

### III. Quantitative Messung der Sandwanderung an der Brandungsküste vor Westerland/Sylt

Von R ü d e g e r R e i n h a r d

#### Inhalt

1. Einleitung . . . . .	77
2. Radioaktive Markierung des Sandes . . . . .	80
3. Transport und Einbringung des radioaktiven Sandes . . . . .	81
4. Ablauf der Messungen . . . . .	82
5. Quantitative Auswertung der Meßergebnisse . . . . .	85
5.1. Berücksichtigung des Nulleffekts . . . . .	85
5.2.-4. Berücksichtigung der Vergrabung des radioaktiven Sandes . . . . .	87
5.5. Umrechnung der Zählrate in Aktivität . . . . .	87
5.6. Halbwertszeitkorrektur . . . . .	88
5.7. Umrechnung der Aktivität in radioaktiv markierte Sandmenge . . . . .	88
5.8. Umrechnung in Gramm radioaktiv markierter Sand pro m <sup>2</sup> . . . . .	89
6. Fehlerabschätzung . . . . .	89
7. Diskussion der Ergebnisse . . . . .	90
7.1. Allgemeine Überlegungen zu den Isolinien . . . . .	90
7.2. Ergebnisse aus den im Herbst 1970 durchgeführten Messungen . . . . .	97
7.3. Ergebnisse aus den im Frühjahr 1971 durchgeführten Messungen . . . . .	98
8. Zusammenfassung . . . . .	106
9. Schriftenverzeichnis . . . . .	106

#### Summary

*Two samples of radioactivated sand were deposited offshore Westerland/Sylt on September 29, 1970. The sand transport was measured in intervalls of a few weeks until June 1971. The results are shown in the form of isolines on 10 charts. Of special interest is the last measurement in May/June 1971 since we obtained quantitative results for the first time, applying the theory outlined in paper I and the new probe described in paper II. It was then possible to find 24 kg and 17 kg of the originally deposited two times 100 kg of radioactivated sand. The mean burial depth is found to be 5-7 cm.*

*In general, the results depend strongly on the location of the deposition point. In the southern area the transport is preferably to the south, in the northern area to the north, thus revealing the existence of a "neutral" point. The transport in the north is stronger than in the south. In addition small quantities of sand are transported seaward.*

*Careful error calculations are included as well as a first attempt towards a theoretical understanding of the transport of sand.*

#### 1. Einleitung

Von allen Inseln an der Westküste von Schleswig-Holstein ist Sylt den Brandungs- und Gezeitenkräften am meisten ausgesetzt, da diese Insel dem Festland am weitesten vorgelagert ist. Der Sandabtrag ist im Mittelteil der Insel so stark, daß von Strand und Küste durchschnittlich 1 m pro Jahr verlorengehen. Deshalb kommt der Erfassung der Sandwanderung vor Sylt über das Interesse hinaus, das allgemein an der Erforschung von Sandwanderungsvorgängen besteht, eine erhöhte Bedeutung zu (Abb. 1 und 2).



Abb. 1. Luftbild der Insel Sylt. Deutlich ist der Knick in der Mitte bei Westerland zu erkennen. Dieser Punkt ist den Angriffen des Meeres am meisten ausgesetzt, der Sandabtransport ist hier am stärksten

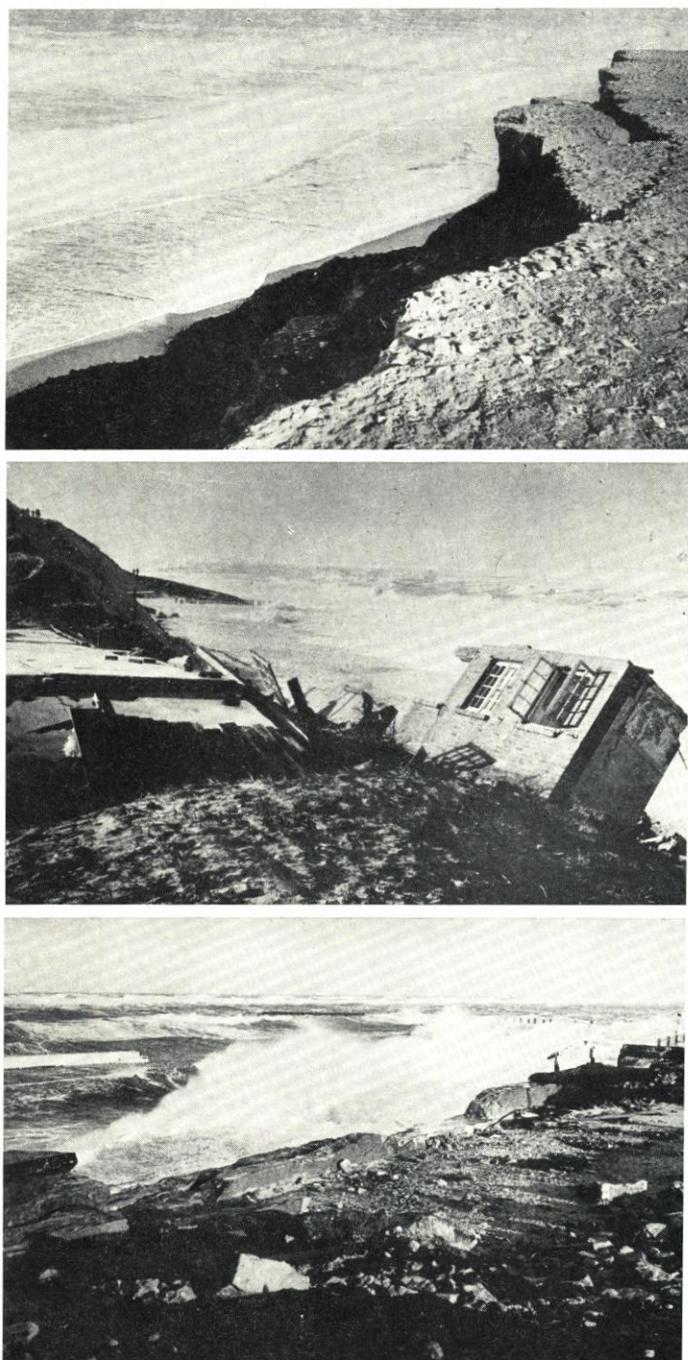


Abb. 2. Abbruch des Steilufers, von Häusern und Einbrüche auf der befestigten Kurpromenade nach einer Sturmflut. Wegen des fehlenden Sandes vor der Küste ist die Wirkung der Wellen ungebrochen

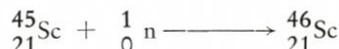
Die ersten Messungen der Sandbewegung vor Sylt mit radioaktiven Tracern wurden bereits 1963 durchgeführt (R. Dolezal, M. Petersen, et al., 1965 und Bericht II, Übersichtstabelle).

Da für 1972 erstmalig eine aktive Küstenschutzmaßnahme in Form einer Sandvorspülung geplant war, wurde vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Gutachtergruppe Sylt, im Teilgutachten A „Untersuchungs- und Meßtechnik“ eine erneute Messung der Sandwanderung im Herbst 1970 mit radioaktiven Tracern für erforderlich gehalten. Diese Messung sollte bis in das Frühjahr 1971 hinein fortgesetzt werden.

## 2. Radioaktive Markierung des Sandes

Die Markierung des Sandes mit  $^{46}\text{Sc}$  wurde von den Farbwerken Höchst durchgeführt.

Zunächst wird im Reaktor durch Neutronenbestrahlung das Radioisotop  $^{46}\text{Sc}$  erzeugt.



Bei einem Neutronenfluß von einigen  $10^{12}$  Neutronen/cm<sup>2</sup> sec beträgt die Bestrahlungsdauer ca. 4 Wochen, um bei einigen Gramm  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  eine Aktivität von 4-5 Ci zu erreichen. Das Scandiumoxid wird dann im Labor mit Salzsäure behandelt.



Der mit 80%igem Alkohol aufgeschlammte Seesand wird unter Rühren tropfenweise mit dieser schwach salzsauren Lösung von  $\text{ScCl}_3$  ( $\text{pH} = 2-7$ ) versetzt.

Nach Zugabe von konzentriertem Ammoniak schlägt sich Scandiumhydroxid auf dem Sand nieder.



Durch dieses Verfahren werden über 99 % der angebotenen Radioaktivität von dem zu markierenden Sand aufgenommen. Die Verwendung von  $\text{NH}_4\text{OH}$  hat gegenüber  $\text{NaOH}$  den Vorteil, daß sich das  $\text{NH}_4\text{Cl}$  im Gegensatz zum  $\text{NaCl}$  verflüchtigt.

Der so behandelte Sand wird bis zur Trockne eingedampft.



Der getrocknete Sand wird anschließend im Tiegelofen 30 Minuten auf  $800^\circ$  erhitzt.

Das Scandiumoxid geht mit dem Sand eine nahezu abriebfeste Verbindung ein, da es infolge seiner guten Verträglichkeit mit dem Kristallgitter des  $\text{SiO}_2$  in die Oberfläche des Sandkorns hineindiffundiert. Die aufgebraute Schicht ist außerordentlich dünn, so daß die Oberfläche der Sandkörner nicht verändert wird. Trotzdem lassen sich wegen der fast 100%igen  $\gamma$ -Ausbeute des  $^{46}\text{Sc}$  (siehe Zerfallsschema, Bericht I) hohe spezifische Aktivitäten erreichen.

Die auf diese Weise aktivierten Sandproben gaben bei 60stündigem Schütteln in Seewasser weniger als 0,05 % ihrer Aktivität an das Meerwasser ab (Schüttelfrequenz: 80 Bewegungen pro min). Die mechanischen Parameter Schüttdichte, Rütteldichte, spez. Gewicht, Durchlaufzeit durch ein Glasrohr ( $\phi$  3 mm) von natürlichem und radioaktiv markiertem Seesand stimmen im Rahmen der Meßgenauigkeit überein.

Eine völlig homogene Durchmischung und gleichmäßiges Abschlagen des  $\text{Sc}(\text{OH})_3$  auf den Sandkörnern kann nicht erreicht werden, so daß die Aktivitätsunterschiede zweier

gleich großer Sandkörner erheblich sein können. Es ist deshalb darauf zu achten, daß im Erfassungsbereich der Meßsonde immer noch genügend viele Sandkörner liegen, um die Unterschiede nach Möglichkeit auszumitteln. Wie in Abschnitt 5.7 erläutert wird, muß sich die gemessene Zählrate deutlich vom Nulleffekt abheben, damit der Meßpunkt ausgewertet wird. Es läßt sich zeigen, daß diese Bedingung nur erfüllt werden kann, wenn sich im Erfassungsbereich der Meßsonde immer mehr als 100 radioaktiv markierte Sandkörner befinden. Bei 100 Sandkörnern wird der Unterschied in der Aktivität gleich großer Sandkörner statistisch vollkommen ausgemittelt.

Die beschriebene Methode der Aktivierung hat jedoch in der bisher angewendeten Art und Weise einen schwerwiegenden Nachteil. Da die Aktivität auf die Oberfläche der Sandkörner aufgebracht wird, erfolgt die Aktivierung oberflächenproportional und nicht volumenproportional. Volumenproportionale Markierung ist jedoch eine grundsätzliche Voraussetzung für jede quantitative Auswertung. Dieser Nachteil läßt sich dadurch leicht umgehen, daß vor der Aktivierung die einzelnen Kornfraktionen ausgesiebt werden und dann jeweils gleiche Gewichtsmengen mit der gleichen Aktivitätsmenge behandelt werden. Ein anschließendes Vermischen der aktivierten Kornfraktionen ist nicht erforderlich, da diese Durchmischung durch die Wanderungsvorgänge auf dem Meeresgrund von selbst erfolgt.

Die von den Farbwerken Höchst im Herbst 1970 angelieferten beiden Chargen von je 100 kg mit je 3 Ci radioaktiv markierten Seesandes waren allerdings noch nicht volumenproportional aktiviert, so daß die im folgenden beschriebene quantitative Auswertung nur mit dieser wesentlichen Einschränkung verstanden werden darf.

### 3. Transport und Einbringung des radioaktiven Sandes

Unmittelbar nach seiner Abkühlung wird der radioaktiv markierte Sand in ein Sandgefäß gefüllt, das aus Strahlenschutzgründen in einem geschlossenen Abschirmbehälter steht. Der Sand läuft chargenweise aus dem Produktionsabzug durch eine mit Dichtung aufgesetzte Rohrleitung in das Sandgefäß, während durch Absaugen über eine zweite Öffnung im Deckel Unterdruck im Sandgefäß aufrechterhalten wird.

Der Abschirmbehälter ist für den Bahntransport als Typ - B - Verpackung ausgelegt (Transport von 2 bis 200 Ci von radioaktiven Stoffen der Radiotoxizitätsgruppe III, wozu auch  $^{46}\text{Sc}$  gehört, Dosisleistung  $\leq 200$  mr/h an der Oberfläche des Abschirmbehälters und  $\leq 10$  mr/h in 1 m Entfernung). Die Wandstärken betragen bis zur Höhe der Sandfüllung 2 cm Stahl und 7 cm Blei. Bei einem Inhalt von 100 kg Seesand, markiert mit 3,2 Ci  $^{46}\text{Sc}$ , wurden an der Oberfläche 40 mr/h und in 1 m Abstand 3 mr/h gemessen.

Das Sandgefäß ist aus 5 mm starkem Stahlblech hergestellt, der Durchmesser beträgt 45 cm, die Höhe 73 cm. Das Sandgefäß wiegt 80 kg, mit Traverse und 100 kg Seesand ergibt sich ein Gesamtgewicht von 195 kg.

Das Sandgefäß ist so konstruiert, daß es durch einen Hubschrauber am Einsatzort aus dem geöffneten Abschirmbehälter herausgezogen werden kann und direkt zur vorher mit Bojen bezeichneten Einbringestelle auf See geflogen werden kann (Abb. 4). Während des Fluges hängt das Sandgefäß über eine 1,20 m lange Traverse an 2 Trageilen und locker an einem Zugseil. Wenn das Sandgefäß auf dem Meeresboden abgesetzt ist, lockern sich die Trageile. Sie können nun vom Piloten des Hubschraubers mechanisch ausgeklinkt werden. Wenn das Sandgefäß wieder hochgezogen wird, hängt es nur noch am Zugseil,

das so angebracht ist, daß es den Eimer umdreht und die Verriegelung für den Deckel öffnet. In 2 m Wassertiefe ist der Wasserdruck jedoch bereits größer als der vom Sand auf den Deckel ausgeübte Druck. Ein Überdruckventil sorgt daher unter Wasser für Druckausgleich, damit der Deckel sich unter dem Gewicht des Sandes öffnen kann. Anschließend wird das Sandgefäß durch mehrmaliges Eintauchen gespült.

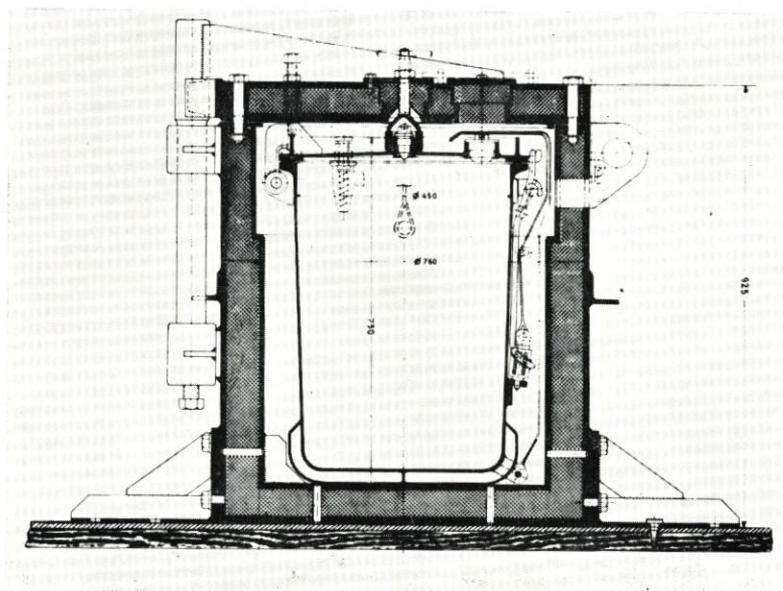


Abb. 3. Abschirmbehälter mit Sandgefäß zum Transport von radioaktiv markiertem Sand

Am 29. September 1970 wurden auf diese Weise an zwei in den Karten mit „Sc“ bezeichneten Stellen je 100 kg mit 3 Ci  $^{46}\text{Sc}$  radioaktiv markierter Seesand eingebracht.

#### 4. Ablauf der Messungen

Das Meßverfahren ist so angelegt, daß die Meßsonde, die an einem 10–20 m langen Tragseil unter einem Hubschrauber hängt, vom Hubschrauber auf dem Meeresboden abgesetzt wird, dort in der Regel 1 min lang die Zählrate mißt, bevor sie dann vom Hubschrauber durch Steigflug wieder hochgezogen wird. Der Hubschrauber fliegt danach zum nächsten Meßpunkt, der im Mittel 50 m vom vorigen entfernt liegt.

Die Meßpunkte einer Meßreihe liegen auf den „Profilen“, das sind küstennormale, an Land eingefluchtete Linien im Abstand von 50 oder 100 m. Die Abstände zweier Punkte auf einem Profil können frei gewählt werden, sie richten sich nach den jeweils vorher gemessenen Zählraten.

Während einer Messung wird der Ort des Hubschraubers von 3 einfachen Theodoliten durch „Vorwärtseinschnitten“ über feste vermessene Basen festgestellt. Aus dem sich ergebenden Fehlerdreieck läßt sich die Ungenauigkeit der Ortsbestimmung der mit dieser Methode bestimmten Meßpunkte bei Entfernungen um 1000 m auf  $\pm 5$  m festlegen.

Schon vor dem Einbringen des radioaktiven Sandes wurde der Nulleffekt auf dem

Meeresboden bestimmt. Da sich der radioaktive Sand nicht sofort über größere Strecken ausbreitet, wurde der Nulleffekt auch am Tag des Einbringens und an den folgenden Tagen gemessen. Insgesamt wurden 68 Meßpunkte für die Bestimmung des Nulleffektes herangezogen.

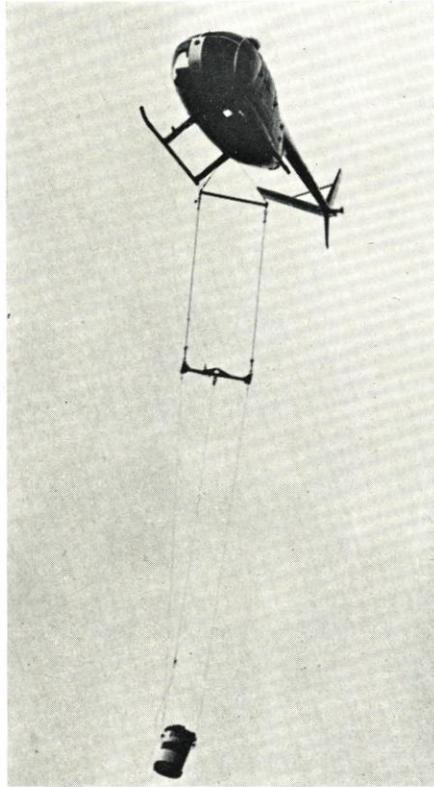


Abb. 4. Entnahme des Sandtransportgefäßes aus dem Bleiabschirmbehälter und Transport zum Einbringepunkt mit einem Hubschrauber. Dadurch wird die Strahlenbelastung auf ein Minimum gesenkt

Bei den im Herbst 1970 durchgeführten Messungen wurden noch die beiden älteren Meßsonden verwendet, die im Bericht II in der Einleitung beschrieben sind. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse wurden ausschließlich mit der älteren dieser beiden Sonden gemessen.

Der damit gemessene Nulleffekt lag im gesamten Untersuchungsgebiet zwischen 100 und 200 Imp/min. Dabei wurden die höheren Zählraten im flacheren Wasser registriert. Die Abweichungen des Nulleffektes bei Meßpunkten gleicher Tiefe waren gering, sie lagen im großen und ganzen innerhalb der durch eine Normalverteilung gegebenen Grenze. Als obere Grenze des Nulleffektes wurden für die folgenden Messungen 200 Imp/min festgelegt.

Mit einem Kontaminationsmonitor FHT 111 C wurde der Strand am 29. 9., dem Tag des Einbringens, auf seine natürliche Radioaktivität überprüft. Der Nulleffekt lag hier bei 200–240 Imp/min. Während der gesamten Meßdauer bis Anfang November wurde am Strand keine Erhöhung dieser Impulsrate registriert.

Tabelle 1  
Übersicht über die im Herbst 1970 durchgeführten Messungen

Datum	D+	Einbringe- punkt	Meßpunkte mit		Karte	Nr.
			Nulleffekt	Aktivität		
Okt. 5.	6	Süd	25	3	1	
Okt. 6.	7	Nord	22	2	2	
Okt. 15.	16	Süd	57	35	3	
Okt. 16./17.	17/18	Nord	60	89	4	5
Okt. 31.	32	Süd	52	31	6	
Nov. 2.	34	Süd*)	37	18	7	

\*) Es wurde wieder der südliche Einbringspunkt vermessen, weil am 1. November der stärkste Sturm wehte, wie aus der Windtabelle ersichtlich ist.

Tabelle 2  
Tabelle der täglichen Mittelwerte der Windrichtung und Geschwindigkeit in Westerland/Sylt  
in der Zeit 29. 9. 1970 bis 3. 11. 1970

Datum	Richtung in Grad	Geschw. in Knoten
29. 9.	161	10,0
30. 9.	240	8,6
1. 10.	292	9,7
2. 10.	268	15,7
3. 10.	331	18,0
4. 10.	282	5,8
5. 10.	237	12,6
6. 10.	194	13,3
7. 10.	190	8,8
8. 10.	210	7,0
9. 10.	190	2,1
10. 10.	161	2,9
11. 10.	114	7,3
12. 10.	109	13,4
13. 10.	124	4,3
14. 10.	92	7,4
15. 10.	193	1,9
16. 10.	236	3,2
17. 10.	212	10,0
18. 10.	247	14,9
19. 10.	265	22,0
20. 10.	283	11,3
21. 10.	350	10,0
22. 10.	354	8,6
23. 10.	78	3,0
24. 10.	254	8,6
25. 10.	262	14,4
26. 10.	293	16,4
27. 10.	314	6,6
28. 10.	261	13,0
29. 10.	246	5,4
30. 10.	256	17,0
31. 10.	259	11,0
1. 11.	267	23,8
2. 11.	96	1,0
3. 11.	258	10,8

Bei den Karten wurden die Punkte gleicher Zählrate durch Isoimpulslinien verbunden. Aus ihnen lassen sich die bevorzugten Wanderungsrichtungen erkennen. Für das Zeichnen von Isoimpulslinien ist es ohne Bedeutung, ob einfach die gemessene Zählrate  $J$  oder die Zählrate  $J_0$ , die durch Abzug des Nulleffekts und anschließende Halbwertszeitkorrektur berechnet wird, aufgetragen wird.

$$J_0 = (J - N) \exp(t \ln 2 / T_{1/2})$$

Wie man sieht, ist  $J_0$  direkt proportional zu  $J$ . Aus diesem Grunde wurden für die Darstellung der Isoimpulslinien die gemessenen Zählraten verwendet. Die äußerste Isoimpulslinie trennt das Gebiet zwischen Aktivität und Nulleffekt (200 Imp/min).

Die am 2. November 1970 abgebrochenen Messungen wurden am 20. Mai 1971 mit der inzwischen fertiggestellten neuen Meßsonde (Beschreibung im Bericht II) wieder aufgenommen.

Tabelle 3  
Übersicht über die im Frühjahr 1971 durchgeführten Messungen

Datum	D+	F <sub>h</sub>	Einbringepunkt	Meßpunkte mit Nulleffekt	Aktivität	Karte Nr.
Mai 20.-23. und Juni 2.-3.	233-236	6,8-7	Süd und Nord	169	26*) 110	8 10
	245-246	7,6			13*)	9

\*) Mit diesen Meßpunkten wurde das in Bericht I beschriebene Verfahren der quantitativen Auswertung durchgeführt. Die in die Karten 6 bzw. 7 eingetragenen Werte sind Gramm radioaktiv markierter Sand/m<sup>2</sup>.

## 5. Quantitative Auswertung der Meßergebnisse

Die Umrechnung der gemessenen Zählraten in Gramm radioaktiv markierten Sandes pro m<sup>2</sup> geht in folgenden Schritten vor sich:

1. Abzug des Nulleffekts (bzw. bei sehr hohen Zählraten Totzeitkorrektur)
2. Berechnung des Verhältnisses der Zählraten in den beiden Bereichen (Photo- und Comptonbereich)
3. Bestimmung der mittleren Vergrabungstiefe  $x$  mit Hilfe der Eichkurve
4. Korrektur der in den beiden Bereichen gemessenen Zählrate mit Hilfe der Absorptionskurven und Umrechnung auf einen einheitlichen Wert
5. Umrechnung des so erhaltenen Mittelwertes in Aktivität
6. Halbwertszeitkorrektur
7. Umrechnung der Aktivität in die entsprechende radioaktiv markierte Sandmenge
8. Umrechnung in Gramm radioaktiv markierte Sandmenge pro m<sup>2</sup>.

### 5.1. Berücksichtigung des Nulleffektes

Wie im Bericht II, 4.2 gezeigt wird, ist die Abnahme des Nulleffektes mit der Wassertiefe  $w$  näherungsweise von der Form

$$\text{im Bereich I : } N_I = 90 \exp(-0,4w) + 90$$

$$\text{im Bereich II : } N_{II} = 40 \exp(-0,4w) + 30$$

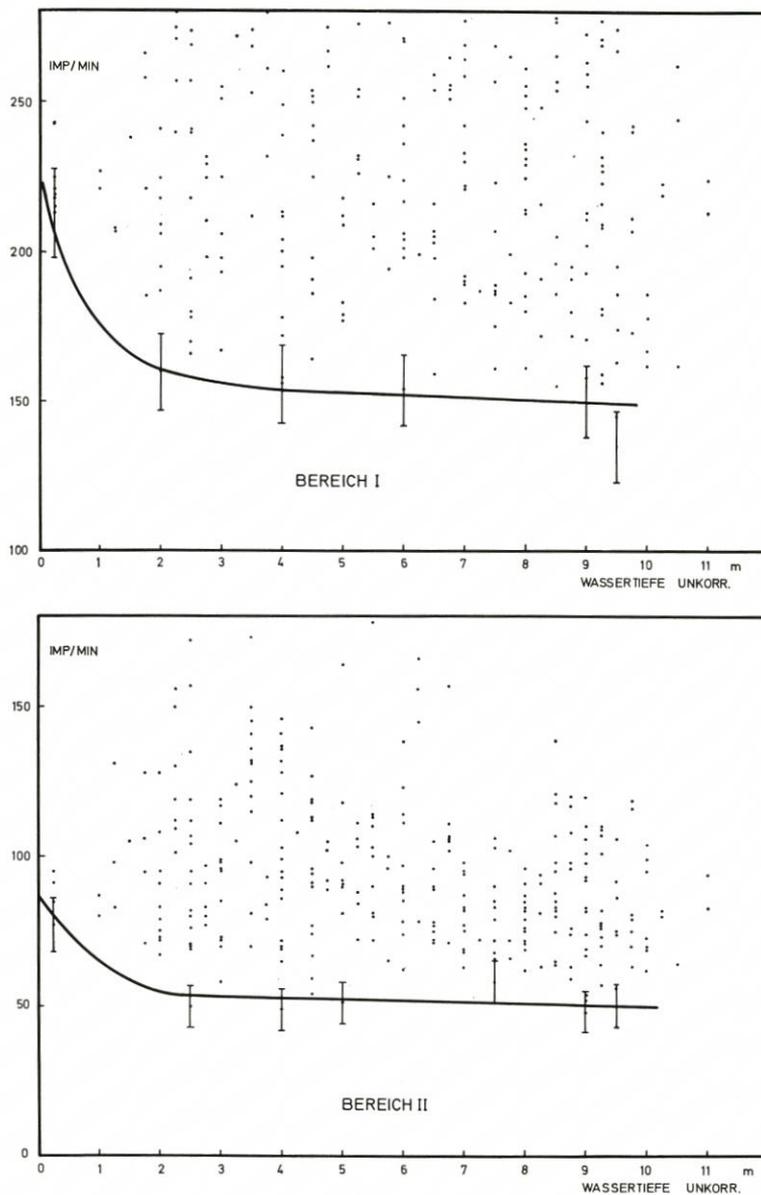


Abb. 5. Nulleffekt an Meßpunkten verschiedener Wassertiefe. (Die unkorrigierte Wassertiefe nimmt als Bezugsniveau das Tiefenmeßgerät in der Sonde, so daß die wirklichen Wassertiefen ungefähr 0,5 m größer sind.)

Diese Formeln wurden aus Messungen, die im Kieler Hafenbecken durchgeführt wurden, abgeleitet.

Bei den Westerlander Nulleffektmessungen stand die Meßsonde immer auf dem Meeresboden, so daß ein konstanter Wert entsprechend der Sandaktivität addiert werden muß. Die Bestimmung dieses Wertes aus den Nulleffektmessungen im Mai/Juni 1971

war besonders schwierig, da das gesamte Untersuchungsgebiet schwach mit Aktivität durchsetzt zu sein schien. Um trotzdem den Nulleffekt abschätzen zu können, wurden die gemessenen Zählraten in Abhängigkeit von der Wassertiefe aufgetragen.

Als Nulleffekt wurde die untere Begrenzung all dieser Punkte angesehen. Aus dem Vergleich der Werte am unteren Rand mit der im Kieler Hafen aufgenommenen Kurve folgt, daß die Westerländer Werte im Bereich I um etwa 40 Imp/min und im Bereich II um etwa 10 Imp/min höher liegen.

Daraus ergibt sich für die Abhängigkeit des Nulleffekts von der Wassertiefe

$$\text{im Bereich I : } N_I = 90 \exp(-0,4w) + 130$$

$$\text{im Bereich II : } N_{II} = 40 \exp(-0,4w) + 40$$

Diese Kurvenverläufe sind in Fig. 5 dargestellt. Aus ihnen wurden die Nulleffekte für die weiteren Berechnungen entnommen.

Nur Meßpunkte, deren Zählrate  $J + N$  in den beiden Bereichen nach Abzug des 3  $\sigma$  Konfidenzintervalls noch größer als der nach diesen Formeln errechnete Nulleffekt war, die also mit 99,7%iger Sicherheit kein Nulleffekt waren, wurden als Meßpunkte mit „Aktivität“ bezeichnet und für die Auswertung verwendet.

$$\text{Für sie gilt also } J_I + N_I - 3 \sqrt{J_I + N_I} > N_I$$

$$\text{und gleichzeitig } J_{II} + N_{II} - 3 \sqrt{J_{II} + N_{II}} > N_{II}$$

#### 5.2.-4. Berücksichtigung der Vergrabung des radioaktiven Sandes

Das Verfahren der Bestimmung einer mittleren Vergrabungstiefe und der damit möglichen Zählratenkorrektur wird im Bericht I ausführlich erläutert. Wichtig ist, daß die Zählratenkorrektur mit dem aus der Eichkurve gefundenen Wert für  $x$  nicht nach

$$J_0 = J \exp(\mu x)$$

durchgeführt wird, sondern mit den tatsächlich gemessenen Absorptionskurven, da diese die mit zunehmender Tiefe größer werdende erfaßte Fläche des Öffnungswinkels mitberücksichtigen. Auf diese Weise erhält man zwei Zählraten, wie sie von der unverschütteten Aktivität in den beiden Bereichen erzeugt werden. An dieser Stelle ist es sinnvoll, aus beiden Zählraten einen Mittelwert zu bilden, mit dem die weiteren Umrechnungen erfolgen. Dazu muß vorher beispielsweise die Zählrate im Bereich II mit

$$\frac{50,6 \cdot 10^3}{37,9 \cdot 10^3} = 1,33$$

multipliziert werden. Im Idealfall ist der sich ergebende Wert gleich der Zählrate im Bereich I, im anderen Fall erfolgt die Mittelwertbildung.

#### 5.5. Umrechnung der Zählrate in Aktivität

Die Umrechnung geschieht mit Hilfe einer Eichung, die zugleich mit der in Bericht I beschriebenen Aufnahme der Eichkurve erfolgt. Dazu muß zusätzlich nur bekannt sein, welche Aktivität die Flächenquelle besitzt.

Für die Herstellung der Flächenquelle wurde 1 mCi verwendet. Die Aktivität wurde mit 60 l Wasser verdünnt und in 44 große Platten (50 × 50 cm) und 8 kleine Platten (25 × 50 cm) gefüllt. Eine große Platte faßt 1150 ml, eine kleine 525 ml. Daraus läßt sich ausrechnen, daß die Aktivität pro große Platte 19,2  $\mu$ Ci, die einer kleinen 8,75  $\mu$ Ci beträgt.

Stellt man die Sonde direkt auf die Platten, so wird durch den Öffnungswinkel von 120° eine Fläche von 0,59 m<sup>2</sup> erfaßt. In diesem Bereich befindet sich die Aktivität von

$$\frac{19,2 \cdot 0,59}{0,25} = 45,3 \mu\text{Ci}$$

Diese Aktivität erzeugt im Bereich I 5,06 · 10<sup>4</sup> Imp/min. Berücksichtigt man die absorbierende Wirkung der 4 mm starken AlMg<sub>3</sub> Oberseite der Eichplatten, so entsprechen 45,3  $\mu$ Ci einer Zählrate von 5,4 · 10<sup>4</sup> Imp/min, oder 1 Imp/min entspricht 0,84 nCi (im Bereich II wird 1 Imp/min durch 1,12 nCi erzeugt).

### 5.6. Halbwertszeitkorrektur

Die Anzahl der zerfallenden Atome einer radioaktiven Substanz nimmt nach dem Zerfallsgesetz ab

$$n = n_0 \exp(-\lambda t)$$

und da die Aktivität A eines Strahlers der Anzahl der strahlenden Atome n proportional ist, nimmt auch die Aktivität entsprechend ab

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

Für die Halbwertszeit  $T_{1/2}$ , nach der die Aktivität auf die Hälfte ihres Anfangswertes abgeklungen ist, erhält man

$$\frac{1}{2} = \exp(-\lambda T_{1/2})$$

$$\text{und daraus } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Damit läßt sich das Zerfallsgesetz auch in folgender Form schreiben:

$$A = A_0 \exp(-t \cdot \ln 2 / T_{1/2}) \quad T_{1/2} = 84 \text{ Tage für } ^{46}\text{Sc}$$

A ist die nach Abschnitt 5.5 erhaltene Aktivität,  $A_0$  ist die Aktivität, die die gleiche Sandmenge am Tage des Einbringens gehabt hat. Der Korrekturfaktor für die Umrechnung ist also

$$F_h = \exp(t \cdot 0,693/84) \quad t \text{ in Tagen}$$

Die Anzahl der Tage zwischen dem Einbringen des radioaktiven Sandes und der jeweiligen Messung ist in Tabelle I und III in der Spalte „D +“ angegeben. In Tabelle III sind auch die sich aus der obigen Gleichung ergebenden Korrekturfaktoren  $F_h$  angegeben.

### 5.7. Umrechnung der Aktivität in radioaktiv markierte Sandmenge

Diese Umrechnung ist durch die Daten der eingebrachten Sandmenge gegeben, die möglichst genau bekannt sein müssen. Es wurden 100 kg Seesand mit 3 Ci aktiviert.

Daraus folgt, daß die 1 Imp/min erzeugende Aktivität auf einer Sandmenge von  $0,28 \cdot 10^{-4}$  g fixiert ist.

Geht man von einem mittleren Sandkorndurchmesser von  $200 \mu$  aus, so sind in 100 kg Sand  $10^{10}$  Körner enthalten. Jedes Korn ist demnach im Mittel mit 0,3 nCi aktiviert.

Bei einer Wassertiefe von beispielsweise 10 m liegt die Auswertungsgrenze im Bereich I bei 170 Imp/min.

$$170 - 3 \sqrt{170} = 131 \text{ (Nulleffekt in 10 m Tiefe)}$$

Die Auswertungsgrenze liegt also  $3 \sqrt{170} = 39$  Imp/min über dem Nulleffekt. Es müssen infolgedessen bei diesem Beispiel mindestens  $0,84 \cdot 39/0,3 = 109$  Sandkörner im Erfassungsbereich der Sonde liegen, damit dieser Meßpunkt ausgewertet wird.

### 5.8. Umrechnung in Gramm radioaktiv markierter Sand pro m<sup>2</sup>

Die vom Öffnungswinkel der Sonde erfaßte Fläche beträgt 0,59 m<sup>2</sup>. Dementsprechend erfolgt die Umrechnung der nach Abschnitt 5.7 erhaltenen Sandmenge auf 1 m<sup>2</sup> durch Multiplikation mit 1/0,59.

Die Umrechnungen 5.5–5.8 werden zusammen durchgeführt. Der Gesamtumrechnungsfaktor ist

$$\text{für die Messungen im Mai: } 6,9 \cdot 0,28 \cdot 10^{-4} / 0,59 = 3,27 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{und entsprechend für die Messungen im Juni: } 3,6 \cdot 10^{-4},$$

um aus der auf die Oberfläche des Meeresbodens zurückgerechneten Zählrate in Imp/min die zum Meßort gewanderte radioaktiv markierte Sandmenge in Gramm/m<sup>2</sup> zu erhalten.

### 6. Fehlerabschätzung

Das Verfahren der Bestimmung einer mittleren Vergrabungstiefe erfordert die Messung in 2 verschiedenen Energiebereichen des  $\gamma$ -Spektrums von <sup>46</sup>Sc. In diesen Bereichen wird die aus Aktivität und Nulleffekt zusammengesetzte Zählrate  $J_I + N_I$  bzw.  $J_{II} + N_{II}$  gemessen.

Die Anzahl der in den Szintillationskristall gelangenden  $\gamma$ -Quanten unterliegt einem statistischen Zufallsprozeß, der durch eine Poisson-Verteilung beschrieben wird. Für große Zählraten geht die unsymmetrische Poisson-Verteilung in die symmetrische Gauß-Verteilung über. Bei beiden Verteilungen ist die Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{J + N}$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß die Zählrate innerhalb des Konfidenzintervalls  $< J + N + \sqrt{J + N}, J + N - \sqrt{J + N} >$  liegt, ist 68,27 %. Dieses Konfidenzintervall wird üblicherweise als Fehlermaß verwendet.

Nach Abzug des Nulleffekts, der durch eine große Anzahl von Messungen genau bekannt sein möge, wird das Zählratenverhältnis  $V$  gebildet. Nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich für den Fehler im Zählratenverhältnis

$$V = \frac{J_I}{J_{II}} \pm \sqrt{\frac{J_I + N_I}{J_{II}^2} + \frac{J_I^2 (J_{II} + N_{II})}{J_{II}^4}}$$

Nach dieser Gleichung wird der Fehler für den ungünstigsten (Beispiel 1) und den günstigsten Fall (Beispiel 2) bei den quantitativ ausgewerteten Meßpunkten berechnet.

$$\begin{aligned} \text{Beispiel 1: } J_I + N_I &= 663 \\ J_{II} + N_{II} &= 340 \\ \text{Wassertiefe } w &= 6 \text{ m, so daß } N_I = 138 \\ &N_{II} = 43 \\ J_I &= 525, J_{II} = 297, V = 1,77 \pm 0,14 \end{aligned}$$

Das ergibt eine radioaktiv markierte Sandmenge, die zwischen 0,2 und 0,25 g/m<sup>2</sup> liegt. Gegenüber dem wahrscheinlichsten Wert von 0,22 g/m<sup>2</sup> ergibt sich nach oben ein Fehler von 14 %, nach unten von 9 % (die Asymmetrie ist durch die Form der Eichkurve gegeben).

$$\begin{aligned} \text{Beispiel 2: } J_I + N_I &= 6781 \\ J_{II} + N_{II} &= 3465 \\ \text{Wassertiefe } w &= 4,5 \text{ m, so daß } N_I = 143 \\ &N_{II} = 46 \\ J_I &= 6638, J_{II} = 3419, V = 1,94 \pm 0,04 \end{aligned}$$

Bei diesem Beispiel liegt die radioaktiv markierte Sandmenge zwischen 3,3 und 3,6 g/m<sup>2</sup>. Der mittlere Fehler beträgt 4 %.

## 7. Diskussion der Ergebnisse

### 7.1. Allgemeine Überlegungen zu den Isolinien

Das Einbringen des radioaktiv markierten Sandes ist aufzufassen als Erzeugung einer Quelle radioaktiven Sandes auf dem Meeresgrund. Diese Quelle gibt dauernd radioaktiven Sand an die Umgebung ab.

Bei der Ausbreitung verdünnt sich der Sand, d. h., je weiter weg von der Quelle gemessen wird, desto weniger Sandkörner pro m<sup>2</sup> liegen vor. Irgendwo ist die Grenze erreicht, bei der die Bedingung für eine Auswertung

$$J + N - 3\sqrt{J + N} > N$$

nicht mehr erfüllt ist. Diese Grenze ist die äußerste Isolinie, sie trennt das Auswertungsgebiet definitionsgemäß vom Gebiet mit Nulleffekt ab. Je empfindlicher eine Meßsonde ist und je länger die Meßdauer pro Meßpunkt ist, desto mehr Meßpunkte können ausgewertet werden und desto größer ist das von der äußersten Isolinie umschlossene Auswertungsgebiet.

In den ersten Wochen und Monaten nach dem Einbringen des radioaktiv markierten Sandes nimmt die von der äußersten Isolinie umschlossene Fläche dauernd zu, da fortwährend radioaktiver Sand nachgeliefert wird. Andererseits nimmt die Aktivität mit der Halbwertszeit ab, so daß die Ausdehnung des Auswertungsgebietes nicht beliebig groß werden kann. Es läßt sich mathematisch beweisen, daß sich nach längerer Zeit die Isolinien wieder zusammenziehen und die von ihnen umschlossene Fläche im Grenzfall Null wird. Das bedeutet gleichzeitig, daß dazwischen ein Zeitpunkt liegt, an dem sie ihre maximale Ausdehnung haben.

**B e w e i s :** Die am Einbringeort verbleibende Sandmenge nimmt ab nach der Gleichung

$$M = M_0 \exp(-\alpha t)$$

Die verbleibende Aktivität nimmt noch schneller ab

$$A = A_0 \exp(-\alpha t) \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-(\alpha + \lambda) t)$$

Die insgesamt bis zum Tag  $t$  nach außen abgegebene Aktivität ist

$$A_t = A_0 - A = A_0 (1 - \exp(-(\alpha + \lambda) t))$$

Die zwischen dem Tag  $t$  und dem Tag  $t + 1$  abgegebene Aktivität ist

$$\begin{aligned} A_{t, t+1} &= A_0 (1 - \exp(-(\alpha + \lambda) (t + 1))) - A_0 (1 - \exp(-(\alpha + \lambda) t)) \\ &= A_0 \exp(-(\alpha + \lambda) t) (1 - \exp(-(\alpha + \lambda))) \end{aligned}$$

In dem die Quelle umschließenden Gebiet liegen die jeweils pro Tag bis zum Tag  $t + 1$  von der Quelle abgegebenen Aktivitäten, die dort auch der Abnahme mit der Halbwertszeit unterliegen, also

$$\begin{aligned} A_{\text{ges}} &= A_{0,1} \exp(-\lambda t) + A_{1,2} \exp(-\lambda (t - 1)) + \dots \\ &\dots + A_{t, t+1} \exp(-\lambda (t - t)) \end{aligned}$$

Zu beweisen ist nun, daß diese Reihe gegen den Grenzwert Null konvergiert. Dazu genügt es zu zeigen, daß jedes einzelne Glied gegen Null konvergiert.

Das  $(n + 1)$  - te Glied ist

$$\begin{aligned} A_{n, n+1} &= A_0 \exp(-(\alpha + \lambda) n) (1 - \exp(-(\alpha + \lambda))) \exp(-\lambda (t - n)) \\ &= A_0 (1 - \exp(-(\alpha + \lambda))) \exp(-\alpha n) \exp(-\lambda t) \end{aligned}$$

Für festes  $n$  sind die ersten 3 Faktoren konstant, so daß

$$\lim_{t \rightarrow \infty} A_0 (1 - \exp(-(\alpha + \lambda))) \exp(-\alpha n) \exp(-\lambda t) = 0$$

was zu beweisen war.

Für die Berechnung des Zeitpunktes der maximalen Ausdehnung der Isolinien wird der Ausdruck für  $A_{\text{ges}}$  zunächst umgeformt. Es ist

$$A_{\text{ges}} = A_0 C_1 \exp(-\lambda t) (1 + \exp(-\alpha) + \exp(-2\alpha) + \dots + \exp(-\alpha t))$$

wobei  $C_1 = 1 - \exp(-(\alpha + \lambda))$

Die Differentiation dieser Gleichung ist dadurch etwas kompliziert, daß die Anzahl der Summenglieder eine Funktion der Differentiationsvariablen  $t$  ist. Man muß daher die Summe durch eine Funktion von  $t$  ersetzen. Diese Umformung erfolgt über die Euler-McLaurin Formel

$$\sum_{k=1}^{n-1} f_k = \int_0^n f(k) dk - \frac{1}{2} (f(0) - f(n)) + \frac{1}{12} (f'(n) - f'(0))$$

Mit  $f_k = \exp(-\alpha k)$  ist

$$\sum_{k=1}^{t-1} \exp(-\alpha k) = \exp(-\alpha t) \left( -\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{12} \right) + \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2} + \frac{\alpha}{12} \right)$$

Diese Beziehung entspricht bis auf das erste und letzte Glied genau unserer Summe. Nach Einsetzen und einigen Umformungen ergibt sich

$$A_{ges} = A_0 C_1 \exp(-\lambda t) (1 + C_2 \exp(-at) - C_2)$$

$$\text{wobei } C_2 = -\frac{1}{a} + \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{12}$$

Die Differentiation ist nun ausführbar

$$\frac{d A_{ges}}{dt} = A_0 C_1 \exp(-\lambda t) (-\lambda + C_2 (-\lambda - a) \exp(-at) + C_2 \lambda) = 0$$

$$\exp(-at) = \frac{\lambda (C_2 - 1)}{C_2 (\lambda + a)} = \frac{\lambda \left( \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2} + \frac{\lambda}{12} \right)}{\left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2} + \frac{\lambda}{12} \right) (\lambda + a)} \approx \frac{\lambda}{\lambda + a}$$

In diese Beziehung können jetzt die Werte  $a$  und  $\lambda$  eingesetzt werden, um  $t$  auszurechnen.

Während  $\lambda$  aus der bekannten Halbwertszeit für  $^{46}\text{Sc}$  ermittelt wird, ist über  $a$  nichts bekannt. Setzen wir jedoch an, daß nach 240 Tagen von den eingebrachten 100 kg Sand noch 13,5 kg in der unmittelbaren Nähe des Einbringepunktes verblieben sind (dieser Wert ergibt sich in etwa aus der quantitativen Auswertung der Messungen im Mai/Juni 1971), so ist  $a = \lambda$  und wir erhalten

$$\exp(-at) = 0,503$$

$$t = 83 \text{ Tage}$$

Wird  $a = 2 \lambda$  gesetzt, d. h., am Einbringeort sind nach 240 Tagen nur noch 1,8 kg Sand verblieben, so ist der Zeitpunkt der maximalen Isolinienausdehnung 67 Tage nach Einbringen des Sandes erreicht.

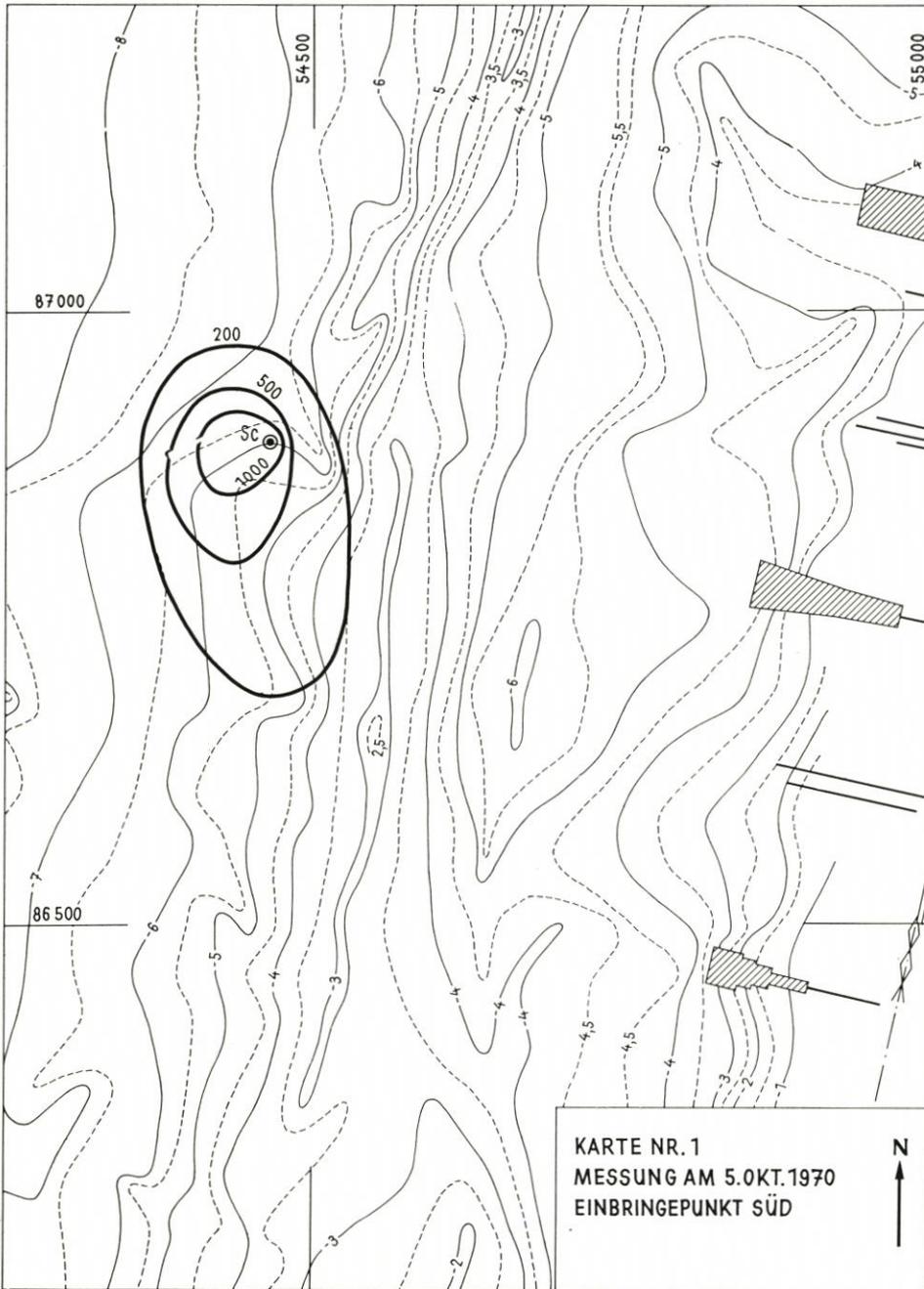
Der Parameter  $a$  ist ersichtlich ein Maß für die Transportrate des radioaktiven Sandes. Ist  $a$  groß, so bedeutet das, daß der Sand sehr schnell vom Einbringeort abtransportiert wird und der Zeitpunkt der maximalen Isolinienausdehnung schnell erreicht wird. Es ist hier also die Möglichkeit gegeben, durch Bestimmung des Zeitpunktes der maximalen Isolinienausdehnung auf die Transportrate zu schließen.

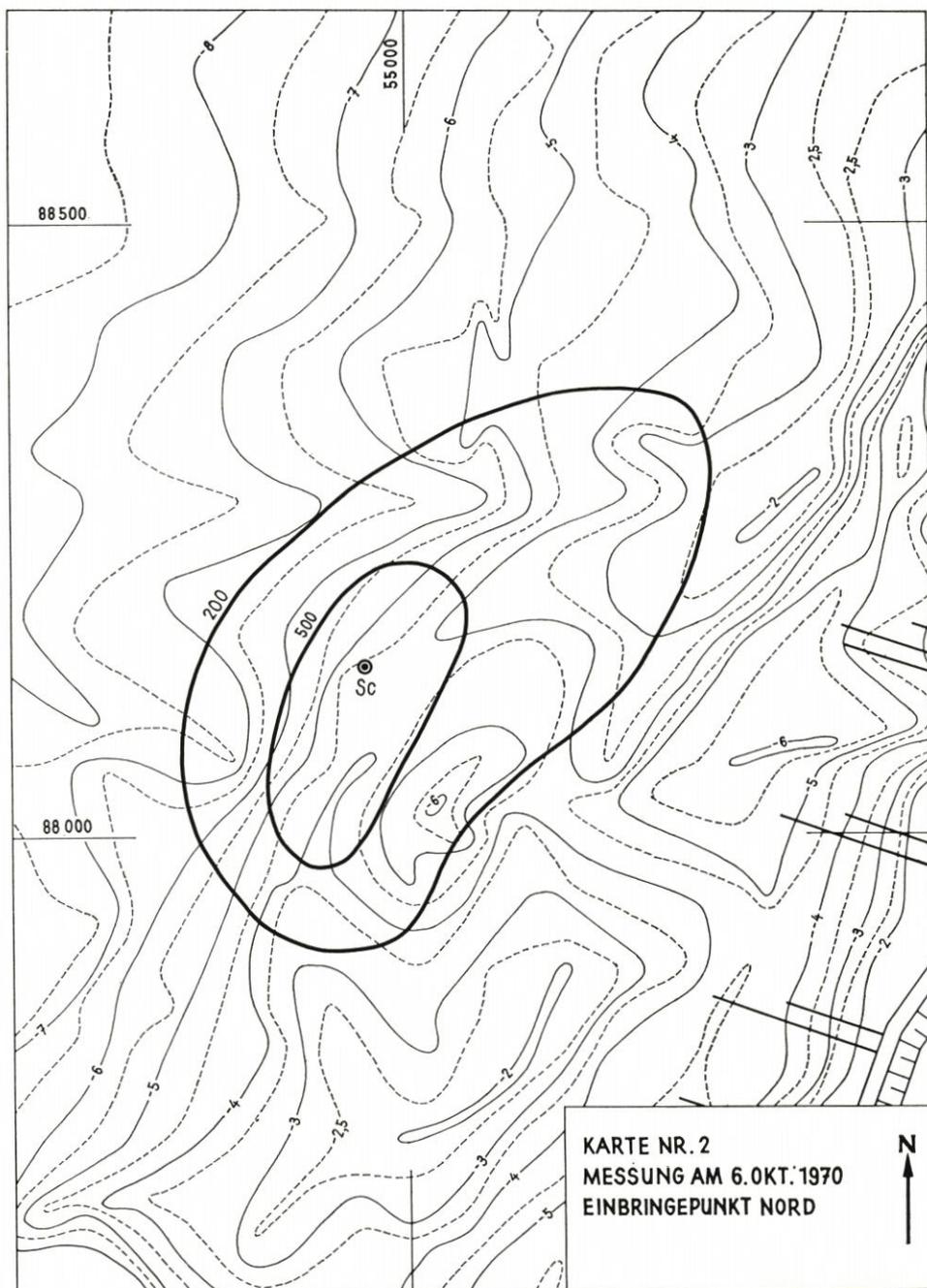
Von Bedeutung ist schließlich noch der Zeitpunkt, bei dem die größten Mengen radioaktiven Sandes aus der Quelle austreten, denn zu diesem Zeitpunkt dürfen wir auch das schnellste Wachstum der Isolinien erwarten. Dazu betrachten wir die Funktion  $A_{t, t+1}$ , die angibt, welche Aktivität pro Tag von der Quelle abgegeben wird. Sie ist von der Form

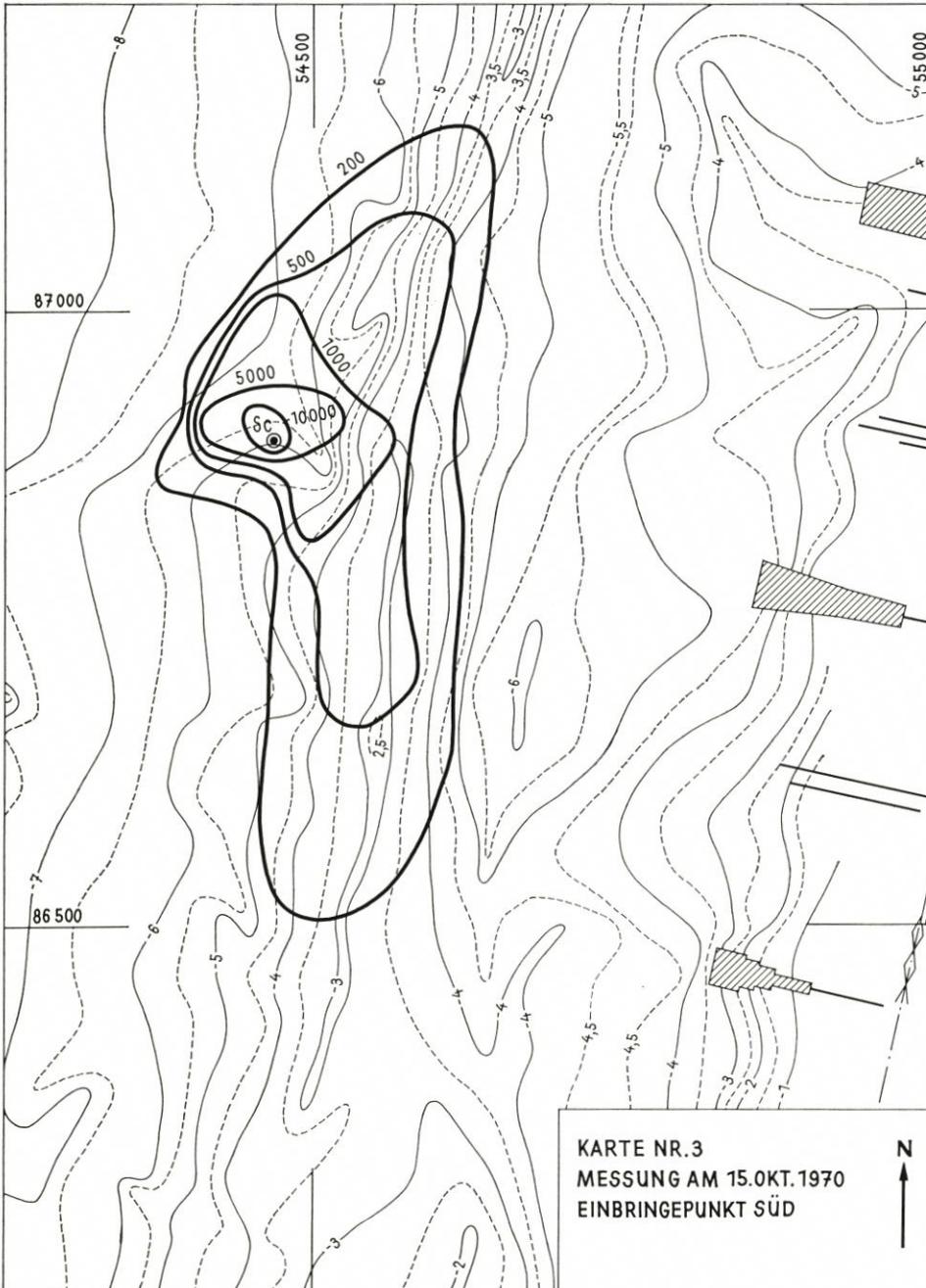
$$A_{t, t+1} = \text{const} \cdot \exp(-\text{const}' \cdot t)$$

Diese Funktion hat kein eigentliches Extremum. Ihren größten Wert erreicht sie bei  $t = 0$ . Danach fällt die Funktion monoton bis zum Grenzwert Null. Die größten pro Tag an die Umgebung abgegebenen Aktivitäts- oder Sandmengen erhalten wir also unmittelbar nach dem Einbringen.

Aus rein theoretischen Überlegungen ergibt sich demnach für die zu erwartende Veränderung der Isolinien, daß sie sich bereits in den ersten Tagen sehr schnell vergrößern, nach 2 bis 3 Monaten ihre größte Ausdehnung erreichen und danach wieder kleiner werden. Im Gegensatz dazu ist die Sandwanderung ein kontinuierlich andauernder Vorgang mit einer im Mittel konstanten Transportrate, d. h., der markierte Sand wird auch dann noch von der Quelle abtransportiert, wenn sich die Isolinien wieder zusammenziehen. Nach dem Überschreiten des Zeitpunktes der maximalen Isolinienausdehnung kommt es zu dem paradoxen Fall, daß Isolinienänderung und Sandwanderungsrichtung entgegengesetzt verlaufen!

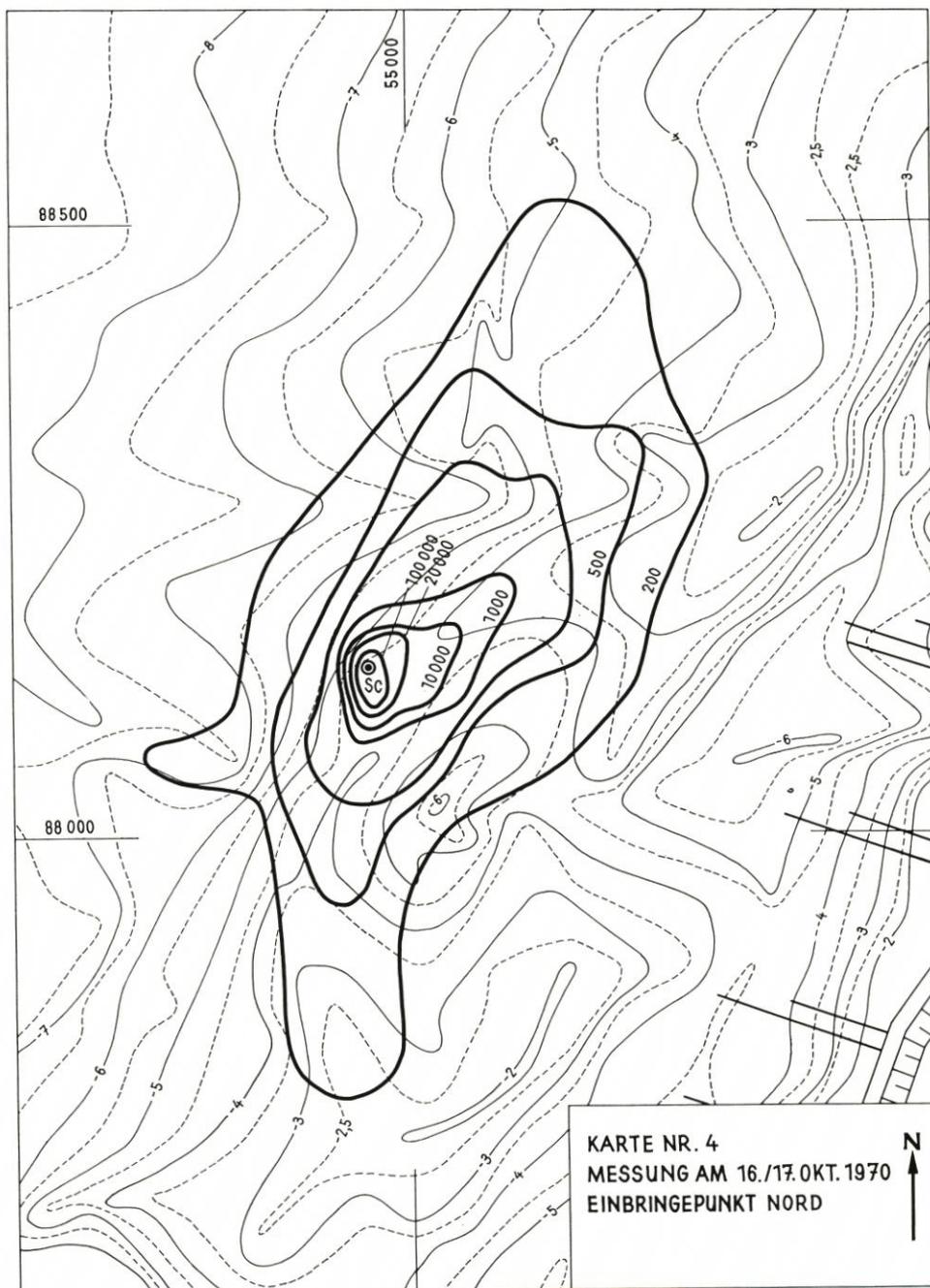


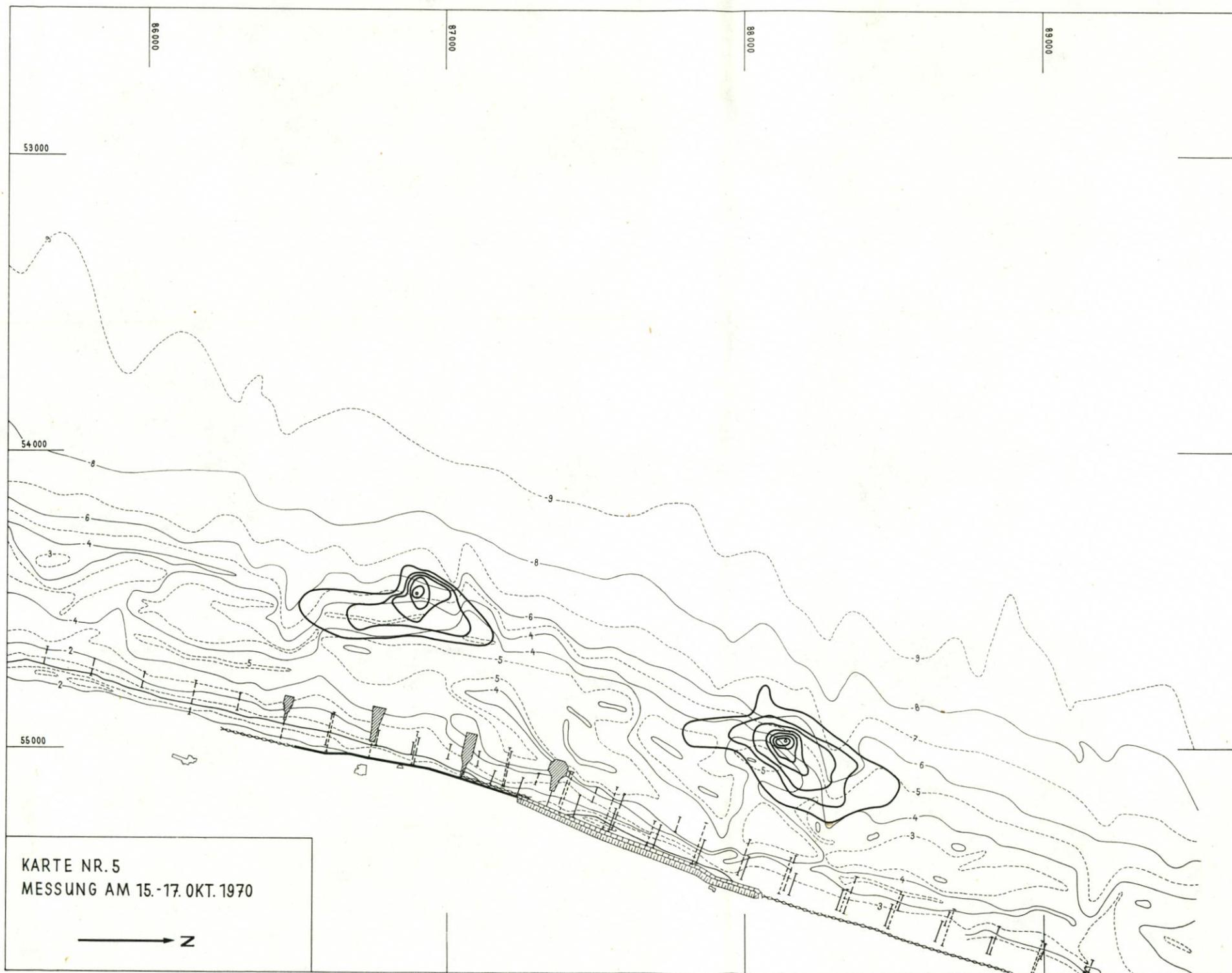




KARTE NR.3  
MESSUNG AM 15.OKT.1970  
EINBRINGEPUNKT SÜD







## 7.2. Ergebnisse aus den im Herbst 1970 durchgeführten Messungen

Die ersten Sandwanderungsmessungen fanden am 5. und 6. Oktober, also 6 bzw. 7 Tage nach dem Einbringen, statt. Für die Darstellung von Isoimpulslinien konnten im südlichen Untersuchungsgebiet 3 Meßpunkte, im nördlichen 6 Meßpunkte verwendet werden. Die gezeichneten Isolinien (Karte Nr. 1 und 2) geben infolgedessen nur einen groben Anhalt. Es ist jedoch die vorherrschende Sandwanderungsrichtung, eine küstenparallele Wanderung entlang des Riffs, bereits deutlich zu erkennen. Es ist weiterhin bemerkenswert, daß der südlich eingebrachte Sand hauptsächlich nach Süden wandert, während der im Norden eingebrachte Sand nach Norden abwandert.

Die Ausdehnung der Isolinien im Süden beträgt 270 m küstenparallel und 170 m küstennormal, im Norden 540 m küstenparallel und 270 m küstennormal. Die Folgerung, daß die Wanderung im Norden stärker ist als im Süden, kann daraus nicht ohne weiteres gezogen werden, da die Meßpunktdichte zu gering und die Ausdehnung der Isolinien zu unsicher ist.

Die nächsten Messungen der Sandwanderung wurden vom 15.–17. Oktober durchgeführt. Die Meßpunktdichte ist groß genug, um im Süden 5 und im Norden sogar 7 Isolinien zu zeichnen (Karte Nr. 3–5). Jetzt ist die küstenparallele Hauptwanderungsrichtung klar zu erkennen. Der Sand ist auch teilweise über das Riff in die Rinne hineingewandert, vermag aber den landwärtigen Rinnenhang nicht hochzusteigen (Abb. 6). Eine Konstaminierung des Strandes ist bei dieser Form und Ausdehnung der Isolinien ausgeschlossen.

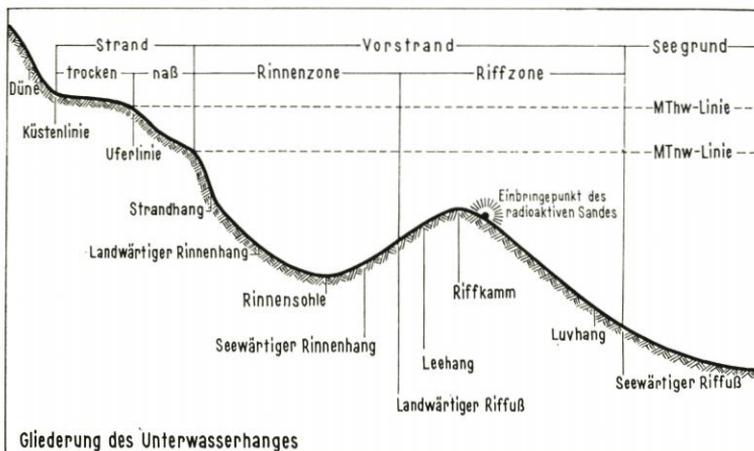


Abb. 6. Gliederung des Unterwasserhanges vor Sylt. Das Riff befindet sich einige hundert Meter vor der Uferlinie

Vor allem im Süden scheint eine schwache seewärts gerichtete Sandwanderungstendenz vorzuliegen. Wahrscheinlicher ist aber, daß sie nur durch die markante Einschnürung am südwestlichen Isolinienrand vorgetäuscht wird. Der Grund für diese Einschnürung ist nicht ganz klar, möglicherweise eine in den Tiefenlinien nicht enthaltene höher gelegene Stelle, die den radioaktiven Sand an der weiteren Ausbreitung hindert, oder aber auch ein Gebiet stärkerer Vergrabung.

Die Ausdehnung der Isolinien hat gegenüber der Messung vom 5./6. 10. bedeutend zugenommen: 650 m küstenparallel, 250 m küstennormal im Süden und 750 m küstenparallel, 300 m küstennormal im Norden. Die Wanderung ist im Norden also eindeutig stärker ausgeprägt, eine Beobachtung, die sich bereits bei den Isolinien vom 5./6. 10. andeutete.

Die nächste Messung der Sandwanderung erfolgte am 31. Oktober im südlichen Einbringgebiet. Die küstenparallele Wanderung ist stark nach Süden gerichtet. Vom Einbringepunkt des radioaktiven Sandes ist die äußerste Isolinie im Norden nur 170 m entfernt, im Süden dagegen 550 m. Die Wanderung in die südliche Richtung ist damit mehr als 3mal so stark wie die Wanderung in nördliche Richtung.

Im großen und ganzen haben die Isolinien im Vergleich zu den Isolinien vom 15. 10. ihre Form und Ausdehnung behalten, möglicherweise ist der Zeitpunkt der maximalen Ausdehnung bereits erreicht oder sogar schon überschritten. Während sich die 200 Imp/min-Isolinie noch weiter ausgebreitet hat, hat sich die 500 Imp/min-Isolinie etwas zusammengezogen. Ganz sicher spielen hier Vergrabungseffekte eine Rolle, die bei den Rechnungen in Abschnitt 7.1 nicht mit berücksichtigt wurden.

Ursprünglich war geplant, am 1. November das nördliche Einbringgebiet zu vermessen. An diesem Tag wehte jedoch ein heftiger Wind aus westlicher Richtung (siehe Tabelle 2). Daraufhin wurde am 2. November das südliche Einbringgebiet nochmals vermessen, um die durch den Sturm verursachte Sandbewegung festzustellen.

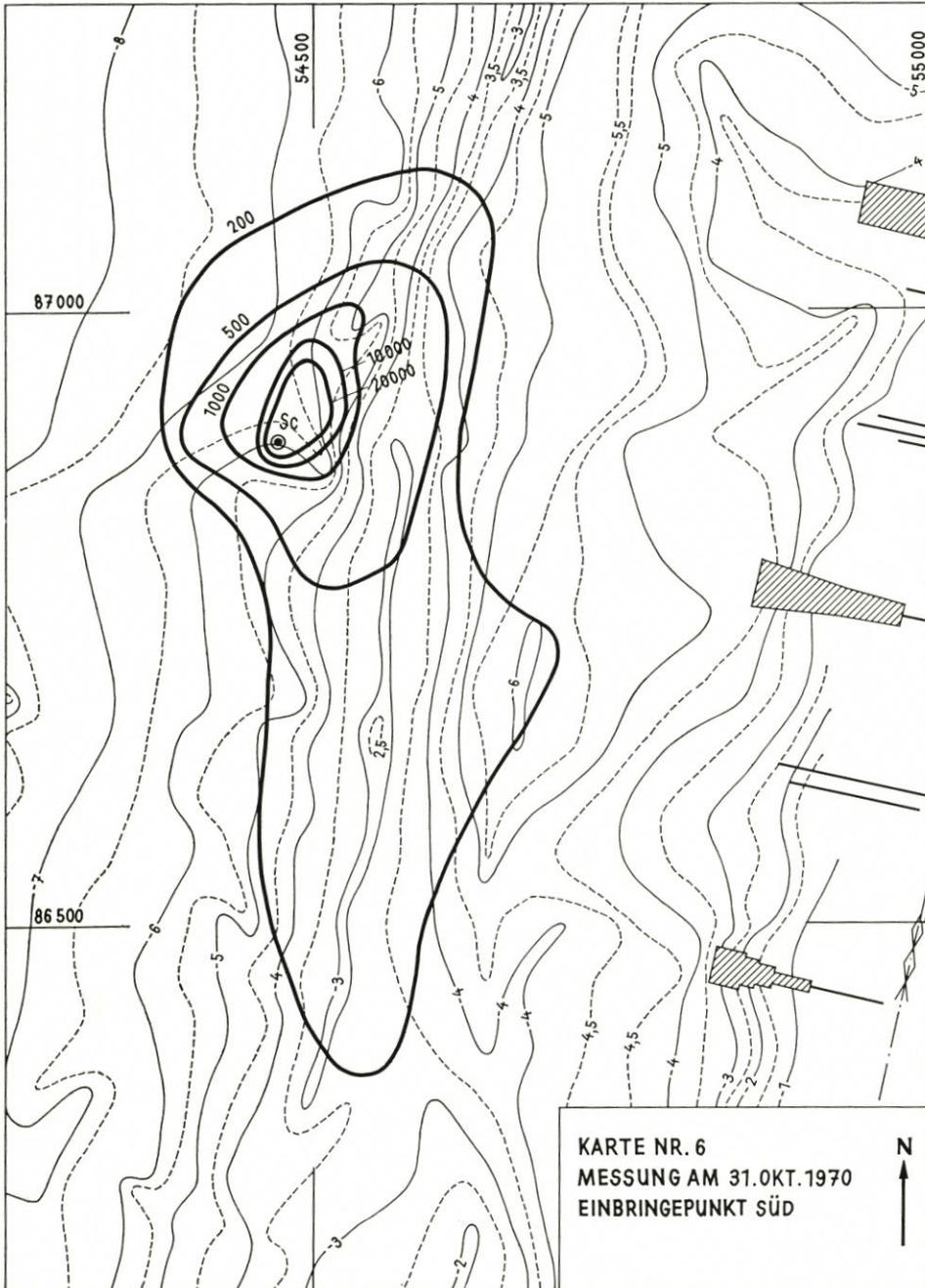
Die äußerste Isolinie hat sich im Süden und auf der seewärtigen Seite etwas zurückgezogen, während sie auf der landwärtigen Seite in etwa die gleiche Ausdehnung und Form behalten hat. Am interessantesten ist die nach Süden gerichtete Vergrößerung der 500 Imp/min-Isolinie, die immerhin 100 m in 2 Tagen ausmacht. Wir finden also eine eindeutige Zuordnung einer Sandwanderung, die nach Süden gerichtet ist, zu einem starken Sturm aus West.

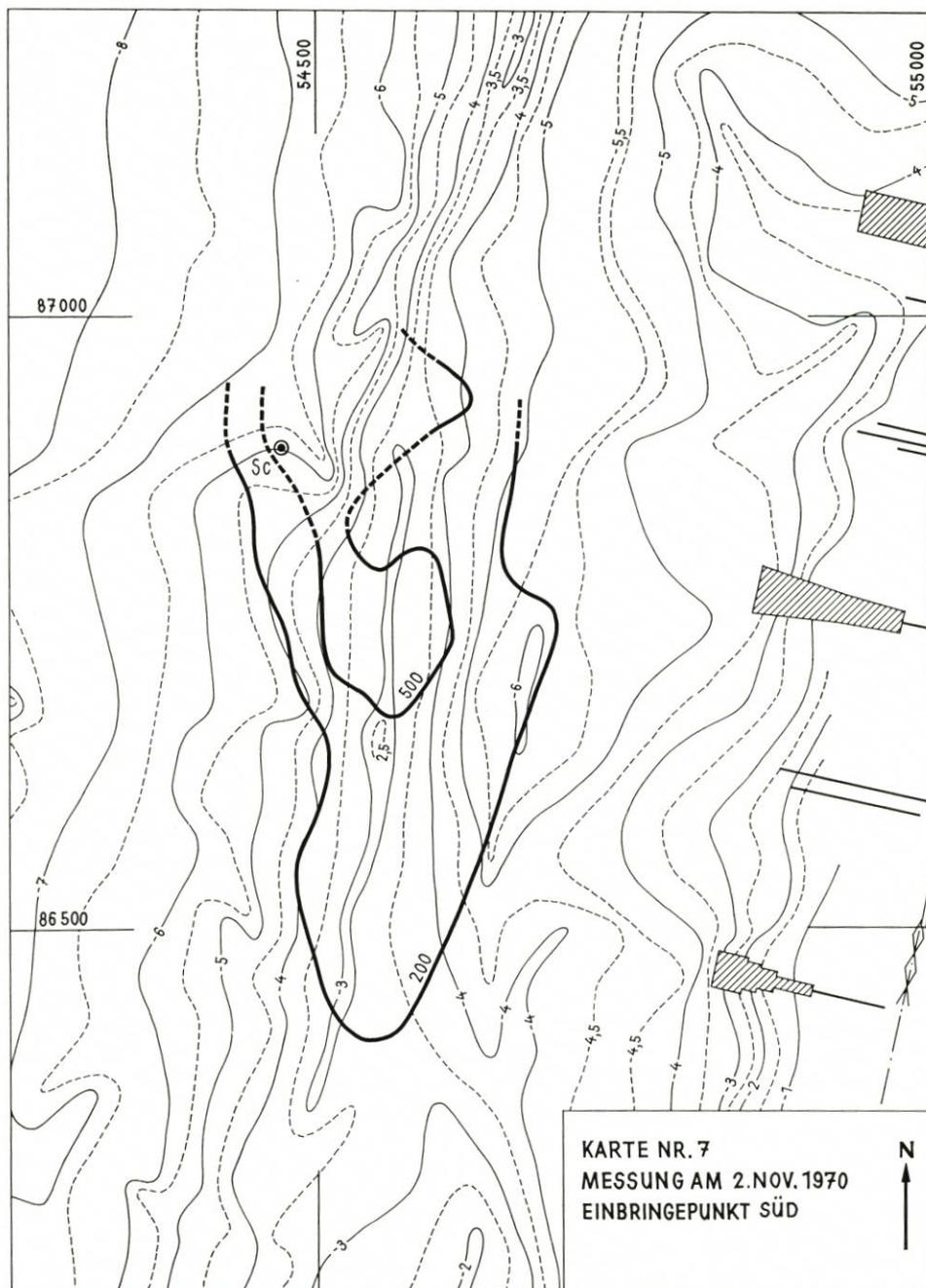
Die Vermessung des südlichen Einbringgebietes vom 2. 11. konnte wegen des in Bericht II in der Einleitung beschriebenen häufigen apparativen Versagens nicht zu Ende geführt werden.

Bei der Diskussion der Isolinien fällt auf, daß sich charakteristische Änderungen im wesentlichen nur in den 200 Imp/min- und den 500 Imp/min-Isolinien zeigen. Das hat 2 Gründe. Einmal liegt es an der relativ grobmaschigen Auflösung von etwa 1 Meßpunkt pro 2000 m<sup>2</sup>. Die Isolinien mit höheren Zählraten bewegen sich von einer Messung zur anderen wahrscheinlich weniger als 50 m weit. Zum anderen sind die Isolinien um so ortsfester, je höher ihre Zählrate ist, d. h., sie ordnen sich als zeitlich nahezu unveränderliche konzentrische Ringe um den Einbringepunkt herum an und stellen so die in Abschnitt 7.1 theoretisch angenommene Quelle für den radioaktiven Sand dar. Für das Studium der Sandwanderung spielt die geringe Änderung dieser Isolinien keine oder nur eine untergeordnete Rolle.

### 7.3. Ergebnisse aus den im Frühjahr 1971 durchgeführten Messungen

Obwohl die Aktivität vom Zeitpunkt des Einbringens bis zur Nachmessung Ende Mai/Anfang Juni auf 14 % ihrer Anfangsaktivität abgeklungen ist und die dazwischenliegenden Herbst- und Frühjahrsstürme zu einer starken Wanderung, Vermischung und Verschüttung geführt haben, war doch eine beträchtliche Aktivitätsmenge in der unmit-

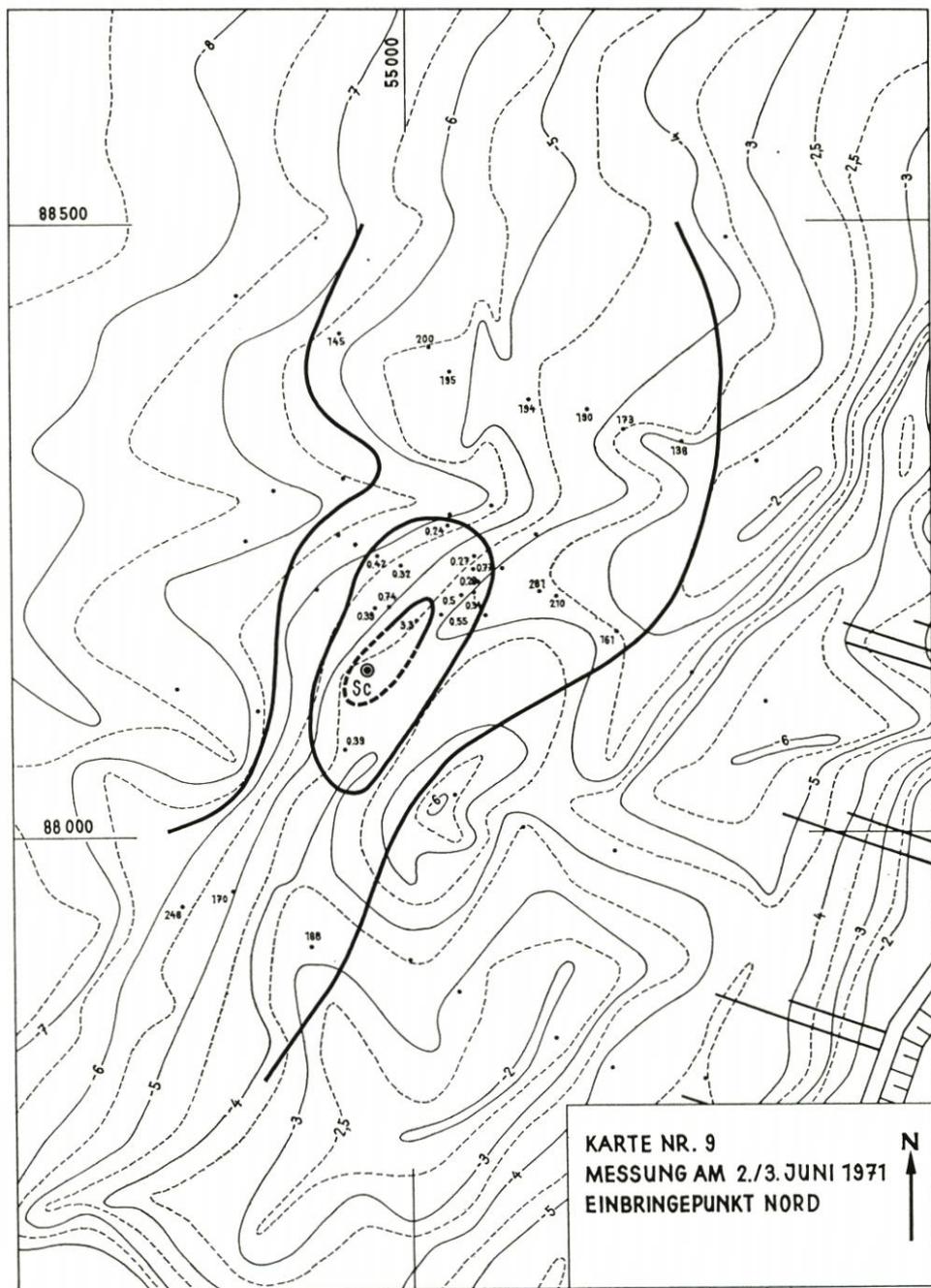


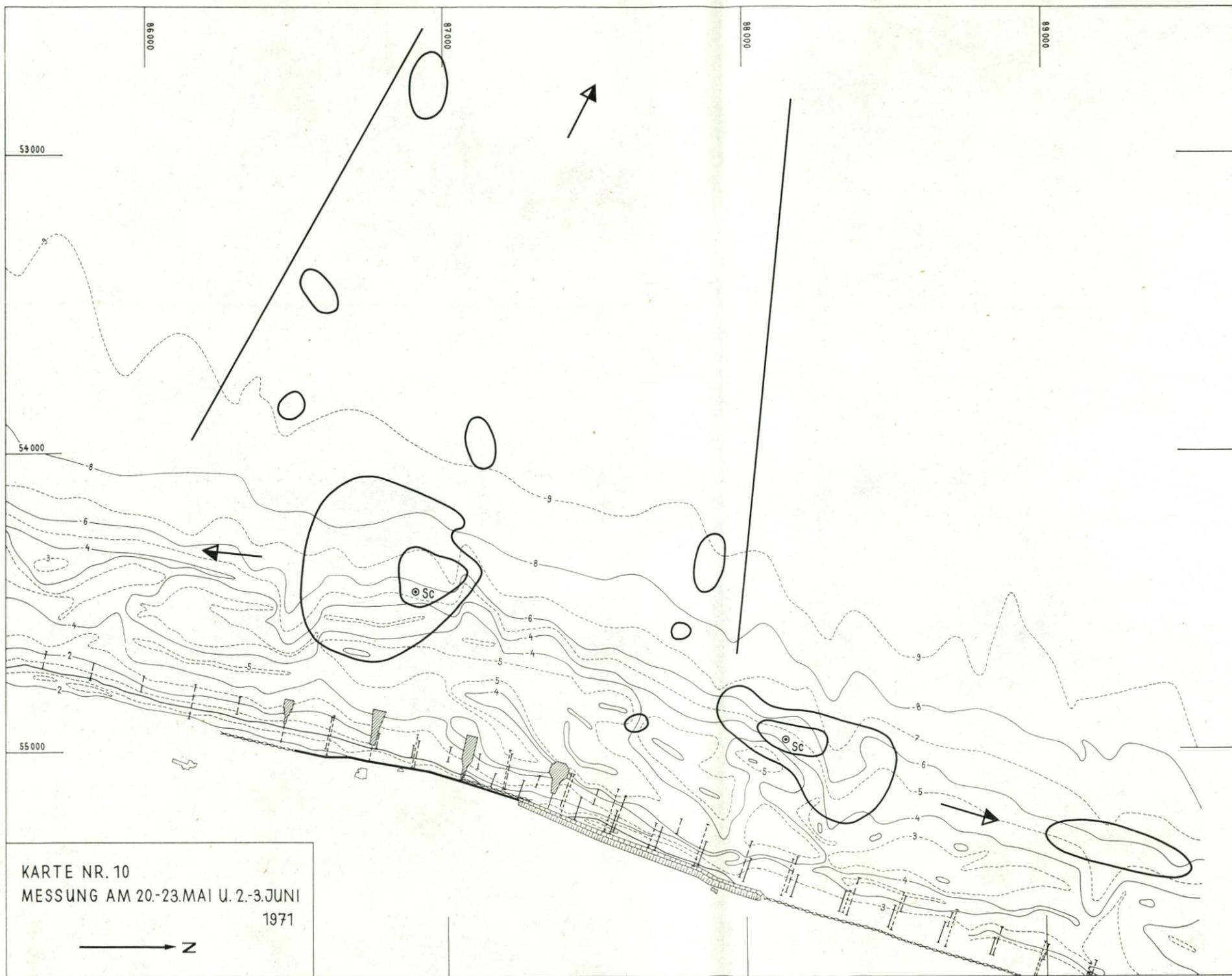


KARTE NR. 7  
MESSUNG AM 2. NOV. 1970  
EINBRINGEPUNKT SÜD









0 200 400 600m

telbaren Umgebung der beiden Einbringeorte nachweisbar. Aber schon etwa 100 m neben den Zentren beträgt die Aktivität kaum mehr als doppelten Nulleffekt.

Wie in Abschnitt 6 ausgeführt wurde, ist eine quantitative Auswertung der Meßergebnisse nur sinnvoll, wenn die Ungenauigkeit nicht zu groß, d. h., die Zählrate nicht zu klein ist.

Aber auch bei einer geringen Zählrate läßt sich der Fehler klein halten, wenn nur lange genug gemessen wird. Bei längerer Meßdauer pro Meßpunkt wird natürlich auch der Nulleffekt größer. Entscheidend für die Festlegung einer Grenze für die quantitative Auswertung ist daher die Anzahl der Impulse nach Abzug des Nulleffekts. Um den Fehler unter 15 % zu halten, wurde als Grenze festgelegt

$$J_I = 500 \text{ Imp}$$

$$J_{II} = 300 \text{ Imp}$$

Bei einem angenommenen Nulleffekt von 200 Imp/min im Bereich I bedeutet das, daß 700 Imp/min registriert werden müssen. Aber auch eine Zählrate von 300 Imp/min kann noch ausgewertet werden, wenn 5 min lang gemessen wird. Dann beträgt die Zählrate nämlich 1500 Imp. Nach Abzug von 1000 Imp. Nulleffekt ergeben sich ebenfalls 500 Imp.

Aus diesem Grund wurde an einigen Meßpunkten 2 oder 3 min lang gemessen. Bei Durchführung der Messungen mit einem Hubschrauber ist eine längere Meßdauer kaum zu erreichen.

Trotzdem konnten im südlichen Einbringegebiet 26 Meßpunkte und im nördlichen Einbringegebiet 13 Meßpunkte quantitativ ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind in Form von „Isosandmengenlinien“ in Karte Nr. 8 und 9 dargestellt.

Im südlichen Gebiet (Karte Nr. 8) beträgt die Ausdehnung der äußersten geschlossenen Isolinie 230 m küstenparallel und 170 m küstennormal. Diese Linie umgrenzt das quantitative Auswertungsgebiet. Sie ist praktisch identisch mit der 0,2 g/m<sup>2</sup> Isosandmengenlinie.

Diese Menge radioaktiv markierten Sandes entspricht einer Zählrate von

$$\frac{0,2}{3,27 \cdot 10^{-4}} = 610 \text{ Imp/min}$$

Die Ausdehnung der 500 Imp/min (= 570 Imp/min nach Halbwertszeitkorrektur) betrug am 15. 10. 70 270 m küstenparallel und 175 m küstennormal (ohne Berücksichtigung des Südzipfels), und am 31. 10. (= 650 Imp/min nach Halbwertszeitkorrektur) betrug sie 270 m küstenparallel und 200 m küstennormal. Wie man sieht, hat sich die Form und Größe dieser Isolinie auch nach 9 Monaten nicht wesentlich geändert. Im nördlichen Einbringegebiet liegen die Verhältnisse ähnlich.

In Abb. 7 sind die mit Hilfe der Eichkurve erhaltenen Werte für die mittleren Vergrabungstiefen des radioaktiven Sandes an den verschiedenen Meßpunkten aufgetragen. Sie liegen im südlichen Gebiet im Mittel zwischen 5 und 7 cm. Aus Bericht I, Fig. 13 und 14, entnimmt man, daß dies einer homogenen Verteilung bis zu knapp 20 cm oder einer linearen Verteilung bis etwa 30 cm Tiefe entspricht. Im nördlichen Gebiet ist der Sand etwas stärker verschüttet, ein Anzeichen größerer Sandbewegungen. Die mittleren Vergrabungstiefen liegen hier um 10 cm, d. h. homogene Verteilung bis 30 cm oder lineare Verteilung bis 50 cm.

Unter der Annahme, daß die Meßpunkte genügend dicht liegen, d. h., daß die Abweichungen zweier benachbarter Meßpunkte gering sind, läßt sich die im umschlossenen

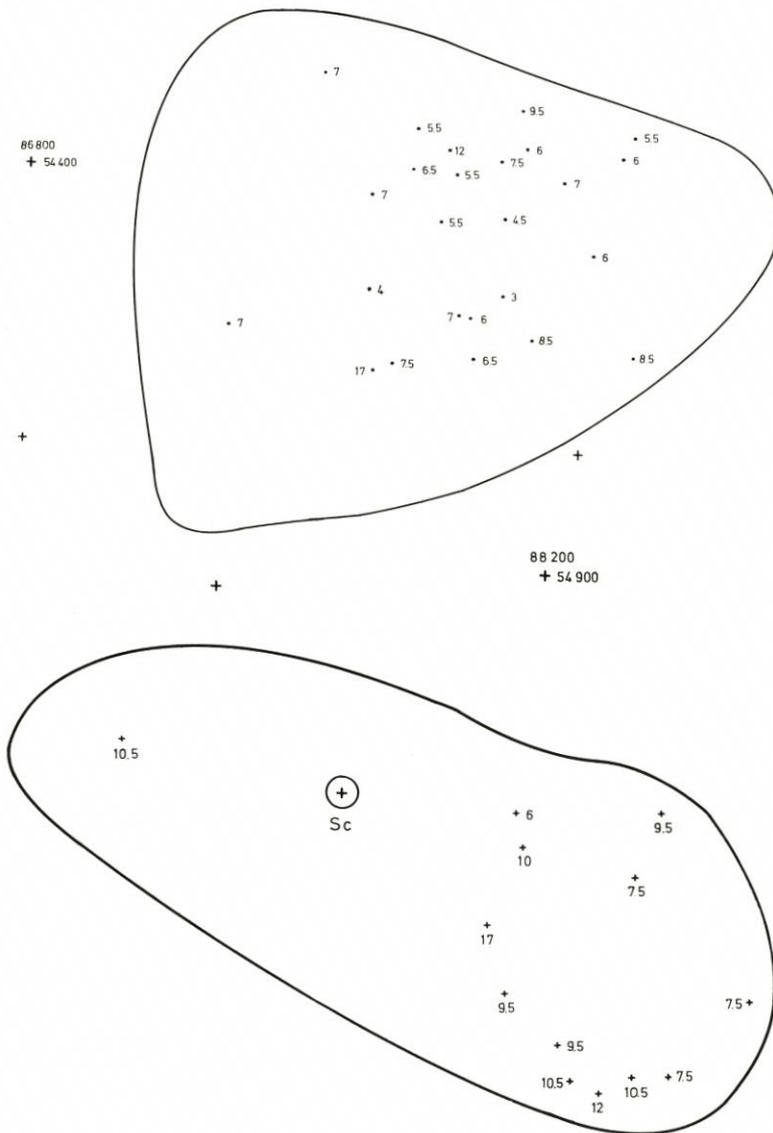


Abb. 7. Gemessene mittlere Vergrabungstiefe für die beiden Einbringungsgebiete; oben: südliches Gebiet, unten: nördliches Gebiet

Gebiet enthaltene radioaktive Sandmenge ermitteln. Dazu wird in dem jeweiligen Gebiet der Mittelwert der gemessenen radioaktiven Sandmengen gebildet und mit der Fläche multipliziert.

Südliches Einbringungsgebiet (von innen nach außen)

695 m <sup>2</sup>	mit 3,27 g/m <sup>2</sup>	= 2,3 kg
4 060 m <sup>2</sup>	mit 1,74 g/m <sup>2</sup>	= 7,1 kg
14 490 m <sup>2</sup>	mit 0,7 g/m <sup>2</sup>	= 10,2 kg
14 755 m <sup>2</sup>	mit 0,31 g/m <sup>2</sup>	= 4,6 kg
		<hr/>
		24,2 kg

## Nördliches Einbringgebiet (von innen nach außen)

$$\begin{array}{r} 2\,880\text{ m}^2 \text{ mit } 3,3\text{ g/m}^2 = 9,5\text{ kg} \\ 17\,450\text{ m}^2 \text{ mit } 0,43\text{ g/m}^2 = 7,5\text{ kg} \\ \hline 17\text{ kg} \end{array}$$

Diese Aussage bedeutet, daß 24 % bzw. 17 % des eingebrachten Sandes in der Nähe der Einbringorte geblieben ist.

Aus der in Abschnitt 6 durchgeführten Fehlerbetrachtung ergibt sich für die einzelnen Meßpunkte im Mittel ein Fehler von 10 %. Von mindestens gleicher Größenordnung ist der Fehler, der durch die geringe Meßpunktdichte entsteht. Das führt nicht nur zu einer Unsicherheit in der Festlegung der durch die Isolinien umschlossenen Flächen, sondern auch innerhalb eines Gebietes zu Fehlern in der Mittelwertbildung. Im südlichen Einbringgebiet werden diese Fehler mit jeweils 10 % abgeschätzt, im nördlichen Einbringepunkt, wo die Meßpunktdichte noch geringer ist, mit jeweils 20 %. Der insgesamt auftretende Fehler ist dann 18 % bzw. 30 %. Damit ergibt sich für das südliche Einbringgebiet:

$$24,2 \pm 4,3\text{ kg}$$

und für das nördliche Einbringgebiet:

$$17 \pm 5,1\text{ kg}$$

Es ist offensichtlich, daß eine stärkere Wanderung des radioaktiven Sandes auch eine stärkere Wanderung des natürlichen Sandes bedeutet, ein Vorgang, der zu größeren Vergrabungstiefen des radioaktiven Sandes führt. Wenn der Abtransport des Sandes im Norden schneller vor sich geht als im Süden, dann muß auch im Norden eine geringere radioaktive Sandmenge gefunden werden als im Süden. Dies wird in überzeugender Weise durch die quantitativen Ergebnisse bestätigt.

Karte Nr. 10 zeigt die Übersicht über das gesamte Untersuchungsgebiet. Nördlicher und südlicher Einbringepunkt sind durch „Sc“ gekennzeichnet. Die diese Punkte unmittelbar umschließenden Isolinien sind die in den Karten 8 und 9 dargestellten äußersten Isolinien, die das Gebiet quantitativer Auswertung abgrenzen.

Die in Karte Nr. 10 außerdem dargestellten, ein größeres Gebiet umfassenden Isolinien grenzen das Gebiet mit Nulleffekt vom Gebiet mit Aktivität ab. In diesem Gebiet gibt es Stellen mit stärkerer Aktivität, wie man aus den zahlreichen „Inseln“ in Karte 10 sieht. Die Zählrate ist in diesen Inseln eindeutig größer als der Nulleffekt, so daß auf das Vorhandensein von radioaktivem Sand in diesen Inseln geschlossen werden muß. Der Sand muß also vom südlichen Einbringepunkt mehr als 1,5 km seewärts bis zur äußersten Insel gewandert sein. Daß die dazwischen liegenden Gebiete weniger Aktivität zeigen, kann durch stärkere Vergrabung erklärt werden.

Ein ähnliches Bild ergibt sich im Norden des Untersuchungsgebietes: eine Insel radioaktiven Sandes 1,2 km nördlich des Einbringepunktes, dazwischen kaum oder keine Aktivität. Nun war aber im Norden bereits eindeutig starke Wanderung in nördlicher Richtung bei den Messungen im Herbst 1970 beobachtet worden, so daß die Deutung einer Insel als Folge von Wanderung von radioaktivem und Überlagerung durch natürlichen Sand gerechtfertigt erscheint.

Im Süden wird diese Deutung durch das Auftreten von 3 weiteren Inseln unterstützt. Damit scheint die Tendenz zu seewärtiger Wanderung beim südlichen Einbringepunkt erwiesen zu sein. Auch der im Norden eingebrachte Sand wandert seewärts, aber erst, nachdem er sich einige hundert Meter nach Süden ausgebreitet hat. Es gibt also eindeutige Hinweise auf eine seewärtige Wanderung, die innerhalb eines Streifens verläuft,

der etwa von 400 m südlich des nördlichen Einbringepunktes bis 700 m südlich des südlichen Einbringepunktes verläuft.

### 8. Zusammenfassung

Zwei Chargen von je 100 kg mit 3 Ci aktivierten Seesandes wurden am 29. September 1970 an zwei Stellen vor der Küste von Westerland/Sylt mit Hilfe eines Hubschraubers eingebracht. In regelmäßigen Abständen wurde die Ausbreitung des Sandes bis zum Juni 1971 verfolgt. Die Ergebnisse sind in Form von Isolinien auf 10 Karten des Untersuchungsgebietes dargestellt. Von besonderem Interesse ist die letzte Messung im Mai/Juni 1971, bei der die im Bericht I erläuterte Theorie der quantitativen Auswertung und die in Bericht II beschriebene Meßeinrichtung zum erstenmal eingesetzt wurden. Damit konnten erstmalig quantitative Ergebnisse erzielt werden. Es zeigte sich, daß 9 Monate nach dem Einbringen in der näheren Umgebung der Einbringepunkte noch 24 kg bzw. 17 kg verblieben waren. Im Mittel betragen die mittleren Vergrabungstiefen 5–7 cm, dies entspricht einer maximalen Vergrabung von ca. 30 bis 50 cm je nach Verteilungsfunktion des radioaktiven Sandes mit der Tiefe.

Eindeutig ergab sich im nördlichen Einbringepunkt eine Wanderung in nördliche Richtung, im südlichen Einbringepunkt in südliche Richtung. Es muß dazwischen also einen „neutralen“ Punkt geben, bei dem die Wanderung in nördliche und südliche Richtung etwa gleich groß ist. Aufschlußreich ist ferner die Beobachtung, daß der Abtransport des Sandes im Norden stärker ist als im Süden und daß zweifellos eine schwache Tendenz zu seewärtiger Wanderung vorhanden ist. In Richtung auf das Ufer hin wurde überhaupt keine Wanderung festgestellt.

Die quantitative Auswertung wird im Detail durchgeführt, wobei besonders die Fehlerrechnung beachtet wird. Eine entscheidende Verbesserung der Genauigkeit ist, abgesehen von volumenproportionaler Markierung, vor allem durch längere Meßzeiten zu erreichen.

Es werden schließlich erste theoretische Ansätze der Beschreibung der Sandwanderung durch Einführung eines mittleren Transportparameters gemacht, der sich aus dem Zeitpunkt der maximalen Ausdehnung der Isolinien sowie aus der in der Nähe des Einbringepunktes verbleibenden Restsandmenge abschätzen läßt.

### 9. Schriftenverzeichnis

- DOLEZAL, R., PETERSEN, M. et al.: Entwicklung und Untersuchung eines radioaktiven Indikatorverfahrens zur Messung der Kinetik, der Erosion und des Sandtransportes an sandigen Brandungsküsten, EURATOM Forschungsbericht 2167.d, 1965.