

Neue geomorphologische Forschungsergebnisse aus dem zentralen Pazifischen Ozean aufgrund flächenhafter Kartierungen des Tiefseebodens*)

Von JOHANNES ULRICH, Kiel

1. Einleitung

Der für die Formen des Meeresbodens zuständige marine Geomorphologe hat es bekanntlich schwerer, seine Forschungsobjekte zu untersuchen als sein am Festland interessierter Kollege. Der Meeresboden, vor allem aber der Tiefseeboden, entzieht sich weitgehend der visuellen Beobachtung.

Für marin-geomorphologische Tiefseeforschungen benötigt man außer einem Schiff als beweglicher Beobachtungsbasis ein mehr oder weniger kompliziertes und aufwendiges Gerät, um den Meeresboden überhaupt in irgendeiner Weise sichtbar zu machen. Dies geschah jedoch bisher auf sehr unvollkommene Art. Noch bis in das erste Viertel unseres Jahrhunderts hinein kannte man nur die punkthafte Einzellotung mit Lotleine und Gewicht, und es bedeutete schon einen gewaltigen technischen Umbruch, als es durch die Erfindung des Echolotes und später des Echographen möglich wurde, den Meeresboden wenigstens linienhaft, d.h. in Form einer Bodenprofilinie, deren Daten in eine Karte übertragen wurden, sichtbar zu machen. Doch selbst bei engmaschiger bathymetrischer Vermessung lassen sich Lücken zwischen den abgefahrenen Schiffskursen nicht vermeiden. Eine lückenlose bathymetrische Kartierung des Meeresbodens, vor allem des Tiefseebodens, war bisher nicht möglich. Die Lücken in den See- und Tiefenkarten mußten durch Interpolation bzw. spekulativ gefüllt werden.

Hier bahnt sich nun ein grundlegender Wandel an, dem einzelne technische Entwicklungen vorausgingen. Bald nach dem Zweiten Weltkrieg wurden erste Versuche unternommen, den Meeresboden flächenhaft zu erfassen, und Ende der 60er Jahre kam aus den USA das sogenannte „Side Scan Solar“-Gerät auf den Markt, das zumindest für den Schelfbereich eine flächenhafte Aufnahme des Meeresbodens ermöglichte. Nach dem gleichen Prinzip wurde in England ein entsprechendes Sonargerät für den Tiefsee-Einsatz (bis 6.000 m Tiefe) gebaut, die sogenannte „Gloria“. Beide Geräte haben jedoch den Nachteil, daß ihre Sendeeinheit in einem Schleppgerät untergebracht ist, was eine erhebliche Abhängigkeit von den Seegangsverhältnissen bedeutet. Außerdem liefern diese Systeme zwar ein relatives Bild des Meeresbodens, eine Art Reliefkarte zu beiden

*) Vortrag, gehalten am 7.10.1983 in Berlin anlässlich des Ferdinand v. Richthofen-Symposiums, mit einigen Ergänzungen aufgrund zusätzlicher Auswertungen geomorphologischer Ergebnisse

Seiten des Schiffskurses, aber keine genauen und für bathymetrische Vermessungszwecke einwandfreien Tiefenlinienkarten. Immerhin waren jedoch die Meeresgeologen und marinen Geomorphologen mit Hilfe dieser Methode erstmals in der Lage, den Meeresboden direkt flächenhaft sichtbar zu machen.

Die Weiterentwicklung der Echolottechnik hat in den letzten Jahren zu einem methodischen Umbruch geführt, der auch die marine Geomorphologie und Kartographie in Zukunft noch stark beeinflussen wird. Die Verbindung von Mehrstrahl-Echolotung und rechnergesteuerter flächenhafter Erfassung und Kartierung des Meeresbodens in Form von Tiefenlinienkarten macht es möglich, bereits während einer Forschungsfahrt eine sehr genaue bathymetrische Darstellung des Meeresbodens zu erhalten, was für die Effizienz der Forschungsarbeiten und deren zeitlichen Ablauf von erheblicher Bedeutung sein kann.

Mit diesem neuen Echolotsystem konnten im November 1981 im Pazifischen Ozean einige geomorphologische Untersuchungen durchgeführt werden, über die hier berichtet werden soll. Zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen sei aber zunächst eine Kurzbeschreibung der neuen Multi-Echolotanlage und ihres Prinzips gegeben.

2. Das Hydrochart/Sea-Beam-System

Dieses neue Echolotverfahren, das unter der Bezeichnung Hydrochart/Sea-Beam-System international bekannt geworden ist, wurde in den USA entwickelt und Mitte der 70er Jahre für den Einbau in Forschungsschiffe freigegeben. Das Gesamtsystem besteht aus zwei Komponenten, die auch getrennt installiert werden können, dem „Hydrochart“-System für Wassertiefen bis 620 m und dem Sea-Beam-System für den Tiefseebereich bis 12.000 m, also für die größten Meerestiefen.

Das Hydrochart-System, das mit einer Frequenz von 36 kHz arbeitet, eignet sich zur flächenhaften Lotung im Schelf- und Schelfrandbereich. Es wurde bisher nur auf wenigen Schiffen eingebaut. Das Hauptinteresse derjenigen Institutionen, die Tiefseeforschung betreiben, gilt dem eigentlichen Sea-Beam-System und der damit verbundenen rechnergesteuerten flächenhaften Kartierung des Tiefseebodens an Bord von Forschungsschiffen.

Das System arbeitet nach folgendem Prinzip (vgl. Abb. 1): Im Schiffsboden ist nicht mehr nur – wie bei herkömmlichen Vertikalloten – ein einziger Ultraschall-Wandler für Sendung und Empfang von Echos eingebaut, sondern es ist ein kompletter Satz von flächenartig angeordneten Schwingern installiert, von denen 16 ständig arbeiten. Mit diesem Fächer gebündelter Sonarstrahlen werden die Tiefen des Meeresbodens unter dem Schiff ertotet und seine Topographie als Tiefenlinienstreifen in real-time aufgezeichnet. Die Breite des Streifens beträgt ca. 80 % der jeweiligen Wassertiefe, d.h. bei 5.000 m Wassertiefe wird ein Streifen von 4.000 m Breite erfaßt.

Die Arbeitsfrequenz des Systems beträgt 12 kHz, und die einzelnen Elemente des Sonarfächers strahlen ihre Impulse unter einem Öffnungswinkel von $2,6^\circ$ ab. Diese enge Bündelung ist erforderlich, um steile Formen des Meeresbodens richtig erfassen zu können. Dies erfordert jedoch auch einen guten Ausgleich der Roll-

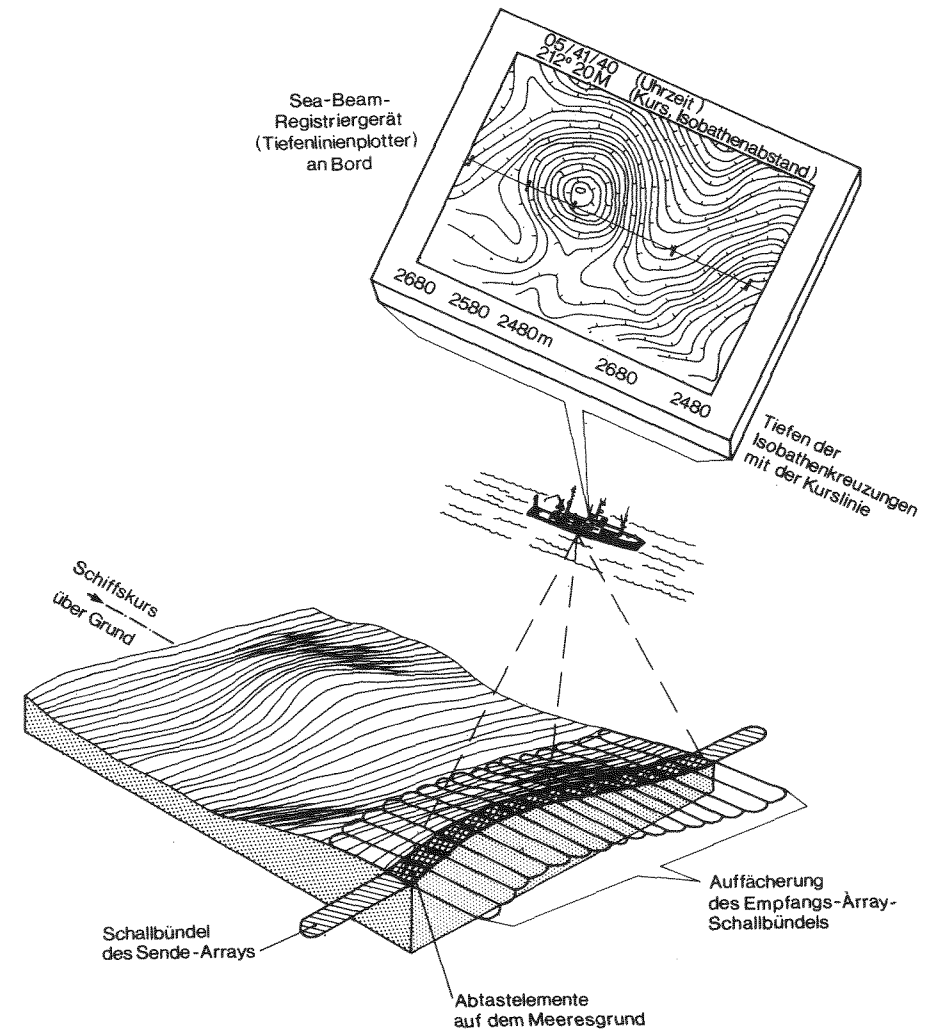


Abb. 1: Prinzipskizze der flächenhaften Kartierung des Meeresbodens mit dem Sea-Beam-System

und Stampfbewegungen des Schiffes sowie eine Korrektur von Fehlern, die durch unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten im Wasser entstehen.

Um die Wirkung der Sonarfächer zu optimieren, wurden Sender und Empfänger getrennt in Einzelelemente aufgeteilt und in zwei Streifen entlang der Kiellinie des Schiffes und rechtwinklig dazu am Schiffsboden angeordnet. Die Anordnung ermöglicht einen gerichteten Empfang. Durch Überlagerung des Sende-Arrays mit Empfangs-Array entstehen sogenannte Abtastelemente, aus denen der jeweilige Lotungswert im Rechner zugeführt wird. An Bord werden die empfangenen Signale in den Echoprocessor eingegeben und von ihm verarbeitet. Als primäres Produkt des Processors wird in real-time eine Tiefenlinienkarte des vermessenen Streifens

– also nicht mehr nur ein einziges Profil wie beim linienhaften Loten – ausgegeben. Dieser geplottete Registrierstreifen enthält außer den Tiefenlinien im 20 m-Abstand die Kurslinie, den Maßstab, jede 200 m-Linie stärker gezeichnet sowie Markierungen an der Mittellinie, die sich auf Uhrzeit (oben am Rand angegeben), und Tiefendurchgänge (unten angegeben) beziehen.

3. Geomorphologische Forschungsergebnisse aus dem Pazifischen Ozean

Als erstes deutsches Schiff erhielt das Rohstoff-Forschungsschiff „Sonne“ eine solche Fächerlot-Anlage eingebaut. Der Test des neu installierten Sea-Beam-

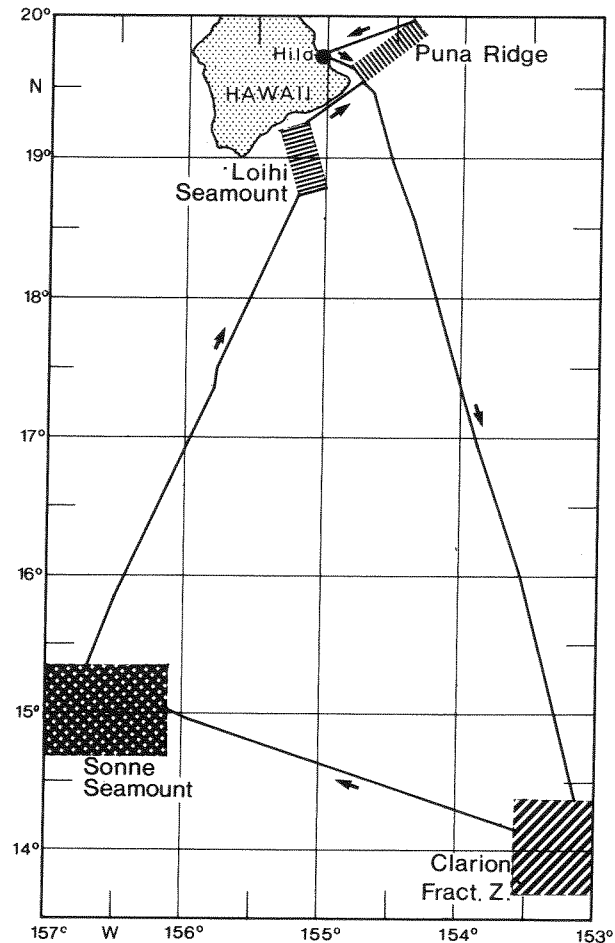


Abb. 2: Geographische Lage der Untersuchungsgebiete im zentralen Pazifischen Ozean: Westteil der Clarion Fracture Zone, Tiefseekuppenregion südlich Hawaii sowie Areale im Hawaii-Rückensystem (Loihi-Seamount und Puna Ridge)

Systems fand in der Zeit vom 7. bis 19. November 1981 in drei topographisch unterschiedlichen Arealen südlich der Hauptinsel Hawaii statt und war glücklicherweise so erfolgreich, daß außer den notwendigen technischen Versuchen auch bathymetrische, geomorphologische und sogar petrographische Untersuchungen erfolgreich durchgeführt werden konnten.

Der schematische Überblick (Abb. 2) zeigt die drei Untersuchungsgebiete
 Westlicher Teil der Clarion Fracture Zone
 Tiefseekuppenregion südlich Hawaii und
 zwei kleinere Areale im Gebiet des seismisch aktiven Hawaii-Rückensystems (Loihi Seamount und Puna Ridge).

3.1 Clarion Fracture Zone

Um die Anwendbarkeit und die Vorteile des Sea-Beam-Systems für morphologische, sedimentologische und tektonische Untersuchungen zu testen, wurde eine erste flächendeckende bathymetrische Detailvermessung im Westteil der Clarion Fracture Zone vorgenommen. Dieses Gebiet war bereits 1980 von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover) genau untersucht und mit dem herkömmlichen Echolotverfahren vermessen worden. Hier bot sich nun die Gelegenheit zu einem ersten Vergleich beider Lotsysteme. Die Ergebnisse hat V. RIECH (1983) im BMFT-Forschungsbericht M 83 – 001 dargestellt. Viele topographische Details konnten erst mit Hilfe der Sea-Beam-Aufzeichnung erkannt und lückenlos kartiert werden.

Die morphologischen Bedingungen waren in diesem Areal für einen Sea-Beam-Vergleichstest besonders günstig, da es sich um eine Tiefsee-Bruchzone mit stark ausgeprägtem Relief handelt. Generell gesehen liegt folgende topographische Situation vor: ein in W-E-Richtung verlaufender Horst wird von je einem bruchzonenparallel verlaufenden Graben im N und S begrenzt. Der Südrand des Horstes bildet einen Steilabfall zwischen 5.800 m und 6.300 m Tiefe. An vielen Stellen beträgt hier auf einer horizontalen Distanz von ca. 400 m der Tiefenunterschied ebenfalls etwa 400 m, was einer Hangneigung von 45° entspricht (vgl. Abb. 3 b). Die Sohle des südlichen Grabens steigt vom Fuße des Steilabfalles (6.300 m) nach S zu auf rund 5.400 m an. Sowohl der Horst als auch der Südgraben weisen zwar ein überwiegend stark gegliedertes Relief auf, aber es gibt auch Areale mit ausgeglichenerem Relief. Bemerkenswert ist jedoch, daß diese Areale stets in Verbindung mit Canyons vorkommen (ein 1.000 m breites Canyon verläuft über 5 km von N nach S, Höhenunterschied 360 m). Eine weitere rinnenförmige Vertiefung erstreckt sich von dem höher gelegenen Südteil des Südgrabens nach N. Sie ist wesentlich breiter und besitzt ein geringes Gefälle. Vermutlich sind diese rinnenförmigen Vertiefungen (Canyons) primär tektonisch angelegt und nachträglich durch Bodenströmungen ausmodelliert worden. Das dabei erodierte Material wurde unmittelbar im Mündungsbereich des Canyons abgelagert, wodurch ein extrem ausgeglichenes Relief entstand (Abb. 3 a).

Doch nicht in allen Bereichen der Horst-Graben-Zone sind derartige Canyons vorhanden. Die typische Situation bei fehlenden Canyons sowohl auf dem Horst als auch im Graben zeigt die Abbildung 3 b. Die Höhendifferenz beim Steilabfall ist ähnlich (500 m), aber die horizontale Distanz ist größer (750 m). Hier fehlt die

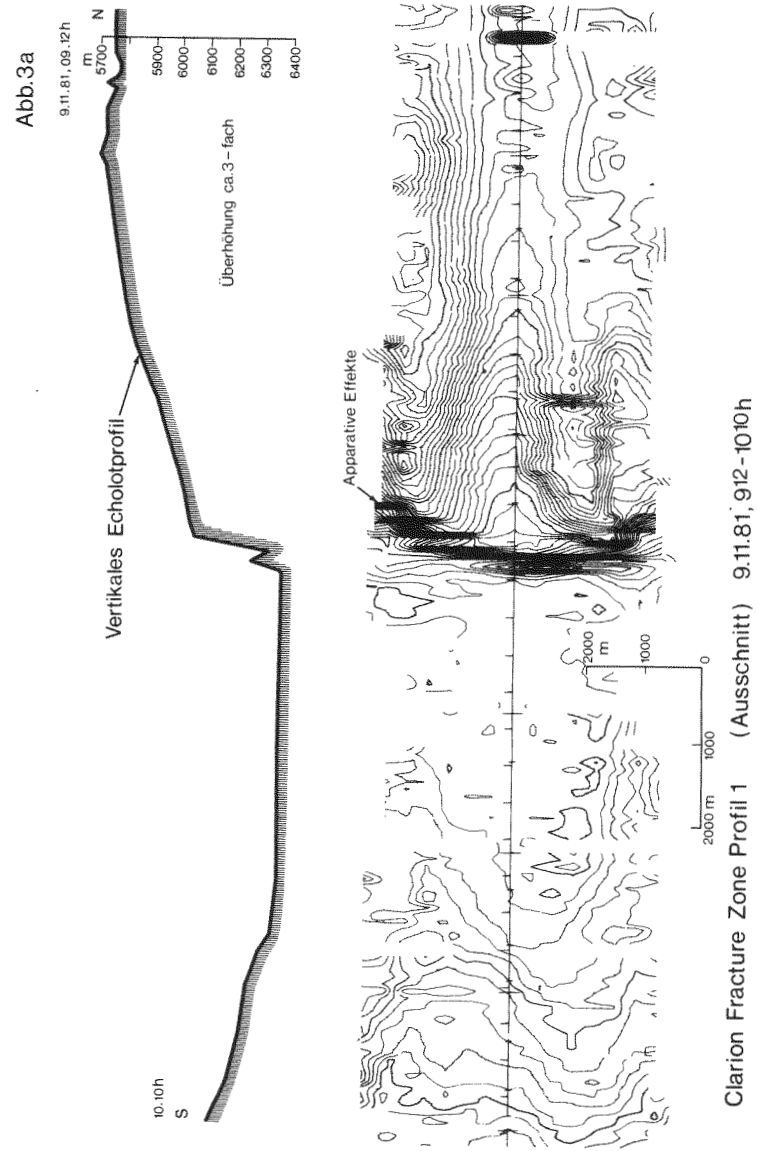
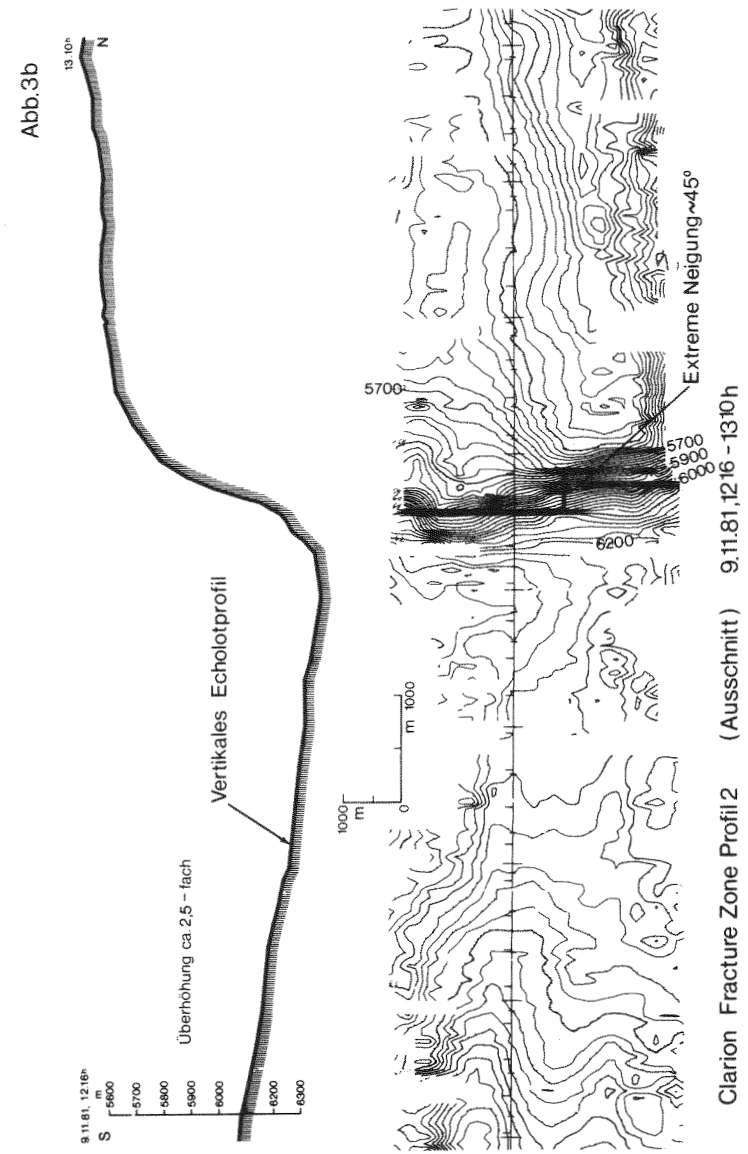


Abb. 3: Echolotprofile und Sea-Beam-Registrierungen quer zum Verlauf der Clarion Fracture Zone (nach F.-C. KÖGLER und U. ULRICH, 1983)

- Der Südrand des Horstes bildet einen Steilhang mit extremem Gefälle. Er ist in diesem Bereich durch breites Canyon gegliedert. Die Sohle des Grabens ist ausgeglichen
- Steilabfall ohne Canyon. Die Grabensohle weist hier ein unruhiges Relief auf.



Sedimentzufuhr; somit ist das Relief des Grabens in der Nähe des Steilabfalles unausgeglichen.

Für diese Forschungsergebnisse wurde außer der manuellen Auswertung auch ein rechnergesteuertes Post Processing der Sea-Beam-Daten – versuchsweise durch die Fa. Prakla-Seismos (Hannover) – durchgeführt. Geliefert wurden außer einer Tiefenlinienkarte und einer Sea-Beam-Überdeckungskarte eine farbige Tiefenstufenkarte und eine dreidimensionale Blockrelief-Darstellung.

3.2 Sonne Seamount

Um die Möglichkeiten und Grenzen des Sea-Beam-Systems bei der Vermessung einer möglichst hoch aufragenden Tiefseekuppe zu testen, wurde in der Umgebung der Clarion Fracture Zone nach einer möglichst steilen Einzelerhebung gesucht. Sie konnte sehr bald befunden werden, und zwar bei $15^{\circ}07'N/156^{\circ}40,3'W$. Diese Struktur wurde mit insgesamt 22 Profilkursen nahezu lückenlos vermessen. Dabei stellte sich heraus, daß es sich hier um eine größere Tiefseekuppe handelt, die aus Tiefen um 5.500 m bis 2.180 m unter dem Meeresspiegel aufragt. Ihre Gesamthöhe beträgt also ca. 3.300 m. Mit Hilfe des Sea-Beam-Systems konnte die Vermessung einer solchen Tiefseekuppe hier – wahrscheinlich überhaupt zum ersten Mal – fast völlig lückenlos erfolgen, wie die Überdeckungskarte zeigt (J. ULRICH und F.-C. KÖGLER, 1982).

Die morphologischen Details der Kuppe konnten hier weitaus besser erfaßt werden als mit dem herkömmlichen Einstrahl-Lotungsverfahren. Dies zeigen Vergleiche zwischen Sea-Beam-Registrierung und Vertikallotung. Der Informationsgehalt von Sea-Beam-Aufzeichnungen ist um ein Vielfaches größer. Die seitlich vom Schiffskurs gelegenen Strukturen wären bei ausschließlicher Vertikallotung nicht erfaßt worden.

Die detaillierte Vermessung dieser steil aufragenden Erhebung ergab, daß es sich hier nicht – wie zu Beginn der Untersuchungen angenommen wurde – um einen wenig gelieferten Vulkankegel mit mehreren Gipfeln handelt, sondern daß die Flanken des Berges zahlreiche kleinere Einzelkegelberge aufweisen, die zumeist Höhen unter 100 m besitzen. Aus dem zentralen Teil der Kuppe (< 3.000 m) ragen allein 14 Einzelkegel in geringere Wassertiefen als 3.000 m auf, zwei von ihnen in Minimaltiefen unter 2.500 m. Insgesamt wurden im Kuppenbereich 62 Einzelgipfel entdeckt, von denen bei alleiniger Verwendung der herkömmlichen Lotungstechnik lediglich 6 vom Vertikallot erfaßt worden wären. Wegen ihrer geringeren Höhe (< 100 m) sind die meisten von ihnen in der hier wiedergegebenen Tiefenkarte, da sie im Originalmaßstab 1 : 50.000 erstellt wurde, nicht enthalten. Sie basiert auf der manuellen Auswertung sämtlicher Sea-Beam-Registrierungen aus dem Kuppenbereich (Abb. 4). Es wird erkennbar, daß vor allem die 5.000 m-Isobathe eine mehr ovale als kreisrunde Form besitzt, mit Ausbuchtungen nach N, NE und S. Im Süden deutet der Tiefenlinienverlauf auf die Existenz einer weiteren ähnlichen Struktur (Tiefseekuppe) in der Nachbarschaft hin.

Die Tiefenkarte läßt bereits gewisse Rückschlüsse auf die Gefällsverhältnisse der Kuppe zu. Doch wesentlich detaillierter zeigt dies die Hangneigungskarte (Abb. 5): Extrem flache Übergänge zur Umgebung in über 5.000 m Tiefe vor allem im NE (unter 10° Neigung), steilere Übergänge im W und E (10° bis 20°) sowie extrem steile Hänge mit über 40° Neigung an mehreren Stellen in verschiedenen Tiefen, besonders auffallend aber in Tiefen zwischen 4.000 und 5.000 m im NW der Kuppe. Möglicherweise handelt es sich hier um Partien mit starken Hangrutschungen. Terrassenartige Gefällsunterbrechungen sind an mehreren Stellen zwischen 3.000 und 4.000 m zu erkennen. Ein vorherrschendes Niveau konnte bisher nicht ermittelt werden. Auch eine die Kuppe umlaufende Ringmulde (wie z.B. bei der Anton-Dohrn-Kuppe) konnte zumindest morphologisch nicht gefunden werden. Hierzu sei erwähnt, daß in der Zwischenzeit eine Erfassung sämtlicher vom Sea-Beam aufgezeichneten Strukturen in einer großmaßstablichen Tiefenkarte (M. 1 : 20.000)

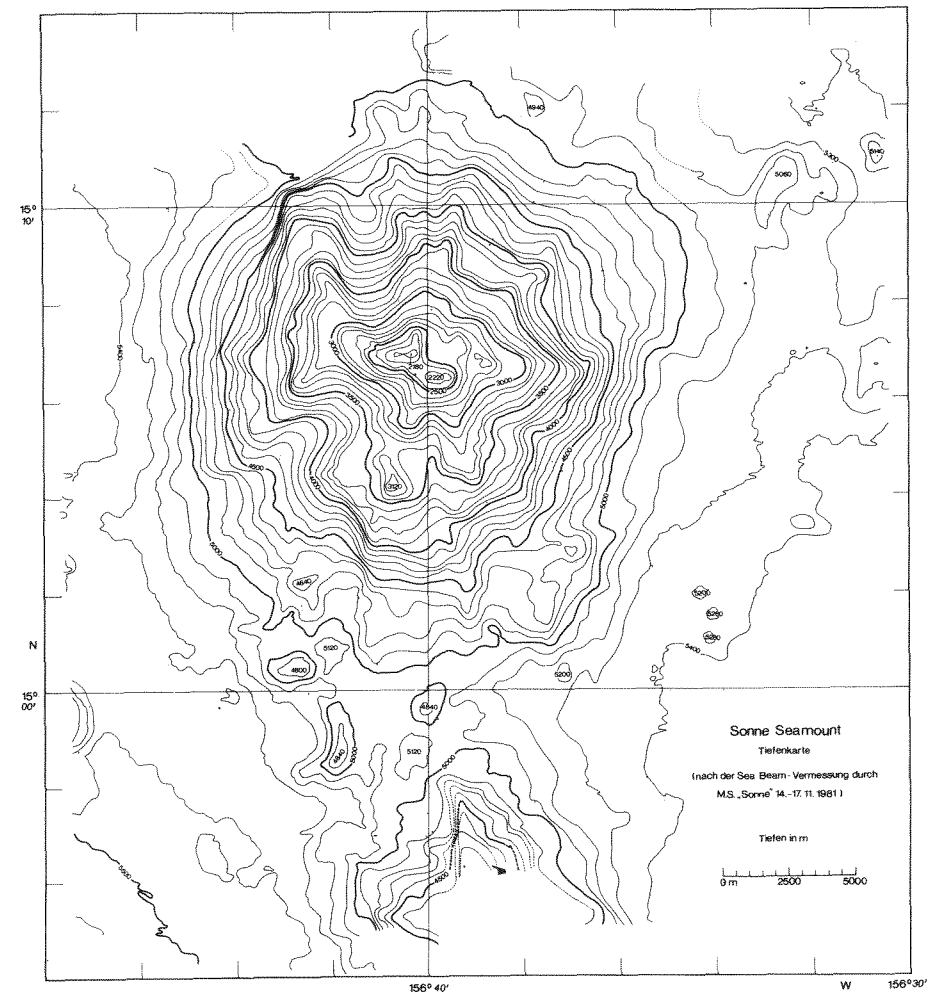


Abb. 4: Tiefenkarte des Sonne-Seamount, erarbeitet auf der Grundlage einer nahezu lückenlosen bathymetrischen Vermessung mit dem Sea-Beam-System von MS „Sonne“ (aus J. ULRICH und F.C. KÖGLER (1982), verkleinerte Wiedergabe).

Abb. 5: Hangneigungskarte des Sonne-Seamount →

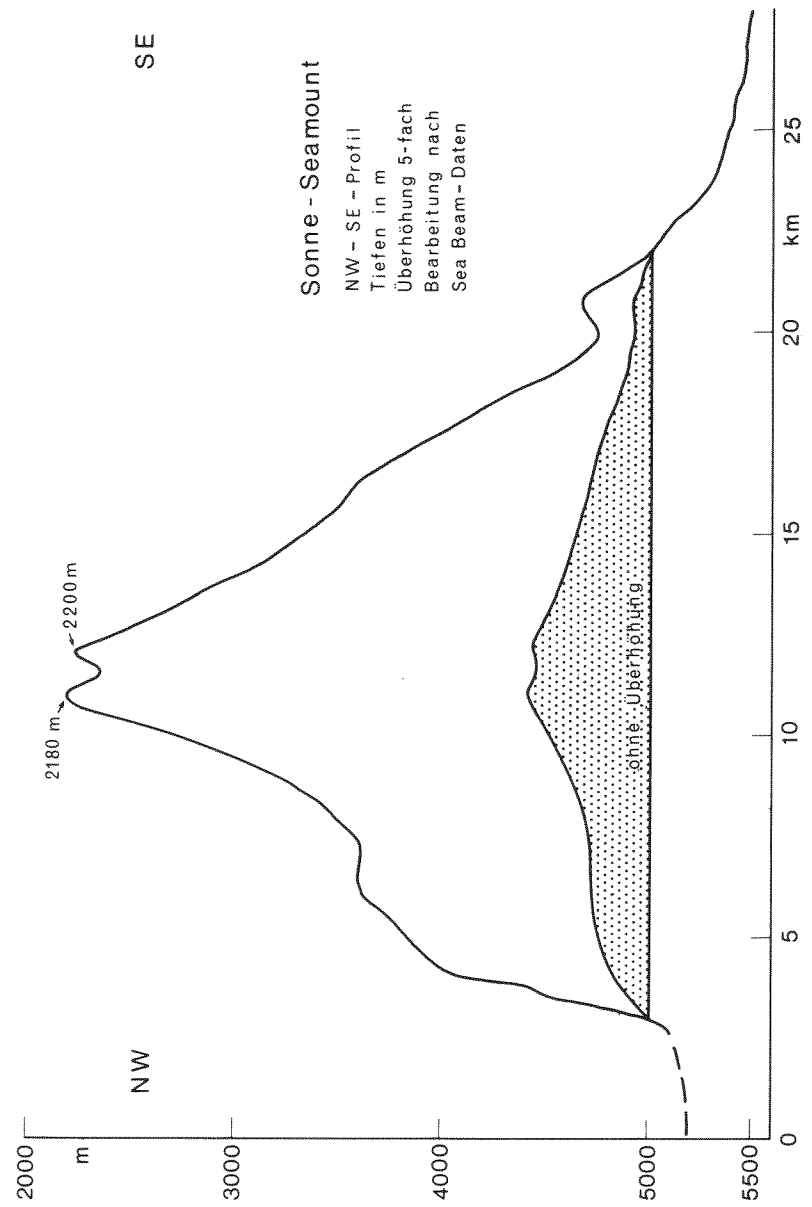


Abb. 6: NW-SE-Profil über den Sonne-Seamount

erfolgte. Ein aus den Sea-Beam-Registrierungen resultierendes NW-SE-Profil über die Kuppe veranschaulicht die Neigungsverhältnisse in 5-facher Überhöhung (Abb. 6).

3.3 Loihi Seamount und Puna Ridge

Die Anwendungsmöglichkeiten des Sea-Beam-Systems erschöpfen sich jedoch nicht mit der bathymetrischen Kartierung des Meeresbodens. Mit Hilfe einer Detailkartierung bestimmter morphologischer Einzelformen läßt sich eine kontinuierliche Navigation anhand topographischer Strukturen durchführen. Um dieses Verfahren, die sogenannten „bottom navigation“ mit dem Sea-Beam-System der Sonne zu testen, wurden zwei eng begrenzte Einzelformen im Bereich des seismisch aktiven „Hawaii Rift Systems“ untersucht, deren Umgebung bereits früher von amerikanischen Forschungsschiffen vermessen worden waren. Lediglich das Mikrorelief der Kammregionen was bisher noch nicht bearbeitet worden, so daß hier einige bathymetrische Lücken geschlossen werden konnten.

Die Ergebnisse wurden von F.-C. KÖGLER und J. ULRICH (1983) im BMFT-Forschungsbericht veröffentlicht. Hier seien lediglich einige geomorphologische Resultate genannt. Der Kamm des Loihi Seamounts (südlich der Hauptinsel Hawaii gelegen) wurde in einer Tiefe von 4.340 m angetroffen und mit dem Sea-Beam-System in NW-Richtung kontinuierlich bis zu dem in einer Tiefe von 1.020 m gelegenen Plateau verfolgt, so daß seine Topographie über ca. 15 km hinweg in allen Details erfaßt werden konnte. Die Breite des Kammes dieses länglichen Seamounts liegt zwischen 500 und 100 m. Unterhalb des Plateaus treten kegelförmige Erhebungen auf, deren Durchmesser ca. 200 m beträgt. Auf dem Plateau wurden zwei größere ovale Krater (1.000 m x 600 m) erlotet, deren Boden etwa 260 m tiefer als die Umgebung liegt.

Der Kamm des Puna Ridge, der östlich der Hauptinsel Hawaii liegt, wurde in einer Tiefe von 5.520 m erfaßt und in NE-SW-Richtung über etwa 60 km hinweg verfolgt. Sein Relief ist weniger unruhig als das der Loihi Seamounts. Breite Regionen mit flachem Anstieg wechseln mit schmäleren und steileren Arealen. Typisch sind hier jedoch hufeisenförmige Strukturen, bei denen es sich um kleinere Krater mit durchbrochenem Kraterrand handeln dürfte, wie sie auch auf der Insel Hawaii zu finden sind. Kammaufwärts wurden kuppelförmige Erhebungen mit Höhen bis zu 120 m und 600 m Durchmesser gefunden.

3.4 Philippinen- und Marianengraben

Die bisher dargebotenen Sea-Beam-Ergebnisse betrafen Tiefen bis zu etwa 6.400 m. Die Frage drängt sich auf: Wie arbeitet nun das System im Bereich der größten Tiefen des Weltmeeres, d.h. bei der Vermessung von Tiefseegräben, deren Maximaltiefe bis 11.000 m liegen?

Hierzu seien abschließend zwei Beweisstücke aus Tiefseegräben wiedergegeben, die im September 1982 von MS „Sonne“ im Pazifischen Ozean überquert wurden, und zwar vom Marianengraben (Maximaltiefe an der Überquerungsstelle 9.400 m) und vom Philippinengraben (9.475) (Abb. 7). Sämtliche Registrierungen wurden mir dankenswerterweise von Herrn Kapt. H. Andresen (MS „Sonne“) zur Verfügung gestellt.

4. Ausblick

Aufgrund der bisherigen rechnergesteuerten Kartierungsergebnisse kann festgestellt werden, daß das Multi-Echolot-System Sea-Beam ein ausgezeichnetes

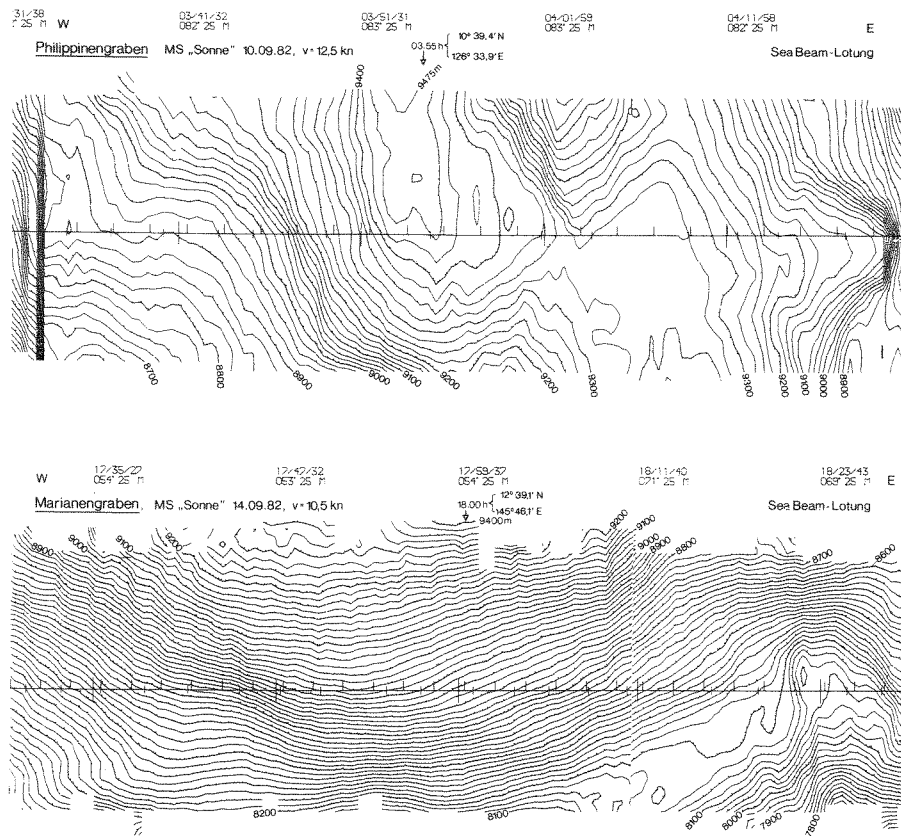


Abb. 7: Sea-Beam-Registrierungen des Forschungsschiffes „Sonne“ aus dem zentralen Bereich zweier Tiefseegräben des Pazifischen Ozeans
oben: W-E-Profil über den Philippinengraben
unten: W-E-Profil über den Marianengraben
 (verkleinerte Wiedergabe).

modernes Hilfsmittel der marin-geomorphologischen Forschung darstellt. Allerdings sollten diese Ergebnisse auch nicht darüber hinwegtäuschen, daß dem System noch einige Mängel anhaften, die vor allem das fehlende Post-Processing an Bord betreffen. Es sollte möglich sein, mit Hilfe eines integrierten Rechners bereits an Bord Sea-Beam- und Navigationsdaten zusammenzuführen und ein Post Processing zu schaffen, das mit der Ausgabe einer endgültigen, korrigierten Tiefenkarte abschließt. Bisher laufen beide Vorgänge noch getrennt ab; es gibt jedoch bereits bei den hierfür kompetenten Firmen und Instituten Überlegungen, welcher Weg einzuschlagen ist, um diese Integration zu erreichen.

5. Literatur

- Bundesministerium für Forschung und Technologie: Geowissenschaftliche und rohstoffwirtschaftliche Erprobung des Multi-Echolotes SEA-BEAM in zentral pazifischen Seegebieten mit MS „Sonne“ (Fahrt SO – 21). Forschungsbericht M 83 – 001, 1983.
- KÖGLER, F.-C. und J. ULRICH: Morphologie und tektonische Strukturen im Bereich der Clarion Fracture Zone, des „Sonne-Seamount“, des Loihi-Seamount und des Puna Ridge. In: BMFT-Forschungsbericht M 83 – 001, 1983.
- ROBB, D.: Multibeam bathymetric swath survey systems. Sea Technol. 23, No. 6, 28 – 31, 1982.
- ULRICH, J. und F.-C. KÖGLER: Zur Topographie und Morphologie des „Sonne-Seamount“ südlich Hawaii. Dt. Hydrogr. Z. 35, H. 6, 239 – 250, 1982.

Anschrift des Verfassers:

Wiss. Direktor Dr. J. ULRICH
 Institut für Meereskunde an der Universität Kiel
 Düsternbrooker Weg 20
 D – 2300 Kiel