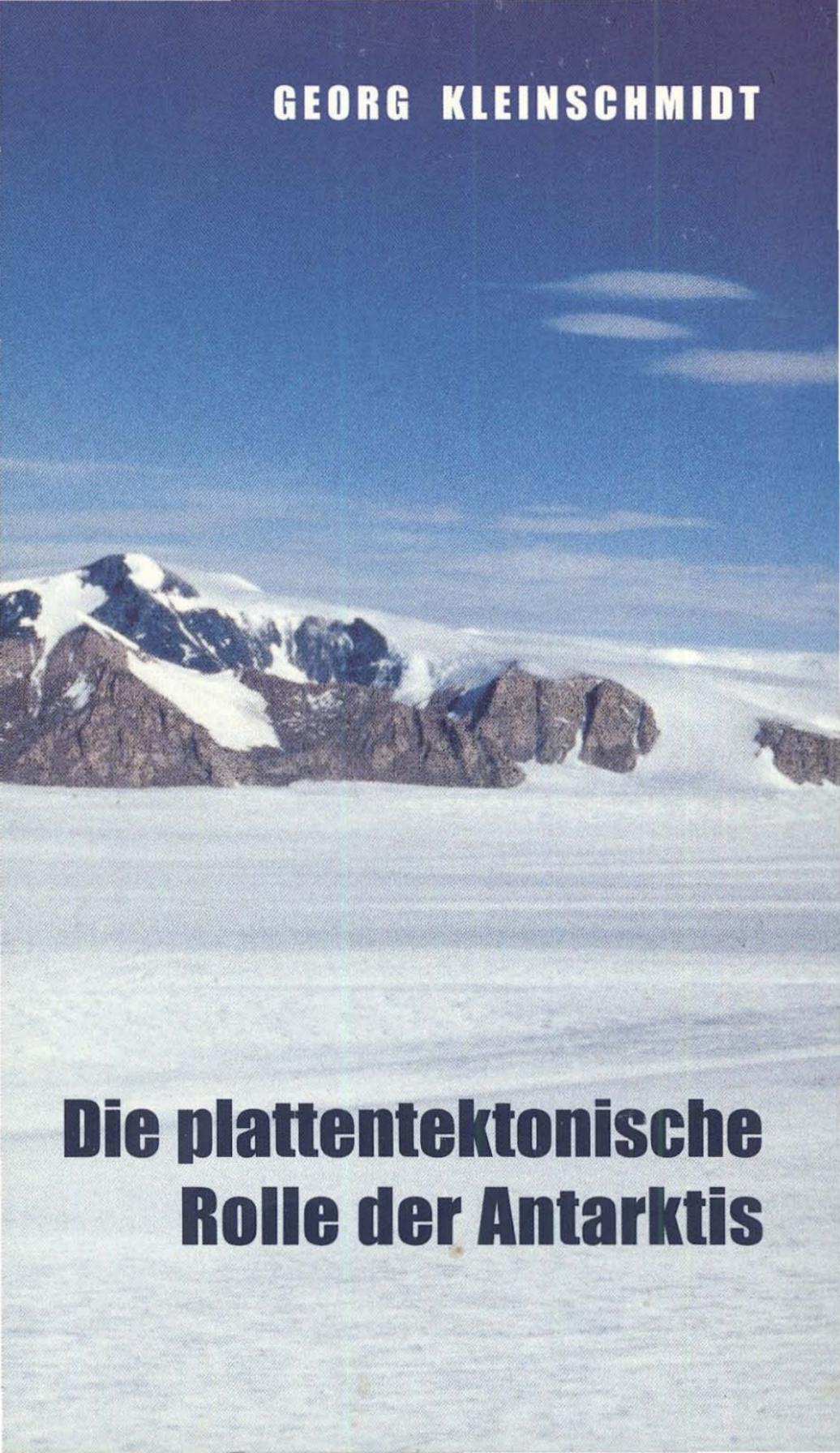


**GEORG KLEINSCHMIDT**

A photograph of a snowy, rocky landscape under a blue sky with a few clouds. The foreground is a vast, flat expanse of snow. In the middle ground, there are dark, jagged rock formations partially covered in snow. The sky is a deep blue with a few wispy clouds.

**Die plattentektonische  
Rolle der Antarktis**



CARL FRIEDRICH VON SIEMENS STIFTUNG · THEMEN BD. 73

*Georg Kleinschmidt*

*Die plattentektonische Rolle der Antarktis*

*Julia  
mit Ulfen  
fest mit späten  
fest dank!*

*Schöne W.*

*Herausgegeben von Heinrich Meier*

GEORG KLEINSCHMIDT

Die plattentektonische Rolle der  
Antarktis

Carl Friedrich von Siemens Stiftung  
München

## *Zum Umschlag*

Die Umschlagaußenseiten zeigen eine Aufnahme von Victorialand. Alle Photos und Abbildungen in dieser Veröffentlichung stammen, soweit kein anderer Name genannt wird, vom Verfasser der vorliegenden Schrift.

Erweiterte Fassung eines Vortrags, gehalten in der  
Carl Friedrich von Siemens Stiftung am 18. Oktober 1999.  
Der Abend wurde geleitet von Professor Dr. Hubert Miller,  
Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie  
der Ludwig-Maximilians-Universität München.

## *Inhalt*

Georg Kleinschmidt

*Die plattentektonische Rolle der Antarktis* ..... 7

Über den Autor ..... 81

»Themen«

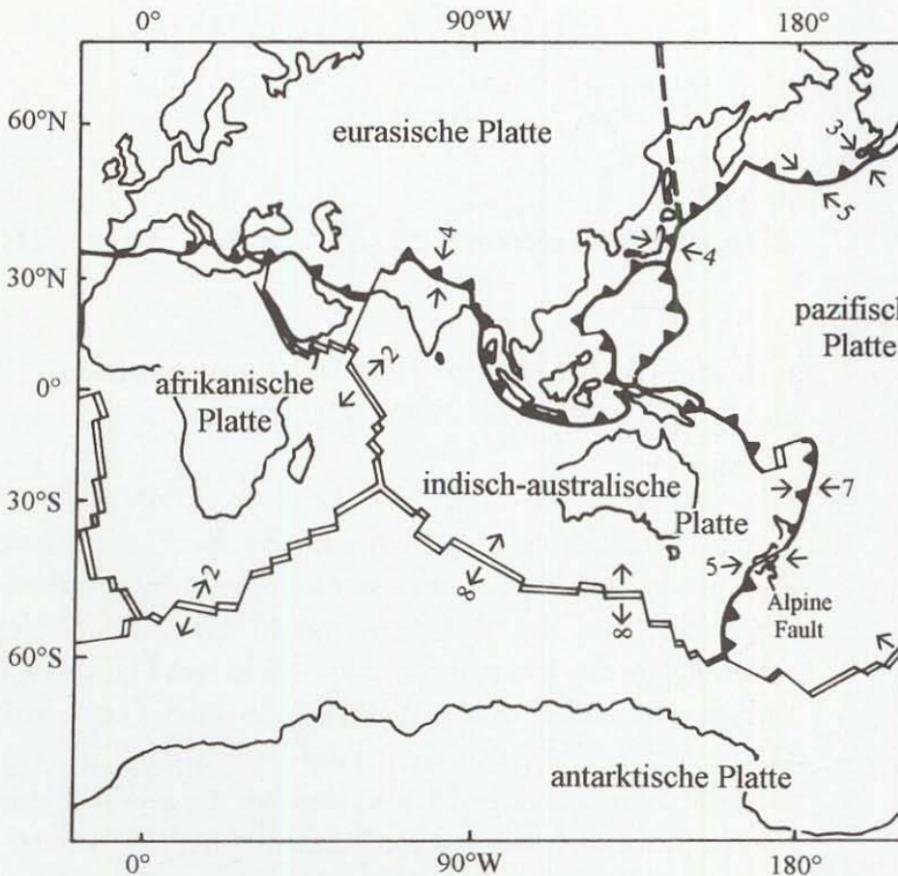
Eine Privatdruckreihe  
der Carl Friedrich von Siemens Stiftung ..... 82

## *Die plattentektonische Rolle der Antarktis*

### *A. Bau und Dynamik der heutigen Erdkruste (rezente Plattentektonik)*

Seit rund 90 Jahren weiß man, daß unsere Erde konzentrisch-schalenförmig aufgebaut ist. Der Kern mit einem Radius von 3470 km besteht – so nimmt man aufgrund seiner Dichte und des Vergleichs mit Meteoriten an – im wesentlichen aus Eisen, dazu etwas Nickel und bestimmte Silikate. Der äußere Kern ist flüssig, der innere unterhalb 5150 km fest. Über dem Kern folgt in 2900 km Tiefe der rund 2850 km mächtige Mantel, darüber die relativ dünne Kruste. Sie ist im kontinentalen Bereich 30 bis 40 km, in seltenen Extremfällen über 80 km dick, im ozeanischen Bereich dagegen nur knapp 10 km, meist deutlich weniger. Die kontinentale Kruste hat eine Dichte von 2,7, die ozeanische ist mit 3,0 bis 3,1 deutlich schwerer. Die Kruste wird mit den obersten 70 km des Mantels als Lithosphäre zusammengefaßt. Die Lithosphäre ist fest und starr. Darunter folgt die zähplastische, vermutlich teilflüssige Asthenosphäre, die nach unterschiedlichen Auffassungen bis in 200, 250, 400 oder gar 700 km Tiefe reicht.

Die Lithosphäre, d. h. die Erdkruste samt dem oberen Teil des Erdmantels, besteht aus gegeneinander verschiebbaren Platten, die – wie Eisschollen oder -berge in Polarge-



wässern – auf der Asthenosphäre schwimmen. Einige dieser Platten bestehen aus ozeanischer, einige aus kontinentaler, die meisten jedoch aus ozeanischer plus kontinentaler Lithosphäre. Es gibt acht größere und eine Vielzahl kleinerer solcher Lithosphärenplatten. Die größeren sind die eurasische, die afrikanische, die indisch-australische, die pazifische, die Nazca-, die nord- und die südamerikanische und antarktische Platte (Abb. 1). Alle diese Platten bewegen sich

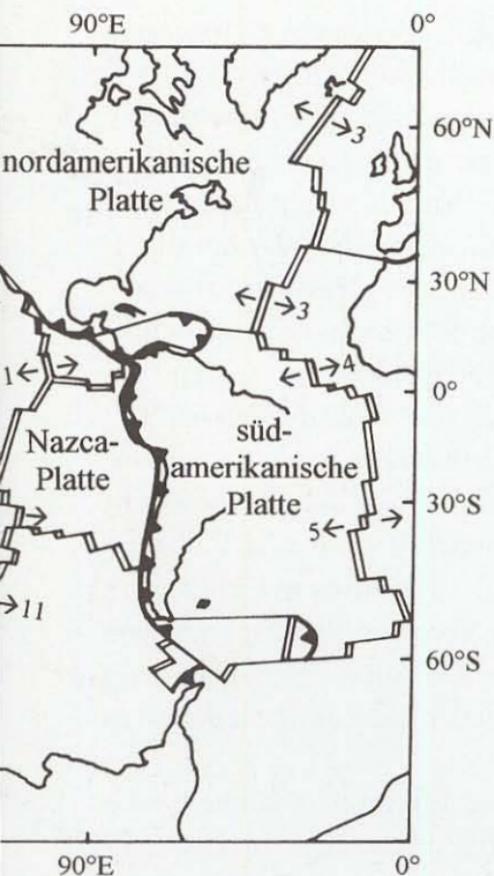


Abb. 1. Die gegenwärtigen Platten der Erde. Die Zahlen geben die derzeitigen Relativbewegungen in cm je Jahr an.

mit Geschwindigkeiten von wenigen Millimetern bis über 10 cm pro Jahr aufeinander zu, voneinander weg oder aneinander vorbei (Abb. 1), angetrieben von Konvektionsströmen im Mantel darunter, d. h. in erster Linie in der Asthenosphäre.

Da sich strukturbildende Prozesse vor allem an den Plattengrenzen abspielen, sind sie für Geologie und Geophysik von besonderem Interesse.

Grenzen von Platten, die sich aufeinander zu bewegen, heißen konvergent, kompressiv oder konsumierend. Sie fallen mit Teilbereichen von Faltengebirgszügen zusammen, vor allem aber mit den Tiefseerinnen. Denn dort taucht die dünne, schwere ozeanische Platte bzw. ein ozeanischer Plattenanteil unter eine andere (ozeanische oder kontinentale) Platte ab, gleitet weiter unter der Oberplatte abwärts, wird »subduziert«. Diese »Subduktionszonen« (Subduktion heißt Verschluckung, Unterschiebung) reichen bei Neigungswinkeln zwischen  $30^\circ$  und  $> 60^\circ$  (selten bis  $90^\circ$ ) mehrere 100 km unter die Oberplatte, an ihnen verschwindet ozeanische Kruste, wird gleichsam gewaltsam »vernichtet«, u. a. verbunden mit Erdbeben­­tätigkeit und Vulkanismus. Die Subduktion ozeanischer Kruste bzw. Lithosphäre kann schließlich zur völligen Vernichtung, zum völligen Schließen eines Ozeans führen. Die Subduktion geht dann in eine Kollision von kontinentaler mit kontinentaler Kruste bzw. Lithosphäre über.

Subduktion und Kollision führen zur Bildung von Orogenen (Faltengebirgen), d. h. Orogenese ist Kennzeichen und wesentliches Geschehen nahe konvergierender Plattengrenzen. Dabei findet im Bereich einer Kollisionszone oder einer Subduktionszone und oberhalb von ihr heftige kompressive Deformation (Faltung, Überschiebung) statt. Die stark versenkten Anteile einer Subduktionszone und die tieferen Anteile einer Kollisionszone sind Druckstärken und Temperaturen ausgesetzt, bei denen Gesteine stark verändert und/oder teilweise aufgeschmolzen werden. Gesteinsveränderung durch Druck- und Temperaturerhöhung *ohne* Schmelzbildung nennt man Metamorphose, ihre Produkte sind die metamorphen Gesteine (z. B. Glimmerschiefer, Gneis, Marmor). Gesteinsschmel-

zen (Magmen) können direkt oder indirekt zum Aufstieg von leichten Schmelzanteilen führen. Diese erstarren entweder in größerer Tiefe in Form von sogenannten Plutonen (z. B. Granitkörpern), oder sie fließen in Vulkanen als »Lava« an der Erdoberfläche aus. Subduktions- wie Kollisions-Orogenese sind wegen der kompressiven Deformation und wegen der Magmenzufuhr stets mit Krustenverdickung kontinentaler Plattenränder (bis hin zur Verdoppelung der Krustendicke) verknüpft. Besonders auffällig findet dieser Prozeß der Orogenese heute (oder geologisch seit kurzem, d. h. seit rund 100 Millionen Jahren) in den amerikanischen Kordilleren als Subduktions-Orogenese und im Alpen-Himalaya-Zug als Kollisions-Orogenese statt. Der Himalaya ist zugleich Beispiel dafür, daß Subduktion und Kollision nicht immer scharf gegeneinander abgrenzbar sind. Denn nach der Subduktion eines Ozeans zwischen Indien einerseits und Nordtibet/Nordasien andererseits nordwärts unter Asien wird oder wurde bis vor geologisch kurzem der indische Subkontinent weiterhin nordwärts subduziert, sozusagen als Produkt der Trägheit, denn die Konvergenzrate an der Plattengrenze Indien/Nordasien ist mit über 10 cm pro Jahr besonders schnell. Die Folge ist, daß die kontinentale Kruste im Himalaya mit über 80 km besonders dick, gegenüber dem Normalzustand praktisch verdoppelt ist und daß sich diese stark verdickte, jedoch leichte kontinentale Kruste besonders hoch aus dem schwereren Mantelmaterial herausheben muß. So entstand das höchste Hochgebirge der Welt.

Grenzen von Platten, die sich voneinander entfernen, heißen divergent oder extensional oder auch produktiv. Sie sind als mittelozeanische Rücken ausgebildet, augenfällig im mittelatlantischen Rücken, sehr asymmetrisch angeord-

net und gar nicht »mittelozeanisch« im Pazifik. An den mittelozeanischen Rücken weicht Kruste auseinander und gibt Raum frei für den Aufstieg von Material aus dem asthenosphärischen Mantel. Dies geschieht in Form von überwiegend submarinem Vulkanismus. Mittelozeanische Rücken sind – bezogen auf die Fördermenge – mit 15 Kubikkilometer pro Jahr die Hauptvulkangebiete. An ihnen wird ständig neue Erdkruste gebildet, »produziert«, als Ausgleich für die Krustenvernichtung in den Subduktionszonen.

Plattengrenzen zweier horizontal aneinander vorbeigleitender Platten werden als Transformstörungen bezeichnet. In bezug auf die Produktion oder Vernichtung von Kruste/Lithosphäre sind sie »neutral« bzw. »konservativ«. An den Transformstörungen sind divergente wie konvergente Plattengrenzen versetzt. Besonders klar und auffällig treten sie in Ozeanbereichen hervor. Auf dem Festland ist die kalifornische San Andreas Fault ein bekanntes Beispiel für eine Transformstörung.

Gelegentlich führt auch die Kombination von Transform-Bewegung und Kompression an einer Plattengrenze zur Gebirgsbildung. Bekanntes Beispiel für eine solche »Strike-Slip-Orogenese« sind die neuseeländischen Südlichen Alpen. Sie türmen sich an der Alpine Fault auf, einer Transformstörung mit kompressiver Komponente an der Grenze der pazifischen gegen die indisch-australische Platte auf der Südinsel Neuseelands.

Dieses Gesamtbild der heute ablaufenden Geodynamik ist als »Plattentektonik« seit über 20 Jahren Lehrbuchwissen (z. B. Frisch und Loeschke 1993). Plattentektonik ist heutzutage keine Hypothese oder Theorie mehr, sondern Faktum, denn die Plattenbewegungen sind seit über 15 Jah-

ren mit Satellitengeodäsie direkt meßbar (z. B. Dietrich und Gendt 1986). Der Aufbau eines weltweiten Beobachtungsnetzes der Plattenbewegungen ist nahezu abgeschlossen und in der Antarktis zur Zeit im Gang.

## B. Superkontinente

Daß der Prozeß der Plattentektonik in der ferneren geologischen Vergangenheit ebenso abgelaufen ist wie heute bzw. geologisch »vor kurzem«, war insbesondere für die Zeit des Präkambriums länger umstritten (z. B. Kröner 1984). Die meisten Geowissenschaftler stimmen jedoch inzwischen darin überein, daß Orogenese und Plattentektonik zumindest seit dem Proterozoikum, d. h. bis vor 2,5 Milliarden Jahren, prinzipiell abgelaufen ist wie heute (z. B. Condie 1997).

Plattenkollision (d. h. Kollisionsorogenese) vereint zwei vorher getrennte Kontinente zu einem. Man kann sich vorstellen, daß es so während der langen Zeit plattentektonischer Aktivität sozusagen zufällig zu einem Verschweißen und Zusammenklumpen mehrerer Kontinente zu Groß- oder Superkontinenten kommen konnte. Die Bildung solcher Superkontinente hat sich, soweit bis jetzt bekannt und allgemein akzeptiert, in der Erdgeschichte mindestens zweimal abgespielt, nämlich vor rund 1100 bis 1000 Millionen Jahren und noch einmal vor rund 600 bis 500 Millionen Jahren (*Abb. 2*). Der ältere Superkontinent wurde von den amerikanischen Paläontologen McMenamin und Schulte McMenamin (1990) vermutet und in Anlehnung an das russische Rodina (dt. Heimat) *Rodinia* genannt. Unabhängig

voneinander stellten Dalziel, Hoffmann und Moores 1991 die ersten Rodinia-Rekonstruktionen vor. Aktuellere Darstellungen stammen z. B. von Li et al. (1996) und Omarini et al. (1999). Die Existenz des jüngeren Superkontinents *Gondwana* wurde schon von Eduard Suess (1885) gefordert. Er schuf auch den Begriff, und zwar nach einer Region in Indien. Alfred Wegener (1912, 1915) erkannte bereits nahezu korrekt seinen Bildungsprozeß durch Kontinentalverschiebung. Er betonte seinen späteren Ausbau zum noch größeren *Urkontinent Pangäa* vor ca. 300 Millionen Jahren (Vereinigung des südlichen *Gondwana* mit dem nördlichen *Laurasia*) (*Abb. 2*).

Der plattentektonische Kompressionsprozeß (Orogenese), der vor 1100 bis 1000 Millionen Jahren zur Bildung *Rodinas* führte, wird heute von Nordamerika ausgehend und verallgemeinernd als *grevillische Orogenese* bezeichnet; derjenige, der zum Zusammenschweißen *Gondwanas* führte, heißt von Afrika ausgehend *panafrikanische Orogenese*, in der Antarktis auch *Ross-Orogenese*.

Zur Rekonstruktion früherer plattentektonischer Konfigurationen, also auch zur Rekonstruktion von Superkontinenten und ihrer Bildungs- und Zerfallsprozesse, werden vor allem zwei Methoden angewendet: *Paläomagnetik* und die Nutzung geologischer *Großstrukturen*. Beide voneinander unabhängigen Methoden sollten übereinstimmende Ergebnisse liefern.

Die *Paläomagnetik* bestimmt an geeigneten Gesteinen mit zuverlässig erkanntem und geeignetem Alter die früheren *Pollagen* heutiger Kontinente und Kontinentteile, also heutiger Bruchstücke der jeweiligen Superkontinente. Diese heute unter Umständen weit auseinanderliegenden alten *Pollagen* werden z. B. im Computermodell wieder zur



Deckung gebracht und damit zugleich die zugehörigen Bruchstücke verschoben. Dadurch sollten diese ihre frühere relative Lage wieder eingenommen haben, der Superkontinent wiederhergestellt sein.

Geologische *Großstrukturen* werden beim Wiederausammenfügen zerbrochener Großkontinente benutzt wie die Ziermuster beim Wiederausammenfügen zerbrochener antiker Keramiken. Denn besonders die plattentektonische Kompression hinterläßt im betroffenen Krusten-/Lithosphärenbereich mehr oder weniger gut erhaltungsfähige Spuren. Nicht erhaltungsfähig sind die Subduktionszonen selbst, die durch Kompression, d. h. durch Subduktion oder Kollision, hervorgerufene Krusten- bzw. Lithosphärenverdickung und die daraus folgende Hochgebirgsbildung. Erhaltungsfähig sind dagegen vor allem die Deformationsgefüge in den betroffenen Gesteinen, die druck- und temperaturbedingte Gesteinsmetamorphose und die Zeugnisse der Schmelzbildung. Mit diesen Kriterien werden in Kontinenten und ihren Bruchstücken Regionen gegeneinander abgegrenzt, die sich einer bestimmten, *zeitlich* faßbaren plattentektonischen Prägung zuordnen lassen und sich dadurch von benachbarten Regionen unterscheiden. Diese gegeneinander abgrenzbaren Regionen sind im wesentlichen verschieden alte Orogene.

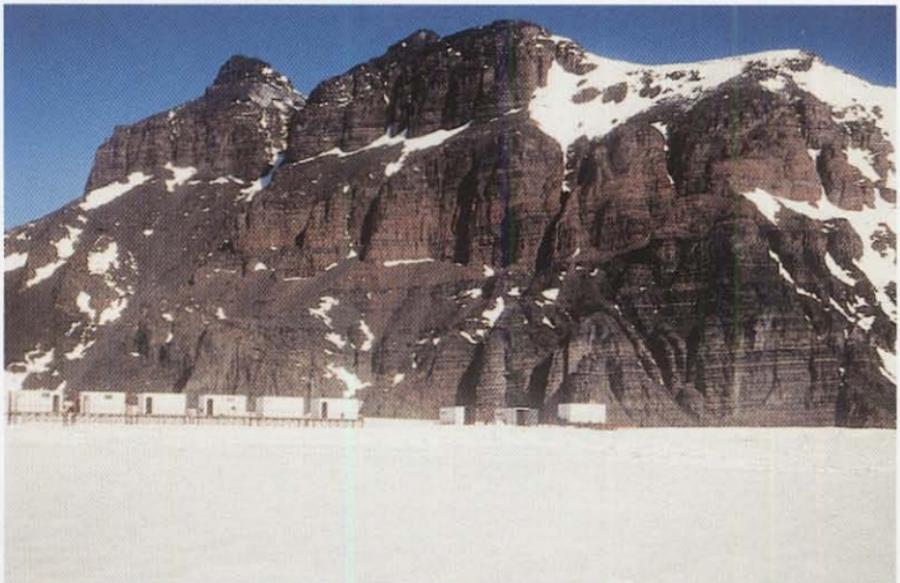
Solche Regionen erkennt man an *Gesteinen*, die von dem bestimmten plattentektonischen Prozeß *betroffen* sind. Sie sind datierbar deformiert, d. h. gefaltet, zusammen- und übereinandergeschoben und enthalten kompressive Scherzonen. Sie können außerdem zu metamorphen Gesteinen umgewandelt worden sein.

Man erkennt solche Regionen außerdem an *Gesteinskomplexen*, die während des plattentektonischen Prozesses



*Tafel Ia. Strukturprägungen des »spät- bis postorogenen Kollaps'«: von links oben nach rechts unten verlaufende, flache Abschiebungen (low angle normal faults = »LANFs«) im Ross-Orogen, Oatesland, Antarktis. Die Höhe der Felswand beträgt ca. 40 m.*

*Tafel Ib. Der Grunehogna-Kraton: horizontal liegende, undeformierte Sedimentgesteine von über einer Milliarde Jahren Alter bei der südafrikanischen Sommerstation Grunehogna.*

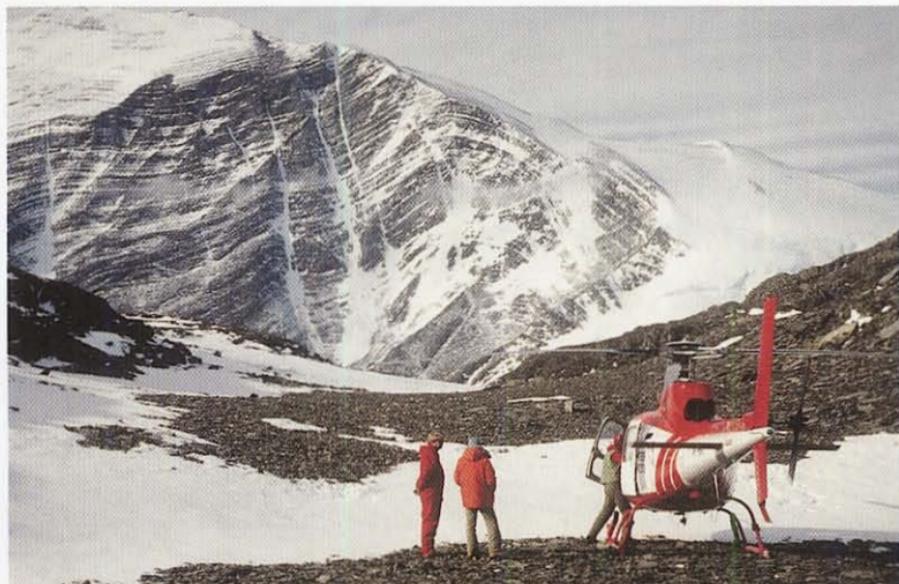




*Tafel IIa. Ostantarktischer Kraton (Schild): Orthogneise bei Mawsons Hütte, George-V.-Land. Die Ausgangsgesteine waren ca. 2,5 Milliarden Jahre alte Granite, die vor ca. 1,7 Milliarden Jahren zu Gneisen metamorphisiert wurden.*

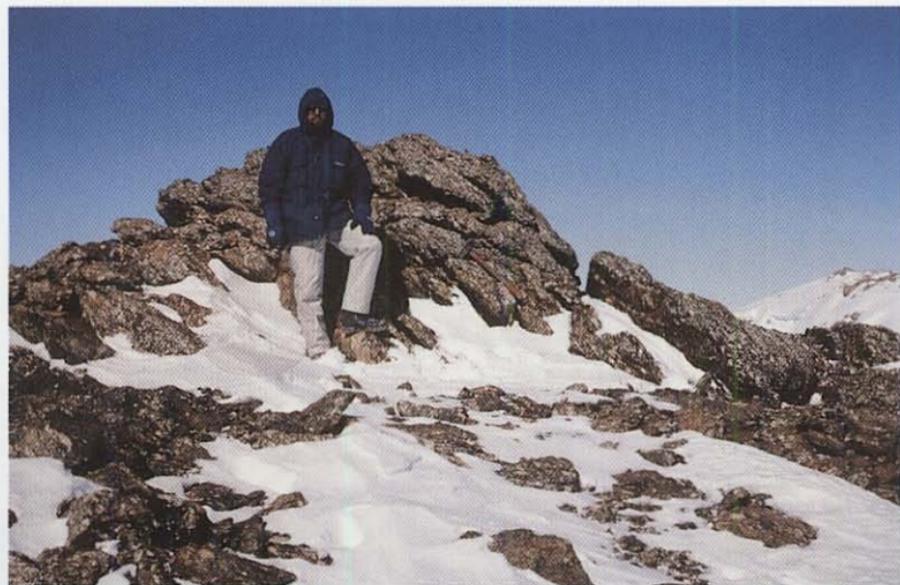
*Tafel IIb. Einer der beiden Moltke-Nunatakker in Coatsland, unzugänglich seit ihrer Entdeckung durch Filchner im Jahre 1911. Die überhängende Eisbedeckung ist gut 20 m dick.*

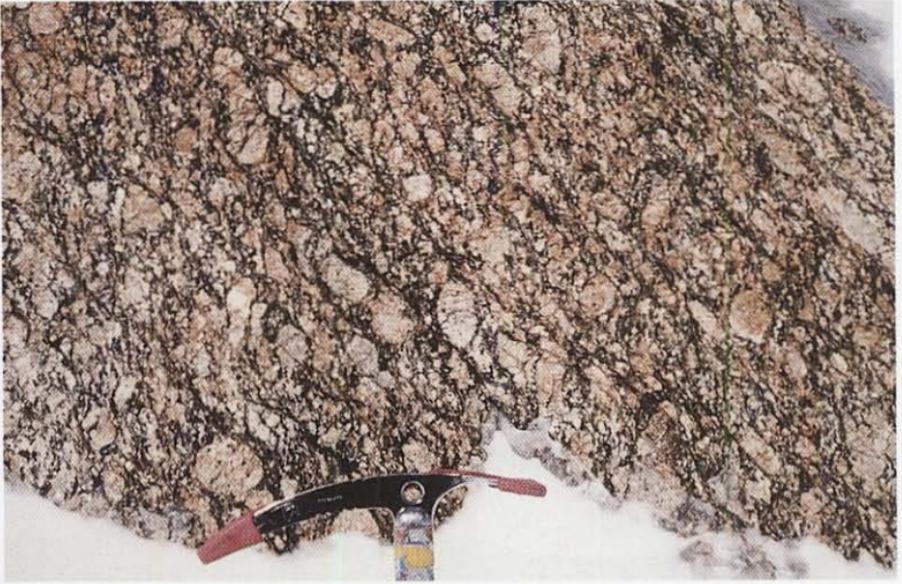




*Tafel IIIa. Ross-orogenetische Falten in Nordvictorialand.*

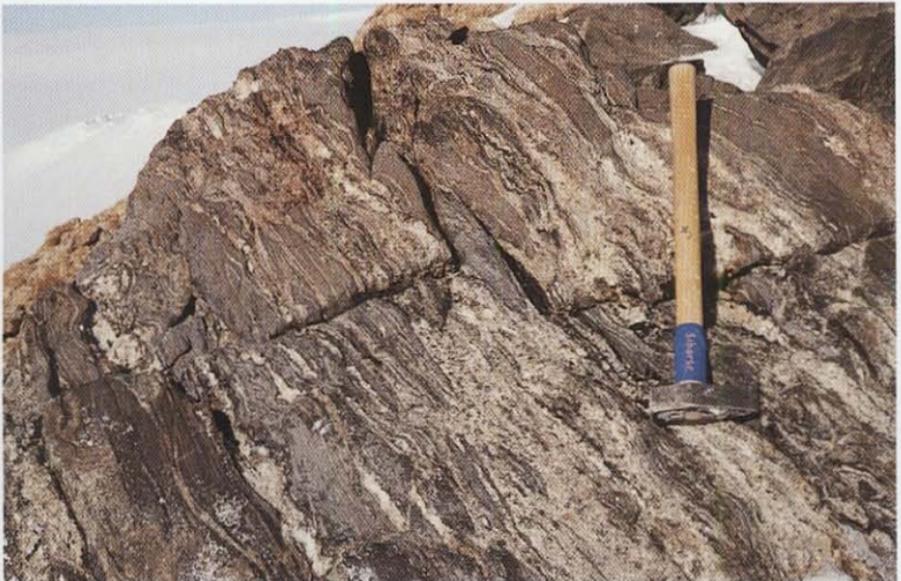
*Tafel IIIb. In einer ross-orogenetischen Überschiebungsbahn zerscherter Granit, Oatesland. Überschiebungsrichtung (Schersinn) nach links, hier: Osten.*





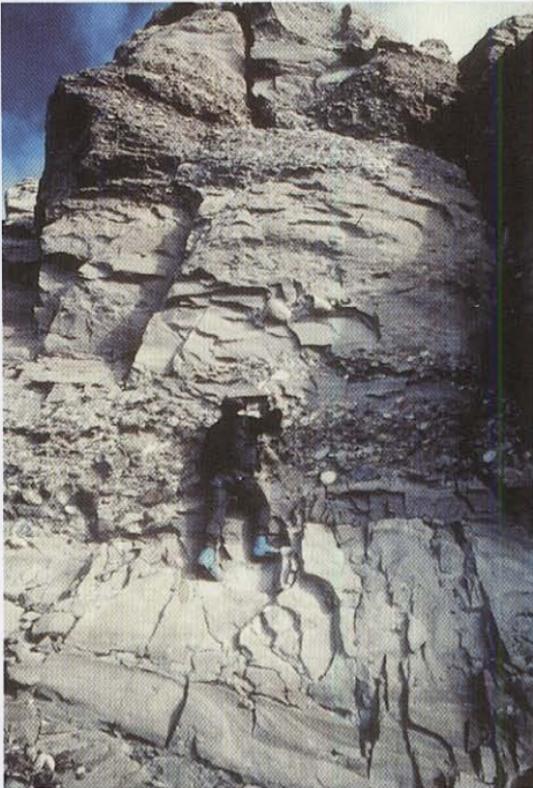
Tafel IVa. Detail aus Tafel IIIb, Schersinn nach links (Osten) zeigend.

Tafel IVb. Gesteinsmetamorphose der Ross-Orogenese: »migmatischer Granat-Biotit-Gneis«, Oatesland. »Migmatisch« meint, daß das Gestein durch die Metamorphose teilweise aufgeschmolzen wurde. Schmelzprodukte sind die hellen Partien. Granat (dunkle, rundliche Flecken links vom Hammerkopf) und Biotit (schwarze Anteile) sind metamorph gebildete Minerale.





*Tafel Va. Ross-orogener Granitkörper (hell-rötlich) mit seinem dunklen Dach, Victorialand.*



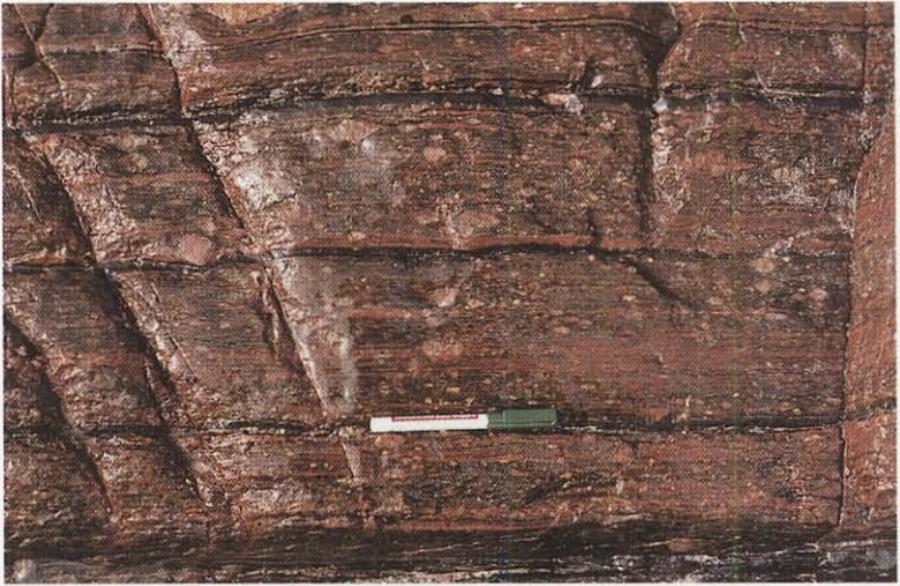
*Tafel Vb. Spät-ross-orogener Molassebildung: ordovizische Konglomerate und Sandsteine in der Shackleton Range. Photo: F. Henjes-Kunst.*



*Tafel VIa. Diskordanz von permotriadischen Sandsteinen der »Beacon-Supergruppe« (oben, horizontal) über panafrikanisch übereinandergeschobenen Gneisen unbekannter Alters (nach rechts geneigt). Panafrikanisch überprägter Teil Neuschwabenlands, südliches Kirwanveggen, Polaris Ridge.*

*Tafel VIb. Rennickgraben, Victorialand: Die Grabenfüllung - hier helle Sandsteine der permotriadischen »Beacon-Supergruppe« - ist über den Grabenrand hinweg nach rechts (d. i. Osten) hinausgepreßt: Produkt von horizontaler Seitenverschiebung mit kompressiver Komponente. Die Wand ist ca. 25 m hoch. Photo: A. Läufer.*





*Tafel VIIa. Scherzone der Kimba-Orogenese in Südaustralien (Küste bei Port Neill).*

*Tafel VIIIb. Fortsetzung dieser Scherzone in George-V.-Land, Antarktis, bei 145°E (Mertzgletscher).*

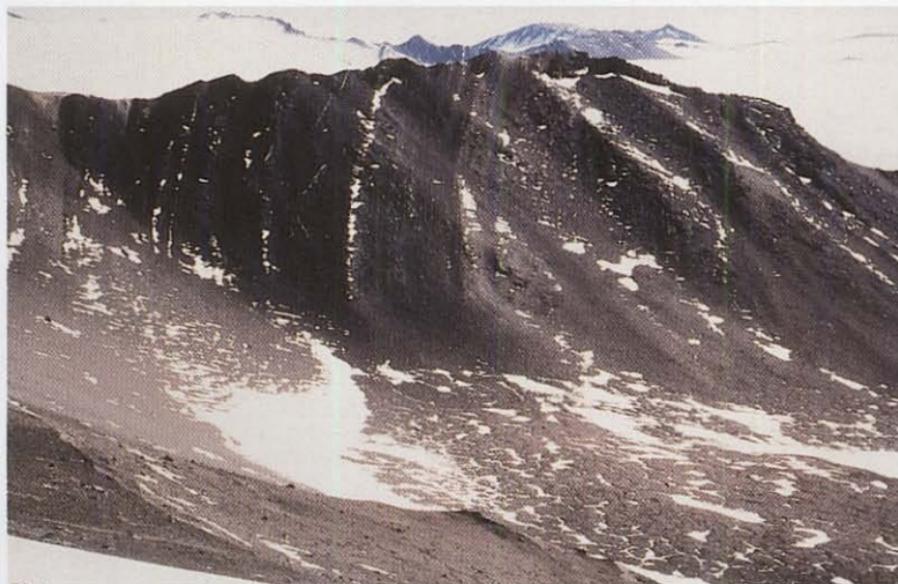
*In beiden Fällen betrifft die Scherzone einen Orthogneis und in beiden Fällen läßt sich aus der Asymmetrie kleiner Scherkörper (helle Feldspäte) derselbe rechtssinnige Schersinn ablesen.*





Tafel VIIIa. Gut 30 m breite, dunkle (d. h. basische) Gänge drangen vor 750 Millionen Jahren in grenvillisches Grundgebirge ein und deuten so den beginnenden Zerfall Rodinias in der Antarktis an. Lokalität: Svartbandufsa, Kirwanveggen, Neuschwabenland.

Tafel VIIIb. 5 km breiter, 70 km langer »Ophiolithkomplex« (dunkler Bereich, von vorn in den Hintergrund des Bildes, d. h. nach Westen laufend) der nördlichen Shackleton Range. Dieser Rest eines Ozeanbodens ist zwischen 1 und 0,5 Milliarden Jahre alt, d. h. er hat nach dem Zerfall Rodinias und vor der Bildung Gondwanas existiert.



gebildet worden sind. Dies sind (abgesehen von den genannten metamorphen Gesteinen) Magmatite, und zwar sowohl granitische als auch vulkanische Gesteine bestimmter chemischer Zusammensetzung. Sie bilden sich durch Aufschmelzung subduzierter, sich verdickender und sich besonders stark erwärmender Lithosphäre. Die chemische Zusammensetzung derartiger Granite wird dadurch gesteuert, daß sie entweder besonders gering oder aber besonders stark durch kontinentale Krustenanteile beeinflusst ist. Geringer kontinentaler Einfluß herrscht im Subduktionsorogen nahe der Plattengrenze, d. h. ozeanwärts. Starker kontinentaler Einfluß herrscht im Subduktionsorogen oberhalb des tiefer versenkten Teils einer Subduktionszone, d. h. kontinenteinwärts im stärker verdickten Orogenbereich. Weniger kontinental beeinflusste Granite werden »I-Typ-Granite« genannt, stärker kontinental beeinflusste heißen »S-Typ-Granite«. Die Vulkanite im Bereich kompressiver Plattengrenzen, d. h. der Orogene, haben im Gegensatz zu anderen Vorkommen vulkanischer Gesteine eine sogenannte »kalkalkalische« Zusammensetzung und gehören zur Gruppe der Andesite und andesitischen Basalte oder lassen sich davon herleiten.

Man erkennt solche einheitlichen, gegen andere abgrenzbaren Regionen schließlich auch an *Gesteinskomplexen*, die den *Abschluß* eines plattentektonischen Prozesses *markieren*. Solche Gesteine sind zum einen die Schuttbildungen der Orogene (»Molasse«), zum anderen Sedimentgesteine, die die orogenen Gesteine und ihre Gefüge horizontal zudecken und somit »diskordant« abschneiden. Schließlich wird die durch Plattenkompression (Orogenese) hervorgerufene Krustenverdickung wieder rückgängig gemacht: spät- oder postorogener Kollaps. Die-

ser krustenverdünnende Prozeß hinterläßt ebenfalls Spuren, nämlich bestimmte Gefüge wie flache Abschiebungen (low angle normal faults = »LANFs«) und Knickbänder mit abschiebendem Charakter (*Tafel Ia*).

Zusätzlich ist mit Gesteinen zu rechnen, die Phasen *plattentektonischer Extension* bis hin zum *Zerfall* von Kontinenten charakterisieren: Denn bei Krustenextension bilden sich zunächst Becken, die sich mit typischen Vulkaniten und Beckensedimenten wie randlichen Konglomeraten füllen. Schließlich führt Krustenextension zum Zerbrecen der Kruste; dadurch kann Magma in Gangschwärmen aufsteigen und/oder als Flutbasalte großflächig ausfließen. Solche Magmatite zeichnen sich ebenfalls durch eine bestimmte chemische Tendenz aus: sie sind besonders reich an Kalium und/oder Natrium. Die entsprechenden Tiefengesteine sind die zugleich fluorreichen *Alkaligranite* oder »A-Typ-Granite«, dazu die Gruppe der Syenite. Besonders weit verbreitet ist die Familie der *Alkalivulkanite* mit Alkalibasalten, den kalireichen Trachyten, dazu die Phonolithe und die sogenannten Karbonatite. Rezente bis subrezente Beispiele liefert das ostafrikanische Grabensystem und nicht zuletzt der tertiäre bis quartäre Vulkanismus in Deutschland (z. B. Kaiserstuhl, Eifel, Vogelsberg).

### *C. Der Bau der Antarktis*

Vorwiegend mit Hilfe des oben dargestellten Gliederungsprinzips der Kontinente ergibt sich – etwa von den älteren zu den jüngeren Großstrukturen fortschreitend – folgender geologischer Aufbau der Antarktis (*Ausschlagtafel*):

## 1. Eisbedeckung und Schelfeis

Vorweg muß allerdings die jüngste geologische Einheit der Antarktis genannt werden. Diese jüngste Einheit hat nichts (oder nur sehr indirekt) mit Plattentektonik und Orogenese zu tun: das »Gestein« Eis. Es bedeckt den Kontinent zu 98 %, und zwar als bis zu 4700 m, durchschnittlich 2500 m dickes Inlandeis. Es fließt in Form riesiger Gletscher und vor allem der Schelfeise vom Kontinent ab. Unter den Gletschern sind die drei größten der Erde: der Lambertgletscher mit 400 km Länge und bis 80 km Breite sowie der Rennickgletscher und Jutulstraumen, die sich mit jeweils 300 km Länge und 40 km Breite Platz zwei streitig machen. Die Schelfeise sind vor der Küstenlinie aufgeschwommene, rund 150 bis 500 m dicke Eisplatten, die dennoch meist in die Umrissdarstellungen des Kontinents Antarktis einbezogen werden. Die bedeutendsten sind:

- das Ross-Schelfeis (540 000 Quadratkilometer),
- das Filchner-Ronne-Schelfeis (480 000 Quadratkilometer) und
- das Amery-Schelfeis (größer als 30 000 Quadratkilometer).

Die Eisbedeckung ist neben der schwierigen Zugänglichkeit des Kontinents der Hauptgrund für die noch unzureichende Kenntnis des eigentlichen geologischen Aufbaus der Antarktis.

## 2. Sehr alte Bereiche (Kratone)

Die ältesten Anteile, d. h. die Kerne von Kontinenten werden traditionsgemäß als »Kratone« oder »alte Kratone«

zusammengefaßt. Kratonbereiche, die von jüngeren, undeformierten, nicht in spätere Orogenesen einbezogenen Ablagerungen verhüllt sind, werden »Tafeln« genannt; dort, wo sie frei von solchen jüngeren Ablagerungen zutage treten, werden sie als »Schild« oder »alte Schild« bezeichnet. Ursprünglich waren mit (alten) Kratonen allgemein jene präkambrischen Kontinentteile gemeint, die seit der Wende Kambrium/Präkambrium keinerlei Orogenese mehr erlitten haben. Mit zunehmender Kenntnis über ältere Orogenesen werden solche präkambrischen Orogengürtel zunehmend aus den Kratonen herausgelöst, die eigentlichen kratonischen Bereiche werden immer weiter eingeengt, der Anteil der Kratone am Aufbau der Kontinente schrumpft scheinbar. Für die Antarktis werden zur Zeit zwei kratonische Bereiche unterschieden:

1. Der kleine Grunehogna-Kraton (auch Maudheim-Kraton genannt) umfaßt das westlichste Dronning-Maud-Land. Über 1 Milliarde Jahre alte Sedimente sind flach liegend und undeformiert erhalten (*Tafel Ib*), nur punktuell schaut deren noch älterer Untergrund (Schild) daraus hervor.

2. Der größere ostantarktische Kraton (auch ostantarktischer Schild) umfaßt weite Teile der Ostantarktis jenseits des Transantarktischen Gebirges, schaut jedoch nur in den Thiel Mountains, im Süden der Shackleton Range sowie am Rande des Kontinents in Enderbyland, in den Prince Charles Mountains, in den Vestfold Hills, in Wilkesland und in George-V.-Land (*Tafel IIa*) unter der Eiskalotte der Ostantarktis hervor. Seine Konfiguration dürfte in den nächsten Jahren weiter präzisiert werden. Dort, wo der Kraton als Schild zutage tritt, wird er aus hochmetamorphen Gesteinskomplexen aufgebaut, die radiometrische

Altersdaten von über 1,5 Milliarden Jahren geliefert haben. Gelegentlich ist dieser ostantarktische Schild von jüngeren Sedimenten (»Tafelsedimenten«) teilweise bedeckt, z. B. in den Thiel Mountains und am Südrande der Shackleton Range. Dort überdecken Reste intern undeformierter jung-präkambriischer Sedimente mit autochthonen Verwitterungsbildungen an ihrer Basis lokal das 1,6 Milliarden Jahre alte kristalline Grundgebirge.

Zur Zeit wird die Ausgliederung weiterer Orogenzonen aus dem ostantarktischen Kraton in zwei Fällen diskutiert: bei zwei neu entdeckten, 500 Millionen Jahre alten (panafrikanischen) und von Nord nach Süd verlaufenden Orogenen bei 100° Ost und im Raum des Lambertgletschers, die möglicherweise unter dem Eis der Zentralantarktis zusammenlaufen (Fitzsimons 2000), und bei rund 1,6 Milliarden alten Orogengürteln gegenüber vom westlichen Südastralien (Fanning et al. 1999).

### *3. Bereich der grenvillischen Orogenese*

Die Gebiete, die vor 1,1 bis 1,0 Milliarden Jahren durch die grenvillische Orogenese geprägt worden sind, wurden noch vor wenigen Jahren schlicht dem kratonischen Bereich zugerechnet. Das komplette Inventar einer Orogenese von grenvillischem Alter, nämlich Falten, Überschiebungen, Metamorphose und Magmatismus, ist in einem Streifen vom westlichen bis zum zentralen Dronning-Maud-Land belegt, d. h. es umfaßt ziemlich genau den Teil Dronning-Maud-Lands, der auch Neuschwabenland heißt. Dazu gehören Heimfrontfjella, Kirwanveggen, H. U. Sverdrupfjella, Mühlig-Hoffmann-Gebirge, Wohlthatmassiv und

Schirmacheroase und wohl auch noch Sør-Rondane. Auf vielen Darstellungen verläuft das antarktische Grenville-Orogen jedoch in einem rund 250 km breiten, küstennahen Streifen von Coatsland bis George-V.-Land um die ganze Antarktis herum (z. B. Hoffmann 1991, Li 1996), d. h. es umfaßt danach nicht nur Neuschwabenland, sondern setzt sich weiter nach Westen, vor allem aber viel weiter nach Osten fort. Eine solche Ausdehnung ist zumindest für George-V.-Land unzutreffend und für Coatsland unbewiesen. In Coatsland sind die einzigen, sehr abgelegenen Aufschlüsse drei kleine Nunatakgruppen\*, genannt »Littlewood«, »Bertrab« und »Moltke«. Die Littlewood- und Bertrab-Nunatakker bestehen aus Quarzporphyren, die zwar das richtige Alter von rund 1,1 Mrd. Jahren haben (Storey et al. 1994), aber sonst völlig undeformiert sind. Die pure Existenz von Quarzporphyr läßt den Schluß auf ein Orogen entsprechenden Alters jedoch nicht zu; man würde allein aus der Existenz von permischen Quarzporphyren auch nicht auf eine permische Orogenese in Deutschland schließen. Entscheidend ist bzw. wäre »Moltke«. Die beiden kleinen Nunatakker sind seit ihrer Entdeckung durch die Zweite Deutsche Antarktisexpedition 1911/12 (Filchner 1922) wegen überhängender Eismassen unzugänglich (*Tafel IIb*). Todesmutige Inder haben zwar Proben gewonnen und festgestellt, daß hier keine Quarzporphyre vorliegen (Raina et al. 1995), aber eine fachgerechte Struktur- und Altersanalyse steht noch aus.

\* »Nunatak« wird eine eng begrenzte, eisfreie (Fels-)Aufragung im Inlandeisbereich, d. h. die Spitze eines sonst von Eis bedeckten Berges oder Gebirges genannt.

#### 4. Ross-Orogen/Panafrikanischer Bereich

Vom knapp 500 bis knapp 600 Millionen Jahre alten Ross- bzw. panafrikanischen Orogen wird in erster Linie das Transantarktische Gebirge eingenommen, und zwar von der pazifischen Seite in Nordvictorialand bis zu ihrem atlantikwärtigen Ende, den Pensacola Mountains. Zum gleichen Orogenstrang ist das westlichste Marie-Byrd-Land zu rechnen. Dieser Teil des Ross-Orogens wurde erst viel später – etwa am Ende der Kreidezeit – abgetrennt. In denselben Bildungszeitrahmen von 500 bis 600 Millionen Jahren gehören die Shackleton Range, Teile von Dronning-Maud-Land/Neuschwabenland, möglicherweise der Süden von Sør-Rondane (Shiraishi 1991) und ein Teil der Lützow-Holm-Bukta-Gegend (Shiraishi et al. 1992). Das Ross-Orogen im engeren Sinne ist auf das Transantarktische Gebirge beschränkt (Stump 1995), während sich für den sich andeutenden Orogenzug Shackleton Range – Dronning-Maud-Land – Lützow-Holm-Bukta zunehmend der Terminus panafrikanisches Orogen (in der Antarktis) durchsetzt. Der genaue Verlauf dieses Orogenastes ist jedoch nicht bekannt. Vom Angelpunkt Shackleton Range aus könnte er in Richtung Sør-Rondane ziehen oder direkt auf die Lützow-Holm-Bukta zusteuern. Der größte Teil dieser Problemregion liegt unter Eis, und an einigen entscheidenden eisfreien Stellen im östlichen Dronning-Maud-Land haben die notwendigen Untersuchungen erst begonnen.

Alle diese knapp präkambrisch bis kambrisch geprägten Antarktisanteile weisen die typischen Charakterzüge von Subduktionsorogenen (Ross-Orogen in Victorialand) oder von Kollisionsorogenen auf (Shackleton Range):

- Deformationszeugnisse wie Falten (z. B. *Tafel IIIa*), Überschiebungen und Deckenbahnen (z. B. *Tafel IIIb, IVa*),
- Gesteinsmetamorphose(n) (z. B. *Tafel IVb*),
- Granite (z. B. *Tafel Va*),
- auch spätorogene Kollapsstrukturen (LANFs und Knickbänder) (z. B. *Tafel Ia*) und
- Molassebildungen (z. B. *Tafel Vb*).

Sie finden sich allerdings in höchst unterschiedlichen Ausmaßen und Ausbildungen. So wird das Ross-Orogen Victorialands durch parallel verlaufende Gürtel von I- bzw. S-Typ-Graniten beherrscht (*Abb. 3*). Dies weist neben anderen Kriterien auf Subduktionsorogen hin. Die Shackleton Range ist als Teil eines panafrikanischen Kollisionsorogens u. a. durch großzügigen Überschiebungs- und Deckenbau sowie durch ausgesprochene Armut an orogenen Graniten charakterisiert.

### *5. Bildungen im Anschluß an die Ross-/panafrikanische Orogenese*

Die Zeugnisse der Ross-/panafrikanischen Orogenese werden an vielen Stellen von den Sedimentgesteinen der sogenannten »Beacon-Supergruppe« horizontal überlagert und somit »diskordant« abgeschnitten, so vielerorts im Transantarktischen Gebirge, am Ostrand der Shackleton Range und in Neuschwabenland (*Tafel VIa*). Die »Beacon-Supergruppe« stammt aus dem Zeitraum Devon bis Trias, ähnelt teilweise unserem Buntsandstein, denn sie ist vor allem durch fluviatile Sandsteine, d. h. festländisch geprägt. Sie enthält perm- bis karbonzeitliche Eiszeitbildungen (Tillite) und Kohlen.

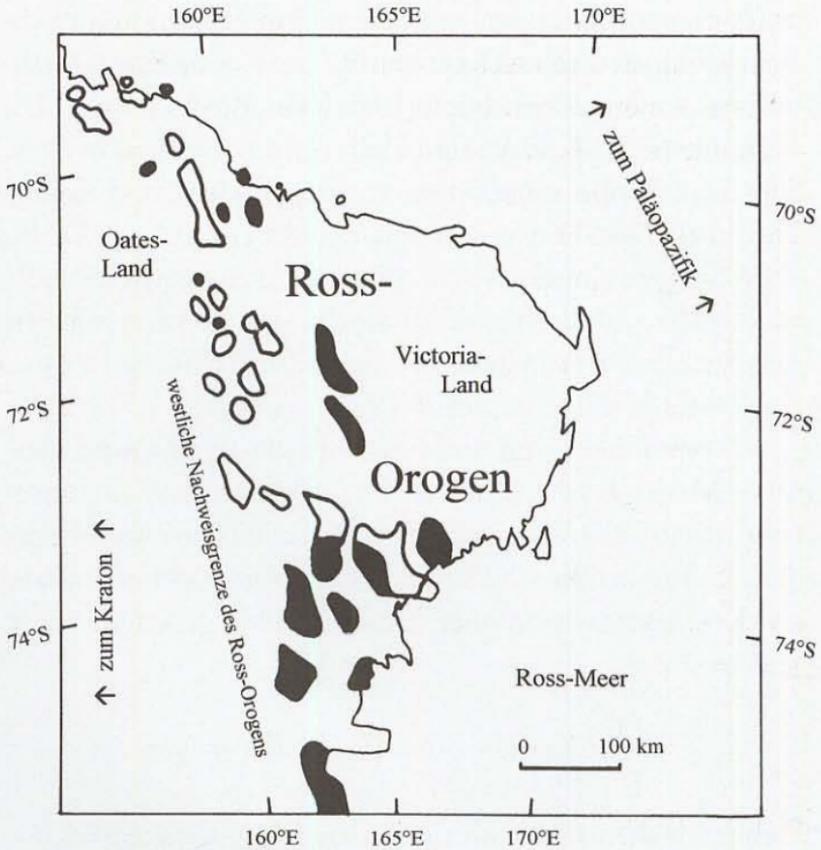


Abb. 3. Die Verteilung von I- und S-Typ-Graniten im Ross-Orogen in Oates- und Victoria-Land (nach zahlreichen amerikanischen, australischen, deutschen und italienischen Autoren). I-Typ-Granite: schwarz, S-Typ-Granite: dick umrandet.

Ähnlich, aber noch weiter verbreitet sind basische Vulkanite aus der Jurazeit (180 Millionen Jahre alt (Abb. 4)). Sie sind bekannt aus Neuschwabenland, der Umgebung der Shackleton Range, dem gesamten Transantarktischen Gebirge, Nordvictorialand und George-V.-Land. Sie firmieren je nach Ausbildung und geochemischen Details

unter mehreren regionalen Namen. Am geläufigsten ist die Bezeichnung »Ferrar-Dolerite« für den Raum Transantarktisches Gebirge/Nordvictorialand/George-V.-Land. Die Vulkanite sind als sogenannte Sills etwa horizontal in ältere Schichtverbände eingedrungen oder bilden ausgedehnte Flutbasalt-Decken. Sie erreichen mehrere 100 m Dicke. Obwohl ihre chemische Zusammensetzung pauschal nicht »alkalisch«, sondern »subalkalisch« ist, werden sie von nahezu allen Bearbeitern als Beleg für Krustenextension angesehen (siehe Storey et al. 1992).

Noch jünger sind die sogenannten »Byrd-Coast-Granite« Marie-Byrd-Lands (*Abb.4*). Sie stammen mit ihren rund 100 Millionen Jahren aus der Kreidezeit und gehören dem A-Typ an. Sie sind somit ebenfalls im Zusammenhang mit Krustenextension oder -rifting gebildet worden.

### *6. Ellsworth- oder Weddell-Orogen*

Den nach dem Grenville- und dem Ross-Orogen nächstjüngeren Orogenzug bildet das Ellsworth- oder Weddell-Orogen. Es entstand vor 250-200 Millionen Jahren am damaligen pazifischen Rand der Antarktis. Hier wurde durch Subduktion des Pazifiks dem Kontinent der nächste Saum nach dem Ross-Orogen angefügt. Auch räumlich schließt das Ellsworth-Orogen annähernd an das Ross-Orogen an. Es zieht sich von den Ellsworth zu den Pensacola Mountains, d. h. es verläuft etwa quer zu älteren und jüngeren Großstrukturen (s. *Ausschlagtafel*). In den Pensacola Mountains scharft es sich mit dem Ross-Orogen und überprägt dort teilweise dessen Strukturen. Die auffällige Querlage hat sich aufgrund paläomagnetischer Unter-

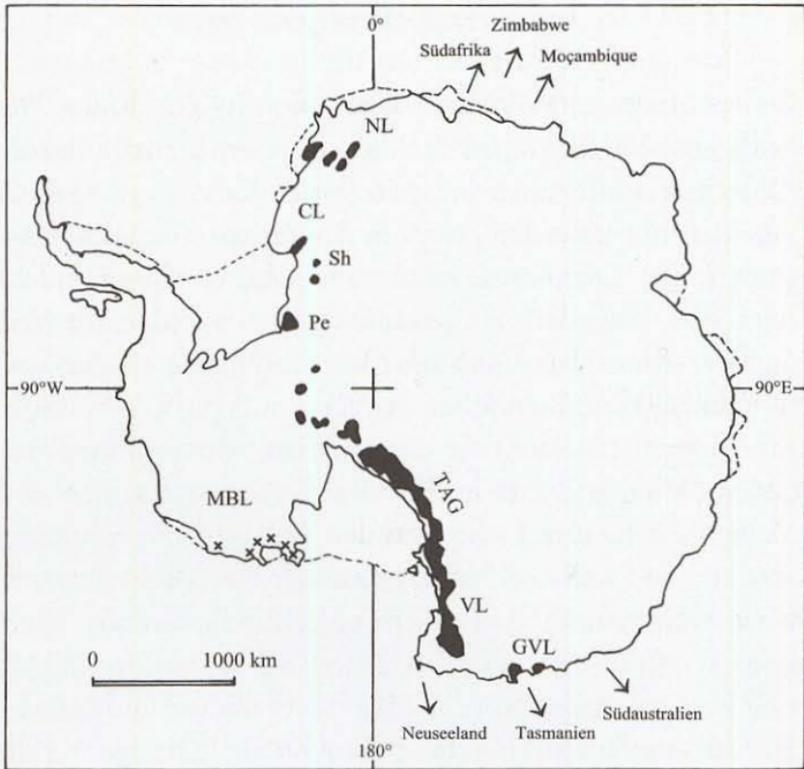


Abb. 4. Die Verbreitung jurassischer Vulkanite in der Antarktis (schwarz; »Ferrar-Vulkanite«) und kreidezeitlicher A-Typ-Granite (Kreuze; »Byrd-Coast-Granite« in Marie-Byrd-Land). Abkürzungen: CL = Coatsland, GVL = George-V.-Land, MBL = Marie-Byrd-Land, NL = Neuschwabenland, Pe = Pensacola Mts., Sh = Shackleton Range, TAG = Transantarktisches Gebirge, VL = Victorialand.

suchungen (Funaki et al. 1991) als sekundäre Rotation des ursprünglich etwa Nord-Süd verlaufenden Orogens erwiesen. Merkwürdigerweise ist das Ellsworth-Orogen »orogenetisch unvollständig«, denn es weist zwar lebhaftere Deformation (Faltung) und auch eine zugehörige, allerdings nur schwache Metamorphose auf, der orogenetische Magmatismus scheint jedoch zu fehlen (Webers et al. 1992).

## 7. *Antarktisches Andenorogen*

Das Antarktische Andenorogen nimmt den Raum der gesamten Antarktischen Halbinsel bis etwa zur Walgreen Coast ein. Es hat sich im Zeitrahmen Jura bis Jungtertiär gebildet und stellt den jüngsten Anwachsstreifen des Kontinents dar. Die Antarktis-Anden gehören damit bereits dem gut belegten, erdgeschichtlich unproblematischen, (sub)rezenten plattentektonischen Geschehen an. Sie sind wie die südamerikanischen Anden ein typisches Subduktionsorogen (Subduktion des Pazifiks) mit reichlich orogenem Magmatismus in Form von Granitplutonen und Vulkanresten. Das Deformations- und Metamorphosegeschehen ist, weil mehrphasig, im einzelnen sehr kompliziert: Faltung und Überschiebungstektonik wird vor allem vom Süden der Halbinsel (Palmerland, Alexander Island) und vom äußersten Norden (Trinity-Halbinsel und östliche Südshetland-Inseln) beschrieben. Ähnlich heterogen ist die Verteilung der zugehörigen Metamorphose, darunter auf Elephant Island die für Subduktionszonen typische Hochdruckmetamorphose.

## 8. *Plattentektonisch aktiver Teil der Antarktis*

Der plattentektonisch jüngste, noch aktive Teil der Antarktis liegt nordwestlich der Antarktischen Halbinsel und ist eigentlich weiter nichts als der äußerste, pazifikwärtigste Teil des Antarktischen Andenorogens. Er umfaßt die Südshetland-Inseln (von Snow Island im Südwesten bis Elephant Island im Nordosten) und die Bransfieldstraße. Nordwestlich der Südshetland-Inseln wird gegenwärtig im Bereich

der Südshetland-Tiefseerinne ein Teilstück des pazifischen Ozeans, die kleine Drake-Platte, unter die antarktische Platte subduziert. Zugehörige Aufschmelzungsprodukte bilden die Vulkankette der Südshetland-Inseln (Inselbogen). Die meisten dieser Vulkane sind erloschen, jedoch noch besonders schön sichtbar auf King George Island. Aktiv ist der oft von Kreuzfahrtschiffen besuchte Vulkan Deception Island. Ein Teil der Südshetland-Inseln (Teil von Livingston Island, Elephant Island) gehört wie die Halbinsel selbst früheren Stadien des Subduktionsbereichs an und besteht aus verfalteter Tiefseerinnenfüllung der Jurazeit. Die Bransfieldstraße liegt südlich des Subduktionsinselbogens und bildet einen aktiven Zerrungsbereich (Musterbeispiel eines sog. »Back-Arc-Beckens«), ebenfalls mit zugehörigem Vulkanismus, überwiegend submarin und teilweise aktiv.

### 9. Bereiche mit ausgeprägter Bruchtektonik

Dieser ganze Antarktischbau wird schließlich von relativ junger Bruchtektonik zerschnitten (s. *Ausschlagtafel*). Besonders große und auffällige Bruchstrukturen sind

- der Lambertgraben (Ostantarktis),
- der Ross-Meer-Graben (Pazifiksektor),
- der Jutulstraumen-Penckmulden-Graben (im folgenden stets kurz »Jutul-Penck-Graben« genannt; Atlantiksektor) und
- ein Blattverschiebungssystem in Victoria-, Oates- und George-V.-Land mit dem Rennickgraben als Hauptelement.

Der Lambertgraben ist in den Ostantarktischen Kraton eingebrochen und mit Gesteinen der permotriadischen

Beacon-Supergruppe gefüllt. Die Bruchtektonik setzte bereits im Altpaläozoikum ein, erreichte ihren Höhepunkt im Perm und dauerte bis in die Unterkreide (Hofmann 1996). Möglicherweise liegt der kürzlich entdeckte, unter 3700 m Inlandeis begrabene Wostok-See (Lake Vostok) etwas versetzt in der Fortsetzung desselben Bruchsystems. Aufwendige internationale Forschungsprogramme werden sich diesen subglazialen See in den nächsten Jahren vornehmen, z. B. der »Russian plan for subglacial Vostok Lake Investigation« (Abyzow et al. 2000). Glaziologisch-hydrologische, geophysikalische und mikrobiologische Arbeiten sollen seine geologische Entwicklung, sein Alter (Morphologie und Wasser) und mögliche Lebensreste und -formen in Wasser und See-Eis ermitteln. Dazu soll eine Bohrung niedergebracht werden, deren Technologie erst noch entwickelt werden muß.

Der Ross-Meer-Graben trennt im Pazifiksektor die West- von der Ostantarktis. Sein Einbruch begann im späten Mesozoikum, d. h. vor rund 140 Millionen Jahren, hatte seinen Höhepunkt im Alttertiär vor 40 Millionen Jahren und schuf an seiner Westschulter das enorme Relief des Transantarktischen Gebirges gegen das Ross-Meer mit insgesamt über 14 km Höhendifferenz. Auch sonst sind die Maße des Grabensystems z. B. dem bekannten ostafrikanischen Riftsystem vergleichbar (Tessensohn und Woerner 1991). Wie dort ist hiermit ein alkalischer, also intrakontinentaler, Krustenextension anzeigender Vulkanismus verknüpft, der im 3794 m hohen Mount Erebus und im 2732 m hohen Mount Melbourne, beide in Victorialand gelegen, noch aktiv ist.

Der Jutul-Penck-Graben im westlichen Dronning-Maud-Land brach wahrscheinlich vor 140 Millionen Jahren

oder etwas später ein (Jacobs und Lisker 1999). Er begrenzt den Grunehogna-Kraton gegen Südosten und benutzt somit eine längst vorgezeichnete geologische Struktur.

Das ausgedehnte Blattverschiebungssystem in Victoria-, Oates- und George-V.-Land verläuft schräg zum Ross-Meer-Graben, wird von diesem abgeschnitten und dürfte daher vor diesem angelegt sein. Es weist aber noch eine gewisse Aktivität auf, denn 1952, 1974 und 1998 wurden dort Erdbeben registriert (Reading 2001). Die Beben von 1974 und 1998 lagen im Bereich des sogenannten Rennickgrabens, beide mit einer Magnitude zwischen 4 und 5. Das dritte lag bei unbekannter Stärke in einer parallelen Struktur entlang des Matusевичgletschers, auf der *Ausschlagtafel* als schwarze Linie in Oatesland westlich des Rennickgletschers eingezeichnet. Hauptelement ist der Rennickgraben. In seinem Verlauf sind jurassische Ferrar-Dolerite und Gesteine der Beacon-Supergruppe eingebrochen und in Teilabschnitten spektakulär verfaltet und über die Grabenschultern hinweg aufgepreßt und überschoben (*Tafel VIb*). Dies belegt einen komplizierten Bau dieses Blattverschiebungssystems, in dessen Verlauf mehrfach zusätzliche Dehnungs- und Kompressionskomponenten wechseln. Ersteres führt zur Bildung von grabenartig eingebrochenen Becken, letzteres zu sogenannten Transpressionszonen mit den beobachteten Einengungsstrukturen. Hauptsächlich erfolgten die Bewegungen entlang des Systems jedoch in der Weise, daß die jeweils östlich gelegenen Bereiche nach Süden versetzt wurden; man kann auch sagen, daß die jeweils jenseits einer Bewegungszone gelegenen Bereiche nach rechts versetzt sind. Eine solche Bewegung wird daher auch als »rechtssinnig« oder »dextral« bezeichnet. Im Rennickgraben-System gibt es interessanterweise Anzeichen

dafür, daß die Verschiebung in früheren Epochen auch entgegengesetzt ablief, d. h. »linkssinnig« oder »sinistral«.

## *D. Der Superkontinent Rodinia und seine Rekonstruktion mit Hilfe des Antarktis-Baus*

### *1. Rekonstruktion mit grenvillischen Strukturen*

Die ersten Rekonstruktionen des Superkontinents Rodinia gingen von den Schweißnähten, d. h. von den Orogenen aus, die sich bei der Kollision an den Rändern der früheren Teilplatten auftürmten. Die Verschweißung erfolgte vor 1100 bis 1000 Millionen Jahren; sie wird als grenvillische Orogenese bezeichnet. Ursprünglich ist das Grenville-Orogen ein Faltengebirgszug im Osten Nordamerikas von Labrador/Neufundland über den Raum Ontario-/Erie-See weiter in südwestlicher Richtung nach Oklahoma/Texas ziehend. Seine Fortsetzung wird im grenvillischen Orogen der Antarktis in Neuschwabenland gesehen (Dalziel 1991; s. *Abb. 5a*). Auf der gleich alten Darstellung (Hoffmanns 1991; s. *Abb. 5b*) kommt der Bildungsprozeß durch die grenvillische Kollision zahlreicher vorheriger Rodinianteile noch besser zum Ausdruck.

Trotzdem ist der grenvillische Anschluß Nordamerikas an die Antarktis bis jetzt unbefriedigend. Denn die grenvillische Orogenese ist in der Antarktis nur für Neuschwabenland sicher belegt, nicht jedoch für das eigentlich in der direkten Fortsetzung des nordamerikanischen Grenvillians gelegene Coatsland mit den Bertrab-, Littlewood- und Moltke-Nunatakkern und mit der Shackleton Range.

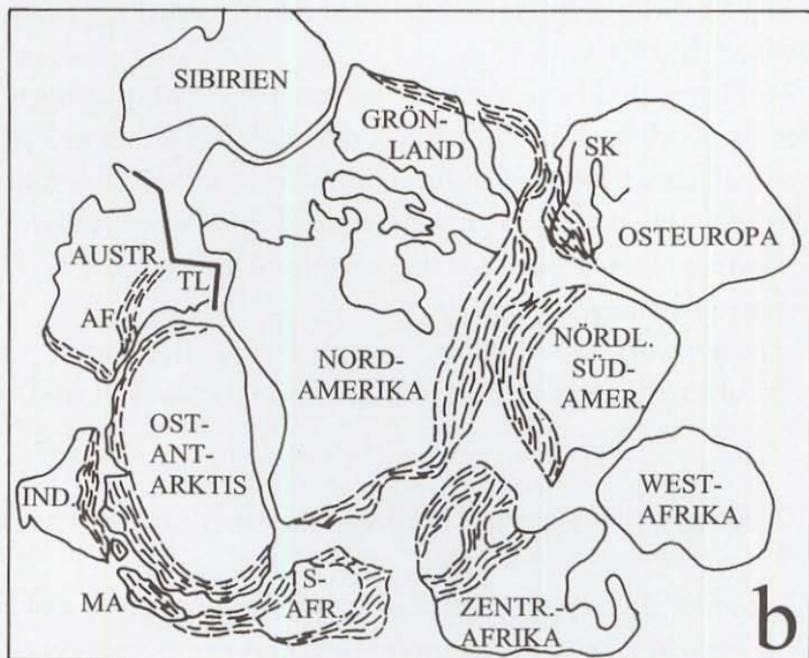
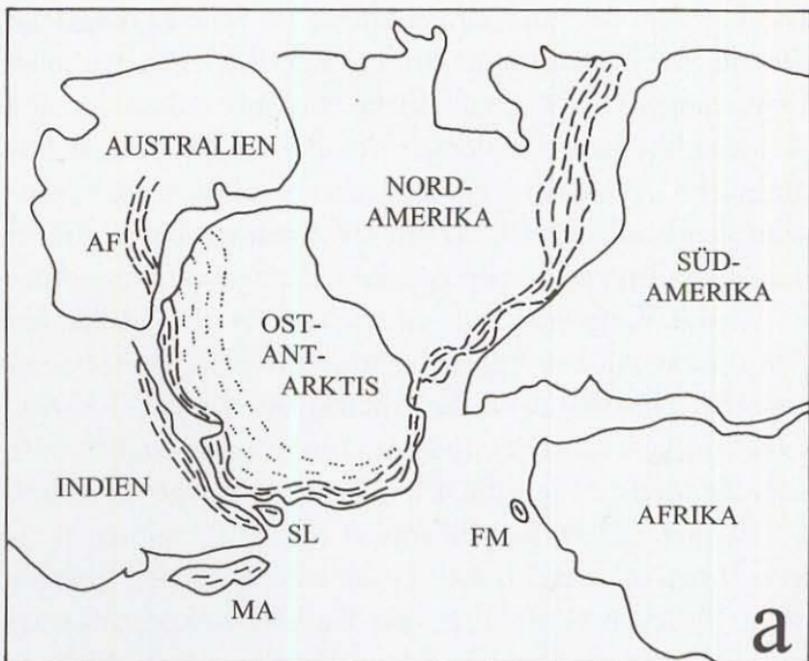
Das Problem der Nunatakker wurde auf Seite 22 dargelegt; für die Shackleton Range konnte kürzlich entgegen allen Erwartungen jeder grenvillische Einfluß ausgeschlossen werden. Ebenso fehlt derzeit der Beweis für eine kontinuierliche Fortsetzung grenvillischer Strukturen von Neuschwabenland nach Osten um die Antarktis herum bis in die Australien gegenüberliegenden Sektoren Wilkes-, Adélie- und George-V.-Land. Australiens ca. 1,1 Milliarden Jahre alten Albany-Fraser-Gebirgsgürtel als Fortsetzung eines bei 110 bis 120° E die Antarktis verlassenden Grenville-Orogens zu sehen (wie in *Abb. 5a* dargestellt), böte sich als ideale Möglichkeit an. Bisher vorliegende Daten aus Wilkesland (z. B. Williams et al. 1983) müßten dazu jedoch ergänzt werden. Gut belegt ist dagegen der grenvillische Brückenschlag (d. h. die Rodinia-Rekonstruktion) von Neuschwabenland in dessen kontinuierliche Fortsetzung als Namaqua-Natal-Belt im südlichen Afrika (Jacobs et al., z. B. 1996).

Dennoch spricht auch aus der Sicht der Antarktis einiges für die Rodinia-Rekonstruktion der *Abb. 5b*. Denn es lassen sich dafür außer Strukturen, die direkt mit der Bildung Rodinias zusammenhängen, folgende Hinweise verwenden:

- ältere, prägrenvillische, d. h. prärodinische Strukturen,
- paläomagnetische Daten,
- Spuren einer 750 Millionen Jahre alten Vereisung und
- Strukturen, die dem Zerfall Rodinias zu verdanken sind.

## *2. Rekonstruktion mit prägrenvillischen Strukturen*

Geeignete ältere prärodinische Strukturen können sowohl im Grunehogna- als auch im ostantarktischen Kraton vor-



liegen. Der Grunehogna-Kraton schließt völlig kontinuierlich an den Ostrand des Zimbabwe-Kaapvaal-Kratons des südlichen Afrika etwa zwischen Maputo und Beira an (Groenewald et al. 1991). Er stellt lediglich einen erst während des Gondwanazerfalls abgetrennten kleinen Splitter des ursprünglich einheitlichen »Kalahari-Kratons« dar, auch »Zimbabwe-Kaapvaal-Grunehogna-Kraton« genannt.

Im ostantarktischen Kraton wurde mit 3,93 Milliarden Jahren das höchste Alter der Antarktis überhaupt ermittelt, und zwar in Enderbyland (ca. 50-55° E) (Black et al. 1992). Enderbyland gehört damit zu den ältesten Anteilen der Erdkruste; nur zwei Gebiete lieferten bis jetzt ein höheres Alter: der Mackenziedistrikt in Nordwestkanada (ca. 4 Milliarden Jahre) und der Mount Narryer in Westaustralien (4,2 Milliarden Jahre). Die Gesteine in Enderbyland erstarrten vor mehr als 3,9 Milliarden Jahren zu einer Art Granit. Sie wurden dann mehrfach metamorph und tektonisch überprägt (vor 3, vor 2,9 und vor 2,5 Milliarden Jahren). Die Druck- und Temperaturbedingungen der Überprägung waren mit 700-950° C und 10 kb sehr hoch und werden als »granulitfaziell« bezeichnet. Die gleichen Gesteine mit der gleichen Metamorphoseart und mit sehr ähnlichem Alter von über 3 Milliarden Jahren bei etwa 3 und etwa 2,5 Milliarden Jahre alten Überprägungen (Raith et al. 1982) liegen

*Abb. 5. Rodinia-Rekonstruktionen mit Hilfe des Grenville-Orogens: a) nach Dalziel (1991) und Moores (1991), b) nach Hoffmann (1991). Gestrichelt: Grenville-Orogen (z.T. nur vermutet), in Australien: AF = Albany-Fraser-Gebirgsgürtel. Gepunktet: hypothetische Ausdehnung des Grenville-Orogens in der Antarktis unter Eis nach Moores. FM = Falklandinseln/Malwinen, MA = Madagaskar, SK = Skandinavien, SL = Sri Lanka, TL = Tasman-Linie.*

in Südostindien südlich von Madras. Um diese besonders alten Kerne in Enderbyland und in Südostindien schlingen sich Zonen mit geringerem Metamorphosealter. Diese konzentrisch angeordneten Zonen in der Antarktis und auf dem indischen Subkontinent ergänzen einander perfekt und lassen eine genaue Passung eines Teils von Rodinia zu (Yoshida und Santosh 1994; s. *Abb. 6*).

Ein ähnlich alter Bereich des ostantarktischen Kratons liegt mit knapp 3,3 Milliarden Jahren im Umfeld der Vestfold Hills auf den Rauer Islands (77-78° E) vor. Er läßt sich mit Nordostindien (Bundesstaat Orissa) zusammenfügen.

Der größte Teil des ostantarktischen Kratons (ohne den küstennahen Streifen zwischen etwa 20° E und 90° E) wurde mit dem Gawler-Kraton im westlichen Südaustralien als präkambrischer »Mawson-Kontinent« zusammengefaßt (Fanning et al. 1996). Das soll die enge Verwandtschaft des südlichen Australien mit den gegenüberliegenden Teilen der Ostantarktis hervorheben. Der Mawson-Kontinent ist – abgesehen von seiner jungen Auftrennung in einen antarktischen und einen australischen Anteil vor rund 100 Millionen Jahren – seit 1,5 Milliarden Jahren geologisch völlig unverändert. Im Mawson-Kontinent wurde ein mehrfacher Wechsel von ca. 2,4 und 1,7 Milliarden Jahre alten Gesteinskomplexen konstatiert, und zwar sowohl in Südaustralien (Drexel et al. 1993) als auch im antarktischen Gegenüber in Adélie- und George-V.-Land (Peucat et al. 1999); beides paßt prinzipiell gut zusammen. Innerhalb dieses Wechselspiels liegt auf australischer Seite das 1,7 Milliarden Jahre alte Kimba-Orogen mit seinen scharf ausgeprägten Strukturen: Scherzonen von etwa 5-10 km Breite (Drexel et al. 1993). Diese Strukturen ließen sich kürzlich in der Antarktis in George-V.-Land weiterverfolgen; die

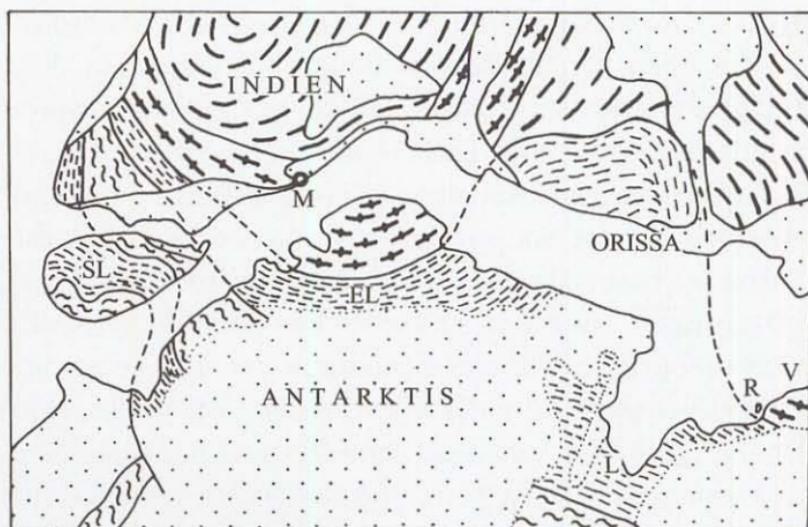


Abb. 6. Rodinia-Rekonstruktion im Raum Antarktis/Sri Lanka/Indien mit Hilfe archaischer und begleitender jüngerer Gesteinszüge, im wesentlichen nach Yoshida et al. (1996). Starke Strichsignatur: archaische Anteile (älter als 2,5 Milliarden Jahre), darin besonders stark veränderte Gesteine (»granulitische Metamorphose«): starke Strichsignatur durchkreuzt, kleine Strichsignatur und schließlich sigmoidale Signatur: Gürtel mit jüngeren Metamorphosen, Punktraster: jüngere Bedeckung einschließlich Eis in der Antarktis. EL = Enderbyland, M = Stadt Madras, L = Lambertgletscher, R = Rauer Islands, SL = Sri Lanka, V = Vestfold Hills.

Übereinstimmung bis ins Detail auf beiden Seiten des Südpolar-Meeress ist verblüffend (Tafel VIIa, b; Kleinschmidt und Talarico 2001). In diesem Fall ist mit derartigen Strukturen sogar eine quasi metergenaue Rodinia-Rekonstruktion möglich.

1,7 Milliarden Jahre alt ist auch der Yavapai-Mazatzal-Orogengürtel Nordamerikas, der sich etwa von Arizona über Neumexiko und Colorado nach Kansas spannt. Er

wurde von Moores (1991) in den Kern der Antarktis einschließlich der Shackleton Range hineingezogen. Die südliche Shackleton Range lieferte tatsächlich entsprechende Deformations- und Metamorphosealter. Moores hat außerdem das noch ältere Wyoming-Hearne-Orogen Amerikas auf den Südpol zulaufen lassen, ohne daß es die Antarktis erreicht; er diskutiert jedoch eine mögliche Fortsetzung unter Eis. Moores hatte 1991 so mit Hilfe grenvillischer und prägrenvillischer Strukturen das einstige unmittelbare Nebeneinander der Ostseite der Ostantarktis und der Westseite Nordamerikas gefordert und die fruchtbare Diskussion um die Existenz und das Wesen von Rodinia angestoßen (*Abb. 7*).

### *3. Paläomagnetische Rekonstruktion*

Rekonstruktionen des Superkontinents Rodinia und seines Bildungsprozesses lassen sich, wie auf Seite 14 erläutert, durch paläomagnetische Daten absichern. Das ist bereits von Dalziel für seine Rodinia-Rekonstruktion von 1991 (*Abb. 5a*) angewendet worden. Seither hat eine Reihe neuer paläomagnetischer Daten das Rodiniabild modifiziert und weiter präzisiert. Danach liegt der magnetische Südpol vor ca. 1100 Millionen Jahren für Teile der Ostantarktis, Nordamerikas und des südlichen Afrika im selben Bereich, wenn Rodinia wie in *Abb. 8* zusammengefügt wird. Prinzipiell ist diese neue Rodinia-Rekonstruktion nicht allzu verschieden von den früheren (*Abb. 5 u. 7*). Der Zimbabwe-Kaapvaal-Grunehogna-Kraton ist jedoch samt Teilen von Coatsland eher Südamerika als der Antarktis benachbart. Die problematische Fortsetzung des Grenville-Orogens in den

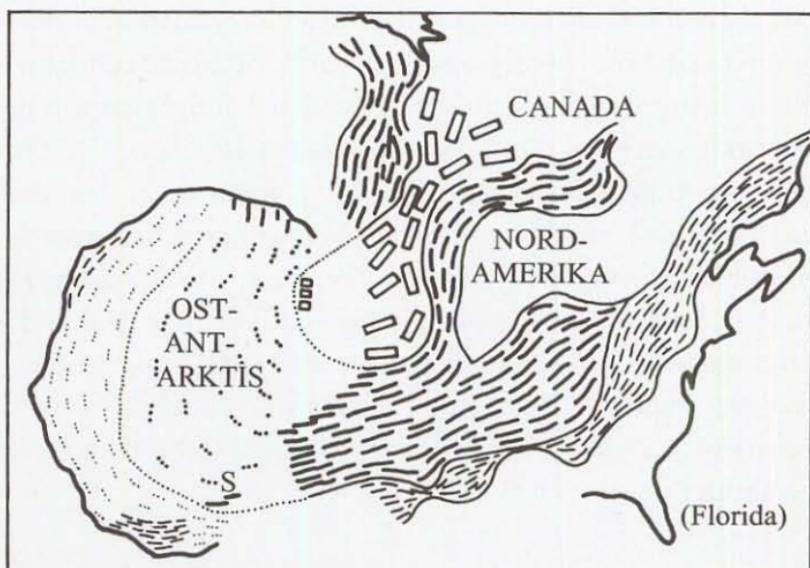


Abb. 7. Das Verhältnis von Nordamerika/Ostantarktis im Rahmen von Rodinia aufgrund von grenvillischen und prägrenvillischen Orogenen nach Moores (1991).

Dicke, durchgezogene Linien: Teilabschnitte heutiger Kontinentumrisse zur Orientierung; fein gestrichelt: Grenville-Orogen (~1,1 Milliarden Jahre); fett gestrichelt: Yavapai-Mazatzal- und Wopmay-Orogen (~1,7 Mrd. Jahre); offen gestrichelt: Wyoming-Hearne-Orogen (>2 Mrd. Jahre); gepunktet: jeweils hypothetischer Verlauf der Orogene unter dem ostantarktischen Inlandeis. S = Shackleton Range.

Raum der Bertrab-, Littlewood- und Moltke-Nunatakker (s. S. 22) wäre dadurch entschärft.

#### 4. Rekonstruktion mit proterozoischer Vereisung

Ein großes Problem der früheren Geologie des Präkambriums läßt sich durch Rodinia auflösen und stellt zugleich

ein weiteres Werkzeug zur Rodinia-Rekonstruktion dar; gemeint sind die proterozoischen, rund 750 Millionen Jahre alten, heute weit auseinander liegenden Vereisungsspuren. Sie finden sich im westlichen Nordamerika und im südlichen Australien. Sie ergeben erst Sinn, wenn sie in Rodinia zu einem einheitlichen, polnahen Vereisungsgebiet zusammengefügt sind (*Abb. 9*; Young 1995). Eigentlich wären sie auch in der Antarktis, etwa in Oates- oder George-V.-Land, zu erwarten. Dort ließen sie sich bis jetzt jedoch nicht nachweisen, obwohl während des deutsch-italienischen Unternehmens »GANOVEX VIII« (1999/2000) intensiv danach gefahndet wurde.

### *5. Rekonstruktion mit Produkten des Rodinia-Zerfalls*

Der Zerfallsprozeß Rodinias wird für den Zeitraum von vor 800 bis 700 Millionen Jahren angesetzt. Ein schlüssiges und durch Belege untermauertes Gesamtkonzept ist für diesen Prozeß jedoch bis jetzt nicht erkennbar. Angaben in der Literatur sind schwankend und widersprüchlich bzw. lassen (positiv ausgedrückt) fruchtbare Forschungsaktivität erkennen. Daher ist auch der Beitrag der Zerfallsprodukte zur Rodinia-Rekonstruktion bis jetzt eher bescheiden – und besonders bescheiden aus der Sicht der Antarktis.

Als Dokument des beginnenden Rodiniazersfalls gilt u. a. eine ca. 800-600 Millionen Jahre alte Suite von magmatischen Gesteinen in Nordwest-Argentinien (Omarini et al. 1999). Die ältesten Anteile dieser magmatischen Abfolge sind ausgesprochen alkalireich, signalisieren also einen Riftprozeß, den beginnenden Zerfall einer Kontinentalmasse. Die jüngeren Anteile haben zunehmend den Charakter

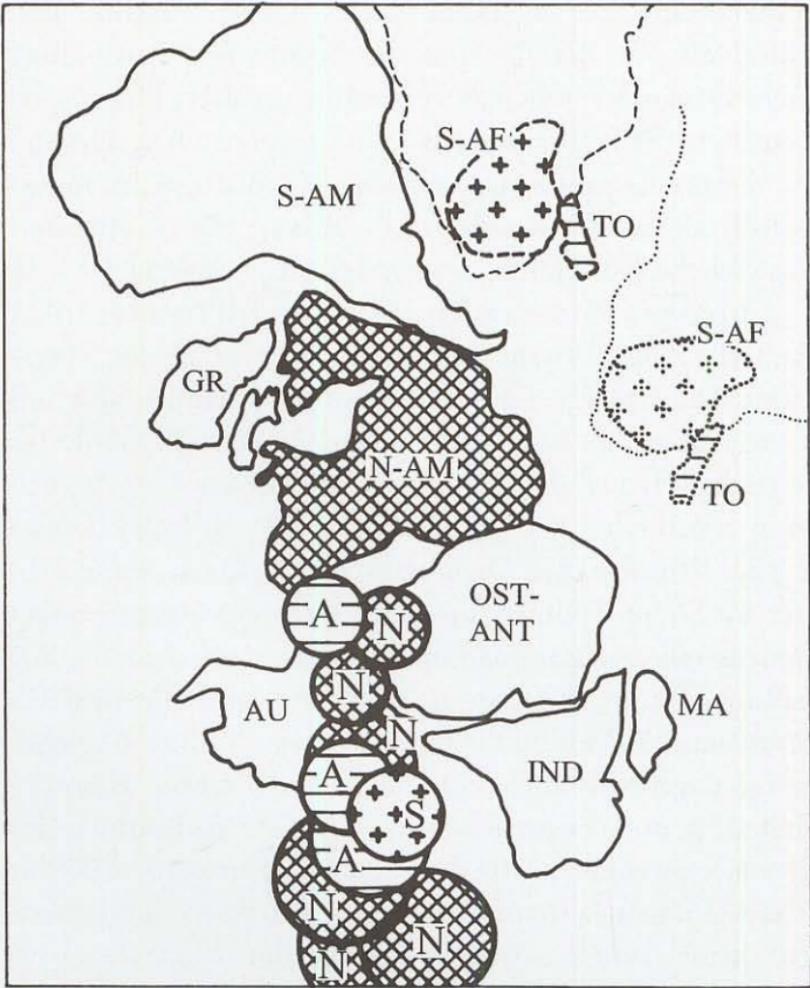


Abb. 8. Neuere Rodinia-Rekonstruktion unter Verwendung paläomagnetischer Daten, nach Gose et al. (1997, gestrichelt) und Dalziel et al. (2000, gepunktet). AU = Australien, GR = Grönland, IND = Indien, MA = Madagaskar, N-AM = Nordamerika, OST-ANT = Ost-Antarktis, S-AF = südliches Afrika, S-AM = Südamerika, TO = Teile der Ost-Antarktis, Kreise = ungefähre Bereiche paläomagnetisch bestimmter Pollagen vor 1,1 Milliarden Jahren: A = Teile der Ost-Antarktis (liniiert), N = verschiedene Teile Nordamerikas (Kreuzschraffur), S = südliches Afrikas (Kreuzchen).

mittelozeanischer Rückenbasalte, melden mithin den Abschluß des Zerfalls und die beginnende Ausbildung eines Ozeans zwischen zwei Kontinenthälften. Die eine ist heute ein Teil Südamerikas mit der genannten Gegend Nordwest-Argentiniens; die andere ist Nordamerika. Innerhalb Rodinias werden also das westliche Südamerika und das östliche Nordamerika nebeneinander plaziert.

Im gegenüberliegenden westlichen Teil Nordamerikas sind ebenfalls basische Magmatite entsprechenden Alters (rund 780 Millionen Jahre) bekannt. Es handelt sich um Gangscharen, die vom kanadischen Mackenzie-Distrikt bis Wyoming radial angeordnet sind und einen nach Westen konvergierenden Fächer bilden (Park et al. 1995). Dieser Fächer läßt sich zum Dreiviertelkreis ergänzen, wenn man ihn im Sinne Rodinias mit dem Gairdner-Gangschwarm Südaustraliens zusammenfügt. Er ist etwa gleich alt (ca. 800 Millionen Jahre, Zhao et al. 1994) und wird allgemein als Rodiniazzerfallsprodukt akzeptiert. Ein Vollkreis solcher radial angeordneten basaltischen Gänge würde Krusten-dehnung und bevorstehendes Aufplatzen Rodinias im Dreieck Australien/Nordamerika/Antarktis vor 800 bis 700 Millionen Jahren besonders eindrucksvoll untermauern, jedoch sind die Analoga des Gairdner-Gangschwarms im antarktischen Oates-/Adélie-Land-Sektor trotz gründlicher Suche durch »GANOVEX VIII« (1999/2000) bis jetzt nicht gefunden worden. Immerhin wird durch 750 Millionen Jahre alte basische Gänge in Neuschwabenland (*Tafel VIIIa*) und durch 700 Millionen Jahre alte Gänge im Verlauf des Transantarktischen Gebirges bei etwa 83° Süd und 79° Süd (Goodge 1999) postgrevillische Krustendehnung, d. h. der Beginn des Rodiniazzerfalls, an anderen Stellen der Antarktis wenigstens angedeutet.

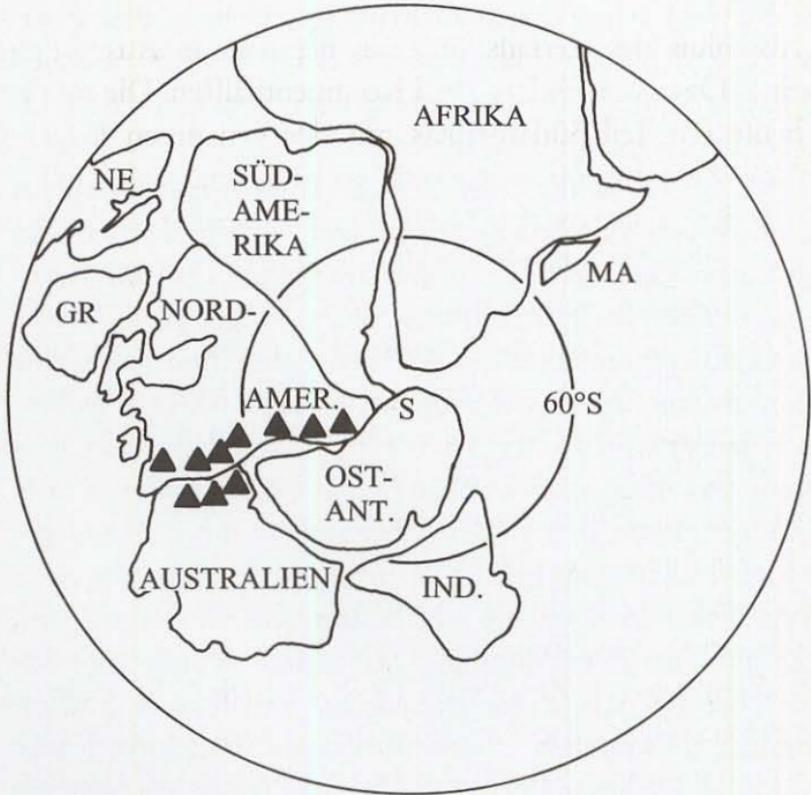


Abb. 9. 750 Millionen Jahre alte Vereisungsspuren (= Dreiecke) in der Rodinia-Rekonstruktion nach Young (1995 [von ihm allerdings nicht Rodinia genannt]). GR = Grönland, MA = Madagaskar, NE = Nordost-Europa, S = Südpol vor 750 Millionen Jahren.

In Australien gilt außerdem die sog. Tasman-Line (»TL«) als Bruchlinie des Rodinia-Zerfalls (Abb. 5b). Sie durchzieht die Osthälfte Australiens als gezackte Linie von Norden nach Süden und schneidet alle Einheiten und Strukturen des westlichen Australiens, die älter als ca. 1 Milliarde Jahre sind, scharf ab. Sie ist auf geologischen Karten leidlich, auf aeromagnetischen Darstellungen hervorragend zu erkennen. Mit solchen Messungen des irdischen Magnet-

feldes und seiner Anomalien müßte sie bzw. ihre Fortsetzung sich auch unter dem Eis der Antarktis zwischen Victoria- und Wilkesland nachweisen lassen. Das ist bis jetzt jedoch nicht gelungen.

Nach Abschluß des Zerfalls eines Superkontinents müßten sich zwischen den Kontinentbruchstücken Ozeane mit ozeanischer Kruste ausgedehnt haben. Im Falle Rodinias müßten diese Ozeankrustenreste jünger als die Rodiniabildung (grenvillisch = 1 Milliarde Jahre) und älter als die Gondwanabildung (panafrikanisch = etwa 600-500 Millionen Jahre) sein. In der Antarktis sind zur Zeit zwei Vorkommen mit genau solchen Resten ozeanischer Kruste bekannt. Eines liegt in der Küstenregion um die Lützow-Holm-Bukta zwischen 35° E und 45° E (Shiraishi et al. 1992), also dort, wo die Antarktis innerhalb Rodinias mit Südindien zusammenhing. Das andere wurde kürzlich als über 100 km langer Streifen aus basischen und ultrabasischen Gesteinen in der nördlichen Shackleton Range entdeckt (Talarico 1999, *Tafel VIIIb*). Beide Vorkommen belegen zwar den Zerfall und den Zerfallsprozeß des zuvor existenten Superkontinents Rodinia, lassen das Zwischenstadium aus zahlreichen Kleinkontinenten, umspült von Ozeanen, erahnen und leiten durch ihren Einbau in den nachfolgenden Superkontinent Gondwana zu dessen Bildung über. Zu einer exakten Rekonstruktion von Rodinia und dem Folgezustand tragen sie bis jetzt kaum bei, zu ungenau ist ihre Alterseinstufung, zu isoliert ihr Auftreten, noch zu umstritten ihre Bedeutung für ein globales plattentektonisches Gesamtkonzept für die Zeit von 1 bis 0,5 Milliarden Jahren.

Fazit: Angelpunkt bei der Nutzung der Antarktis zur Rodinia-Rekonstruktion ist das Grenville-Orogen, das vom

Grenvillian Nordamerikas – d. i. das Grenvillian im strengen Sinne – über die Antarktis, Teile des südlichen Afrika und Indiens nach Australien in den »Albany-Fraser-Gebirgsgürtel« hineinlaufen soll. In der Antarktis ist davon – wie wir gesehen haben – allerdings nur ein kleiner Abschnitt (s. *Ausschlagtafel*) des gesamten Orogenzuges belegt und keineswegs die gesamte in den Rekonstruktionen angegebene Erstreckung (*Abb. 5*). Weitere Antarktis-Argumente für eine konsistente Vorstellung von Rodinia, seiner Bildung und seinem Zerfall sind noch lückenhaft. Sie können das gegenwärtige Bild jedoch wenigstens örtlich untermauern und präzisieren.

### *E. Der Superkontinent Gondwana und seine Rekonstruktion mit Hilfe des Antarktis-Baus*

Zur Rekonstruktion von Gondwana, seiner Bildung und seines Zerfalls eignen sich in erster Linie solche geologischen Erscheinungen, die jünger oder gleich alt sind wie die Gondwanabildung, und solche, die älter oder gleich alt sind wie der Gondwanazerfall.

#### *1. Rekonstruktion mit Hilfe des Ross-Orogens*

Wichtigste geeignete Rekonstruktions-Elemente sind die »Schweißnähte« an den Rändern der prägondwanischen Kontinente, d. h. das Ross-Orogen und seine zeitlichen Äquivalente (*Abb. 10*) bzw. deren überlieferbares Inventar.

Das Ross-Orogen im strengen Sinne folgt dem Transantarktischen Gebirge und endet einerseits bei 50-60° W in den Pensacola Mountains und andererseits in Victorialand bei 160-170° E gegenüber von Australien/Neuseeland. Diesem Ende des Orogens ist außerdem das westliche Marie-Byrd-Land zuzurechnen. Im südlichen Australien setzt es sich mit gleichen Gesteinen und gleichen Strukturen völlig kontinuierlich – lediglich unter anderem Namen – fort; es heißt dort »delamerisches Orogen«. Wie auf der Antarktischeite kommen im delamerischen Orogen S- und I-Typ-Granite vor, und Überschiebungsbahnen mit ost- und westwärtigem Überschiebungssinn sind hier wie dort die auffälligsten Deformationsstrukturen. Das ermöglicht hier eine sehr genaue Wiederherstellung des Gondwanazustands (*Abb. 11*). An den östlichsten Teil des Orogens in Marie-Byrd-Land, charakterisiert durch verfaltete kambroordovizische Turbidite, schließt sich mit identischen Gesteinen der Nordwesten der neuseeländischen Südinsel an, allerdings gegenüber dem Hauptteil des Orogenzugs von Transantarktischem Gebirge und Australien völlig verschwenkt.

Schwieriger ist der Anschluß an das andere Ross-Orogen-Ende in den Pensacola Mountains zu belegen, da die geradlinige Fortsetzung gen Norden zum Antarktischelf gehört und unter Schelfmeer bzw. -eis liegt. Außerdem muß nördlich der Pensacola Mountains die Scharung mit dem quer verlaufenden panafrikanischen, also zeitgleichen Orogenzug der Shackleton Range liegen. Dennoch bietet sich der Saldania-Belt Südafrikas als Anknüpfung an (*Abb. 10*), wiederum mit verfalteten Turbiditen passenden Alters, mit Überschiebungssystemen, die denen in Victorialand vergleichbar sind, intrudiert von Graniten passenden Alters.

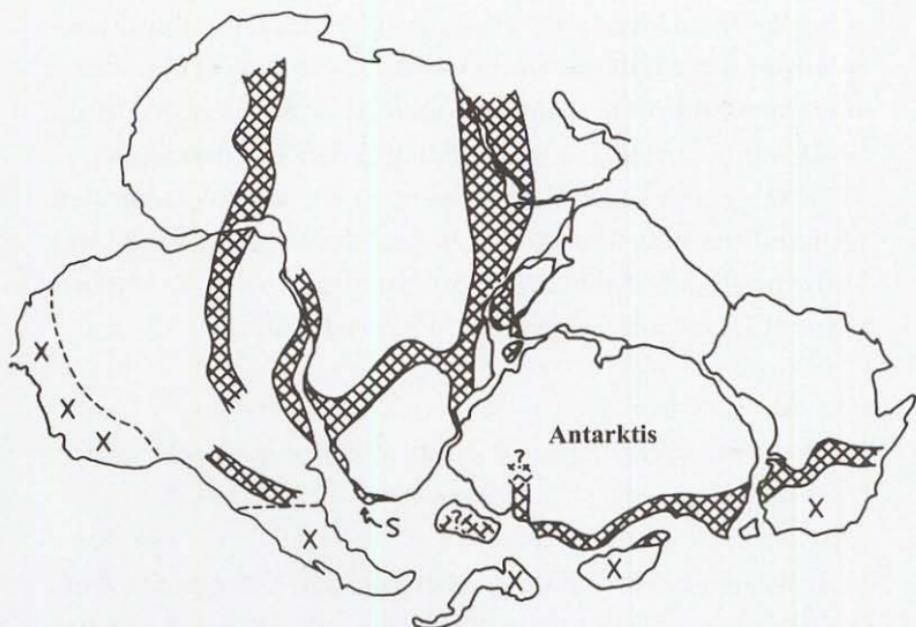


Abb. 10. Der Superkontinent Gondwana mit den Anwachs- und Schweißnähten seiner Teilstücke (500 bis 600 Millionen Jahre alte Orogenzüge = Schraffur), darunter der Saldania-Belt Südafrikas, bezeichnet mit »S«. X = Bereiche, die z. Zt. Gondwanas nicht existierten und hier nur der besseren Verständlichkeit wegen eingetragen sind. Mit Fragezeichen sind Bereiche gekennzeichnet, in denen die Fortsetzung der genannten Orogenzüge umstritten oder wegen Eisbedeckung unklar ist.

Eine weitere, etwa streichende Fortsetzung dieses Zuges kann man im Brasiliano-Belt Südamerikas (Südbrasilien) sehen.

Selbst spätorogene Produkte ermöglichen Brückenschläge von der Antarktis aus: Die Kollapsgefüge abschließender Knickbänder finden sich in gleichartiger Ausbildung und Orientierung in Victoria- und Marie-Byrd-Land einerseits und in Südaustralien und Neuseeland anderer-

seits; etwa ordovizische Molassebildungen laufen im Ross-Orogen Victorialands unter der Bezeichnung »Leap-Year-Gruppe«, ihre Äquivalente bauen in Australien (Victoria) die Grampians und in Südafrika u. a. den Tafelberg auf.

Insgesamt bildet der Orogenzug von den Delameriden Australiens über das Ross-Orogen der Antarktis bis zum Saldania-Belt Südafrikas den Subduktions- (d. h. Anwachs-) Saum Gondwanas gegen den »Paläo«-Pazifik.

## 2. *Rekonstruktion mit Hilfe des panafrikanischen Orogens*

Demgegenüber erfüllt das panafrikanische Orogen der Antarktis, von der Shackleton Range aus ost- bis nordostwärts verlaufend (s. *Ausschlagtafel*), eine andere Funktion in Gondwana: Es ist Teil des Grenzstreifens zwischen Ost- und Westgondwana. Beide Gondwanateile waren, wie paläomagnetisch belegt ist, bis vor gut 500 Millionen Jahren völlig getrennt (*Abb. 12*). Zwischen beiden erstreckte sich ein Ozean unbekannter Ausdehnung, der Moçambique-Ozean. Er bildete sich spätestens beim Zerfall Rodinias (s. *Abb. 2*, vgl. S. 44) und schloß sich wieder im Zeitraum von vor 600 bis 500 Millionen Jahren. Westgondwana kollidierte mit Ostgondwana, der panafrikanische Moçambique-Belt türmte sich auf. Er ist in Ostafrika von Ostägypten bis Moçambique/Madagaskar belegt und sollte, markiert durch Ozeanreste, die Schweißnaht zwischen Ost- und Westgondwana (»Sutur«) enthalten. Der genaue Verlauf dieser Sutur ist umstritten. Dies gilt noch mehr für eine Fortsetzung hinein in die Antarktis. Denn dort sind Moçambique-Ozeanreste, d. h. die Sutur zwischen West- und Ostgond-

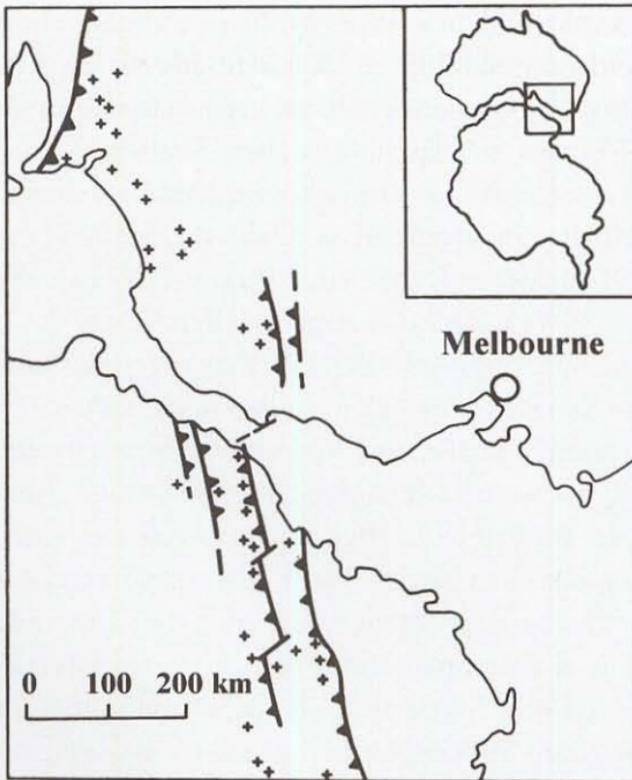


Abb. 11. Ross-orogenetische bzw. delamarische Granite (Kreuze) und Überschiebungssysteme (gezähnte Linien) der Antarktis und Australiens (nach Flöttmann et al. 1993, verändert).

wana, nur in der Shackleton Range bekannt (s. S. 44). Angaben über panafrikanische Orogenese in Dronning-Maud-Land (s. Jacobs et al. 1998) helfen nur bedingt weiter, denn dort dürfte es sich um Fernwirkungen handeln, ähnlich wie heutzutage die aktive Gebirgsbildung in China Fernwirkung der Indien-/Asienkollision im Himalaya-Raum ist. Die Frage, wo die Ost-/Westgondwana-Sutur durch die

Antarktis verläuft, ist für eine schlüssige Vorstellung über die Gondwanabildung entscheidend (*Abb. 13*). Ein deutsch-japanisches Gemeinschaftsprogramm soll dies in den nächsten Jahren zu klären versuchen. Die Plazierung unmittelbar am Ostrand des Grunehogna-Kratons (Shackleton 1996) dürfte unzutreffend sein; die direkte Verbindung von der Shackleton Range zur Lützw-Holm-Bukta (Grunow et al. 1996; s. *Abb. 13*) zeigt, daß der Anschluß an den eigentlichen Moçambique-Belt Ostafrikas verpaßt und statt dessen an den Raum zwischen Indien und der Antarktis hergestellt würde. Daß dieser Streifen eine Schweißnaht im Zuge der Gondwanabildung darstellt, nur weniger fundamental als der Moçambique-Belt und quer dazu, erhärtet sich derzeit mehr und mehr. Denn die panafrikanisch überprägten Ozeanreste in der Gegend der Lützw-Holm-Bukta und deren panafrikanisch geprägtes Umfeld (Shiraishi et al. 1992) fügen sich bis ins Detail genau an den geschwungenen Streifenbau Sri Lankas (s. *Abb. 6*).

Molassebildungen des panafrikanischen Antarktisorogens in der Shackleton Range und in Kirwanveggen lassen sich wie die des Ross-Orogens im strengen Sinne (siehe oben) an die Tafelbergsedimente Südafrikas anschließen – vielleicht ein Hinweis auf den Zusammenhang des Ross-Orogens einerseits und des Moçambique-Belts samt antarktischem Panafrika-Orogen andererseits im Verlauf des südafrikanischen Saldania-Gürtels.

Eine unerwartete, erstaunliche zusätzliche Unterstützung liefern die berühmten Edelsteinvorkommen des Zuges von Tansania über Moçambique, Madagaskar, die Südspitze Indiens bis Sri Lanka mit Rubin, Saphir, Topas und Beryll. Sie werden sämtlich als panafrikanisch eingestuft, folgen dem Moçambique Belt und seinen Moçambique-Ozean-

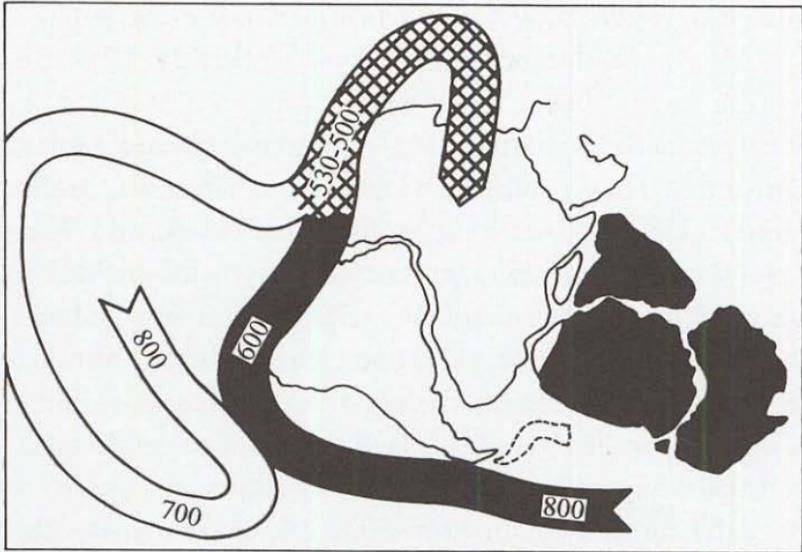


Abb. 12. Paläomagnetischer Nachweis der Vereinigung von Ost-Gondwana (schwarz) und West-Gondwana (weiß) vor gut 500 Millionen Jahren: Die paläomagnetisch bestimmten Pollagen für Ost-Gondwana (schwarzes Band) und West-Gondwana (weißes Band) differieren deutlich im Zeitraum davor, fallen jedoch danach zusammen (kreuzschraffiertes Band). Diese sog. »scheinbaren Polwanderkurven« für den Zeitraum von 800 bis < 500 Millionen Jahren (= Zahlen an den Kurven) wurden zusammengestellt nach Kröner (1980, 1991), Kröner et al. (1980) und McWilliams (1981).

Resten und sollen sich in die Lützw-Holm-Bukta-Region der Antarktis fortsetzen (Dissanayake und Chandrajith 1999). Vielleicht reicht der Zug von da sogar weiter bis in die Shackleton Range, wo wir 1994/95 in den panafrikanischen Ozeanresten Rubin fanden.

### 3. Rekonstruktion mit postpanafrikanischen Bildungen: Kohle und Vereisung

Die festländisch bestimmten Ablagerungen aus Karbon, Perm und Trias in allen Südkontinenten haben wegen ihrer großen Übereinstimmung bereits Suess (1885) und Wegener (1915) zur Vorstellung von einem einheitlichen Südkontinent Gondwana veranlaßt. Diese Sedimente laufen in Südamerika und Australien unter einer Vielzahl von Formationsbezeichnungen; in Südafrika heißen sie »Karoo-Folge«, in Indien »Gondwana-Folge« und in der Antarktis »Beacon-Supergruppe« (s. o.). Sie schneiden überall in Gondwana diskordant-horizontal alle älteren – also auch die ross-orogenetischen bzw. panafrikanischen – Strukturen ab (s. *Tafel VIa*) und enthalten in allen Südkontinenten zwei bekannte Bildungen: 1. die Zeugnisse einer permokarbonen Inlandvereisung und 2. die permischen, z. T. noch triassischen Gondwanakohlen. Letztere sind im südlichen Afrika, in Indien und in Australien von großer wirtschaftlicher Bedeutung. In der Antarktis wäre ein Abbau natürlich unwirtschaftlich, und er ist dort derzeit international verboten. Bisher fanden lediglich Beprobungen aus wissenschaftlichem Interesse statt, und zwar schon 1911 von Scott.

Ein hervorragendes Instrument zur Rekonstruktion Gondwanas liefern die Vereisungsspuren: Eine Zusammenstellung aller Indikatoren der permokarbonen Eisstromrichtungen, insbesondere der Gletscherschrammen, führt zu einem Gondwanabild, das sich völlig mit den zuvor dargestellten Rekonstruktionsansätzen deckt. Es führt außerdem zu einem permokarbonen Vereisungszentrum Antarktis und bestätigt die paläomagnetisch bestimmte Lage des

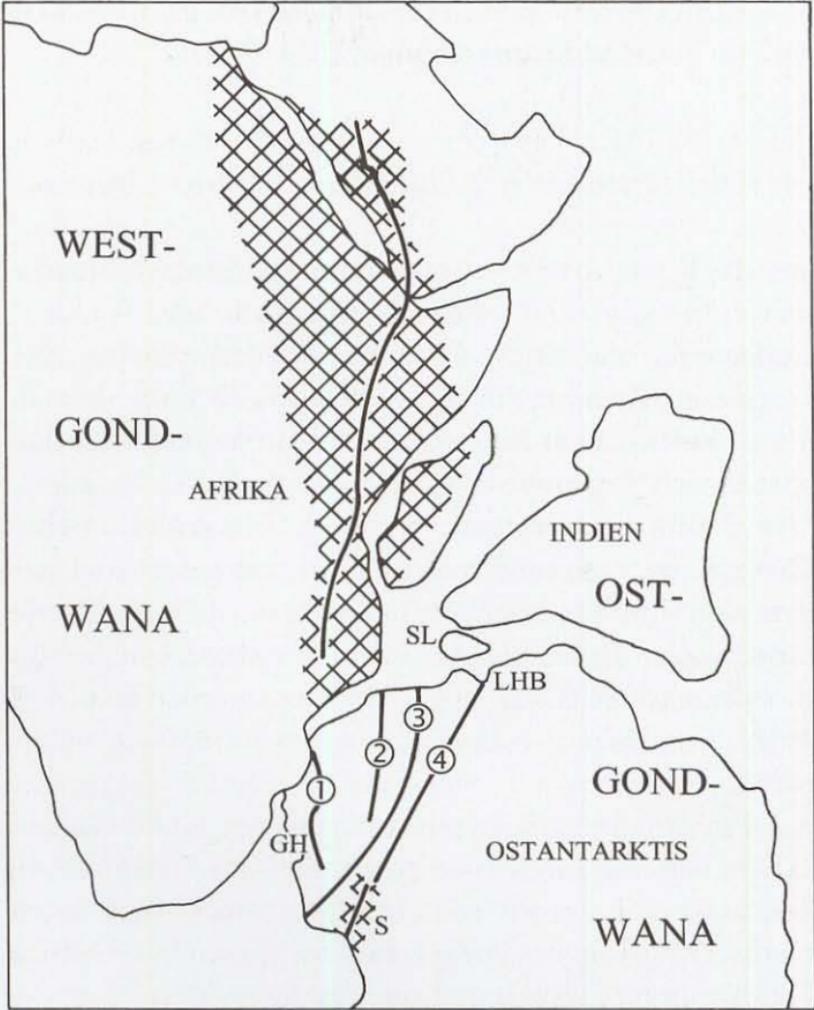


Abb. 13. Der Moçambique-Belt (kreuzschraffiert) mit der Naht (=»Sutur«, schwarze Linie) zwischen West- und Ost-Gondwana nach Shackleton (1996) und deren derzeit diskutierte Fortsetzungsmöglichkeiten in der Antarktis: (1) nach Shackleton (1996), (2) nach Jacobs et al. (1998), (3) nach Moyes et al. (1993), (4) nach Grunow et al. (1996). S = Shackleton Range, ebenfalls kreuzschraffiert, mit Sutur; Fortsetzung des Moçambique-Belts? GH = Grunehogna-Kraton; LHB = Lützow-Holm-Bukta; SL = Sri Lanka.

permokarbonen Südpols in der Ostantarktis, gar nicht weit entfernt von dem heutigen Südpol (*Abb. 14*).

#### 4. Rekonstruktion mit Hilfe des Ellsworth-Orogens

Wie das Ross-, so läßt sich auch das nächstjüngere Antarktisch-Orogen, das frühmesozoische Ellsworth- oder Weddell-Orogen (s. *Ausschlagtafel*), für die Wiederherstellung der Gondwana-Zusammenhänge verwenden. Es verbindet sich mit den gleich alten Kapketten in Südafrika und setzt sich weiter nach Argentinien in die Sierra de La Ventana fort. Der gesamte Orogenstrang wird auch als »Gondwanisches Orogen« oder »Gondwaniden« zusammengefaßt und bildete sich durch Subduktion des Paläopazifiks am Rande Gondwanas. Es ist als Argument für die Existenz von Gondwana bereits seit langem benutzt worden (Du Toit 1937, hier unter der Bezeichnung »Samfrau-Geosynklinale«).

Für den innigen Zusammenhang der Gondwaniden spricht u. a., daß ihre afrikanischen und südamerikanischen Teilstücke wie ihr antarktisches Gegenstück als Orogen merkwürdig »unvollständig« sind. Sie weisen zwar heftige Deformation (Faltung) und eine schwache Metamorphose auf, der zugehörige orogenetische Magmatismus scheint jedoch wie in der Antarktis zu fehlen (v. Gosen et al. 1990). Merkwürdig ist außerdem, daß die Gondwaniden den Zug des älteren Ross-Orogens und seiner außerantarktischen Fortsetzung offenbar zweimal kreuzen (*Abb. 15*).

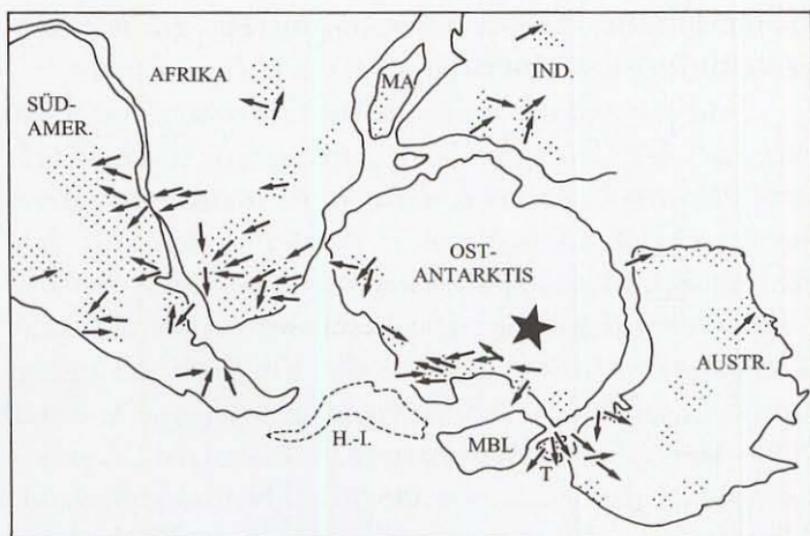


Abb. 14. Gondwana und Zeugnisse der permokarbonen Vereisung nach verschiedenen Quellen und eigenen Daten. Pfeile: Gletscherschrammen, Eisstromrichtungen. Punkte: Verbreitung von Resten glazialer Ablagerungen. Stern: permokarboner Südpol. MA = Madagaskar, H.-I. = Antarktische Halbinsel, MBL = Marie-Byrd-Land, T = Tasmanien.

### 5. Rekonstruktion mit Bildungen des Gondwanazerfalls: Vulkanite der Jurazeit

Fast gleichzeitig mit der Auffaltung der Gondwaniden fließen in der Jurazeit (vor 180 Millionen Jahren) in Gondwana weit verbreitet Vulkanite aus. Sie dringen als sogenannte Sills in ältere Schichtverbände ein oder bilden ausgedehnte Flutbasalte. Sie laufen in der Antarktis unter dem Namen »Ferrar-Basalte« (Abb. 4) und erreichen dort in einzelnen Sill- oder Flutbasaltlagen mehrere 100 m und insgesamt Kilometer Dicke. Häufigster Typ ist der sogenannte

»Ferrar-Dolerit«. Die Vulkanite markieren Krustenextension (Rifting), d. h. den Beginn des Gondwana-Zerfalls.

Nutzbar sind die Vulkanite für Gondwana vor allem auch aus folgendem Grunde: In der Antarktis lassen sie sich zwei Provinzen zuordnen, der Ferrar-Provinz im engeren Sinne und der Karoo-Provinz. Beide unterscheiden sich geochemisch in den Spurenelementen, die Ferrar-Provinz ist außerdem titanärmer. Die Ferrar-Provinz umfaßt den Raum von der Shackleton Range über das Transantarktische Gebirge nach Nord-Victoria-Land und George-V.-Land (*Abb. 4*). Die Karoo-Provinz umfaßt Coatsland unmittelbar nördlich der Shackleton Range und Neuschwabenland. Aber beide Provinzen ragen an ihren jeweiligen Enden weit über die Antarktis hinaus und betonen so die jeweiligen ursprünglichen Zusammenhänge: Die Ferrar-Provinz reicht von Nordvictorialand und George-V.-Land nach Südostaustralien mit Tasmanien und nach Neuseeland, die Karoo-Provinz reicht von Coatsland und Neuschwabenland in die Karoo Südafrikas, nach Zimbabwe und Moçambique. Genau hier, zwischen Moçambique und Neuschwabenland, wird das Hauptzentrum des Gondwanazerfalls angenommen, hier begann Gondwana geradezu »aufzuplatzen«.

Zahlreiche weitere Daten und Details zu diesen jurassischen Vulkaniten und dem Gondwanazerfall sind dem Sammelband von Storey et al. (1992) zu entnehmen.

### *6. Rekonstruktion mit Bildungen des Gondwanazerfalls: Granite der Kreidezeit*

Auch die kreidezeitlichen A-Typ-Granite Marie-Byrd-Lands (siehe oben »Byrd-Coast-Granite«; *Abb. 4*) stehen

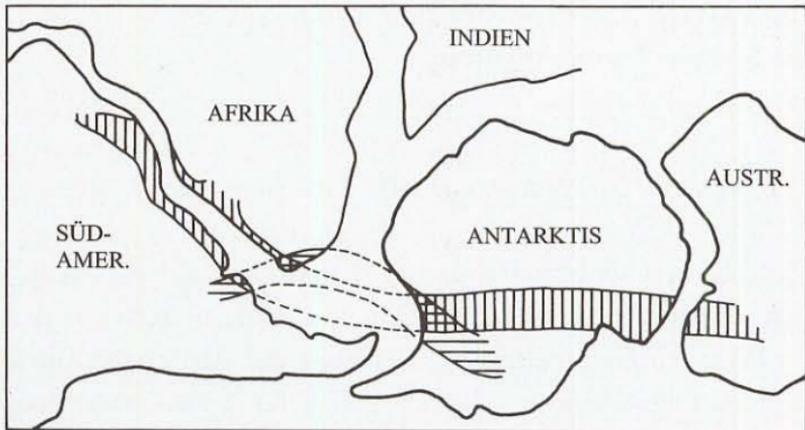


Abb. 15. Das Gondwaniden-Orogen (waagerecht schraffiert) und das Ross-Orogen und dessen Fortsetzungen in Südamerika/Afrika und Australien (senkrecht schraffiert), sich zweimal überkreuzend; nach Le Roux und Toens (1987), unwesentlich verändert.

als Indikator für Kontinentrifting in ursächlichem Zusammenhang mit dem Gondwanazerfall. Denn völlig gleich alte und gleichartige Gesteine erscheinen im Westen Neuseelands. Früher, als man noch nicht mit hoher Mobilität von Krustenteilen im Zuge von Plattentektonik rechnete und noch nicht zwischen I-, S- und A-Typ-Graniten unterschied, wurden die Kreide-Granite Neuseelands und Marie-Byrd-Lands als Argument dafür benutzt, daß sich die Anden von Südamerika entlang der gesamten Pazifikküste der Antarktis bis nach Neuseeland fortsetzen. Heute belegen diese A-Typ-Granite, die bis hin zu ihren Nebenbestandteilen (vor allem die Minerale Apatit, Ilmenit, Zirkon, Monazit und Orthit) auf beiden Seiten des Südpazifiks identisch sind, daß sich vor 100 Millionen Jahren Neuseeland von Gondwana, d. h. von der Antarktis, genauer von

Marie-Byrd-Land löste und auf kompliziertem Wege bis in die heutige Position driftete.

### *7. Rekonstruktion mit Hilfe von Bruchstrukturen*

Daß die vergleichsweise jungen Bruchlinien, die den heutigen Antarktischbau zerschneiden, zur Rekonstruktion des Gondwanabildes beitragen, erscheint auf den ersten Blick widersinnig. Wenn sich diese Bruchsysteme jedoch vor dem Zerfall Gondwanas, der sich ja in erster Linie zwischen 180 und 60 Millionen Jahren abspielte, angelegt haben und das bereits so deutlich und scharf wie richtiggehende Grabenbrüche, dann müßten sie exzellente Paßstellen im Gondwanapuzzle darstellen. Bereits paläozoisch angelegt ist der Lambertgraben. Er findet seine Fortsetzung mit gleichartiger und gleich alter Sedimentfüllung im Mahanadi-Rift Indiens südwestlich von Kalkutta im Staat Orissa (Hofmann 1996). Die so erzielte Indien-Antarktis-Kombination stimmt genau mit derjenigen überein, die durch archaisch-frühproterozoische Elemente im Falle Rodinias erzielt wurde. D. h. das Verhältnis Indiens zur Antarktis innerhalb Rodinias unterscheidet sich interessanterweise nicht von dem innerhalb Gondwanas.

Diskutiert wird außerdem eine Fortsetzung des Jutul-Penck-Grabens in Neuschwabenland in das noch aktive ostafrikanische Grabensystem (Grantham und Hunter 1991). Dies ist keineswegs abwegig, denn Teile des ostafrikanischen Grabensystems waren tatsächlich bereits zur Jura-Zeit aktiv. Die aufgrund anderer Argumente (s. o.) ohnehin gute Passung von Neuschwaben-/Coatsland mit Südosafrika könnte auch hier eine besonders hohe Genauigkeit erfahren.

Fazit: Die Rekonstruktion Gondwanas, seiner Bildung und seines Zerfalls ist prinzipiell durch Beachtung antarktischer Befunde – Struktur und Verlauf von panafrikanischem, Ross- und Ellsworth-Orogen, Charakteristika der permokarbonen Beaconsedimente, Verbreitung und Geochemie der jurassischen Ferrar- und der kretazischen Byrd-Coast-Magmatite, Alter und Geometrie von Lambert- und Jutul-Penck-Graben – gelungen. Offen sind lediglich Detailprobleme und nötig hier und dort eine Präzisierung (s. Kapitel H). Alle Teilergebnisse weisen in die gleiche Richtung (*Abb. 10*). Und alle genannten geologischen Argumente bestätigen den paläomagnetischen Ansatz (z. B. McWilliams 1981; *Abb. 12*).

## *F. Die Antarktislplatte in der heutigen plattentektonischen Konfiguration*

### *1. Die gegenwärtige plattentektonische Situation um die Antarktis*

Wie fügt sich der Bau der Antarktis in das heutige plattentektonische Bild? Die gegenwärtige plattentektonische Situation der Antarktis ergibt sich aus den *Abbildungen 1* und *16*: Die antarktische Platte umfaßt nicht nur den kontinentalen Festlandbereich der Antarktis (der gelegentlich auch »Antarktika« genannt wird), sondern auch die antarktischen Schelfgebiete. In erster Linie sind dies ein ca. 150 km breiter Streifen vor der Küste der Ostantarktis zwischen 60° und 160° Ost, das Ross-Meer, das südliche Amundsen-Meer (105°-130° West), das Bellingshausen-Meer (74°-90°

West) und das südliche Weddell-Meer. Außer diesen Bereichen mit *kontinentaler* Kruste gehören zur antarktischen Platte aber vor allem auch große Anteile mit *ozeanischer* Kruste, und zwar der südliche Atlantik bis etwa  $60^{\circ}$ - $55^{\circ}$  Süd, der südliche Indik bis ca.  $50^{\circ}$ , z. T. bis  $40^{\circ}$  Süd und der südliche Pazifik bis ca.  $60^{\circ}$  Süd im Westen (d. h. südlich von Neuseeland) und bis ca.  $40^{\circ}$  Süd im Osten (d. h. vor Südamerika). Umgeben wird die Antarktisplatte von einem kleinen Teil der südamerikanischen Platte (in Richtung  $15^{\circ}$  West), von der afrikanischen Platte (in Richtung  $10^{\circ}$  West bis  $70^{\circ}$  Ost), von der indisch-australischen Platte (in Richtung  $70^{\circ}$  bis  $150^{\circ}$  Ost), von der pazifischen Platte (in Richtung  $150^{\circ}$  Ost bis  $120^{\circ}$  West), von der Nazca-Platte (in Richtung  $90^{\circ}$  West) und von mehreren kleinen Platten im Halbinselbereich und östlich davon, d. h. zwischen  $75^{\circ}$  und  $25^{\circ}$  West.

Fast alle diese umgebenden Platten bewegen sich von der Antarktis weg (*Abb. 1, 16*), es sind Bewegungen, die die Fortsetzung des Gondwanazerfalls darstellen. Die südamerikanische, die afrikanische und der indische Teil der indisch-australischen Platte bewegen sich seit etwa 120 Millionen Jahren von der Antarktis etwa in Richtung Norden, die pazifische Platte seit rund 100 Millionen Jahren und der australische Teil der indisch-australischen Platte seit etwa 60 Millionen Jahren.

Die vor 120, 100 bzw. 60 Millionen Jahren herausgebildeten neuen Plattengrenzen schneiden alle älteren Antarktisstrukturen und deren Fortsetzung in den Nachbarkontinenten ab. Dies war einer der Hauptansatzpunkte für die Rekonstruktion Gondwanas und z. T. sogar Rodinias in den Kapiteln zuvor. Die verbindenden Elemente zwischen der Antarktis und ihren Nachbarkontinenten wurden mit

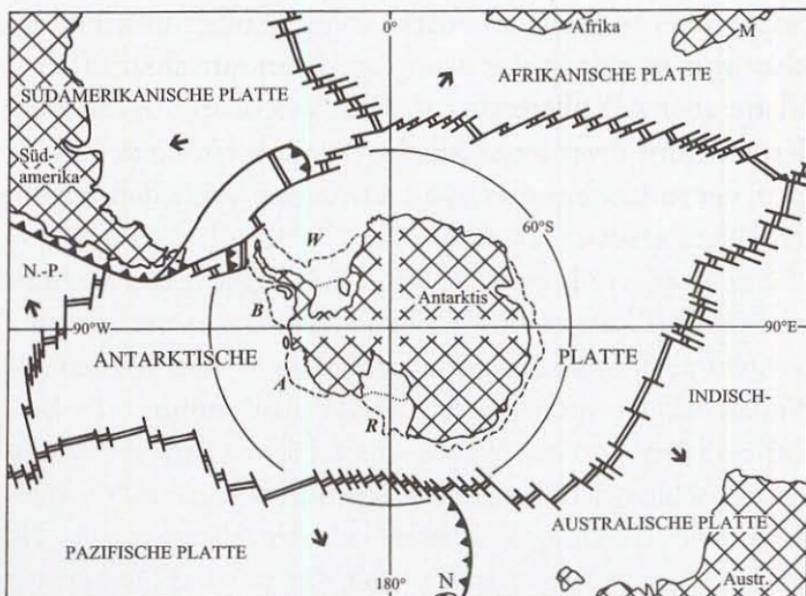


Abb. 16. Die Antarktis-Platte und ihr Umfeld. Pfeile = Plattenbewegung aus der Sicht der Antarktis; aktive Plattengrenzen: Doppellinie = divergierend (»mittelozeanische« Rücken), gezähnte Linie = Subduktionszone, einfache Linie = Transform-Störung; gerissene Linie = Umgrenzung des antarktischen Schelfs. N.-P. = Nazca-Platte, A = Amundsen-Meer, B = Bellingshausen-Meer, R = Ross-Meer, W = Weddell-Meer, M = Madagaskar, N = Neuseeland.

dem Beginn dieser Bewegungen gekappt, die Antarktis hat sich seither geotektonisch und darüber hinaus ganz allgemein weitgehend unabhängig und isoliert entwickelt.

Die späteren Stadien dieser Plattenbewegungen und der zugehörigen Plattengrenzen sind in Mustern der ozeanischen Kruste um die Antarktis eingeprägt: zum einen Muster der magnetischen Anomalien, zum andern Schweremuster (Abb. 17). In den Magnetikmustern spiegelt sich der Wechsel in der Polarität des irdischen Magnetfeldes wider, symmetrisch um die heute aktiven Dehnungsrücken

angeordnet und jeweils älteren Plattenrändern folgend. In den Schweremustern, auch Flow-Lines genannt, erkennt man dagegen die Richtungen, in die sich die heutigen Nachbarcontinente von der Antarktis entfernten. Beide Muster sind allerdings bis jetzt erst in wenigen Bereichen um die Antarktis erfaßt, z. B. *Abb. 17*.

Zwischen 75° und 25° West, d. h. in Richtung Südspitze Südamerikas, ist die Nachbarschaft der Antarktisplatte besonders kompliziert. Hier schalten sich zwischen die Südamerika- und die Antarktisplatte mindestens drei Mini-Platten ein: von West nach Ost die Drake-, die Scotia- und die Sandwichplatte (*Abb. 18*). Sie bewegen sich keineswegs wie alle anderen Platten von der Antarktis weg. In Kapitel C wurde bereits erwähnt, daß sich die Drakeplatte vielmehr unter die Antarktisplatte schiebt und daher unmittelbar nördlich der Spitze der Antarktischen Halbinsel die einzige aktive Subduktionszone am Antarktisrand darstellt. Verbunden damit ist die Öffnung eines Randbeckens (»Back-Arc-Basin«) zwischen den westlichen Südshetlandinseln und der Antarktischen Halbinsel, die Öffnung der Bransfieldstraße. Diese aktive Plattenbewegung am Antarktisrand vollzieht sich zur Zeit mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 1 cm pro Jahr. Östlich davon schrammt die Scotiaplatte am Rand der antarktischen Platte entlang, hier repräsentiert durch den Nordwestteil des Weddell-Meeres, und zwar in Richtung Westen. Zugleich entfernt sich von der Scotiaplatte die kleine Sandwichplatte mit etwa derselben Geschwindigkeit in Richtung Osten unter Ausbildung eines kurzen Nord-Süd gerichteten ozeanischen Rückens. Zum Ausgleich dafür wird der Südteil der südamerikanischen Platte (topographisch ein Teil des Südatlantiks) an der Subduktionsszone

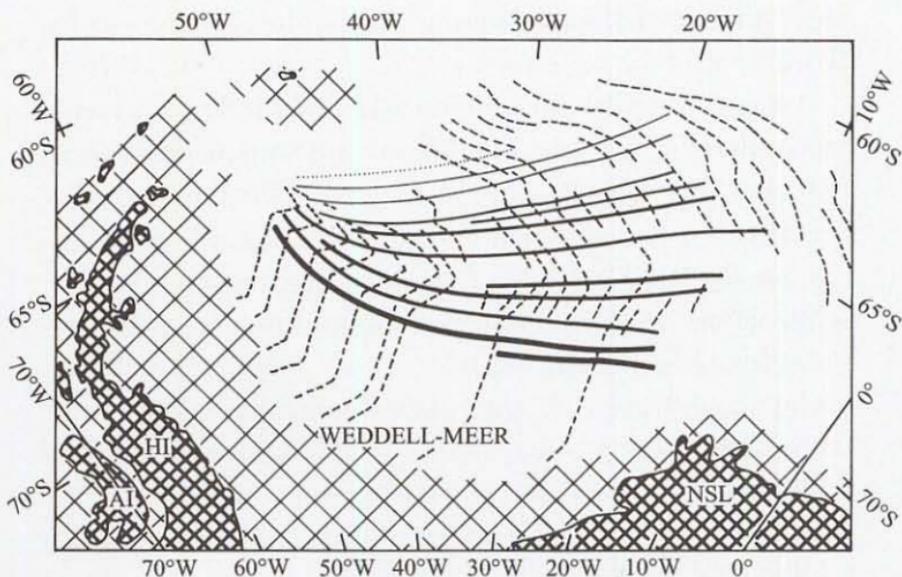


Abb. 17. Muster von Magnetik- und Schwere-Anomalien in der ozeanischen Kruste um die Antarktis, Beispiel Weddell-Meer (Südende des Atlantiks). Enge Kreuzschraffur: antarktischer Kontinent, weite Kreuzschraffur: antarktischer Schelf (ebenfalls aus kontinentaler Kruste), unterschiedlich starke Linien: Achsen magnetischer Anomalien, gerissene Linien: Achsen von Schwere-Anomalien.

Die magnetischen Anomalien zeichnen frühere mittelozeanische Rücken nach und verlaufen parallel zum Spreizungsprozeß des Weddell-Meeres. Die älteren sind breiter dargestellt, die jüngeren fein, d. h. die älteren (mit bis 162 Millionen Jahren) liegen im Süden, die jüngeren im Norden (mit 35 Millionen Jahren). Die Schwere-Anomalien werden als Fließlinien (»Flow-Lines«) aufgefaßt und entsprechen der Öffnungsrichtung des wachsenden Ozeans; sie laufen parallel zu (ehemaligen) Transformstörungen (s. S. 12); an ihnen erkennt man, in welche Richtung sich die heutigen Nachbarkontinente - im Beispiel Südamerika - von der Antarktis entfernten.

AI = Alexander Island, HI = Antarktische Halbinsel, NSL = Neuschwabenland (westliches Dronning Maud Land); nach einer Vielzahl zumeist jüngerer Quellen (1996, 1997, 1999).

des Südsandwichgrabens unter die Sandwichplatte subduziert.

Diese komplizierte plattentektonische Situation zwischen der Antarktischen Halbinsel und Südamerika bedeutet, daß die Antarktische Halbinsel, d. h. die Antarktis-Anden, einen Analogfall der südamerikanischen Anden bilden. Das ergibt sich aus folgenden Merkmalen:

- die etwa ostwärts gerichtete Subduktion von Ozeanboden des südlichen Pazifiks,
- der zugehörige, z. T. noch aktive Vulkanismus,
- der zugehörigen, etwas älteren Granit-Magmatismus und
- die damit verknüpfte Kupfervererzung.

Jedoch sind die Antarktis-Anden im *heutigen* Plattengefüge keineswegs die direkte Fortsetzung der südamerikanischen Anden, wie man gelegentlich lesen kann.

## *2. Bezug der »jungen« innerantarktischen Bruchstrukturen zur gegenwärtigen plattentektonischen Situation um die Antarktis*

In Kapitel C (s. *Ausschlagtafel*) wurden vier größere innerantarktische Bruchstrukturen beschrieben, der *Lambertgraben* in der Ostantarktis, der *Jutul-Penck-Graben* in Dronning Maud Land, das *Rennickgraben*-Störungssystem in Victoria-/Oatesland und der *Ross-Meer-Graben*. Es soll kurz diskutiert werden, ob und wieweit diese Strukturen rezent-plattentektonisch von überregionaler Bedeutung sind und insofern eine Wirkung über die antarktische Platte hinaus haben.

Beim altpaläozoisch angelegten, aber seit der Kreidezeit passiven *Lambert-Grabensystem* wurde ein Bezug

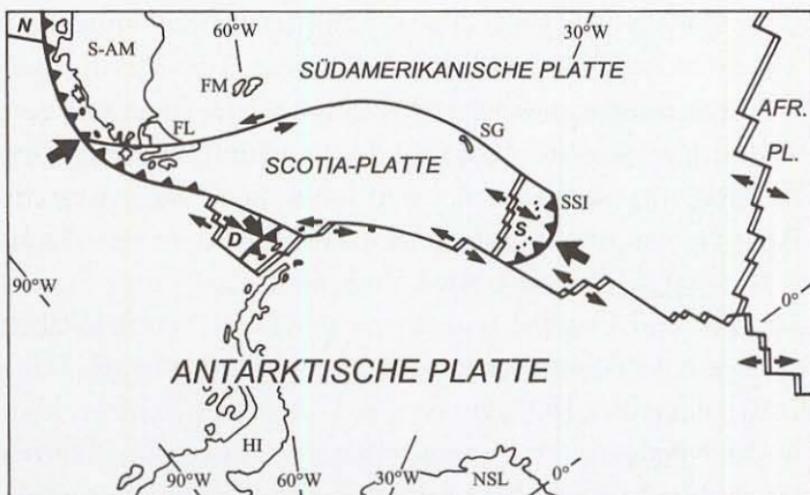


Abb. 18. Die Nachbarschaft der Antarktische Platte in Richtung Südspitze Südamerikas. Zwischen die Südamerika- und die Antarktische Platte schieben sich mindestens drei Mikroplatten (kursive Schrift): die Drake- (= D), die Scotia- und die Sandwichplatte (= S). (Weitere Platten: N = Nazcaplatte, AFR.PL. = afrikanische Platte). Plattengrenzen: Doppellinie = divergente Grenze/Spreizungszone, gezähnte Linie = Subduktionszone, einfache Linie = Transformstörung; Pfeile = relative Plattenbewegungen, dicke Pfeile = Subduktionsrichtungen. FL = Feuerland, FM = Falklandinseln/Malwinen, HI = Antarktische Halbinsel, NSL = Neuschwabenland (westliches Dronning-Maud-Land), S-AM = Südamerika, SG = Südgeorgien, SSI = Südsandwichinseln. (Im wesentlichen nach Tectonic map of the Scotia arc, 1985).

zum indischen Mahanadi-Grabensystem konstatiert. Wegen seiner Frühanlage konnte es zur Gondwana-Rekonstruktion benutzt werden. Der Lambertgraben ist, wie das Mahanadi-System, geologisch tot; rezente oder subrezente tektonische Aktivität sind hier wie dort unbekannt. Irgend eine Beziehung des antarktischen Lambert-Grabensystems zum *heutigen* plattentektonischen Bild der Erde ist daher nicht bekannt und auch nicht zu erwarten.

Ähnlich wie im Fall des Lambertgrabens wurde die Tauglichkeit des *Jutul-Penck-Grabens* für Gondwana-Rekonstruktionen diskutiert. Denn auch er ist alt angelegt und findet jenseits heutiger Antarktisumgrenzung seine Fortsetzung, nämlich im ostafrikanischen Grabensystem. Aber es besteht ein Unterschied zwischen dem Paar Lambert- und Mahanadigraben und dem Paar Jutul-Penck-Graben und Ostafrika. Zwar ist der Jutul-Penck-Graben *nach jetziger Kenntnis* ebenfalls tektonisch inaktiv (Reading 2001), das ostafrikanische Grabensystem jedoch nicht. Hier findet Rifting mit Spreizungsraten von mehreren Millimetern bis zu 1 cm pro Jahr statt (z. B. Ring und Betzler 1993), und hier sind auch zahlreiche Vulkane aktiv. Deshalb ist es nicht ausgeschlossen, daß sich die tektonische Aktivität im Grabensystem Ostafrika und Jutulstraumen/Penckmulde irgendwie im rezenten plattentektonischen Bilde äußert, z. B. durch Störung oder Unregelmäßigkeiten der Magnetik- oder Schweremuster zwischen Dronning Maud Land und Südostafrika. Bis jetzt bekannte Daten widersprechen dem jedenfalls nicht.

Der *Rennickgraben* und die parallel verlaufenden Störungszonen haben weitgehend den Charakter von rechtssinnigen Blattverschiebungen. Dieses Blattverschiebungssystem ist zwar älter angelegt als der Ross-Meer-Graben (es wird davon abgeschnitten), zeigt aber dennoch weiterhin eine gewisse Aktivität, belegt durch die oben genannte Erdbebentätigkeit. Daher ist für das System Rennickgraben und Parallelelemente ein über die Antarktisumgrenzung hinausreichender Außenbezug denkbar. Und in der Tat: die rezenten plattentektonischen Detaildarstellungen im ozeanischen Raum zwischen der Antarktis und Australien zeigen, daß der mittelozeanische Spreizungs-

rücken zwischen beiden Kontinenten mehrfach an Transformstörungen gegen Südosten versetzt ist und daß diese Störungen in das Rennicksystem hineinlaufen können (Abb.19). Dieses Blattverschiebungssystem läßt sich daher womöglich als Fortsetzung der Transformstörungen im ozeanischen Bereich zwischen der Antarktis und Australien auffassen. Trotzdem ist der Zusammenhang nicht von vornherein völlig klar. Denn der Bewegungssinn in den *aktiven* Abschnitten der Transformstörungen zwischen Südostaustralien und Victoria-, Oates- und George-V.-Land in der Antarktis ist linkssinnig. Der Versetzungssinn im Rennicksystem weitgehend rechtssinnig. Eine Übereinstimmung wird erst dann deutlich, wenn man die Transformstörungen-Abschnitte direkt vor der Antarktis betrachtet: an ihnen ist der Schelfrand tatsächlich rechtssinnig versetzt (Abb. 19). Diesem Sachverhalt wird derzeit intensiver nachgegangen.

Der *Ross-Meer-Graben* ist aktiv, denn an seiner Ostflanke sitzen zwei der drei aktiven Vulkane in der Antarktis. Ein Bezug zum rezenten plattentektonischen Geschehen über die Grenzen der Antarktis hinaus könnte daher zwar gegeben sein, ist jedoch nicht bekannt und scheint auch nicht zu existieren. Es handelt sich beim Ross-Meer-Graben vielmehr um eine rein »innerantarktische Angelegenheit«. Allerdings muß diese wegen der Dimension des Ross-Meer-Grabens von größerer Bedeutung sein. Es dürfte sich hier um den Beginn eines großen Gesamt-Antarktis-Riftings handeln, den Beginn der plattentektonischen Aufspaltung der Antarktisplatte in *zwei* künftige Platten. Man hat begonnen, Meß-Stationen zu errichten, um diesen Vorgang mit Hilfe von Satellitengeodäsie quantitativ zu erfassen.

## *G. Allgemeine Schlußfolgerung*

Die Abschnitte D, E, F haben dokumentiert, daß die Antarktis für die Erforschung der Architektur der Erde und ihrer Geschichte nicht nur wesentlich, sondern notwendig ist. Das hat mehrere Gründe:

- Die Antarktis liegt innerhalb des ersten bekannten Superkontinents Rodinia von vor 1000 bis 700 Millionen Jahren an ausschlaggebender Position.
- Sie bildete im zweiten Superkontinent Gondwana zwischen ca. 500 und 200 Millionen Jahren dessen Mitte.
- Die antarktische Platte bildet im heutigen plattentektonischen Puzzle der Erdkruste nach der pazifischen, afrikanischen und eurasischen die viertgrößte Platte.
- Vor allem aber weist ihr der innere Aufbau (Kap. C) diese unverzichtbare Rolle bei der Rekonstruktion des sich stets wandelnden Plattenmusters der Erdkruste zu. Eine Rekonstruktion der Großkontinente Rodinia und Gondwana, ihrer Bildungs- und Zerfallsprozesse ist ohne die Antarktis und ohne die Kenntnis vom Aufbau und der Entwicklungsgeschichte dieses Aufbaus der Antarktis nicht möglich.

## *H. Offene Probleme, Forschungsbedarf und künftige Forschungsziele*

In den Kapiteln zuvor wurde eine – manchmal vielleicht verwirrende – Fülle geologischen Wissens über die Antarktis und daraus folgender Erkenntnisse über Zusammenhänge von Superkontinenten, ihrer Geschichte und sich dabei

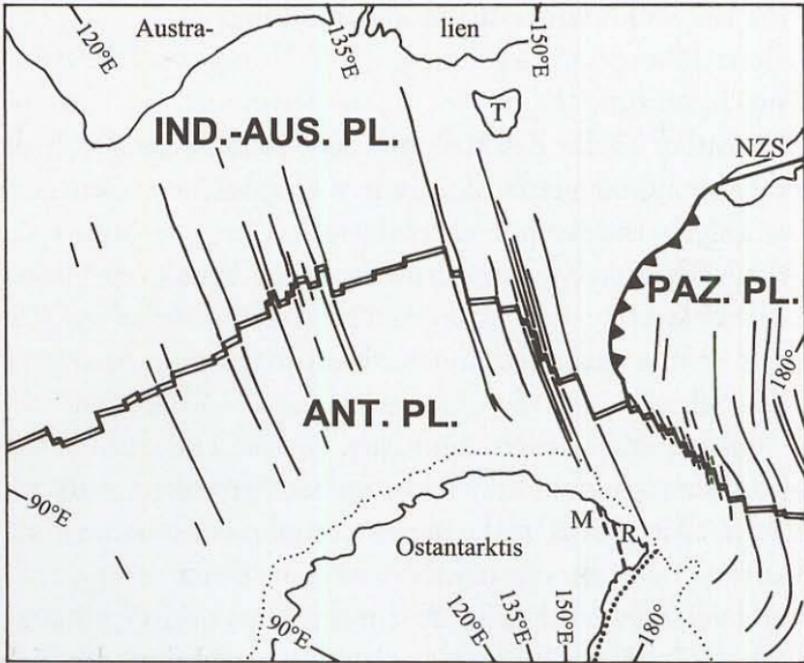


Abb. 19. Plattentektonisches Störungsmuster zwischen Australien und der Antarktis. Die Transformstörungen könnten in das Rennickgraben-Störungssystem hineinlaufen. Feine Punktierung: Schelfbereich um die Antarktis (aus kontinentaler Kruste), Doppellinien: mittelozeanische Spreizungsrücken, gezähnte Linie: Subduktionszone, einfache Linien: Transformstörungen, dick dargestellt: aktiver Anteil, gerissene Linien: mögliche Fortsetzungen der Transformstörungen in der Antarktis: R = Rennickgraben, M = Parallelstruktur des Matusевичgletschers, dicke Punktierung: Westschulter des Ross-Meer-Grabens. Sonstige Abkürzungen: ANT. PL = antarktische Platte, IND.-AUS. PL. = indische-australische Platte, PAZ. PL. = pazifische Platte, N.Z.S. = Neuseeland Südinsel, T = Tasmanien. Im wesentlichen nach Cande et al. (2000), ergänzt.

abspielender Prozesse vorgestellt. Dennoch mußte dabei wegen der großen Kenntnis- und Verständnislücken vieles offen und ungeklärt bleiben. Offene Fragen und Probleme der Antarktisgeologie sind vor allem:

- die Entwicklung vor der Rodiniabildung,
- Präzisierung und Ergänzung der Bildungs- und Zerfallsprodukte von Rodinia,
- Verlauf der Naht des Moçambique-Ozeans,
- die Analyse des ostantarktischen Kratons, vor allem der sich darin andeutenden Mobilzonen (Orogene, Suturen),
- das Verhältnis von Ross- zu Gondwaniden-Orogen und
- die Erfassung des geologischen Baus unter dem Eis mit Hilfe der Geophysik (Aeromagnetik, Schwere, Seismik).

Offen ist vor allem die Frage, wie die Erde, ihr architektonisches Bild und die tektonischen Prozesse *vor* Rodinia aussahen. Zur Klärung dieses Komplexes kann und muß natürlich auch die Antarktis beitragen. Bevor aber überhaupt versucht wird, den Bau der Antarktis in ein »prärodinisches Weltbild« einzupassen, müssen in der Antarktis (und auch darüber hinaus) viel mehr altproterozoische und archaische Daten in den Kratonbereichen ermittelt werden, als in Kapitel D angedeutet. Und vor allem müssen die jeweils zugehörigen Strukturen und Gesteins(um)bildungen erfaßt werden.

Der Bildungsprozeß Rodinias, d. h. das grenvillische Geschehen vor etwa 1 Milliarde Jahren, muß gerade in der Antarktis viel genauer bestimmt werden. Über den einigermaßen bekannten Raum in Dronning Maud Land hinaus sollten dazu der oder die grenvillischen Orogenzüge gegenüber Australien zwischen 90° und 120° Ost und gegenüber Indien zwischen 20° und 90° Ost überhaupt erst einmal einigermaßen korrekt und plausibel belegt und dargestellt werden. Das gleiche gilt für den Raum westlich von Dronning-Maud-Land zwischen 15° und 35° West, wo ganz konkret eine Struktur-, Alters- und Metamorphoseanalyse der

derzeit unzugänglichen Moltke-Nunatakker in Coats-Land erforderlich ist.

Selbst das bereits in Lehrbücher eingegangene, nur scheinbar gefestigte Rodinia-Bild etwa der *Abbildungen 5* und *9* mit der innigen Nachbarschaft der Antarktis und Nordamerikas kann keineswegs als gesichertes Wissen gelten. Dies zeigt ein neuer, zunächst kühn anmutender Rekonstruktionsvorschlag (*Abb. 20*; Karlstrom et al. 1999). Er ist jedoch im Einklang mit einer Vielzahl von Befunden wie Großstrukturen der grenvillischen Orogenese, Paläomagnetik und dem für die Antarktis fehlenden Beleg einer Vereisung vor ca. 750 Millionen Jahren. Zur Untermauerung des einen oder anderen Rodinia-Bildes sind weitere Daten erforderlich, auch und gerade aus der Antarktis.

Mehr noch als an Zeugnissen der Rodinia-Bildung mangelt es in der Antarktis an Zeugnissen des Rodinia-Zerfalls: Die Fortsetzung der ostaustralischen Tasman-Linie (s. S. 43) in die Antarktis hinein ist nicht bekannt, obwohl sie irgendwo zwischen Victoria- und Wilkesland zu erwarten wäre. Und sichere Analoga des südaustralischen Gairdner-Dike-Schwarms fehlen bisher ebenfalls. Hier gilt es, vor allem mit geophysikalischen Methoden weiterzusuchen (s. u.).

Ein bereits von deutscher (und japanischer) Seite planend in Angriff genommenes Problem ist der Moçambique-Ozean in der Antarktis im bislang nur sehr unscharf faßbaren Zeitrahmen von zwischen 850 bis 550 Millionen Jahren. Sein genauerer Nachweis, seine Lage, sein Alter ist entscheidend für Rodinia und seinen Zerfall und für Gondwana und seine Bildung. Er sollte sich aus dem Raum Ostafrika/Madagaskar zur Zeit Rodinias und/oder kurz danach in die Antarktis hinein fortgesetzt haben. Dies sollte an kleinen Ozeanresten kenntlich sein, die an der Suture (der

Naht) nach der panafrikanischen Kollision von West- und Ostgondwana in der Antarktis zurückgeblieben sein müßten. Die oben genannten Überbleibsel möglicher moçambique-ozeanischer Kruste in der Shackleton Range und in der Lützow-Holm-Bukta (Kapitel D u. E) sind zu weit voneinander und zu weit vom bekannten Moçambique-Ozean im östlichen Afrika entfernt, um ein klares Bild zu liefern. Bevorstehendes, höffiges Suchgebiet für zugehörige Ozeanreste und Kollisionsnaht ist das östliche Dronning-Maud-Land, das so zum Schlüsselgebiet werden könnte.

Hier schließt sich unmittelbar ein verwirrend-verwickelter Fragenkomplex an: Die genannten Ozeanreste an der Lützow-Holm-Bukta markieren naturgemäß eine Naht zwischen zwei prägondwanischen Teilkontinenten. Unklar ist jedoch, ob es sich bei diesen »Teilkontinenten« um Ost- und Westgondwana oder eher um zwei Teilbereiche Ostgondwanas, etwa das heutige Indien und die heutige Ostantarktis, handelt. In Kapitel D und E haben wir erfahren, daß die heutige Ostseite Indiens und die Ostantarktis sowohl innerhalb Rodinias (von vor etwa 1100 bis etwa 750 Millionen Jahren) als auch innerhalb Gondwanas (von vor etwa 550 bis etwa 120 Millionen Jahren) unmittelbar aneinander grenzten, und zwar bemerkenswerterweise in jeweils fast gleicher gegenseitiger Position. Insbesondere wenn vor zwischen 750 und 550 Millionen Jahren zwischen diesen beiden Teilen ein Ozean gelegen hat – eben der, dessen Reste in der Lützow-Holm-Bukta liegen –, ist es die Frage, ob hier ein und dieselbe Naht zwischen zwei (Teil-)Kontinenten bei gleicher Geometrie mehrfach aufplatzte, sich zum Ozean verbreiterte und wieder schloß. Könnte das reiner Zufall sein? Bekannt sind solche Prozesse von der

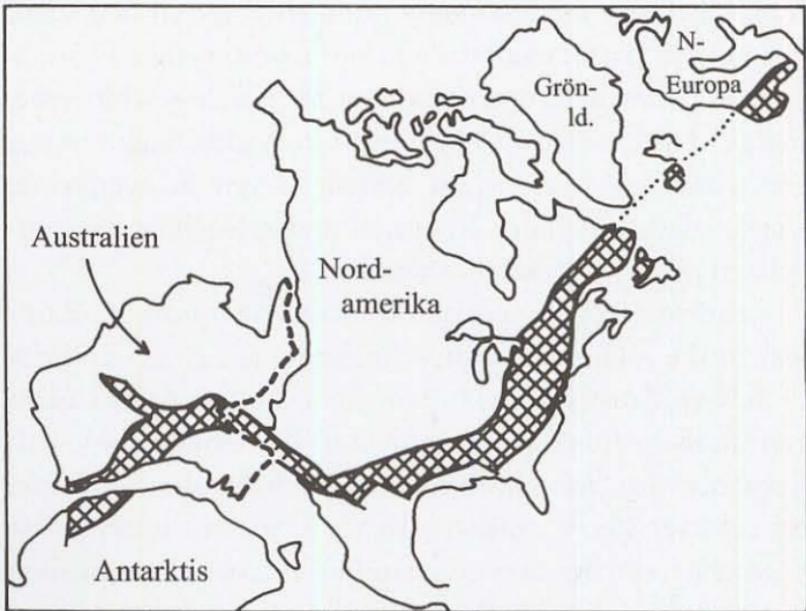


Abb. 20. Alternativer Vorschlag für eine Rodinia-Rekonstruktion im Bereich Antarktis-Australien-Nordamerika nach Karlstrom et al. (1999). Kreuzschraffur: grenvillische Orogene; gerissene Linie in Ostaustralien: »Tasman-Line« (s. S. 43).

Beziehung anderer Kontinentalblöcke, etwa im Verhältnis Südamerikas zum südlichen Afrika, wo vor 550 Millionen Jahren ein Vorgänger des Atlantiks verschwand, sich dann die Fortsetzung des Ross-Orogens auftürmte und seit 130 Millionen Jahren der Atlantik öffnete. Schwachstellen der Erdkruste werden mehrfach benutzt. Für das Verhältnis Indien/Antarktis ist eine solche Vorstellung noch zu früh, die Datenbasis zu schwach. Hier sind von der relativ unzureichend erforschten und naturgemäß auch schwer erforschbaren Ostantarktis künftige Antworten zu erhoffen und zu erwarten. Ein erster Schritt ist die Andeutung von panafrikanischer Orogenese im Lambertgletschergebiet (s.

Kap. C). Diese Andeutungen könnten zugleich bedeuten, daß sich der ostantarktische Kraton vielleicht eines Tages als Fiktion herausstellt und daß dieser angeblich geschlossene, riesige »Urkontinent« Ostantarktis in Wirklichkeit nur aus vielen kleinen Kratönchen besteht, deren Schweißnähte wegen unzureichender Kenntnis und schlechter Zugänglichkeit gerade erst sichtbar werden.

Ein weiteres ungelöstes Problem im Gondwana-Kontext ist die mehrfache Überschneidung des Ross- und des Gondwaniden-Orogens (s. *Abb. 15*). Das ist derzeit nicht verständlich, zumal *ein* Teilabschnitt der Gondwaniden als Ergebnis von Subduktion mit anschließender Kollision, ein anderer als »intrakratonisches Orogen« interpretiert wird. Für ein besseres Verständnis dieses inkonsistenten Gesamtbilds fehlen auch hier bestimmte unter Eis verborgene Fakten aus der Antarktis, vor allem die Fortsetzung des Ross-Orogens vom Transantarktischen Gebirge über die Pensacola Mountains in Richtung 50° West, d. h. in Richtung Südafrika zum dortigen »Ross-Orogen«, Saldania-Belt genannt.

Lösbar ist auch dieses Problem nur mit Hilfe geophysikalischer Untersuchungsmethoden und geophysikalischer Daten. Denn die großen, durch Eisbedeckung zwangsläufig vorhandenen Wissenslücken sind nur durch Messungen der Anomalien von Magnet- und Schwerfeld überbrückbar. Das Schwere- und Magnetikmuster der Antarktis ist bis jetzt sehr unvollständig bekannt. Ein hinreichend dichtes Netz mit Meßlinien der magnetischen Anomalie wurde bis jetzt lediglich im Ross-Meer-Sektor einschließlich Victoria- und Oatesland und im Atlantiksektor im Weddell-Meer, seiner Umrahmung, der Shackleton Range und Neuschwabenland geflogen.

Fast noch wertvollere Informationen wären von der Seismik zu erwarten: Sie kann durch Messung von Laufzeiten künstlich erzeugter Erdbebenwellen und deren Reflexion und Refraktion an geologisch-physikalischen Unstetigkeitsflächen die Struktur der Lithosphäre recht genau ermitteln. Doch derartige seismische Daten sind in der Antarktis ganz allgemein noch extrem rar, existieren einigermaßen flächendeckend nur für das Ross-Meer und seinen Westrahmen, für den nördlichen Halbinselbereich und für das Umfeld des subglazialen Wostok-Sees. Der Grund für diese unvollständige Datenakquisition liegt in einem vermeintlichen Interessenskonflikt mit dem Antarktis-Naturschutz. Denn für seismische Untersuchungen muß man Schallwellen erzeugen, d. h. sie sind mit Krach verbunden. An Land fungieren Großvibratoren oder Sprengungen als Schallquellen. Großvibratoren sind an Spezialfahrzeuge gebunden, die sich in der Antarktis nicht einsetzen lassen. D. h. man müßte dort Sprengstoff einsetzen und tatsächlich Krach machen. Daß dies in der belebten Küstennähe mit Rücksicht auf die Lebewelt vermieden werden sollte, ist verständlich. Neue Technologien sind gefragt. Die Forderung, das Sprengen auch im Innern des Kontinents zu unterlassen, wo gar kein Leben existiert, wäre jedoch Ignoranz. Hier steht gelegentlich die Vorstellung von »unberührter Natur« im Naturschutzgebiet Antarktis dem Bedürfnis und dem Auftrag der Forschung gegenüber. Schließlich ist es die Aufgabe der Wissenschaft, Wissen zu schaffen und zu vervollständigen, und die Aufgabe der Geowissenschaft, Geo-Wissen auch über die Antarktis zu vervollständigen und damit Wissen und Verständnis über globale Zusammenhänge zu ermöglichen. Dies ist auch eine Zielsetzung der vorgelegten Schrift.

## Literatur

- S. S. Abyzov, N. I. Barkov, S. A. Bulat, G. E. Grikurov, B. B. Kudriashov, G. A. Kudryavtsev, G. L. Leitchenkov, V. Y. Lipenkov, V. V. Lukin, V. N. Masolov, A. M. Popkov, S. V. Popov and A. N. Sheremetyev: *Plan for Russian subglacial Lake Vostok investigation*. St. Petersburg, Moskau 2000. 44 S. Vorgelegt bei »SCAR 2000« (Tokyo).
- L. B. Black, J. W. Sheraton and P. D. Kinny: *Archaean events in Antarctica*, in: Y. Yoshida, K. Kaminuma and K. Shiraishi (Ed.): *Recent progress in Antarctic earth science*. Tokio 1992, S. 1-6.
- S. C. Cande, J. M. Stock, R. D. Müller and T. Ishihara: *Cenozoic motion between East and West Antarctica*, in: *Nature* 404 (2000), S. 145-150.
- K. C. Condie: *Plate tectonics and crustal evolution*. Oxford 1997.
- I. W. D. Dalziel: *Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugated rift pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent*, in: *Geology* 19 (1991), S. 598-601.
- I. W. D. Dalziel, S. Mosher and L. M. Gahagan: *Laurentia-Kalahari collision and the assembly of Rodinia*, in: *J. Geol.* 108 (2000), S. 499-513.
- R. Dietrich and G. Gendt: *Investigation of tectonic deformations using global satellite laser ranging data*, in: *Gerlands Beitr. Geophysik* 95 (1986), S. 453-458.
- C. B. Dissanayake and R. Chandrajith: *Sri Lanka-Madagascar Gondwana linkage: Evidence for a Pan-African mineral belt*, in: *J. Geol.* 107 (1999), S. 223-235.
- J. F. Drexel, W. V. Preiss and A. J. Parker: *The geology of South Australia. Volume 1: The Precambrian*, in: *Geol. Surv. South Australia Bull.* 54 (1993).
- C. M. Fanning, D. H. Moore, V. C. Bennett and J. S. Daly: *The Mawson Continent: Archean to Proterozoic crust in the East Antarctic Shield and Gawler Craton, Australia. A cornerstone in Rodinia and Gondwanaland*, in: 14. Australian geol. Conv., Geol. Soc. Australia 41 (1996), S. 135.
- C. M. Fanning, D. H. Moore, V. C. Bennett, J. S. Daly, R. P. Ménot, J. J. Peucat and R. L. Oliver: *The Mawson Continent: The East Antarctic Shield and Gawler Craton, Australia*, in: 8th internat. Sympos. Antarctic Earth Sci. July 1999 Wellington, Progr. and Abstr., S. 103.
- W. Filchner: *Zum sechsten Erdteil*. Berlin 1922.
- I. C. W. Fitzsimons: *A review of tectonic events in the East Antarctic Shield and their implications for Gondwana and earlier supercontinents*, in: *J. Afric. Earth Sci.* 31 (2000), S. 3-23.

T. Flöttmann, G. M. Gibson and G. Kleinschmidt: *Structural continuity of the Ross and Delmerian orogens of Antarctica and Australia along the margin of the paleo-Pacific*, in: *Geology* 21 (1993), S. 319-322.

W. Frisch und J. Loeschke: *Plattentektonik*. Darmstadt 1993.

M. Funaki, M. Yoshida and H. Matsueda: *Palaeomagnetic studies of Palaeozoic rocks from the Ellsworth Mountains*, in: M.R.A. Thomson, J. A. Crame and J. W. Thomson (Eds.): *Geological evolution of Antarctica*. Cambridge 1991, S. 257-260.

J. W. Goodge: *From Rodinia to Gondwana: Supercontinent evolution in the Transantarctic Mountains*, in: 8th Internat. Sympos. Antarctic Earth Sci. July 1999 Wellington, Progr. and Abstr., S. 5-6.

W. A. Gose, M. A. Helper, J. N. Connelly, F. E. Hutson and I. W. D. Dalziel: *Paleomagnetic data and U-Pb isotopic age determinations from Coats Land, Antarctica: Implications for late Proterozoic plate reconstructions*, in: *J. geophys. Res.* 102 (1997), S. 7887-7902.

W. v. Gosen, W. Buggisch and L. V. Dimieri: *Structural and metamorphic evolution of the Sierras Australes (Buenos Aires Province/Argentina)*, in: *Geol Rdsch.* 79 (1990), S. 797-821.

G. H. Grantham and D. R. Hunter: *The timing and nature of faulting and jointing adjacent to the Pencksökket, western Dronning Maud Land, Antarctica*, in: M. R. A. Thomson, J. A. Crame and J. W. Thomson (Eds.): *Geological evolution of Antarctica*. Cambridge 1991, S. 47-51.

P. B. Groenwald, G. H. Grantham and M. K. Watkeys: *Geological evidence for a Proterozoic to Mesozoic link between southeastern Africa and Dronning Maud Land, Antarctica*, in: *J. geol. Soc. London* 148 (1991), S. 1115-1123.

A. Grunow, R. Hanson and T. Wilson: *Were aspects of Pan-African deformation linked to Iapetus opening?* in: *Geology* 24 (1996), S. 1063-1066.

P. F. Hoffmann: *Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out?* in: *Geology* 19 (1991), S. 1409-1412.

J. Hofmann: *Fragmente intragondwanischer Riffe als Werkzeug der Gondwana-Rekonstruktion – das Beispiel des Lambert-Mahanadi-Riftes (Ostantarktika – Peninsular Indien)*, in: *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 199 (1996), S. 33-48.

J. Jacobs and F. Lisker: *Post Permian tectono-thermal evolution of western Dronning Maud Land, East Antarctica: an apatite fission-track approach*, in: *Antarctic Sci.* 11 (1999), S. 451-460.

J. Jacobs, W. Bauer, G. Spaeth, R. J. Thomas and K. Weber: *Lithology and structure of the Grenville-aged (~1.1 Ga) basement of Heimefrontfjella (East Antarctica)*, in: *Geol. Rdsch.* 85 (1996), S. 800-821.

- J. Jacobs, C. M. Fanning, F. Henjes-Kunst, M. Olesch and H.-J. Paech: *Continuation of the Mozambique Belt into East Antarctica: Grenville-age metamorphism and polyphase Pan-African high-grade events in central Dronning Maud Land*, in: *J. Geol.* 106 (1998), S. 385-406.
- K. A. Karlstrom, S. S. Harlan, M. L. Williams, J. McLelland, J. W. Geissmann, K.-I. Åhäll: *Refining Rodinia: Geologic evidence for the Australia-western U.S. connection in the Proterozoic*, in: *GSA today* 9 (10), S. 1-7.
- G. Kleinschmidt and F. Talarico: *The Mertz Shear Zone*, in: *Terra Antarctica Rep.* 5 (2001), S. 109-115.
- A. Kröner: *Pan African crustal evolution*, in: *Episodes* 1980, S. 3-8.
- A. Kröner: *Fold belts and plate tectonics in the Precambrian*, in: *Proc. 27th Internat. Geol. Congr.* 5 (1984), S. 247-280.
- A. Kröner: *African linkage of Precambrian Sri Lanka*, in: *Geol. Rdsch.* 80 (1991), S. 429-440.
- A. Kröner, M. O. McWilliams, G. J. B. Gerns, A. B. Reid and K. E. L. Schalk: *Paleomagnetism of late Precambrian to early Paleozoic mixtite-bearing formations in Namibia (South West Africa): The Nama Group and Blaubeker Formation*, in: *Amer. J. Sci.* 280 (1980), S. 942-968.
- Z.-X. Li, L. Zhang and C. McA. Powell: *South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia?* in: *Geology* 23 (1995), S. 407-410.
- Z.-X. Li, L. Zhang and C. McA. Powell: *Positions of the East Asean cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia*, in: *Austral. J. Earth Sci.* 43 (1996), S. 593-604.
- M. A. S. McMenamin and D. L. Schulte McMenamin: *The emergence of animals. The Cambrian breakthrough*. New York 1990.
- M. O. McWilliams: *Palaeomagnetism and Precambrian tectonic evolution of Gondwana*, in: A. Kröner (Ed.): *Precambrian plate tectonics*. *Devel. Precambrian Geol.* 4 (1981), S. 649-687.
- E. M. Moores: *Southwest U.S.-East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis*, in: *Geology* 19 (1991), S. 425-428.
- A. B. Moyes, J. M. Barton and P. B. Groenewald: *Late Proterozoic to Early Palaeozoic tectonism in Dronning Maud Land, Antarctica: supercontinental fragmentation and amalgamation*, in: *J. geol. Soc. London* 150 (1993), S. 833-842.
- R. H. Omarini, R. J. Sureda, H.-J. Götze, A. Seilacher and F. Pflüger: *Puncoviscana folded belt in northwestern Argentina: testimony of Late Proterozoic Rodinia fragmentation and pre-Gondwana collisional episodes*, in: *Internat. J. Earth Sci./Geol.Rdsch.* 88 (1999), S. 76-97.

- J. K. Park, K. L. Buchan and S. S. Harlan: *A proposed giant radiating dyke swarm fragmented by the separation of Laurentia and Australia based on paleomagnetism of ca. 780 Ma mafic intrusions in western North America*, in: Earth planet. Sci. Lett. 132 (1995), S. 129-139.
- J. J. Peucat, R. P. Ménot, O. Monnier and C. M. Fanning: *The Terre Adélie basement in the East Antarctic Shield: geological and isotopic evidence for a major 1.7 thermal event; comparison with the Gawler Craton in South Australia*, in: Precambrian Res. 94 (1999), S. 205-224.
- V. K. Raina, V. Divakara Rao, S. Mukerji, A. S. Gill and K. Dotiwala: *Geology of Nunataks – Littlewood, Bertrab and Moltke in Weddell Sea area, West Antarctica*, in: Sci. Rep. Indian Exped. Weddell Sea, techn. Rep. No. 7, New Delhi (Dept. Ocean Devel. ) (1995), S. 25-54.
- M. Raith, P. Raase, D. Ackermann and R. K. Lal: *The Archean craton of southern India: Metamorphic evolution and P-T conditions*, in: Geol. Rdsch. 71 (1982), S. 280-290.
- A. Reading: *Antarctic seismicity and neotectonics*, in: J. Gamble, D. N. B. Skinner, S. Henrys and R. Lynch (Eds.): *Antarctica at the close of a millennium*. Proc. 8th ISAES, Royal Soc. NZ Bull. 35 (2001).
- U. Ring and C. Betzler: *Architecture, tectonics and sedimentology of the Malawi Rift (East Africa)*, in: Z. dt. Geol. Ges. 144 (1993), S. 30-44.
- J. P. le Roux and P. D. Toens: *The Permo-Triassic uranium deposits of Gondwanaland*, in: G. D. McKenzie (Ed.): *Gondwana six: stratigraphy, sedimentology, and paleontology; geophys. Monogr. 41* (1987), S. 139-146.
- R. M. Shackleton: *The final collision zone between East and West Gondwana: where is it?* in: J. African Earth Sci. 23 (1996), S. 271-287.
- K. Shiraishi: *Geology and metamorphism of the Soer Rondane Mountains, East Antarctica*, in: M. R. A. Thomson, J. A. Crame and J. W. Thomson (Eds.): *Geological evolution of Antarctica*. Cambridge 1991, S. 77-82.
- K. Shiraishi, Y. Hirol, D. J. Ellis, C. M. Fanning, Y. Motoyoshi and Y. Nakai: *The first report of a Cambrian orogenic belt in East Antarctica – an ion microprobe study of the Luetzow-Holm Complex*, in: Y. Yoshida et al. (Eds.): *Recent progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo 1992, S. 67-73.
- B. C. Storey, T. Alabaster and R. J. Pankhurst (Eds.): *Magmatism and the causes of continental break-up*, in: Geol. Soc. spec. Publ. 68 (1992).
- B. C. Storey, R. J. Pankhurst and A. C. Johnson: *The Grenville Province within Antarctica: a test of the SWEAT hypothesis*, in: J. Geol. Soc. London 151 (1994), S. 1-4.
- E. Stump: *The Ross Orogen of the Transantarctic Mountains*. Cambridge 1995.
- E. Suess: *Das Antlitz der Erde*, Bd. 1. Wien u. Leipzig 1885.

F. Talarico, G. Kleinschmidt and F. Henjes-Kunst: *An ophiolitic complex in the northern Shackleton Range, Antarctica*, in: Terra Antarctica 6 (1999), S. 293-315.

*Tectonic map of the Scotia arc, 1:3 000 000*, BAS (Misc.) 3, Cambridge (Brit. Antarctic Surv.), 1985.

F. Tessensohn and G. Woerner: *The Ross Sea rift system, Antarctica: structure, evolution and analogues*, in: M. R. A. Thomson, J. A. Crame and J. W. Thomson (Eds.): *Geological Evolution of Antarctica*. Cambridge 1991, S. 273-277.

A. L. du Toit: *Our wandering continents*. Edinburgh 1937.

G. F. Webers, C. Craddock and J. Spletstoesser: *Geology and paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctica*, in: Soc. Geol. Amer. Mem. 107 (1992).

A. Wegener: *Die Entstehung der Kontinente*, in: Dr. A. Petermanns Mitt. 58 (I) (1912), S. 185-195, 253-256, 305-309.

A. Wegener: *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. Braunschweig 1915.

I. S. Williams, W. Compston, K. D. Collerson, P. A. Arriens and J. F. Lovering: *A reassessment of the age of the Windmill Metamorphics, Casay area*, in: R. L. Oliver, P. R. James and J. B. Jago (Eds.): *Antarctic Earth Science*, Canberra (Austral. Acad. Sci.) (1983), S. 73-76.

M. Yoshida, C. Unnikrishnan-Warrier and M. Santosh: *Three major reworking events in the India - Sri Lanka - Antarctic sector of East Gondwana*, in: *Gondwana nine* (Hyderabad, India), Rotterdam (Balkema) (1996), S. 983-988.

G. M. Young: *Are Neoproterozoic glacial deposits preserved on the margins of Laurentia related to the fragmentation of two supercontinents?* in: *Geology* 23 (1995), S. 153-156.

J.-X. Zhao, M. T. McCulloch and R. J. Korsch: *Characterisation of a plume-related ~ 800 Ma magmatic event and its implications for basin formation in central-southern Australia*, in: *Earth planet. Sci. Lett.* 121 (1994), S. 349-367.

## Über den Autor

*Georg Kleinschmidt*, geboren 1938 in Berlin, Studium der Geologie in Tübingen und Würzburg. Diplom und Promotion in Tübingen. Assistent in Hamburg. 1972 Professor für Geologie in Darmstadt, seit 1985 in Frankfurt mit Schwerpunkt »Endogene Dynamik/Strukturgeologie«. Forschung vorwiegend in den Ostalpen und seit 1979 in der Antarktis.



Photo JOCHEN FIEBIG

Teilnahme an zehn Antarktisexpeditionen, zuletzt in die Shackleton Range (1994/95, britisch-deutsch-italienisch-russisches Unternehmen), nach Drowning-Maud-Land (1997/98, südafrikanisches Unternehmen), und nach George-V-Land (1999/2000, deutsch-italienisches Unternehmen). Mitglied mehrerer nationaler und internationaler Gremien, die sich mit Polar- bzw. Antarktisforschung befassen, u. a. Vorsitzender der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung.

*THEMEN – Eine Privatdruck-Reihe  
der Carl Friedrich von Siemens Stiftung*

In der Reihe *Themen* wird eine kleine Auswahl der im Wissenschaftlichen Programm der Carl Friedrich von Siemens Stiftung gehaltenen Vorträge in teilweise überarbeiteter und erweiterter Form veröffentlicht. Die Publikationen können von der Stiftung direkt bezogen werden. Vergriffene Bände sind mit dem Vermerk *vgr* gekennzeichnet.

- 1 Reinhard Raffalt: *Das Problem der Kontaktbildung in der zeitgenössischen Gesellschaft*. 1960. 2. Auflage 1970. 20 S. *vgr*
- 2 Kurd von Bülow: *Über den Ort des Menschen in der Geschichte der Erde*. 1961. 2. Auflage 1970. 32 S. *vgr*
- 3 Albert Maucher: *Über das Gespräch*. 1961. 2. Auflage 1970. 22 S. *vgr*
- 4 Felix Messerschmid: *Das Problem der Planung im Bereich der Bildung*. 1961. 2. Auflage 1970. 34 S.
- 5 Peter Dürrenmatt: *Das Verhältnis der Deutschen zur Wirklichkeit der Politik*. 1963. 2. Auflage 1970. 40 S. *vgr*
- 6 Fumio Hashimoto: *Die Bedeutung des Buddhismus für den modernen Menschen*. 1964. 2. Auflage 1970. 36 S. *vgr*
- 7 Clemens-August Andreae: *Leben wir in einer Überflußgesellschaft?* 1965. 2. Auflage 1970. 28 S. *vgr*
- 8 Rolf R. Bigler: *Möglichkeiten und Grenzen der Psychologischen Rüstung*. 1965. 2. Auflage 1970. 35 S.
- 9 Robert Sauer: *Leistungsfähigkeit von Automaten und Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit*. 1965. 2. Auflage 1970. 32 S. *vgr*
- 10 Hubert Schrade: *Die Wirklichkeit des Bildes*. 1966. 66 S. *vgr*
- 11 Wilhelm Lehmann: *Das Drinnen im Draußen oder Verteidigung der Poesie*. 1968. 24 S. *vgr*
- 12 Richard Lange: *Die Krise des Strafrechts und seiner Wissenschaften*. 1969. 46 S. *vgr*
- 13 Hellmut Diwald: *Ernst Moritz Arndt – Das Entstehen des deutschen Nationalbewußtseins*. 1970. 46 S. *vgr*
- 14 *Zehn Jahre Carl Friedrich von Siemens Stiftung*. 1970. 54 S. *vgr*

- 15 Ferdinand Seibt: *Jan Hus. Das Konstanzer Gericht im Urteil der Geschichte.* 1973. 58 S. vgr
- 16 Heinrich Euler: *Napoleon III. Versuch einer Deutung.* 1973. 82 S. vgr
- 17 Günter Schmölders: *Carl Friedrich von Siemens. Vom Leitbild des großindustriellen Unternehmers.* 1973. 64 S. vgr
- 18 Ulrich Hommes: *Entfremdung und Versöhnung. Zur ideologischen Verführung des gegenwärtigen Bewußtseins.* 1973. 50 S. vgr
- 19 Dennis Gabor: *Holographie 1973.* 1974. 52 S.
- 20 Wilfried Guth: *Geldentwertung als Schicksal?* 1974. 44 S.
- 21 Hans-Joachim Queisser: *Festkörperforschung.* 1975. 2. Auflage 1976. 64 S. vgr
- 22 Ekkehard Hieronimus: *Der Traum von den Urkulturen.* 1975. 2. Auflage 1984. 54 S.
- 23 Julien Freund: *Georges Sorel.* 1977. 76 S. vgr
- 24 Otto Kimminich: *Entwicklungstendenzen des gegenwärtigen Völkerrechts.* 1976. 2. Auflage 1977. 52 S.
- 25 Hans-Joachim Hoffmann-Nowotny: *Umwelt und Selbstverwirklichung als Ideologie.* 1977. 42 S. vgr
- 26 Franz C. Lipp: *Eine europäische Stammestracht im Industriezeitalter. Über das Vorder- und Hintergründige der bayerisch-österreichischen Trachten.* 1978. 43 S. vgr
- 27 Christian Meier: *Die Ohnmacht des allmächtigen Dictators Caesar.* 1978. 108 S. vgr
- 28 Stephan Waetzoldt und Alfred A. Schmid: *Echtheitsfetischismus? Zur Wahrhaftigkeit des Originalen.* 1979. 72 S. vgr
- 29 Max Imdahl: *Giotto. Zur Frage der ikonischen Sinnstruktur.* 1979. 60 S. vgr
- 30 Hans Frauenfelder: *Biomoleküle. Physik der Zukunft?* 1980. 2. Auflage 1984. 53 S. vgr
- 31 Günter Busch: *Claude Monet »Camille«. Die Dame im grünen Kleid.* 1981. 2. Auflage 1984. 50 S.
- 32 Helmut Quaritsch: *Einwanderungsland Bundesrepublik Deutschland? Aktuelle Reformfragen des Ausländerrechts.* 1981. 2. Auflage 1982. 92 S. vgr
- 33 Armand Borel: *Mathematik: Kunst und Wissenschaft.* 1982. 2. Auflage 1984. 58 S.
- 34 Thomas S. Kuhn: *Was sind wissenschaftliche Revolutionen?* 1982. 2. Auflage 1984. 62 S. vgr
- 35 Peter Claus Hartmann: *Karl VII.* 1982. 2. Auflage 1984. 60 S.

- 36 Frédéric Durand: *Nordistik. Einführung in die skandinavischen Studien*. 1983. 104 S.
- 37 Hans-Martin Gauger: *Der vollkommene Roman: »Madame Bovary«*. 1983. 2. Auflage 1986. 70 S. vgr
- 38 Werner Schmalenbach: *Das Museum zwischen Stillstand und Fortschritt*. 1983. 47 S.
- 39 Wolfram Eberhard: *Über das Denken und Fühlen der Chinesen*. 1984. 2. Auflage 1987. 48 S.
- 40 Walter Burkert: *Anthropologie des religiösen Opfers*. 1984. 2. Auflage 1987. 64 S.
- 41 Christopher Freeman: *Die Computerrevolution in den langen Zyklen der ökonomischen Entwicklung*. 1985. 57 S. vgr
- 42 Benno Hess und Peter Glotz: *Mensch und Tier. Grundfragen biologisch-medizinischer Forschung*. 1985. 60 S. vgr
- 43 Hans Elsässer: *Die neue Astronomie*. 1986. 64 S. vgr
- 44 Ernst Leisi: *Naturwissenschaft bei Shakespeare*. 1988. 124 S.
- 45 Dietrich Murswiek: *Das Staatsziel der Einheit Deutschlands nach 40 Jahren Grundgesetz*. 1989. 56 S. vgr
- 46 François Furet: *Zur Historiographie der Französischen Revolution heute*. 1989. 50 S. vgr
- 47 Ernst-Wolfgang Böckenförde: *Zur Lage der Grundrechtsdogmatik nach 40 Jahren Grundgesetz*. 1990. 86 S. vgr
- 48 Christopher Bruell: *Xenophons Politische Philosophie*. 1990. 2. Auflage 1994. 71 S.
- 49 Heinz-Otto Peitgen und Hartmut Jürgens: *Fraktale. Gezähmtes Chaos*. 1990. 70 S. vgr
- 50 Ernest L. Fortin: *Dantes »Göttliche Komödie« als Utopie*. 1991. 62 S.
- 51 Ernst Gottfried Mahrenholz: *Die Verfassung und das Volk*. 1992. 58 S. vgr
- 52 Jan Assmann: *Politische Theologie zwischen Ägypten und Israel*. 1992. 2. Auflage 1995. 122 S.
- 53 Gerhard Kaiser: *Fitzcarraldo Faust. Werner Herzogs Film als postmoderne Variation eines Leitthemas der Moderne*. 1993. 74 S.
- 54 Paul A. Cantor: *»Macbeth« und die Evangelisierung von Schottland*. 1993. 88 S.
- 55 Walter Burkert: *»Vergeltung« zwischen Ethologie und Ethik*. 1994. 48 S. vgr
- 56 Albrecht Schöne: *Fausts Himmelfahrt. Zur letzten Szene der Tragödie*. 1994. 40 S.

- 57 Seth Benardete: *On Plato's »Symposium« – Über Platons »Symposion«*. 1994. 2. Auflage 1999. 106 S. mit einer Farbausschlagtafel.
- 58 Yosef Hayim Yerushalmi: *»Diener von Königen und nicht Diener von Dienern«. Einige Aspekte der politischen Geschichte der Juden*. 1995. 62 S.
- 59 Stefan Hildebrandt: *Wahrheit und Wert mathematischer Erkenntnis*. 1995. 60 S.
- 60 Dieter Grimm: *Braucht Europa eine Verfassung?* 1995. 58 S.
- 61 Horst Bredekamp: *Repräsentation und Bildmagie der Renaissance als Formproblem*. 1995. 84 S.
- 62 Paul Kirchhof: *Die Verschiedenheit der Menschen und die Gleichheit vor dem Gesetz*. 1996. 80 S.
- 63 Ralph Lerner: *Maimonides' Vorbilder menschlicher Vollkommenheit*. 1996. 50 S.
- 64 Hasso Hofmann: *Bilder des Friedens oder Die vergessene Gerechtigkeit. Drei anschauliche Kapitel der Staatsphilosophie*. 1997. 98 S.
- 65 Ernst-Wolfgang Böckenförde: *Welchen Weg geht Europa?* 1997. 60 S.
- 66 Peter Gülke: *Im Zyklus eine Welt. Mozarts letzte Sinfonien*. 1997. 64 S.
- 67 David E. Wellbery: *Schopenhauers Bedeutung für die moderne Literatur*. 1998. 70 S.
- 68 Klaus Herding: *Freuds »Leonardo«. Eine Auseinandersetzung mit psychoanalytischen Theorien der Gegenwart*. 1998. 80 S.
- 69 Jürgen Ehlers: *Gravitationslinsen. Lichtablenkung in Schwerefeldern und ihre Anwendungen*. 1999. 58 S. mit 4 Farbtafeln.
- 70 Jürgen Osterhammel: *Sklaverei und die Zivilisation des Westens*. 2000. 74 S.
- 71 Lorraine Daston: *Eine kurze Geschichte der wissenschaftlichen Aufmerksamkeit*. 2001. 60 S.
- 72 John M. Coetzee: *The Humanities in Africa – Die Geisteswissenschaften in Afrika*. 2001. 98 S.
- 73 Georg Kleinschmidt: *Die plattentektonische Rolle der Antarktis*. 2001. 86 S. mit 20 Abbildungen, 16 Farbtafeln und einer Ausschlagtafel.

Außerhalb der Reihe ist erschienen:

1985 - 1995 Carl Friedrich von Siemens Stiftung – Zehnjahresbericht.  
1996. 2. Auflage 1999. 144 S. mit 81 Abbildungen.

*Notiz zur Zitierweise*

**Georg Kleinschmidt:**

Die plattentektonische Rolle der Antarktis –  
München: Carl Friedrich von Siemens Stiftung, 2001  
(Reihe »Themen«, Bd. 73).

Carl Friedrich von Siemens Stiftung  
Südliches Schloßrondell 23  
D-80638 München

© 2001 Carl Friedrich von Siemens Stiftung, München  
Layout und Herstellung Udo Wiedemann  
Druck Mayr Miesbach, Druckerei und Verlag GmbH

# Veröffentlichungen der Carl Friedrich von Siemens Stiftung

Herausgegeben von Heinz Gumin und Heinrich Meier

## Band 1: Heinrich Meier (Hrsg.) Die Herausforderung der Evolutionsbiologie

294 Seiten mit 28 Abbildungen, € 9,90, Serie Piper 997.

*Heinrich Meier*

Die Herausforderung der Evolutionsbiologie

*Ilya Prigogine*

Die physikalisch-chemischen  
Wurzeln des Lebens

*Richard Dawkins*

Auf welche Einheiten richtet sich die  
natürliche Selektion?

*Norbert Bischof*

Ordnung und Organisation als  
heuristische Prinzipien des reduktiven  
Denkens

*Richard D. Alexander*

Über die Interessen der Menschen  
und die Evolution von Lebensabläufen

*Hans Kummer*

Gruppenführung bei Tier und Mensch  
in evolutionärer Sicht

*Christian Vogel*

Gibt es eine natürliche Moral?  
Oder: Wie widernatürlich ist unsere Ethik?

*Ernst Mayr*

Die Darwinsche Revolution und die  
Widerstände gegen die Selektionstheorie

*Roger D. Masters*

Evolutionsbiologie, menschliche  
Natur und Politische Philosophie

## Band 2: Die Zeit – Dauer und Augenblick

417 Seiten mit 51 Abbildungen, € 9,90, Serie Piper 1024.

*Jean-Pierre Blaser*

Die Zeit in der Physik

*John A. Wheeler*

Jenseits aller Zeitlichkeit. Anfang und Ende  
der physikalischen Zeitskala

*Manfred Eigen*

Evolution und Zeitlichkeit

*Hans Heimann*

Zeitstrukturen in der Psychopathologie

*Otto-Joachim Grüsser*

Zeit und Gehirn. Zeitliche Aspekte der  
Signalverarbeitung in den Sinnesorganen  
und im Zentralnervensystem

*Jürgen Aschoff*

Die innere Uhr des Menschen

*Ferdinand Seibt*

Die Zeit als Kategorie  
der Geschichte und als Kondition  
des historischen Sinns

*Jan Assmann*

Das Doppelgesicht der Zeit  
im altägyptischen Denken

*Carsten Colpe*

Die Zeit in drei asiatischen Hochkulturen  
(Babylon – Iran – Indien)

*Hubert Cancik*

Die Rechtfertigung Gottes durch  
den »Fortschritt der Zeiten«. Zur  
Differenz jüdisch-christlicher und  
hellenisch-römischer Zeit- und  
Geschichtsvorstellungen

*Peter Häberle*

Zeit und Verfassungskultur

*David Epstein*

Das Erlebnis der Zeit in der Musik

*Edgar Lüscher*

Zusammenfassende Bemerkungen  
zur physikalischen Zeitdefinition

*Ernst Pöppel*

Erlebte Zeit und die Zeit überhaupt:  
Ein Versuch der Integration

### Band 3: Heinrich Meier (Hrsg.) Zur Diagnose der Moderne

251 Seiten, € 9,90, Serie Piper 1143.

*Heinrich Meier*

Die Moderne begreifen –  
die Moderne vollenden?

*Daniel Bell*

Zur Auflösung der Widersprüche  
von Modernität und Modernismus:  
Das Beispiel Amerikas

*Winfried Schulze*

Ende der Moderne?  
Zur Korrektur unseres Begriffs  
der Moderne aus historischer  
Sicht

*Agnes Heller*

Die ethischen Alternativen der Moderne

*Kenneth Minogue*

Drei Formen des modernen europäischen  
Staates

*Jean-François Lyotard*

Zeit heute

*Hans-Martin Gauger*

Gibt es eine Sprache der Moderne?

*Joseph Cropsey*

Über die Alten und die Modernen

### Band 4: Tilo Schabert (Hrsg.) Die Welt der Stadt

261 Seiten mit 26 Abbildungen, € 9,90, Serie Piper 1317

*Peter Hall*

Gibt es sie noch – die Stadt?

*Joseph Rykwert*

Für die Stadt –  
Argumente für ihre Zukunft

*Wolfgang J. Mommsen*

Stadt und Kultur im deutschen Kaiserreich

*Karl Riha*

Menschen in Massen.  
Ein spezifisches Großstadtsujet und seine  
Herausforderungen an die Literatur

*Mathias Schreiber*

Die Stadt als Medium

*Tilo Schabert*

Wie werden Städte regiert?

*Manuel Castells*

Die zweigeteilte Stadt –  
Arm und Reich in den Städten  
Lateinamerikas, der USA und Europas

*Nathan Glazer*

Vielfalt, Nonkonformismus  
und Kreativität –  
das Beispiel der Stadt New York

### Band 5: Einführung in den Konstruktivismus

187 Seiten mit 15 Abbildungen, € 9,90, Serie Piper 1165

*Ernst von Glasersfeld*

Konstruktion der Wirklichkeit und des  
Begriffs der Objektivität

*Heinz von Foerster*

Entdecken oder Erfinden – Wie läßt sich  
Verstehen verstehen?

*Paul Watzlawick*

Wirklichkeitsanpassung oder angepaßte  
»Wirklichkeit«? – Konstruktivismus und  
Psychotherapie

*Peter M. Hejl*

Konstruktion der sozialen Konstruktion –  
Grundlinien einer konstruktivistischen  
Sozialtheorie

*Siegfried J. Schmidt*

Vom Text zum Literatursystem – Skizze  
einer konstruktivistischen (empirischen)  
Literaturwissenschaft

*Peter M. Hejl, Siegfried J. Schmidt*

Bibliographie

**Band 7: Heinrich Meier, Detlev Ploog (Hrsg.)**  
**Der Mensch und sein Gehirn**  
**Die Folgen der Evolution**

259 Seiten mit 19 Abbildungen, € 9,90, Serie Piper 2457

*John R. Searle*

Die wissenschaftliche Erforschung des  
Bewußtseins

*Wolf Singer*

Der Beobachter im Gehirn

*Ernst Pöppel*

Zeitlose Zeiten: Das Gehirn als paradoxe  
Zeitmaschine

*Leslie L. Iversen*

Die Chemie des Gehirns

*Richard E. Leakey*

Die Bedeutung eines vergrößerten  
Gehirns in der Evolution des Menschen

*Angela D. Friederici*

Menschliche Sprachverarbeitung und  
ihre neuronalen Grundlagen

*Martin Heisenberg*

Das Gehirn des Menschen aus  
biologischer Sicht

*Gerald M. Edelman / Giulio Tononi*

Neuronaler Darwinismus:  
Eine selektionistische Betrachtungsweise  
des Gehirns

*Detlev Ploog*

Epilog:  
Das soziale Gehirn des Menschen

**Band 8: Heinrich Meier, Gerhard Neumann (Hrsg.)**  
**Über die Liebe**  
**Ein Symposium**

352 Seiten mit 10 Abbildungen, € 9,90, Serie Piper 3233

*Gerhard Neumann*

Lektüren der Liebe

*Helen Fisher*

Lust, Anziehung und Verbundenheit –  
Biologie und Evolution der menschlichen  
Liebe

*Karl-Heinz Kohl*

Gelenkte Gefühle –  
Vorschriftsheirat, romantische Liebe und  
Determinanten der Partnerwahl

*Jean Starobinski*

Fêtes galantes –  
Geburt und Niedergang einer Utopie der  
Liebe

*Seth Bernardete*

Sokrates und Platon –  
Die Dialektik des Eros

*Walter Haug*

Tristan und Lancelot –  
Das Experiment mit der personalen Liebe  
im 12./13. Jahrhundert

*Kurt Flasch*

Liebe im Decameron des Giovanni  
Boccaccio

*Peter von Matt*

Versuch, den Himmel auf Erden einzu-  
richten –  
Der Absolutismus der Liebe in Goethes  
Wahlverwandschaften

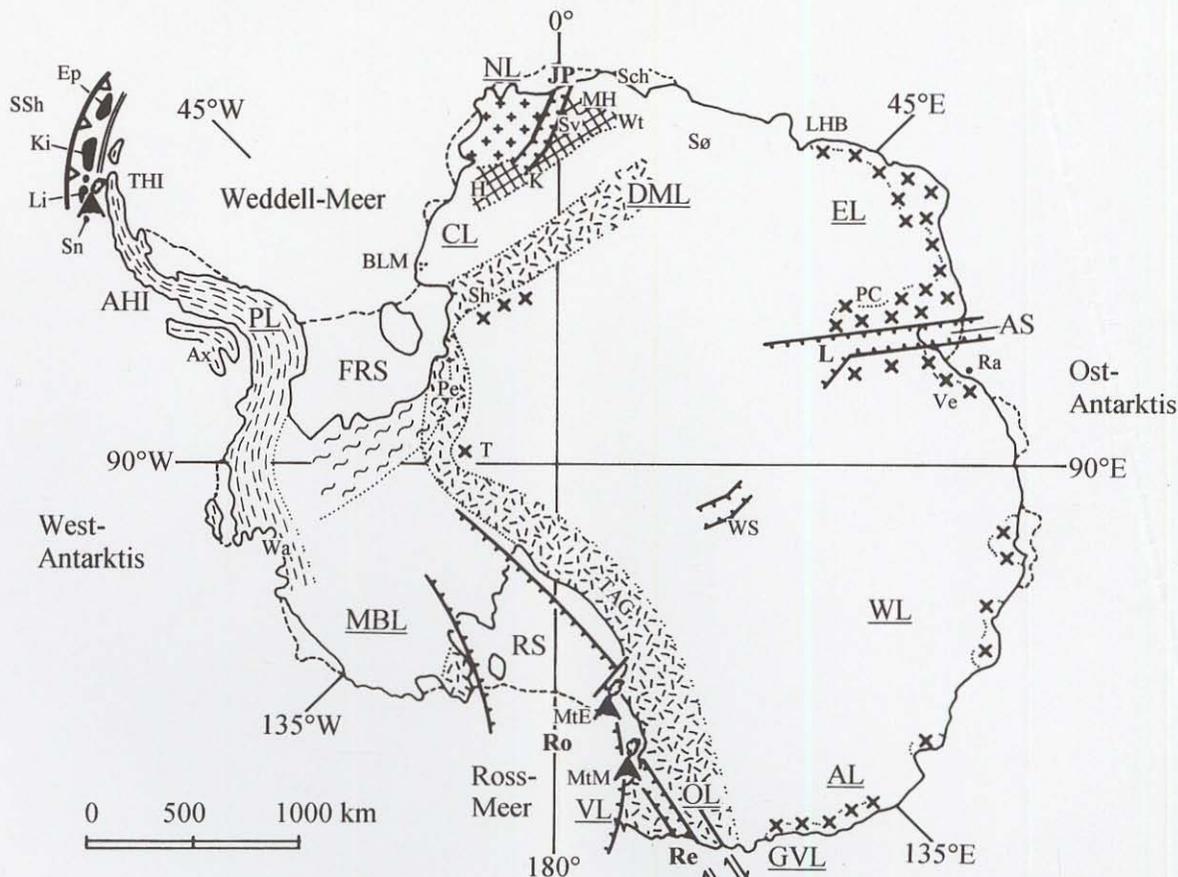
*Ulrich Pothast*

Liebe und Unverfügbarkeit

*Heinrich Meier*

Epilog –  
Über Liebe und Glück

**PIPER**



### Der geologische Bau der Antarktis und im Text genannte Lokalitäten.

**Signaturen:** Gestrichelt umrissen = Schelfeis (FRS = Filchner-Ronne-Schelfeis, AS = Amery-Schelfeis, RS = Ross-Schelfeis), schwarz: = aktive Plattentektonik, dicke Linie m. Dreiecken: = aktive Subduktion, dünne Doppellinie = aktive Spreizung (Bransfieldstraße), Dreiecke m. Rauchfahnen: = aktive Vulkane, gestrichelt = Antarktis-Anden, geschlängelt: = Ellsworth- oder Weddell-Orogen, Strichmuster = Ross-Orogen und panafrikanisches Orogen, kreuzschraffiert = grenvillisches Orogen, kleine Kreuze = Grunehogna-Kraton, große Kreuze = ostantarktischer Kraton (zwei aufgeschlossen), v. gezähnten Linien begrenzt = Grabenbrüche (JP = Jutul-Penck-Graben, Jutulstraumen, L = Lambertgraben, Lambertgletscher, Ro = Ross-Meer-Graben, Re = Rennickgraben, Rennickgletscher.)  
**Länder** (unterstrichene Kürzel): AL = Adélieland, CL = Coatsland, DML = Dronning-Maud-Land, EL = Enderbyland, GVL = George-V.-Land,

MBL = Marie-Byrd-Land, NL = Neuschwabenland, OL = Oatesland, PL = Palmerland, VL = Victorialand, WL = Wilkesland.

**Sonstige topographische Kürzel:** AHI = Antarktische Halbinsel, Ax = Alexander Island, BLM = Bertrab-, Littlewood- und Moltke-Nunatakker, Ep = Elephant Island, H = Heimefrontjella, K = Kirwanveggen, Ki = King George Island, LHB = Lützw-Holm-Bukta, Li = Livingston Island, MH = Mühlig-Hoffman-Gebirge, MtE = Mount Erebus, MtM = Mount Melbourne, PC = Prince Charles Mountains, Pe = Pensacola Mts., Ra = Rauer Islands, Sch = Schirmacheroase, Sh = Shackleton Range, Sn = Snow Island, Sør = Sor-Rondane, SSh = Südschetland-Inseln, Sv = H.U. Sverdrupfjella, T = Thiel Mts., TAG = Transantarktisches Gebirge, THI = Trinity-Halbinsel, Ve = Vestfold Hills, Wa = Walgreen Coast, WS = Wostok-See, Wt = Wohlthatmassiv.

