

## 7. Zusammenfassung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit war, die Wechselwirkungen zwischen Zirkulation und Bodentopographie am europäischen Kontinentalrand westlich von Irland im Bereich der Porcupine - Bank und Porcupine - Seabight zu untersuchen. Für die Analyse der Wassermassencharakteristik und Strömungsverhältnisse wurden hydrographische Daten und regionale Prozeßstudien mit dem Strömungsmodell SPEM (Sigma - coordinate Primitive Equation Model) durchgeführt. Die vorliegende Arbeit gliederte sich in 3 Themengebiete. Zunächst wurden die Eigenschaften und zeitlichen Veränderungen der Hauptwassermassen untersucht. Der zweite Teil befaßte sich mit der Untersuchung der Ausbreitungswege des SEC (Shelf Edge Current) im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt verschiedener Meßkampagnen. Der Schwerpunkt der Arbeit konzentrierte sich schließlich auf die Auswertung und Interpretation der hydrographischen Messungen im Bereich der Porcupine - Bank. Zusätzlich wurden, mit Hilfe numerischer Prozeßstudien, die wesentlichen Mechanismen der kuppennahen Zirkulation diskutiert und mit den Beobachtungen verglichen.

### Klassifikation der Wassermassen

Die Wassermassen der tiefen Ozeanregionen westlich der Porcupine - Bank und in der Porcupine - Seabight wurden anhand von  $\Theta/S$  - und  $\lambda/S$  - Verteilungen klassifiziert. Die Wassersäule kann im Wesentlichen in 5 Stockwerke untergliedert werden. Die oberflächennahe Schicht wird von ENAW (Östliches Nordatlantikwasser), der warmen, salzreichen Komponente des SPMW (Subpolares Modewasser), eingenommen. Der Kern des ENAW ist in Tiefen von etwa 400 m definiert und durch ein Minimum der potentiellen Vorticity von  $\lambda = 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  westlich der Porcupine - Bank und  $\lambda = 25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  in der Porcupine - Seabight charakterisiert. Das intermediäre Salzgehaltsmaximum auf der Dichtefläche  $\sigma_1 = 32.03 \text{ kgm}^{-3}$  repräsentiert den polwärtigen Arm des MW (Mittelmeerwasser) in der Porcupine - Seabight. Die Tiefenlage des Salzgehaltsmaximums variiert zwischen 1100 dbar in der zentralen Porcupine - Seabight und 800 dbar südlich der Porcupine - Bank. Westlich der Porcupine - Bank sind eindeutige MW - Eigenschaften nicht mehr nachweisbar. Messungen von *Arhan et al.* (1994) belegen, daß der Einfluß von kaltem, salzarmem SAIW im Sommer als Barriere für die Ausbreitung des MW in den Rockall - Kanal wirkt. Dieses saisonale Signal konnte in den Beobachtungen ebenfalls identifiziert werden. Im Juni/Juli 1995 ist westlich der Porcupine - Bank (nördlich von  $52^\circ \text{N}$ ) eine auffällige Salzgehaltsabnahme auf der Dichtefläche des MW zu beobachten,

die in den Beobachtungen vom April/Mai 1994 nicht erkennbar ist. Der Kern des LSW ist durch ein ausgeprägtes Salzgehaltsminimum ( $S \approx 34.90$ ) auf der Dichtefläche  $\sigma_{1.5} = 34.65 \text{ kgm}^{-3}$  charakterisiert und liegt in Tiefen zwischen 1600 dbar westlich der Porcupine - Bank und 1900 dbar in den tiefen Regionen der Porcupine - Seabight. Die tiefsten Stockwerke der nördlichen Porcupine - Tiefsee - Ebene weisen relativ salzreiches ISOW und kaltes, salzarmes LDW auf. Die Salzgehalte des ISOW liegen mit  $S \approx 34.96$  in beiden Untersuchungszeiträumen deutlich unterhalb der Werte, wie sie von *Ellett et al.* (1986) als typisch für den Rockall - Kanal ( $S = 34.99$ ) angegeben werden. Dieses ISOW wird auf dem Weg nach Süden durch Vermischungsprozesse mit LDW stark modifiziert. Das bodennahe Temperatur- und Salzgehaltsminimum des LDW beträgt  $\Theta \approx 2.4^\circ\text{C}$  und  $S \approx 34.92$ . Die Untersuchung der zwischenjährlichen Veränderungen der drei wichtigsten Wassermassen zeigt eine auffällige regionale Instabilität. Während im Gebiet der Porcupine - Seabight zwischen 1994 und 1995 eine deutliche Erwärmung und Salzgehaltszunahme von ENAW, MW und LSW zu beobachten ist, unterliegen diese Wassermassen in den tiefen Ozeanregionen westlich der Porcupine - Bank in diesem Zeitraum einer überwiegenden Abkühlung und Salzgehaltsabnahme. Diese Unterschiede lassen darauf schließen, daß vor allem die tiefen Wassermassen der Porcupine - Seabight in diesem Zeitraum keiner entscheidenden Wassermassenerneuerung ausgesetzt sind.

### **Struktur und Ausbreitungswege des SEC westlich von Irland**

Der Nachweis der Existenz eines kontinuierlichen, polwärts gerichteten Randstromsystems entlang des europäischen Kontinentalrandes und der Bedeutung für den Wärme- und Salzhaushalt der Norwegischen See ist seit geraumer Zeit Bestandteil umfangreicher Untersuchungen. Die Bemühungen konzentrierten sich in diesem Zusammenhang vor allem auf detaillierte qualitative und quantitative Untersuchungen des SEC in Teilregionen des europäischen Kontinentalrandes und sind in *Turrell et al.* (1995) ausführlich zusammengefaßt.

Auf der Grundlage der Beobachtungen, die im Rahmen des SEFOS - Projektes der EU zwischen 1994 und 1995 durchgeführt wurden, sollten im Rahmen dieser Arbeit Struktur und Ausbreitungswege des SEC im Bereich der Porcupine - Bank und der Porcupine - Seabight, einem bisher wenig befahrenen Teilgebiet des SEC, untersucht werden. Nach *Ellett et al.* (1986) umrundet warmes, salzreiches Wasser subtropischen Ursprungs als polwärtiger Randstrom die Südspitze der Porcupine - Bank und wird entlang der westlichen Kuppenflanke der Bank weiter nach Norden in den Rockall - Kanal transportiert. Zwischen Mai und Juli 1995 durchgeführte hydrographische Messungen zeigen den SEC als Kern warmen, salzreichen Wassers niedriger Dichte entlang des irischen Schelfrandes in den oberen 500 m der Wassersäule. Oberhalb der Kuppenflanken der südlichen Ausläufer der Porcupine - Bank existieren in diesem Tiefenbereich weitere Einschlüsse von war-

mem, salzreichem Wasser, die jedoch durch erhebliche Beimischungen von Wassermassen des subpolaren Nordostatlantik modifiziert werden. Diese Eigenschaften sind in ähnlicher Form im April/Mai 1994 ebenfalls zu beobachten und werden durch Phytoplanktonmessungen bestätigt, wonach eine deutliche regionale Trennung verschiedener Arten von Dinoflagellaten zwischen den schelfnahen Gebieten und der unmittelbaren Kuppenregion der Porcupine - Bank erfolgt. Diese Arten können somit als Indikatoren für die Advektion von Wassermassen unterschiedlichen Ursprungs in das Untersuchungsgebiet betrachtet werden und deuten, in Übereinstimmung mit der meridionalen Temperatur- und Salzgehaltsverteilung, darauf hin, daß der Verlauf des SEC in den beobachteten Zeiträumen auf den irischen Schelfrand beschränkt bleibt. Westlich der Porcupine - Bank wird modifiziertes warmes, salzreiches Wasser als sekundärer Randstrom (SSEC) in den Rockall - Kanal transportiert, das aus der Anströmung von Wassermassen resultiert, die im Verlauf des NAC and den westeuropäischen Kontinentalrand transportiert werden. Aus der Kombination von ADCP - Daten und geostrophischen Berechnungen wurde ein Volumentransport von 0.5 Sv ermittelt, die im Juni/Juli 1995 oberhalb von 500 m mit dem SEC durch die flachen Gebiete zwischen der Porcupine - Bank und dem Irischen Schelf in den südlichen Rockall - Kanal transportiert werden. Die Transportraten für den SSEC liegen mit 2.5 Sv deutlich darüber. Die Struktur des Strömungsfeldes der Porcupine - Seabight ist durch eine südwärts gerichtete Rezirkulation in der Größenordnung von etwa 4 Sv gekennzeichnet. Ein Vergleich mit Ergebnissen aus verankerten Strömungsmessungen (*Pingree et al.*, 1996; *White et al.*, 1997) in diesem Gebiet zeigt eine gute Übereinstimmung. Der SEC erreicht im Winter ein Maximum und bildet in diesem Zeitraum zwischen Goban - Spur und der nordwestlichen Porcupine - Bank ein geschlossenes Randstromsystem. Zwischen Frühling und Sommer erfolgt hingegen eine deutliche Abschwächung des SEC, die vor allem im Bereich des irischen Schelfrandes zu einer zeitweiligen Strömungsumkehr führt (*Pingree et al.*, 1996). Diese Abschwächung resultiert aus der sog. SOMA - Instabilität des Windfeldes und dem Eintrag von Wassermassen des NAC in die Porcupine - Seabight.

### **Beobachtungen zu Wechselwirkungen zwischen der Topographie der Porcupine - Bank und umgebenden Strömungen**

Im Bereich unterseeischer Meeresrücken können spezielle Mechanismen der Wechselwirkung zwischen Bodentopographie und umgebender Strömung zu auffälligen Anomalien des kuppennahen Massen- und Strömungsfeldes führen. In diesem Zusammenhang wurden in zahlreichen Beobachtungen und Modellstudien an isolierten Kuppen (siehe z.B. *Chapman und Haidvogel*, 1992; *Kunze und Toole*, 1997; *Beckmann und Haidvogel*, 1997) als wichtigste Prozesse die Bildung einer Taylor - Kappe durch eine stetige Anströmung und die resonante Anregung topographischer Wellen durch eine eintägige Gezeitenströmung identifiziert. In beiden Fällen entsteht eine antizyklonale Umströmung der Kuppe, deren Amplitude von der Stärke der Anströmung, der Kuppengeometrie und der Stärke der

Schichtung der kuppennahen Wassersäule abhängt.

Die Beobachtungen auf der Grundlage von CTD - Messungen im Bereich des Kuppenplateaus der Porcupine - Bank zeigen in allen befahrenen Zeiträumen eine auffällige Deformation des Massenfeldes in unmittelbarer Umgebung der Banktopographie. Die Deformation ist durch eine Aufwölbung der Isothermen und Isopyknen entlang der Kuppenflanken der Bank charakterisiert, in Verbindung mit einem Einschluß kalten Wassers hoher Dichte oberhalb der Kuppenspitze. Die Auswertung geostrophischer Strömungsberechnungen auf der Basis von CTD - Daten der Meßkampagnen H56 (März/April 1994), V144/1 (April/Mai 1994) und V153 (Juni/Juli 1995) sowie der ADCP - Messungen vom Juni/Juli 1995 beschreibt eine antizyklonale, bodenintensivierte Zirkulationszelle entlang der Kuppenflanken der Porcupine - Bank. Dieses Phänomen ist typisch sowohl für die Existenz einer Taylor - Kappen - Zirkulation (*Dooley*, 1984), als auch für die Restströmung nach einer Anregung topographischer Wellen durch eine eintägige Gezeitenströmung (*Brink*, 1990). Der Grad der Bodenintensivierung zeigt eine direkte Abhängigkeit von der Stärke der Schichtung. Der nachhaltige Einfluß der winterlichen Konvektion in Kombination mit schweren Sturmereignissen vor der Probennahme ist im März/April 1994 in Form einer nahezu homogen durchmischten Schicht in den oberen 200 m der Wassersäule erkennbar. Als Folge davon liegen die vertikalen Gradienten der geostrophischen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen der Meeresoberfläche und dem zentralen Kuppenplateau (170 m) bei maximal  $1 \text{ cm s}^{-1}$  und die Strömung kann als nahezu barotrop betrachtet werden. Mit zunehmender Intensität der Schichtung nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zum Boden hin zu. Mit Ausbildung der sommerlichen Dichtesprungschicht erreicht die Geschwindigkeitsscherung ihre größten Amplituden und es bildet sich ein bodennahes Maximum der Strömungsgeschwindigkeit, das als isoliertes Signal auf die unmittelbare Kuppenregion beschränkt bleibt. Allein aus den Messungen ist eine eindeutige Identifizierung des für die Porcupine - Bank relevanten Mechanismus nicht möglich. Empirische Kriterien für die Bildung von Taylor - Kappen an achsensymmetrischen Kuppen (*Johnson*, 1978; *Owens und Hogg*, 1980) sind an der Porcupine - Bank erfüllt, können aufgrund der unregelmäßigen Geometrie der Bank jedoch nur unter Vorbehalt als allgemeingültig angesehen werden. Die ADCP - Messungen im Juni/Juli 1995 liefern Hinweise für die Möglichkeit der Anregung topographischer Wellen im Bereich der Kuppe als verantwortlichen Mechanismus für die beobachteten Anomalien des Strömungsfeldes. Die Amplitude der eintägigen Gezeitenströmung ist im Bereich der Ostflanke des Kuppenzentrums der Porcupine - Bank gegenüber den angrenzenden Regionen deutlich verstärkt. Ähnliche Beobachtungen an isolierten Kuppen wurden als Folge der Anregung topographischer Wellen im Bereich der Kuppentopographie durch Resonanz mit der periodischen Gezeitenströmung interpretiert (*Hunkins*, 1986; *Chapman*, 1989). Die gezeitenkorrigierten ADCP - Strömungen unterscheiden sich darüberhinaus erheblich von den geostrophischen Strömungen dessel-

ben Meßzeitraums. Die ADCP - Strömungen weisen vor allem im Bereich des flachen Kuppenzentrums bei  $53.5^{\circ}\text{N}$  deutlich erhöhte Amplituden gegenüber den geostrophischen Strömungen auf. Die Differenz beträgt etwa  $7\text{ cm s}^{-1}$  entlang der westlichen Kuppenflanke und fällt mit  $11\text{ cm s}^{-1}$  entlang der östlichen Kuppenflanke besonders deutlich aus.

### **Numerische Prozeßstudien zu Wechselwirkungen zwischen der Topographie der Porcupine - Bank und umgebenden Strömungen**

Die mit dem numerischen Strömungsmodell SPEM durchgeführten Prozeßstudien hatten das Ziel, die an der Porcupine - Bank beobachteten Anomalien des Strömungsfeldes in Bezug auf die Bildung einer Taylor - Kappe bzw. die resonante Anregung topographischer Wellen durch eine periodische Gezeitenströmung zu reproduzieren und zu bewerten. Einen wesentlichen Aspekt bildete dabei die Untersuchung des Einflusses variabler Schichtungsverhältnisse auf die kuppennahe Zirkulation. Die Modellkonfiguration entspricht in weiten Teilen den Experimenten von *Haidvogel et al.* (1993) und *Beckmann und Haidvogel* (1997) und entspricht einem periodischen Kanal auf der f - Ebene. Die grundlegende Dimensionierung der Modelltopographie orientiert sich an der Originaltopographie des GEBCO - Datensatzes (*BODC*, 1994) und berücksichtigt vor allem die zonale Asymmetrie der Porcupine - Bank. Thermodynamische Effekte werden im Modell durch eine lineare Zustandsgleichung für die Dichte beschrieben, die weitestgehend an die Situation im Bereich des zentralen Kuppenplateaus während der verschiedenen Meßkampagnen angepaßt wurden. In Anlehnung an *Hogg* (1973) wurden die Fälle einer schwachen (März/April 1994), moderaten (April/Mai 1994) und starken Schichtung (Juni/Juli 1995) unterschieden und gegenüber den Beobachtungen stärker idealiert. Das Modell wird durch eine stetige bzw. periodische Anströmung mit eintägiger Periode in Form einer entsprechenden Randbedingung für die barotrope Stromfunktion  $\Psi$ . Der Fluß durch den Modellkanal wird in Nord - Süd - Richtung angenommen und am südlichen Eingang des Kanals initiiert. Wind- einfluß, halbtägige Gezeiten sowie zonal fortschreitende Gezeitenwellen werden ebenso vernachlässigt wie vertikale oder horizontale Strömungsscherungen.

Die Modellergebnisse bestätigen, daß die wesentlichen Eigenschaften der kuppennahen Zirkulation durch Wechselwirkungen zwischen der unregelmäßigen Kuppengeometrie der Porcupine - Bank und der Intensität der Schichtung der kuppennahen Wassersäule charakterisiert ist. Im Fall einer stetigen Anströmung und schwacher Schichtung wird die Bildung einer geschlossenen Antizyklone, vergleichbar zu den Effekten an einer Kuppe mit geringer Kuppenhöhe (*Chapman und Haidvogel*, 1992), unterdrückt. Mit zunehmender Schichtung entwickelt sich eine geschlossene Umströmung der Porcupine - Bank, deren Zentrum leicht stromabwärts verschoben ist. Dabei wird die vertikal barotrope Säulenform des Geschwindigkeitsfeldes in eine nicht mehr tiefenunabhängige Kegelform überführt. Die Umströmung der Bank erfolgt extrem asymmetrisch. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind entlang der

westlichen Kuppenflanke um etwa den Faktor 3 gegenüber der Amplitude der Anströmung erhöht und erreichen  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Die Rezirkulation entlang der östlichen Kuppenflanke weist hingegen Strömungsamplituden von maximal  $3 \text{ cm s}^{-1}$  auf. Eine periodische Anströmung der Bank führt zu einer resonanten Anregung topographischer Wellen im Bereich des Kuppenzentrums. Die nichtlineare Rektifizierung dieser Wellen erzeugt eine zeitlich gemittelte Restströmung in Form einer antizyklonalen Umströmung der Bank. Ausgehend von einer Amplitude der Anregung von  $1 \text{ cm s}^{-1}$  erreichen die Strömungsamplituden bei schwacher Schichtung  $22 \text{ cm s}^{-1}$  entlang der westlichen Kuppenflanke bzw.  $30 \text{ cm s}^{-1}$  entlang der östlichen Kuppenflanke. Im Unterschied zu einer stetigen Anströmung der Bank ist somit eine umgekehrt asymmetrische Zirkulationszelle zu beobachten. *Beckmann* (1995) zeigte, daß die Kuppengeometrie das Resonanzverhalten topographischer Wellen erheblich mitbeeinflusst. An Kuppen mit nahezu vertikalen Flanken bzw. unendlicher kleiner Amplitude ist keine Resonanz zu beobachten. In allen anderen Fällen dominiert das Gefälle der Kuppenflanken. Der vergleichsweise geringe Neigungswinkel der östlichen Kuppenflanke der Porcupine - Bank erfüllt somit die Voraussetzungen für ein ideales Resonanzverhalten. Mit zunehmender Schichtungsintensität werden die Strömungsamplituden der antizyklonalen Restströmung erheblich gedämpft, während der Einfluß der Kuppengeometrie spürbar nachläßt. Bei starker Schichtung nimmt das Strömungsmaximum entlang der westlichen Kuppenflanke auf  $10 \text{ cm s}^{-1}$ , entlang der östlichen Kuppenflanke auf  $12 \text{ cm s}^{-1}$  ab. Gleichzeitig wird die Strömung in hohem Maße bodenintensiviert. Ein quantitativer Vergleich der Modellergebnisse mit den ADCP - Messungen für die hydrographische Situation im Juni/Juli 1995 wäre aufgrund der erheblichen Einschränkungen der Modellkonfiguration spekulativ. Die auffällige Übereinstimmung der Strukturen der Antizyklone zwischen den Beobachtungen und den Modellergebnissen für eine periodische Anströmung der Bank bei starker Schichtung im Bereich des zentralen Kuppenplateaus bei  $53.5^\circ \text{N}$  deutet jedoch darauf hin, daß zumindest in diesem Zeitraum nur die nichtlineare Rektifizierung resonant angeregter topographischer Wellen als wesentlicher Mechanismus in Frage kommt.