

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL
- Forschungsstelle Küste -

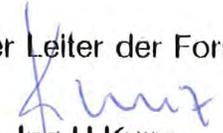
MTK 385

Sedimentologische Untersuchungen
zu Wechselwirkungen zwischen
Küstenbauwerken und mariner Umwelt

Schlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben
"Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt"
- Teilvorhaben "Naturuntersuchungen"-
-Sedimentologie-

Norderney,
im August 1992

Der Leiter der Forschungsstelle


Dr.-Ing. H. Kunz

Bearbeiter: Dipl.-Geol. Volker Eitner
Dipl.-Ing. Günther Ragutzki
Dipl.-Geol. Dr. Theo Westhoff

029947 

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Untersuchungsverfahren	5
2.1 Sedimentologische Untersuchungen	5
2.2 Morphologische Untersuchungen	6
3. Ergebnisse	7
3.1 Sedimentologie	7
3.1.1 Ebbdelta des Norderneyer Seegats	7
3.1.2 Strand- und Vorstrandbereich	9
3.2 Einzeltidenergebnisse	31
3.2.1 Sedimentverteilungen	31
3.2.2 Sedimentumlagerungsintensitäten	34
3.2.3 Lumineszenzversuche	42
4. Folgerungen	51
5. Zusammenfassung	52
6. Literatur	53

1. Einleitung

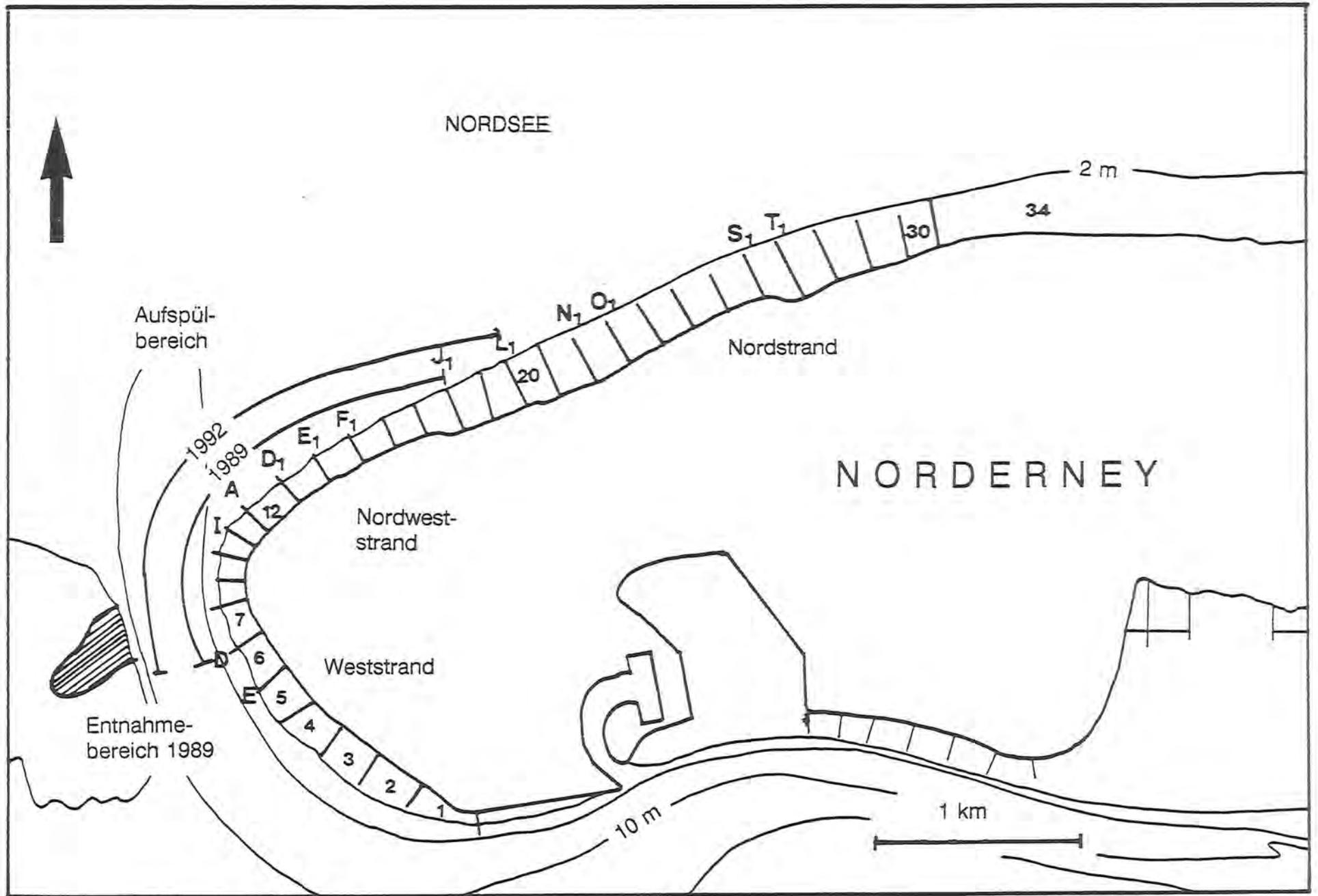
Fortschreitende, die Insel Norderney bedrohende Strand- und Dünenverluste waren Mitte des vorherigen Jahrhunderts Anlaß, den Westkopf Norderneys durch umfangreiche Strand- und Dünenschutzwerke - Bühnen, Strandmauern und Deckwerke - zu sichern. Die aus den komplexen hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen im Seegat- und Riffbogenbereich resultierenden Strandhöhenverluste konnten dadurch in ihren Auswirkungen zwar begrenzt, aber nicht grundsätzlich verhindert werden. Daher wurden im Laufe der Zeit bis in die 50er Jahre dieses Jahrhunderts weitere Ausbauten und Verstärkungen erforderlich.

Nach dem zweiten Weltkrieg war dann ein Zustand der negativ verlaufenden Strandentwicklung erreicht, der eine grundlegende Entscheidung erforderte: Bau eines Dammes zur Verbesserung der Verhältnisse am Westkopf oder/und Verstärkung und Erhöhung der vorhandenen Deckwerke oder aber die Wahl einer damals völlig unkonventionellen Lösung zur Sicherung der Insel durch eine künstliche Strandauffüllung. Diese Maßnahme bedeutete eine Abkehr vom ausschließlich passiven zum aktiven Inselschutz: Abmilderung der Seegangskräfte durch ausreichende Strandhöhen am Deckwerksfuß und im Strandbereich, so daß auf sonst erforderliche massive Verstärkungen der Schutzwerke verzichtet werden kann.

Nach der damaligen Grundsatzentscheidung - durch Arbeiten der Forschungsstelle Norderney maßgeblich vorbereitet - wurde 1951/52 die erste, auch in Europa erste künstliche Strandauffüllung auf Norderney ausgeführt. In den Jahren 1967, 1976, 1982, 1984, 1989, 1990 und 1992 folgten weitere Strandauffüllungen mit zum Teil unterschiedliche Zielsetzungen und voneinander abweichenden Sandmengen und Aufspülbereichen (Tab. 1, Abb. 1). Mit der sechsten Strandaufspülung konnte das vom Kuratorium für die FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN initiierte und vom BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE geförderte Forschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" verbunden werden. Das Forschungsvorhaben wurde Mitte 1986 begonnen und Ende 1991 abgeschlossen.

Strandauffüllungen haben sich als geeignete und kostengünstige Lösungen bewährt, um die Beanspruchungen von Bühnen- und Deckwerkssystemen in Bereichen mit abnehmenden Strandhöhen abzumildern und temporäre Strand- und Dünenabbrüche auszugleichen. Nicht hinreichend erfaßt waren bisher die Anwendungsgrundla

Abb. 1 Lageplan des Untersuchungsgebietes



gen. Ziel der Untersuchungen war es daher, mit Hilfe unterschiedlicher, sich ergänzender Verfahren die hydrodynamische Wirksamkeit von Strandauffüllungen und deren Langzeitstabilität in Abhängigkeit von dem vorhandenen Deckwerks- und Buhnensystem zu ermitteln. Aus den Ergebnissen sollten auch Bemessungsansätze entwickelt werden, um Strandauffüllungen zukünftig effektiver gestalten zu können. Die Untersuchungsergebnisse gewinnen für zukünftige Strandauffüllungen auch deshalb an Bedeutung, weil dieses Verfahren ohne oder in Verbindung mit massiven Strandschutzwerken ein Reagieren auf zu erwartende Klimaveränderungen und die damit verbundenen verstärkten Strandverluste ermöglicht.

Strandauffüllungen auf Norderney 1951 - 1992				
Jahr	Menge (Mio. m ³)	d ₅₀ (mm)	Auffüllbereich zw. den Buhnen	Entnahme- Bereich
1951/52	1,245	0,10-0,13	O - V ₁	südl. Inselwatt
1967	0,240	0,15-0,30	E - K ₁	vor Buhne G ₁
1976	0,400	0,18-0,30	E - E ₁	Robbenplate
1982	0,470	0,17-0,25	C - H ₁	Robbenplate
1983**	0,064		J ₁ - N ₁	E' Weiße Düne
1984	0,410	0,16-0,20	C - J ₁	Robbenplate
1989	0,447	0,15-0,20	D - J ₁	Robbenplate
1990**	0,045	0,15-0,22	J ₁ - N ₁	E' Weiße Düne
1992	0,500		D - L ₁	Robbenplate

Tab. 1 Menge und mittlere Korngröße der Sandauffüllungen am Strand von Norderney von 1951 bis 1992; ** Trockeneinbau (nach KRAMER 1960, LUCK 1970, PÄTZOLD 1982, ERCHINGER 1986, STEPHAN 1988, ERCHINGER & LAUE 1989,1992, RAGUTZKI & WESTHOFF 1990, KUNZ 1991)

Als Teilprojekt des KFKI-Forschungsvorhabens wurden zur Klärung der hydrodynamisch-morphologischen Vorgänge bei Strandauffüllungen am Anwendungsbeispiel Norderney erstmals auch umfangreichere sedimentologische Untersuchungen durchgeführt. Während bei den vorhergehenden fünf Norderneyer Strandauffüllungen Sedimentkennwerte nur zu Teilfragen ermittelt wurden, sollten bei der sechsten

Aufspülung in Ergänzung zu hydrometrischen und morphologischen Untersuchungen Ergebnisse zu folgenden Aufgabenstellungen erarbeitet werden:

- Erfassung der langfristigen und großräumigen Sedimentverteilungen und deren Wechselbeziehung zu den Sedimenten im Auffüllbereich
- Bestimmung kurzfristiger Umlagerungen in Zuordnung zu morphologischen und hydrologischen Randbedingungen

Nachfolgend wird über Verfahren und Ergebnisse dieser Sedimentuntersuchungen im Rahmen des o.g. Forschungsvorhabens von 1986 bis 1991 berichtet.

2. Untersuchungsverfahren

2.1 Sedimentologische Untersuchungen

Der Strand und Inselvorstrand wurde in halbjährlichen Abständen entlang von 34 küstennormalen Profilen beprobt, um ein Gesamtbild längerfristiger Änderungen der Sedimentverteilung zu erhalten. Um auch kurzfristige Veränderungen zu erfassen, wurden in monatlichen Abständen Sedimentproben entlang von sieben Profilen entnommen, wobei der Schwerpunkt auf die Problembereiche mit besonders starken Strandhöhenverluste gelegt wurde.

Die Sedimentproben wurden mit einem Stechzylinder (Höhe und Durchmesser jeweils 5 cm) ungestört an der Niedrigwasserlinie (NWL), an der Mittelwasserlinie (MWL), an der Hochwasserlinie (HWL) und am Trockenen Strand (TST), soweit dieser ausgebildet war, entnommen. Von dieser Probenentnahmetechnik wurde bei der sedimentologischen Aufnahme des Aufspülkörpers abgewichen, bei der jeweils 9 Proben pro Bühnenfeld mit einem 12 cm tiefreichenden Stechzylinders entnommen wurden.

Der Inselvorstrand und das Ebbdelta des Norderneyer Seegats wurden vom Schiff aus durch einen Van-Veen-Greifer beprobt, der jedoch nur gestörte Sedimentproben liefert. Die Vorstrandproben wurden 50 m seeseitig der Bühnenköpfe, entlang der sogenannten Bühnenstreichlinie (BSL) gewonnen.

Die Umlagerungsintensität einzelner Tiden wurde beispielhaft im Bühnenfeld D₁-E₁ mit Farbsandkörpern bzw. mit sogenannten Grenzwertanzeigern bestimmt. Zur Ver-

markung der Schnittpunkte eines Rasters, das über das Bühnenfeld gelegt wurde, wurden 30 cm lange, 3 mm starke Schweißdrähte benutzt, die ca. 20 cm in den Strand eingedrückt werden. Über diese Drähte wurde jeweils eine Ringscheibe ($D = 30$ mm, $H = 1$ mm) gelegt und anschließend der Abstand dieser Scheibe zur Spitze des Schweißdrahtes mit einem Zollstock gemessen und notiert. Da davon auszugehen ist, daß sich die Drähte aufgrund der großen Reibung nicht mehr heben oder senken, können diese als Pegel zur Bestimmung der Erosions- und Sedimentationsrate benutzt werden. Bei Erosion des Strandes vergrößert sich der Abstand Pegelspitze - Strand bzw. Ringscheibe. Durch die Ringscheibe läßt sich jedoch auch die Stärke der Sedimentation der Sande messen, da alles Material, das über der Scheibe liegt zwischen der vorletzten und letzten Messung sedimentiert sein muß. Auskolkungen durch die Ringscheibe, die eine verstärkte Erosion im unmittelbaren Bereich um den Pegel hervorrufen können, liegen nach vorherigen Vergleichsmessungen mit Farbsandkörpern bei stärkerem Seegang im Bereich von 2 bis 10 mm. letztere sind ca. 20 cm lange Drähte mit jeweils einer Ringscheibe (Durchmesser von ca. 30 mm). Sie bieten gegenüber der topographischen Vermessung den Vorteil nicht nur die Netto-Umlagerung, sondern zusätzlich die Erosionstiefe und Sedimentationshöhe anzugeben.

Auf der Grundlage von bestimmten Sedimentparametern, (Korngrößenverteilung, mittlere Korngröße d_{50} , Median, Sortierung, Schiefe, Kurtosis, Karbonatgehalt und Schwermineralgehalt) konnten einige Transportprozesse qualitativ erfaßt werden. Für Untersuchungen kleinräumlicher Transportvorgänge haben sich darüber hinaus auch Luminophorenversuche als hilfreich erwiesen.

2.2 Morphologische Untersuchungen

Um Verhalten, Verformung und Umlagerungen sowie die Dauer und Form der Regeneration der vor den Deckwerken gelegenen Inselstrände und der ungeschützten Randdünenbereiche festzustellen, wurden die lang- und kurzfristigen Änderungen der Strandhöhen ermittelt. Für den Untersuchungszeitraum sind halbjährliche Nivellments im gesamten Bühnenbereich und monatliche tachymetrische Aufnahmen der Strandhöhen in den vier Meßfeldern durchgeführt worden.

Um Wechselwirkungen zwischen Vorstrand, Strand und Bauwerken zu erfassen, wurde ein Bereich bis etwa 1.300 m seewärts der Bühnenstreichlinie gepellt. Diese

Arbeiten erfolgten einmal jährlich mit dem Vermessungsschiff "Nynorderoog" der Forschungsstelle Küste.

Aus den Strandaufnahmen und den Peilungen des Vorstrandes wurden Massenbilanzen ermittelt und Tiefenänderungspläne für die Bühnenbereiche erstellt. Das Formänderungsverhalten der Strände wurde auf der Grundlage von Nivellments und tachymetrischen Aufnahmen zudem für repräsentative Höhenlinien in Form von Zeit-Weg-Plänen dargestellt und im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung des Umfeldes untersucht.

Über den Teil "Morphologie" wird gesondert berichtet.

3. Ergebnisse

3.1 Sedimentologie

3.1.1 Ebbdelta des Norderneyer Seegats

Bereits in der Vergangenheit war das Ebbdelta des Norderneyer Seegats Gegenstand intensiver Untersuchungen hinsichtlich der Erfassung des sedimentologischen Geschehens (z.B. KRAUSE 1950, KURZAK et al. 1950, THILO & KURZAK 1952, DECHEND & RICHTER 1953, AKKERMANN 1956, HOMEIER & KRAMER 1957, NUMMEDAL & PENLAND 1981). Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Sedimentverteilung im Bereich des Ebbdeltas und deren zeitlichen Änderungen im Rahmen einer Dissertation von WESTHOFF (1990) eingehend untersucht und dargestellt. Daher kann an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet werden. Diese Arbeit ist Bestandteil des Abschlußberichtes; sie ist als Anlage beigefügt.

Der Sedimenttransport in den Rinnen des Ebbdeltas erfolgt fast ausschließlich durch Tideströmungen. Auf den Platen überwiegen dagegen seegangsinduzierte Strömungen als Transportmedium. In Abb. 2 sind die unterschiedlichen Transportmedien und ihre Richtungen im Ebbdelta des Norderney Seegat nach WESTHOFF (1990) dargestellt.

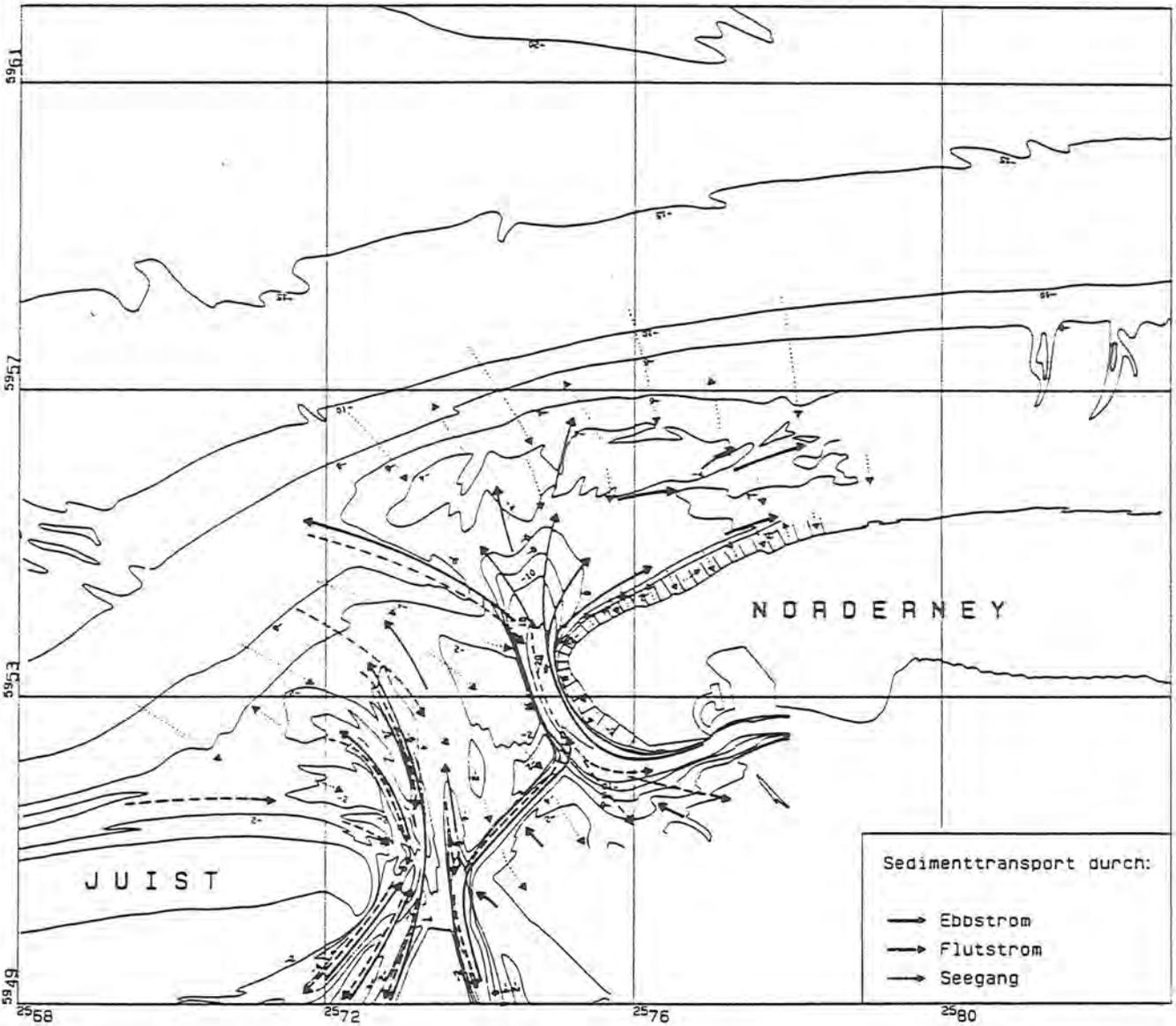


Abb. 2 Sedimenttransport im Ebbdelta des Norderneyer Seegats (aus WEST-HOFF 1990: 168)

3.1.2 Strand- und Vorstrandbereich

Bei allen bisherigen Strandauffüllungen wurden Sedimente im Fein-/Mittelsandbereich (überwiegend $d_{50} \approx 0,2$ mm) mit wechselnden Grobsandanteilen - im wesentlichen Schillbruch - aufgespült (KUNZ 1991). Selektionsprozesse, die im Anschluß an die Auffüllungen feineres Material aussortierten, hatten eine Vergröberung zufolge.

Da es sich bei dem aufgespülten Material um "Fremdmaterial" handelt, kann aus diesem Umstand auch ein Vorteil hinsichtlich der Beurteilung von Transportvorgängen gezogen werden. Das zu feinkörnige Material hebt sich von den ursprünglichen Strandsedimenten ab und kann somit als natürlicher Tracer genutzt werden. Auch die Schwermmineraleanteile boten als natürlicher Tracer die Möglichkeit, einige Transportvorgänge zu verdeutlichen (WESTHOFF 1990).

Die Strände des Westkopfes der Insel Norderney sind den Kräfteinwirkungen der Natur (hydrodynamische Wechselwirkungen) in unterschiedlicher Weise ausgesetzt. Die voneinander abweichenden d_{50} -Verteilungen (Abb. 3-10) lassen sich hierdurch erklären. Dabei ist zu vergegenwärtigen, daß der Seegang und die dadurch induzierten Wirkungen stark von den jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten abhängen (NIEMEYER 1986). Die Sedimentbilanz wird seit 1951 wesentlich von den Strandauffüllungen beeinflusst (KUNZ 1991). Die im folgenden verwendeten Ortbezeichnungen sind der Abb. 1 zu entnehmen.

Der Weststrand unterscheidet sich hinsichtlich der Verteilung der d_{50} -Werte durch abweichende hydrodynamische Einwirkungen des Norderneyer Seegats von den anderen Strandabschnitten. Neben den seegangserzeugten Strömungen wirken hier in verstärktem Maße zusätzlich auch Tidenströmungen. Nach NIEMEYER (1987) können diese in den Bühnenfelder bis zu 30 cm/s erreichen. Aufgrund dieser Gezeitenströmungen, die in den anderen Bühnenfeldern am Nordwest- und Nordstrand nahezu vernachlässigbar sind, und deren Überlagerung mit seegangsinduzierten Strömungen (NIEMEYER 1991), stellen sich stark veränderliche Kornspektren ein. Das Sediment weist wechselnde Anteile von Schill oder Schluff bzw. Ton auf (Abb. 11). Dies gilt insbesondere für den Vorstrand- und den MTnw-Bereich. Weiterhin zeigt das Sediment in der Regel einen hohen Sortierungsgrad. Der Karbonatgehalt und die mittlere Korngröße (d_{50}) hingegen sind jedoch geringer im Vergleich zu den Sedimenten des weiter östlich gelegenden Strandes.

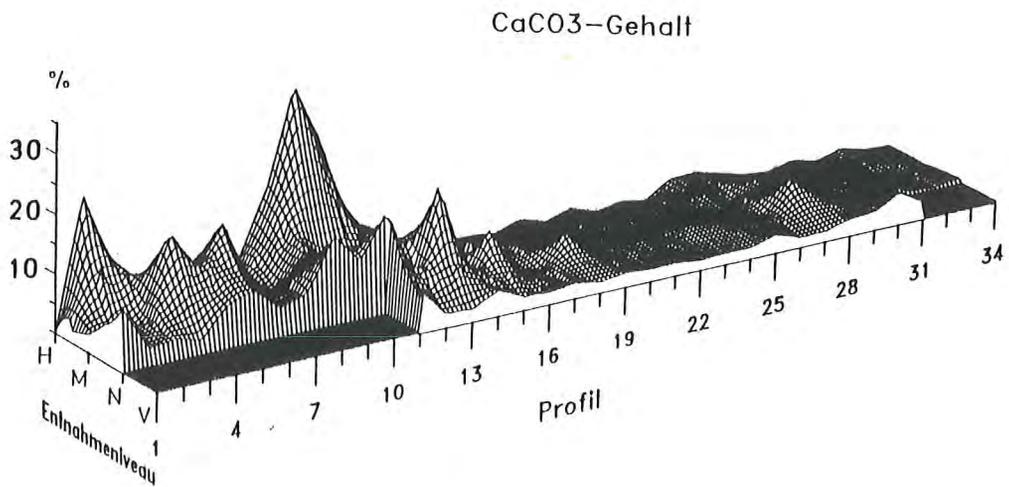
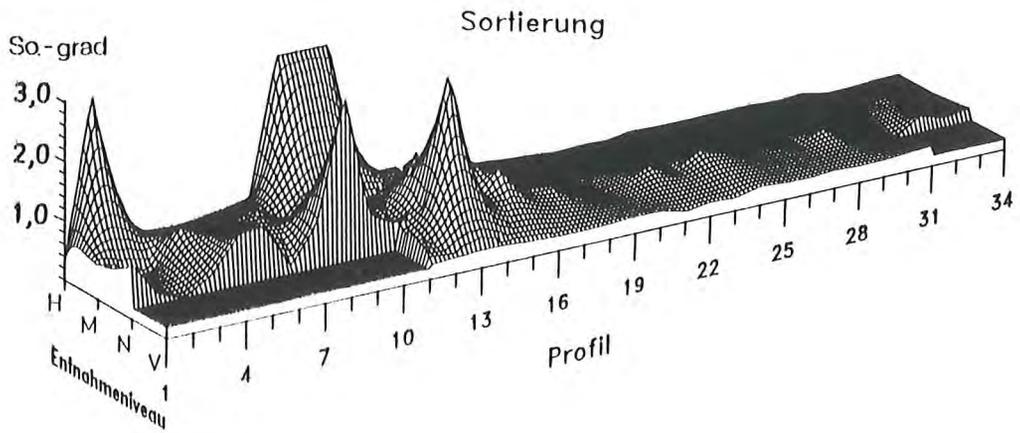
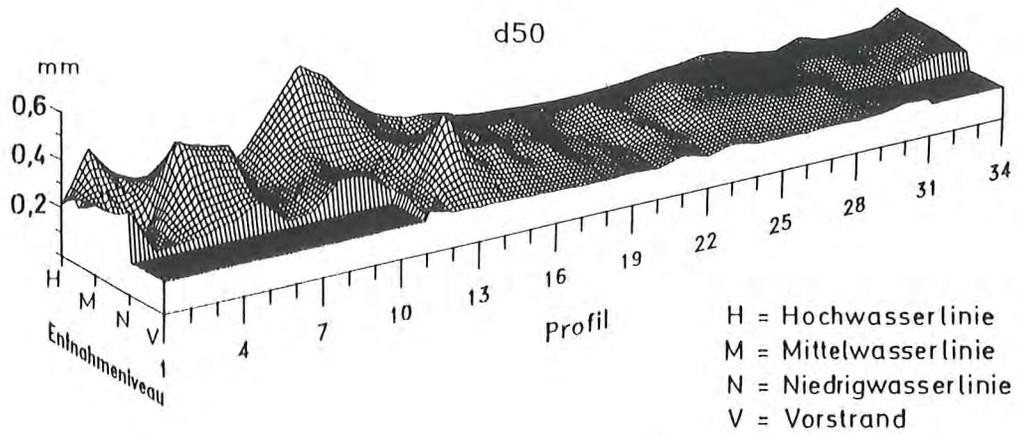


Abb. 3 Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im April 1987 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

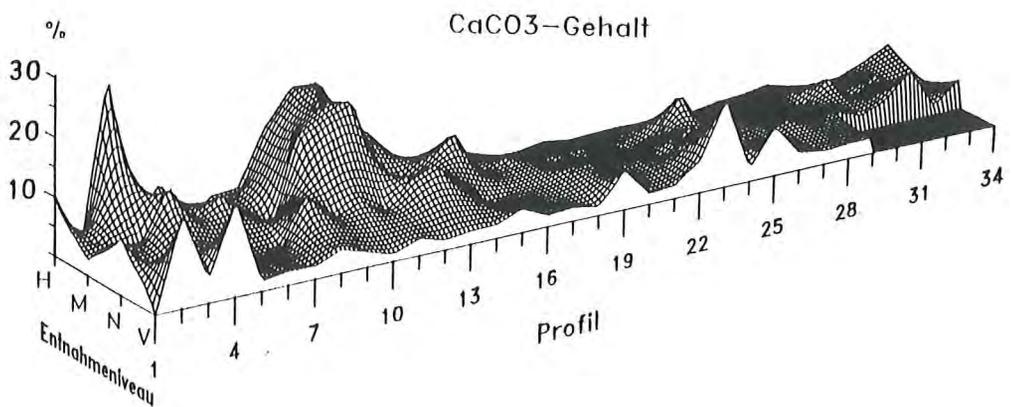
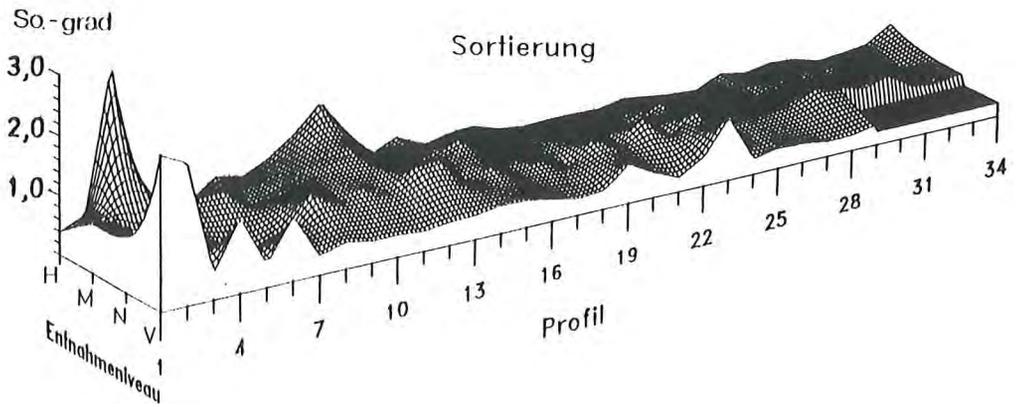
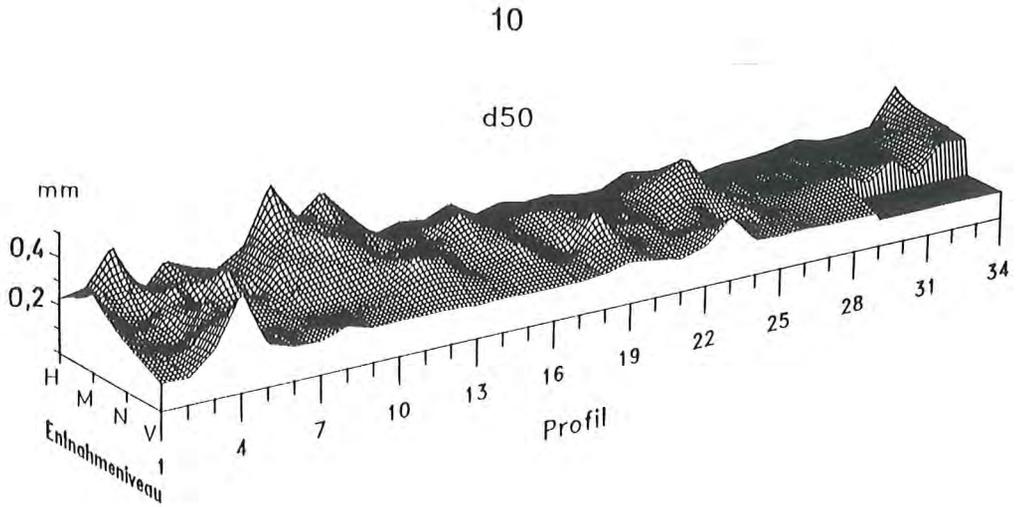


Abb. 4 Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im September 1989 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

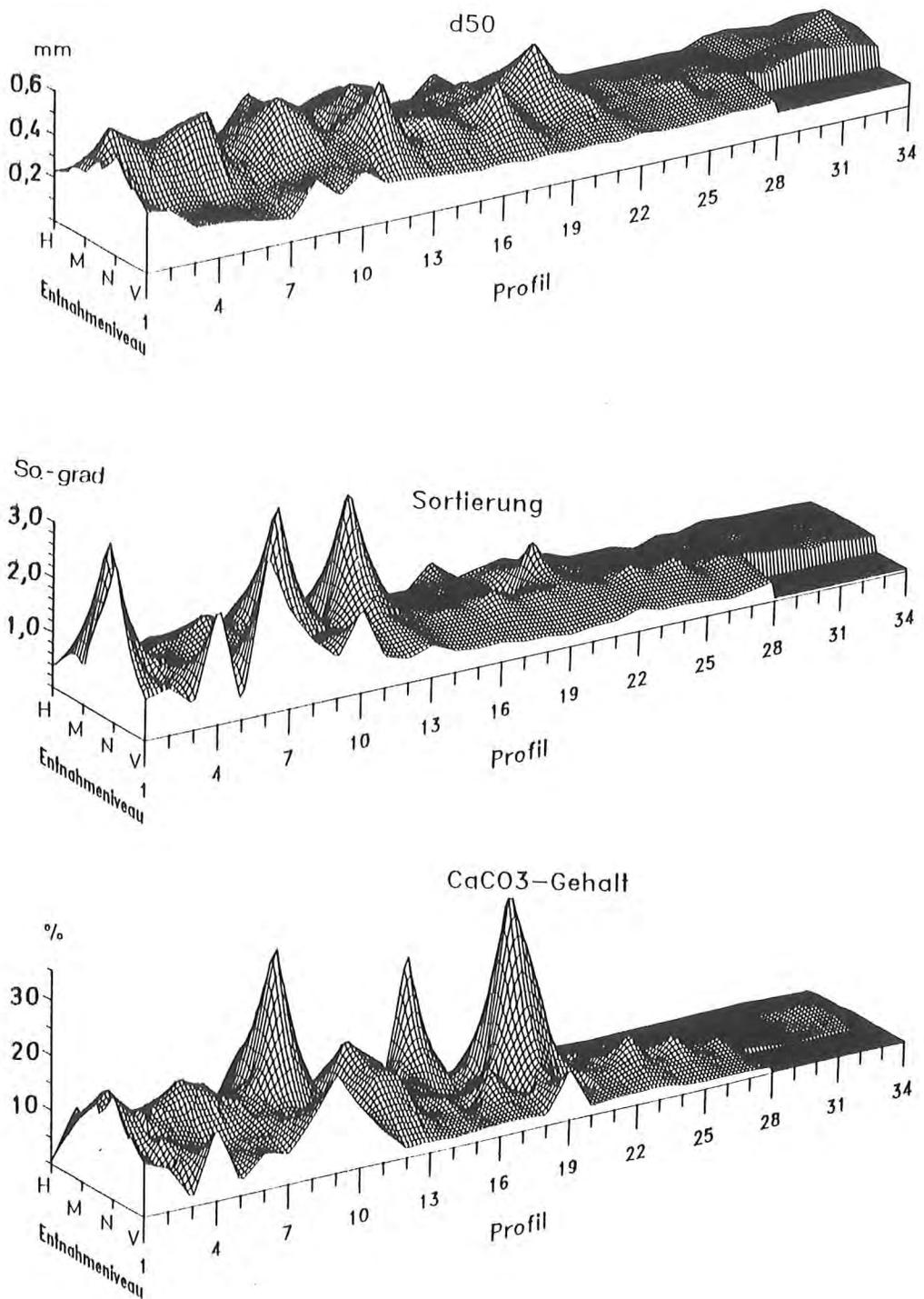


Abb. 5 Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im April 1988 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

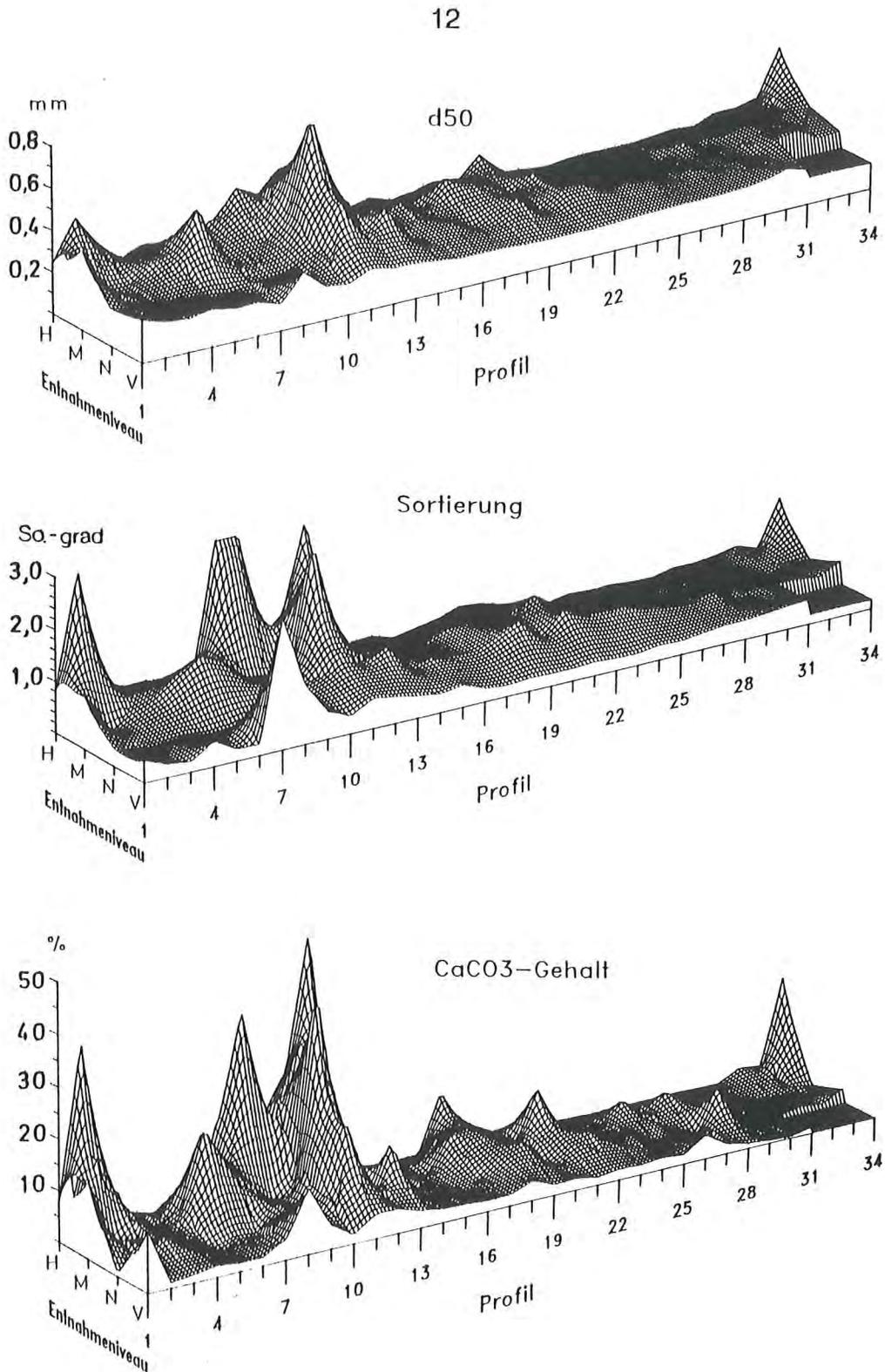


Abb. 6 Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im September 1988 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

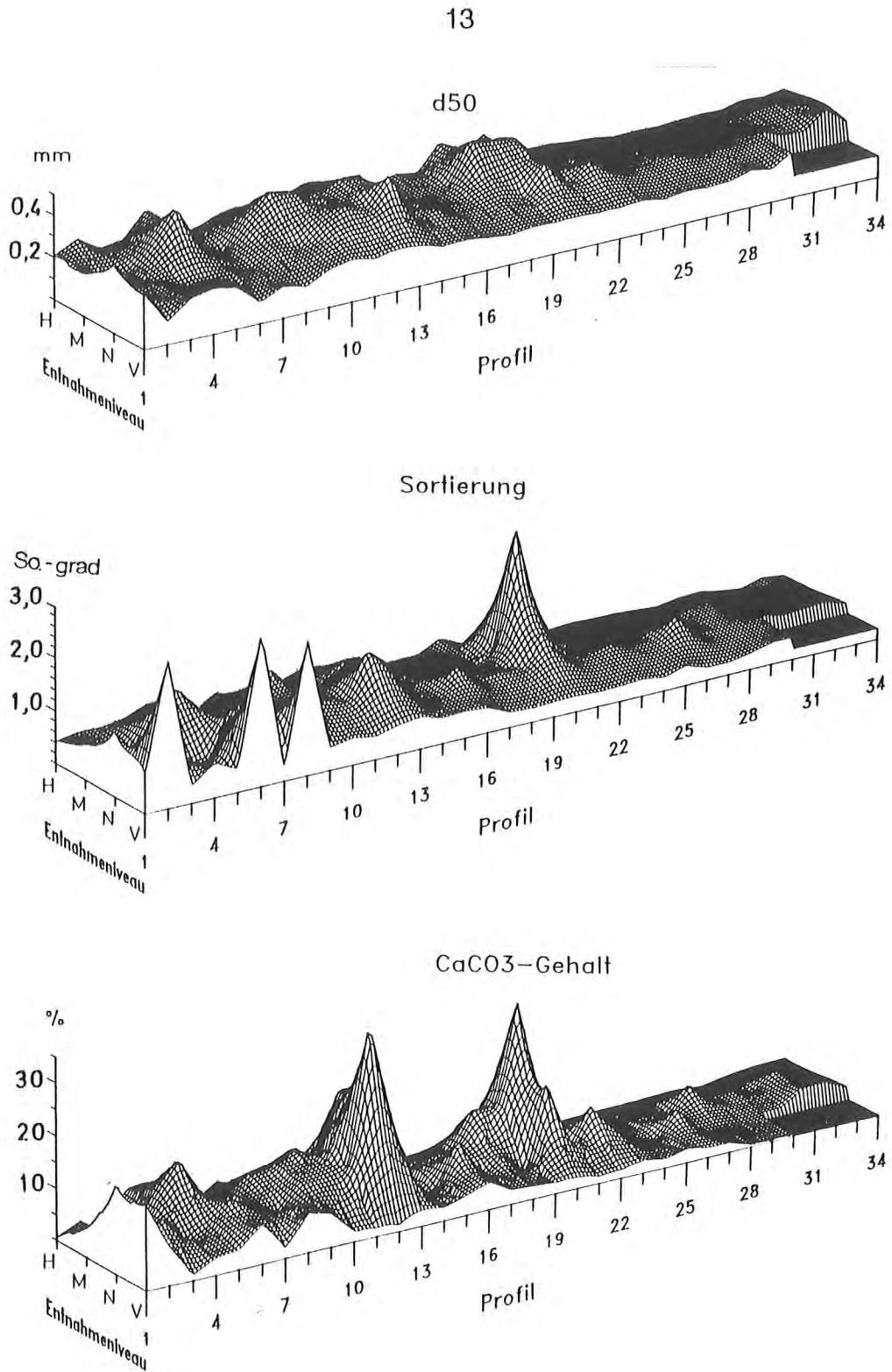


Abb. 7

Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im März 1989 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

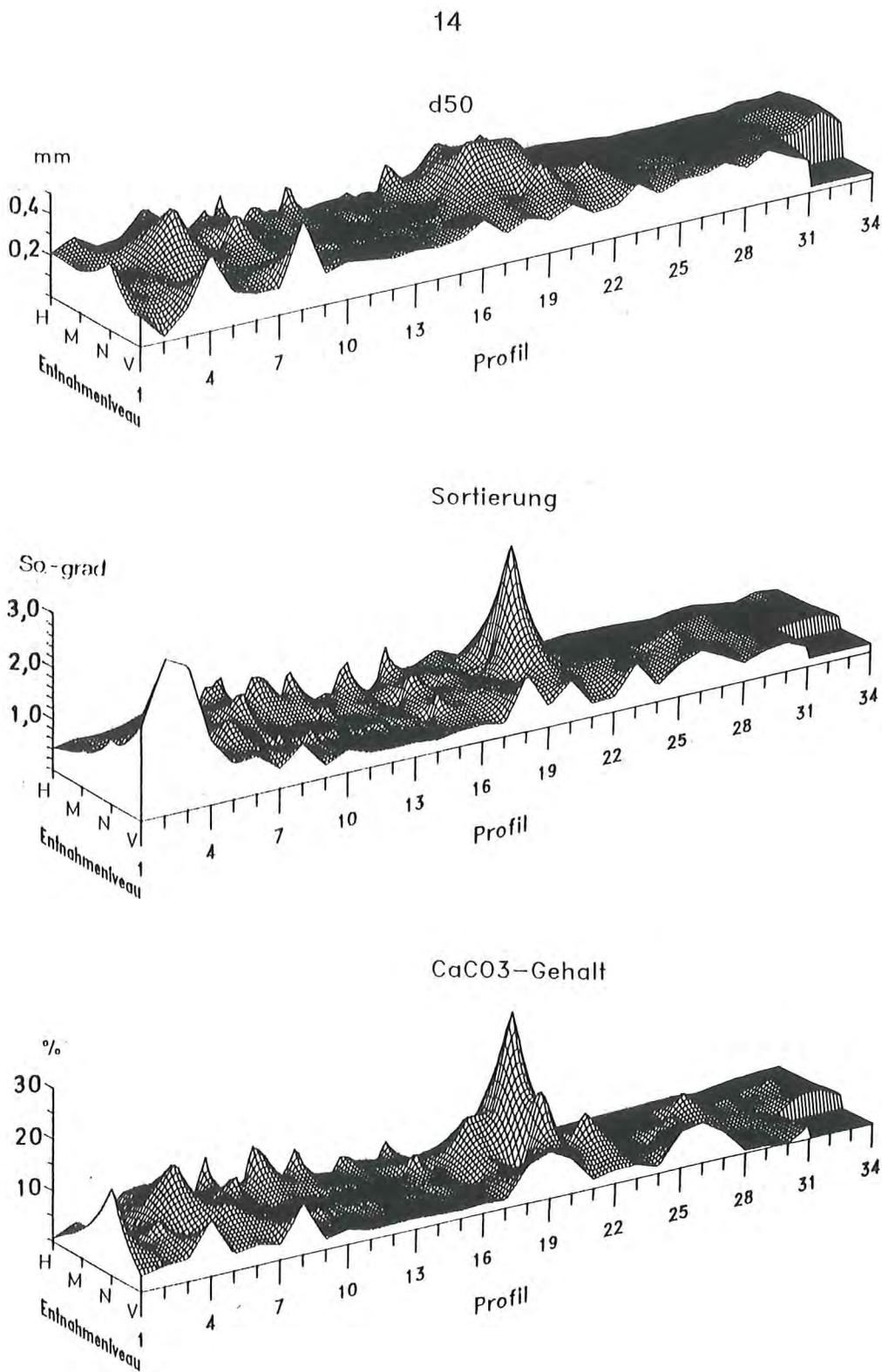


Abb. 8 Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im Mai 1989 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

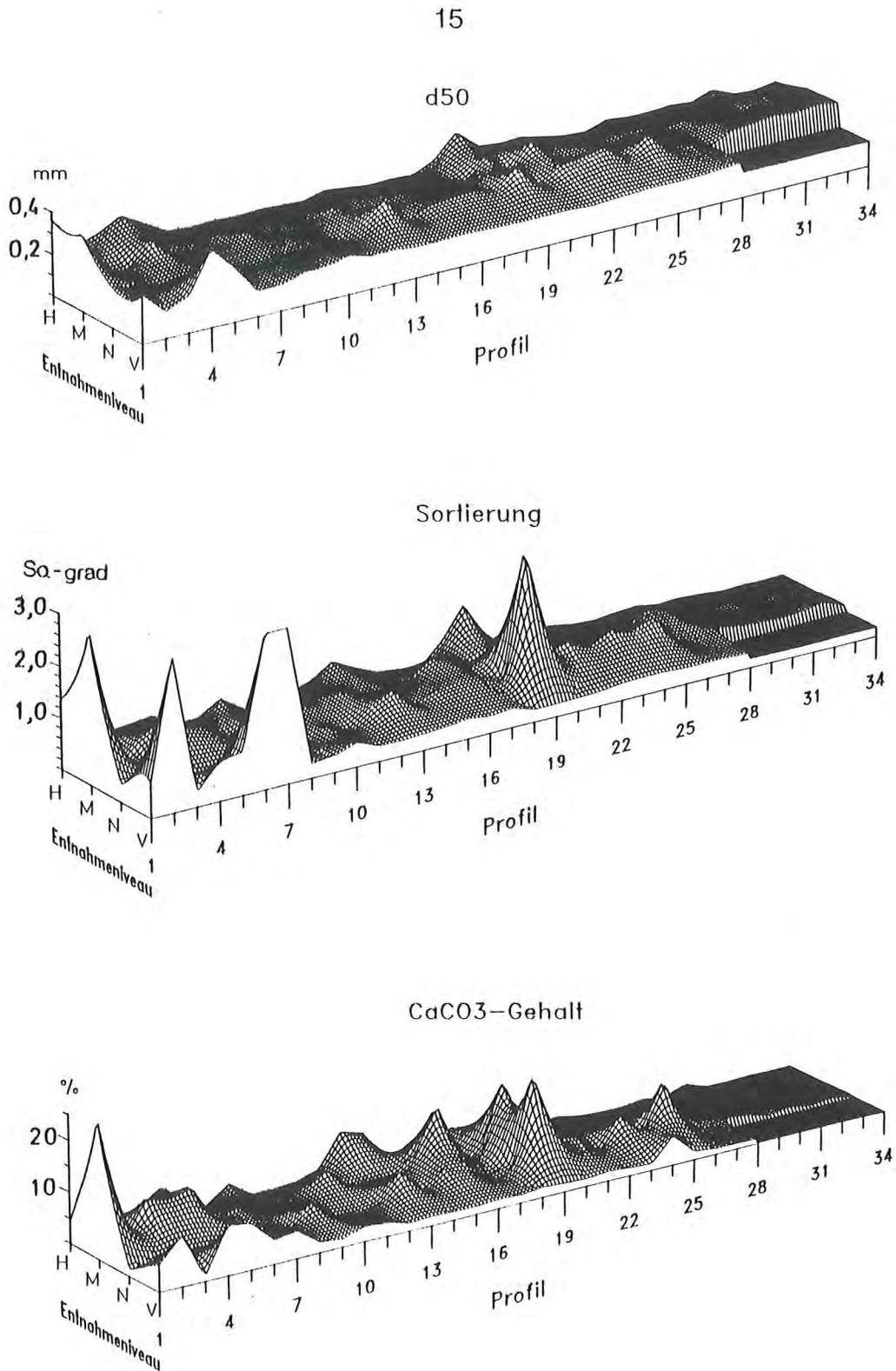


Abb. 9

Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im September 1989 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

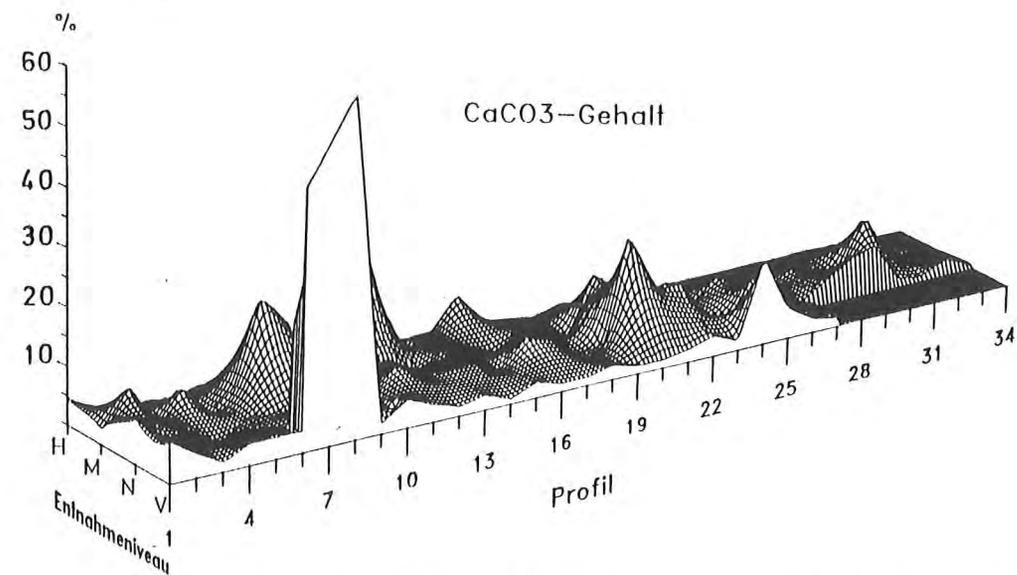
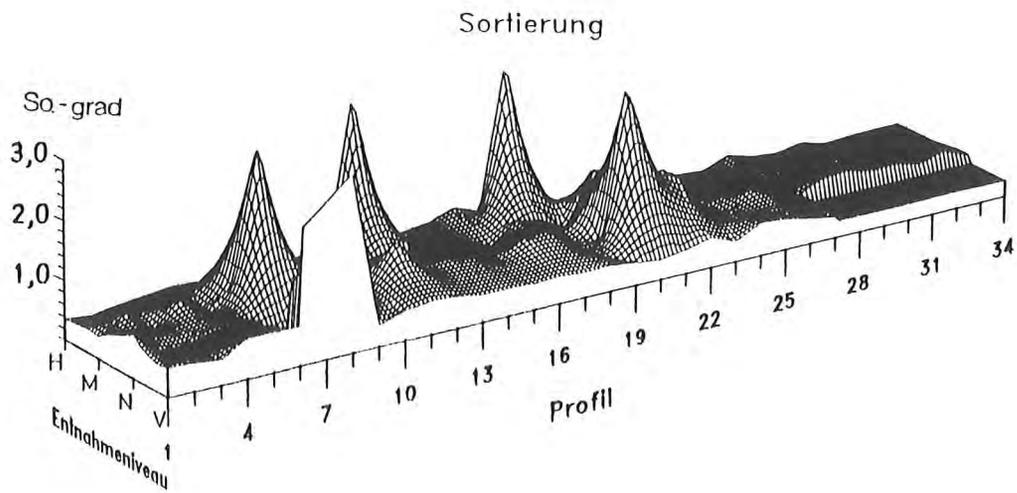
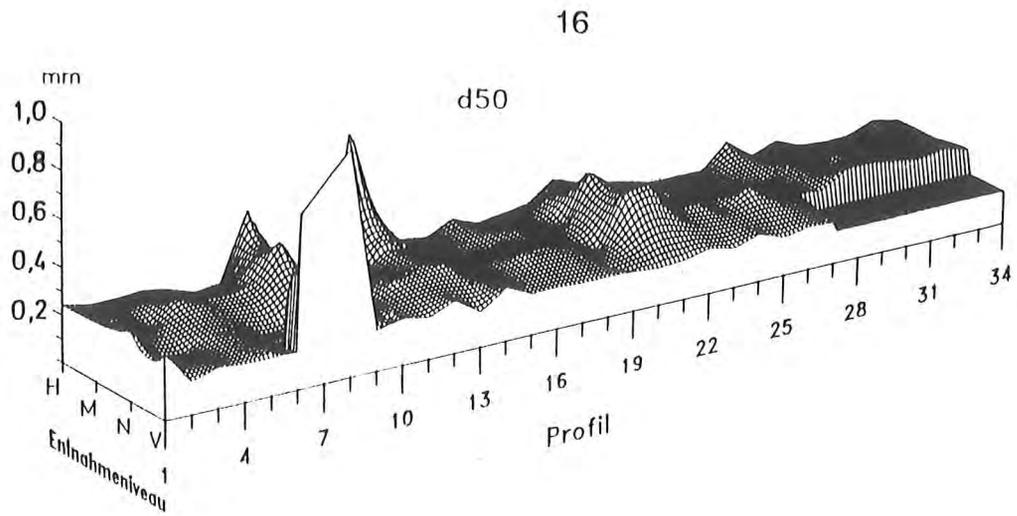


Abb. 10 Verteilung der mittleren Korngröße (d_{50}), der Sortierung und des Kalkgehaltes des Strand- und Vorstrandbereiches im März 1990 (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

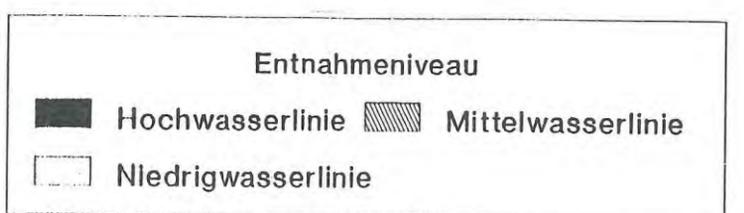
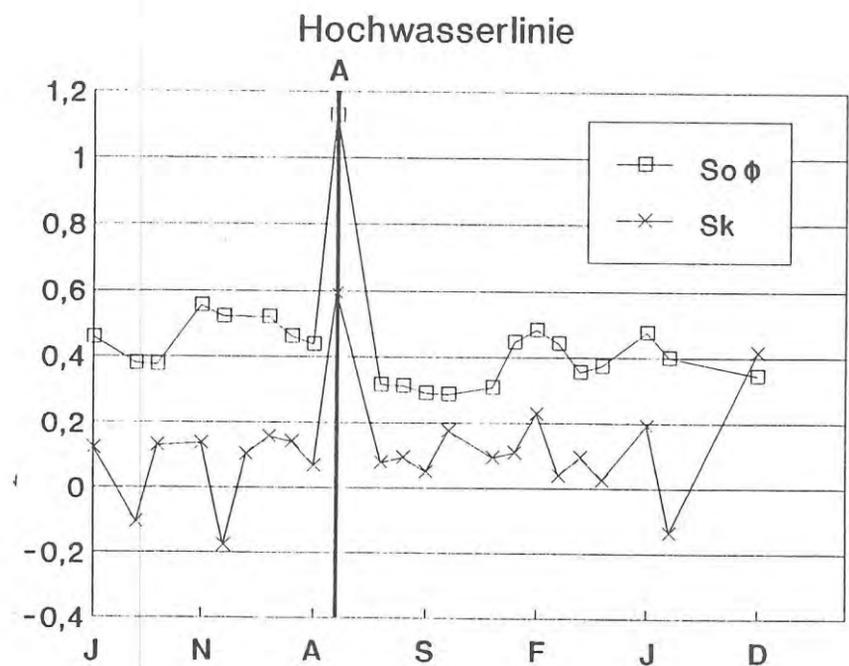
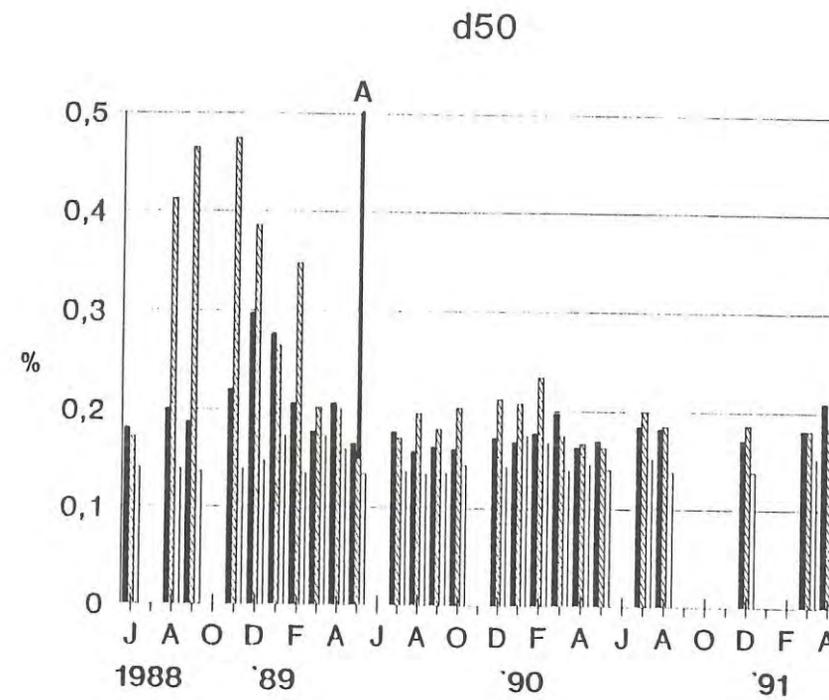
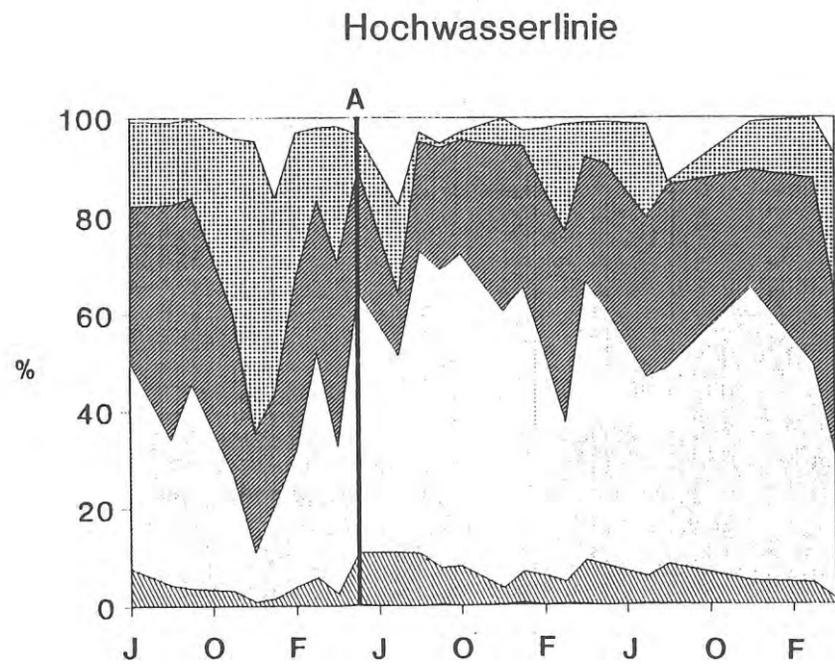
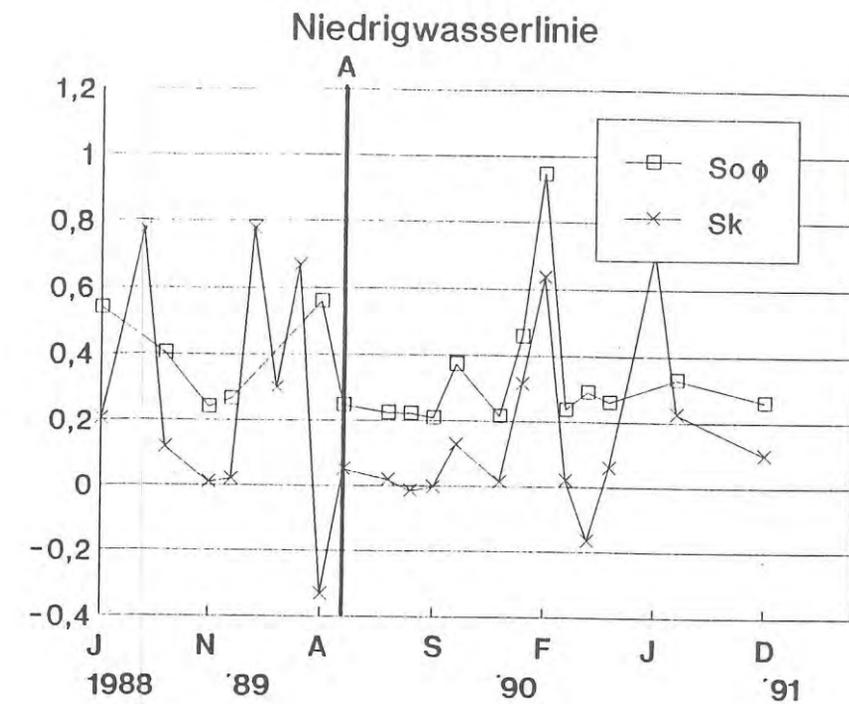
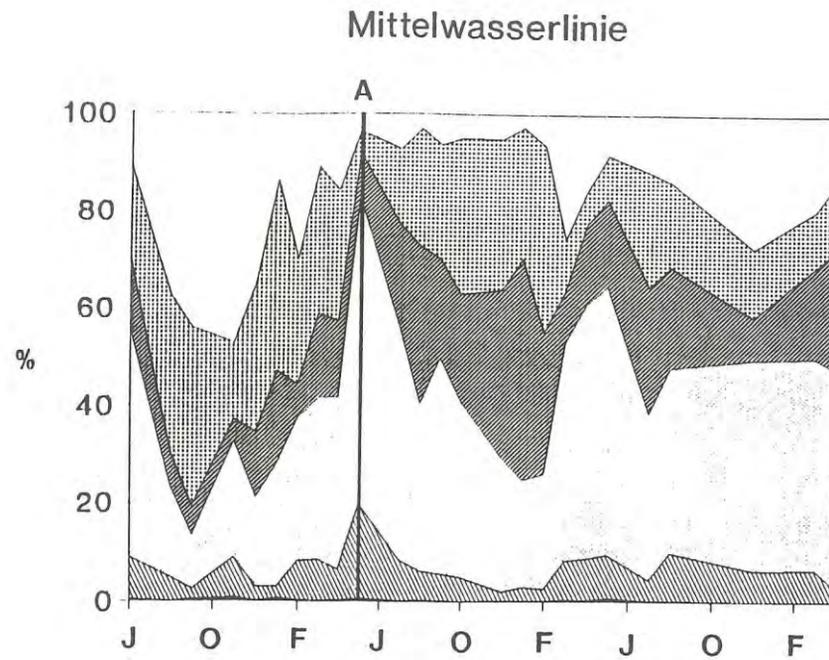
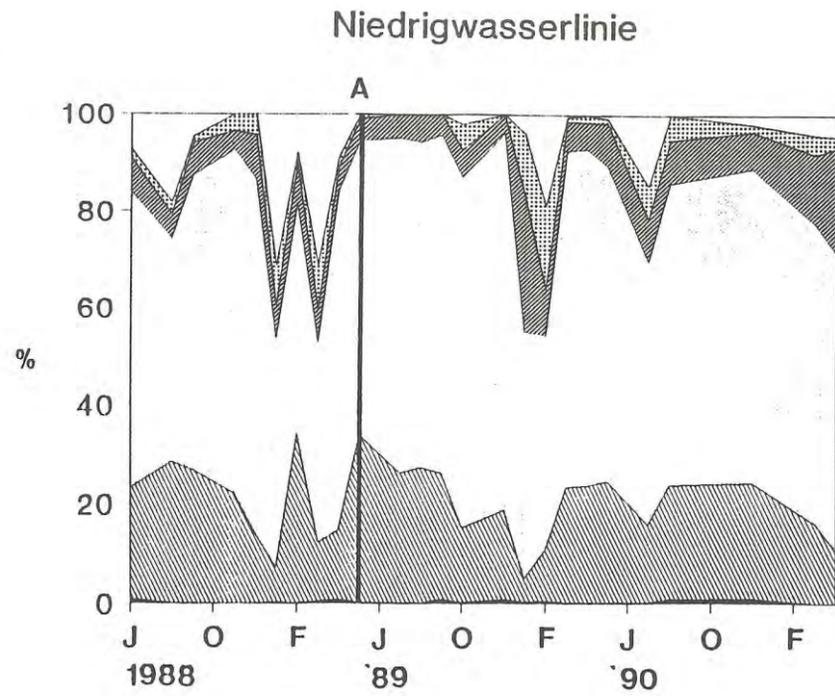


Abb.11 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung(Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinie) der mittleren Korngröße(d50),der Sortierung(So) und der Schiefe(Sk) in dem Bühnenfeld E-D/Profil 1 (A:Aufpülung Mai 1989)

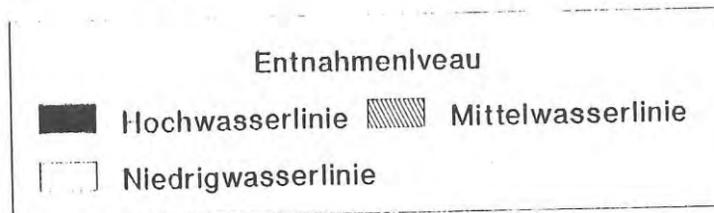
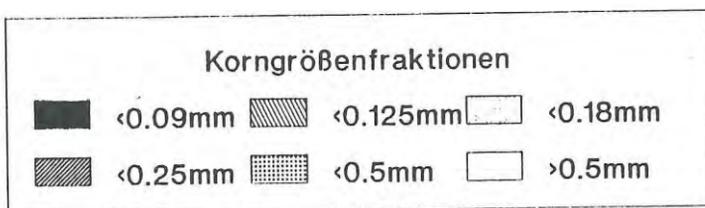
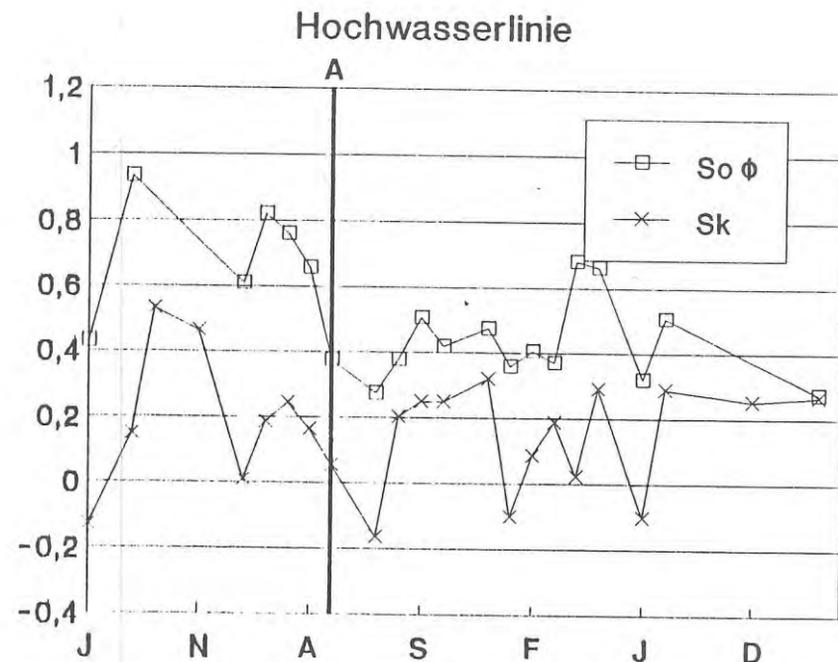
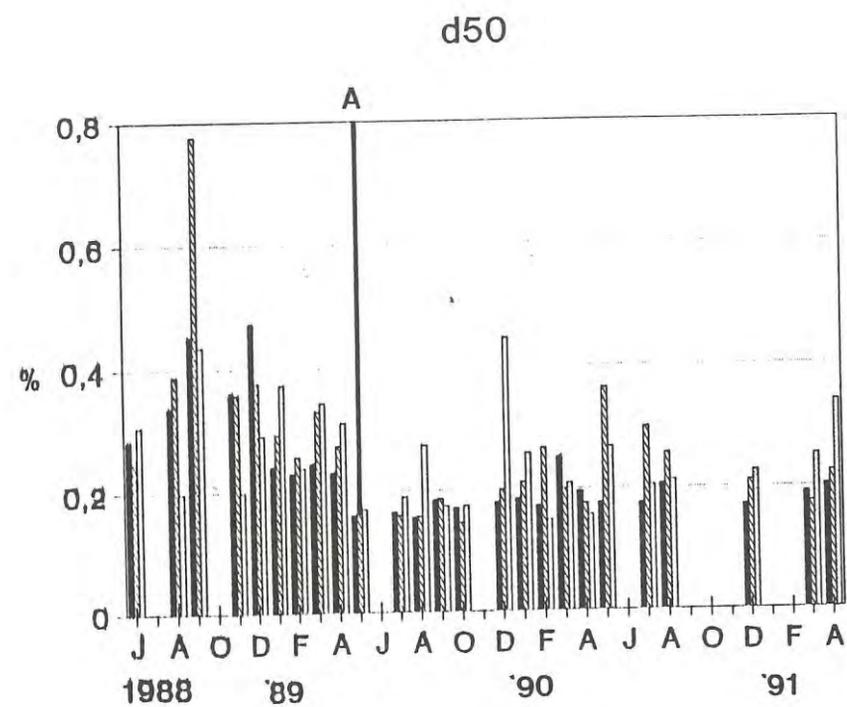
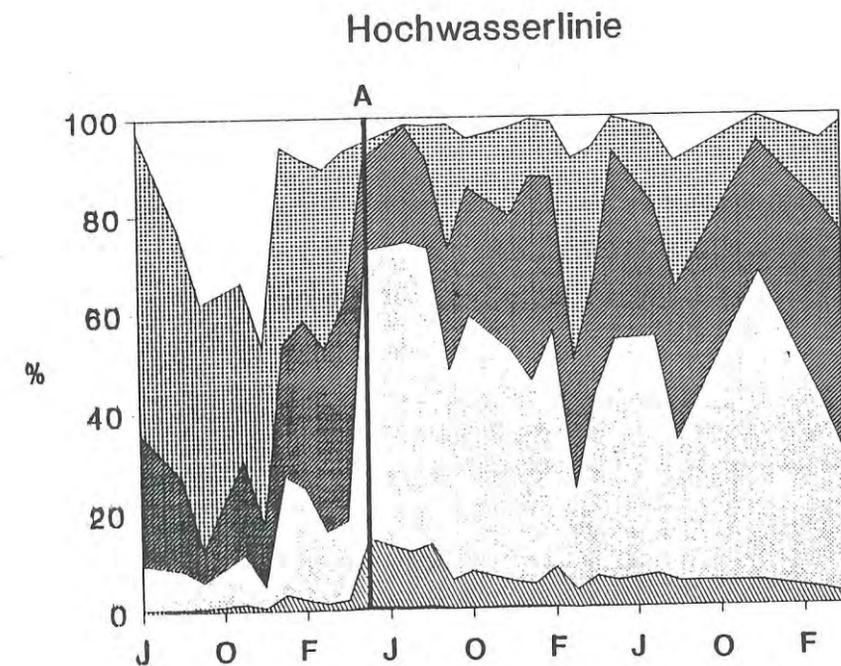
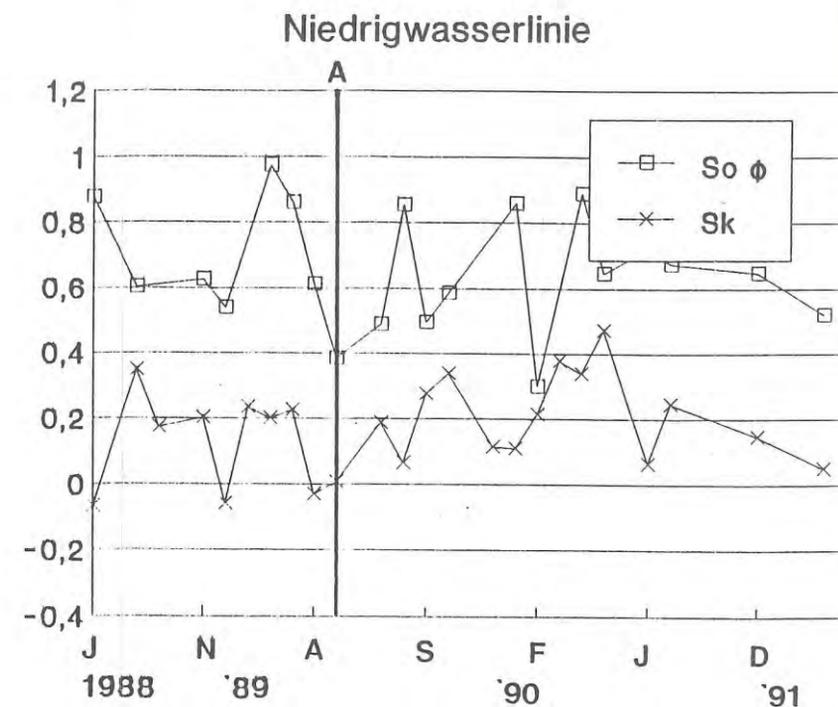
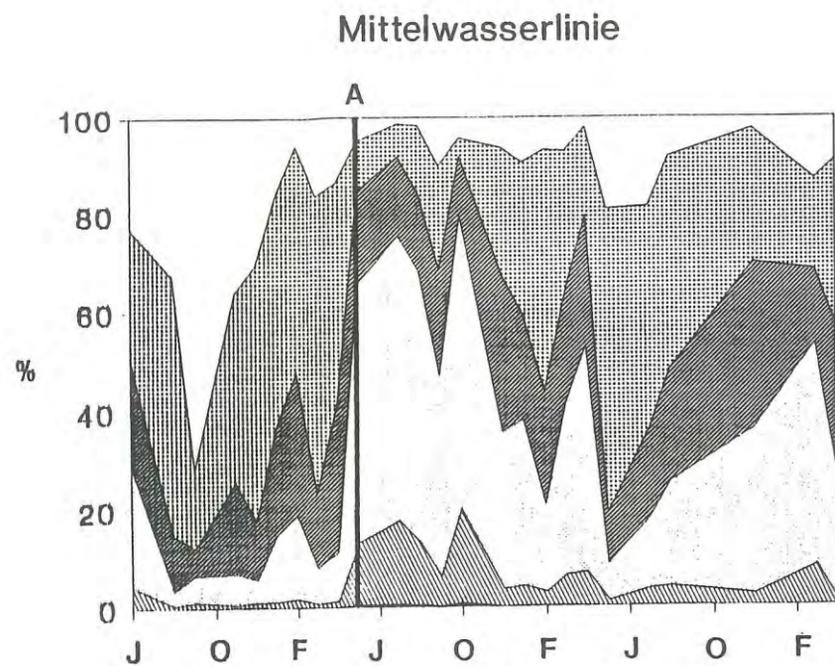
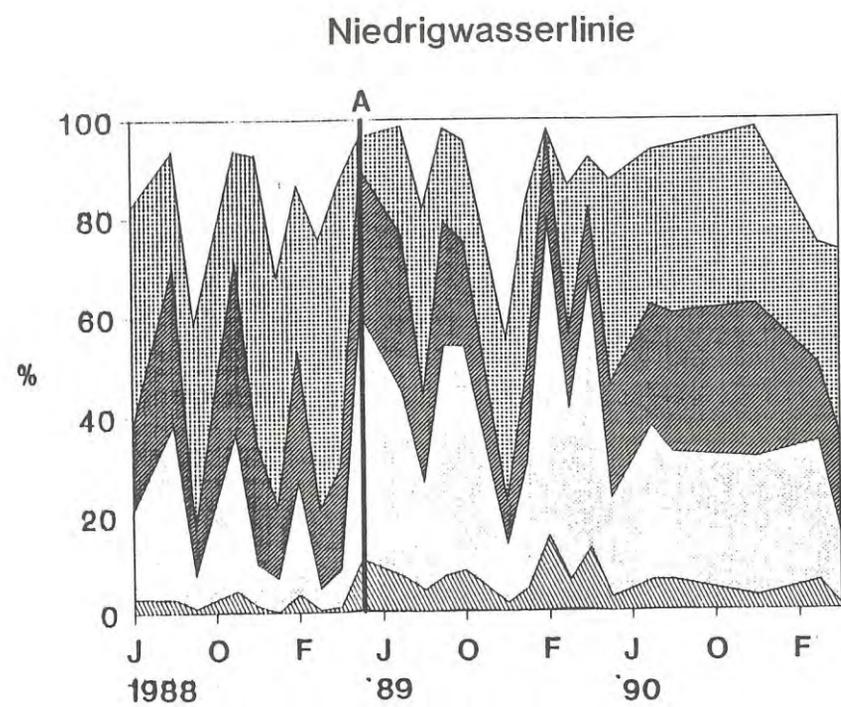


Abb.12 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung(Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinien), der mittleren Korngröße(d50), der Sortierung(So) und der Schiefe(Sk) in dem Buhnenfeld Zbl-A-D/Profil 2 (A:Aufspülung Mai 1989)

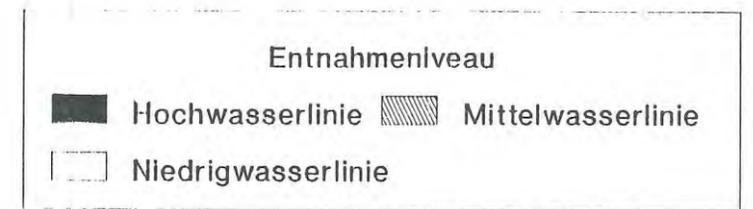
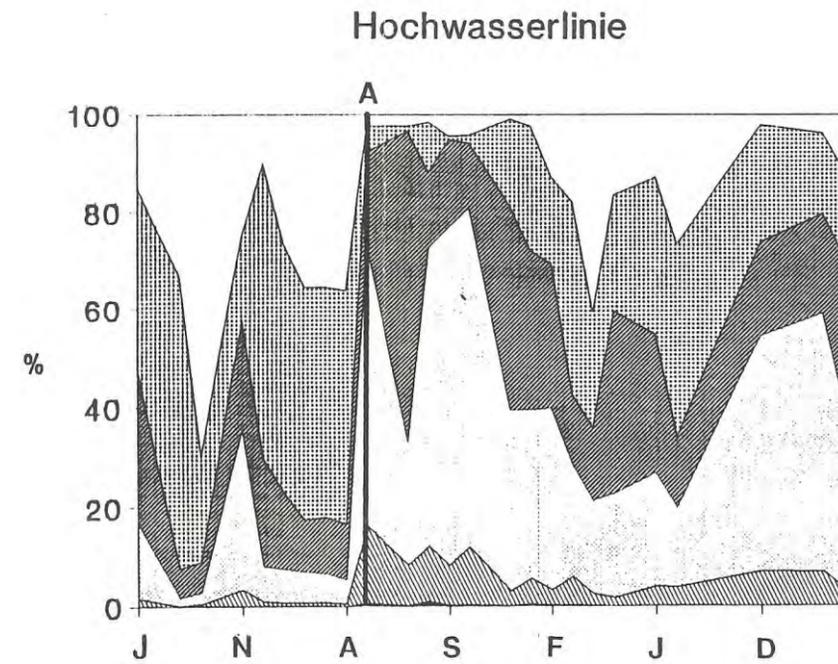
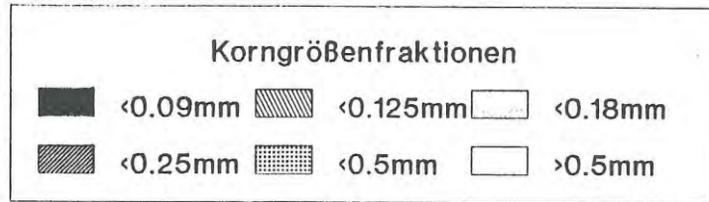
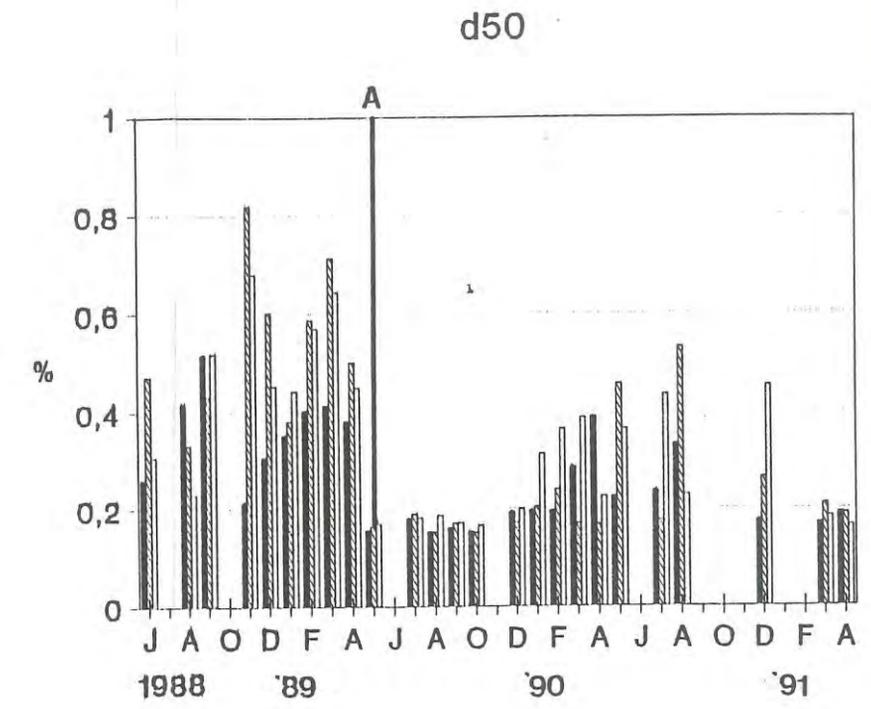
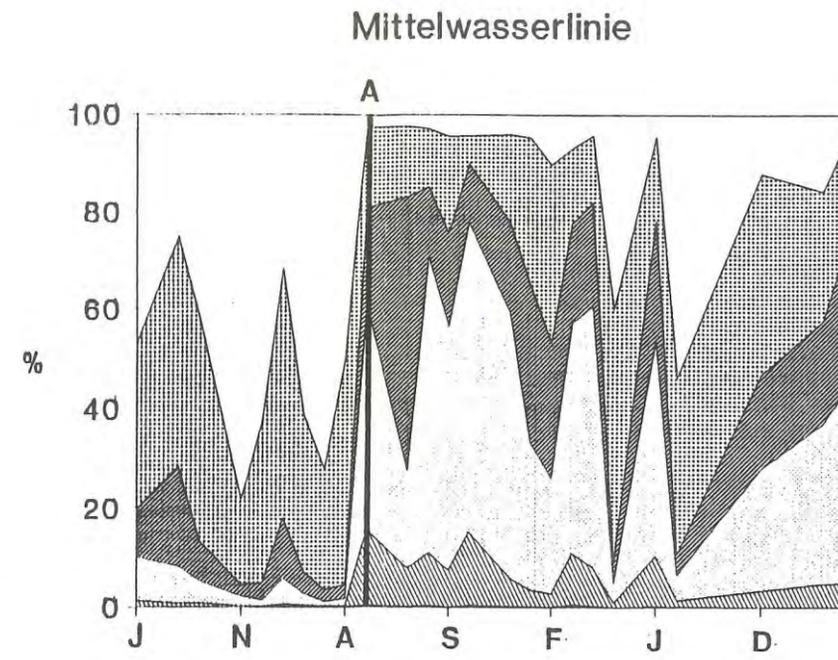
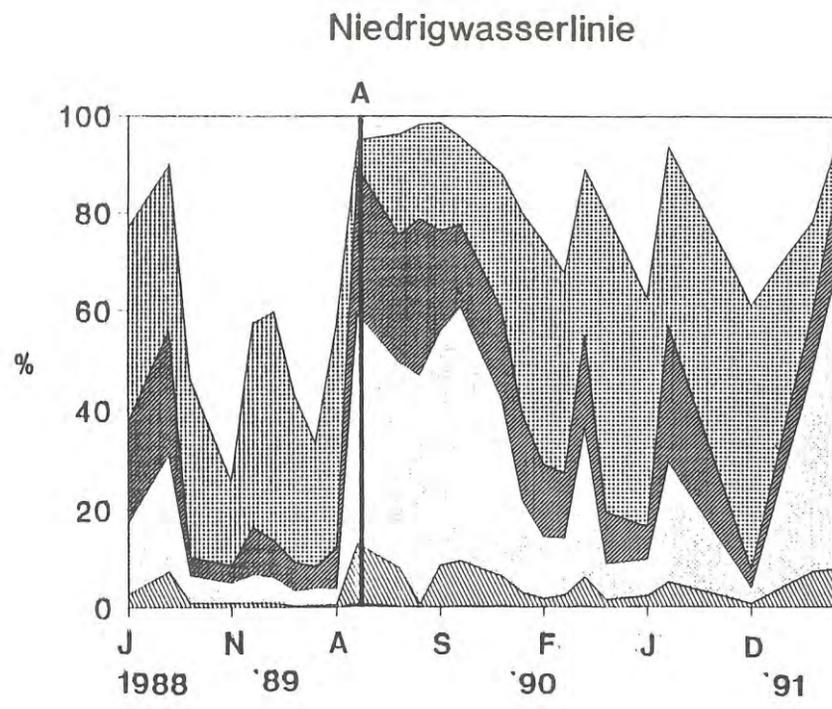


Abb.13 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung(Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinie) und der mittleren Korngröße(d50) in dem Bühnenfeld A-D1/Profil 3 (A:Aufspülung Mai 1989)

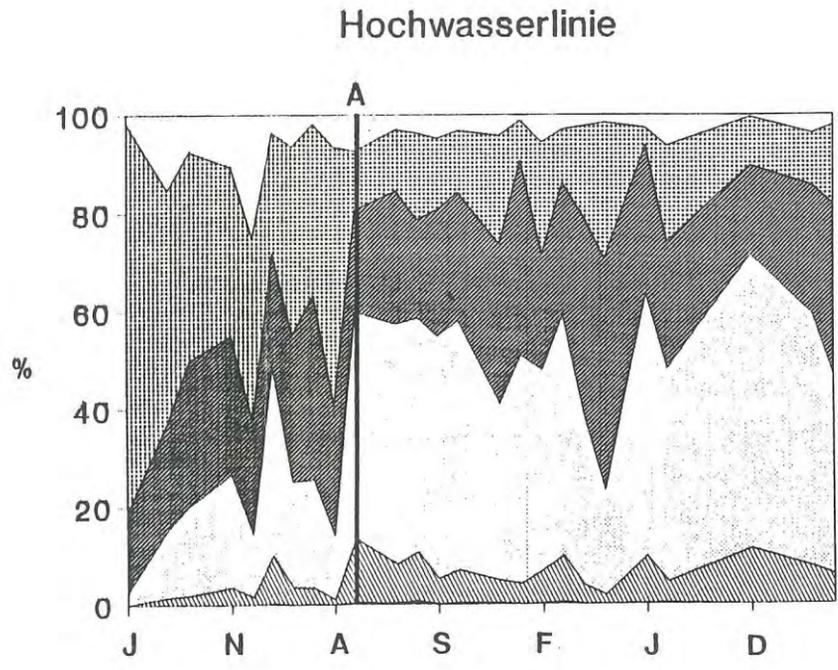
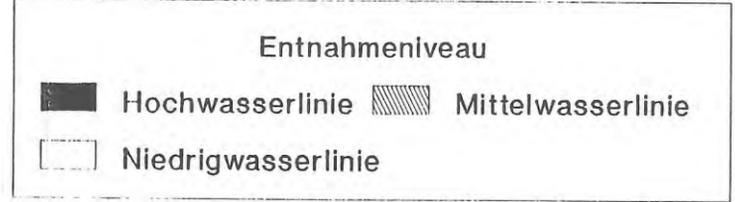
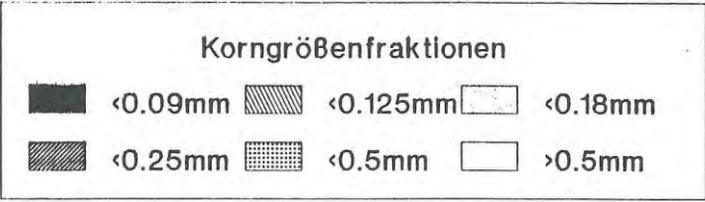
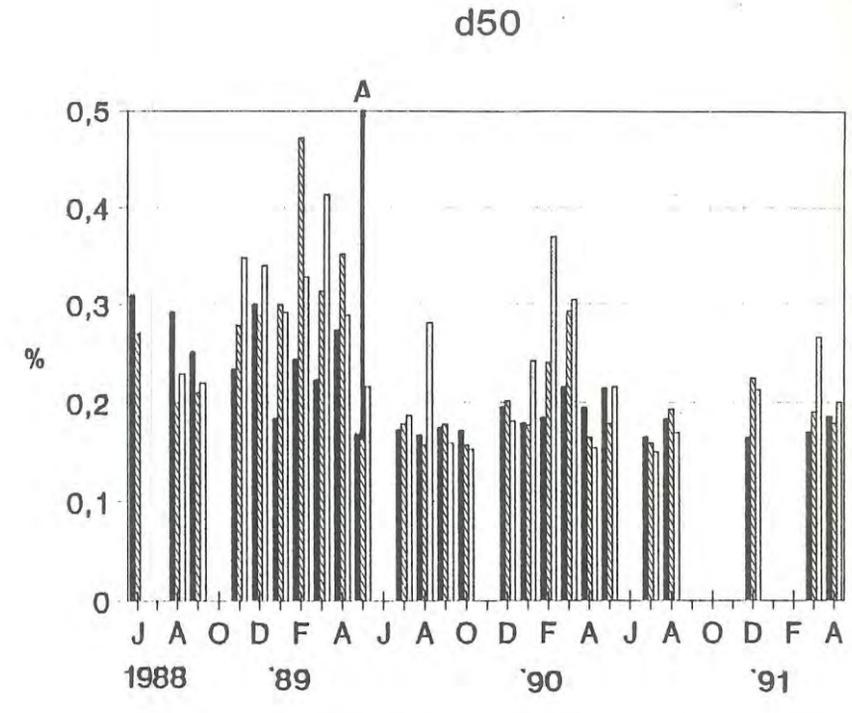
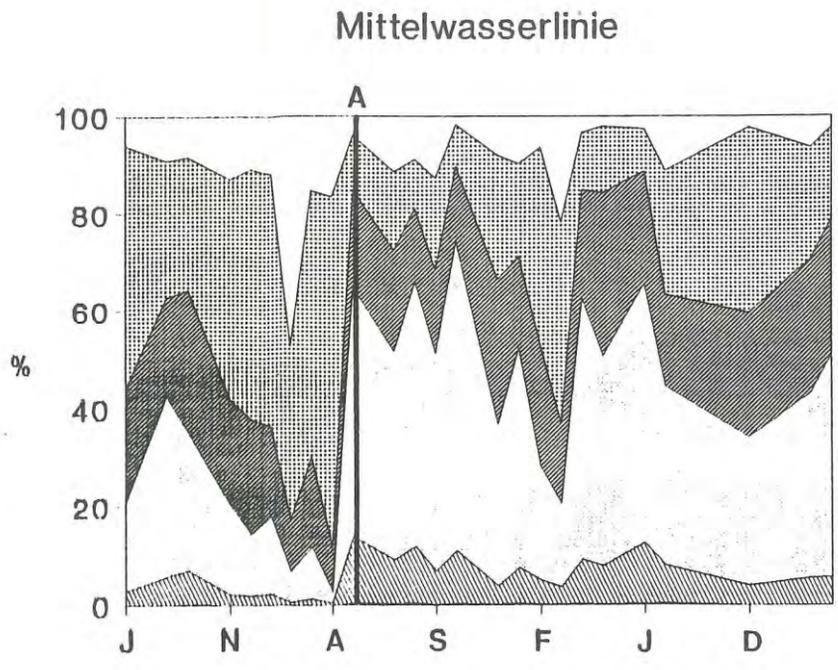
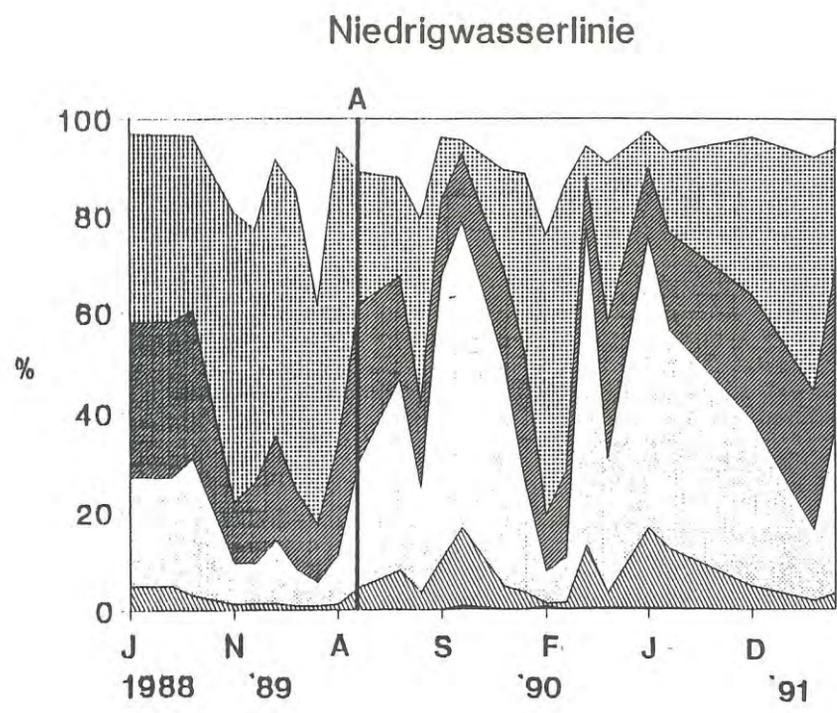


Abb.14 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung(Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinie) und der mittleren Korngröße(d50) in dem Bühnenfeld D1-E1/Profil 4 (A:Aufspülung Mai 1989)

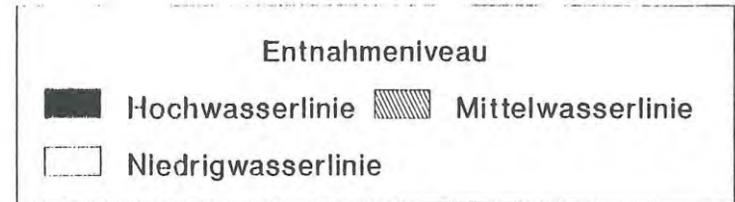
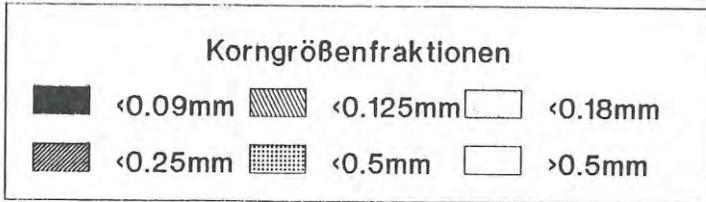
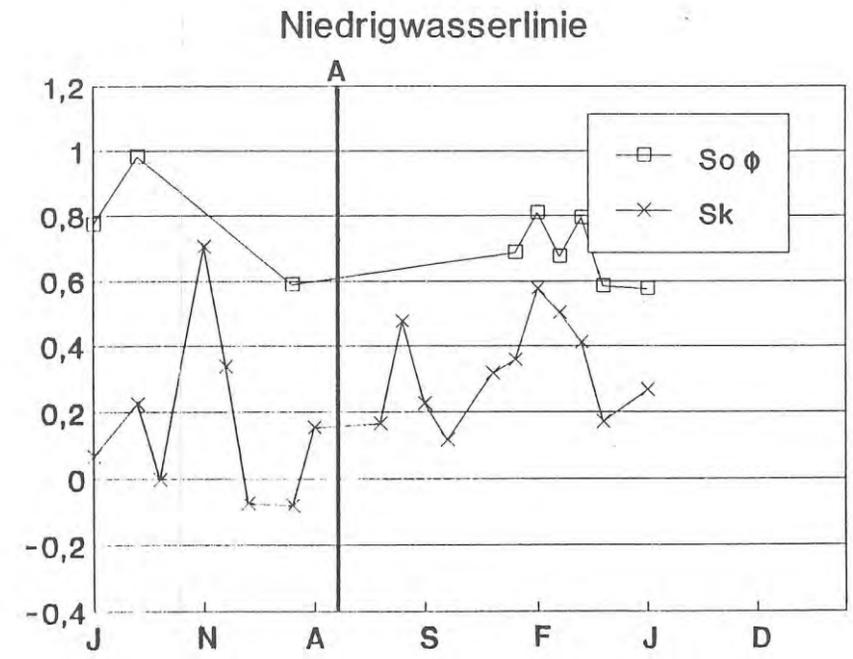
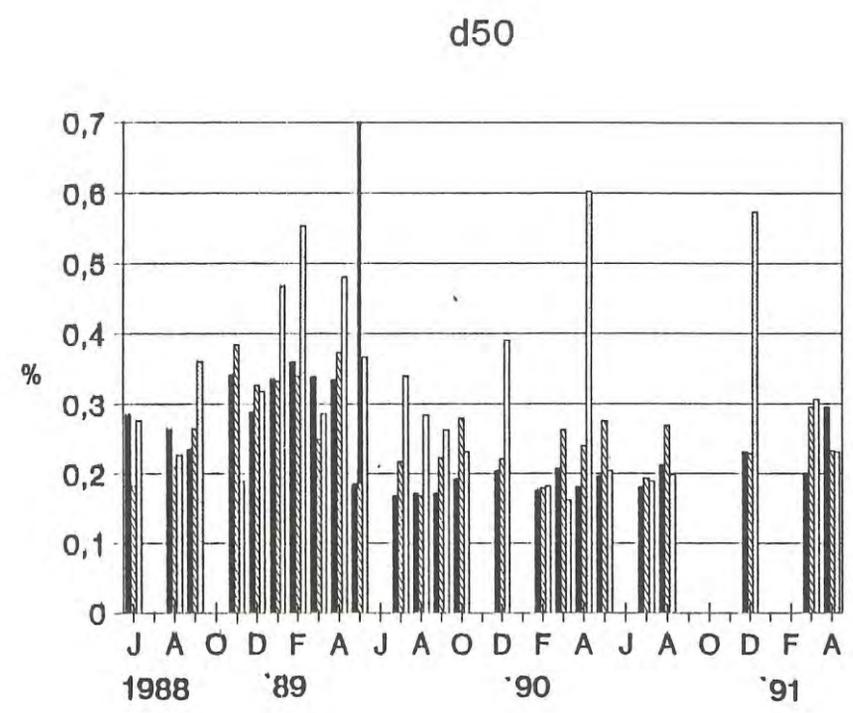
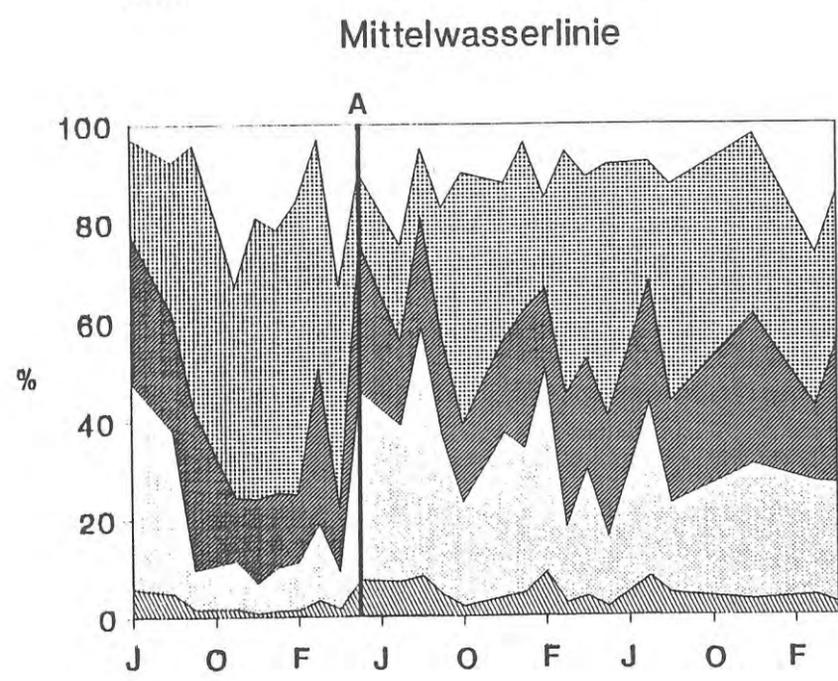
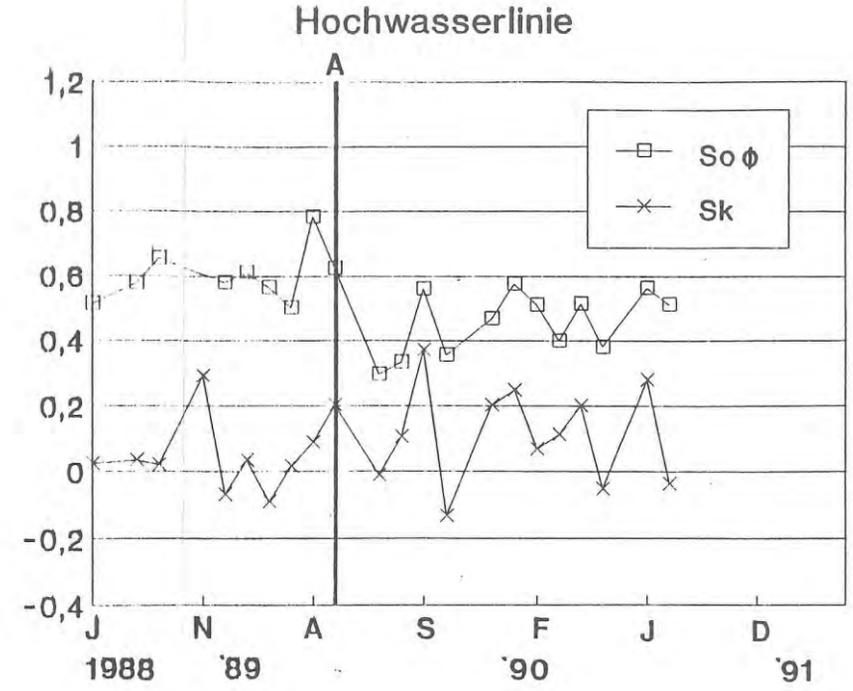
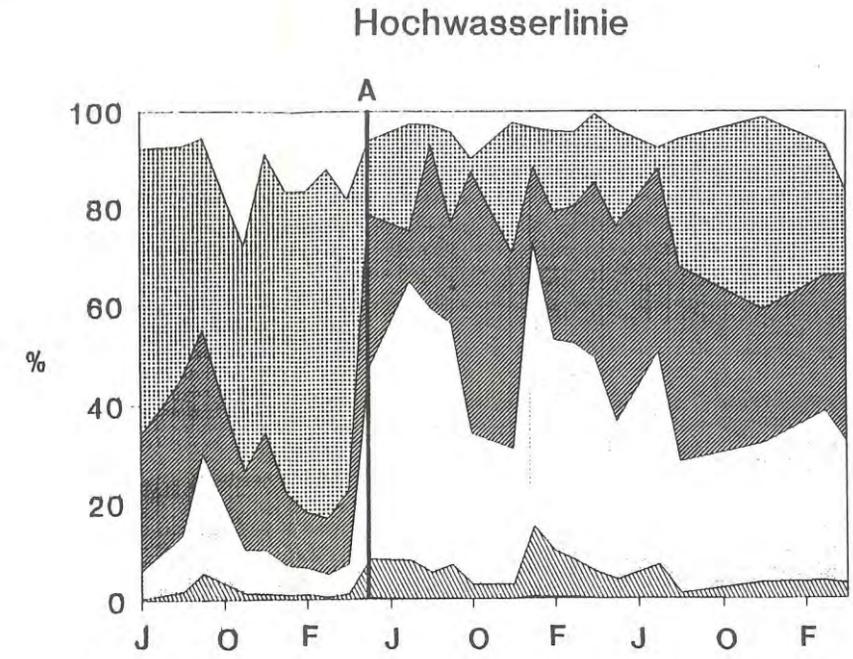
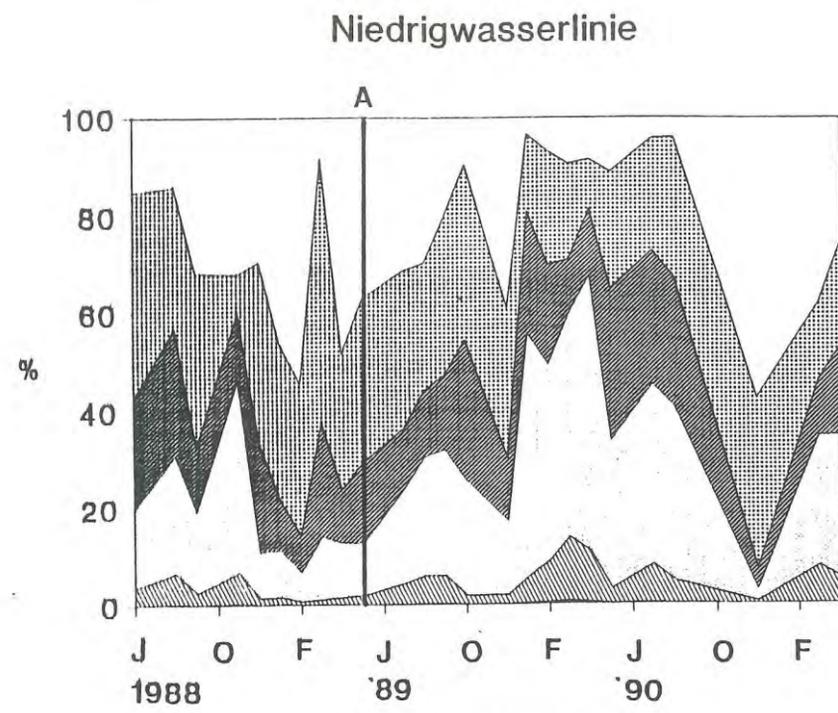


Abb.15 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung (Niedrig-, Mittel-, Hochwasserlinie) der mittleren Korngröße (d50), der Sortierung (So) und der Schiefe (Sk) in dem Bühnenfeld D1-E1/Profil 5 (A: Aufspülung Mai 1989)

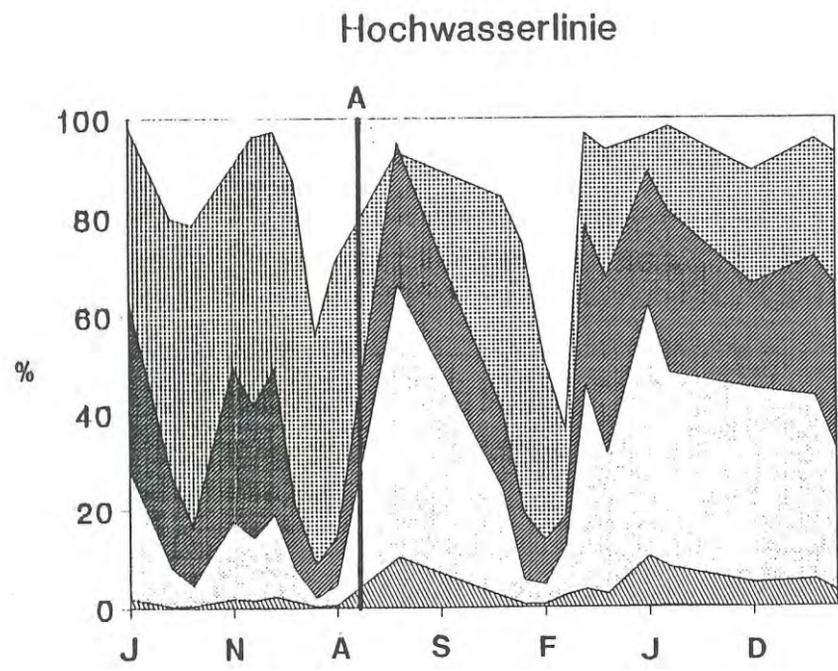
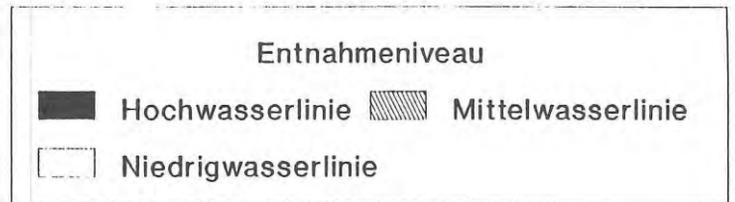
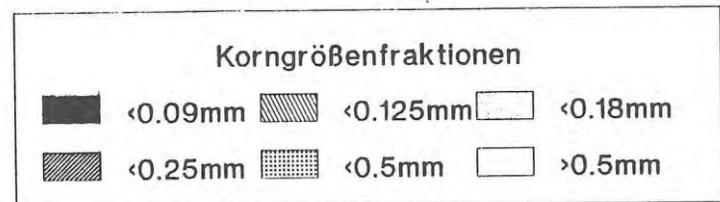
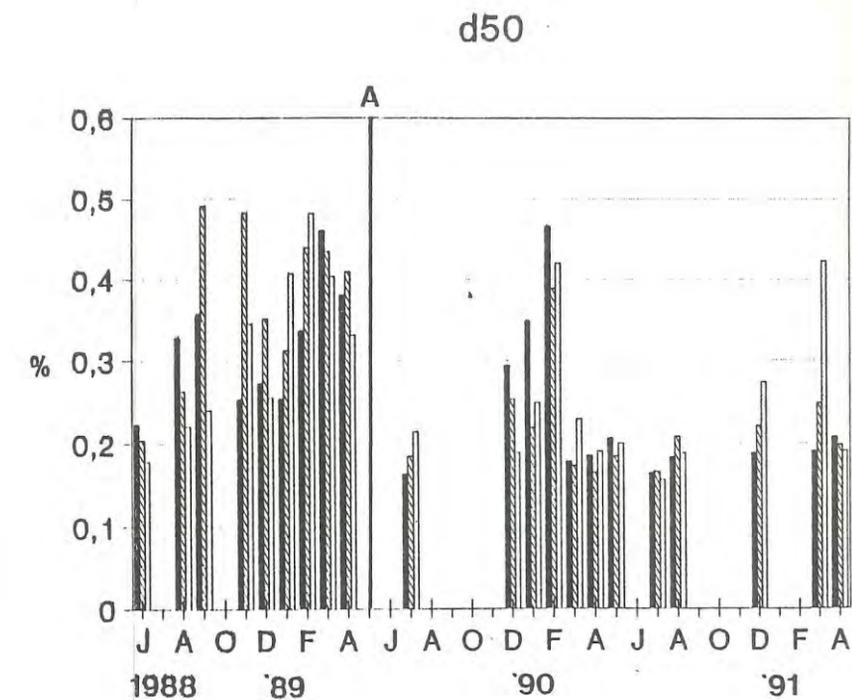
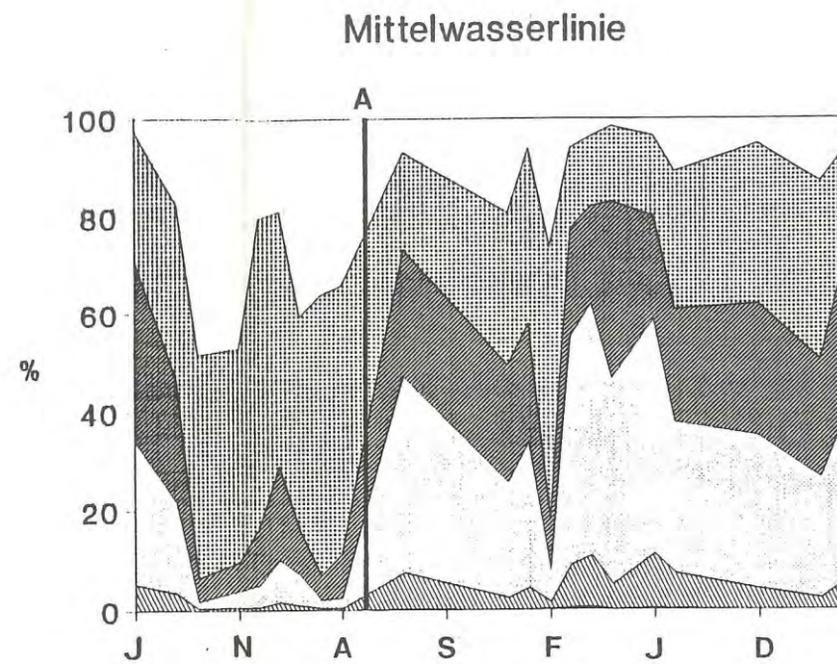
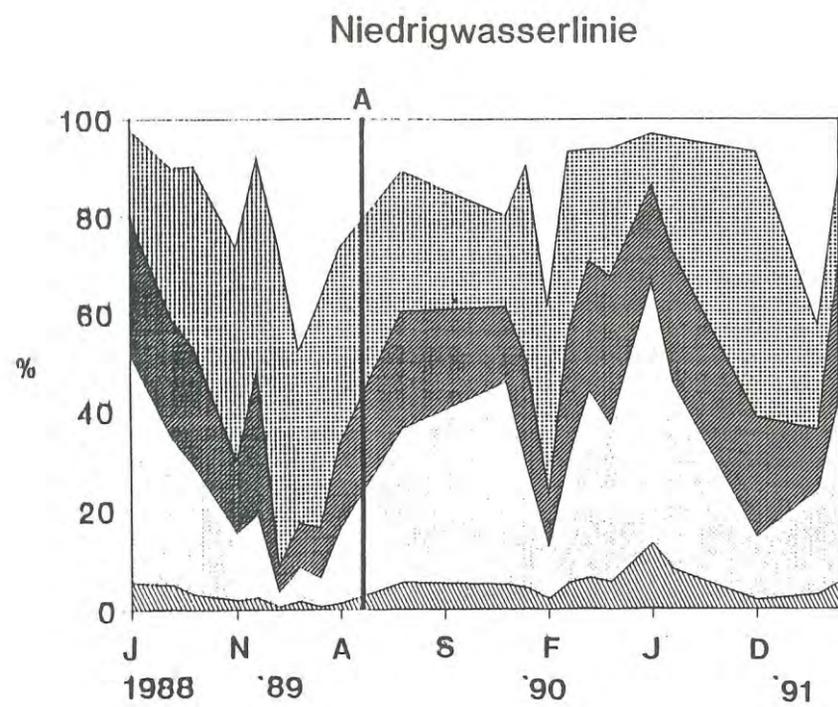


Abb.16 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung(Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinie) und der mittleren Korngröße(d50) in dem Bühnenfeld D1-E1/Profil 6 (A:Aufspülung Mai 1989)

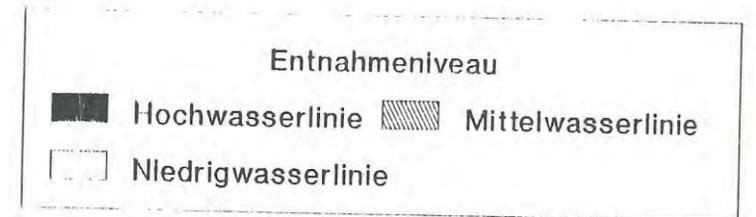
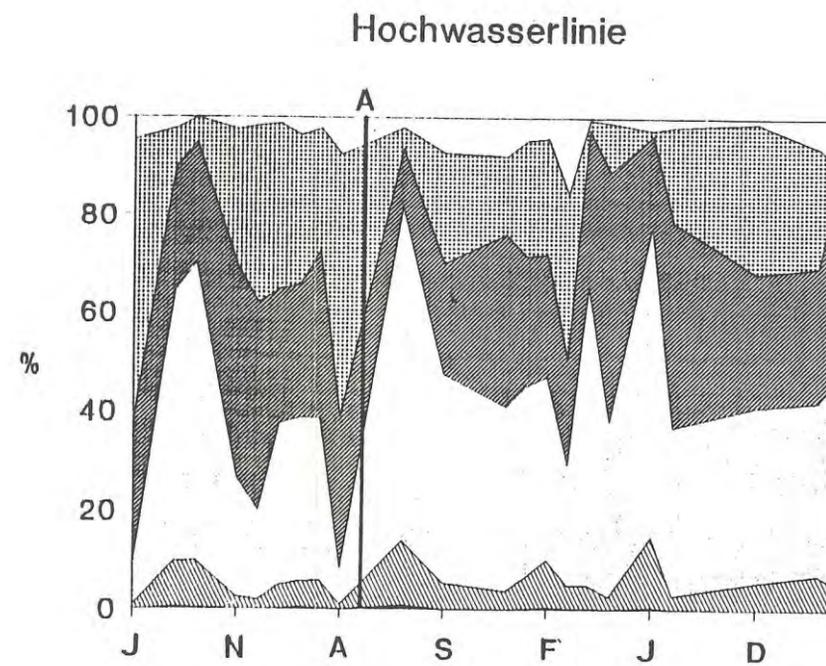
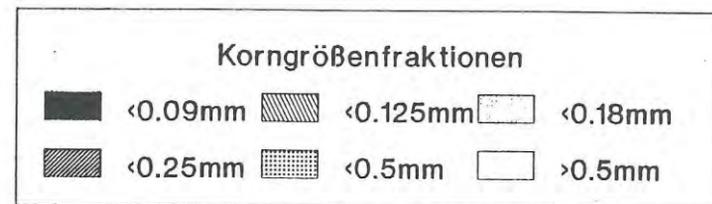
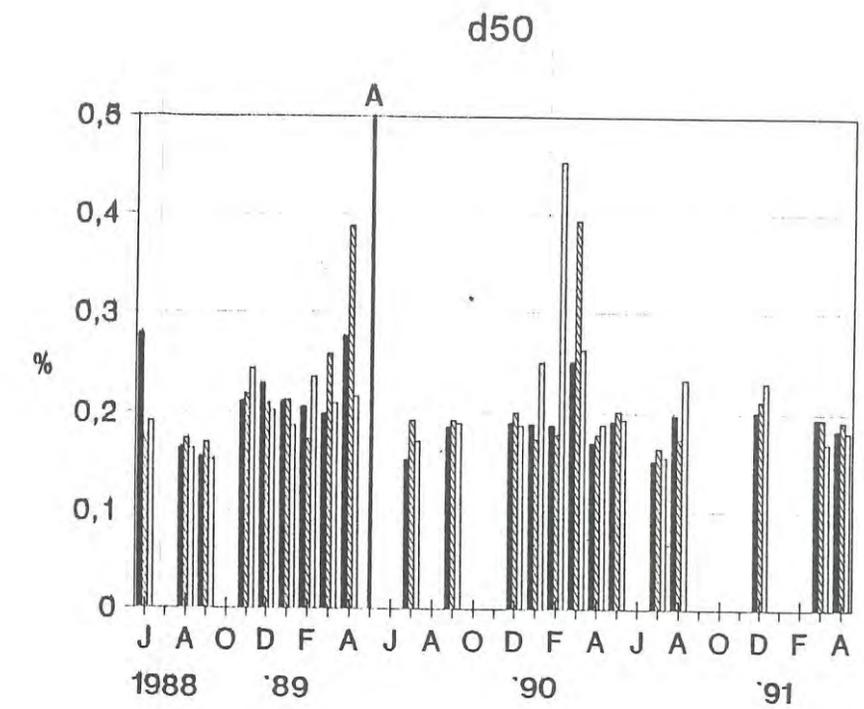
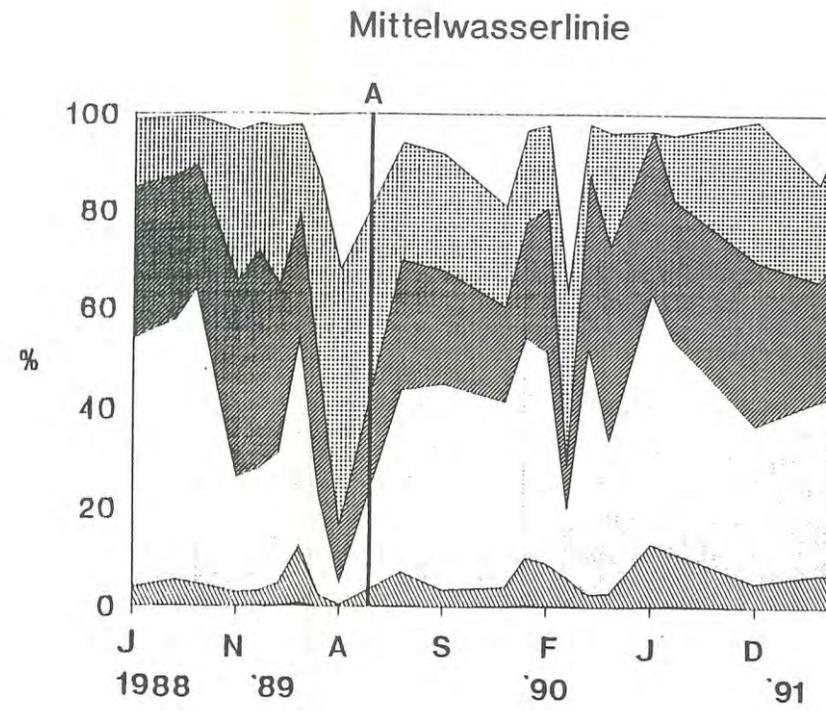
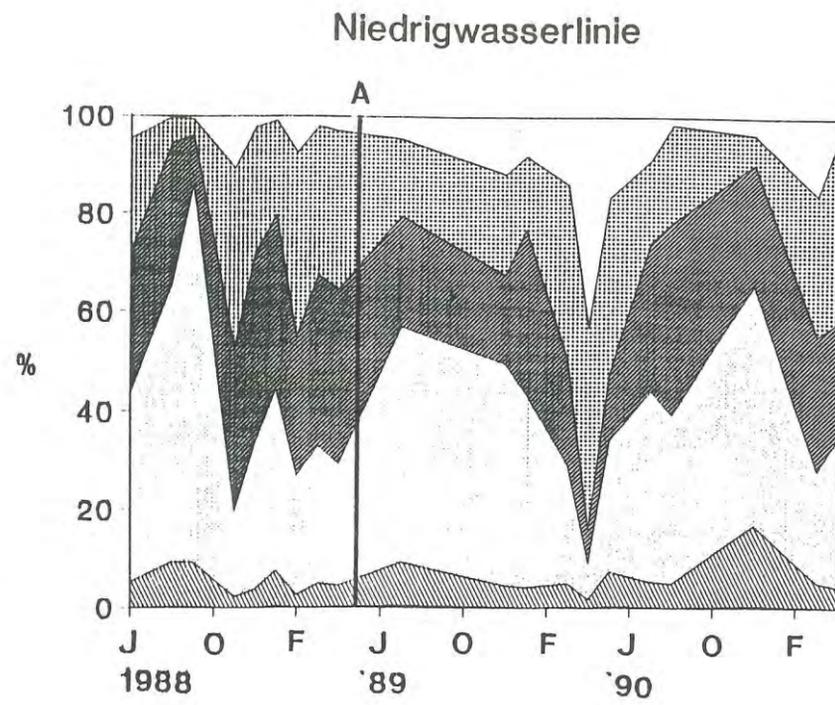


Abb.17 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung(Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinie) und der mittleren Korngröße(d50) in dem Bühnenfeld E1-D1/Profil 7 (A:Aufspülung Mai 1989)

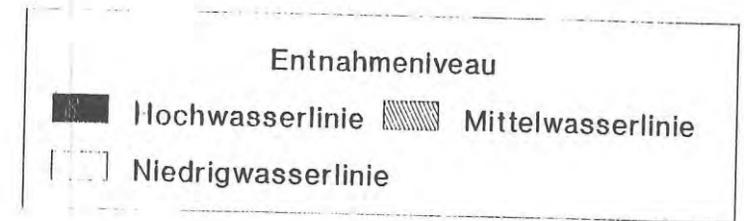
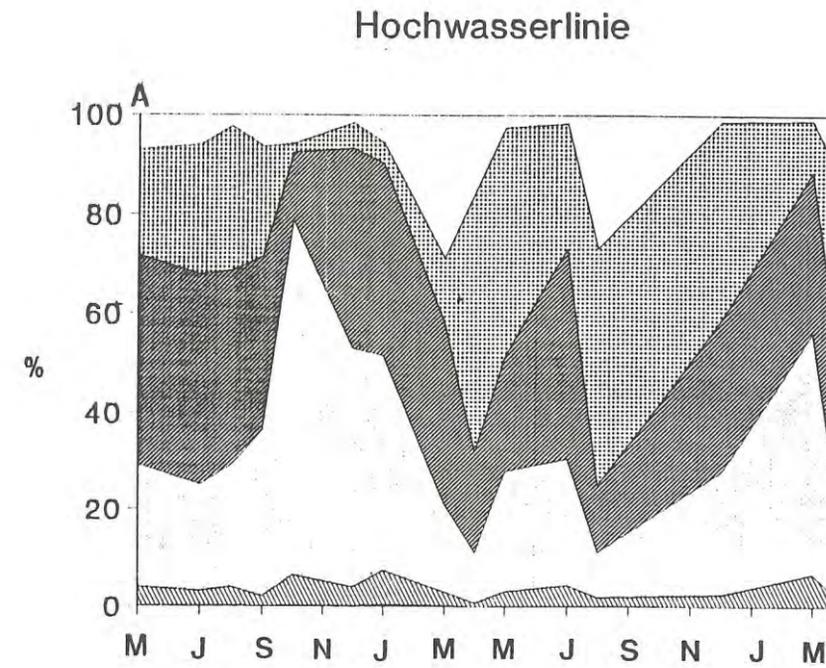
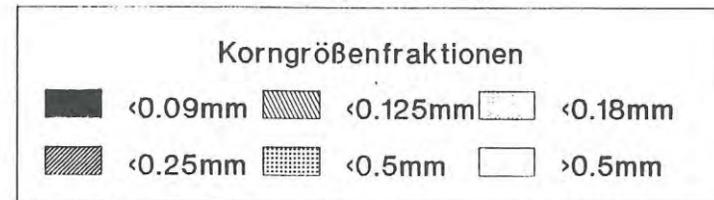
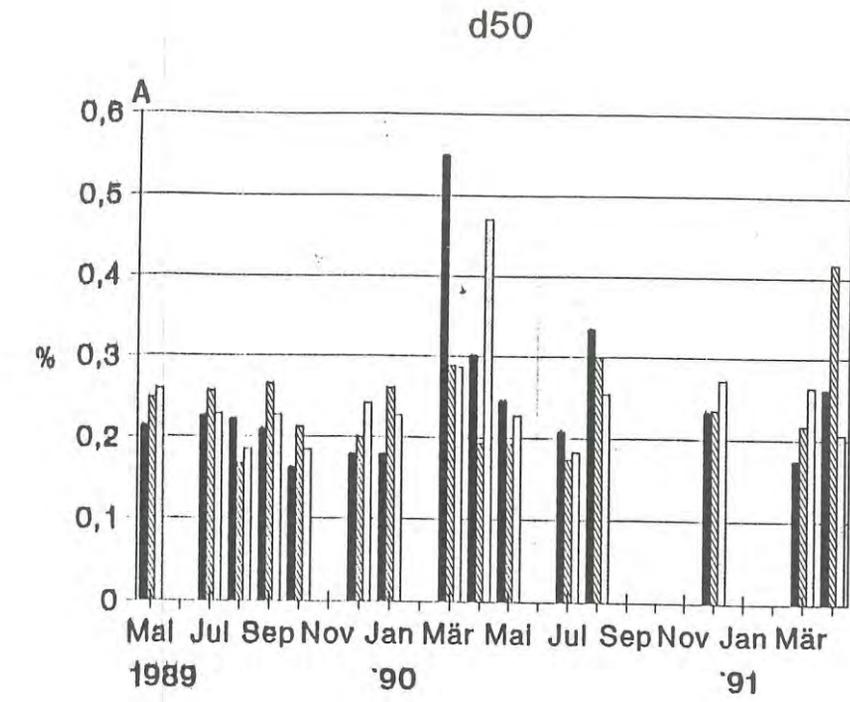
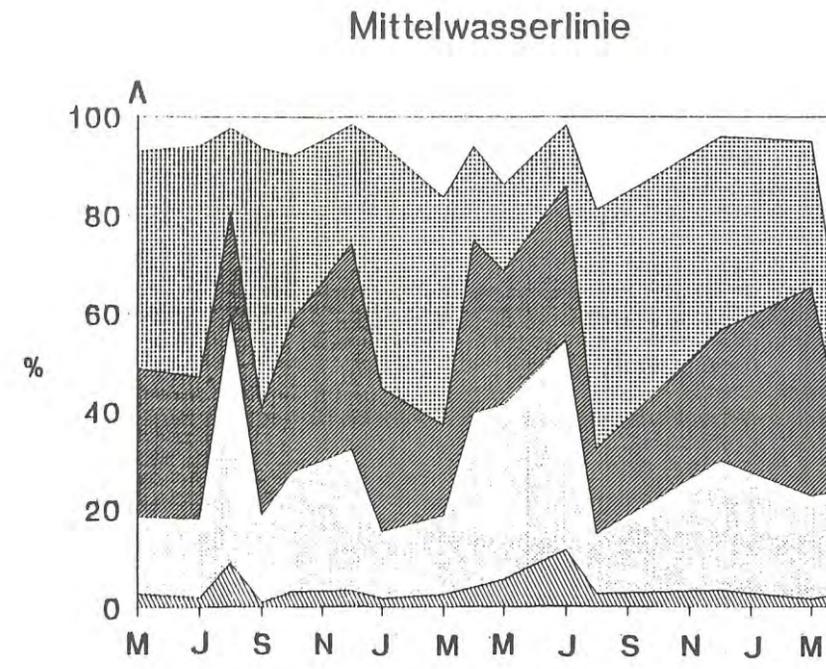
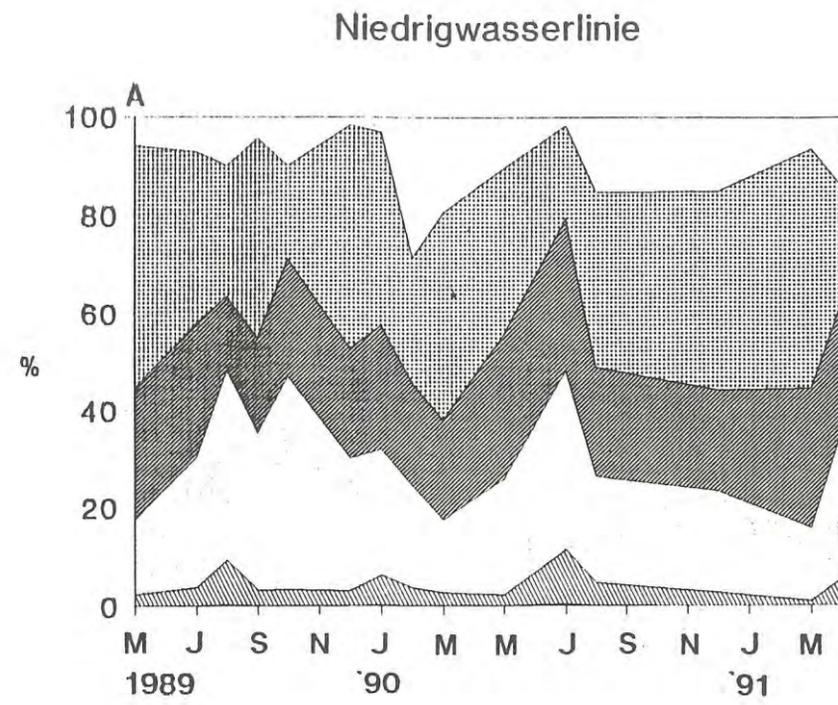
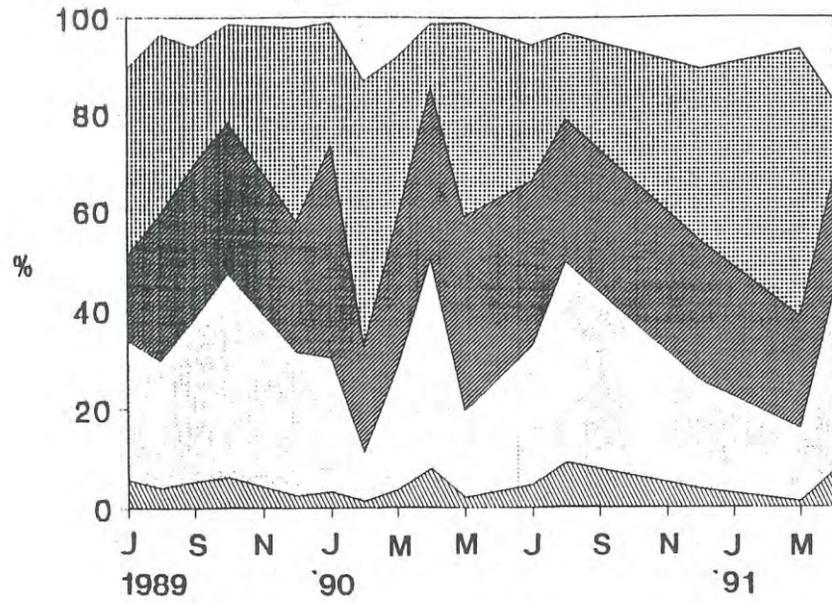
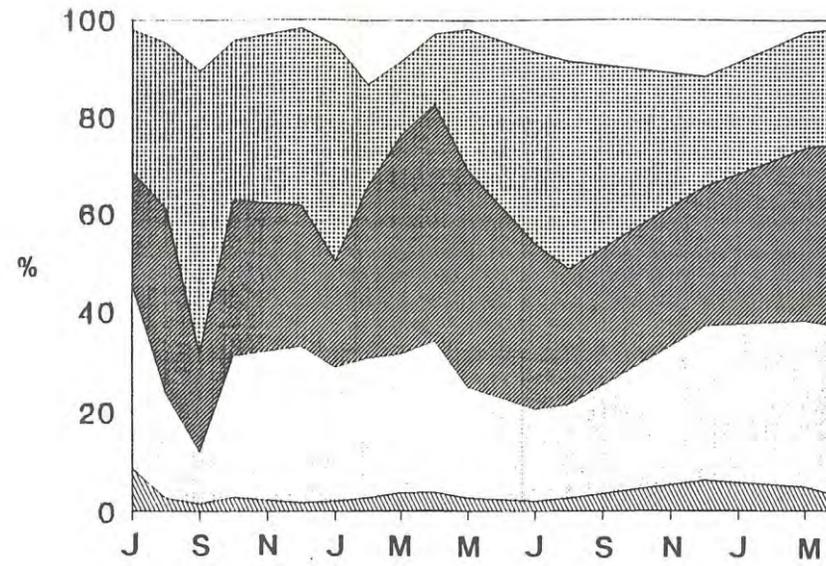


Abb.18 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung(Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinie) und der mittleren Korngröße(d50) in dem Bühnenfeld N1-O1/Profil 8

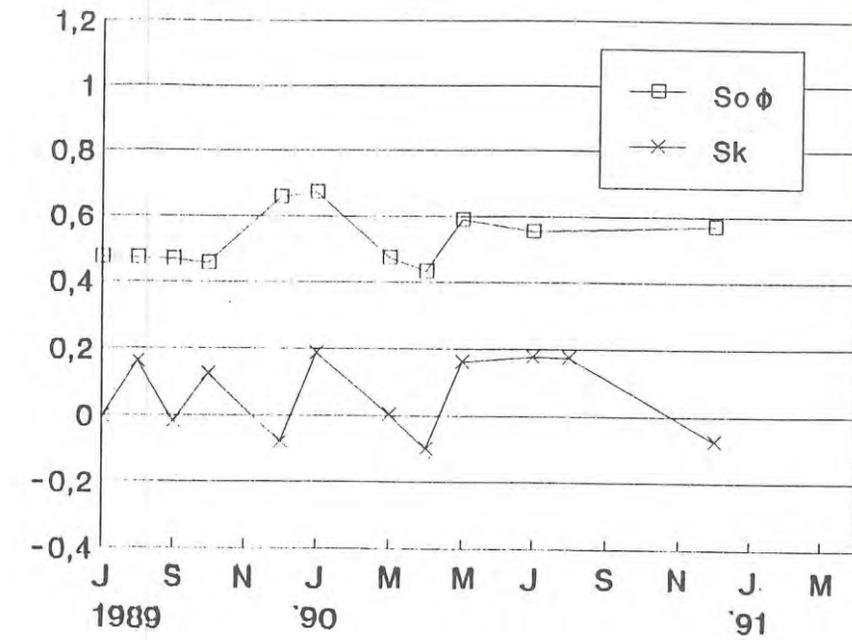
Niedrigwasserlinie



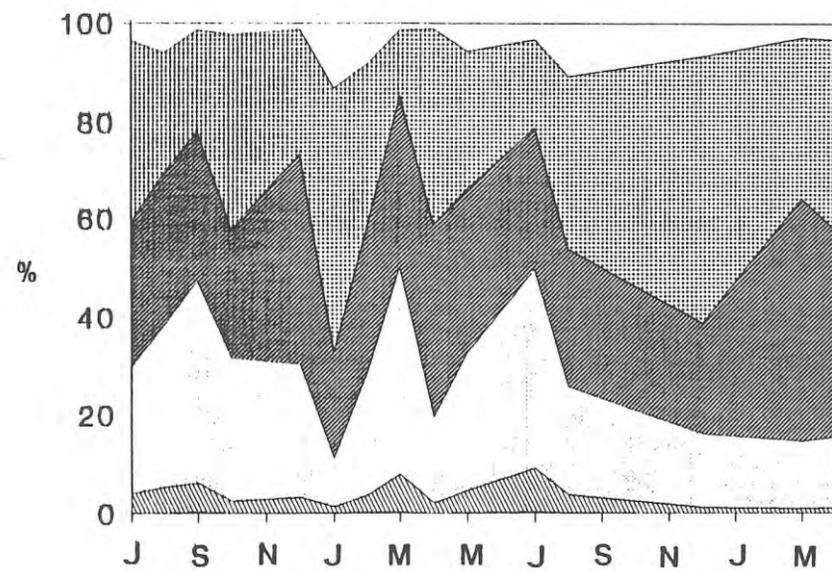
Mittelwasserlinie



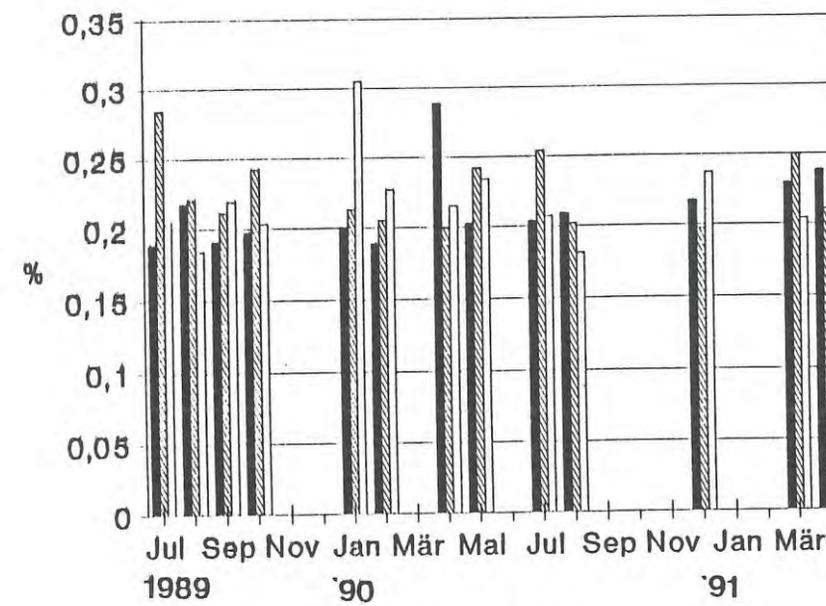
Niedrigwasserlinie



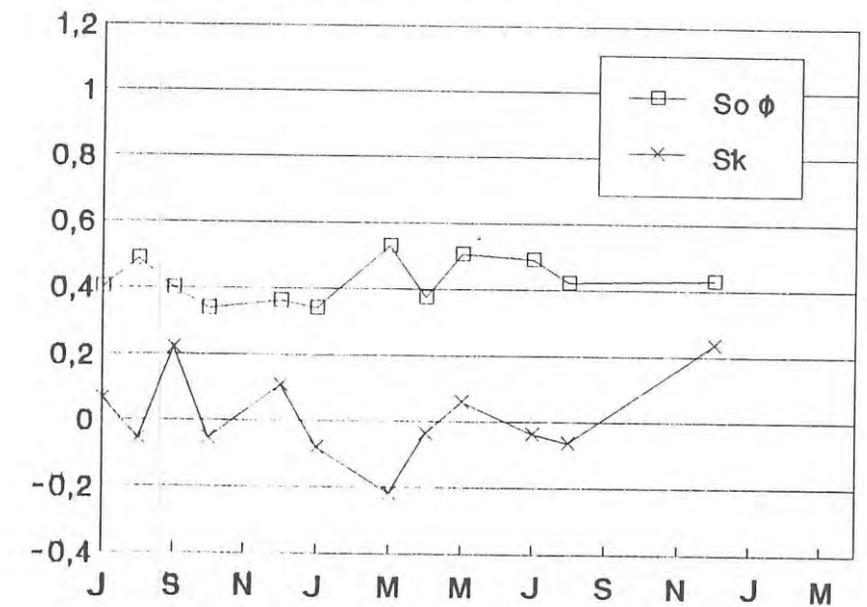
Hochwasserlinie



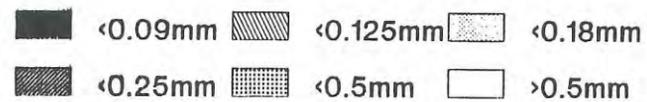
d50



Hochwasserlinie



Korngrößenfraktionen



Entnahmeniveau

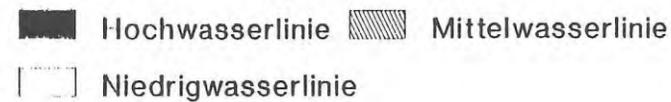


Abb.19 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung (Niedrig-,Mittel-,Hochwasserlinien), der mittleren Korngröße(d50), der Sortierung(So) und der Schiefe(Sk) in dem Bühnenfeld S1-T1/Profil 9

Die Sedimente am Nordweststrand sind auch aufgrund des höheren Anteils von Schillbruch weitaus gröber und schlechter sortiert (WESTHOFF 1990), ursächlich zurückzuführen auf stärkere seegangserzeugte Strömungen. Allgemein ist aufgrund des verstärkten Turbulenzeintrages und der Reflektion des Seegangs am Deckwerk eine Korngrößenzunahme von der Niedrigwasser- zur Hochwasserlinie festzustellen. Die größten Sedimente befinden sich jedoch in der Regel im Bereich der Mittelwasserlinie (Abb. 11-19).

Die Sedimente des Nordstrandes sind im westlichen Abschnitt feinkörniger als die des Nordweststrandes (Abb. 14-19). Die Veränderung des Korngrößenspektrums ist hier von zwei sedimentdynamischen Effekten geprägt. Zum einen wird künstlich aufgespülter Sand vom Nordweststrand eingetragen; und zum anderen wird der Nordstrand bei Ostwindlagen durch Sedimentverdriftung mit Sand aus dem Platananlandungsbereiches aus dem Osten versorgt. Die Morphologie ist mit Strandriffen und -prielen stark saisonal geprägt. Auch in den Korngrößenverteilungen lassen sich jahreszeitliche Veränderungen erkennen. In den Wintermonaten nimmt die Korngröße in der Regel gleichlaufend mit erhöhten Energieeinträgen zu, d.h. es verstärken sich Selektionsprozesse durch Auswaschung feinerer Korngrößen. Aber auch bestimmte Wetterlagen, insbesondere anhaltende Ostwindlagen, führen zu einer Korngrößenzunahme der Sedimente, da aus dem Bereich positiver Sandbilanzes, d.h. aus dem Bereich der Platananlandung des Riffbogens, gröbere Sedimente eingetragen werden. Der Übergang vom Bereich ausgeglichener zum Bereich positiver Sedimentbilanz zeichnet sich durch eine Vergrößerung in der Korngrößenzusammensetzung ab, die durch den Eintrag von überwiegend Mittelsand- mit Grobsand- bzw. Schillanteilen aus dem Riffbogen verursacht wird (Abb. 3-10).

Bei der Aufspülung im Frühjahr 1989 wurde rund 450.000m² Sediment auf den Norderneyer Strand zwischen den Bühnen D und H₁ aufgespült (Abb. 1). In Zusammenarbeit mit dem StAIK wurden in jedem Bühnenfeld des aufgespülten Bereich unmittelbar nach der Auffüllung je 9 Zylinderproben (0 - 12 cm Tiefe) entnommen und kornanalytisch untersucht. In der Tab. 2 sind die Sedimentkennwerte dieser Analysen sowie die Kennwerte der zwei vorherigen Probenentnahmen des Aufspülbereichs aufgelistet. Die Sedimente sind nach der Aufspülung nicht mehr als Mittelsande, sondern nunmehr als Feinsande zu bezeichnen. Auffällig ist, daß sich die Minimum-Werte im Gegensatz zu den Maximum-Werte nur geringfügig geändert haben. Die Aufspülung führte zu einer besseren Sortierung der Strandsedimente. Konnten die Sedimente zuvor als mäßig gut sortiert bezeichnet werden, sind sie im Anschluß als

gut sortiert zu klassifizieren. Hier sind Veränderungen besonders im Minimum-Bereich zu verzeichnen. Das heißt, daß das relativ homogene Aufspülmaterial die Variabilität der Strandsedimente vermindert hat.

Das Sediment setzte sich vorwiegend aus Feinsanden mit einem mittleren d_{50} -Wert von 0,17 mm zusammen. Dadurch wurde gegenüber der ursprünglichen Verteilung eine Verfeinerung des Korngrößenspektrums um 0,15-0,18 mm (d_{50}) vorgegeben, die jedoch an den verschiedenen Entnahmeniveaus der Beprobungen unterschiedlich stark ausgeprägt ist (Abb. 3-10). Am stärksten werden die Veränderungen an der Hochwasserlinie sichtbar. Einige wenige Proben des aufgespülten Sandes, die höhere d_{50} - und Md-Werte besitzen, sind auf größere Anteile des älteren anstehenden Materials zurückzuführen. Diese Beimengungen waren auch an den unterschiedlichen Sedimentfarben des anstehenden und des aufgespülten Materials gut zu erkennen. Der mittlere Korndurchmesser des in der Planung der Strandauffüllung als Aufspülmaterial vorgesehenen Sandes sollte über 0.2 mm liegen, um die Ausbildung von größeren Strandneigungen zu ermöglichen und um dem natürlichen Zustand, wie er sich vor der Aufspülung eingestellt hatte, möglichst nahe zu kommen. Da dieses Planungsziel nicht erreicht werden konnte, sind relativ stärkere Strandhöhenabnahmen zu erwarten.

	d ₅₀			Md			U			So			So ₁			Sk			K		
	04/88	09/88	04/89	04/88	09/88	04/89	04/88	09/88	04/89	04/88	09/88	04/89	04/88	09/88	04/89	04/88	09/88	04/89	04/88	09/88	04/89
Anzahl	27	26	81	25	23	81	27	26	81	22	20	75	25	23	81	25	23	81	22	19	75
Min.	0.189	0.154	0.142	0.214	0.168	0.143	1.433	1.340	1.237	0.367	0.333	0.219	0.358	0.317	0.165	-0.150	-0.060	-0.159	0.831	0.831	0.863
Max.	0.556	1.700	0.314	0.542	0.621	0.320	3.088	4.685	2.827	0.970	1.014	1.088	1.154	1.312	1.183	0.407	0.532	0.606	1.540	2.546	2.319
Arith. Mittel	0.311	0.336	0.173	0.308	0.268	0.182	2.019	2.056	1.495	0.677	0.635	0.462	0.676	0.662	0.458	0.098	0.118	0.178	1.176	1.208	1.390
Geom. Mittel	0.300	0.279	0.170	0.299	0.253	0.178	1.972	1.955	1.462	0.651	0.610	0.421	0.648	0.625	0.399				1.161	1.162	1.351
Stand. Abw.	0.089	0.307	0.038	0.081	0.107	0.041	0.464	0.772	0.366	0.183	0.183	0.217	0.197	0.239	0.256	0.138	0.152	0.201	0.194	0.392	0.336

Tab. 2 Zeitlich-räumliche Variabilität der Sedimentkennwerte des Aufspülbereiches vor (04/88; 09/88) und nach der Aufspülung (04/89)

Das Bühnenfeld C-ZbII nimmt im aufgespülten Strandbereich eine besondere Stellung ein, da dieses Bühnenfeld laut dem Aufspülkonzept mit Grobsand aufgefüllt werden sollte. Dieser Sand wurde nördlich von Juist mit dem Hopperbagger 'BEREND MÜSING' gewonnen und direkt vom Schiff in das Bühnenfeld gespült. Die Analysen der entnommenen Sedimente weisen für die mittleren Korndurchmesser eine große Schwankungsbreite aus. Diese liegen zwischen 0.16 und 0.31 mm. Das arithmetische

Mittel der d_{50} -Werte beträgt für dieses Bühnenfeld 0.22 mm, so daß dieses Material als feinsandiger Mittelsand angesprochen werden kann.

Neben den Korngrößenverteilungen haben sich auch die Schwermineralgehalte der Strandsedimente als ein weiterer Indikator zur Deutung der Transportvorgänge erwiesen (WESTHOFF 1990). Zur Bestimmung der Schwerminerale aus den Sedimenten wurde die magnetische Abtrennung mit dem FRANTZ-Magnetscheider angewandt, die eine Bearbeitung größerer Probenserien ermöglicht. Hierbei wurden jeweils von der Korngrößenfraktion 0,106-0,125 mm drei Schwermineralfraktionen (bei 0,4 Amperre, 0,8 A und 1,2 A) abgetrennt (VEENSTRA & WINKELMOLEN 1976).

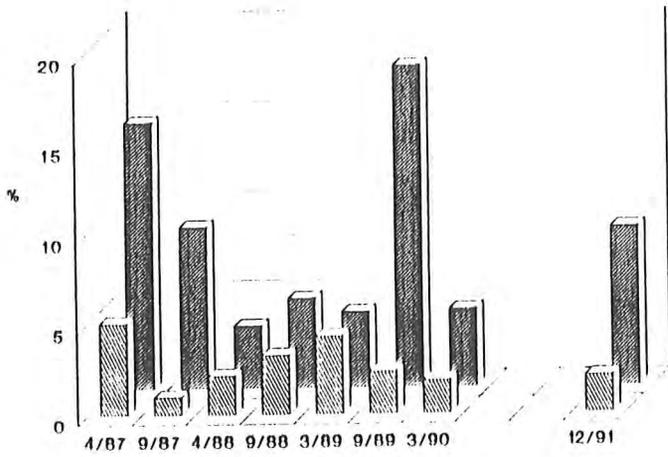
Allgemein kennzeichnend ist ein Anstieg der Schwermineralgehalte vom Vorstrand zum trockenen Strand, der durch stärkeren äolischen Einfluß in den höhergelegenden Strandabschnitten, die nur kurzfristig bzw. selten wasserbedeckt sind, verursacht wird. Der Wind bedingt einen Selektionsprozeß, der eine Anreicherung der Minerale mit einer höheren Dichte zufolge hat. Die Schwermineralgehalte der Strandsedimente nehmen von West nach Ost ab. Parallel dazu vermindert sich die Differenz der Schwermineralanteile der Sedimente, die an der Hochwasser- und an der Niedrigwasserlinie entnommen worden sind. Sehr deutlich sind die saisonalen Schwankungen zu erkennen. In der Regel steigt der Schwermineralanteil in den Wintermonaten deutlich an (Abb. 20).

3.1.2. Sedimenttransport am Norderneyer Strand

Aus den sedimentologischen Untersuchungen lassen sich Rückschlüsse über die Transportmechanismen am Norderneyer Strand ziehen. Hierzu sind insbesondere die Untersuchungen zur Umlagerung der aufgespülten Sande in die umliegenden Strand- und Vorstrandbereiche nützlich.

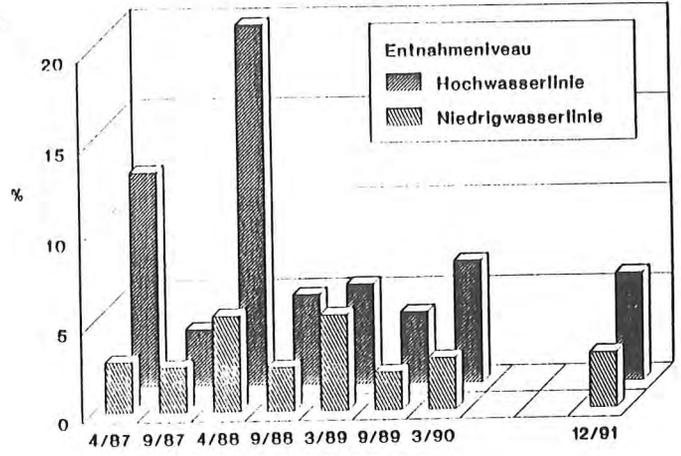
Die bisherigen Untersuchungsergebnisse weisen auf eine starke Dominanz des strandnormal gerichteten Transports gegenüber dem strandparallel gerichteten hin. Da das aufgespülte Material jedoch korngrößenanalytisch eine sehr starke Ähnlichkeit mit den im unmittelbaren Vorstrandbereich anstehenden Sedimenten aufweist, ist der Transport der Strandsande in den Vorstrand anhand der Korngrößenparameter nur schwer nachzuweisen.

Buhnenfeld E - D

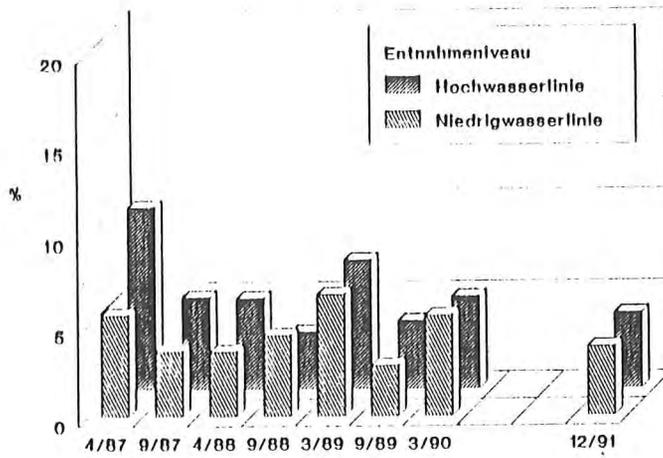


Buhnenfeld Zbl - A

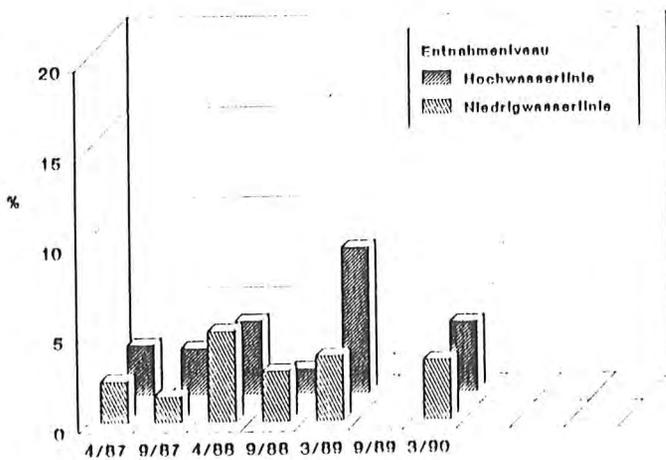
29



Buhnenfeld D1-E1



Buhnenfeld N1-O1



Buhnenfeld S1-T1

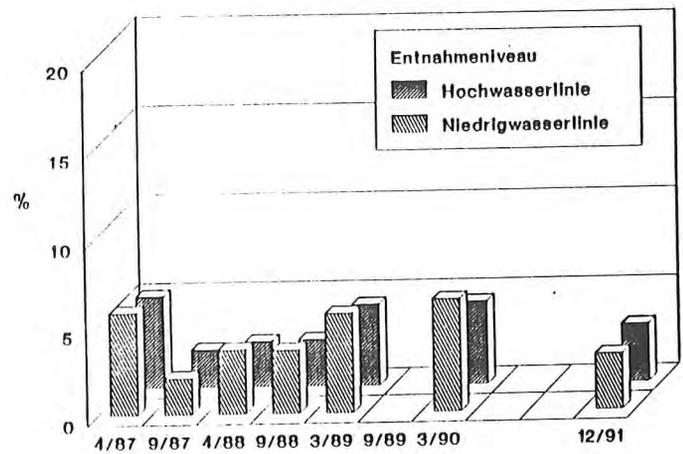


Abb. 20 Jahreszeitliche bedingte Variabilität der Schwermineralgehalte

Der Vergleich der Verteilungsdiagramme der Sedimentkennwerte unmittelbar nach der Aufspülung (Abb. 8) mit den zwei Verteilungsdiagrammen der im halbjährlichen Abstand folgenden Beprobungsserien 09/89 und 03/90 läßt hingegen eine Betrachtung zur Frage des strandparallelen Sedimenttransports zu. Am Weststrand von Norderney läßt sich die Umlagerung von aufgespültem Material nach Süden gut erkennen. Vom Zeitpunkt des Endes der Aufspülung bis zur Beprobungsserie 09/89 wurden anscheinend nennenswerte Mengen der aufgespülten Sande bis in das Bühnenfeld D-E (Profil 6) verfrachtet. In der darauffolgenden Zeitspanne zwischen den Beprobungsserien 09/89 und 03/90 hat das umgelagerte Aufspülmaterial auch das südlichste Bühnenfeld von Norderney (Profil 1) erreicht.

Am Nordstrand von Norderney läßt sich ebenfalls eine derartige Umlagerung feststellen. Die deutliche Grenze in den Sedimentkennwerten zwischen dem aufgespülten Material und den weiter östlich anstehenden Sedimenten unmittelbar nach der Aufspülung zwischen den Profilen 16 und 17 (Abb. 8), läßt sich während der nachfolgenden Beprobungsserie 09/89 (Abb. 9) zwischen den Profilen 18 und 19 ziehen. Im Verlauf des nachfolgenden Herbst und Winters geht diese ostgerichtete Umlagerung von aufgespülten Sanden weiter, da sich in den Beprobungsprofilen 19 und 20 (Bühnenfelder K_1 - L_1 , L_1 - M_1) ebenfalls eine deutliche Verringerung der dargestellten Sedimentkennwerte bemerkbar macht (Abb. 10).

Das Norderneyer Deckwerk wurde während der verschiedenen Bauabschnitte aufgrund fortschreitender Strand- und Dünenabbrüche nicht durchgehend in östlicher Richtung verlängert, sondern in gewissen Abständen um einige Zehnermeter inselwärts verlagert, wegen eingetretener Lee-Erosionen (KUNZ 1987). Im östlich sich anschließenden Platananlandungsbereich kann die Sedimentbilanz im Mittel als ausgeglichen bezeichnet werden. Eine zunehmende Verbreiterung der Strände, die nach Osten zu erkennen ist, wird allein durch die Anpassung der künstlichen an die natürliche Strandlinie erreicht. Die Bühnen tragen nur unwesentlich dazu bei. Dies wird durch den Verlauf der NN-2m - Linie deutlich, die von der Bühnenstreichlinie abweicht. Signifikante Einflüsse auf die Sedimentverteilungen sind nicht erkennbar.

3.2 Einzeltidenereignisse

Zur Erfassung kurzfristiger Umlagerungsvorgänge wurden im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen über die Dauer von jeweils zwei bis vier ausgewählter Einzeltiden im Hauptmeßfeld, dem Bühnenfeld D_1-E_1 , durchgeführt. Im folgenden werden einige Einzeltidenereignisse beispielhaft dargestellt.

3.2.1 Sedimentverteilungen

Die Sedimentverteilung im Bühnenfeld D_1-E_1 stellte sich bei einer Einzeltidenuntersuchung im Juli 1988, deren meteorologischen und hydrographischen Randbedingungen der Tabelle 12 zusammengefaßt sind, wie folgt dar: die größten Sedimente befinden sich im zentralen Bereich des Bühnenfeldes. In Richtung auf das Deckwerk, auf die Bühnen sowie auf den Vorstrand werden die Sedimente feinkörniger. In Abbildung 33 sind die Veränderungen der Sedimente durch die Verteilung der Median-Werte dargestellt. Dabei wird eine Abnahme der mittleren Korngröße um ca. 0,1 mm mit ablaufendem Wasser deutlich. Mit auflaufendem Wasser erreicht das Sediment wieder die Ausgangsverteilung (Abb. 34).

Datum	Tide	V_{Wind} (m/s)	Wind- richtung	H_s (m)	T_s (s)
18.07.1988		10,1	W - WNW		
19.07.1988	NW	7,3	WNW	0,47	4,2
	HW	3,5	WNW-WSW	0,46	4,5
20.07.1988	NW	5,0	WSW-WNW	0,17	4,0
	HW	5,2	W - WNW	0,15	3,5
21.07.1988		1,9	WNW - S		

Tab. 12 Meteorologische und hydrographische Randbedingungen der Einzeltidenuntersuchungen vom 18.07. bis 21.07.1988 im Bühnenfeld D_1-E_1 (Winddaten der Wetterstation Norderney; H_s : signifikante Wellenhöhe, T_s : signifikante Wellenperiode)

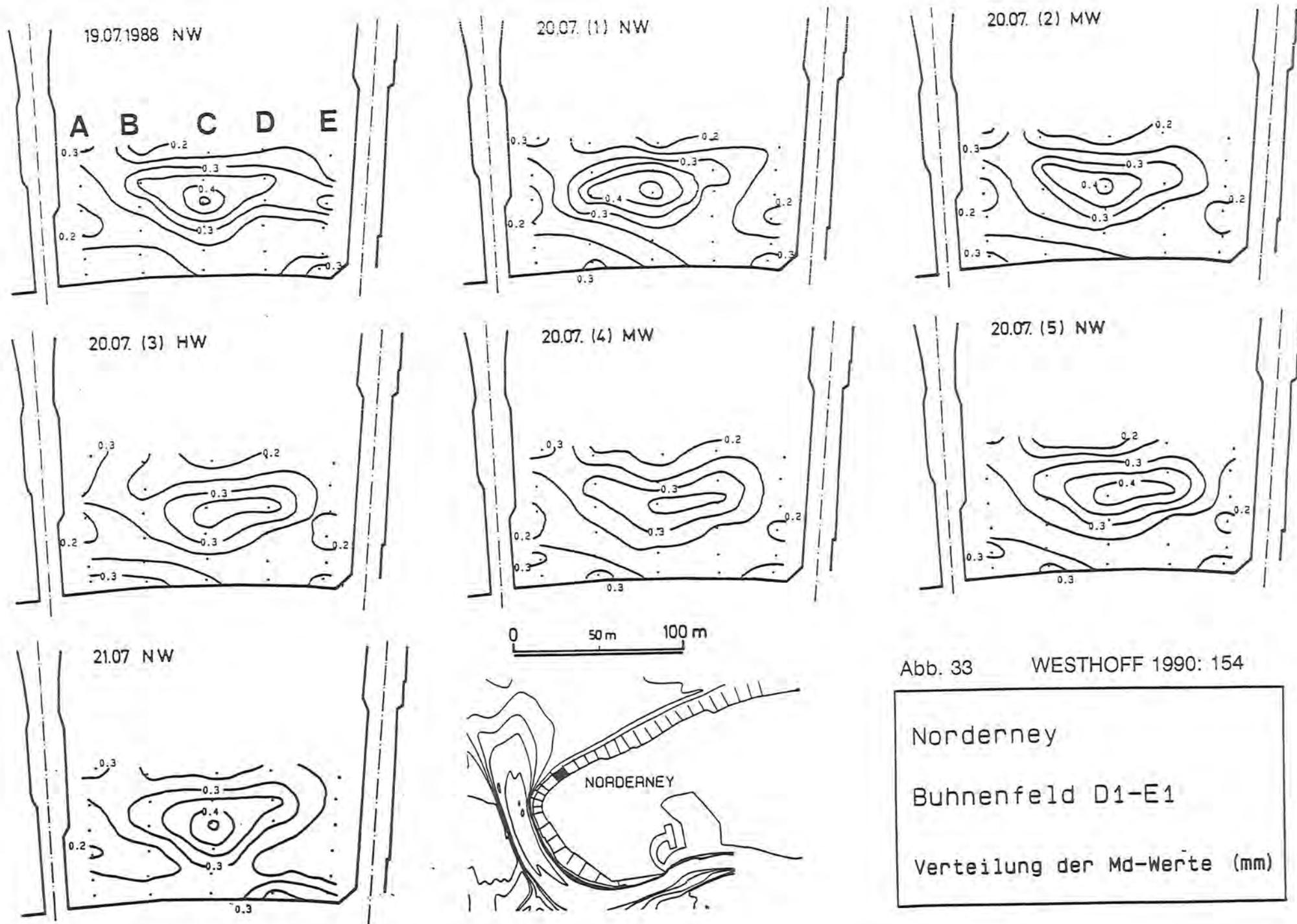


Abb. 33 WESTHOFF 1990: 154

Norderney

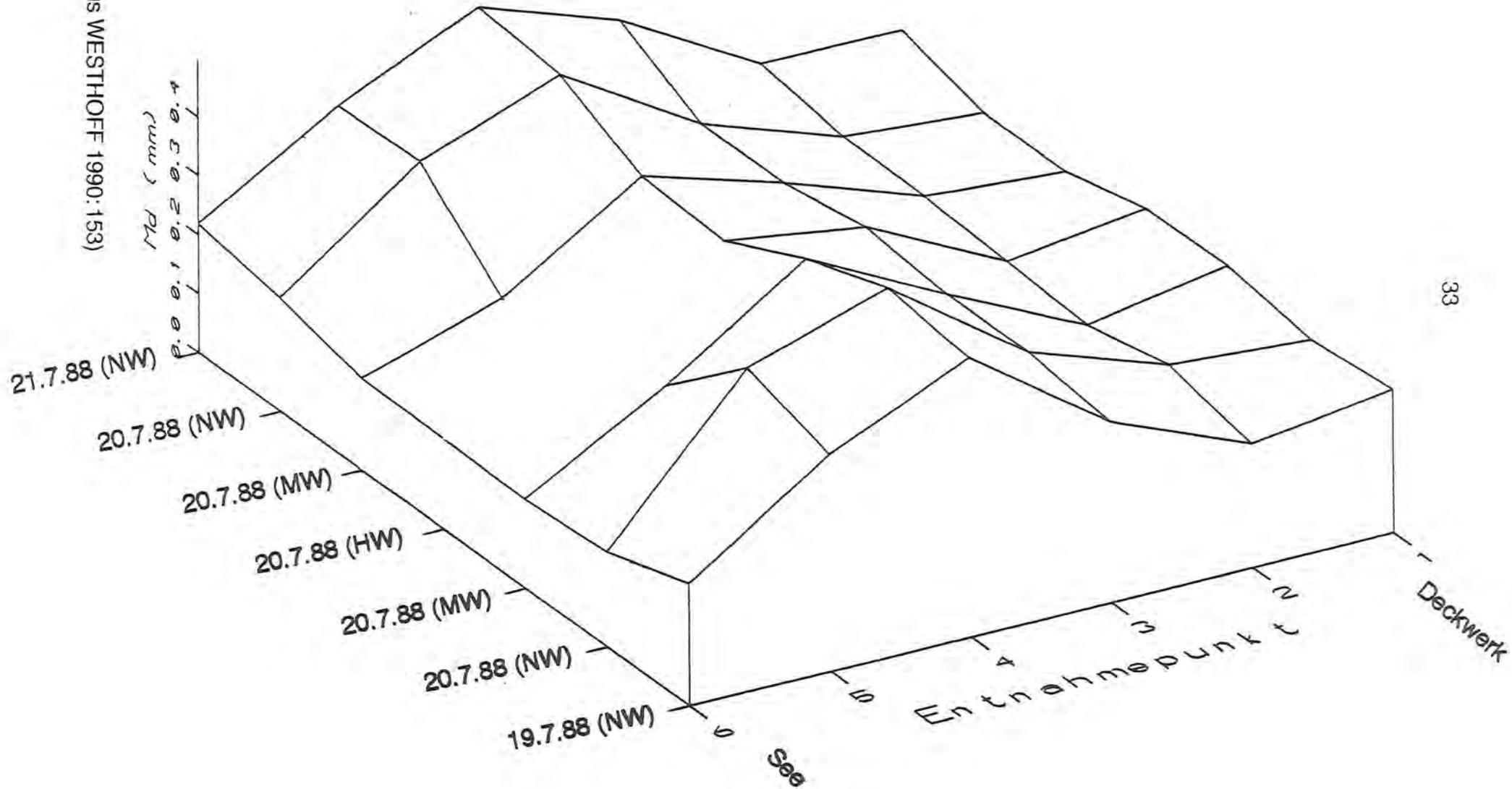
Buhnenfeld D1-E1

Verteilung der Md-Werte (mm)

Abb. 34

Entwicklung der Median-Werte im Entnahmeprofil C

(aus WESTHOFF 1990:153)



21.7.88 (NW)

20.7.88 (NW)

20.7.88 (MW)

20.7.88 (HW)

20.7.88 (MW)

20.7.88 (NW)

19.7.88 (NW)

See

Deckwerk

3.2.2 Sedimentumlagerungsintensitäten

Die Umlagerungsintensitäten können auf verschiedenen Wegen bestimmt werden. Eine Möglichkeit ist die tachymetrische Aufnahme der Strandhöhen. Im Rahmen der Einzeltidenuntersuchungen im Juli 1988 (Tab. 12) wurde zeitgleich auch die Topographie des Bühnenfeldes D₁-E₁ tachymetrisch aufgenommen. Das Ergebnis der Massenbilanzierungen, die auf diesen Vermessungen beruhen, ist in Tabelle 13 zusammengefaßt. Obgleich Zunahmen während der ersten Tide bzw. Verluste sich in den beiden darauffolgenden Tiden ergeben, sind die Veränderungen in Bezug auf die Gesamtmenge als gering zu werten. Der Nachteil dieser Methode ist, daß nur das Endresultat der Umlagerungsvorgänge ermittelt werden kann. Aussagen über die Sedimentations- und Erosionsprozesse während des Tidenablaufes können nicht getroffen werden. Durch sogenannte Grenzwertanzeiger können dagegen diese Prozesse quantifiziert werden. In dieser auf GREENWOOD et al. (1979) zurückgehenden Methode kann die Erosionstiefe sowie die Sedimentationshöhe bestimmt werden. Für das Bühnenfeld D₁-E₁ wurde im August 1990 bei einer weiteren beispielhaften Einzeltidenuntersuchung die Umlagerungstiefe mit Grenzwertanzeigern bestimmt.

Höhe m (NN)	19.7.	20.7. (1)	20.7. (2)	21.7.
-1.1 - -1.1	1078.78	+ 0.47	- 0.66	- 9.92
-1.0 - -0.9	1004.09	+ 5.01	- 4.52	-12.44
-0.9 - -0.8	925.96	+ 5.03	-11.84	-13.24
-0.8 - -0.7	842.71	+ 2.76	-12.80	-14.10
-0.7 - -0.6	756.00	- 0.22	- 9.50	-14.52
-0.6 - -0.5	663.49	- 0.43	- 9.51	- 8.50
-0.5 - -0.4	554.56	- 0.89	- 6.90	- 7.93
-0.4 - -0.3	394.45	+ 6.13	-31.63	+ 9.35
-0.3 - -0.2	207.62	+ 8.56	-26.77	+ 4.53
-0.2 - -0.1	97.19	- 0.03	+ 3.85	-17.29
-0.1 - 0.0	58.75	- 2.66	+ 2.89	-11.99
0.0 - 0.1	35.12	- 3.63	- 0.53	- 3.52
0.1 - 0.2	18.39	- 2.45	- 0.79	- 0.07
0.2 - 0.3	6.81	+ 0.20	+ 0.07	- 0.23
0.3 - 0.4	1.78	+ 0.37	+ 0.72	- 0.18
0.4 - 0.5	0.26	+ 0.22	+ 0.56	- 0.15
Erosion/ Sedimentation		+18.36	-107.36	-100.10
Gesamt	6645.96	6664.35	6457.12	6456.97

Tab. 13 Massenbilanzen (in m³) im Bühnenfeld D₁-E₁ vom 19.7.-21.7.1988 (nach WESTHOFF 1990)

Die Messungen der Stärke der Sedimentumlagerungen mit den Ringscheiben können nur die Mächtigkeit des Erosionsprozesses angeben, der am tiefsten reichte. Der ermittelte Sedimentationswert gilt nur für die Sedimentation, die nach dieser stärksten Erosion eingesetzt hat. Ob die Erosions- und Sedimentationsprozesse mehrphasig stattgefunden haben und in welcher Stärke, läßt sich anhand der ermittelten Werte

Tag	TNW		THW	
	MEZ	cm (PN)	MEZ	cm (PN)
23.08.90	07.20	358	01.08	626
	19.57	329	13.09	640
24.08.90	08.00	326	01.45	598
	20.21	332	13.55	622

Tab. 14 Wasserstandsdaten des Pegels Norderney, Riffgat am 23. u. 24.08.1990

Tag	Zeit	Tide	H_s (m)	T_M (s)	V_x (m/s)	V_y (m/s)	V_r (m/s)	Richt. Grad
23.08.	07.14	NW	0,02	3,13	-0,01	0,00	0,01	351
	10.17	MW	0,80	4,93	-0,05	0,11	0,12	271
	13.20	HW	0,98	5,71	-0,08	0,13	0,15	278
	16.23	MW	0,03	4,44	-0,03	0,33	0,33	251
	22.39	MW	0,57	4,52	0,02	0,01	0,02	188
24.08.	04.45	MW	0,01	0,94	0,10	0,07	0,12	190
	07.48	NW	0,01	2,56	-0,57	0,14	0,59	322
	13.54	HW	0,39	7,03	-0,02	-0,02	0,03	31

Tab. 15 20-minütige Mittel aus Seegangsdaten des Untersuchungszeitraumes an der Meßposition M1 (H_s : signifikante Wellenhöhe, T_M : mittlere Wellenperiode, V_x : strandparallele Geschwindigkeit, V_y : strandnormale Geschwindigkeit, V_r : resultierende Geschwindigkeit)

nicht sagen.

Bei vielen der vermarkten Entnahmepunkte fehlten die Ringscheiben. Daher war in diesen Punkten eine Bestimmung der Sedimentations- und Erosionsmächtigkeit nicht möglich. Hinweise konnten jedoch die Differenzen der Abstände der Pegelspitze zur Strandoberfläche geben, die vor und nach jeder Tide gemessen wurden. Dadurch war

es möglich, für diese Punkte entweder Erosions- oder Sedimentationsraten anzugeben, die mindestens aufgetreten sind.

In der ersten Tide erreichen die Mächtigkeiten der erodierten Sedimentschichten über 10 cm (Abb. 35). Die stärksten Erosionen erfolgten dabei im Bereich des Deckwerksfußes und der Wurzel der Buhne D₁. Entlang der Buhne E₁ traten die geringsten Erosionsraten mit Werten bis 2 cm auf, während im zentralen Teil die erodierten Sedimentschichten eine Mächtigkeit von 5 cm nicht überstiegen. Die Sedimentation, die an den Meßpunkten jeweils nach der stärksten Erosion einsetzte, erreichte in etwa dieselben Werte wie sie bei der vorherigen Erosion aufgetreten sind (Abb. 36).

Daraus ergibt sich auch, daß nach den topographischen Aufnahmen der Bühnenfelder anscheinend keine Sedimentumlagerungen in größerem Maße stattgefunden haben. Berechnet man überschlägig die umgelagerte Sedimentmenge für das Bühnenfeld bei einer mittleren angenommenen Mächtigkeit der umgelagerten Sedimentschicht von 4 cm, so ergibt sich eine Menge von ca. 600 m³. Zu beachten ist, daß bei Sturmzeitenereignissen sich wesentlich größere Umlagerungstiefen ergeben (HOMEIER 1976).

Die in den Abb. 37 und 38 dargestellten Ergebnisse der Bestimmung der Erosions- und Sedimentationsraten während der zweiten erfaßten Tide zeigen ein sehr ähnliches Bild in der räumlichen Verteilung. Lediglich die Mächtigkeiten der umgelagerten Schichten sind geringer. Dies ist auf die geringere Seegangsbeaufschlagung während der zweiten Tide zurückzuführen (Tab. 15, 16).

Profil	2. Tide (20.7.1988)		3. Tide (20.-21.7.1988)	
	Erosion	Sedimentation	Erosion	Sedimentation
A	2.8 cm	3.8 cm	4.7 cm	3.7 cm
B	0.5 cm	2.0 cm	4.6 cm	3.3 cm
C	3.8 cm	1.3 cm		

Tab. 16 Ermittlung der Umlagerungsintensitäten durch eingebaute Farbsandkörper an der Niedrigwasserlinie im Bühnenfeld D₁-E₁ (nach WESTHOFF 1990)

Abb. 35 Verteilung der Erosionsraten nach der ersten Tide

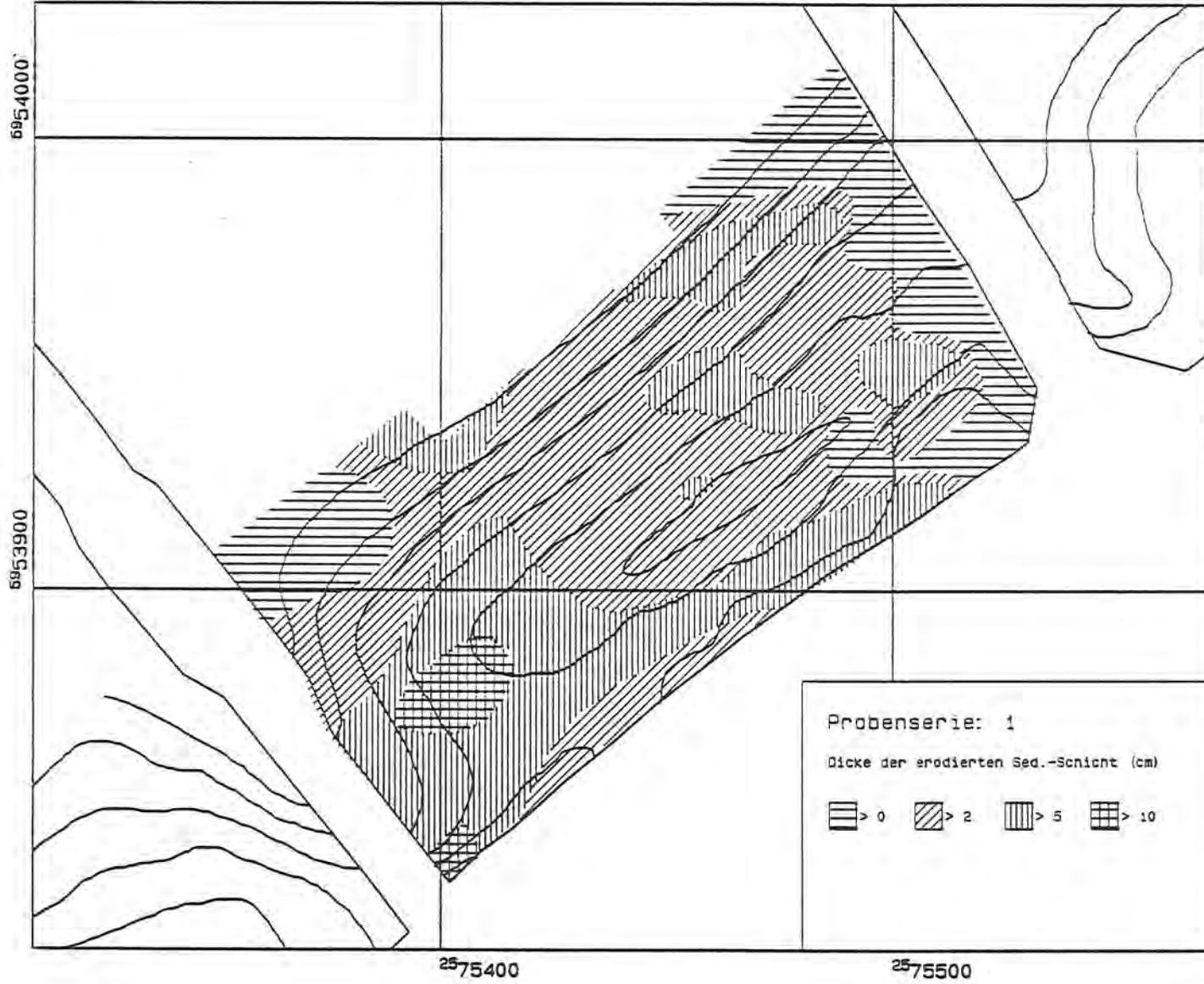
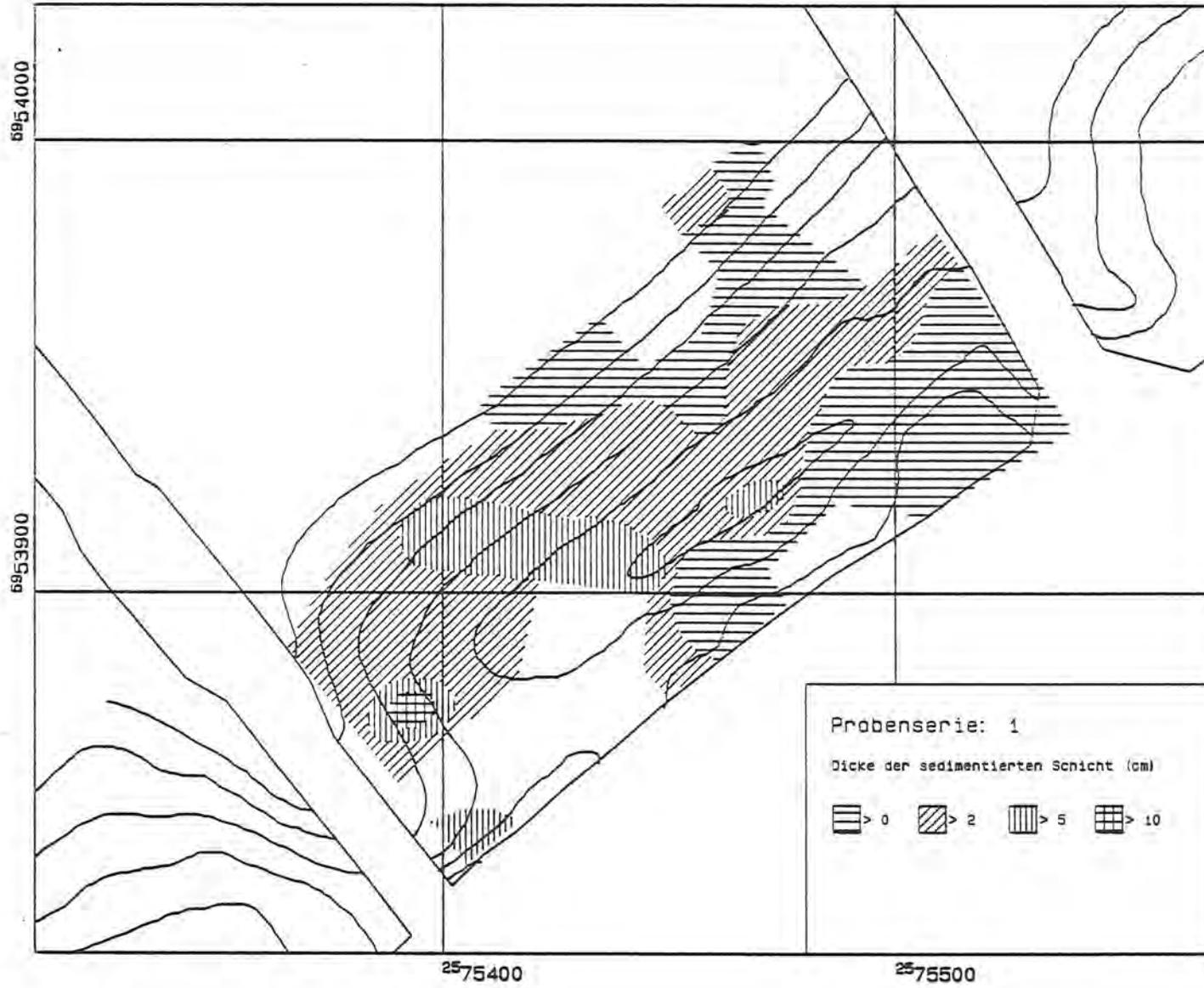


Abb. 36 Verteilung der Sedimentationsraten nach der ersten Tide



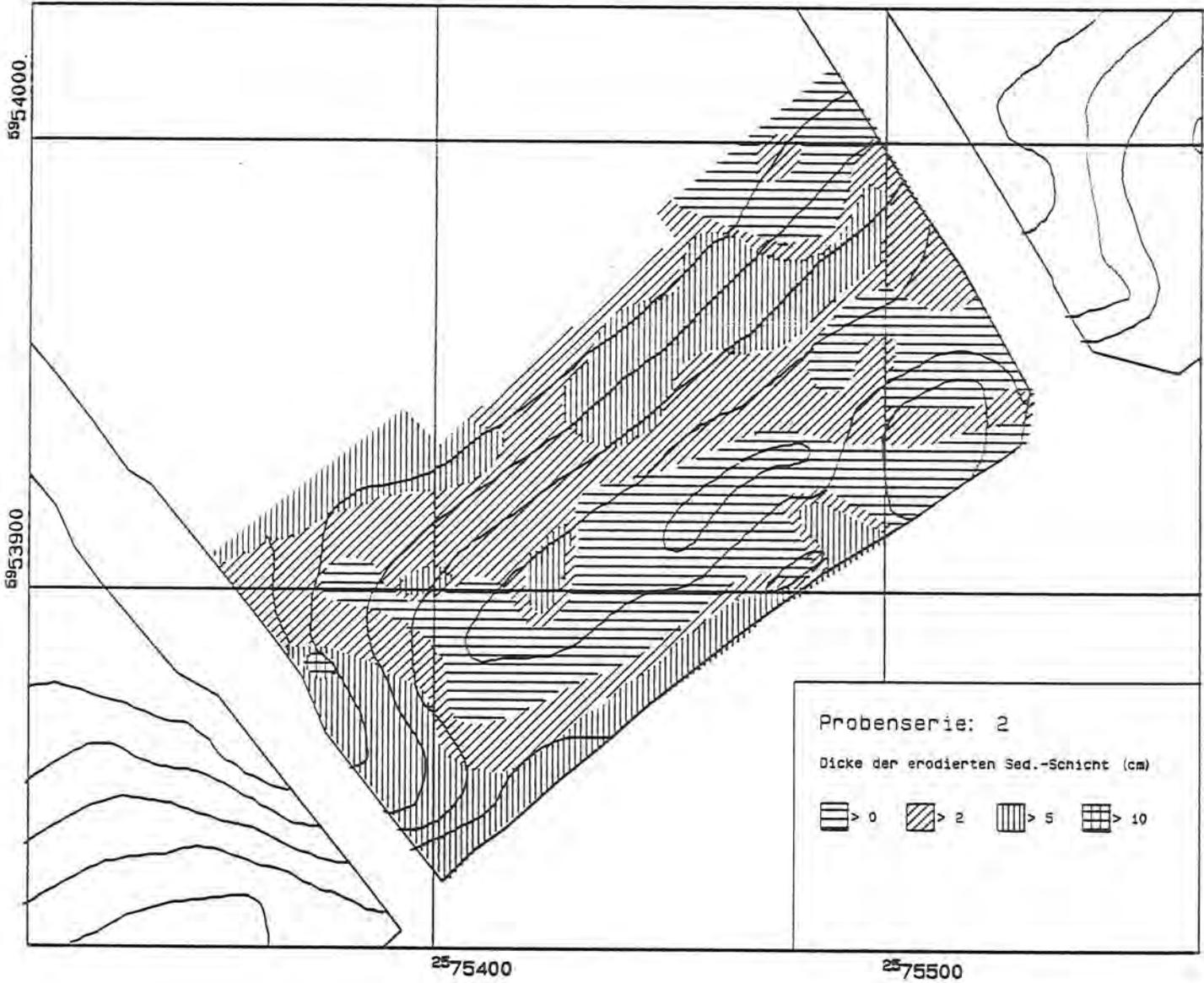


Abb. 37 Verteilung der Erosionsraten nach der zweiten Tide

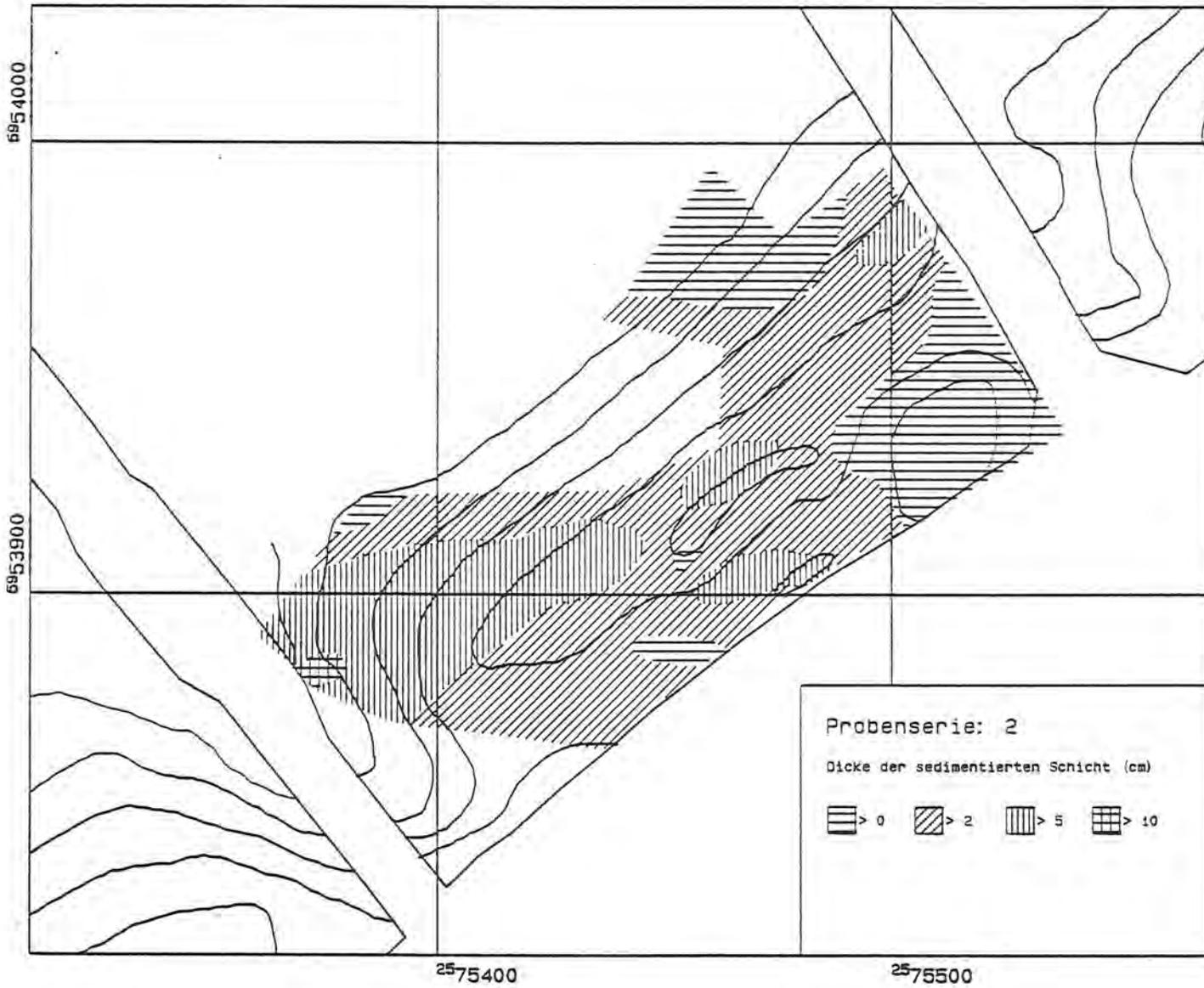


Abb. 38 Verteilung der Sedimentationsraten nach der zweiten Tide

Farbsandversuche geben in analoger Weise die Umlagerungsvorgänge wieder. Dazu wird ein länglicher Farbsandkörper in die Sedimentoberfläche eingebaut. Die Längenänderung dieses Körpers sowie die Mächtigkeit des ihn überlagernden Sedimentes lassen auf die Sedimentations- und Erosionsstärken schließen. WESTHOFF (1990) wandte diese Methode an der Niedrigwasserlinie im Bühnenfeld D_1 - E_1 an, um die Stärke der Umlagerungen über einige Tiden zu bestimmen (Tab. 16).

3.2.3 Luminophorenversuche

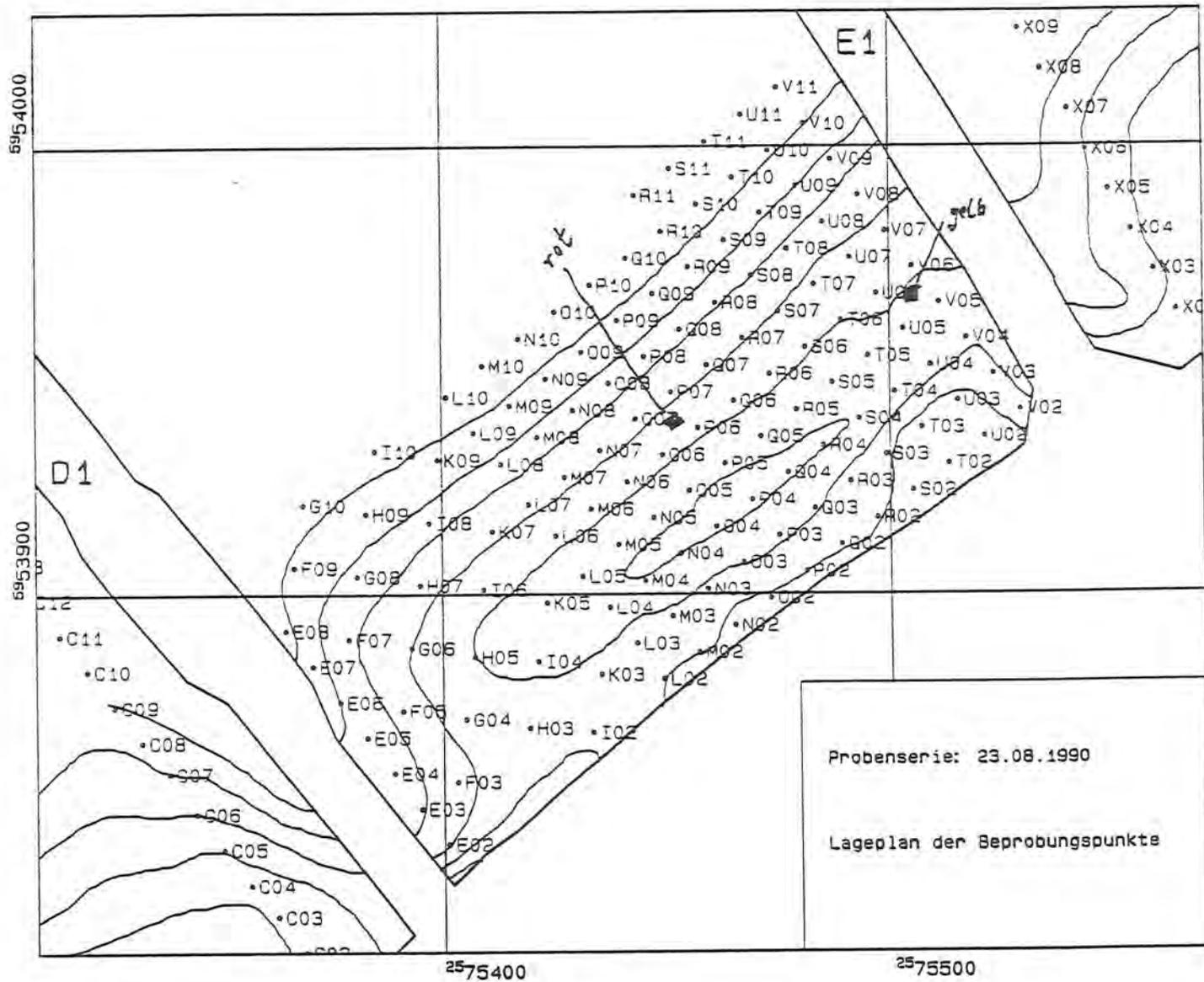
Zur Klärung von Transportvorgängen können natürliche Tracer (Korngröße, Schwerminerale) aber auch künstliche Tracer eingesetzt werden. Dabei haben sich mit einem luminiszierenden Farbstoff angefärbte Sande, sogenannte Luminophoren, als gut geeignet erwiesen (z.B. AJBULATOV 1957, GRIESEIER 1959, MÜLLER et al. 1965).

In Sommer 1990 wurde im Bühnenfeld D_1 - E_1 parallel zu den Umlagerungsuntersuchungen ein Luminophorenversuch über zwei Tidenzyklen durchgeführt und eine Transportmodell erstellt. Der Tracerversuch wurde mit Luminophorensanden ausgeführt, die schon von MÜLLER et al. (1965) auf dem Großen Knechtsand, südlich der Insel Scharhörn, eingesetzt wurden. Die Luminophorensande weisen einen mittleren Korndurchmesser von 0.15 mm auf und waren zum einen mit "Lumogen R LT hellgelb" und zum anderen mit "Lumogen GG rot" (BASF) angefärbt. Als Bindemittel diente Wasserglas.

Die angefeuchteten Luminophorensande (ca. 20 kg) wurden am 23.08.1990 um 8:00 Uhr jeweils auf einer Fläche von 1 m² in 1 cm Stärke mit einer Kelle ausgebracht und mit einer Plastikplane abgedeckt, um Ausblasungen zu vermeiden. Die Planen wurden beim Herannahen der ersten Wellen entfernt.

Der gelbe Luminophorensand wurde in der Mitte zwischen den Rasterpunkten U5, U6, V5 und V6 westlich der Bühne E_1 ausgebracht, während der rote Luminophorensand zwischen den Rasterpunkten O6, O7, P6 und P7 eingebaut wurde (Abb. 39). In der westlichen, landwärts gerichteten Ecke jeder Ausbringungsfläche ist zusätzlich ein 10 cm tiefes Loch gegraben, mit dem jeweiligen Luminophorensand gefüllt und mit einem Schweißdraht markiert worden. Dies diente zur Kontrolle der Erosionstiefe am Ausbringungspunkt der Luminophorensande.

Abb. 39 Lageplan der Sedimententnahmepunkte



Wie sich im Nachhinein bei der Auszählung der Luminophoren herausstellte, hatte der rote Luminophorensand seine fluoreszierenden Eigenschaften verloren. Dies war wahrscheinlich auf eine vorherige Trocknung der roten Luminophorensande bei 105° C zurückzuführen. Bei der Auszählung konnten die roten Körner daher nicht mehr identifiziert werden. Die Auswertung des Tracerversuchs beruht daher einzig und allein auf der Verfolgung des gelben Tracermaterials.

Nach der ersten Tide wurde der Strand im Bühnenfeld D₁-E₁ am Abend des selben Tages an den vermarkten Punkten beprobt. Dabei wurde zuerst der Abstand der Pegelspitze zur Strandoberfläche gemessen und anschließend der Sand, der über den Ringscheiben lag, mit einer kleinen Schaufel abgeschabt und in einen Plastikbeutel gefüllt. Dadurch konnte erreicht werden, daß nur umgelagertes Material, das alleine mit Luminophorensand kontaminiert sein kann, bei der Auszählung untersucht wird, wodurch die Genauigkeit deutlich gesteigert wird. Nach der Sandentnahme wurde die Schaufel in einem Eimer mit Wasser abgespült, um eine Kontamination der anderen Probenpunkte bei der Sandentnahme zu verhindern. Anschließend wurde der Abstand der Pegelspitze zur Ringscheibe gemessen und diese herausgenommen. Das Loch wurde dann mit Sand wieder aufgefüllt, eine Ringscheibe über den Schweißdraht gelegt und der Abstand zwischen der Spitze und der Scheibe notiert. Bei ca. 50 % der Beprobungspunkte und hauptsächlich im Bereich der Niedrigwasserlinie war die Ringscheibe durch die Wellen hochgewirbelt und fortgespült worden, so daß eine Bestimmung der Erosions- und Sedimentationsrate nicht mehr möglich war. In diesen Fällen wurde bei der Sandentnahme für die Luminophorenzählung die Mächtigkeit der zu beprobenden Schicht an umliegenden, schon bestimmten Punkten orientiert. Um ein Fortspülen der Ringscheiben bei zukünftigen Luminophorenversuchen zu vermeiden, empfiehlt es sich, kleine Querstreben auf die Pegelspitze zu schweißen.

Die entnommenen Proben wurden dreimal mit destilliertem Wasser entsalzt und bei 50° C im Ofen getrocknet. Das Auszählen der Luminophorenkörner erfolgte mit einer tragbaren UV-Lampe mit integrierter Lupe. Dazu wurden jeweils 50 g jeder Probe auf einem ca. 1 m² großen, glatten Karton mit aufgezeichneter Rasterung in einer dünnen Lage ausgestreut. Anschließend erfolgte die Auszählung über die einzelnen Rasterquadrate.

Die Topographie des Bühnenfeldes D₁-E₁ und den sich auf beiden Seiten anschließenden Bühnenfeldern A-D₁ und E₁-F₁ wurde jeweils morgens am 23. und 24.08.1990

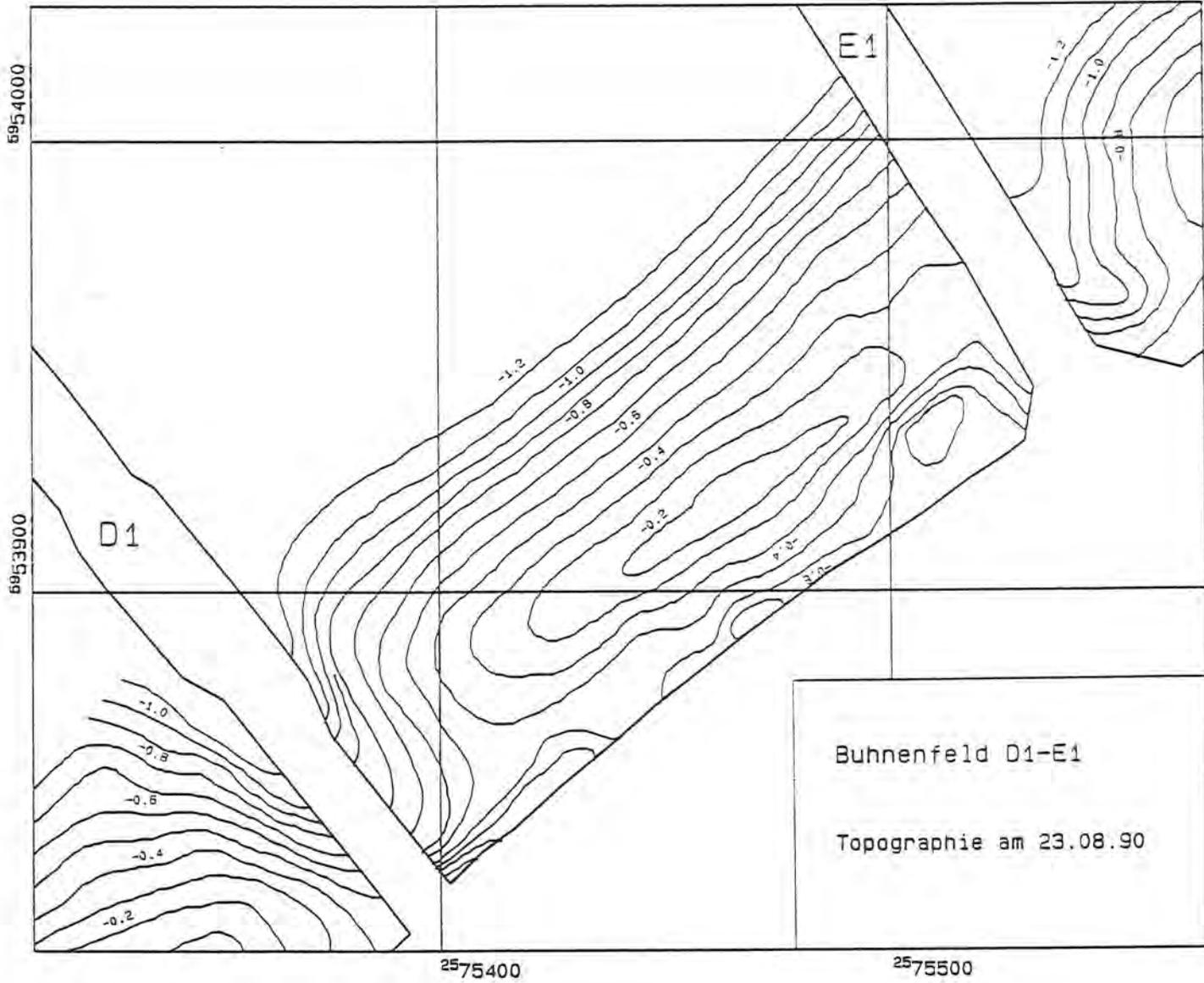


Abb. 40 Topographie am 23.08.1990

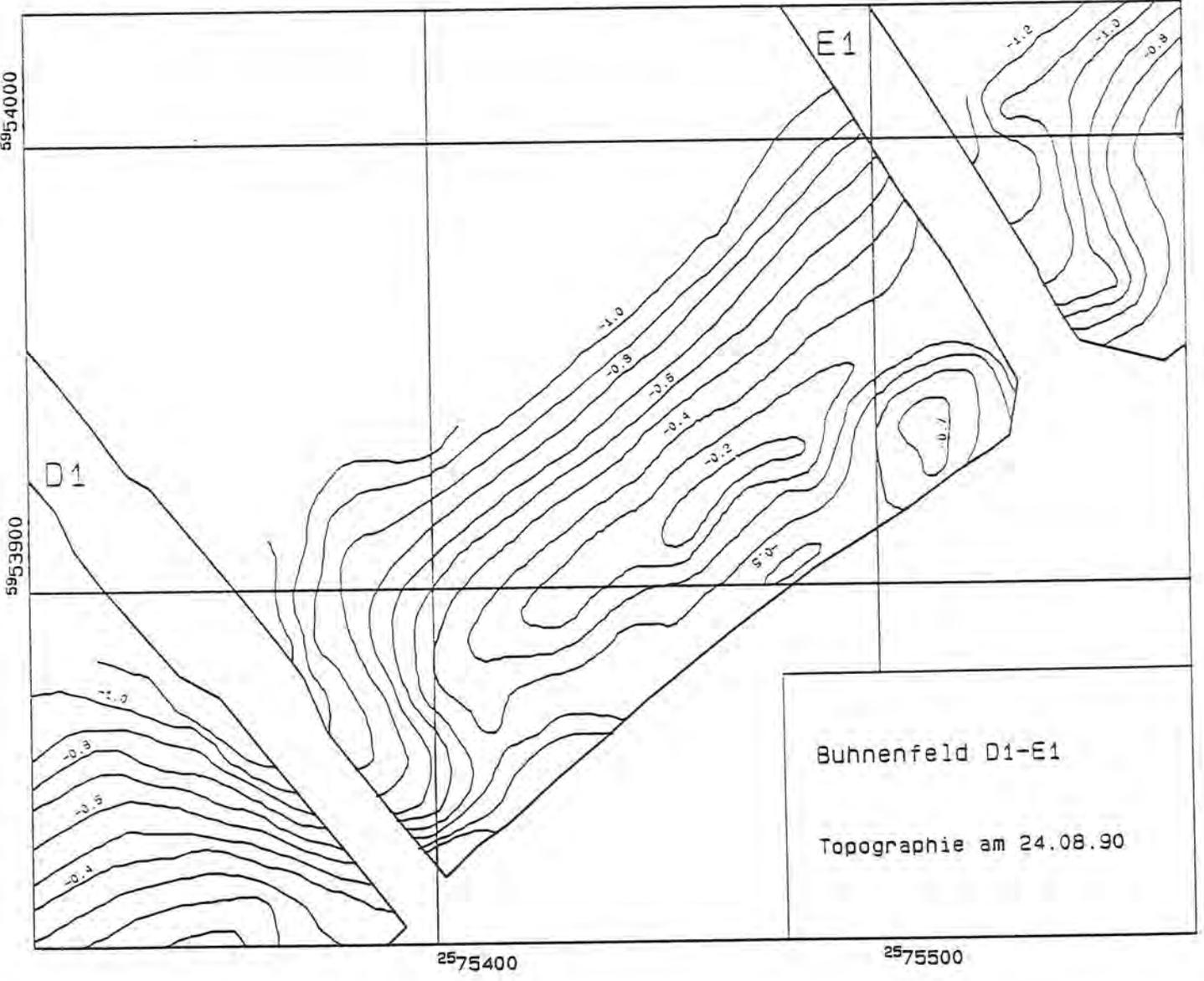


Abb. 41 Topographie am 24.08.1990

tachymetrisch erfaßt (Abb. 40 und 41). Die Höhe betrug danach am Ausbringungsort der gelben Luminophoren NN -0.4 m und bei dem der roten Luminophoren NN -0.5 m.

Die zwei Tiden zwischen den topographischen Aufnahmen des Strandes bewirkten nur geringe Veränderungen der Strandmorphologie. Das Strandriff in der Mitte zwischen den Bühnen verkleinerte sich etwas in seiner Ausdehnung. Ansonsten verschoben sich die Tiefenlinien nur unwesentlich. Mit auflaufendem Wasser wurde beim Überspülen des gelben Farbsands ein Teil des Farbstoffs gelöst und in Richtung auf das Deckwerk flotierend verfrachtet. Gleichzeitig setzte ein landgerichteter, strandnormaler Sedimenttransport ein, der durch die gefärbten Sandkörner gut zu erkennen war. Die Eingabestelle des gelben Farbsandes wurde gleichzeitig von hochgearbeiteten Sanden aus den tieferen Strandbereichen bedeckt und war nach ca. 2 Minuten nicht mehr zu sehen. Ein ähnlicher Vorgang setzte auch an der Eingabestelle des roten Farbsands ein. Dieser wurde ebenfalls zu Beginn der Überflutung strandnormal zum Deckwerk hin verfrachtet, was durch eine ca. 3 m lange Farbsandfahne deutlich zu erkennen war). Nach 1 bis 2 Minuten war die Eingabestelle des roten Farbsands ebenfalls von hochgearbeitetem Strandmaterial überdeckt. Ein Flotieren des roten Farbstoffs war nicht zu bemerken.

Bei der Luminophorenauszählung wurden insgesamt von 280 Proben jeweils 50 g Sediment untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 42 und 43 dargestellt. Da die roten Farbsande ihre Luminiszenzfähigkeit verloren hatten, entsprechen die dargestellten Verteilungen den Auszählungsergebnissen der gelben Farbsande. Nach der ersten Tide (Probenserie 1) weisen die Sedimente um den Eingabeort und in Richtung auf das Deckwerk zu die größten Luminophorenzahlen auf. Es lassen sich jedoch in fast allen entnommenen Sedimentproben Luminophoren nachweisen, so daß auf eine recht starke Umlagerung geschlossen werden kann. In Richtung auf die Bühne D₁ nehmen die Zahlen deutlich ab, wobei eine kleine Häufung auf dem Rücken des Strandriffs nachzuweisen ist. Nach der zweiten Tide (Probenserie 2) zeigt sich im Grunde ein sehr ähnliches Bild. Der Schwerpunkt der Luminophorenverteilung hat sich jedoch weiter in Richtung auf die Wurzel der Bühne E₁ verschoben, wobei die höchsten Absolutwerte deutlich unter den Zahlen der Probenserie 1 liegen. Dies läßt sich im Grunde für das ganze Bühnenfeld belegen. Dies ist auf eine weiter- und tiefergehende Aufarbeitung des Strandes und Durchmischung der kontaminierten mit nicht kontaminierten Sedimente zurückzuführen.

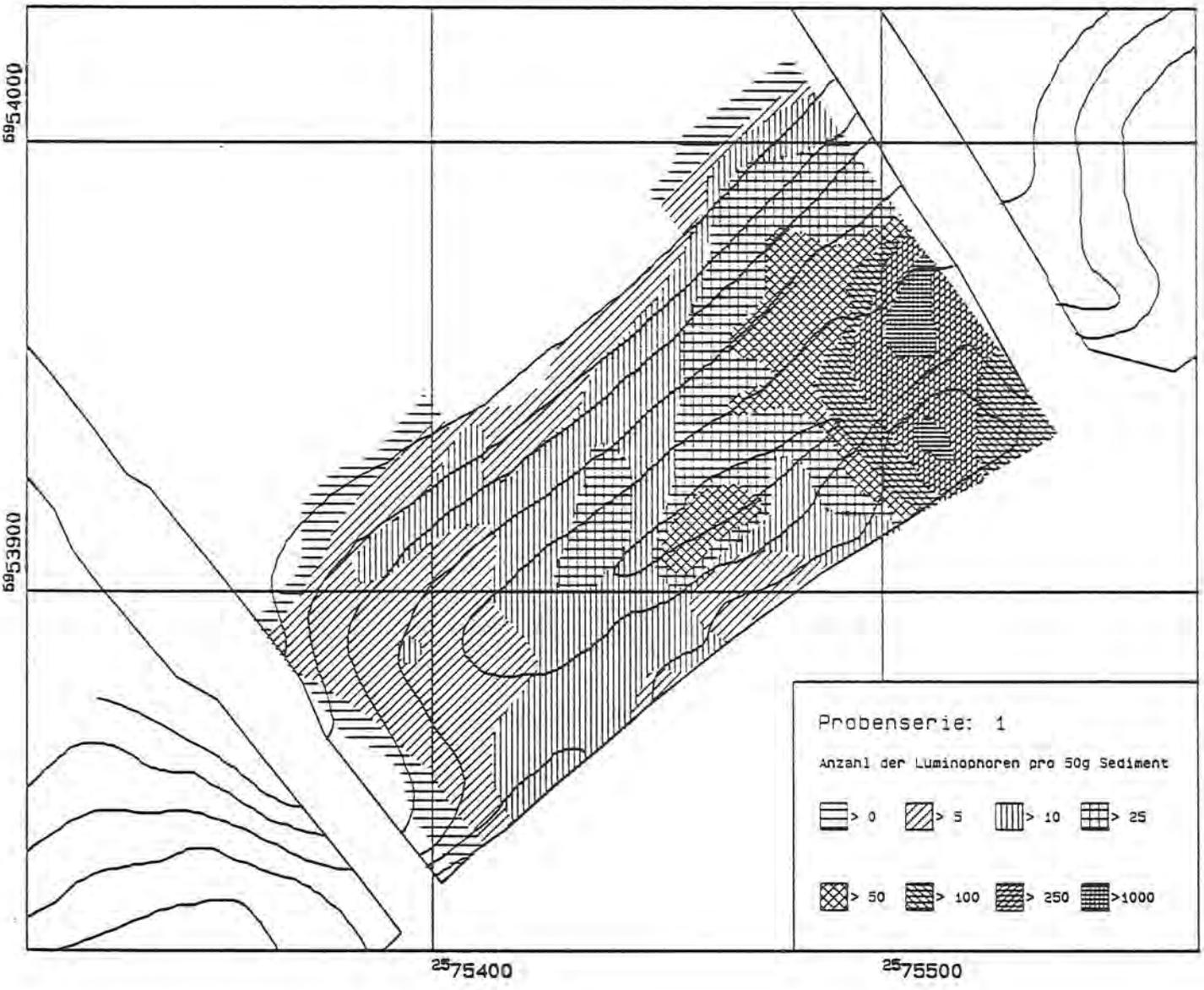
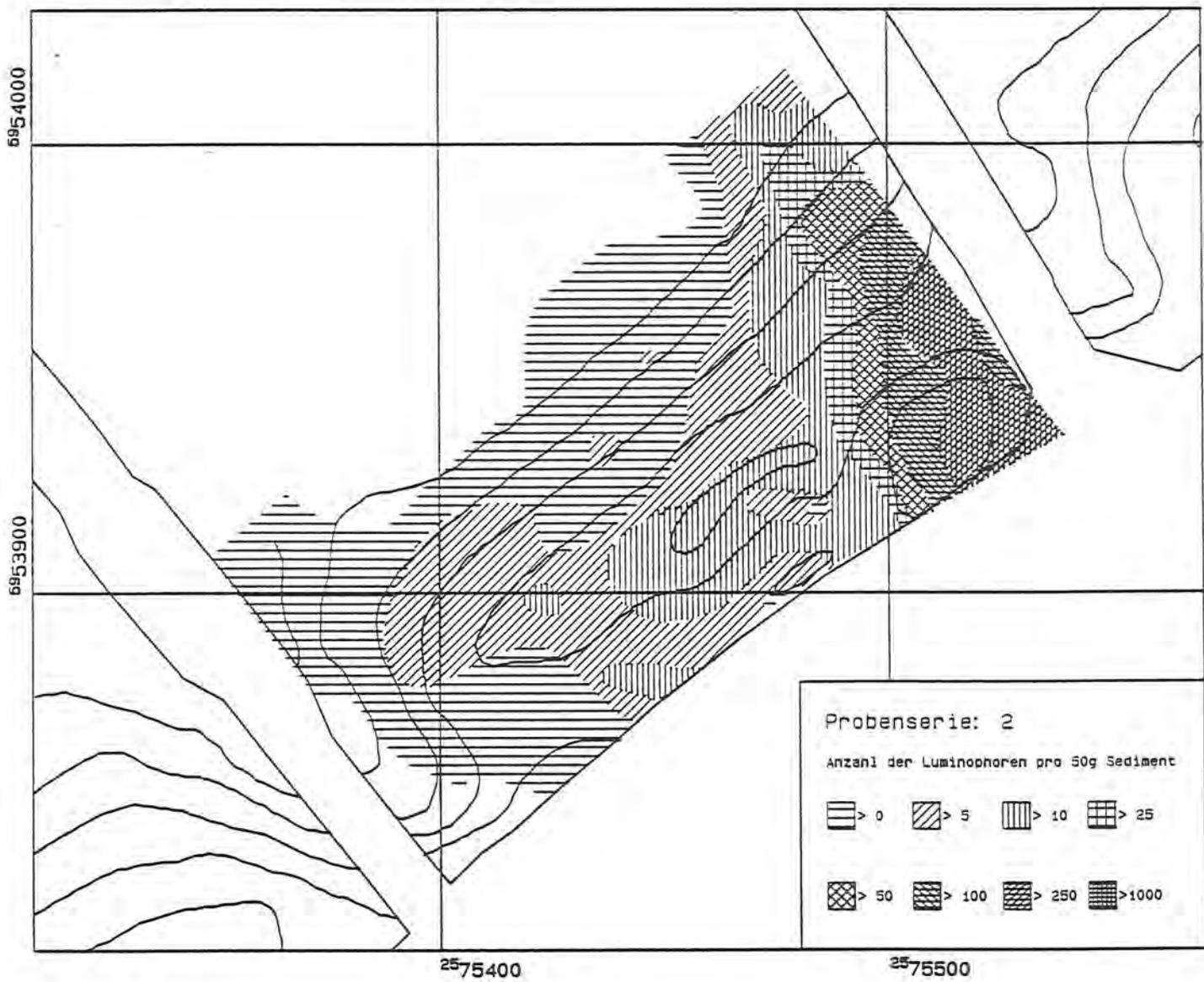


Abb. 42 Verteilung des gelben Lumineszenzandes nach der ersten Tide

Abb. 43 Verteilung des gelben Luminophorensandes nach der zweiten Tide



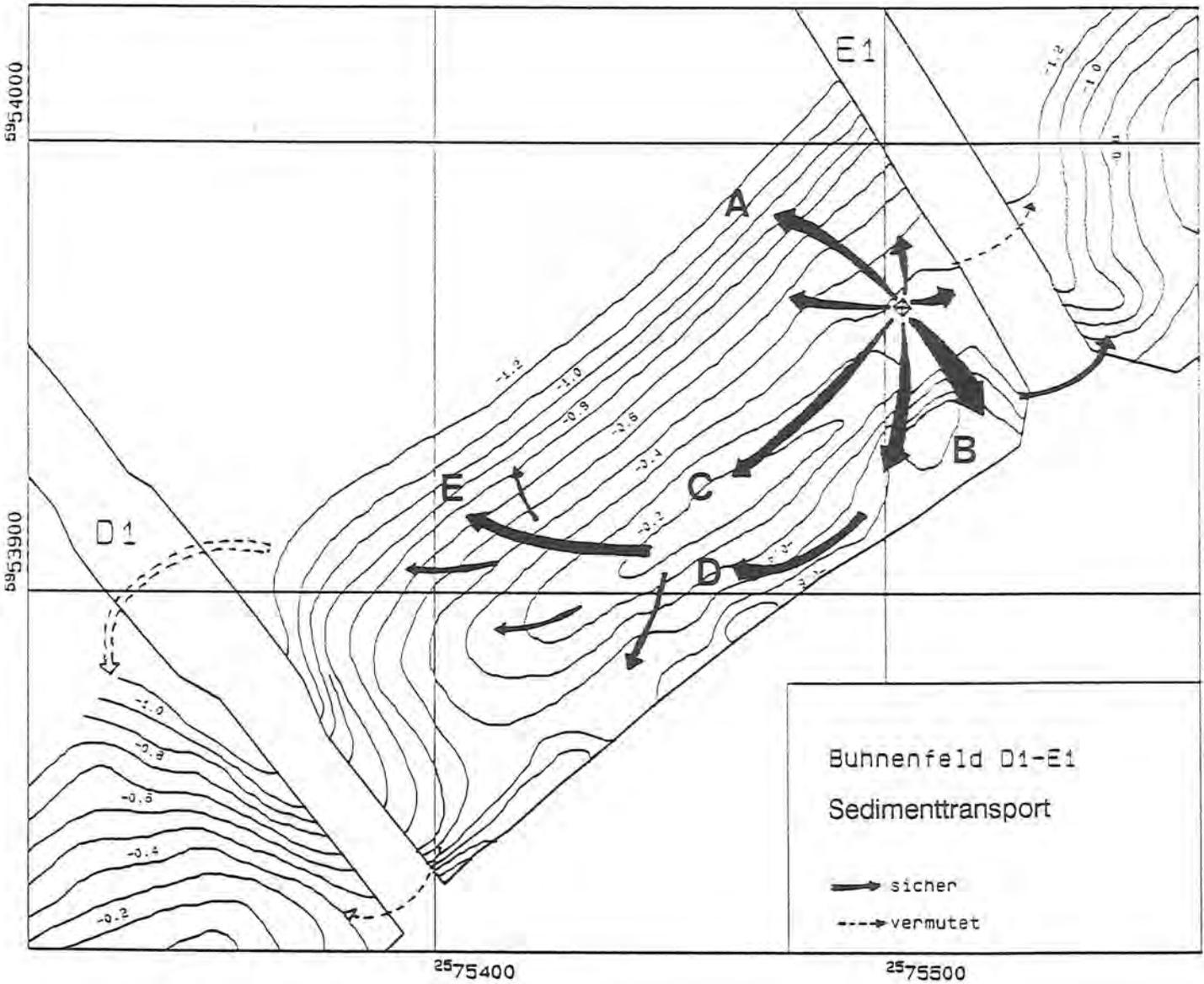


Abb. 44 Sedimenttransportmodell für das Bunnenfeld D1-E1, beruhend auf einem Lumminophorenversuch

Die Luminophorenzählungen der in den benachbarten Bühnenfeldern entnommenen Sedimentproben lassen den Schluß zu, daß im Wurzelbereich der Bühne E₁ während des Untersuchungszeitraums der Sedimenttransport über die Bühne hinweg in das Bühnenfeld E₁-F₁ erfolgt. Die erhöhten Luminophorenzahlen im Bereich der Niedrigwasserlinie des Bühnenfeldes A-D₁ lassen jedoch vermuten, daß hier ein Sedimenttransport verstärkt über den Vorstrand erfolgte.

Eine Erklärung gefundener sedimentologischer Ergebnisse wird durch die Ergebnisse zuzuordnender hydrographischer Untersuchungen möglich. Die alternierenden seeganginduzierten Strömungen verfrachteten die Luminophoren sowohl in see- als auch landwärtige Richtung (A u. B), wobei der landgerichtete, strandnormale Sedimenttransport vorherrscht (Abb. 44). Aus dem alternierenden Quertransport resultiert zusätzlich ein nach Westen auf das Strandriff gerichteter Längstransport (C). Die dominierende landwärtige Transportrichtung wird in der Nähe des Deckwerkes durch das Bauwerk selbst in eine strandparallele Richtung abgelenkt (D). Im westlichen Teil des Bühnenfeldes kommt es dann zu einer Auffächerung des Sedimenttransportes in vorwiegend seewärtige Richtungen (E).

NIEMEYER (1991) zeigt anhand von hydrographischen Naturmeßdaten ein ähnliches Zirkulationsmuster für das Bühnenfeld D₁-E₁.

4. Folgerungen

Entgegen der ursprünglichen Zielsetzung führte die Aufspülung zu einer Verfeinerung der Strandsedimente, weil kein ausreichend grobes Material eingespült werden konnte. Ein Korngrößenspektrum, wie es vor der Auffüllung bestanden hat, stellte sich als Folge der Auswaschung feiner Korngrößen nur langsam wieder ein. Nach einem Jahr war der ursprüngliche Zustand noch nicht wieder erreicht. In diesem Zeitraum ist eine beträchtliche Strandhöhenabnahme eingetreten. Die vom StAIK (1990) geäußerte Begründung, rauhe Herbstwetterlagen wären für diese starken Strandverluste verantwortlich, halten RAGUTZKI & WESTHOFF (1990) für eher unwahrscheinlich, da im Zeitraum von der Aufspülung und bis zum Jahresende nur wenige Tiden einen leicht erhöhten Wasserstand aufwiesen. Sie sehen vielmehr in dem zu feinkörnigen Aufspülmateriale die vermutliche Ursache für die starken Abnahmen der Strandhöhen.

Der Selektionsprozeß spielt eine wichtige Rolle, jedoch darf die Korngröße im Zu-

sammenhang mit Strandaufspülungen nicht überinterpretiert werden. Selbst wenn das aufgespülte Material ein größeres Korngrößenspektrum gehabt hätte, das dem natürlichen entspräche, wären Strandhöhenänderungen zu verzeichnen gewesen. Die herrschenden hydrodynamischen Randbedingungen bedingen nicht nur eine charakteristische Korngrößenverteilung, sondern auch eine charakteristische Morphologie.

Durch die Wahl eines bestimmten Aufspülprofils (insbesondere Höhenlage) und einer bestimmten Korngrößenzusammensetzung des Aufspülmaterials besteht die Möglichkeit, die Verlustmengen zu verringern. Die bisherige Auffüllmethode, die von einer Depotwirkung ausgeht und entsprechend hochgezogene Strandprofile erfordert, hat Sandumlagerungen in der Anfangszeit zur Folge. Diese sind nicht als "Verluste" anzugeben, weil sie den aufgespülten "Störkörper" in einen den Natureinwirkungen angepaßten Zustand umformen. Durch eine Minimierung der Aufspülmengen mit denen man die Strandlagen sicherstellen kann und die man zum Schutz der bestehenden Inselbefestigungen gegen Sturmfluten benötigt, würden sich die Verluste deutlich verringern lassen (KUNZ 1991).

5. Zusammenfassung

Im Vorfeld sowie im Anschluß an eine künstliche Strandauffüllung wurden umfangreiche sedimentologische Untersuchungen im Strand- und Vorstrandbereich der Insel Norderney ausgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, Aussagen über die Sedimenttransportvorgänge zu treffen, um weiterführende Hinweise zur Physik der Prozesse zu erhalten und nun künftige Strandaufspülungen, insbesondere auch solche in Verbindung mit Küstenschutzwerken, geschützte Strandabschnitte, zu optimieren. Es wurden verschiedene sedimentologische Parameter ermittelt, die zur Klärung der Transportprozesse beitragen. Neben der Korngrößenverteilung wurden der Kalkgehalt und der Schwermineralgehalt bestimmt. Darüber hinaus erwiesen sich besonders Luminophoren als künstliche Tracer zur Kennzeichnung von kleinräumigen Transportvorgängen als erfolgreich. Zugeordnete kurzfristige Umlagerungsintensitäten konnten durch tachymetrische Aufnahmen sowie durch Grenzwertanzeiger und Farbsandversuche quantifiziert werden. Die beiden letzteren Methoden erlauben darüber hinaus eine explizite Bestimmung der Erosions- und Sedimentationsstärken.

6. Literatur

- AJBULATOV, N (1957): New investigations on the movement of sands along coasts. - Bull. Ocean. Com. U.S.S.R. 1: 72-80; Moskow
- AKKERMANN, M. (1953): Bericht über die sedimentologischen Untersuchungen zur Frage der Umlagerungen des Sandes. - Jber. 1952, Forschungsstelle Norderney 4; Norderney
- DECHEND, W. & RICHTER, K. (1953): Geologische Untersuchungen zur Frage der Materialumlagerungen im Norderneyer Seegat. - Arbeiten aus der Forschungsstelle Norderney Nr. 1; Norderney (unveröff.)
- ERCHINGER, H.F. (1986): Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. - Die Küste 43: 181-204; Heide
- ERCHINGER, H.F. & LAUE, M. (1989): Sechste Strandaufspülung mit besonderer Berücksichtigung der Sandentnahme und Transporttechniken. - Interner Bericht StAIK; Norden (unveröff.)
- ERCHINGER, H.F. & LAUE, M. (1992): Schlußbericht - KFKI-Forschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" Teilvorhaben Ausführung der Versuchsstrandauffüllung. - Bericht Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz; Norden (unveröff.)
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. (1957): Brazos river bar, a study in the significance of grain-size parameters. - J. Sed. Petrol. 27: 3-27;
- GREENWOOD, B.; HALE, P.B. & MITTLER, P.R. (1979): Sediment Flux Determination in the Nearshore Zone: Prototype Measurements. - Workshop on Instrumentation for Currents and Sediments in the nearshore Zone. Natl. Res. Council: 99-119; Ottawa
- GRIESEIER, H. (1959): Verwendung von Luminophoren beim Studium der litoralen Materialbewegung. - Acta Hydrophy. 6 (1): 5-42; Berlin
- HOMEIER, H. (1976): Die Auswirkungen schwerer Sturmtiden auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. - Jber. 1975 Forschungsstelle f. Insel- u. Küstenschutz

27: 107-122; Norderney

HOMEIER, H. & KRAMER, J. (1957): Verlagerung der Platen im Riffbogen vor Norderney und ihre Anlandung an den Strand. - Jber 1956, Forschungsstelle Norderney 8: 1-28; Norderney

KRAMER, J. (1958): Die Strandaufspülung Norderney (1951/52) und ein Plan zu ihrer Fortführung. - Die Küste 24: 107-139

KRAMER, J. (1960): Beach-rehabilitation by use of beach fills and further plans for the protection of the island of Norderney. - Proc. 7th ICCE, 847-849;

KRAUSE, H.R. (1950): Bericht über die Ergebnisse der Schilluntersuchungen im See- und Wattgebiet von Norderney und Juist. - Interner Bericht Forschungsstelle Norderney; Norderney (unveröff.)

KUNZ, H. (1987): History of seawalls and revetments on the island of Norderney. - Proc. Coastal Sediments '87, S. 974-989;

KUNZ, H. (1991): Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. - Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 3: 3254-3267; New York (ASCE)

KURZAK, G.; LINKE, O. & DECHEND, W. (1950): Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney und die Beurteilung der zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. - Interner Bericht Forschungsstelle Norderney; Norderney (unveröff.)

LUCK, G. (1970): Die zweite Strandaufspülung von Norderney. - Jber. 1968 Forschungsstelle f. Insel- und Küstenschutz 20: 7-34; Norderney

MÜLLER, C.-D.; NACHTIGALL, K.-H.; REINECK, H.-E.; SEIBOLD, E. & VOLLBRECHT, K. (1965): Der Knechtsand - Eine Untersuchung über Material und Materialtransport mit der Luminiophorenmethode und anderen vergleichenden Methoden. - Jber. 1964, Forschungsstelle Norderney 16: 143-201; Norderney

NIEMEYER, H.D. (1986): Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. - Jber. 1985 Forschungsstelle Küste 38: 49-95; Norder-

ney

NIEMEYER, H.D. (1987): Tidestrommessungen in Bühnenfeldern. - Jber. 1986, Forschungsstelle Küste 38: 127-150; Norderney

NIEMEYER, H.D. (1991): Field measurements and analysis of wave induced nearshore currents. - Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 1: 783-797; New York (ASCE)

NUMMEDAL, D. & PENLAND, S. (1981): Sediment dispersal in Norderneyer Seegat, West Germany. - Spec. Publ. Int. Ass. Sedimentology 5: 187-210; Oxford

PÄTZOLD, U. (1982): Bilanz und Verformung aufgespülter Sandstrände. - Jber. 1980 Forschungsstelle f. Insel- u. Küstenschutz 32: 41-53; Norderney

RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. (1987-1990): Fünf Zwischenberichte zu den sedimentologischen Untersuchungen des Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und mariner Umwelt". - Interner Bericht Forschungsstelle Küste; Norderney (unveröff.)

STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ (StAIK) (1990): Strandmorphologische Veränderungen auf den ostfriesischen Inseln. - Jahresbericht 1989, Dienstbericht; Norden (unveröff.)

THILO, R. & KURZAK, G. (1952): Die Ursachen der Abbruchserscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney. - Die Küste 1: 1-20; Heide

WESTHOFF, T. (1990): Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney. - Diss. Univ. Münster, 189 S.; Münster

ANLAGEBERICHT

Sedimentologische Untersuchungen zur Klärung von
Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten
am Beispiel Norderney

Geologie

**Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transport-
vorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney**

- Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades -

vorgelegt an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät Im Fachbereich
Geowissenschaften der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

von

THEO WESTHOFF

Münster 1990

Dekan: Prof. Dr. E. Peveling
Erster Referent: Prof. Dr. K. Poll
Zweiter Referent: Prof. Dr. M. Kaefer
Mündliche Prüfung:
Tag der Promotion:

Für Andrea und Bastian

Vorwort

Das Thema der vorliegenden Dissertation verdanke ich meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Kurt Poll. Ihm bin ich für die Anleitung und Betreuung während der gesamten Untersuchung zu großem Dank verpflichtet.

Ebenso möchte ich mich sowohl beim ehemaligen Leiter der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Wasser und Abfall, Herrn Dr. G. Luck, als auch bei dessen Nachfolger im Amt, Herrn Baudirektor Dr. H. Kunz, bedanken, die mir die Möglichkeit gaben, diese Untersuchung im Rahmen des Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" auszuführen, das vom Kuratorium für Fragen im Küsteningenieurwesen (KFKI) initiiert wurde.

Meinem unmittelbaren Vorgesetzten und Leiter des Dezernats "Geomorphologie des Küstengebiets" der Forschungsstelle Küste Herrn Dipl.-Ing. G. Ragutzki möchte ich ebenfalls für die Unterstützung und die ausführlichen Diskussionen Dank sagen. Dies gilt auch für Herrn Dipl.-Ing. H. D. Niemeyer, der das Dezernat "Hydrographie der Küstengewässer" leitet und mir zahlreiche Anregungen gab.

Den Angestellten der Forschungsstelle Küste sei für die tatkräftige Hilfestellung bei der bodenmechanischen Bearbeitung und bei der Auswertung der gewonnenen Daten gedankt. Stellvertretend sind hierbei insbesondere zu nennen: Herr U. Becker, Herr Dipl.-Math. W. Liebig, Herr Verm.-Ing. E. Wipper, Frau H. Meler, Herr D. Glaser, Herr E. Sieberns, Herr H. Memmken sowie Herr E. Boutelstein.

Der Besatzung des hydrographischen Arbeitsschiffs "BURCHANA" und der Besatzung des Laborschiffs "BUISE" habe ich für die Unterstützung bei der Sedimentprobenentnahme zu danken.

Ebenso bin ich den Arbeitern der Werkstatt der Forschungsstelle Küste unter Leitung von Herrn Gerrelts für die tatkräftige Unterstützung bei den anfallenden Aufgaben und Problemen zu Dank verpflichtet.

Ohne die Einsatzfreude einer Vielzahl von Geologie- und Geographiestudenten aus Münster und Göttingen, die im Rahmen ihres Praktikums mit der Entnahme und Bearbeitung der Sedimente sowie der Aufbereitung der ermittelten Daten befaßt waren, wäre der Umfang dieser Untersuchung nicht einzuhalten gewesen.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr. W. Bauhus, Herrn cand. geol. D. Quante und Herrn cand. geol. Cord Raber für Ihr Interesse und Ihre kameradschaftliche Mitarbeit.

Ich danke dem BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE für die Förderung des KFKI-Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt", in dem ich als wissenschaftlicher Angestellter tätig bin.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Problemstellung	4
2. Geographischer Überblick	4
2.1. Lage des Untersuchungsgebietes	4
2.2. Morphologie des Untersuchungsgebietes	5
2.2.1. Historisch-morphologische Entwicklung	5
2.2.2. Morphologische Gliederung	8
3. Die Geologie des Untersuchungsgebietes	12
3.1. Präquartär	12
3.2. Quartär	13
3.2.1. Pleistozän	17
3.2.1.1. Präglazial	18
3.2.1.2. Elster-Glazial	19
3.2.1.3. Holstein-Interglazial	20
3.2.1.4. Saale-Glazial	20
3.2.1.5. Eem-Interglazial	20
3.2.1.6. Weichsel-Glazial	21
3.2.2. Holozän	21
4. Hydrographische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet	23
4.1. Die tideerzeugten Strömungen	24
4.2. Die seegangserzeugten Strömungen	31
4.3. Wetterdaten und Wasserstände im Untersuchungszeitraum	36
5. Sedimentprobenentnahme	40

6. Aufbereitung und Bearbeitung der Sedimentproben	49
6.1. Wassergehalt und Raumbgewicht	49
6.2. Kornverteilung	49
6.3. Karbonatgehalt	50
6.4. Schwermineralgehalt	50
6.5. Kornformanalysen	53
7. EDV gestützte Auswertung	55
7.1. Ermittlung der Sedimentkennwerte	55
7.2. Sonstige Auswertesoftware	58
8. Ergebnisse der sedimentologischen Untersuchungen	58
8.1. Korngrößenanalysen	58
8.1.1. Vorbemerkungen	58
8.1.2. Ergebnisse der Korngrößenanalysen	59
8.1.2.1. Kornverteilungen	59
8.1.2.1.1. Die Sedimente im Seegebiet	60
8.1.2.1.2. Die Sedimente am Strand	69
8.1.2.2. VISHIER-Diagramme	77
8.1.2.3. Sedimentkennwerte	84
8.1.2.3.1. Der mittlere Korndurchmesser	85
8.1.2.3.2. Sortierung	89
8.1.2.3.3. Schiefe	92
8.1.2.3.4. Karbonatgehalte	96
8.1.2.3.5. Variabilität der Sedimentkennwerte am Strand	99
8.2. Kornformuntersuchungen	106
8.2.1. Allgemeines	106
8.2.2. Ergebnisse der Rollsorter-Analysen	108
8.2.2.1. Allgemeines	108
8.2.2.2. Auswertung der Kornformanalysen	112
8.2.2.2.1. Vorbemerkungen	112
8.2.2.2.2. S.D.C.-Kurven im Seegebiet	113
8.2.2.2.3. S.D.C.-Kurven am Strand	118
8.2.2.2.4. Saisonale bedingte Änderungen der S.D.C.-Kurven	122
8.3. Schwermineraluntersuchungen	122
8.3.1. Vorbemerkungen	122
8.3.2. Ergebnisse der Schwermineralanalysen	123
8.3.2.1. Allgemeines	123
8.3.2.2. Verteilung der Schwermineralgehalte	127
8.3.2.3. Saisonale Änderungen der Schwermineralgehalte und -anteile	133

8.3.2.3.1. Seegebiet	133
8.3.2.3.2. Strand	140
8.4. Seegangs- und tidebedingte Sedimentumlagerungsprozesse in einem Buhnenfeld	149
8.4.1. Topographie des Buhnenfelds D1-E1	150
8.4.2. Sedimentverteilung im Buhnenfeld	151
8.4.3. Die hydrographischen Randbedingungen	159
8.4.4. Ergebnisse der tachymetrischen Aufnahmen und Farb- sandversuche	163
8.4.5. Modellhafte Beschreibung der Umlagerungsvorgänge	165
9. Sedimentdynamik im Norderneyer Seegebiet	165
9.1. Vorbemerkungen	165
9.2. Beschreibung des Sedimenttransports	166
10. Zusammenfassung	172
11. Literatur	173
12. Verzeichnis der Abkürzungen	184
13. Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	184
Anhang	

1. Einleitung und Problemstellung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Erforschung von Sedimentumlagerungen im Strand- und Vorstrandbereich von sandigen Küsten. Am Beispiel des Seegebiets von Norderney (Abb. 1) sollen die Umlagerungsvorgänge mit Hilfe von verschiedenen Sedimentkennwerten herausgearbeitet werden und die Aussagekraft der ermittelten Sedimentparameter zur Klärung dieser Prozesse untersucht werden.

Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt", das vom Bundesminister für Forschung und Technologie gefördert wird, wurden die dieser Arbeit zugrundeliegenden Sedimentproben entnommen. Die Sedimente sind hinsichtlich der Korngrößenverteilung, der CaCO_3 -Gehalte, der Schwermetallgehalte sowie der Kornformen untersucht worden. Die ermittelten Sedimentparameter bilden die Grundlage dieser Untersuchung.

Abb. 1: Luftbildaufnahme des Norderneyer Seegebiets vom 23.5.1989 (GTP, freigegeben Bez. Reg. Braunschweig Nr. 40/41)

2. Geographischer Überblick

2.1. Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt in der südlichen Nordsee, im Bereich der Ostfriesischen Inseln, die Teil der nordwestlichen Küste der Bundesrepublik Deutschland sind.

Es umfaßt den Seegebietbereich zwischen den Inseln Juist und Norderney (Abb. 1, 2). Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde auf das Gebiet um Norderney gelegt. Insgesamt umfaßt das Arbeitsgebiet den Norderneyer Strand und Vorstrand, einschließlich des gesamten Norderneyer Riffbogens von Juist

bis zum Platanlandungsbereich am Nordstrand von Norderney sowie Teile des Küstenvorfeldes, das bis zur NN -20 m Linie beprobt worden ist.

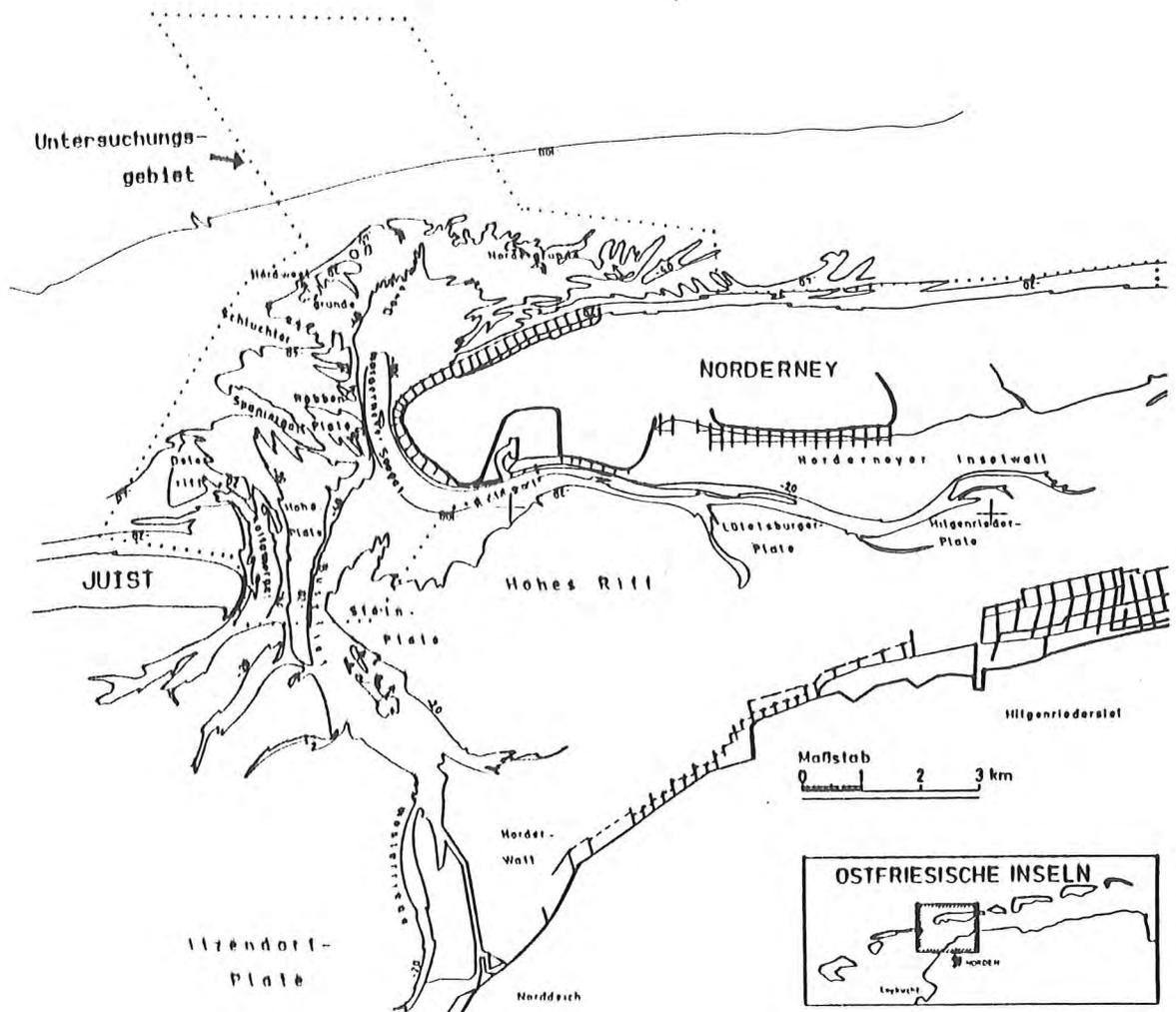


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes

2.2. Morphologie des Untersuchungsgebietes

2.2.1. Historisch-morphologische Entwicklung

"Erdgeschichtlich betrachtet sind die Ostfriesischen Inseln extrem junge, instabile und vergängliche Gebilde, die in ihrer heutigen Position allenfalls seit etwa 8000 Jahren existieren, aber seither erhebliche Umgestaltungen erfahren haben" (STREIF 1986: S. 37).

Über die Entstehung der Ostfriesischen Inseln gibt es verschiedene Theorien. Als unhaltbar erwies sich zunächst die Auffassung, daß die Inseln während einer gewaltigen Sturmflut vom Festland losgerissen worden seien. Ebensovwenig aufrechtzuerhalten ist die These von GRIPP (1944), der die Westfriesischen und Ostfriesischen Inseln als Bestandteile einer weitgespannten Nehrungskette ansah,

deren Aufhängepunkt Texel darstellt. Demnach aber müßten jedoch die Alter der Inseln von Westen nach Osten abnehmen. Da dies jedoch nicht der Fall ist, würde auch diese Theorie recht bald verworfen.

Vielmehr scheint es sicher zu sein, daß die Inseln ihre Entstehung dem Zusammenwirken von Strömung, Seegang, Tide und Wind zu verdanken haben. Die theoretischen Überlegungen von LÜDERS (1953), daß die Inseln aus einem durch Seegaten unterbrochenen Strandwall entstanden sind, nähert sich diesen Vorstellungen schon stark an.

Die heute gültige Theorie wurde von BARCKHAUSEN (1969) entwickelt, nach der sich auf pleistozänen Hochlagen bzw. submarinen Geesthochlagen die ersten hochwasserfreien Platen bildeten. Diese Platenbildung setzt eine stetige Sandzufuhr voraus. Nach OELE (1969) und SINDOWSKI (1973) ist im ostfriesischen Küstengebiet ab 1600 v. Chr. eine verstärkte Sandsedimentation zu bemerken. Durch diese Zufuhr von Sanden bildeten sich auf den hochwasserfreien Platen die ersten Dünen, die durch Bewuchs und Äolisches Sandtransport ständig weiter erhöht wurden. Zu der Theorie von BARCKHAUSEN (1969) bemerkt STREIF (1990: S. 117), daß diese die "heute allgemein akzeptierte Auffassung von der Entstehung der Ostfriesischen Inseln" sei, aber "die Bedeutung der Geestkerne für die Entwicklung der Ostfriesischen Inseln etwas unterbewertet". Die Ostfriesischen Inseln haben alle das Stadium einer Geestkerninsel durchlaufen. Nach STREIF (1990: S. 111) "verwendet man diese Bezeichnung für Inseln, bei denen sich um einen morphologisch über die Wattoberfläche aufragenden Kern aus Pleistozän- oder Tertiar material herum holozäne Sedimente anlagern. Derartige Verhältnisse sind heute auf Sylt, Föhr, Amrum und Texel zu beobachten. In Ostfriesland "ertranken" die Geestkerne im Jüngeren Atlantikum und im Subboreal, d.h. sie wurden überflutet und von marinen Sedimenten bedeckt. Dabei wandelten sich die ursprünglichen Geestkerninseln zu den heutigen Barriere-Inseln um".

Nach SINDOWSKI (1973), SINDOWSKI & STREIF (1974) und STREIF (1987) bildeten sich mit den Midlum Schichten, ab ca. 1700 v. Chr. die ersten hochwasserfreien Platen. Für Langeoog setzte nach BARCKHAUSEN (1969) das Platen Stadium mit den oberen Midlum-Schichten (ca. 800 v. Chr) ein und dauerte ca. 700 Jahre. Danach verstärkte sich das Dünenwachstum, so daß um die Zelterwende die Düneninseln - wenn auch noch nicht im heutigen Umfang - vorhanden waren.

Die Ostfriesischen Inseln und ihre zugeordneten Wattgebiete unterlagen geschichtlich gesehen schon immer starken topographischen Veränderungen. Die im Laufe der Geschichte aufgetretenen topographischen Änderungen des Seegebietes zwischen Juist und Norderney sind im Historischen Kartenwerk 1:50000, Nr. 5, der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE in 6 Zuständen für die Jahre 1350, 1400, 1650, 1750, 1860 und 1960 festgehalten.

Die ersten Nachrichten über die Ostfriesischen Inseln verdanken wir den römischen Geographen STRABO und PLINIUS (LUCK 1972). Norderney ist die jüngste der ostfriesischen Inseln und wird 1398 erstmals urkundlich als Osterende erwähnt (HOMEIER 1964). Die Abtrennung von Osterende als ehemaligem Teil der Insel Bülse ist nach HOMEIER (1964) den Katastrophenfluten im 14. Jahrhundert zuzuschreiben (Abb. 3). Durch die weitere Erosion der Insel Bülse und der damit verbundenen Sedimentumlagerung nach Osten vergrößerte sich Osterende, das später als Nordernigheooge und danach als Norderney bezeichnet wurde, immer mehr. Um 1750 ist Bülse nur noch eine vom Hochwasser überflutete Plate, deren Sockel ständig weiter aufgearbeitet wird.

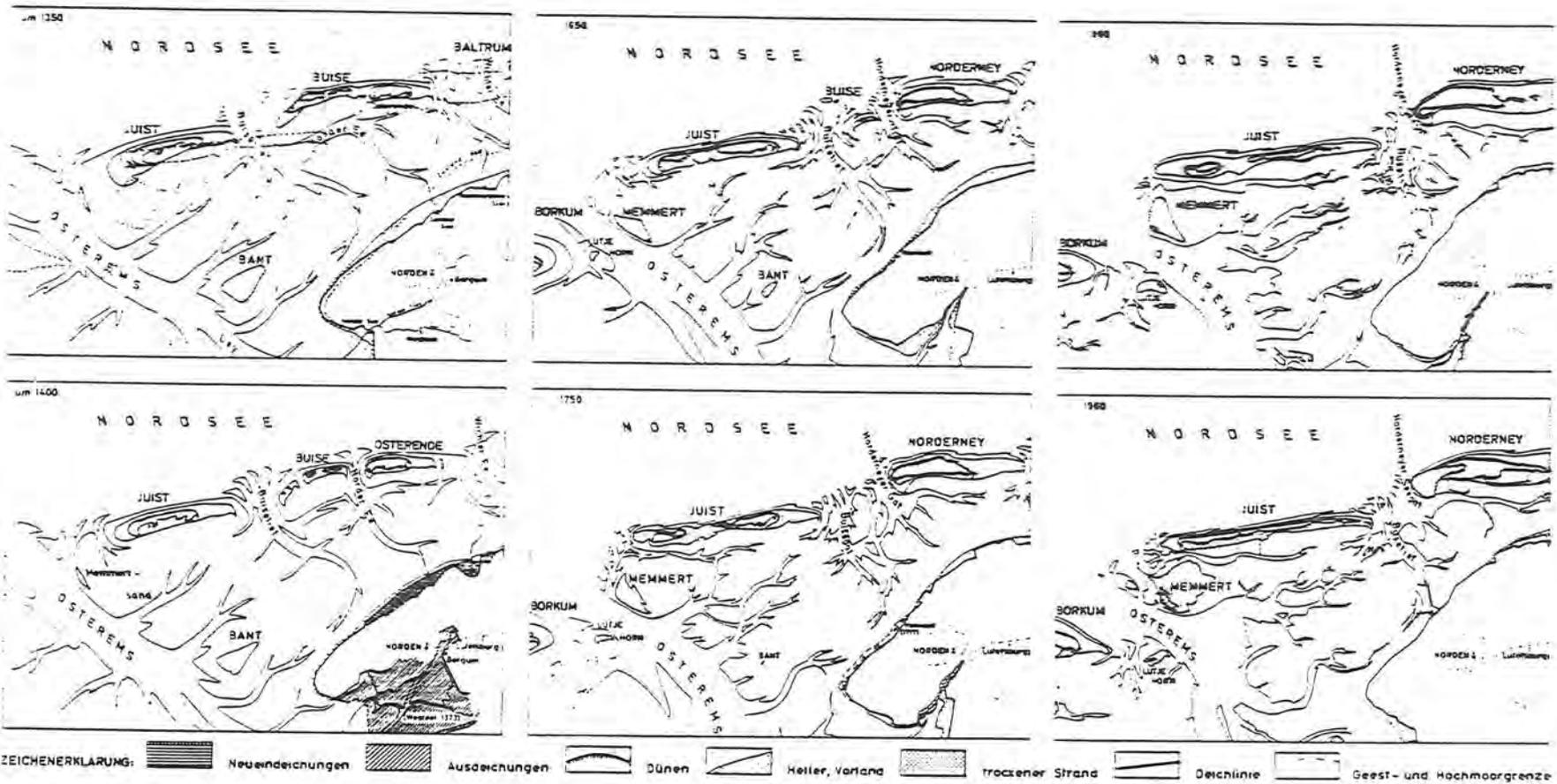


Abb. 3: Entwicklung der Küste, des Wattes und der Inseln zwischen Osterems und Wichter Ee (aus: FORNSCHNUNGSGRUPPE FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ 1970)

Das Bulsetief, das zwischen Juist und Bülse verlief, versandete zusehens und bildete sich östlich des Bülsekomplexes neu. Um 1860 sind die Überreste von Bülse weitestgehend verschwunden. Die zwei ursprünglich vorhandenen Seegaten, das Bulsetief und das Norderneyer Tief (Abb. 3), haben sich nun zu einem Seegat - dem Norderneyer Seegat - vereinigt. Die morphologisch-hydrologischen Vorgänge dieser Umgestaltung hat LUCK (1975, 1976) beschrieben.

2.2.2. Morphologische Gliederung

Auch heute noch unterliegt die Morphologie des Untersuchungsgebietes dauernden Änderungen, die durch die ständig wechselnden meteorologischen und hydrographischen Bedingungen und die damit verbundenen unterschiedlichen hydrodynamischen Einflüsse hervorgerufen werden. "Dieser Gestaltwandel wird aktiv bewirkt durch den überwiegend von Westen nach Osten versetzenden Gezeitenstrom, die in den Seegaten Nord/Süd gerichteten Strömungen, die zwischen Hoch- und Niedrigwasser im Gezeitenrhythmus wechselnden Wasserstände und die insbesondere bei Stürmen aus dem Nordwest-Sektor sehr starken Seegangerscheinungen mit ihren ostwärts gerichteten Brandungsströmungen sowie dem überwiegend nach Osten wirkenden Wind" (LUCK 1976: S. 21).

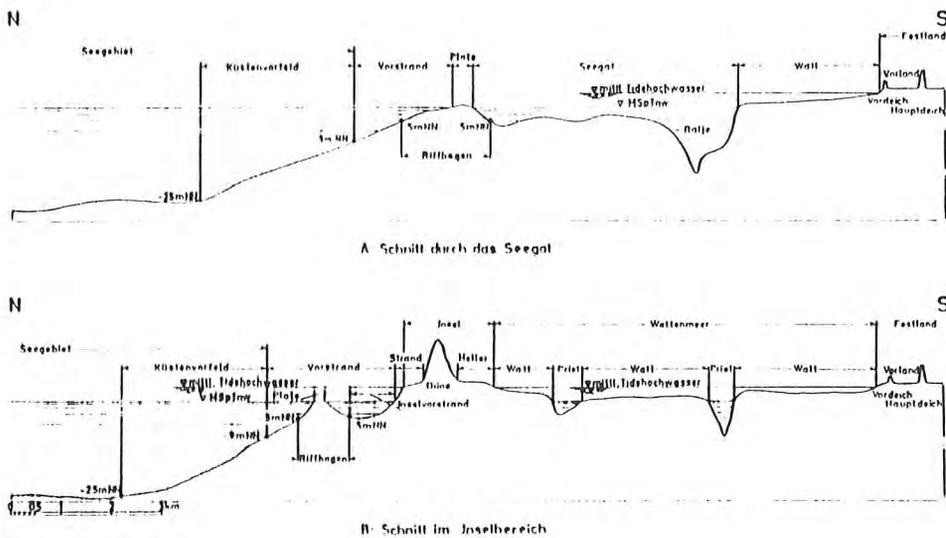


Abb. 4: Morphologische Querschnitte im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste - schematisch nach LÜDERS & LUCK (1976); aus: NIEMEYER (1986)

Das Arbeitsgebiet läßt sich morphologisch in verschiedene Bereiche gliedern. Deren Bezeichnungen und Abgrenzungen orientieren sich an den Definitionen von LÜDERS & LUCK (1976). NIEMEYER (1986) hat diese Bereiche schematisch in zwei Querschnitten dargestellt, anhand derer sich die einzelnen Gebiete gut voneinander abgrenzen lassen (Abb. 4). Die Bezeichnung "Seengebiet", die anhand dieser Abbildung das Küstenvorfeld und die nördlich vorgelagerten tiefen Bereiche der Nordsee umfaßt, soll jedoch in der vorliegenden Arbeit das gesamte, vom Schiff aus beprobte Untersuchungsgebiet beinhalten.

Von Norden ausgehend, läßt sich das Küstenvorfeld ausgliedern, das den Tiefenbereich zwischen NN -25 m und NN -9 m umfaßt. Dieser Abschnitt ist vor Norderney zwischen NN -9 m und NN -20 m nur gering morphologisch geprägt. Der tiefere Teil des Küstenvorfeldes jedoch ist durch NW-SE streichende Sandriffe charakterisiert, die nach REINECK (1979) bis zu 15 km lang sind. In der Seekarte des DEUTSCHEN HYDROGRAPHISCHEN INSTITUTS (DHI) Nr. 2900 (1981) wird dazu angemerkt, daß diese Riffe nicht stationär sind. Die Genese dieser Riffe ist noch nicht geklärt, jedoch ist bemerkenswert, daß sie die Richtung des Oldenburg-Ostfriesischen Geestrückens aufweisen und gegenüber ihrem Umfeld zumeist deutlich grobkörniger sind (DHI Karte Nr. 2900).

Oberhalb dieses Bereiches schließt sich nach Süden hin der Vorstrand bis zur Strandlinie (NN -2.0 m) an. Im Seegatbereich lassen sich darin der Riffbogen (oberhalb NN -5.0 m), der Inselvorstrand zwischen dem Riffbogen und dem Inselstrand, sowie die Platen (oberhalb NN -2.0 m) ausgliedern. Der morphologisch am deutlichsten hervortretende Teil des Vorstrands ist der Riffbogen.

Im kleinen Küstenoxkton wird der Begriff Riffbogen als "Bezeichnung für den nach See zu gewölbten Wanderweg der Riffe und Platen durch ein Seegat der Ostfriesischen Inselkette. Der durch Brandung und Strömung verursachte, von West nach Ost gerichtete Transport des Sandes entlang der Ostfriesischen Inselkette wird im Gebiet eines Seegats wegen der hier herrschenden Strömungsverhältnisse unterbrochen. Der Sand staut sich an der Westseite des Seegats und schließt sich zu Sandbänken zusammen, die dann das Seegat auf einer bogenförmigen Bahn umgehen. Im Bereich des Westendes der nächsten Insel landet die Sandbank an, und ihr Sand wird durch Brandung und Strömung nach Osten weiter verfrachtet. Am nächsten Seegat wiederholt sich der geschilderte Vorgang" (LÜDERS & LUCK 1976: S.154) definiert.

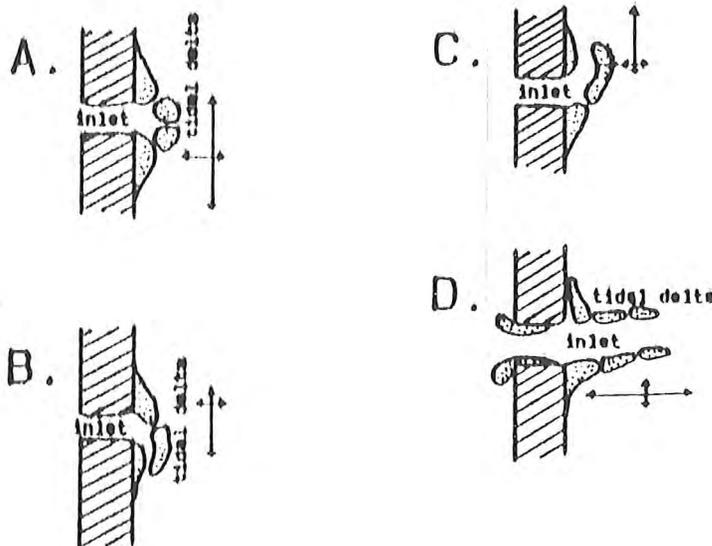


Abb. 5: Ausbildung von Ebbsstrom-orientierten Deltas in Abhängigkeit von den relativen Stärken der verschiedenen Strömungen (OERTEL 1975)

Zu dieser Definition ist jedoch zu bemerken, daß die Platen nicht als Ganzes wandern, sondern der Sand, aus dem die Plate aufgebaut ist, wird nach und nach umgelagert, wobei der Riffbogenquertransport gegenüber dem Riffbogenlängstransport deutlich überwiegt. Da für den Insel- und Küstenschutz der resultierende Ost - West gerichtete Längstransport jedoch von übergeordneter Bedeutung war, wurde er immer besonders herausgestellt. Nach HANISCH (1981) wird der Sand durch die Tideströmung vor allem rechtwinklig zum Riffbogen in das Seegat hinein- und wieder heraus transportiert. Bei diesem "Zig-Zag Transport" (HANISCH 1981) ergibt sich schließlich ein Nettosandtransport entlang des Riffbogens.

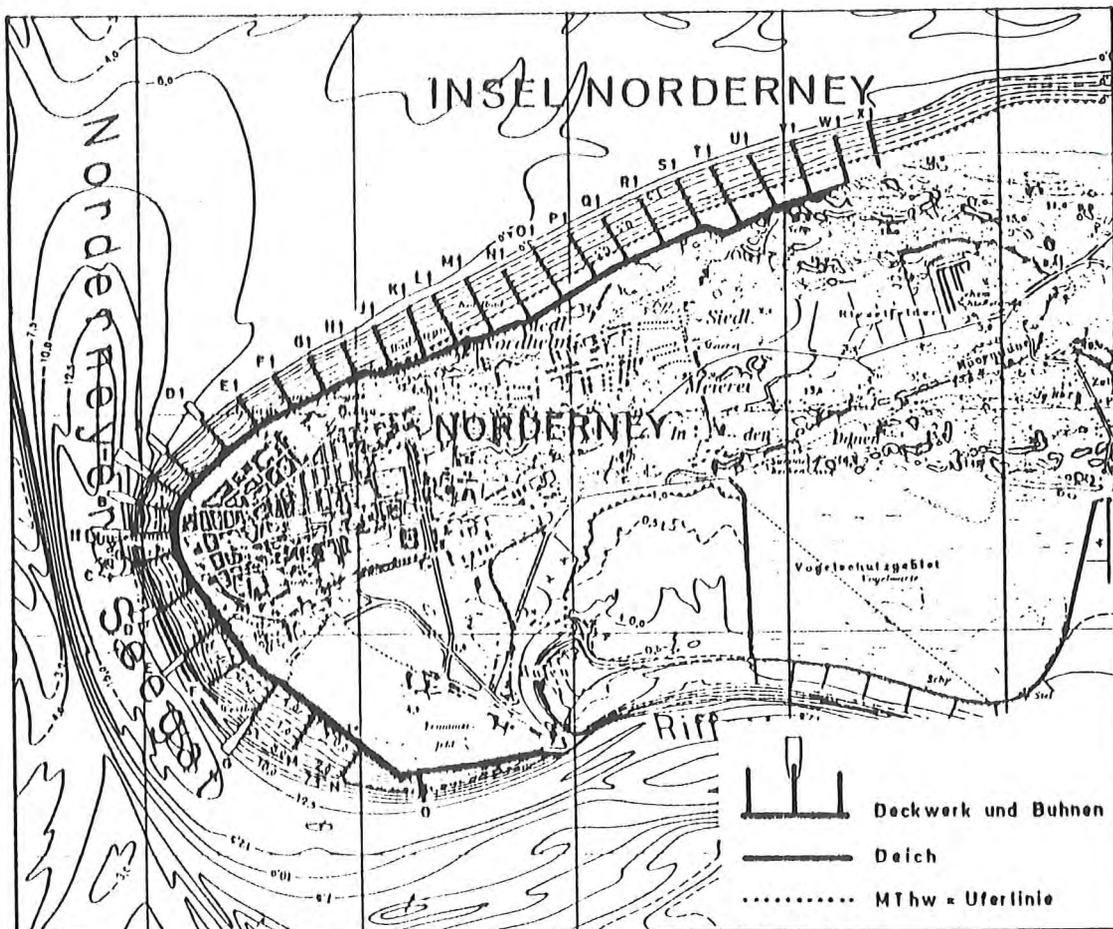


Abb. 6: Lageplan des Deckwerks und der Bühnen auf Norderney (aus: FORSCHUNGSTELLE FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ 1970)

Für VAN VEEN (1950) deutet der zur See gewölbte Riffbogen auf eine Ebbstromdominanz im Norderneyer Seegat hin. Diese Meinung vertreten auch OERTEL (1975, 1977) und NUMMEDAL & FISCHER (1978) und NUMMEDAL (1980). Weiterhin weist OERTEL (1975, 1977) darauf hin, daß die Form eines Ebbstrom-orientierten Riffbogens direkt die relativen Kräfte und Richtungen des wellen- und des tideerzeugten Sedimenttransportes widerspiegelt. "Dieses System von Platen und Rinnen kennzeichnet die Zone eines dynamischen Gleichgewichtes zwischen den Ebbströmungen des Seegats und den von See einschwingenden Wellen, deren Energie hier häufig durch Brandung umgewandelt wird. Die Asymmetrie des (Norderneyer) Riffbogen-Seegat-Systems steht zum einen in Einklang mit den

dominierenden Richtungen der Seegangsfortpflanzung entsprechend der langfristigen Windverteilung" (NIEMEYER 1986: S. 51). In Abb. 5 sind die verschiedenen Delta-Formen nach OERTEL (1975) schematisch dargestellt. Das Norderneyer Seegat läßt sich demnach dem Typ B zuordnen.

An den Vorstrandbereich schließt sich der Strand an, der sich in den nassen und den trockenen Strand untergliedern läßt. Der nasse Strand umfaßt den Bereich zwischen der Strandlinie und dem mittleren Tidehochwasser (MThw, Norderney: NN + 1.1 m). Der trockene Strand erstreckt sich oberhalb der MThw-Linie bis zum Dünenfuß.

Der größte Teil des untersuchten Strandbereichs ist durch Deckwerke und Buhnen geschützt. Mit dem Bau dieser Schutzwerke am Norderneyer Strand wurde 1857 begonnen, da Strand- und Dünenverluste durch die West-Ost-Verlagerung der tiefen Seegatrinne bedrohlich zugenommen hatten. Heute weist Norderney ein 6,35 km langes Deckwerk mit 32 Buhnen auf, das den Weststrand und den Nordstrand bis zum Platananlandungsbereich in Höhe der Weißen Düne schützt (Abb. 6).

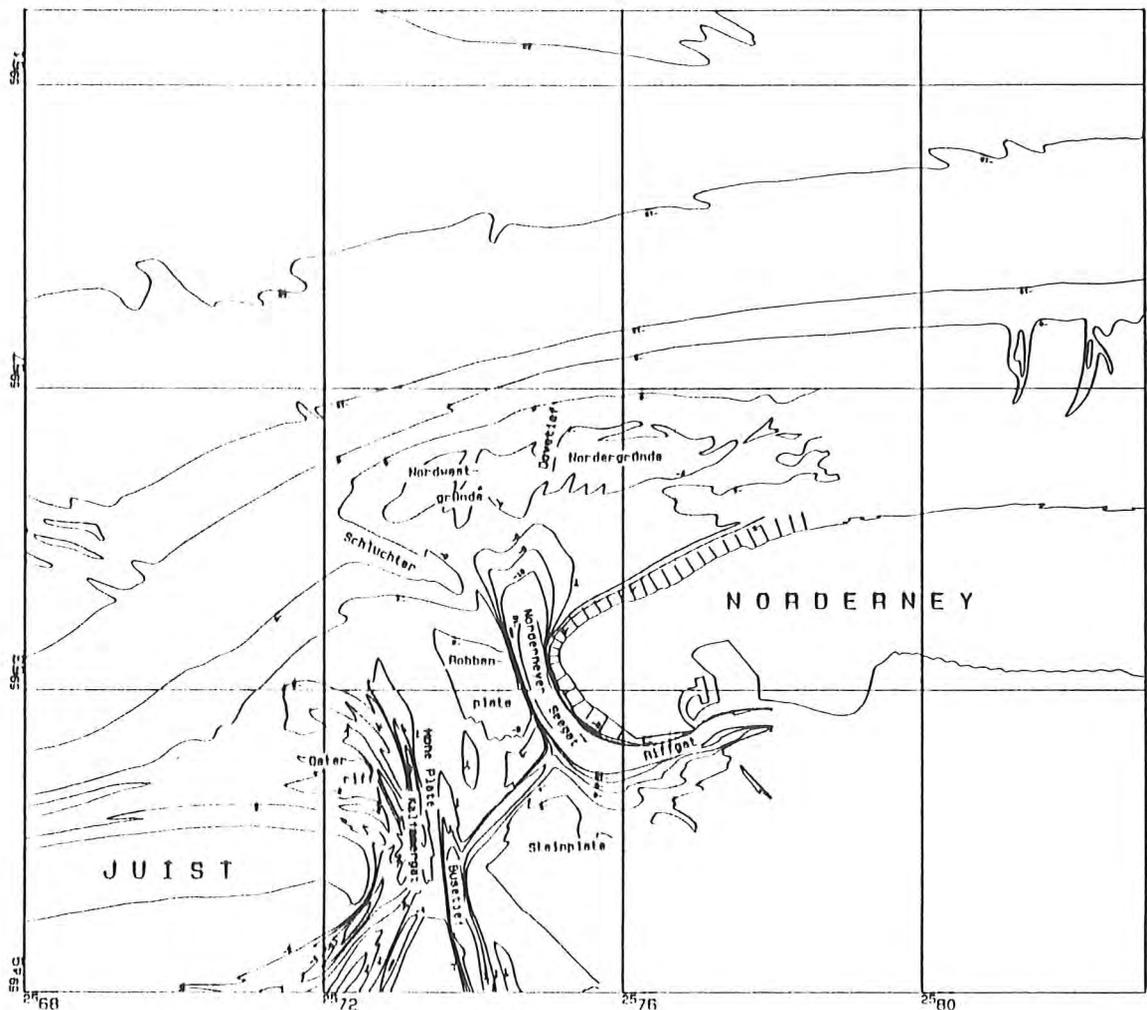


Abb. 7: Übersicht über die Lage der morphologischen Großformen im Untersuchungsgebiet

Die Inseln mit ihren Dünen sind die im Untersuchungsgebiet am stärksten morphologisch geprägten Bereiche. Sie sind "Elemente eines aus Küstensand bestehenden Barriersystems, das sich in

unterschiedlichen Ablagerungsformen am seeselligen Rand der südlichen Nordseeküste von Belgien bis zur Spitze Jütlands hinzieht. Aus erdgeschichtlicher Sicht dürfen die derzeitige Küstenlinie und der heutige Formenschatz der Sedimente im Küstenraum nicht als stabiler Endzustand aufgefaßt werden. Vielmehr sind sie Ausdruck eines temporären, aber labilen Gleichgewichtszustandes, der sich zwischen dem Sandangebot, dem Meeresspiegelstand und den morphodynamisch wirksamen Einflüssen von Tide, Seegang, Brandung und Wind eingestellt hat" (STREIF 1986: S. 29).

Die Bezeichnungen und die Lage der verschiedenen Platen und Rinnen im Untersuchungsgebiet, wie z. B. Buseloff und Robbenplate, sind aus der Abbildung 7 zu entnehmen.

3. Die Geologie des Untersuchungsgebietes

3.1. Präquartär

Das Nordseebecken unterliegt schon seit dem Kambrium bis heute einer komplexen geologischen Entwicklung. Innerhalb der es während der verschiedenen Orogenesen meistens Teil einer Geosynklinale war. Nach ZIEGLER & LOUWERENS (1979) erreichen die Sedimente dieses Beckens eine Mächtigkeit bis zu 9 km. Der präquartäre Aufbau von Norderney ist durch eine Tiefbohrung belegt worden und in Abb. 8 dargestellt. Die Auffaltung der tertiären und oberkretazischen Schichten sind auf halokinetische Prozesse des Norderneyer Salzstockes zurückzuführen.

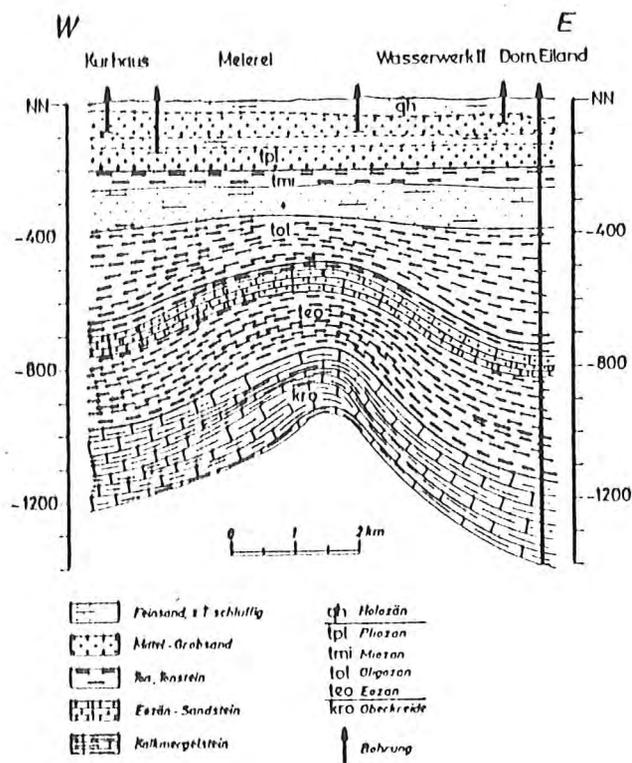


Abb. 8: Geologischer Schnitt durch Norderney (GERIARDY 1979)

Da die präquartären Sedimente für diese Untersuchung keine Bedeutung haben, sei auf eine Beschreibung verzichtet und auf die Arbeiten von HEYBROEK et al. (1967), SINDOWSKI (1973), ZIEGLER, P. (1975 a,b), ZIEGLER, W. (1975), GERHARDY (1979), ZIEGLER & LOUWERENS (1979) und STREIF (1990) verwiesen.

3.2. Quartär

Der quartäre Aufbau des Ostfriesischen Insel- und Wattgebiets ist durch ein umfangreiches Bohrprogramm aus den 40er und 50er Jahren dieses Jahrhunderts recht gut bekannt (DECHEND 1951, 1952, SINDOWSKI 1957, 1960, REINHARDT 1958). Während des Pleistozäns sind im Arbeitsgebiet vorsaalezeitliche Flußabsätze, Vorschütsande und Moränen des Saaleglazials, Interglaziale Eemsedimente sowie frühweichselglaziale bis postglaziale Flugsande abgesetzt worden (WILDVANG 1938, SINDOWSKI 1960). Gegen Ende des Pleistozäns läßt sich der Ostfriesische Küstenraum als ein leicht nach Norden einfallender Geestrücken beschreiben, der durch mehrere, im Pleistozän bis frühem Holozän angelegte Rinnen geprägt ist (Abb. 9).

Diese zumelst Süd - Nord orientierten Rinnen dienten zunächst zur Entwässerung der Geest, während sie im Verlaufe des Holozäns vom anstehenden Meer zum Vorstoß in den Ostfriesischen Geestrücken genutzt wurden. "Die Einflutungen der Holozänbasalfläche sind zu unterschiedlichen Zeiten und durch verschiedenartige Prozesse entstanden. Zum überwiegenden Teil handelt es sich um "ertrunkene" Flußtäler. Der Vorstoß der Nordsee ist örtlich so ruhig verlaufen, daß basale Torfe einen Teil dieser ehemaligen Hohlformen an der Sohle auskleiden. In anderen Bereichen haben Tideströmungen die Morphologie stärker umgestellt, und der Zusammenhang zwischen alt angelegten fluvialen Entwässerungssystemen und jungen Gezeitenrinnen ist weniger deutlich. In einigen Arealen, so zum Beispiel unter dem Mittelteil von Norderney, ist die Morphologie der Holozänbasis ausschließlich durch Brandungs- und Gezeitenerosion geprägt worden" (STREIF 1986: S. 31).

Das Holozän baut sich im wesentlichen aus marinen, brackischen und fluvialen Sedimenten auf, in die im Watt- und Marschgebiet Torfe eingelagert sind. Einen schematischen Schnitt der holozänen Sedimentverteilung im Ostfriesischen Küstengebiet hat STREIF (1986) erarbeitet (Abb. 10).

Die Holozänmächtigkeit beträgt im Inselvorfeld in der Regel weniger als 5 m, während sie unter den Inseln zwischen 5 und 35 m erreichen kann. Im Watten- und Marschenbereich liegen die größten Mächtigkeiten im seewärtigen Teil und laufen zur Geest hin aus (Abb. 10).

Die Ostfriesischen Inseln sind im allgemeinen an pleistozäne Hochlagen gekoppelt. Im Untergrund von Juist befindet sich die Hochlage unter dem westlichen Teil der Insel, während Norderney zwei pleistozäne Aufragungen aufweist, wovon eine unter dem Westkopf der Insel und die andere unter dem östlichen Inselende vorkommt (Abb. 11).

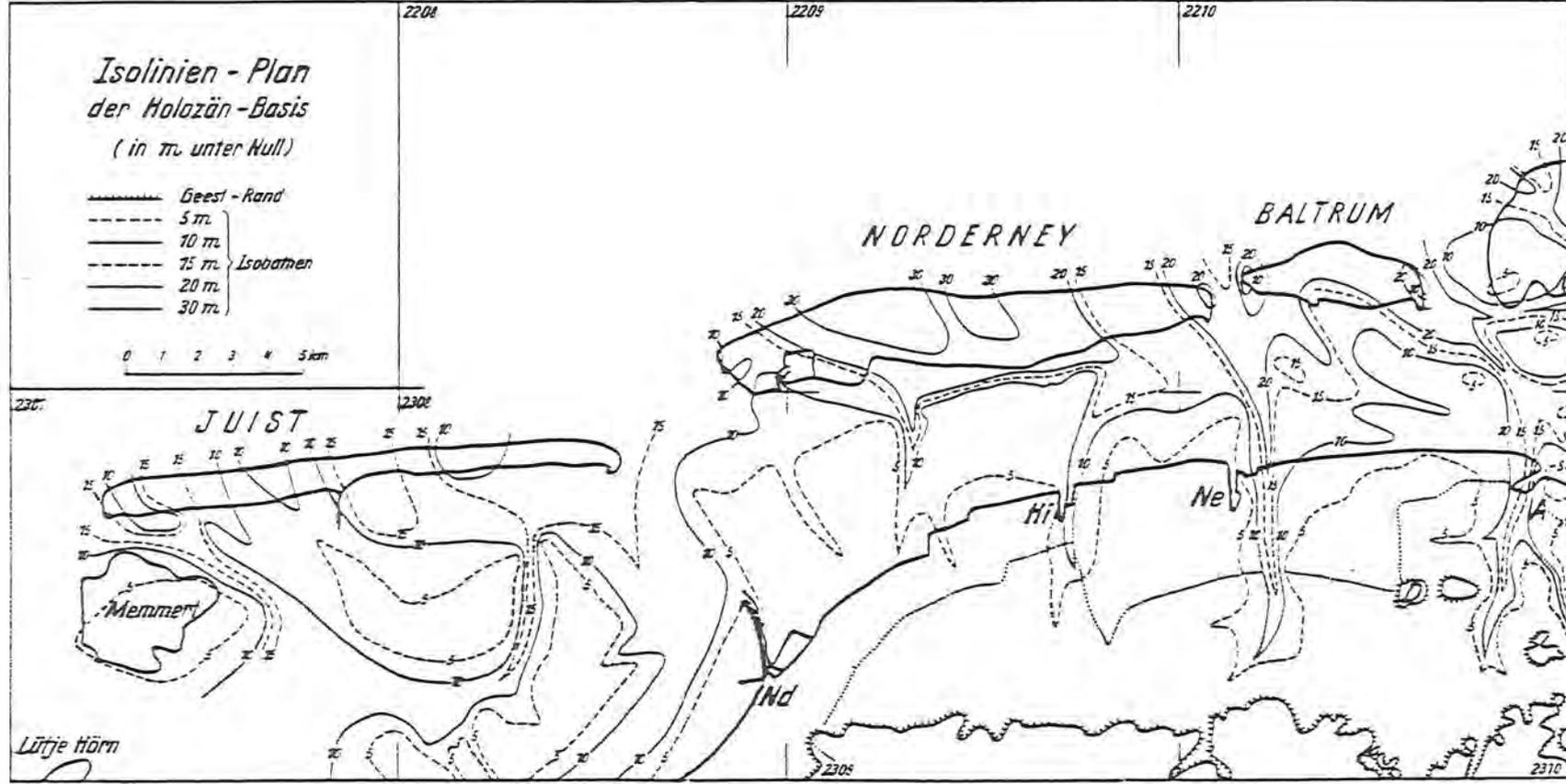


Abb. 9:
Isolinien Plan der Holozän-Basis (aus: SINDOWSKI 1973); Nd = Norddeich, Hi = Hilgenriederdiel,
Ne = Nassmerdiel, A = Accumerdiel

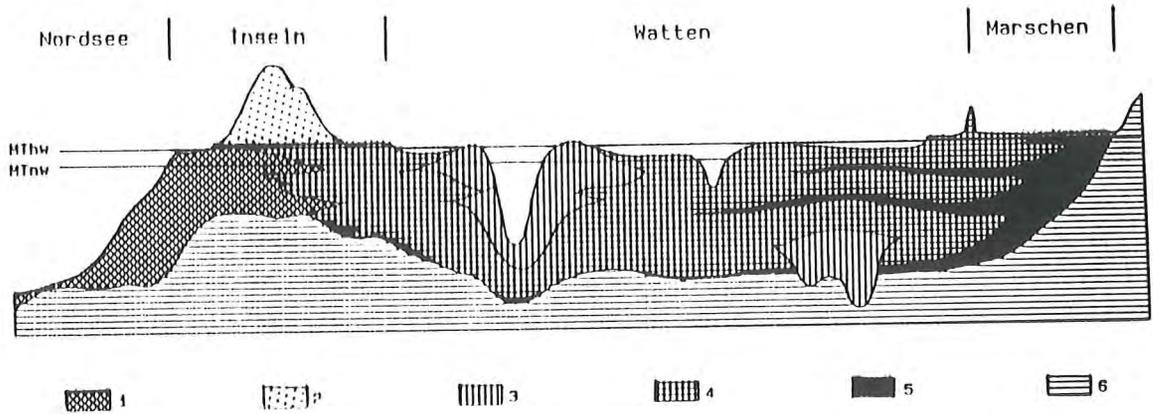
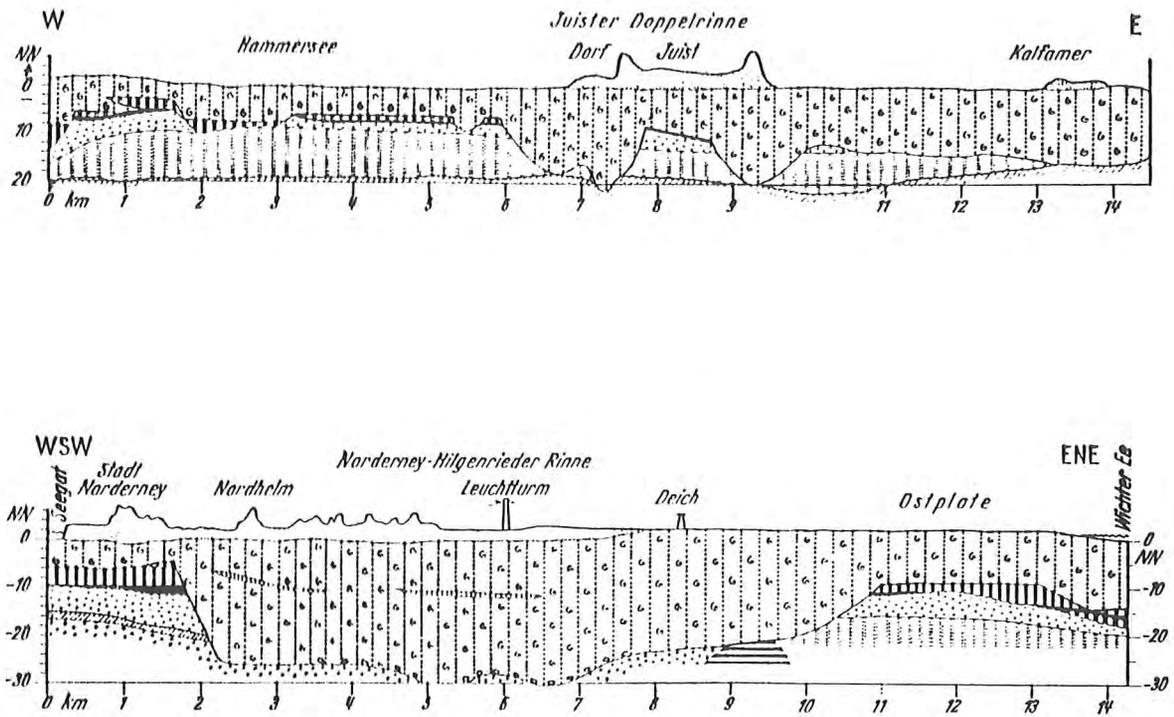


Abb. 10: Schematischer Schnitt von der Nordsee bis zum Geeststrand (aus: STREIF 1986). 1: Marin-litorale Sande, 2: Dünen, 3: Wattinnen-Sedimente, 4: Wattsedimente ungeschichtet, 5: Torf, 6: Pleistozän ungeschichtet

Nach SINDOWSKI "liegt Norderney mit ihrem Westende auf dem Sockel des ehemaligen Osterendes von Bülse und mit ihrem Ostende auf dem Sockel des zurückgewichenen Westendes der einstigen Großinsel Baltrum" (SINDOWSKI 1973: S. 68). Zwischen diesen beiden Geestkernen erstreckt sich die sog. Norderney-Hilgenrieder Rinne, von der DECHEND (1951) vermutet, daß es sich bei dieser Rinne um die alte Wichter Ee handelt, die damals zwischen Bülse und Baltrum verlief. Für den im Untergrund von Norderney liegenden Teil der Norderney-Hilgenrieder Rinne beschrieb DECHEND (1952) die Sedimentabfolge Präeem - fluviales Eem - marines Eem - Holozän und folgerte daraus, daß die Ausräumung und die damit verbundene große Verbreiterung im nördlichen Teil dieser Rinne bereits im Eem erfolgt ist. Im Gegensatz dazu stehen jedoch die Arbeiten von WILDVANG (1936, 1938), SINDOWSKI (1973), GERHARDY et al. (1976) und STREIF (1990), die diese Abfolge über den glazifluvialen Sanden und die Ausräumung dieser Rinne in das Holozän stellen (Abb. 11).

Aus den geologischen Profilen und der Holozänbasiskarte ist zu sehen, daß die Inseln während des Nordseeanstiegs im Verlaufe des Holozäns das Stadium einer Geestkerninsel durchlaufen haben müssen. Rezenté Beispiele dieses Inselstadiums sind die Nordfriesischen Inseln. "Bei diesen Inseln ist um einen Kern aus verschiedenartigen Pleistozänsedimenten herum, in einem Areal und bis über das MThw-Niveau, marin-litorales und semiterrestrisches Holozän angelagert worden. Im ostfriesischen Raum wandelten sich die ursprünglichen Geestkerninseln im jüngeren Atlantikum und im Subboreal zu reinen Barriere-Inseln um" (STREIF 1986: S. 32). Diese Umwandlung erfolgte durch ständige Heranführung von Sanden während des Nordseeanstiegs, bei dem schließlich die pleistozänen Hochflächen, auf denen sich Torfe und Kleie abgelagert hatten, von diesen Sedimenten überdeckt wurden. Durch weitere Aufhöhung und äolischen Transport von Sanden konnten sich dann auf diesen Platen die ersten Dünen bilden und das heutige Erscheinungsbild der Ostfriesischen Inseln formen.



- 1 [] Dünensande der Inseln
- 2 [] Wall- und Rinnensande mit Schill
- [] Klei-Lagen im Sand
- [] Gerölle bzw. Muscheln im Sand
- 3 [] Schlacksand
- 4 [] Prewsum - Klei
- 5 [] Midlum - Klei
- 6 [] Darum - Klei
- 7 [] Baltrum - Klei
- 8 [] Torfe
- 9 [] Brauner Sand
- 10 [] marines Eem
- 11 [] fluviales Eem
- 12 [] drenthestadialer Geschiebelehm
- 13 [] glazifluviale Sande (ungegliedert)
- 14 [] Lauenburger Ton

Abb. 11: Geologische Profile durch Juist und Norderney (aus: SINDOWSKI 1973)

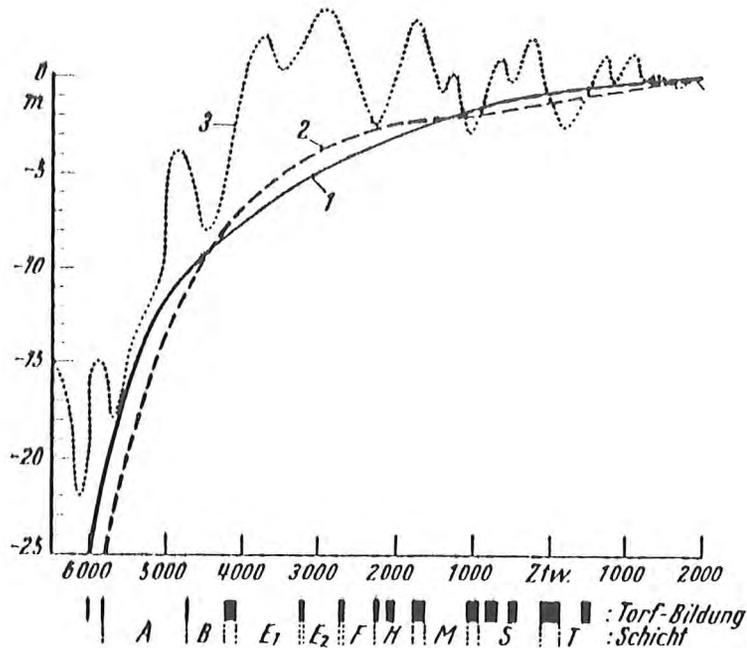


Abb. 12: Kurven des relativen Meeresspiegel-Anstieges im Holozän (nach SINDOWSKI 1973).
 1. Nordsee (JELGERSMA 1961), 2. Ostsee (KÖSTER 1960), 3. Weltmeere (FAIRBRIDGE 1961).
 Torfbildungszellen an der Nordseeküste nach GEYH (1969). Schichten: A = Accum, B = Bart, E1 = Eösch I, E2 = Eösch II, F = Fiel, H = Husum, M = Meldorf, S = Schwabstedt, T = Tönning

Der holozäne Meeresspiegelanstieg, der auch in der heutigen Zeit mit ca. 25 cm/Jahrhundert anhält, ist seit langem ein Objekt der Küstenforschung. Im Verlauf des Holozäns stieg der Meeresspiegel bis zu seinem heutigen Niveau um 110 m an (STREIF 1986), wobei die Ursache in einem "eustatischen Nordseespiegelanstieg infolge allmählicher Füllung des Nordseebeckens mit Schmelzwässern des wechsellagernden und skandinavischen Inlandsees und Kommunikation mit dem Weltmeerespiegel" zu sehen ist (SINDOWSKI 1973: S. 55). Der Ablauf dieses Anstiegs ist jedoch nicht kontinuierlich, sondern durch mehrfache Regressionsphasen gekennzeichnet (Abb. 12), in denen die Torfbildung begünstigt wurde (GEYH 1969). Mit dieser Transgression ist die Umformung der pleistozän-geformten Landschaft zur derzeitigen Küste verknüpft.

3.2.1. Pleistozän

Das ostfriesische Pleistozän weist im Durchschnitt eine Mächtigkeit von 70 - 90 m auf, wobei die Ablagerungen in Rinne und Senken aber auch bis zu 200 m erreichen können (SINDOWSKI 1973). Die allgemein gültige Schichtenfolge läßt sich nach o. g. Autor in der in Tabelle 1 aufgeführten Weise stratigraphisch gliedern.

Der lithologische Aufbau des Westkopfes von Norderney wurde mit den Bohrungen B27a und B29 erfaßt und von WILDVANG (1936, 1938) veröffentlicht (Tab. 2). Dieses "klassische Profil" hat die gesamte quartäre Abfolge einschließlich des jüngsten Tertiärs erschlossen.

Weichsel-Glazial	Flug- und Dünenande (unt. Brauner Sand), Talsande, Seeablagerungen, periglaziäre Bildungen.
Eem-Interglazial	Ablagerungen des Eem-Meeres nördlich der ostfriesischen Inseln, Niedermoor, limnisch-fluviatile Sedimente.
Warthe-Stadium	Periglaziäre Bildungen (Eiskeile, Solifluktion u. a.), Steinsohlen mit drenthestadialen Geschiebe-Inventar.
?	Interstadiale Ablagerungen nicht bekannt
Drenthe-Stadium	Örtlich Stauchmoränen-Bildung, Schmelzwassersande, Grundmoräne des Drenthe-Hauptvorstoßes, Vorschütttsande
Holstein-Interglaz.	Marine Sedimente des Holstein-Meeres nördlich der Ostfriesischen Inseln, Niedermoortorfe
Elster-Glazial	Lauenburger Ton, Schmelzwassersande, Geschiebemergel mit westskandinavischer Geschiebevormacht, Vorschütttsande
Prä-Glazial	Torfe von Hage und ähnliche Bildungen, Fluviatile Quarzsande und -kiese mit nordischen und südl. Komponenten (ob. Kaolinsande)
Pliozän (Tertiär)	Fluviatile Quarzsande und -kiese mit nordischen und südl. Komponenten (unt. Kaolinsande). Darin humose Schichten und Braunkohle der Reuver-Stufe und Kaolinton

Tab. 1: Stratigraphische Gliederung des ostfriesischen Pleistozäns (nach SINDOWSKI 1973 und WOLDSTEDT & DUPHORN 1974, verändert)

3.2.1.1. Präglazial

Das Präglazial des Altpleistozäns baut sich im wesentlichen aus Quarzsanden mit z. T. kaolinisierten Feldspäten (obere Kaolinsande) auf. Diese früher dem Pliozän zugerechneten Quarzsande (WILDVANG, 1938) sind teilweise schwach kiesig und weisen sowohl nordische Komponenten als auch Kieseleschiefer auf, die auf Zuflüsse aus dem SE hinweisen (WOLDSTEDT & DUPHORN 1974). Das Einzugsgebiet der Flüsse, die diese Sande sedimentierten, umfaßt nach o. g. Autoren den Raum zwischen den

Mittelgebirgen, dem Baltikum und Mittelschweden. Nach WILDEVANG (1938) stehen die oberen Kaolinsande am Weststrand von Norderney in einer Tiefe von NN -38.0 m (Tab. 1) an. Die Mächtigkeit dieser altpleistozänen Kaolinsande beträgt nach SINDOWSKI (1973) zwischen 20 und 60 m.

Tiefe in Meter bis		Höhe zu NN: — 0,68 m	
0,10	grauer, schwach kalkhaltiger Sand mit Muscheln	marines Alluvium	Landschaft 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60
0,40	grauer Seesand		
2,30	hellgrauer, mittelkörniger Sand mit Muscheln		
2,40	schmutziggrauer, kalkhaltiger, toniger Sand mit Muscheln		
3,40	desgleichen	Altalluvium	
4,20	dunkelgrauer, kalkhaltiger Ton		
4,60	Torf, darglg		
7,25	grauer, kalkhaltiger Ton		
8,05	schwarzer, stark zersetzter Torf	Diluvium	
8,40	humoser Sand		
11,40	desgleichen, mit Einfluß einer 2 cm starken grauen, tonigen Feinsandachticht		
12,00	grauer Feinsand		
14,00	desgleichen, doch heller, darin wieder zwischen 13,60 bis 13,62 m eine dunkelgraue, humose Feinsandachticht		
15,60	schmutziggrauer Feinsand		
15,80	sandiger Geschiebelehm mit zahlreichen nußgroßen Geschieben		
18,10	grauer, etwas feiner Sand mit vereinzelt kleinen (noch Grundmoräne?)		
21,00	desgleichen, doch etwas dunkler		
27,40	hellgrauer, fein- bis mittelkörniger Sand		
29,00	dasselbe mit einigen Quarz- und Feuersteineinschlüssen	Pliozän (Tertiar)	
32,50	grauer, mittelkörniger Sand		
36,90	grauer, ziemlich grobkörniger Sand mit einzelnen kleinen und kleinen Steinchen		
37,40	dasselbe, doch etwas feiner und ohne Steinchen		
40,10	sandiger Kies mit einem 2 cm langen Braunkohleholz, mattpollertem Kieselchiefer, Quarzen und verkleinerten Silurkalken		
46,00	kiesiger Sand ohne besondere Einschlüsse		
46,20	sandiger Kies, achichtweise mit und ohne Steinchen		
47,50	kiesiger Sand		
49,40	grober Kies mit Steinchen und kiesiger Sand		
60,40	mittelkörniger und kiesiger Sand mit Steinchen		

Tab. 2: Profil der Bohrungen B27a und B29 (aus: WILDEVANG 1938)

3.2.1.2. Elster-Glazial

Das Elsterglazial Ostfrieslands umfaßt Vorschüttssande, Geschiebemergel, Schmelzwassersande sowie Beckentone, den sog. Lauenburger Ton. Diese Abfolge ist bei normaler Ausbildung 20-50 m mächtig und kann in schmalen N-S-streichenden Ton-Trögen bis 150 m erreichen (SINDOWSKI 1973). Im Bereich des Untersuchungsgebiets ist dieser glaziale Zyklus nicht vollständig ausgebildet. Eine elsterzeitliche Grundmoräne ist nicht vorhanden, wodurch sich die Untergliederung der im Untersuchungsgebiet anstehenden Sande als sehr schwierig erweist. Die in der Bohrung 27a (Tab. 1) zwischen der drenthestadlalen Grundmoräne und dem Pliozän anstehenden, ca. 20 m mächtigen Sande können elsterzeitliche Vorschütt- und Schmelzwassersande und drenthestadlale Vorschüttssande enthalten. Die bisherigen Bearbeiter (WILDEVANG (1936, 1938), DECHEND (1951, 1954), SINDOWSKI (1973), STREIF & SCHUBERT (1988)) machten zur genaueren stratigraphischen Stellung dieser Sedimente keinerlei Angaben. Da nach SINDOWSKI (1973) die drenthestadlalen Vorschüttssande nur gering mächtig sind bzw. gänzlich fehlen, ist zu vermuten, daß dieser Sandkomplex ins Elsterglazial zu stellen ist. Ein weiteres Indiz liefert die Bohrung "Haus Waterkant" am Nordweststrand von Norderney, in der unter dem drenthostadlalen Geschiebemergel Lauenburger Ton in einer Mächtigkeit von 2 m

erbohrt wurde. Es ist aber auch möglich, daß an dieser Stelle der Lauenburger Ton als Scholle vom drenthestadialen Eis eingestaucht wurde.

Die pleistozänen Sande sind im oberen Teil mittelsandige Felsande und im unteren Teil feinsandige Mittelsande (STREIF & SCHUBERT 1988).

3.2.1.3. Holstein-Interglazial

Interstadiale Ablagerungen des Holstein-Meeres sind in Ostfriesland nicht vertreten. Ein einziges Vorkommen wurde 30 km nördlich von Borkum erbohrt (SINDOWSKI 1973).

3.2.1.4. Saale-Glazial

Das Saale-Glazial ist in Ostfriesland nur durch drenthestadiale Sedimente vertreten, da das Gebiet während des Warthe-Stadiums nur periglazial beeinflusst wurde.

Drenthestadiale Vorschütsande sind vermutlich, wie oben angeführt, nicht vorhanden. Der Geschlebbemergel, der am Westkopf von Norderney in einer Höhe von ca. NN -15.0 m ansteht, weist nach STREIF & SCHUBERT (1988) eine Mächtigkeit zwischen 0.4 und 5.6 m auf (Mittel: 2.8 m). Der graue bis grau-grünliche Geschlebbemergel ist im Norderneyer Raum sehr sandig ausgebildet. Der Sandgehalt beträgt um 70 %, während der Schluff- und Tongehalt zwischen 15 und 20 % schwankt. Nach DECHEND (1951) nimmt der Sandgehalt von Borkum im Westen bis Wangerooge im Osten zu. Dadurch ist die Erosionsfestigkeit des Geschlebbemergels deutlich herabgesetzt, was in den abnehmenden Mächtigkeiten nach Osten hin zum Ausdruck kommt. Die stratigraphische Klassifizierung der Grundmoräne erfolgte durch eine Geschlebbezählung von K.D. MEYER, nach der sich die Geschlebe zu 46 % nordischem Kristallinmaterial, zu 17 % nordischen Sedimenten, zu 3 % nordischen Kalksteinen, zu 3 % Kreidekalksteinen und zu 31 % den Flinten zuordnen lassen (STREIF & SCHUBERT 1988) und eine drenthestadiale Einstufung wahrscheinlich machen. Oberflächlich steht die Grundmoräne in der tiefen Seegraben westlich von Norderney an. Nach Sturmfluten kann man Brocken dieses Geschlebbemergels am Strand finden, die aus der Seegraben auf den Strand hochtransportiert worden sind.

Die über der Grundmoräne folgenden Schmelzwassersande sind nach SINDOWSKI (1973) in Ostfriesland nur geringmächtig oder aber vollständig erodiert.

Warthestadiale Sedimente konnten im Untersuchungsgebiet nicht nachgewiesen werden, da Ostfriesland zu dieser Zeit zum Periglazialgebiet gehörte.

3.2.1.5. Eem-Interglazial

Die eemzeitlichen Sedimente sind im Ostfriesischen Raum weitverbreitet, da das Eem-Meer einen Höchststand von NN -7 m erreichte (DECHEND 1954, SINDOWSKI 1965) und eine ähnliche Ausdehnung wie die heutige Nordsee aufwies. Die Küste dieses Meeres war durch Buchten der wahrscheinlich drenthestadial angelegten Entwässerungsrinnen der Geest und durch hochliegende Geestrücken geprägt. Nach SINDOWSKI (1965) begann die Eemtransgression im Ostfriesischen

Küstengebiet als der Meeresspiegel auf NN -35 m angestiegen war. Die eemzeitlichen Ablagerungen lassen sich in marine, fluviale, limnisch-telmatische und äolische Sedimente unterteilen. Die im Verlaufe dieser Transgression abgelagerten marinen Sedimente wiederum werden in drei Faziesbereiche gegliedert. Im Gebiet der südlichen Nordsee tritt die kiesig-sandige Hochseefazies mit Arctica islandica auf. Weiter südlich, im Bereich der Inseln und des nördlichen Wattes kommt eine sandige Flachwasserausbildung mit Venerupis senescens vor, an die sich schließlich landwärts eine sandig-tonige Wattfazies anschließt (SINDOWSKI 1959, 1965, 1973, DECHEND 1950, 1951, BEHRE et al. 1979).

Im Bereich des Norddeyer Hafens stehen zwischen NN -14 m und NN -30 m eemzeitliche Sedimente an (DECHEND 1952). Bei diesen handelt es sich um graue bis grau-grüne Schluffe und Fehlsande, in die dünne Tonlagen eingeschaltet sind. Die fluvialen Sedimente des Eems, die aus grauen bis braunen Fein- bis Mittelsanden bestehen, finden sich nach DECHEND (1952) im Bereich der Norderdeyer-Hilgenfelder Rinne, wobei diese Sedimente von Süden nach Norden feiner werden und von marinem Eem überlagert werden. Die Basis dieser Abfolge bilden glazifluviale Sande.

Im Bereich der eemzeitlichen Küste haben sich Torfe des limnisch-telmatischen Faziesbereiches bilden können, die jedoch keine große Ausbreitung erreichten. Mit der Regression des Eem-Meeres konnten sich im ausgehenden Eem Flugsanddecken bilden, die den unteren Teil des Braunen Sandes bilden (DECHEND 1951, SINDOWSKI 1973).

3.2.1.6. Weichsel-Glazial

Wie schon während des Warthe-Stadiums gehörte Ostfriesland auch im Weichsel-Glazial zum Periglazialgebiet. Die vorherrschenden Sedimente lassen sich dem äolischen und limnischen Faziesbereich zuordnen und liegen in Form von Flugdecksanden und Torflagen vor. Dieser gesamte Komplex wird allgemein als Brauner Sand bezeichnet. Im westlichen Teil von Norderdeyer steht der Braune Sand ab einer Tiefe von NN -8.7 m an.

3.2.2. Holozän

Zu Beginn des Holozäns befand sich die Nordseeküste 200-300 km weiter nordwestlich im Gebiet der Doggerbank (STREIF 1986). Die im Verlauf des Holozäns erfolgte Transgression der Nordsee in den Ostfriesischen Raum läßt sich in 10 Transgressionsphasen untergliedern (Tab. 3).

Die Sedimente des Holozäns lassen sich einerseits einem terrestrischen und andererseits einem marinen Faziesbereich zuordnen. Die marine Fazies ist wiederum in einen marinen Normaltyp und einen lagunären Verlandungstyp zu untergliedern (STREIF 1971, 1990, SINDOWSKI 1973). Der Normaltyp einer Ingressionsfolge zeichnet sich durch zunehmende Korngrößen von der Basis bis zur Mitte der Abfolge aus, an die nach oben hin sich verfeinernde Sedimente anschließen. Der lagunäre Verlandungstyp dagegen läßt sich wenig differenzieren, da er meist als durchwurzelter Kiehl auftritt.

Ingressions-Phasen (DEGEND 1957, W. MÜLLER 1962)	Schicht und Torfeinlagen	Schichten	Abschluß des Torfwachstums nach Geyh 1969 (— v. d. Ztw., + n. d. Ztw.)	relativer Nordseespiegel (m unter NN)	OVERBECK-Zonen	FIRBAS-Zonen	Abschnitte	Unterformation
lo4	Wyk (qhW)	Powsum (qhPe)		— 0				
lo3	Tönning (qhT)			— 0,05	XI	IX	Subatlantikum	
lo2	Torf		+ 150	— 0,8				Düнкirchen
lu2	Schwabstedt (qhS)	Midlum (qhMi)		— 1,8	X	IX		
	Torf		— 650	— 2,0				
lu1	Meldorf (qhM)			— 2,8	IX	VIII	Subboreal	
	Torf		— 1600	— 3,0				
m3B	Husum (qhH)	Dornum (qhDo)		— 3,6	IX	VIII		
	Torf		— 2300	— 3,8				
m3A	Piel (qhP)			— 4,8	IX	VII		
	Torf		— 2650	— 5,0				
m2B	Eesch II (qhE)			— 8,0	VIIIb	VII	Atlantikum	
	Torf		— 3150	— 8,5				Calais
m2A	Eesch I (qhE)			— 15,5	VIIIa	VI		
	Torf	Baltrum (qhBa)	— 4050	— 16,0				
m1	Barlt (qhB)			— 20,0	VIIIa	VI		
	Torf		— 5000					
a	Accum (qhA)						Boreal	
	Torf		— 6000		VII	V		

Tab. 3: Lithostratigraphische Gliederung des ostfriesischen Küstenholozäns (aus: SINDOWSKI 1973)

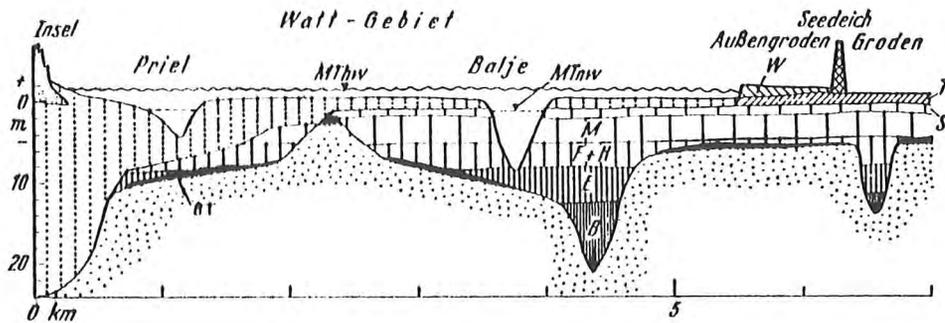


Abb. 13: Schnitt durch das Küstenholozän unter dem ostfriesischen Watt, Schicht-Abkürzungen s. Tab. 3, BT = Holozäner Basltorf (aus: SINDOWSKI 1973)

Zu Beginn der Meeresstransgression wurden nur die tiefsten Bereiche der Geestlandschaft vom Meer erreicht, so daß sich in Ostfriesland zumelst terrestrische Sedimente abgelagert haben.

Die obersten Teile der Flugsande des Braunen Sandes werden schon in das Präboreal gestellt; darauf haben sich im weiteren Verlauf des Holozäns Niedermoortorfe gebildet. Dieser Torf ist als "holozäner Basaltorf" bekannt und im Küstengebiet weitverbreitet. Nach GROHNE (1957) bestand die Vegetation aus Calluna-Heide mit Birken und Weiden oder aus Birkenwäldern. Das Alter dieser Torfe ist je nach ihrer Höhenlage verschieden. Nach SINDOWSKI (1973) ist der älteste Basaltorf im ostfriesischen Küstenraum ca. 6500-6000 v. Chr. alt und gehört somit ins Boreal.

Die marinen Sedimente sind zu Beginn des Holozäns auf die tiefsten Bereiche der Rinnen beschränkt und sehr feinkörnig. Im Verlaufe des Atlantikums wurden die zumelst pleistozän angelegten Rinnen mit den Ablagerungen der Baltrum-Schichten gefüllt. Gegen Ende des Atlantikums überflutete das Meer weite Teile der Geest und es kam auch außerhalb der Rinnen zu großflächiger Schlicksedimentation, die bis ins Subatlantikum anhält. Die Dornum- und Midlum-Schichten, die diese Sedimentationsphase repräsentieren, bestehen aus durchwurzelten Kleien der lagunären Fazies sowie tonig-schluffigen bis tonig-sandigen Sedimenten der normalen Wattfazies.

"Mit Beginn der Pewsum Schichten, die den Zeitraum nach der Zeltewende einnehmen, setzte allgemein die Sandsedimentation im ostfriesischen Wattgebiet ein" (SINDOWSKI 1973: S. 31). Diese Ablagerungen sind Fohnsande, die zum Teil stark schluffig ausgebildet sein können. Lagenweise sind sie auch schillführend.

Die auf Norderney in einer Tiefe von NN -8.6 m bis NN -8.1 m erbohrten Torfe (Tab. 1) wurden von WILDVANG (1936) pollenanalytisch in das frühe Atlantikum bis Atlantikum gestellt. Auch der im Untergrund von Julst in einer Tiefe von NN -7.7 m bis NN -6.8 m anstehende Torf weist nach o. g. Autor ein früh-atlantisches Alter auf.

Nach SINDOWSKI (1973) folgen auf den Basaltorf unter dem Norderneyer Westkopf tonige Dornum-Schichten, die von einem Erosionsrest der unteren Midlum-Schichten überlagert werden. Auf der östlichen pleistozänen Hochfläche von Norderney dagegen liegt der Basaltorf nicht direkt auf den pleistozänen Ablagerungen, sondern auf tonigen Baltrum-Schichten und wird von den Dornum-Schichten überlagert.

Die Midlum-Schichten sind dort während der Jungholozänen Transgression wieder erodiert worden, da die Dornum-Schichten von den feinsandigen Pewsum-Schichten überlagert werden. Die Pewsum-Schichten erreichen unter Norderney eine Mächtigkeit von bis zu 35 m.

4. Hydrographische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet

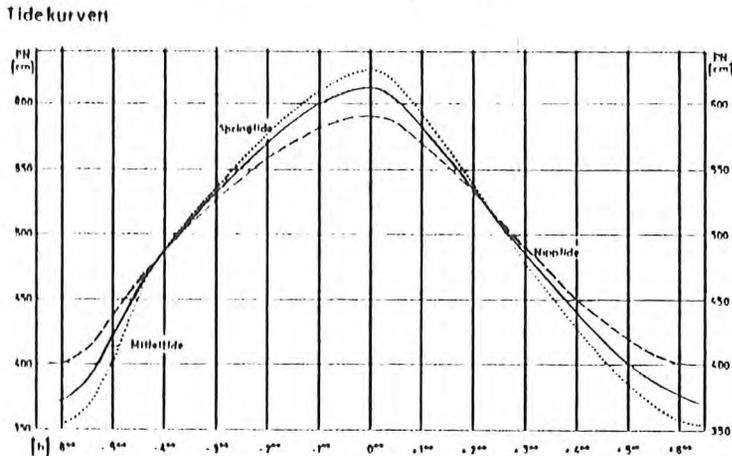
Die Tide- und seegangserzeugten Strömungen sind die Ursache der Umlagerungs- und Transportvorgänge im marinen Bereich und daher schon lange Forschungsobjekte der Küsten- und Meeresforschung. Das Norderneyer Seegebiet ist seit jeher das Hauptuntersuchungsgebiet der

hydrographischen Abteilung der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Wasser und Abfall, wodurch die Tide- und Seegangsverhältnisse in diesem Bereich recht gut bekannt sind.

4.1. Die tideerzeugten Strömungen

Die im Gezeitenrhythmus wechselnden Wasserstände sind die Ursache der Tideströmungen. Für den Pegel Norderney sind in der Abbildung 14 die Gezellengrundwerte zusammengestellt.

Untersuchungsergebnisse über die Tideströmungen im Norderneyer und Julster Seegebiet sind in zahlreichen Berichten und Veröffentlichungen der Forschungsstelle Küste dargestellt (SCHAUBERGER et al. 1950, KRAMER & BARDELMEIER 1954, KÖRITZ 1955, WALTHER 1969, LUCK 1976, KOCH & NIEMEYER 1978, NIEMEYER 1987). Die Tideströmungsverhältnisse im Norderneyer Seegat und im Kalfamergat sind von KOCH & NIEMEYER (1978) für unterschiedliche Wasserstands- und Windverhältnisse tabellarisch zusammengefaßt worden (Tab. 4).



Gezellenwerte 1952/71 bezogen auf PN

Hochwasser		Niedrigwasser		Stelgdauer	millere	Falldauer
MHw	610 cm	MNw	372 cm	5h 58m		6h 27m
MSpHw	625 cm	MSpNw	356 cm	5h 52m		6h 27m
MNpHw	590 cm	MNpNw	397 cm	6h 10m		6h 30m

Höchstes Tidehochwasser (HHHw)	912 cm	am 16. 2. 1962	Höchstes Tideniedrigwasser (HHNw)	680 cm	am 19. 10. 1935
Niedrigstes Tidehochwasser (NNHw)	344 cm	am 1. 11. 1920	Niedrigstes Tideniedrigwasser (NNNw)	161 cm	am 16. 2. 1900

Bezugskonstanten

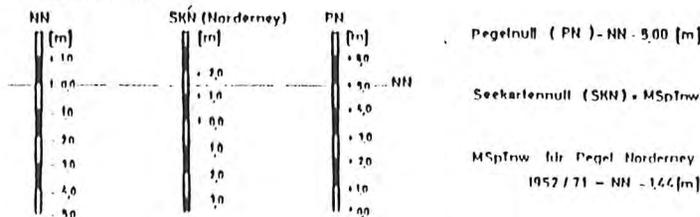


Abb. 14: Gezellengrundwerte des Pegels Norderney (aus: LUCK 1976)

Kennwerte der Strömungen im Norderneyer Seegat

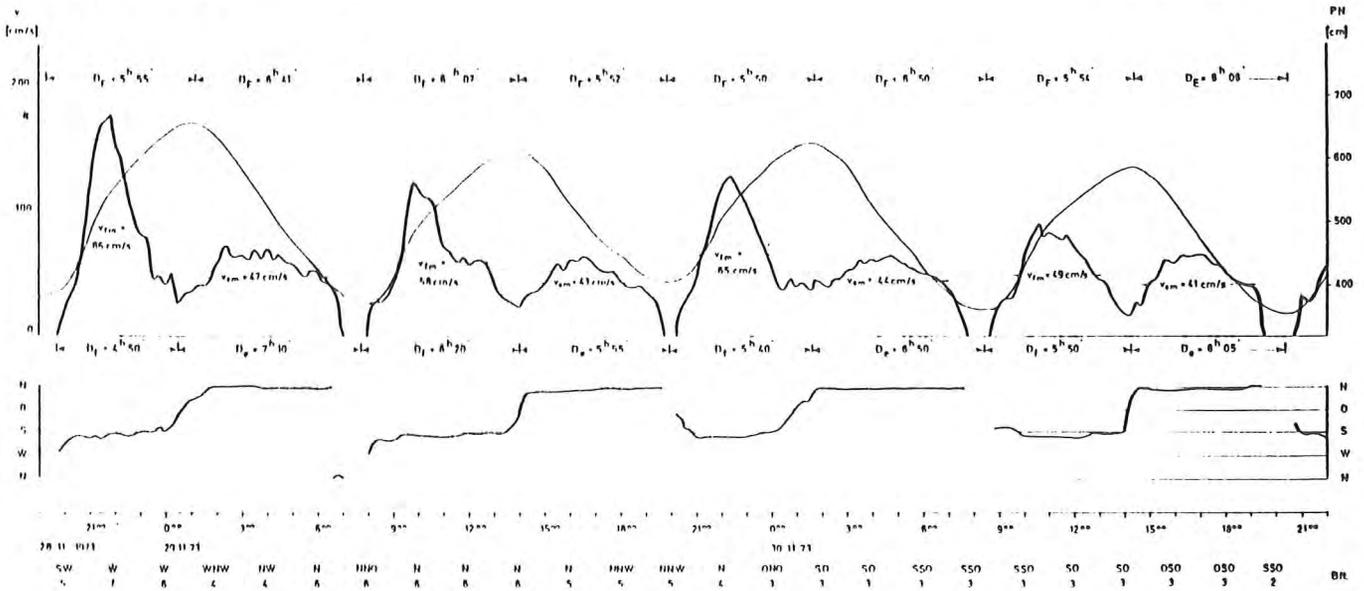
	v_{rms}	v_{max}	D_r	$\int v_r dt$	v_{cm}	v_{max}	D_o	$\int v_o dt$	$\int v_r dt : \int v_o dt$
	[cm/s]	[cm/s]	[h min]	[cm/s · s · 10 ⁻²]	[cm/s]	[cm/s]	[h min]	[cm/s · s · 10 ⁻²]	
Vortide									
Normaltide	80	141	4.30	1 267	93	159	8.00	2 644	1 : 2,09
Windflut	52	104	5.06	936	114	182	7.27	3 053	1 : 3,26
Sturmflut	53	71	4.39	886	107	162	8.06	3 132	1 : 3,58
Orkanflut	61	94	5.50	1 265	90	158	7.25	2 367	1 : 1,87
Hauptide									
Normaltide	75	127	6.00	1 597	70	119	6.10	1 525	1 : 0,96
Windflut	69	124	4.03	1 008	107	174	8.45	3 377	1 : 3,35
Sturmflut	-	-	-	-	133	198	13.00	6 228	1 : ∞
Orkanflut	84	132	3.20	980	120	196	9.45	4 165	1 : 4,25
1. Nachtide									
Normaltide	69	126	4.50	1 172	76	135	7.30	2 026	1 : 1,73
Windflut	75	134	3.30	943	102	165	8.24	3 074	1 : 3,26
Sturmflut	59	74	1.06	216	120	189	12.00	5 162	1 : 23,90
Orkanflut	52	75	2.10	393	111	169	10.10	4 017	1 : 10,22
2. Nachtide									
Normaltide	59	99	5.45	1 197	67	131	6.20	1 515	1 : 1,27
Windflut	57	87	5.54	1 217	91	136	6.42	2 189	1 : 1,80
Sturmflut	45	69	3.24	554	111	167	9.09	3 658	1 : 6,60
Orkanflut	57	93	4.55	995	73	126	6.40	1 720	1 : 1,73

Kennwerte der Strömungen im Kalfamergat

	v_{rms}	v_{max}	D_r	$\int v_r dt$	v_{cm}	v_{max}	D_o	$\int v_o dt$	$\int v_r dt : \int v_o dt$
	[cm/s]	[cm/s]	[h min]	[cm/s · s · 10 ⁻²]	[cm/s]	[cm/s]	[h min]	[cm/s · s · 10 ⁻²]	
Vortide									
Normaltide	86	174	4.50	1 468	47	72	7.10	1 202	1 : 0,82
Windflut	69	140	4.06	1 015	67	118	8.24	1 894	1 : 1,87
Sturmflut	54	86	2.30	490	68	130	8.30	2 081	1 : 4,25
Orkanflut	67	123	6.15	1 519	43	74	5.30	864	1 : 0,57
Hauptide									
Normaltide	58	121	6.20	1 304	43	63	5.55	892	1 : 0,68
Windflut	78	152	2.09	605	53	104	10.39	2 016	1 : 3,33
Sturmflut	12	26	1.57	86	54	98	11.21	2 196	1 : 25,42
Orkanflut	96	221	7.25	2 520	66	89	5.45	1 340	1 : 0,53
1. Nachtide									
Normaltide	65	125	5.40	1 309	44	62	6.50	1 061	1 : 0,81
Windflut	80	154	2.36	749	68	155	10.00	2 434	1 : 3,18
Sturmflut	13	34	1.12	58	55	108	11,54	2 376	1 : 41,25
Orkanflut	93	158	3.40	1 200	57	85	9.50	2 008	1 : 1,67
2. Nachtide									
Normaltide	49	87	5.50	1 012	41	63	6.05	889	1 : 0,88
Windflut	61	104	5.42	1 253	63	126	6.33	1 483	1 : 1,18
Sturmflut	32	64	5.09	590	59	100	7.15	1 534	1 : 2,60
Orkanflut	67	109	5.15	1 254	44	71	6.35	1 036	1 : 0,83

Strömungsverlauf und Wasserstände

Kalfamergal: Normalflut



Kalfamergal: Sturmflut

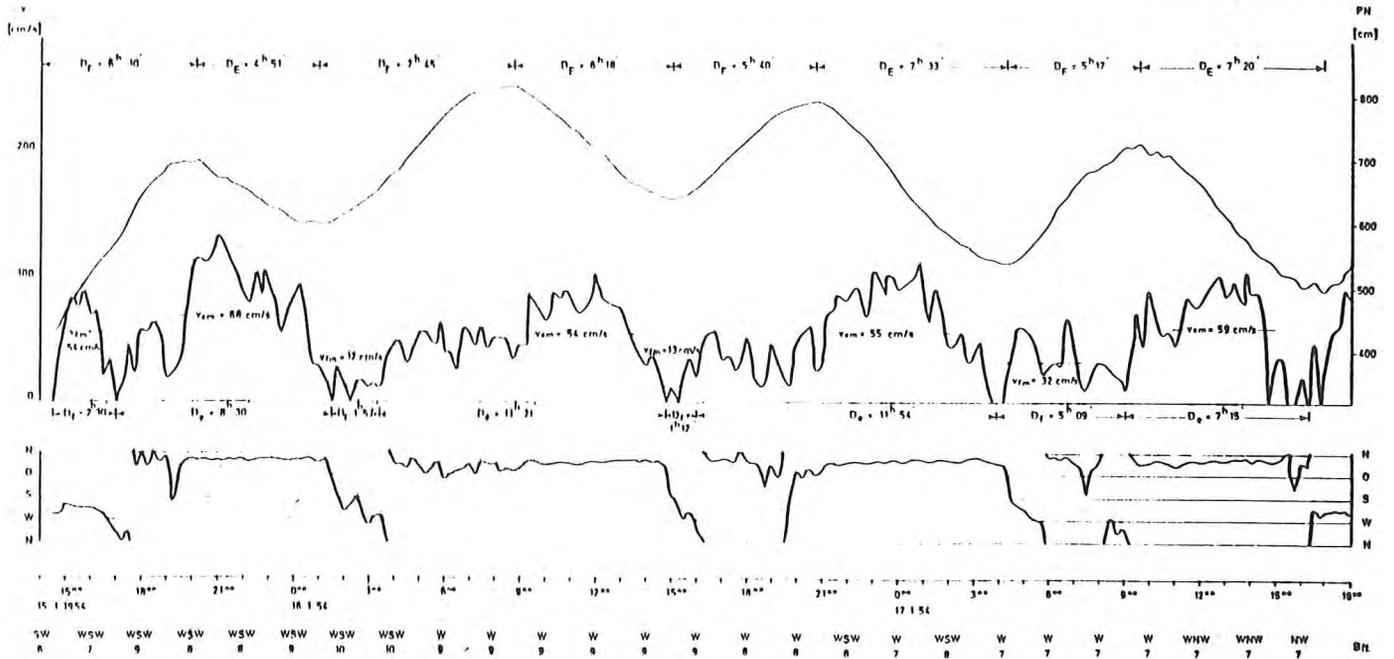
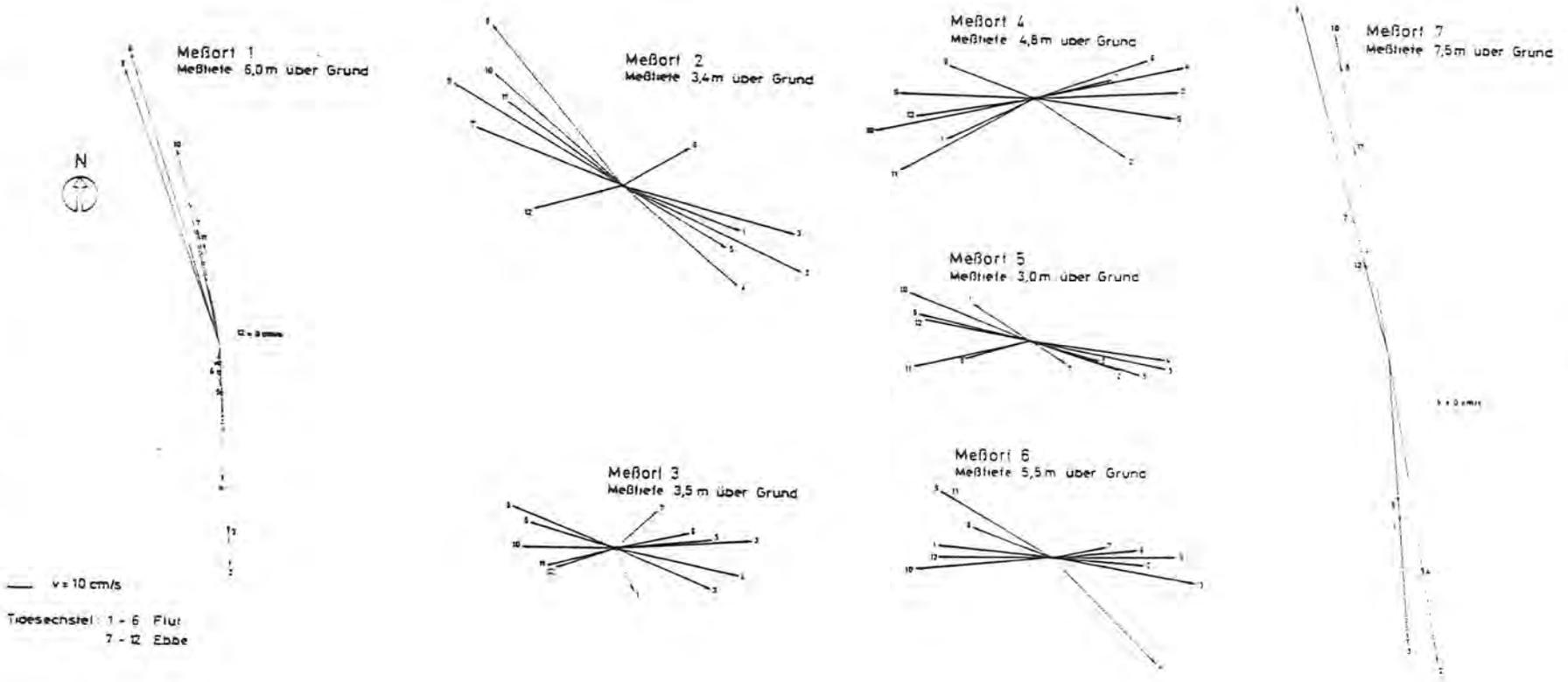


Abb. 16: Strömungsverlauf und Wasserstände im Kalfamergal (aus: KOCH & NIEMEYER 1978)

Abb. 18:

Tideströmosen im Seegat und Küstenvorfeld; Position der Meßorte 1 bis 7 vgl. Abb. 17
(aus: LUCK 1976)



TIDESTROMMESSUNGEN

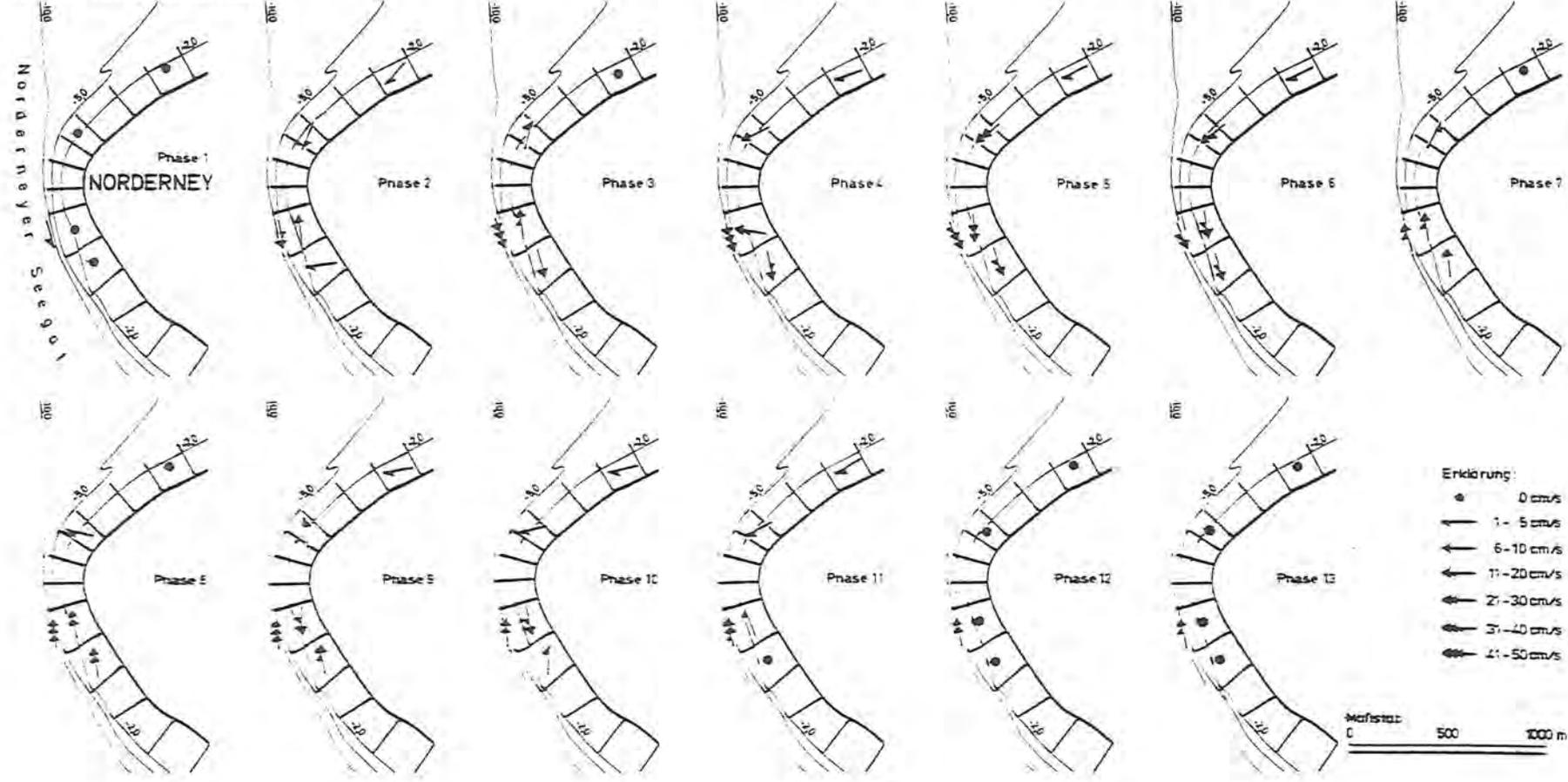


Abb. 19:

Mittlere Tidestromvektoren am Nordermayer Westkopf im Verlauf einer Tide; Phase 1 und 13 = Niedrigwasser, Phase 7 = Hochwasser (aus: NIEMEYER 1987)

In den letzten Jahren hat sich jedoch der Bereich zwischen Juist und Norderney morphologisch stark gewandelt. So bildete sich im nördlichen Teil des Kalfamergats ein deutlich ausgeprägtes, eigenständiges Ebbstromdelta aus. Dies ist auf Änderungen in den hydrographischen Randbedingungen begründet, wobei sich im angeführten Fall die Wirkung des Ebbstroms gegenüber der des Flutstrom vergrößert haben muß.

Die in der Tabelle 4 aufgeführten Werte sind daher jetzt nicht mehr unbedingt gültig, können jedoch einen Einblick in die gegenüber dem Seegat differierenden Tideverhältnisse geben.

Im Bereich der NN -10 m-Linie nördlich des Riffbogens (Meßpunkt 3 bis 6) sind TDESTROMMESSUNGEN von LUCK (1976) veröffentlicht worden (Abb. 17 und 18). Deutlich sind die ostgerichteten Flut- und westgerichteten Ebbströmungen voneinander zu trennen. Die Stromgeschwindigkeiten sind für beide Tidezustände in etwa gleichgroß.

Die Tideströmungen am Norderneyer Strand hat NIEMEYER (1987) untersucht. Die Stärke dieser Strömungen hängt stark von der Lage des Strandabschnitts bzw. des Bühnfelds zum Norderneyer Seegat ab. Während am Weststrand in unmittelbarer Nähe zum Seegat die mittleren Tidestromvektoren am nassen Strand bis 30 cm/s erreichen können und sich in ihrer Richtung zum Teil der Tidephase anpassen, treten am Nordweststrand nur gleichgerichtete mittlere Tidestromvektoren mit Geschwindigkeiten zwischen 0 und 5 cm/s auf (Abb. 19).

4.2. Die seegangserzeugten Strömungen

Die Erforschung der seegangs- und brandungserzeugten Strömungen im Norderneyer Seegebiet ist viel schwieriger als die der Tideströmungen. Dies beruht zum einen auf meßtechnischen Schwierigkeiten und zum anderen auf der Überlagerung der verschiedenen Strömungen (Orbital-, Brandungs-, Ripp-, Längs- und Tideströmungen). Die Ausbreitung und Verformung des Seegangs, der ja die Ursache dieser Strömungen darstellt, ist dagegen recht gut bekannt (NIEMEYER 1979a, 1979b, 1983, 1986).

Für das Norderneyer Seegebiet sind "Winde aus westlichen bis nordnordöstlichen Richtungen von besonderer Bedeutung, da in diesem Richtungsereich die längsten Windwirkwege über verhältnismäßig große Wassertiefen vorhanden sind" (Abb. 20). "Bei Winden aus diesen Richtungen tritt im Untersuchungsgebiet der stärkste Seegang auf, und zur Ausbildung von voll ausgereiftem Seegang ist selbst bei hohen Windgeschwindigkeiten nur eine Wirkdauer von wenigen Stunden erforderlich" (NIEMEYER 1979a: S. 57).

Für die Beschreibung der Veränderung einer von der offenen See auf einen Strand zulaufenden Welle ist eine Untergliederung des dabei durchlaufenen Gebietes notwendig. MUIR WOOD (1969) und LONGUET-HIGGINS (1972) unterscheiden:

1. den Tiefwasserbereich
2. den Refraktionsbereich

- 3. die Brandungszone
- 4. die Wellenaufflaufzone

Für diese einzelnen Bereiche hat NIEMEYER (1974) die verschiedenen Einflüsse auf die Ausbreitung einer Welle sowie ihre Wirkungen schematisch zusammengefaßt (Abb. 21).

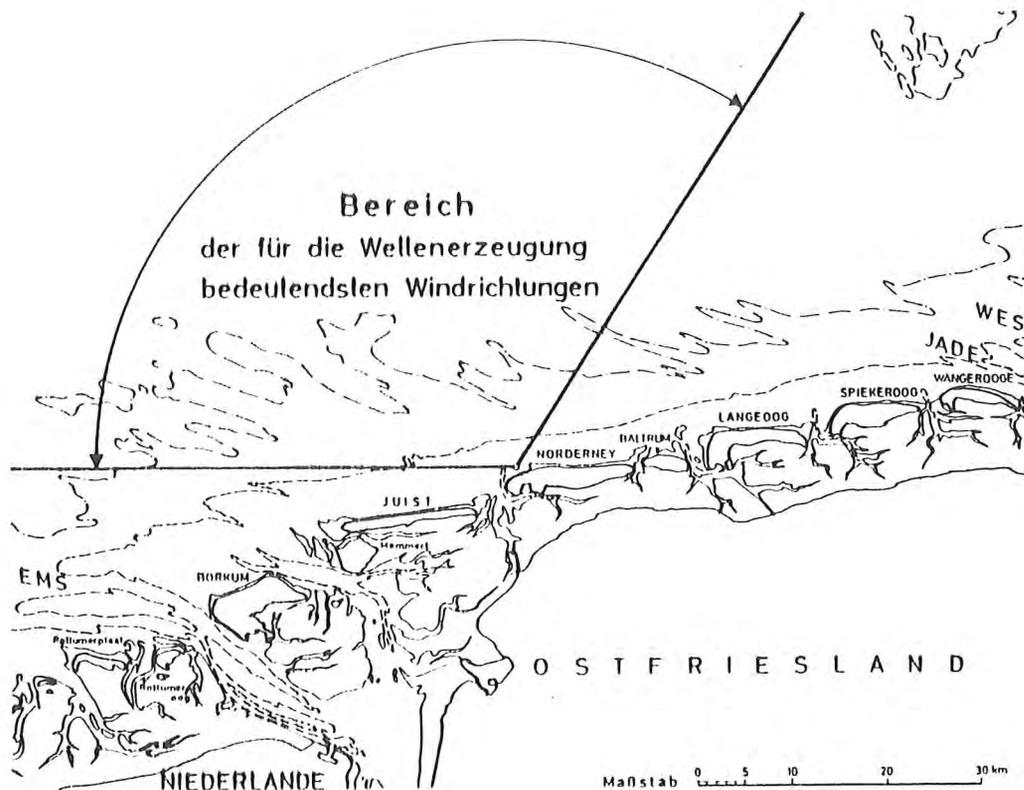


Abb. 20: Sektor der für die Seegangsentwicklung bedeutendsten Windrichtungen (aus: NIEMEYER 1979a)

Der Tiefwasserbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß sich hier die Wellen ungestört fortsetzen können. Dabei hängt die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit ausschließlich von der Tiefwasserwellenlänge ab.

Die von der offenen See her einschwingenden, wind erzeugten Wellen erfahren ab einem Verhältnis der Wassertiefe zur Tiefwasserwellenlänge von:

$$h/L_0 < 0.5$$

h = Wassertiefe

L_0 = Tiefwasserwellenlänge

Bodenberührung, wodurch die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit gebremst wird (Sohlrreibung), während die in tieferem Wasser laufenden Teile der Wellenkämme ihre höhere Geschwindigkeit beibehalten. Die damit verbundene Beugung der Wellenkämme wird als Refraktion bezeichnet.

"Die Wellenkämme haben die Tendenz, sich bis zum Erreichen der Brandungszone den Tiefenlinien des Unterwasserstrandes anzugleichen, wodurch der Angriffswinkel der Welle mit der Tendenz zu senkrechtem Wellenangriff ständig verkleinert wird" (NIEMEYER 1974: S. 131), (Abb. 22).

Bei Grundberührung wird die Welle durch Sohlreibung, Shoaling und Perkolation verformt. Als Shoaling wird die Einengung des Schwingungsraumes einer Welle bezeichnet, während unter der Perkolation das Eindringen der Orbitalbahnen in eine durchlässige Sohle unter gleichzeitiger Verminderung der Orbitalgeschwindigkeiten durch das Sediment zu verstehen ist.

Durch die Sohlreibung und Perkolation wird die Wellenenergie verringert. Dies zeigt sich in einer Abnahme der Wellenhöhe. Überlagert wird dieser Vorgang durch das Shoaling, das sich in einem Aufstellen der Welle bemerkbar macht und wodurch die Orbitalgeschwindigkeiten der Wasserteilchen mit auflaufender Welle in ihrem Wellenberg zunehmen, während sie im Wellental abnehmen. Aus diesen unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Wasserteilchen ergibt sich ein Massentransport von Wasser in Wellenfortschrittsrichtung. Da aber nicht unbegrenzt zusätzliche Wassermassen in einen Strandbereich eingebracht werden können, bildet sich zum Ausgleich der Massenbilanz eine Rückströmung in mittlerer Wassertiefe aus (Abb. 23).

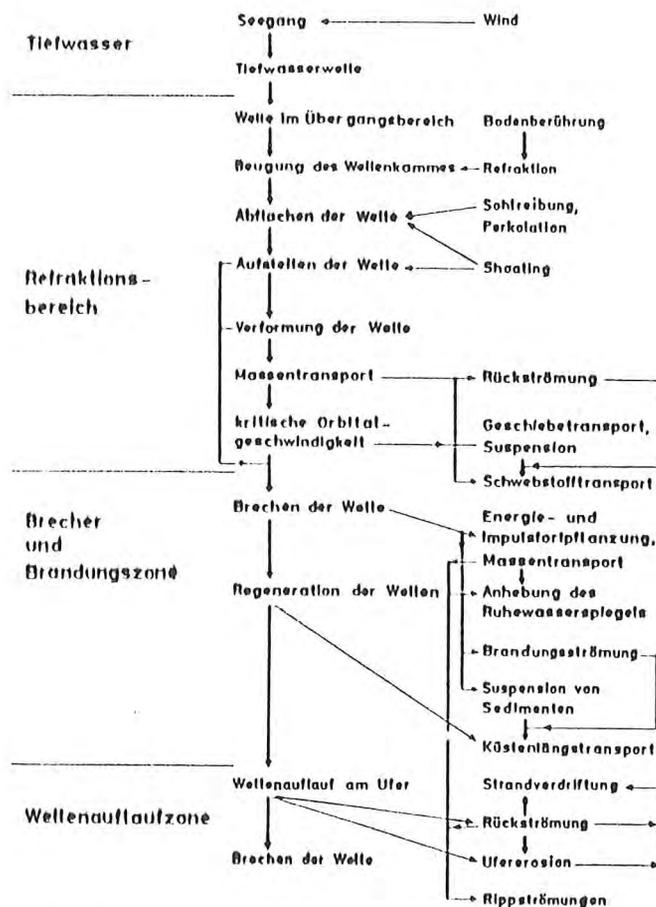


Abb. 21: Ablauf des Wellenangriffs auf die Küste und seine Folgeerscheinungen (aus: NIEMEYER 1974)

Beim Brechen der Welle werden die Geschwindigkeiten stark vermindert, wodurch es zur Sedimentation und Riffbildung kommt. Auf die landwärtige Wassermasse wird ein Impuls ausgeübt, der ein ufernahes Zirkulationssystem in Gang setzt (SHEPARD & INMAN 1951, BOWEN & INMAN 1969). Dieses System beruht auf dem Massenausgleich des durch den Wellenfortschritt und durch das Brechen der Welle bedingten Wassermassentransports in die Brandungszone in Form von Ripp- oder Unterströmungen. Bei schrägem Wellenangriff kommt es in der Brandungszone zur Ausbildung von Brandungsströmungen, die beträchtliche Sedimentmassen bewegen können.

Die auslaufenden Restwellen landwärts der Brecherzone verlieren ihre Restenergie in der Wellenauffaufzone und transportieren dabei die mitgeführten Sedimente bis über den mittleren Wasserspiegel. Nach dem Auslaufen folgen diese aufgelaufenen Wassermassen fast parallel dem Strandgefälle und nehmen dabei wieder Sediment auf und transportieren es seewärts. Schräger Wellenangriff führt dabei zur sog. Strandverfrachtung, einer sägezahnförmigen Bewegung der Sedimente.

Die Strömungsmessungen, die seit 1988 am Norderneyer Strand ausgeführt werden, lassen sich nur schwer mit den oben angeführten Modellvorstellungen in Einklang bringen. Dies ist aber ein weltweites Problem der Seegangsforschung im strandnahen Bereich. Die Ergebnisse der aus technischen Gründen erst seit einigen Jahren möglichen Strömungsmessungen am Strand stimmen häufig nicht mit den theoretischen Überlegungen überein.

Die Abbildung 24 zeigt das Ausbreitungsverhalten des Seegangs im Norderneyer Seegebiet bei westlichen Windrichtungen und bei MTHw. Deutlich ist die Beugung (Refraktion) des Seegangs am Norderneyer Riffbogen und im Seegatbereich zu erkennen. Die Geschwindigkeitsabnahme wird durch die verringerten Abstände zwischen den Kammlinien verdeutlicht. In den tiefen Rinnen wie dem Schluchter, Kalfamergat oder Norderneyer Seegat, wo der Seegang keine Grundberührung und somit keine der o. g. seegangsverändernden Einflüsse erfährt, laufen die schematisierten Wellenkämme sehr viel schneller und sind somit den Wellenkämmen in den flachen Bereichen weit voraus. Weitere Refraktionsdiagramme, die für andere Windrichtungen und Wasserstände gelten, sind von NIEMEYER (1986) herausgegeben worden.

Der Riffbogen und die Platen im Seegat haben jedoch nicht nur eine verformende Wirkung auf den Seegang, sondern dämpfen diesen auch in erheblichen Maße. Nach NIEMEYER (1986) beträgt die Seegangsenergie im Inselvorstrand, dem Bereich zwischen dem Riffbogen und dem Nordweststrand, noch 30 % der Seegangslistung im Küstenvorfeld, während diese im Seegatbereich nur noch 8 % erreicht.

Der von See her einschwingende Seegang spaltet sich im Bereich des Westkopfs von Norderney in zwei Systeme mit unterschiedlichen Wellenfortschrittsrichtungen auf (Abb. 24). Das eine entlang des Weststrands verlaufende System bewirkt einen S-gerichteten Sedimenttransport, während die am Nordweststrand einlaufenden Wellen zumelst einen NE-gerichteten Transport bewirken. Der Strandabschnitt, in dem diese Aufspaltung des Seegangs auftritt wird als Divergenzbereich (LUCK 1976) bezeichnet und umfaßt die Bühnenfelder zwischen den Bühnen C und F1 (Abb. 6). Da sich die Richtungen des einschwingenden Seegangs mit den Windrichtungen ändern, verschiebt sich auch der Bereich in dem sich die Wellen in zwei Richtungen aufspalten. Deshalb umfaßt der als Divergenzbereich bezeichnete Strandabschnitt auch mehrere Bühnenfelder.

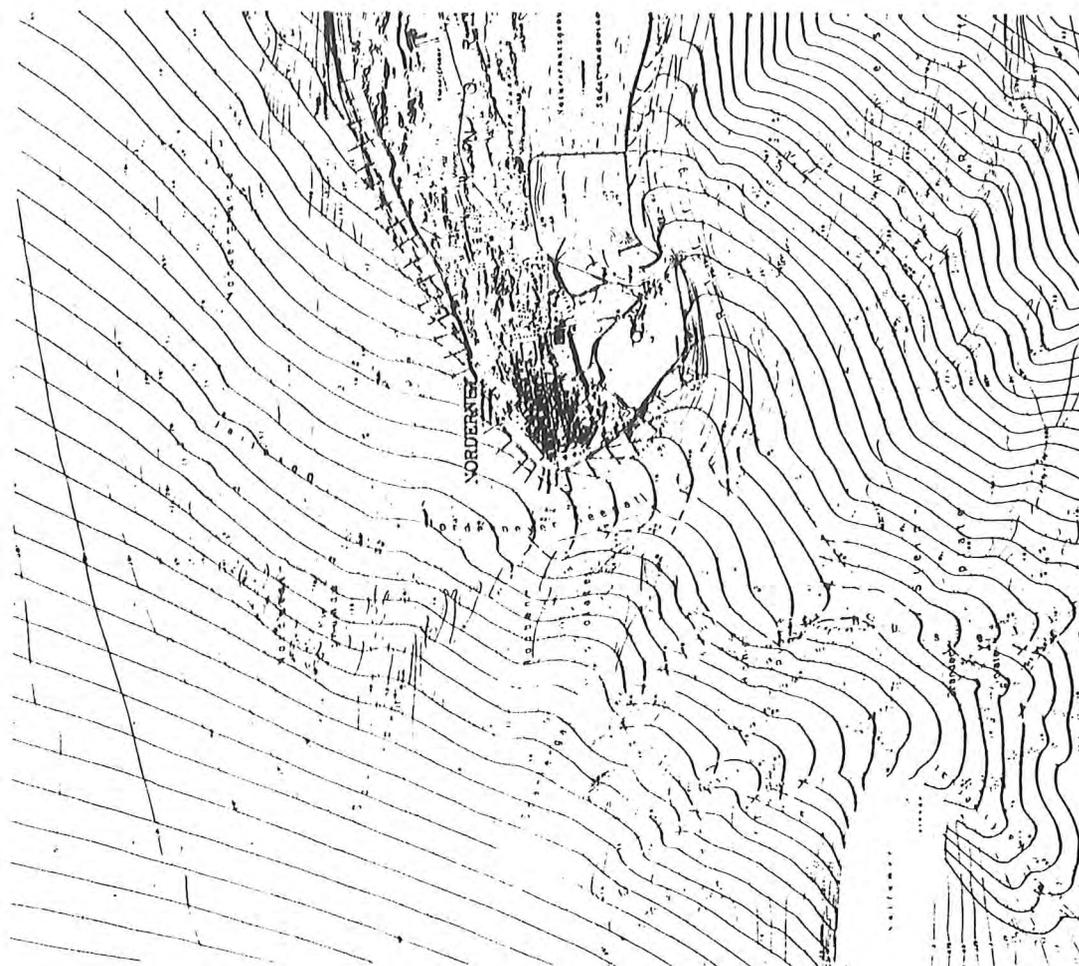


Abb. 24: Refraktion des Seegangs im Untersuchungsgebiet bei MThw und westlichen Winden
(aus: NIEMEYER 1986)

4.3. Wetterdaten und Wasserstände im Untersuchungszeitraum

Um einen Überblick über die Wetter- und Wasserstandsentwicklung im Untersuchungszeitraum zu erhalten, sind in den Abbildungen 25-27 die täglichen Windstärken, Hochwasserstände und Lufttemperaturen der Jahre 1987, 1988 und 1989 dargestellt.

Wind, Wasserstaende, Lufttemperatur auf Norderney Kalenderjahr 1987

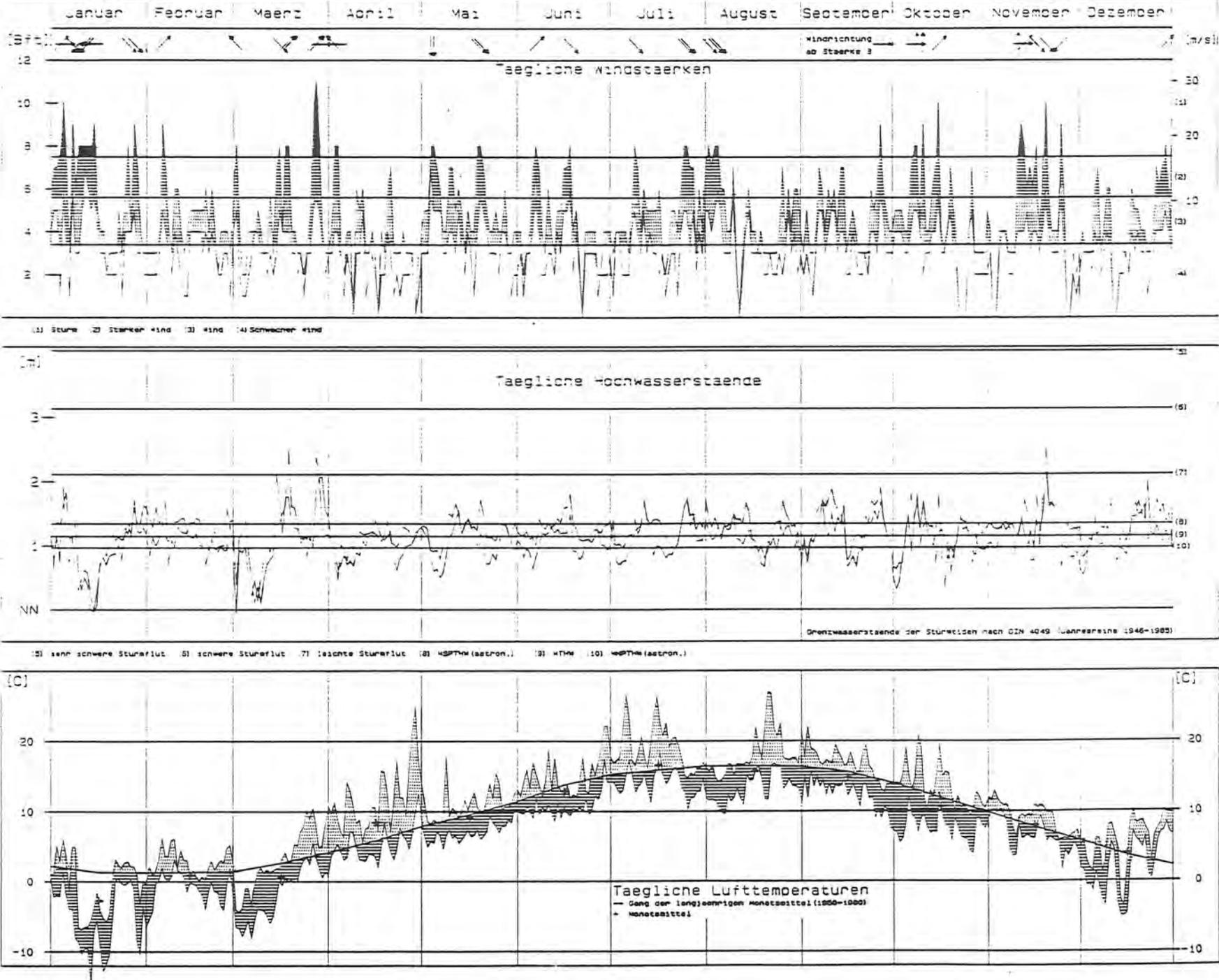


Abb. 25:

Wasser- und Wasserstandsentwicklung 1987

Wind, Wasserstaende, Lufttemperatur auf Norderney Kalenderjahr 1988

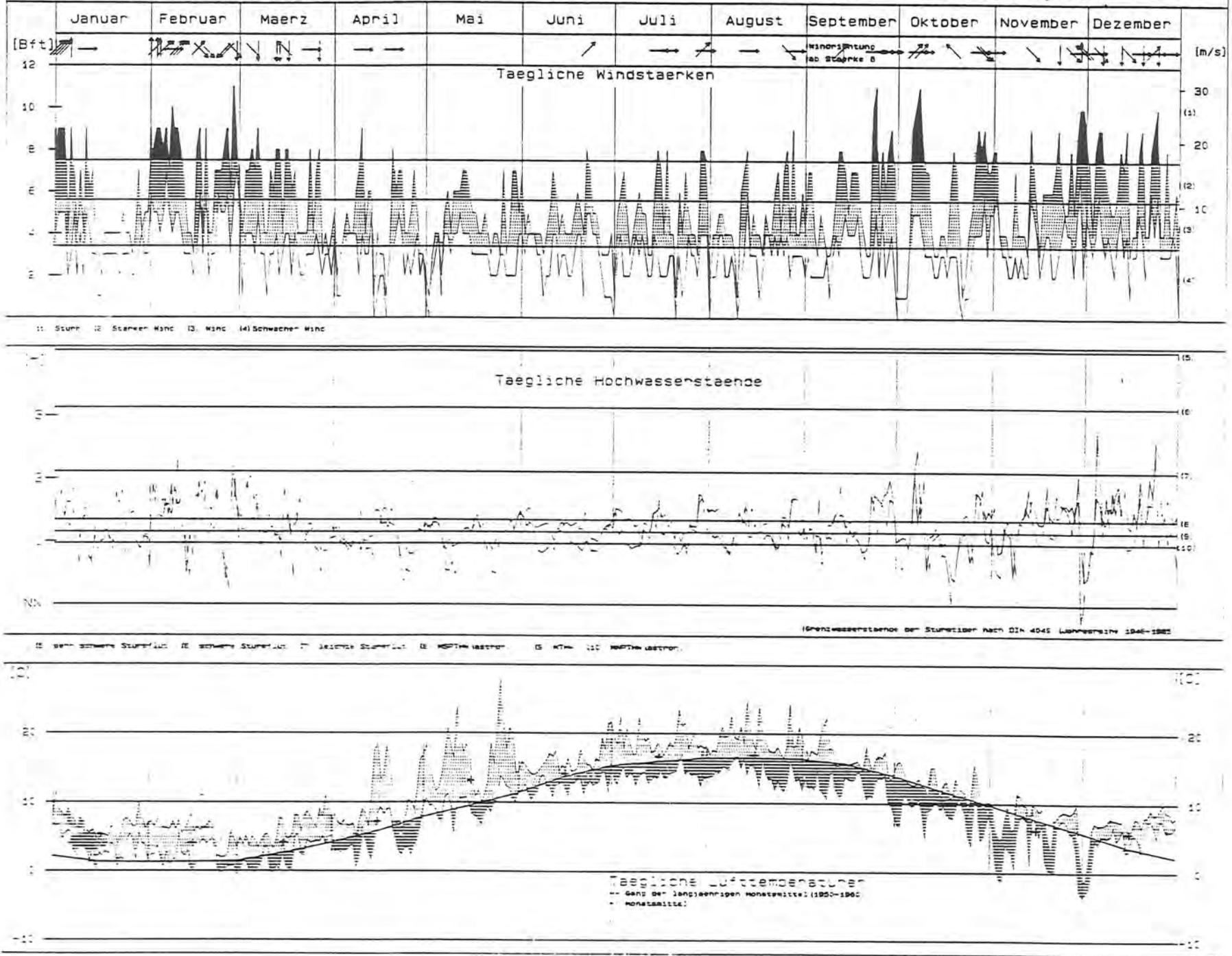


Abb. 26: Wetter- und Wasserstandsentwicklung 1988

Wind, Wasserstaende, Lufttemperatur auf Norderney Kalenderjahr 1989

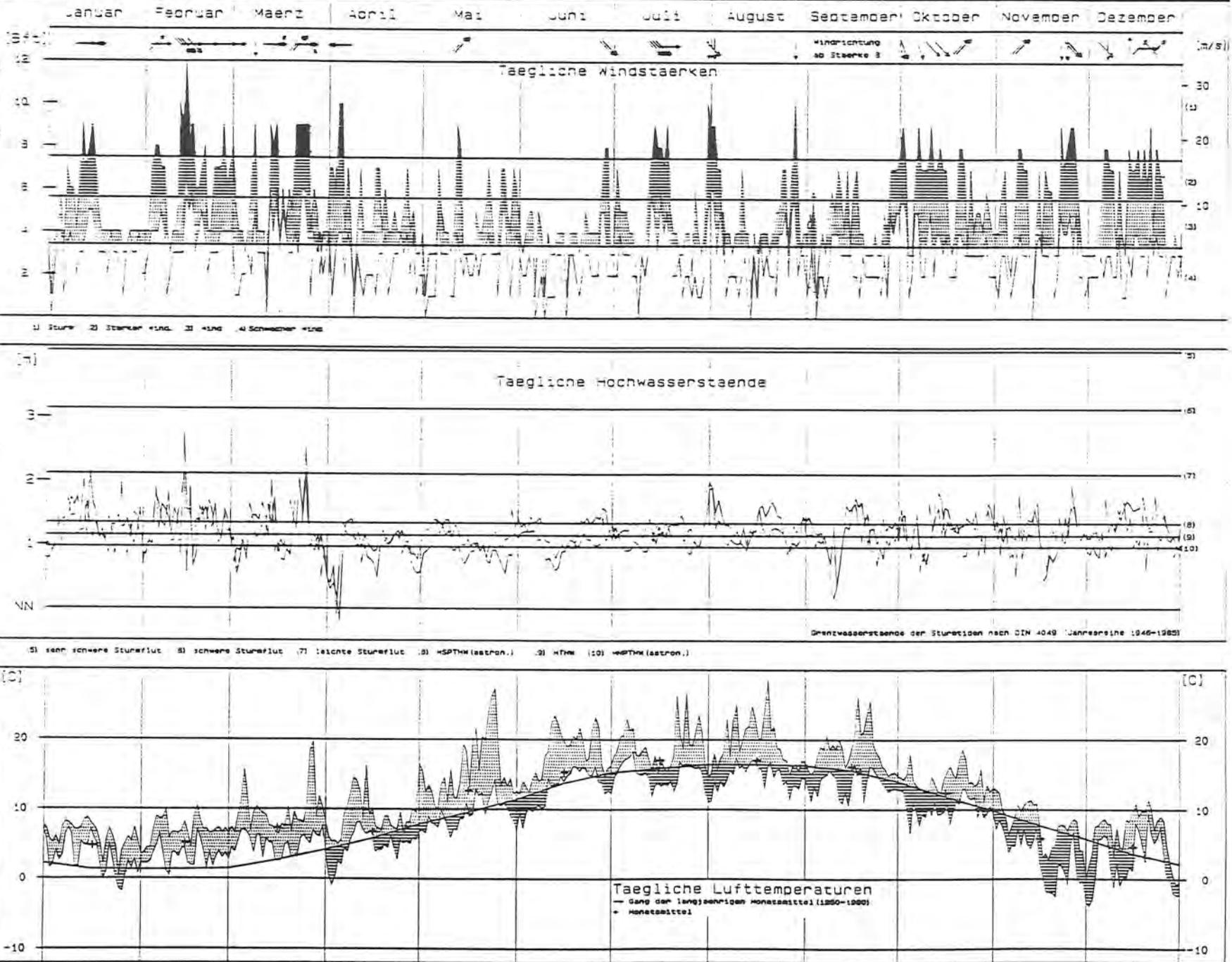


Abb. 27:

Wetter und Wasserstandsentwicklung 1989

5. Sedimentprobenentnahme

Die Entnahme der untersuchten Sedimente erfolgte am Strand mit einem Stechzylinder - Durchmesser 6 cm, Höhe 5 cm - in der Hoch- (HWL), Mittel- (MWL) und Niedrigwasserlinie (NWL) sowie auf dem trockenen Strand (TSI), um definierte Proben zu erhalten. Dabei wurden zur Zeit des Niedrigwassers im halbjährlichen Abstand 31 Profile, die im Bühnenbereich jeweils in der Feldmitte lagen, und 3 Profile östlich der letzten Bühne X1 beprobt (Abb. 28). In der Regel konnte eine Entnahmeserie am Strand innerhalb von 2 Tagen abgeschlossen werden. Zusätzlich zur Sedimentprobenentnahme wurde bei geeignetem Wetter gleichzeitig die Strandneigung am Entnahmepunkt nivellistisch ermittelt.

Die Seeproben wurden von Bord des Hydrographischen Arbeitsschiffes "BURCHANA" oder des Laborschiffes "BUISE" aus mit einem VAN-VEEN-Greifer gewonnen. Hierzu ist jedoch anzumerken, daß sich mit diesem Greifer keine definierten Proben, wie bei der Zylinderprobenentnahme am Strand, gewinnen lassen. Die Positionierung der Entnahmepunkte erfolgte mit einem "SYLEDIS-SR3-Empfänger" an Bord der Schiffe, mit dem sich - bei gutem Empfang der Funkortungssender - die Position auf 5 bis 10 m genau festlegen läßt. Gleichzeitig wurden die mit dem Echolot registrierte Tiefe und die Uhrzeit vermerkt. Die Tiefenangaben sind später mit der zugehörigen Tidenkurve des Norderneyer Pegels beschickt und auf NN umgerechnet worden.

Seewärts der Bühnenstreichlinie (BSL), der Verbindung der Bühnenköpfe am Strand von Norderney, wurden die Sedimentproben jeweils in der Mitte des Bühnenfeldes mit dem VAN-VEEN-Greifer entnommen und bilden somit die seewärtige Fortsetzung der Strandentnahmeprofile. Sie liegen damit im Bereich des durch Bühnen und Deckwerke ungestörten Küstenlängstransports.

Die Lage der Entnahmepunkte im Bereich des Norderneyer Seegats (Abb. 29 - 35) ist den topographischen Verhältnissen angepaßt. Im allgemeinen beträgt der Abstand der Probenpunkte entlang eines Entnahmeprofiles 300 m. Im Küstenvorfeld wurde der Probenabstand auf 500 m erhöht. Da das Norderneyer Seegat starken topographischen Veränderungen unterliegt, konnten bei den verschiedenen Probenentnahmen nicht immer die gleichen Probenentnahmepunkte angelaufen werden. Es wurde jedoch versucht, diesen möglichst nahe zu kommen, um eine größtmögliche Vergleichbarkeit der gewonnenen Sedimente zu gewährleisten. Neben dem starken Gestaltwandel bereitete das Wetter häufiger Probleme. Da für die Probenentnahme ruhige Wetterlagen mit geringem Seegang nötig waren, zogen sich die Entnahmeserien auf See häufig über ein bis zwei Monate hin. Desweiteren konnten manche Proben aufgrund zu starker Seegangsentwicklung und morphologischer Änderungen an den Entnahmepunkten (Riffbogen, Robbenplate, Steinplate) nicht bei jeder Probenserie gewonnen werden.

In der Tabelle 5 sind die Zelträume der einzelnen Beprobungsserien am Strand und im Seegebiet aufgelistet. Die Beprobung Herbst 1988 ist im Folgenden in zwei Probenserien getrennt worden, da zwischen dem Entnahmezeitpunkt September 1988 und 10. Oktober 1988 eine leichte Sturmflut zu verzeichnen war (Abb. 26). Die Lage der Entnahmepunkte während der Sedimententnahmen ist den Abbildungen 29 bis 35 zu entnehmen.

Probenserie	Strand	Seegebiet	Bezeichnung
März 1987	13.3.	11.-12.3.	03/87
April 1987	21.-22.4.	23.-24.4.	04/87
Herbst 1987	16.-17.9. 17.11.	23.9.,19.10. 9.-10.11.	09/87
Frühjahr 1988	11.-13.4.	23.3. 6.-7.4. 24.5.	04/88
Herbst 1988	20.-21.9.	22.-23.9. 12.10.	09/88 10/88
März 1989	2.-3.3.	6.3.	03/89

Tab. 5: Entnahmezellräume der verschiedenen Beprobungsserien

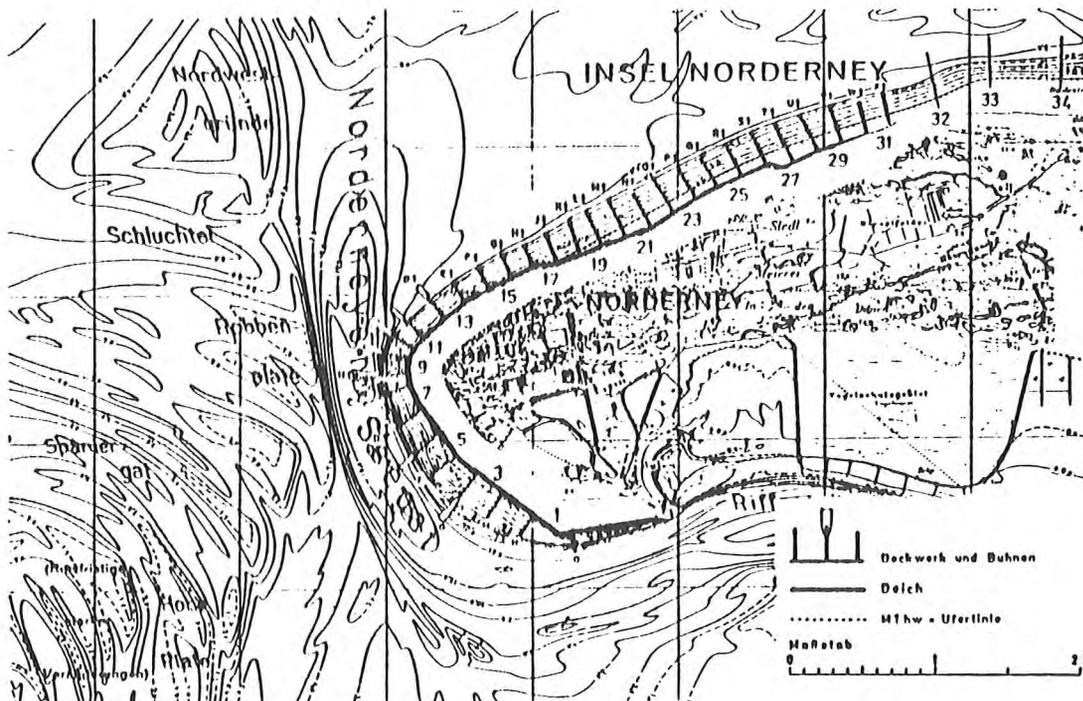


Abb. 28: Lageplan der Beprobungsprofile am Strand

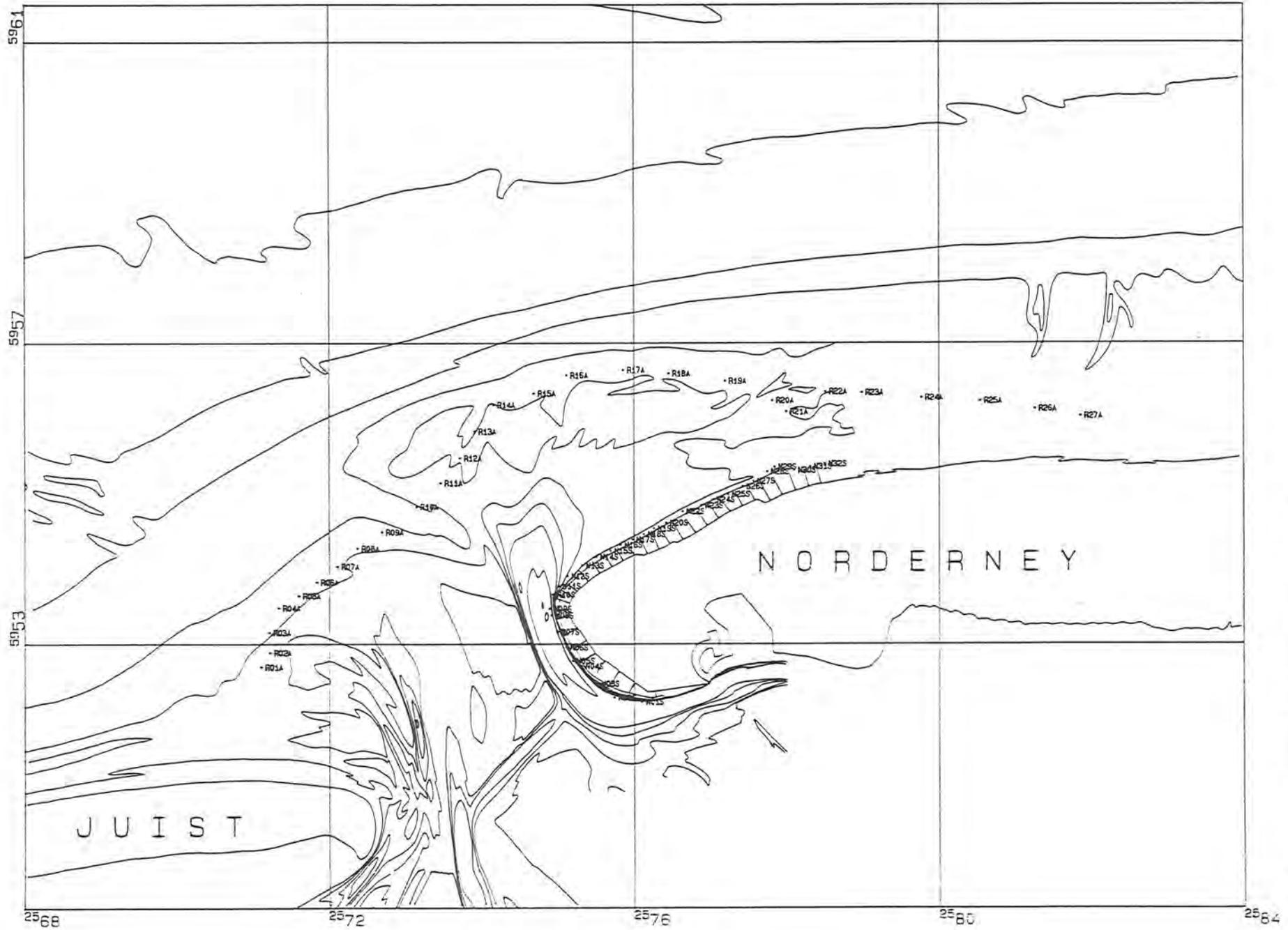
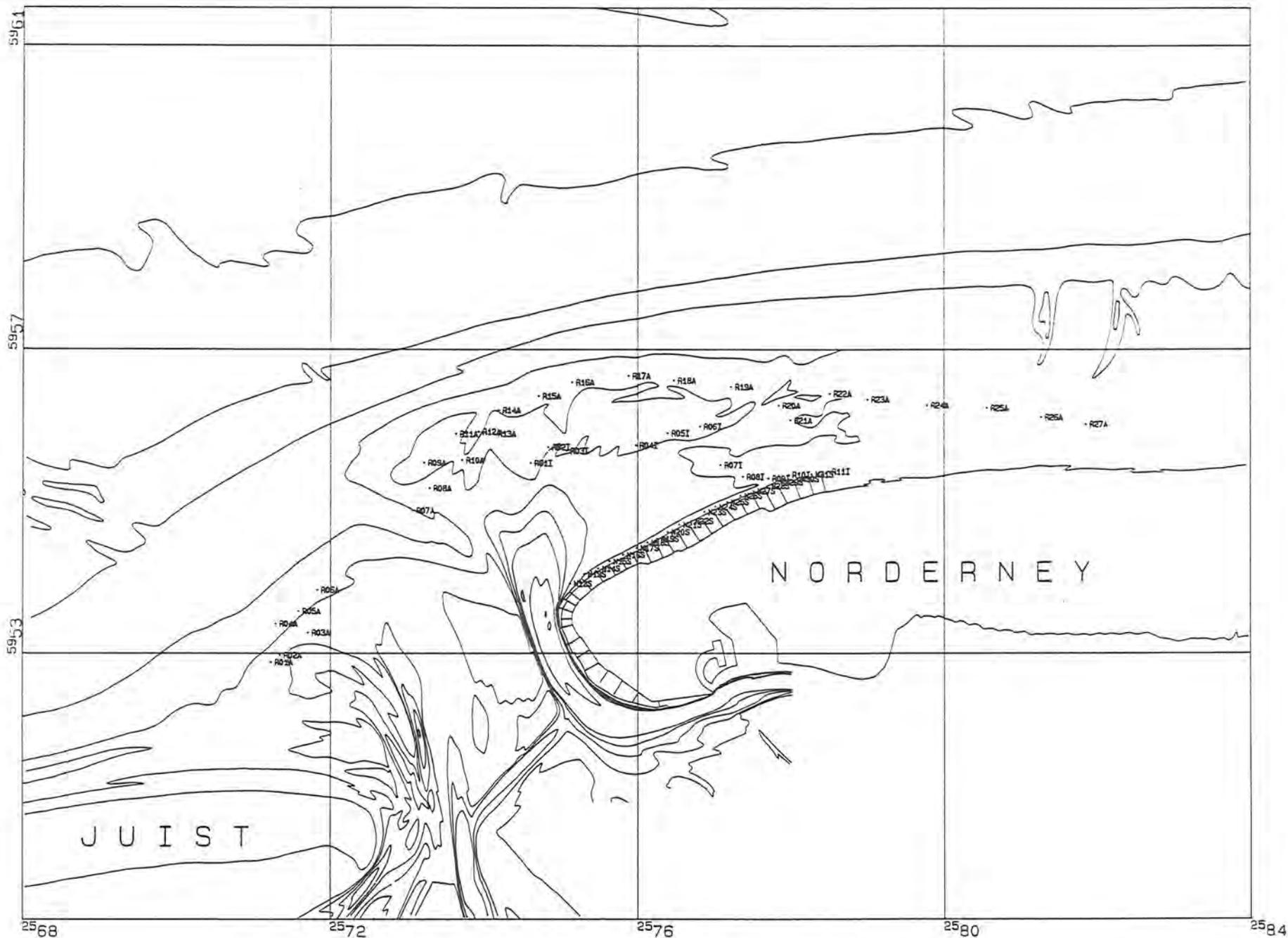


Abbildung 29: Lageplan der Greiferproben im März 1987

Abbildung 29:

Abb. 30:

Lageplan der Grellerproben im April 1987



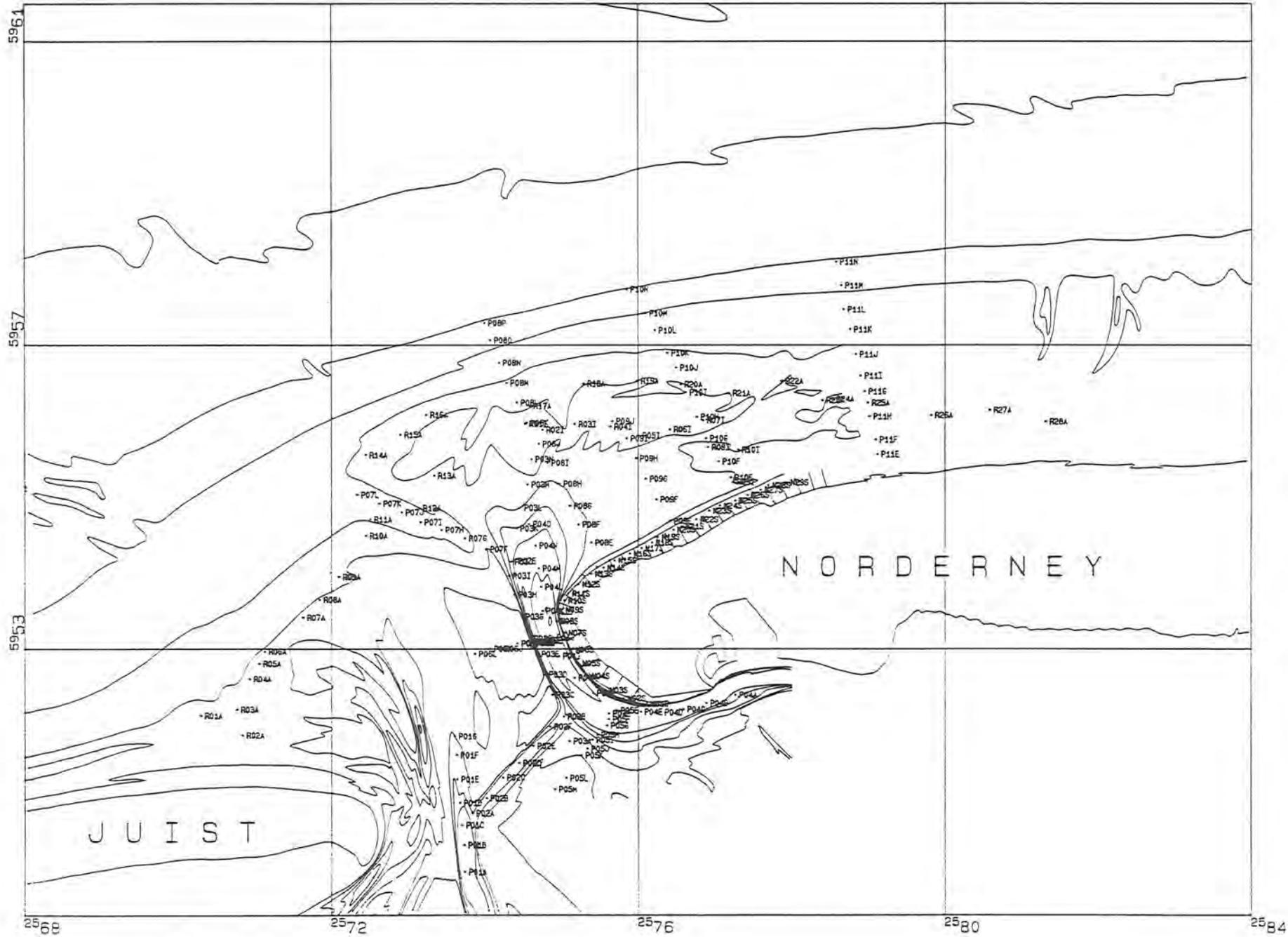


Abb. 31: Lageplan der Greiferproben im Herbst 1987

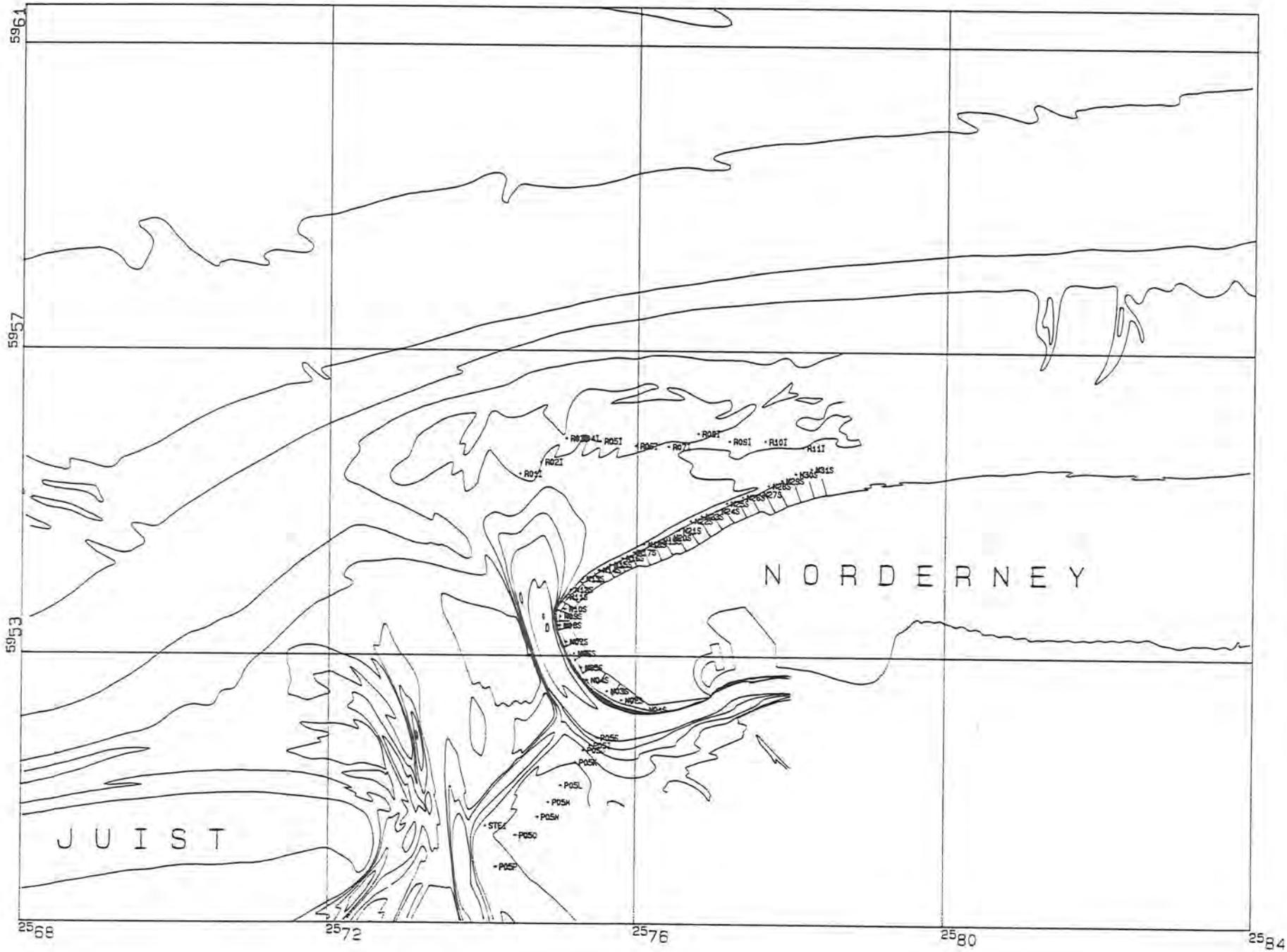
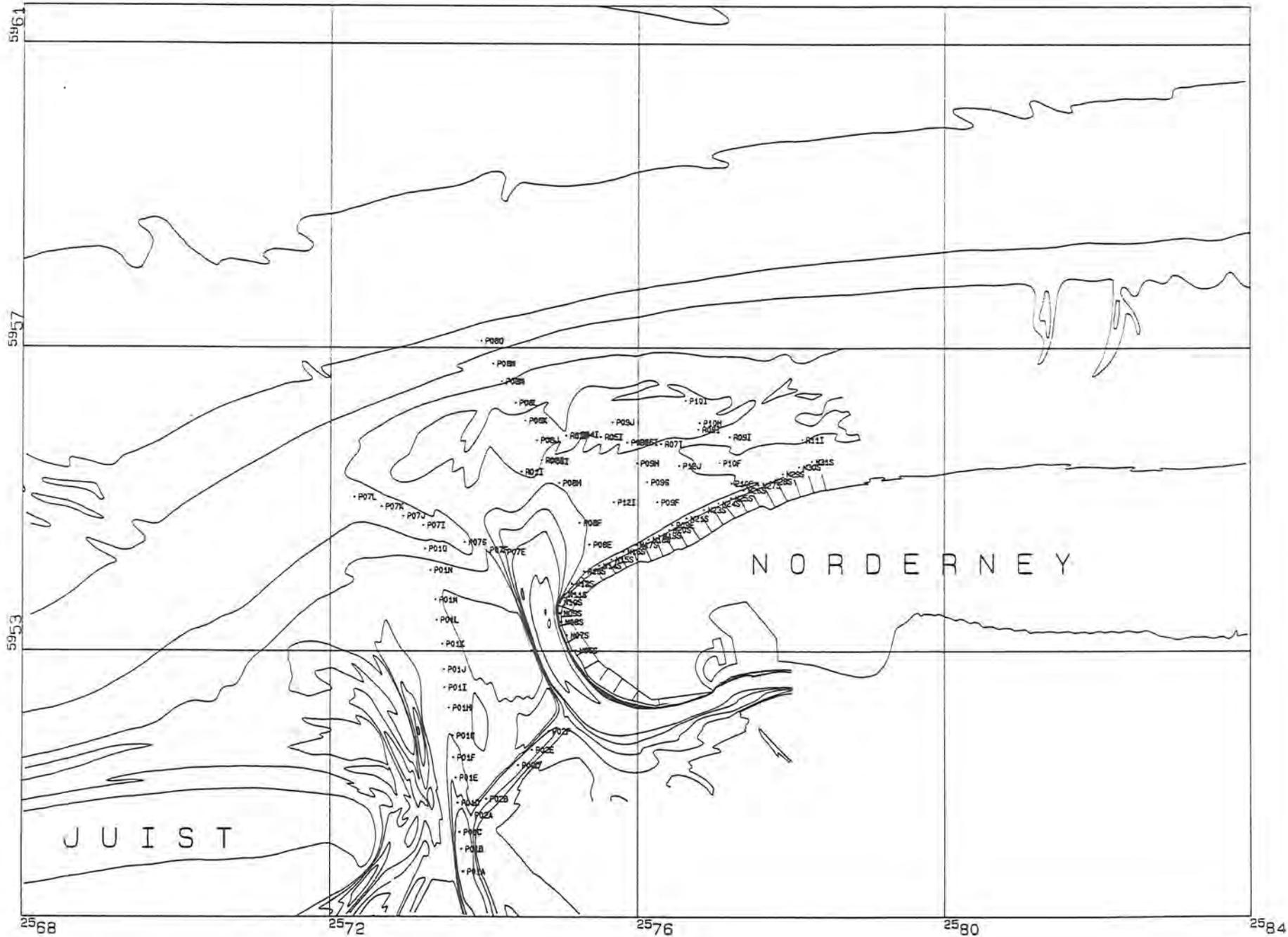


Abb. 33: Lageplan der Greifproben im September 1988

Abb. 34:

Lageplan der Greiferproben im Oktober 1988



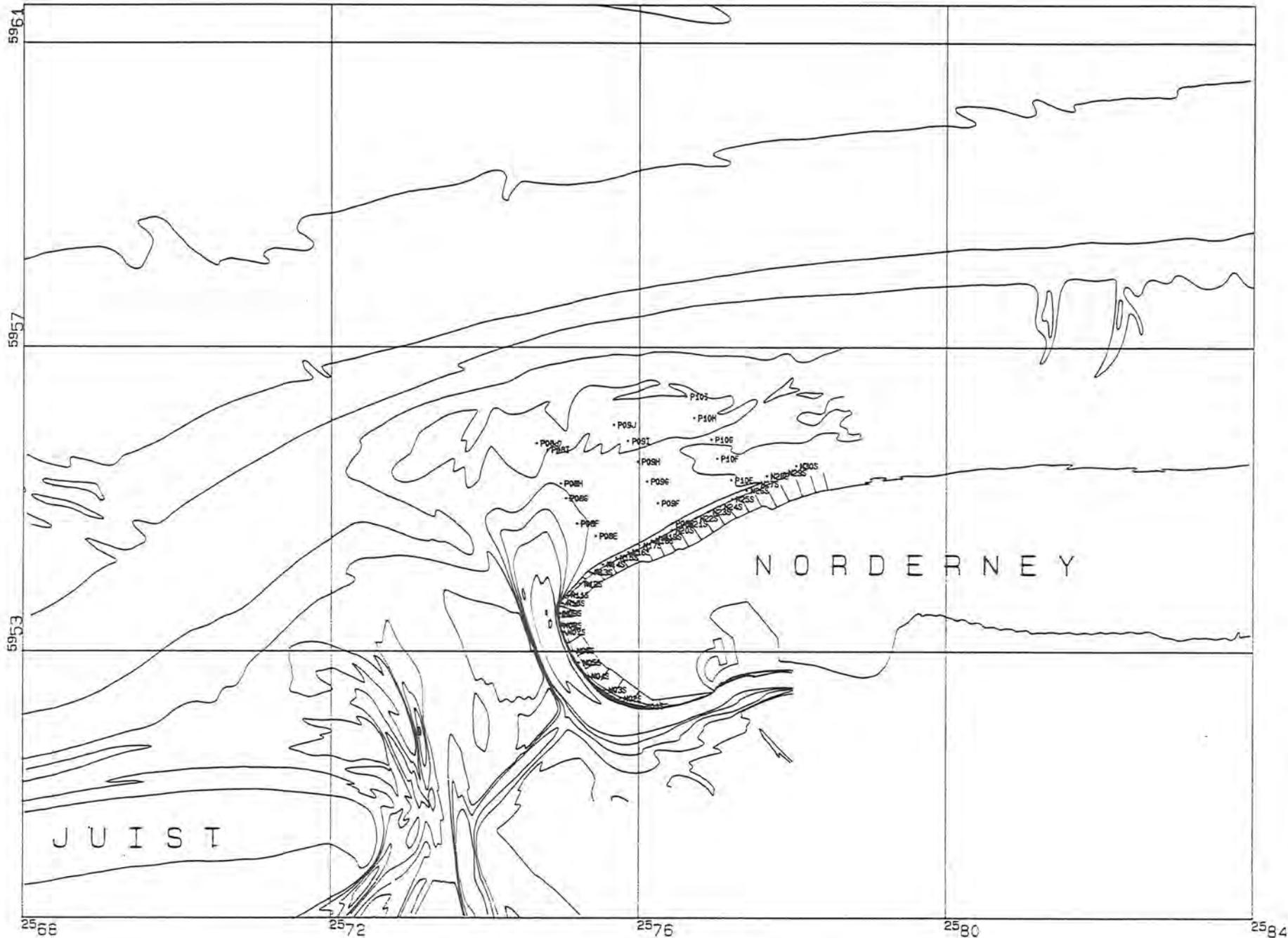


Abb. 35: Lageplan der Greiferproben im Frühjahr 1989

6. Aufbereitung und Bearbeitung der Sedimentproben

Bevor die gewonnenen Sedimentproben im bodenmechanischem Labor bearbeitet werden konnten, wurden sie dreimal mit H₂O-dest. entsalzt und dann bei 105°C getrocknet. Anschließend sind sie mit einem Probenteller geteilt worden, wobei die eine Hälfte als Referenzprobe aufbewahrt wurde und die andere Hälfte zur bodenmechanischen Analyse zur Verfügung stand.

Bei der Analyse der Sedimentproben im Labor wurden folgende Kennwerte ermittelt:

1. Wassergehalt und Raumgewichte (nur Strandproben)
2. Kornverteilung
3. CaCO₃-Gehalt
4. Schwermineralgehalt der Kornfraktion 0.106-0.125 mm
5. Rolligkeit der Kornfraktionen

6.1. Wassergehalt und Raumgewichte

Die Bestimmung des Wassergehalts und der Raumgewichte der ungestört entnommenen Strandproben erfolgte in Anlehnung an die DIN 18125, wobei jedoch ein Ausstechzylinder mit einem Durchmesser von 6 cm und einer Höhe von 5 cm zur Anwendung gelangte.

6.2. Kornverteilung

Die Korngrößenverteilungen wurden in Anlehnung an die niederländischen Arbeiten von WINKELMOLEN & VEENSTRA (1974, 1980) mit Siebsätzen, die nach der Wentworth-Skala in ¼-phi⁰-Schritten abgestuft sind, bestimmt. Dabei besteht zwischen der in der DIN 18123 üblichen mm-Einteilung und den phi-Einheiten der Wentworth-Skala folgender Zusammenhang:

$$d(\text{phi}) = -\log_2 d(\text{mm})$$

Zur Korngrößenanalyse wurde der in Tabelle 6 aufgeführte Siebsatz benutzt. Bei den Trockensiebungen wurden 100 g des zu untersuchenden Sedimentes eingewogen. Dabei wurde auch der Schillbruchanteil mit analysiert und nicht, wie bei manchen Untersuchungen, durch Salzsäure herausgelöst. Denn der Schillanteil ist für die hydrodynamischen Eigenschaften des Sediments gegenüber Erosions- und Sedimentationsprozessen ein wichtiger Faktor und sollte deshalb nicht aus der Beurteilung herausgezogen werden.

Bei bindigen Sedimenten wurde eine kombinierte Naßsiebung/Schlammanalyse (DIN 18123) zur Ermittlung der Kornverteilung angewandt.

Nach dem Auswiegen der einzelnen Siebrückstände wurden diese in 30 ml Kunststoffbehälter abgefüllt und standen so für die Schwermineralgehaltsbestimmungen und die Rolligkeitsanalysen zur Verfügung.

Sieb/Fraktion	Phi ^o	mm
13	-1.0	2.0
12	0.0	1.0
11	0.5	0.71
10	1.0	0.5
9	1.5	0.355
8	1.75	0.3
7	2.0	0.25
6	2.25	0.212
5	2.5	0.18
4	2.75	0.15
3	3.0	0.125
2	3.25	0.106
1	3.5	0.09

Tab. 6: Maschenweite der Analysensiebe

6.3. Karbonatgehalt

Die Bestimmung des Karbonatgehaltes erfolgte mit dem Titrationsverfahren nach CHARISIUS. Dabei wurden 5 g gemörstertes, trockenes Sediment je nach abgeschätztem Karbonatgehalt mit 5 bis 30 ml 1n HCl versetzt. Nach 24 Stunden wurde mit 0.5n NaOH und Methylorange als Indikator gegentitriert und anhand einer Tabelle der CaCO₃-Gehalt bestimmt.

Da die reinen Sande in der Regel karbonatfrei sind, kann dieser Parameter für die Abschätzung des Schillanteils im untersuchten Sediment gut herangezogen werden.

6.4. Schwermineralgehalt

Das Standardverfahren zur Absonderung von Schwermineralen aus Sedimenten ist die Schwerkretrennung. Da dieses Verfahren jedoch sehr aufwendig ist, wird häufig die magnetische Abtrennung mit dem Frantz-Magnetscheider (Abb. 36) bevorzugt, die zwar die Schwerminerale nicht so gut aus dem Sediment extrahiert, wie es beim Abscheiden durch Schwereflüssigkeiten möglich ist (BOENIGK 1983), dafür aber die Bearbeitung größerer Probenserien ermöglicht.

Der Frantz-Magnetscheider trennt die Schwerminerale durch ein regelbares Magnetfeld vom Sediment, das in einer 30° vorwärts- und 20° seitwärtsgeneigten Rutsche diesem Magnetfeld für die Dauer des Durchlaufens ausgesetzt wird. Diese Rutsche spaltet sich im unteren Teil in zwei Bahnen auf, durch die beim Betrieb des Schwermineralseparator die Leicht- und die Schwerminerale in zwei verschiedene Auffangbehälter geleitet werden. Die Abbildung 37 verdeutlicht die verschiedenen Kräfte, die ein Schwermineral während des Durchlaufens ausgesetzt ist. Der Vektor F_g stellt die Gravitationskraft entlang des maximalen Neigungswinkels der Rutsche dar, der sich aus dem Längswinkel \varnothing und der Seiteneigung \ddot{O} zusammensetzt. Das Magnetfeld (F_m) wirkt den Gravitationskräften (F'_g), die durch den Seitenwinkel der Rutsche hervorgerufen werden, entgegen. Der

Vektor F kennzeichnet den Weg eines Schwerminerals, bei dem das Magnetfeld F_m die Gravitationskraft F_g aufhebt. Ist die magnetische Ablenkung stärker als die durch die Gravitation F_g hervorgerufene, wird das Schwermineral nach oben hin abgelenkt und wird im weiteren Verlauf der Rutsche durch die obere Bahn in den Auffangbehälter der Schwerminerale geleitet. Eine genauere Beschreibung der Arbeitsweise des Magnetschelders gibt McANDREW (1957).

Abb. 36: FRANTZ-Schwermineralseparator

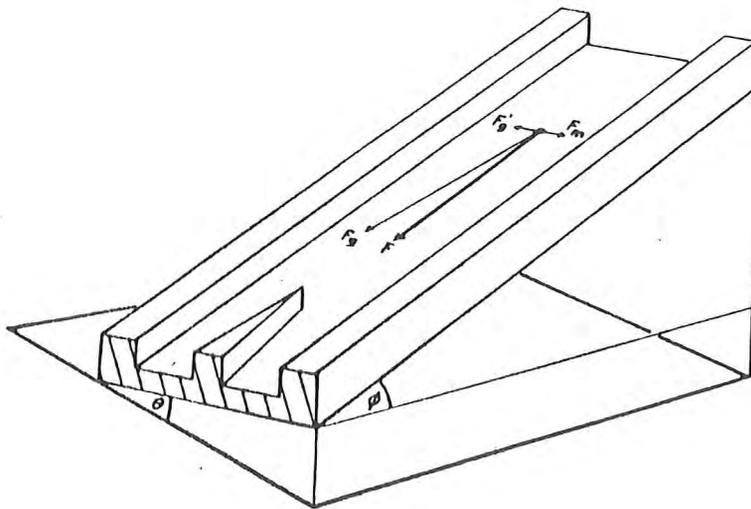


Abb. 37: Während der Schwermineralseparation auf ein Mineralkorn einwirkende Kräfte (McANDREW 1957); Erläuterung s. S. 54

[mA]	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,5	nicht magnetisch
1								
3								
45								
7								
8								
55								
9								
6								
45								
10								
11								
54								
12								
13								
14								
15								
16								
41								
17								
18								
46								
19								
21								
44								
22								
26								
40								
27								
40								
28								
6								
29								
41								
4								
43								
41								
31								
32								
22								
35								
41								
41								
41								
38								
39								
40								
24								
41								
40								
41								
49								
6								
50								
33								
51								
52								
47								
53								
56								
57								
58								
59								
60								
61								
62								
63								
64								
25								

Tab. 7: Magnetisches Verhalten der Schwerminerale im Frantz-Magnetscheider (aus: BOENIGK 1983)

Die Abtrennung der Schwerminerale erfolgt für jedes Sediment in drei Stufen mit steigender Magnetfeldstärke. Im ersten Durchgang wird der Elektromagnet mit einer Stromstärke von 0,4 Ampère, im zweiten mit 0,8 Ampère im dritten mit 1,2 Ampère betrieben. Dadurch werden die Schwerminerale je nach ihrer magnetischen Suszeptibilität - zuerst die hochsuszeptiblen und stark eisenhaltigen Minerale

wie z. B. Granat - aus dem Sediment getrennt. Das magnetische Verhalten der Schwerminerale im Frantz-Magnetscheider hat BOENIGK (1983) tabellarisch zusammengestellt (Tab. 7).

Schwermineralanalysen von Sedimenten unbekannter Körnung lassen sich nicht gegenüberstellen. Um vergleichbare Analysen zu erzielen, empfiehlt sich nach RICHTER (1939) u. a. bei allen Proben stets dieselbe Fraktion zu untersuchen, wobei die feineren Fraktionen vorzuziehen sind, da sich in diesen die Schwerminerale stärker anreichern und somit besser analysieren lassen. In Anlehnung an die sedimentologische Arbeit von VEENSTRA & WINKELMOLEN (1976) wurde daher bei der Schwermineralanalyse nur die Kornfraktion 0.106 - 0.125 mm (3.25 - 3.0 phi) untersucht. Dabei wurden von dieser Kornfraktion jeweils bis zu 4 g analysiert. Da manche Sedimentproben jedoch weniger als 4 g Einwaage aufwiesen, ist bei diesen der gesamte Siebrückstand der o. g. Kornfraktion untersucht worden.

Damit jedoch auch die Schwermineralverteilung im gesamten Sediment verdeutlicht werden kann, wurden bei einigen Proben alle Kornfraktionen (in $\frac{1}{4}$ -phi Schritten) schwermineralanalytisch untersucht.

6.5. Kornformanalysen

Die Bestimmung der Kornform und besonders deren quantitative Erfassung zur Klärung von Transportvorgängen hat sich als sehr schwierig erwiesen. Zur Kennzeichnung der Kornform wurden verschiedene Verfahren und Kennwerte entwickelt, wie z.B. "Roundness" (WADELL 1933), "Sphericity" (ZINGG 1935), "Dynamic Shape Factor" (McCULLOCH et al. 1960), "Pivotability" (SHEPARD & YOUNG 1961, KUENEN 1964) und "Fouler Shape Analysis" (EHRlich & WEINBERG 1970). Diese Verfahren haben jedoch gegenüber dem Verfahren von WINKELMOLEN (1969), das auch in dieser Untersuchung angewandt wurde, erhebliche Nachteile, wie z. B. schlechte Reproduzierbarkeit und hoher Arbeitsaufwand.

Aufbauend auf den Erfahrungen von KUENEN (1964) mit dem "rock-and-roll shape sorter" entwickelte WINKELMOLEN (1969) dessen Konzept der "pivotability"-Bestimmung weiter. Das Ergebnis dieser Arbeit ist der "Rollsorter" (Abb. 38), der für das o. g. Forschungsvorhaben nach den Originalplänen des Geologischen Instituts der Universität Groningen von der Werkstatt der Forschungsstelle Küste nachgebaut wurde.

Der Rollsorter ist im wesentlichen eine mit 2.5° geneigte, rotierende Messingtrommel ($D = 60$ cm, $L = 100$ cm), in der die "rollability" (Rolligkeit) der einzelnen Fraktionen bestimmt wird. Die Innenseite der Trommel ist mit einer wasserlöslichen Latexfarbe beschichtet, in die 20% Graphitpulver gemischt wurde, um statische Aufladungen zu verhindern. Der Farbauftrag war aber auch nötig, um eine gewisse Oberflächenrauhigkeit herzustellen, damit die Sedimentkörner während des Betriebs des Rollsorters nicht die Innenwand herunterrutschen sondern herunterrollen. Die Einwaage der zu untersuchenden Fraktionen schwankt je nach Korngröße zwischen 30 und 200 mg. Dieses Material wird am oberen Ende der Trommel plaziert und dann durch die Rotation solange auf der Innenseite der Trommel mitgenommen, bis es je nach der Kornform zu rollen beginnt. Die Rolligkeit eines Kornes ist daher bei diesem Verfahren auf den Neigungswinkel einer glatten, antistatischen Oberfläche bezogen, bei dem sich das Korn allein durch die Gravitation zu bewegen beginnt.

Je schlechter die Rolligkeit ist, desto höher liegt die Achse, an der sich die Körner während der Messung in der Trommel entlang bewegen. Kugeln würden sich nahe der tiefsten Achse auf spiralförmigen Bahnen bewegen. Diese spiralförmigen Bahnen sind um so breiter, je höher die Rolligkeit ist. Dadurch trennen sich die verschiedenen Kornformen in einer Fraktion beim Lauf durch die Trommel sowohl in der Vertikal- als auch in der Längsrichtung voneinander. Die Körner werden am Ende der Trommel auf eine elektronische Waage (Genauigkeit 0.1 mg) geleitet und die dort registrierten Gewichtsänderungen in zeitlicher Zuordnung mit einer Frequenz von 10 Hz digital erfaßt.

Die Zeit, die die Körner benötigen, um die Trommel zu durchlaufen, ist ein Maß für deren Rolligkeit. Sie ist nach WINKELMOLEN (1969) die Zeit (vom Start des Rollsorters an), bis 50 % der Fraktionseinwaage auf die Waage gelangt sind. WINKELMOLEN benutzte zur Registrierung einen XT-Schreiber und nahm den Abstand der Startmarke zum 50 %-Punkt der Kurve auf dem Schreiberpapier als Maß für die Rolligkeit, um sich das Umrechnen zu ersparen. Durch die digitale Meßdatenerfassung mit einem PC ist es jedoch möglich, die Rolligkeitswerte in Sekunden auszudrücken. Durch Multiplikation dieser Werte mit 4 (der Schreibergeschwindigkeit in mm) sind sie mit den ermittelten absoluten Rolligkeiten von WINKELMOLEN unmittelbar zu vergleichen.

Nach der Messung, die in der Regel weniger als 80 sec. dauert, wird der Rolligkeitswert der untersuchten Fraktion durch ein Auswerteprogramm ermittelt und abgespeichert. Neben dem Rolligkeitswert nach WINKELMOLEN werden auch noch die Zeiten abgespeichert, bei denen 5, 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 90 und 95 % der Fraktionseinwaage auf die Waage gelangt sind. Dadurch wird die Möglichkeit gegeben, innerhalb der Fraktion die Kornformen noch weiter zu differenzieren.

Um gerätespezifische Einflüsse bei der Rolligkeitsbestimmung zu verhindern, wandelt WINKELMOLEN (1969) die "absoluten" Rolligkeitswerte in die sog. "relativen Rolligkeiten" um. Dazu wird aus den ermittelten Rolligkeitswerten der verschiedenen Kornfraktionen aller Sedimentproben eines Untersuchungsgebietes der arithmetische Mittelwert berechnet. Die prozentualen Abweichungen der absoluten Rolligkeiten von diesem Mittelwert werden als "relative Rolligkeiten" bezeichnet. Im Gegensatz zu WINKELMOLEN (1969) wird jedoch den niedrigeren relativen Rolligkeitswerten eine gute Kornrundung - die einem kleinen Verhältnis der Kornoberfläche zum Korndurchmesser entspricht - und den höheren relativen Rolligkeitswerten eine schlechte Kornrundung zugeordnet.

7. EDV-gestützte Auswertung der bodenmechanischen Analysenergebnisse

7.1. Ermittlung der Sedimentkennwerte

Für die Auswertung der ermittelten Kornverteilungen wurde das FORTRAN-77 Programm 'KOKUR' entwickelt, mit dem die Kornverteilungskurven geplottet und die Sedimentkennwerte d_{50} , der Medianwert (Md), die Ungleichförmigkeitszahl (U), die Sortierung (So), die Skewness (Sk) und die Kurtosis (K) ermittelt und abgespeichert werden. Für die Erstellung der Kornverteilungskurven stehen bei diesem Programm mehrere Splinefunktionen zur Verfügung, mit denen sich die Summenkurven am Bildschirm darstellen und bearbeiten lassen. Anschließend werden die Sedimentkennwerte berechnet und die Kornverteilungskurve zur Dokumentation auf einem HP 7596A geplottet.

Im einzelnen haben die o. g. Kennwerte zur Bewertung der Korngrößenverteilungen folgende Bedeutung:

a. d_{50} -Wert

Der d_{50} -Wert gibt die Korngröße (mm) eines Sedimentes an, bei der sich die Kornverteilungskurve mit der 50%-Linie schneidet.

b. Md-Wert

Der Medianwert wird nach der Formel von FOLK & WARD (1957) berechnet:

$$Md(\phi) = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})/3$$

Der arithmetische Mittelwert wird dann anschließend wieder in einen mm-Wert umgerechnet. Bei sehr gut sortierten Sanden entspricht der d_{50} -Wert dem Medianwert. Ist das Sediment im groben Kornspektrum schlechter sortiert als im feinen, so erhöht sich der Md-Wert gegenüber dem d_{50} -Wert. Im umgekehrten Fall verringert er sich.

c. Ungleichförmigkeitszahl (U)

Der U-Wert gibt an, wie gut die Sedimente sortiert sind. Er berechnet sich nach der Formel

$$U = d_{60}/d_{10}$$

Der U-Wert wird hauptsächlich im bautechnischen Bereich für die Beschreibung der Sortierung eines Sedimentes benutzt. Hierbei wird nur die Spannbreite der Kornverteilung zwischen der 10 % und der 60

%-Linie betrachtet und der grobe Teil des Sedimentes außer acht gelassen. Sedimente mit $U < 2$ werden als sehr gleichförmig eingestuft.

d. Sortierung (So)

Im Gegensatz zum Ungleichförmigkeitsfaktor U wird beim So -Wert nach FOLK & WARD (1957) der Bereich der Kornverteilung zwischen 5 und 95% berücksichtigt:

$$So = (\phi_{84} - \phi_{16})/4 + (\phi_{95} - \phi_5)/6.6$$

Einkörnige Sedimente haben einen So -Wert von 0. FOLK & WARD (1957) unterscheiden 7 Sortierungsklassen:

- | | |
|-----------------------------|------------------|
| 1. sehr gut sortiert | : < 0.35 |
| 2. gut sortiert: | : 0.35 bis < 0.5 |
| 3. mäßig gut sortiert | : 0.5 bis < 0.71 |
| 4. mäßig sortiert | : 0.71 bis < 1.0 |
| 5. schlecht sortiert | : 1.0 bis < 2.0 |
| 6. sehr schlecht sortiert | : 2.0 bis < 4.0 |
| 7. extrem schlecht sortiert | : > 4.0 |

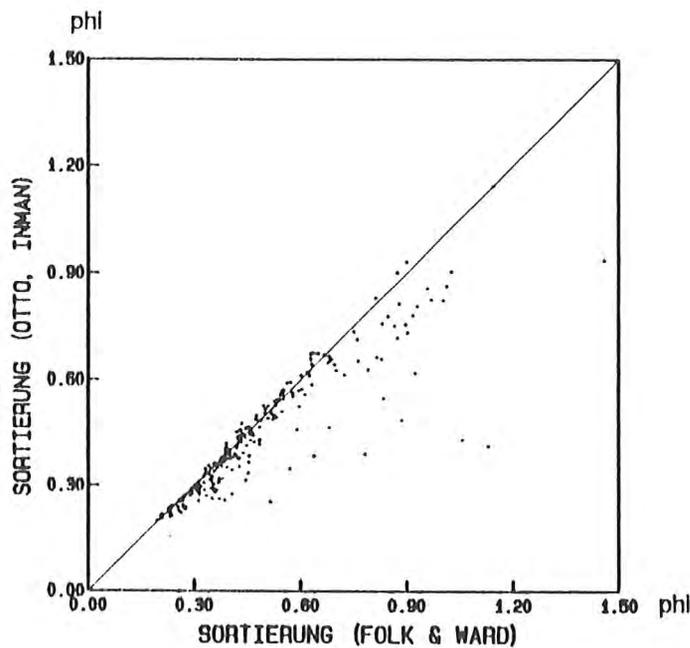


Abb. 39: Verhältnis der So -Werte nach FOLK & WARD zu den So -Werten nach OTTO, INMAN

Durch einen hohen Schillanteil im Sediment konnte der Sortierungswert nach FOLK & WARD (1957) häufig nicht berechnet werden, da der 95 %-Korndurchmesser für diese Berechnung fehlte. Daher wurde neben dieser Berechnung auch die Formel von OTTO (1939) und INMAN (1952) für die Bestimmung der Sortierung angewandt, da diese nur den Kornbereich zwischen 16 und 84 % berücksichtigt:

$$So = (\phi_{84} - \phi_{16})/2$$

Die Abbildung 39 zeigt das Verhältnis der zwei Sortierungswerte zueinander. Im Bereich der niedrigen Sortierungswerte (bis $So = 0.7$) ist die Abhängigkeit bei Sedimenten, die keinen oder nur einen geringen Schillanteil aufweisen, linear.

Bei größeren Schillanteilen erhöht sich der So -Wert nach FOLK & WARD gegenüber dem von INMAN stärker, da mit dem d_{84} -Wert häufig nur die Sandkomponente des Sedimentes erfaßt wurde, während der d_{95} -Wert der Kornsummenlinie im Bereich der Korngrößen des Schillanteils liegt.

e. Schiefe (Sk)

Die Schiefe oder Skewness ist ein Maß für die Symmetrie einer Verteilungskurve. INMAN (1952) berechnet die Skewness nach der Formel:

$$Sk = (\phi_{16} + \phi_{84} - 2*\phi_{50})/(\phi_{84} - \phi_{16})$$

Symmetrische Kurven besitzen einen Sk -Wert von 0. Die Schwankungsbreite der Werte liegt zwischen -1 und +1, wobei die Kornverteilungen, die im größeren Teil schlechter sortiert sind, einen positiven Sk -Wert aufweisen, während jene, welche im feinen Kornspektrum schlechter sortiert sind, einen negativen Sk -Wert annehmen.

FOLK (1974) klassifiziert die Kornverteilungen anhand der Schiefewerte in 5 Klassen:

1. stark fein schief	: -1.0 bis < -0.3
2. fein schief	: < -0.1 bis -0.3
3. symmetrisch	: < 0.1 bis -0.1
4. grob schief	: < 0.3 bis 0.1
5. stark grob schief	: < 1.0 bis 0.3

f. Kurtosis (K)

Die Kurtosis gibt das Verhältnis zwischen der Breite im zentralen Teil der Kornverteilungskurve und der Breite zwischen den groben und feinen Anteilen des Sediments an. FOLK & WARD (1957) berechnen die Kurtosis mit:

$$K = (\phi_{95} - \phi_{5})/2.44*(\phi_{75} - \phi_{25})$$

Normale Kornverteilungskurven weisen einen K-Wert von 1 auf, während bimodale Verteilungen einen Kurtosiswert von < 1 bis 0.6 besitzen können. Sedimente, die eine schlechte Sortierung im groben oder feinen Bereich aufweisen, nehmen Werte zwischen 1.5 und 3 an.

Anhand der Kurtosiswerte unterscheidet FOLK (1974) sechs Klassen:

1. very platykurtic	: < 0.67
2. platykurtic	: < 0.9 bis 0.67
3. mesokurtic	: < 1.11 bis 0.9
4. leptokurtic	: < 1.5 bis 1.11
5. very leptokurtic	: < 3.0 bis 1.5
6. extremly leptokurtic	: > 3.0

Die Kurtosis, die als Parameter zur Differenzierung von uni- und bimodalen Sedimenten herangezogen wird, kann jedoch nur dann bimodale Sedimente erfassen, wenn keiner der Anteile der zwei Ausgangssedimente weniger als 25 % des Mischsediments beträgt. Zumeist wird die Kurtosis jedoch zur Differenzierung von Environments genutzt (FOLK 1974).

7.2. Sonstige Auswertesoftware

Die meisten Programme, die zur Auswertung und Darstellung der gewonnenen Ergebnisse eingesetzt wurden, sind auf verschiedenen Rechnern (HP 1000A, DEC Microvax II, PC-AT) selbst entwickelt worden. Die Programmiersprache ist FORTRAN-77, während zur Steuerung des Bildschirms bei der graphischen Datenverarbeitung auf den größeren Rechenanlagen "REGIS" und zur Ausgabe auf den Plotter "HP-GL" eingesetzt wurde.

Die Clusteranalysen sind mit dem FORTRAN-77 Programm 'CLUSTER', das auf dem Austauschverfahren beruht (SPÄTH 1978 u. 1983, LIEBIG & RAGUTZKI 1987) ausgeführt worden. Statistiken sind mit dem Programm 'STATGRAPHICS' erstellt worden, während die graphische Darstellung der Ergebnisse mit Hilfe einer Vielzahl verschiedener selbstentwickelter FORTRAN-77 Programme und 'MS-CHART' verwirklicht wurde.

8. Ergebnisse der sedimentologischen Untersuchungen

8.1. Korngrößenanalysen

8.1.1. Vorbemerkungen

Das Ziel von sedimentologischen Studien ist es, von Kornverteilungen untersuchter Sedimente auf die Umlagerungsvorgänge zu schließen, denen diese Sedimente unterlagen. Für die Darstellung von Kornverteilungen sind die Histogrammform und Kornsummenkurven am gebräuchlichsten. Bei der Interpretation der Verteilungskurven in Bezug auf die Transportarten wird das Wahrscheinlichkeitsdiagramm bevorzugt (DOEGLAS 1946, DECHEND & RICHTER 1953, INMAN &

CHAMBERLAIN 1955, VISHNER 1969), während die hyperbolischen Verteilungskurven nach BAGNOLD & BARNDORFF-NIELSEN (1980) bisher nur wenig angewandt wurden.

Da sich die Auswertung und Interpretation von Kornverteilungskurven bei großem Probenumfang als schwierig erwies, wurden zur Beschreibung der Kornverteilungen die unterschiedlichsten Korngrößenmaße wie d_{50} , Medianwert, Ungleichkörnigkeitszahl, Sortierung, Schiefe und Kurtosis entwickelt (TRASK 1932, OTTO 1939, INMAN 1952, FOLK & WARD 1957, FRIEDMAN 1961, McCAMMON 1962, WALGER 1971). Für die einzelnen Kennwerte wurden von den genannten Autoren auch voneinander abweichende Formeln veröffentlicht. Vergleichende Betrachtungen dieser verschiedenen Kennwerte untereinander sind von FOLK (1966), SEVON (1968), ISPHORDING (1972), MOUSSA (1977) und KACHHOLZ (1982) durchgeführt worden. Nach KACHHOLZ (1982) sind die Kennwerte nach FOLK & WARD (1957) dem Quartil-System von TRASK (1932), den Formeln von FRIEDMAN (1961), die auf dem Momenten-System beruhen, und den Formeln von WALGER (1971), deren Basis das Perzentil 99-System darstellt, vorzuziehen.

Die Erfassung und Beschreibung von Transportvorgängen durch einzelne Korngrößenparameter von Sedimenten ist wohl die am häufigsten angewandte Methode in sedimentologischen Studien. Hierbei werden zumelst die mittleren Korndurchmesser (d_{50} , Median) sowie die Sortierungswerte verwendet (SIMON 1935, KRUMBEIN 1938, HOUGH 1940, INMAN 1949, MENARD 1949, INMAN 1953, INMAN & CHAMBERLAIN 1955, HINTZ 1956, WALGER 1961, DOEGLAS 1968, ANWAR 1974, FOLK 1974, WINKELMOLEN & VEENSTRA 1974, STAPOR & TANNER 1975, VEENSTRA & WINKELMOLEN 1976, KIRCHNER 1978, TABAT 1979, WINTON et al. 1981, SCHWARZER 1989, ZIEGLER 1989, SHA 1990). Die Sedimentkennwerte Skewness und Kurtosis werden zur Klärung von Transportvorgängen und häufig zur Differenzierung unterschiedlicher Environments benutzt (HOUGH 1940, INMAN 1953, MILLER & OLSEN 1955, MASON & FOLK 1958, DUANE 1964, MARTINS 1964, SAHU 1964, FRIEDMAN 1967, KOLDIJK 1968, HAILS & HOYT 1969, BULLER & McMANUS 1972, SONU 1972, FOLK 1974, STAPOR & TANNER 1975, NORDSTROM 1977, KIRCHNER 1978, KOMAR 1988, ZIEGLER 1989).

Zur Auswertung und Überprüfung der Siebanalysen mit dem Programm "KOKUR" wurden die Kornverteilungen in Form von Kornsummenkurven am Bildschirm dargestellt und anschließend geplottet. Daneben erwies sich aber auch die flächenmäßige Darstellung der Kornverteilungen in Histogrammform als sehr sinnvoll und wird im folgendem Kapitel behandelt. Die Wahrscheinlichkeitsdiagramme der Kornverteilungen (VISHNER-Diagramme) wurden ebenfalls erstellt. Auf die Aussage- und Interpretationsfähigkeit dieser Darstellungsform wird in einem späteren Kapitel eingegangen.

8.1.2. Ergebnisse der Korngrößenanalysen

8.1.2.1. Kornverteilungen

Durch den Gebrauch von statistischen Sedimentparameter geht eine Menge an Informationen verloren, die beim Vergleich von Kornverteilungen herauszuarbeiten sind, während mit den Sedimentkennwerten häufig leichte Änderungen im Kornspektrum nicht erfaßt werden können. Deshalb wurden die Sedimente aller Beprobungsserien in Form von Kornverteilungshistogrammen jeweils für den Strand einschließlich des unmittelbaren Vorstrands (Abb. 47-53) sowie für das Seegebiet (Abb. 40-

46) getrennt dargestellt. Die gewählte Darstellungsform ist zwar aufgrund der hohen Probendichte recht unübersichtlich und für einen schnellen Überblick wenig geeignet, jedoch ermöglicht gerade sie die Erfassung von Transportvorgängen, die sich häufig durch leichte Verschiebungen der Kornfraktionsanteile in Transportrichtung bemerkbar machen. Die anderen möglichen Darstellungsformen können diese Anforderungen nicht oder nur in geringerem Umfang erfüllen.

Der Beprobungspunkt ist in den Histogrammen jeweils durch die Mitte der Abszisse gekennzeichnet. Der Übersichtlichkeit halber wurden in manchen großmaßstäblichen Karten die Ergebnisse einzelner Sedimentproben nicht dargestellt, da sich die Diagramme zu stark überschneiden. Ausgehend von der Beprobungsserie 04/88 werden die Sedimentverteilungen im Seegebiet und am Strand im Folgenden dargestellt.

8.1.2.1.1. Die Sedimente im Seegebiet

Aus dem Kornverteilungshistogrammen der Beprobungsserie des Frühjahrs 1988 (Abb. 43) ist zu ersehen, daß die meisten Sedimente im Untersuchungsgebiet als Fein- bis Mittelsande anzusprechen sind. Grobsande sind nur selten anzutreffen und zumelst auf größere Schillbruchanteile im Sediment zurückzuführen.

Im Seegebiet nördlich des Norderneyer Riffbogens treten zumelst stark mittelsandige Feinsande bis feinsandige Mittelsande auf. Zum Riffbogen hin nimmt die Feinsandkomponente zu. Die Sedimente des äußeren Riffbogens nördlich der Nordergründe sind als schwach mittelsandige bis mittelsandige Feinsande anzusprechen. Der Übergangsbereich zwischen dem nördlich vorgelagertem Seegebiet und dem Riffbogen ist in N-S Richtung z. T. durch zweigipflige, sich kontinuierlich ändernde Kornverteilungshistogramme gekennzeichnet, die auf Austauschprozesse zwischen beiden Bereichen schließen lassen.

Der Riffbogen selbst läßt sich anhand der Histogramme in verschiedene Sedimentbereiche untergliedern. Im westlichen Teil des äußeren Riffbogens nördlich von Julst treten im Tiefenbereich zwischen NN -4.0 m bis NN - 3.0 m reine Feinsande auf, die sich bis zum Südrand des Schluchters erstrecken. Nördlich des Schluchters sind die Sedimente der Nordwestgründe als grobsandige Mittelsande mit geringem Feinsandanteil anzusprechen. Weiter nach Osten in Richtung des Platananlandungsbereichs sind die Sedimente deutlich feiner und lassen sich als mittelsandige Feinsande klassifizieren. In Höhe des Platananlandungsbereichs und weiter östlich kommen zumelst Mittelsande mit unterschiedlich großen Anteilen von Grob- und Feinsanden und auch Schluffen vor. Die deutliche Trennung der Riffbogensedimente im Bereich des Schluchters deutet auf eine Unterbrechung des zumelst NE-gerichteten Sedimenttransports hin.

Im Verlauf des Kalfamergats, das dem Julster Watt zugeordnet ist, treten wie im westlichen äußeren Riffbogenabschnitt Feinsande mit geringer Mittelsandkomponente auf. Die Sedimente besitzen jedoch eine etwas schlechtere Sortierung als die Sedimente des äußeren Riffbogens. Einige wenige Sedimente, die zumelst in den tieferen Teilen des Kalfamergats entnommen wurden, sind als mittelsandige Grobsande zu bezeichnen. Dies ist auf hohe Schillbruchanteile, wahrscheinlich holozäner Schillakkumulationen, die in den Rinnen angeschnitten werden (DECHEND & RICHTER 1953, STREIF & SCHUBERT 1988), zurückzuführen.

Das Busetief weist in seinem Verlauf unterschiedliche Kornspektren auf. Die am südlichsten entnommenen Proben sind schwach mittelsandige Feinsande. Die weiter nördlich entnommenen Sedimente sind dagegen deutlich gröber.

Die Vergrößerung ist auf starke morphologische Änderungen dieses Bereichs in den letzten 15 Jahren zurückzuführen. Das Busetief, das früher in Höhe des Ostendes von Juist aus einer N - S Richtung in eine NNE - SSW Richtung umschwenkte, weist heute einen NE - SW gerichteten Verlauf auf. Mit diesem Richtungswechsel ging gleichzeitig eine Vergrößerung der Robbenplate nach Süden und eine Erosion der Hohen Plate einher, bei der sich das Busetief weiter nach Norden vertiefte. Dieser Erosionsprozeß macht sich sedimentologisch durch mittelsandige Grobsande bemerkbar. Der Übergangsbereich zwischen den Feinsanden im südlichen Teil des beprobten Busetiefs und den Grobsanden im nördlichen Abschnitt ist durch bimodale Sedimente gekennzeichnet. Nördlich der anstehenden Grobsande nimmt der Grob- und Mittelsandanteil nach Norden hin kontinuierlich wieder ab. Dort stehen wiederum mittelsandige Feinsande an. Diese Sedimentverteilungen im Verlauf des Busetiefs lassen sowohl auf N-S gerichtete als auch auf S-N gerichtete Transportvorgänge schließen. Dies steht auch in Einklang mit den alternierenden Tidedrömungen.

Die Sedimente der Robbenplate lassen sich als stark mittelsandige Feinsande beschreiben. Am östlichen Rand der Robbenplate sind die entnommenen Sande jedoch etwas feinkörniger als im zentralen Teil der Robbenplate, was auf W-E bis NW-SE gerichtete Transportwege hindeutet.

Im südwestlichen Teil ist anhand der bimodalen Kornverteilungen eine Zufuhr von grobem Material aus der nördlichen Verlängerung des Busetief zu erkennen.

Die Steinplate ist in ihren höheren Bereichen (über NN -2.0 m) durch reine Feinsande gekennzeichnet. In Richtung auf das Riffgat nimmt der Mittelsandanteil ständig zu, da sich hier die starken Tidedrömungen des Riffgats zunehmend bemerkbar machen.

Die Sedimente aus den Rinnen des Riffgats, Norderneyer Seegats und des Schluchter sind durch stark voneinander differierende Kornspektren charakterisiert. Die Mittel- und Grobsandanteile sind gegenüber den Feinsandfraktionen deutlich stärker vertreten. Daneben sind auch häufig bimodale Kornverteilungen zu erkennen. Aufgrund der in den Rinnen im Tiderythmus ständig wechselnden Transportrichtungen lassen sich durch die Kornverteilungen keine eindeutigen Aussagen über die dominierenden Transportrichtungen treffen.

Der Norderneyer Inselvorstrand ist ein Bereich, in dem sehr feinkörnige Sedimente vorkommen. Bei normalen Wetterlagen sind die wellen- und tideerzeugten Strömungen deutlich schwächer als im übrigen Seegatbereich, so daß sich diese Sedimente dort absetzen können. Zum Ausdruck kommt dieser Prozeß durch z. T. beträchtliche Schluff- und Tonanteile im Sediment, die mit dem Ebbstrom aus dem Watt herantransportiert wurden und während geringer tide- und seegangsinduzierter Strömungen sedimentieren konnten.

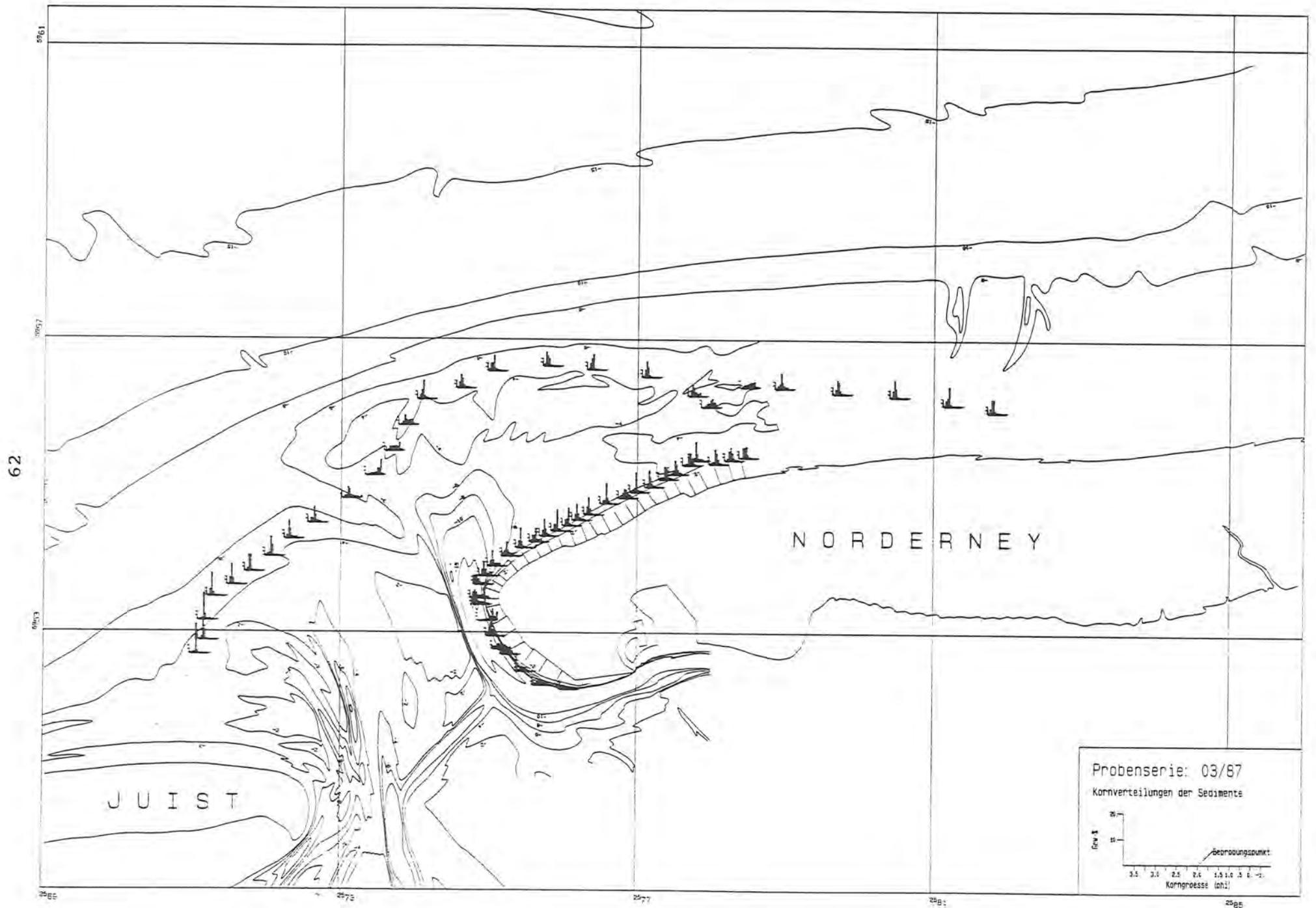
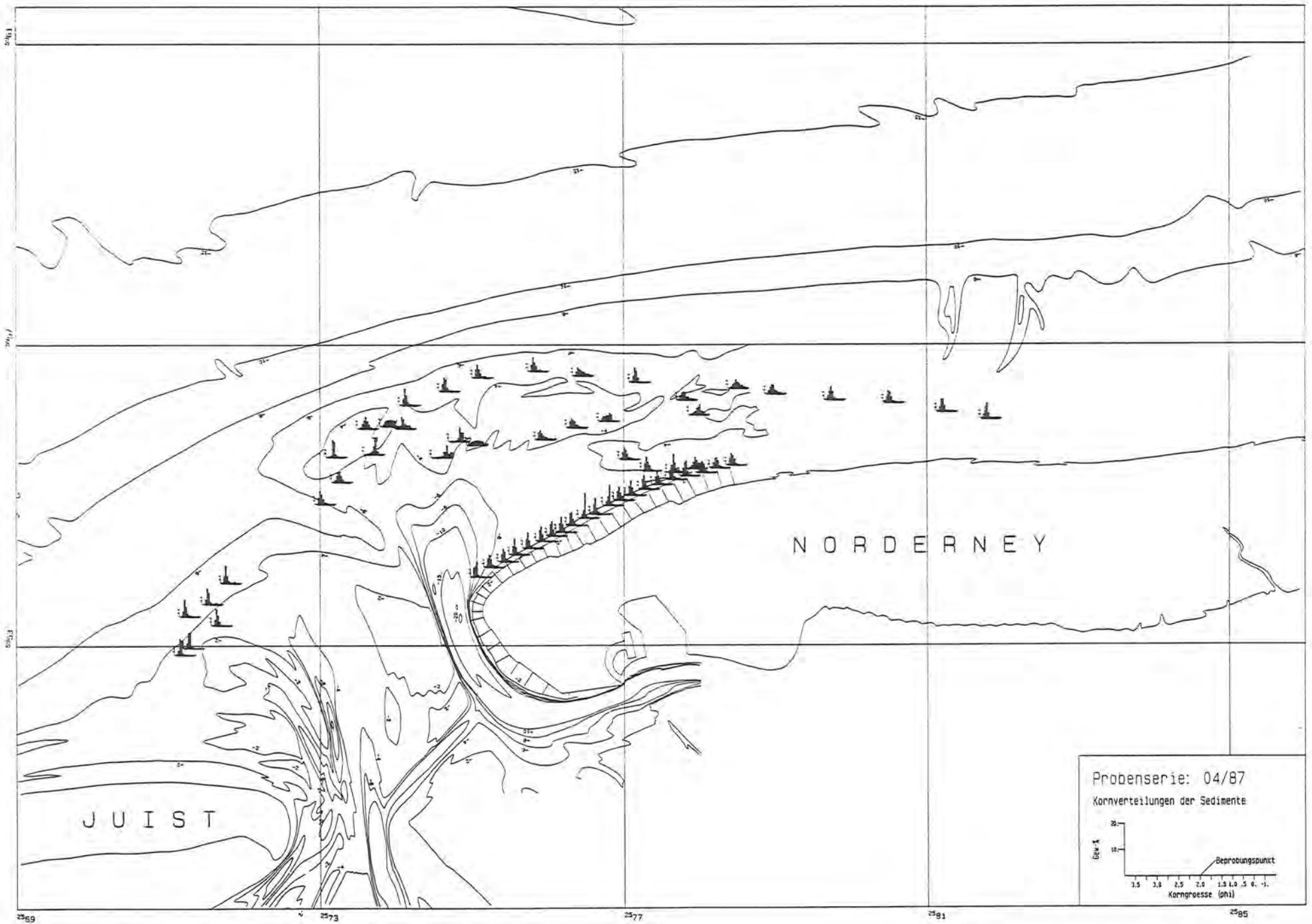
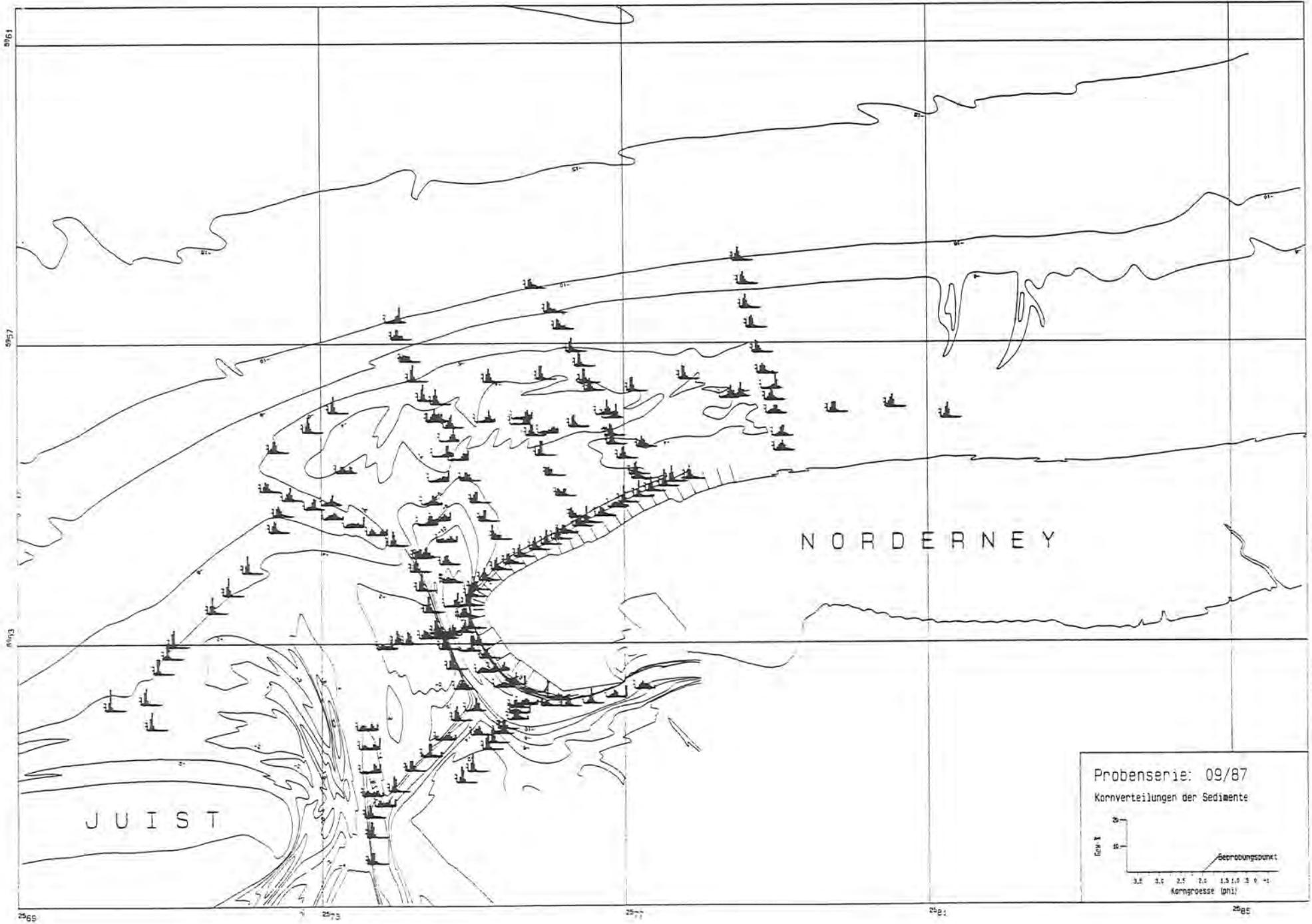


Abb. 40: Kornverteilungen der Beprobungsserie 03/87

Abb. 41: Kornverteilungen der Beprobungsserie 04/87

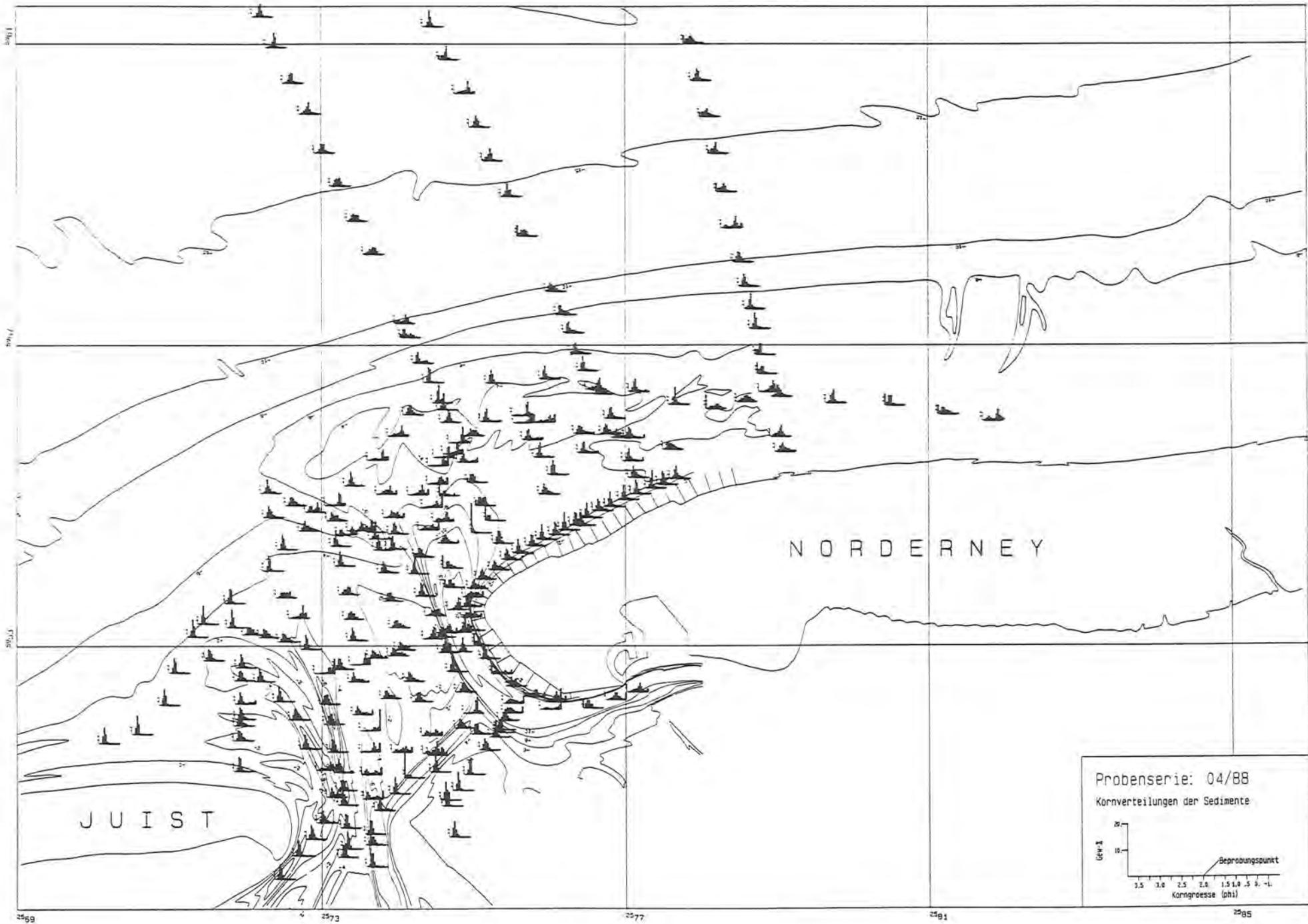


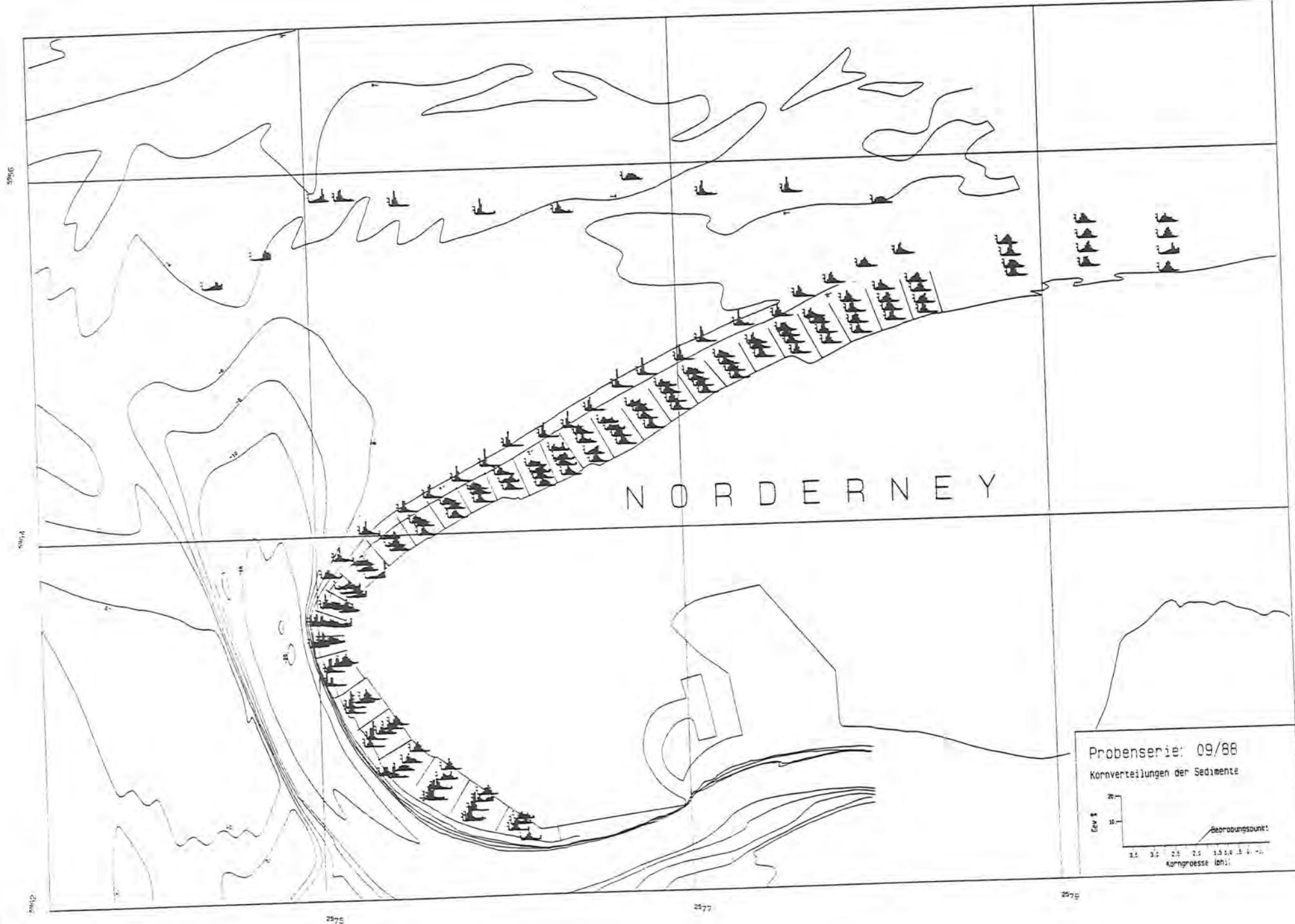


Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/87

Abb. 42:

Abb. 43: Kornverteilungen der Beprobungsserie 04/88



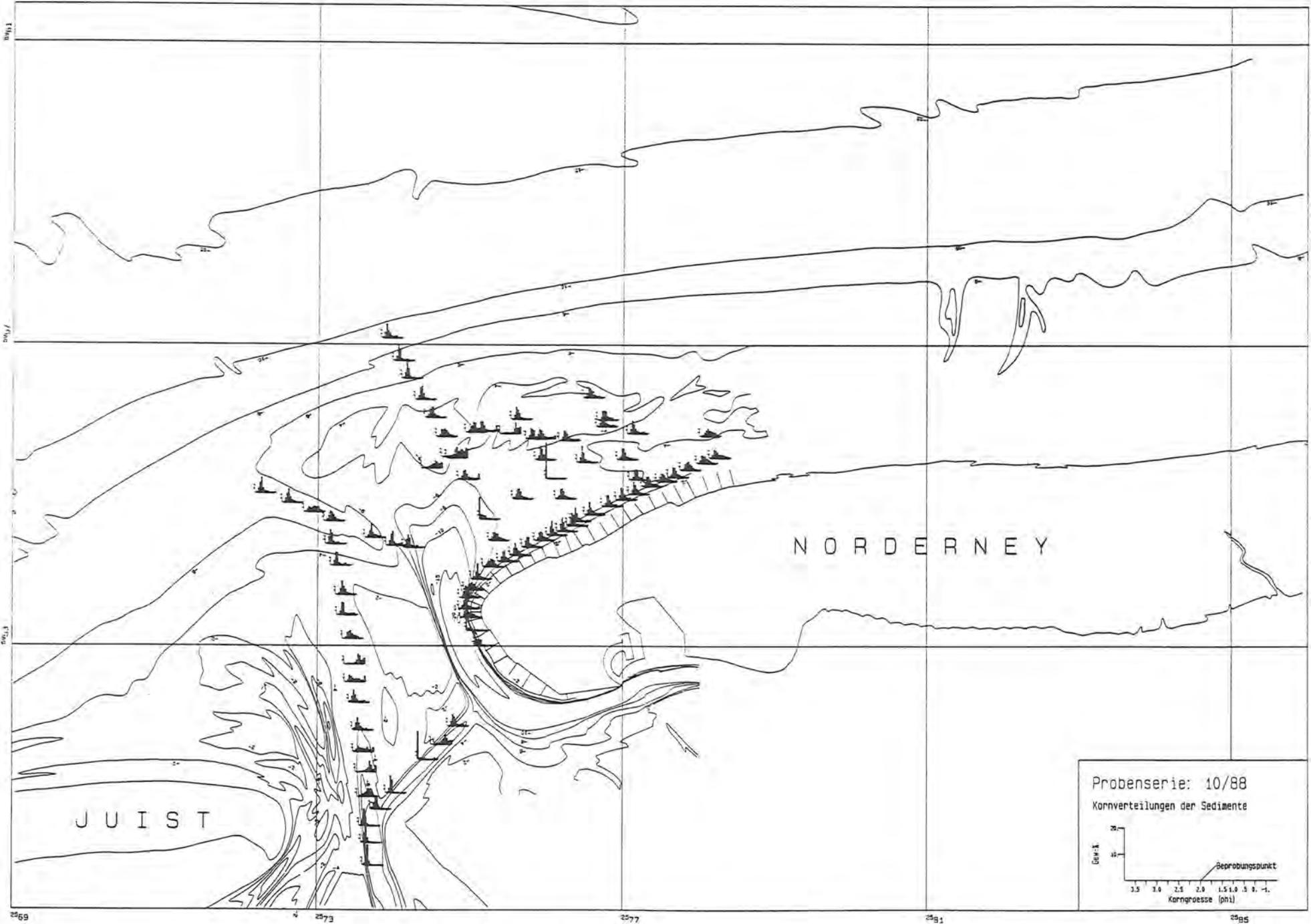


Probenserie: 09/88
Kornverteilungen der Sedimente

The graph shows the grain size distribution of sediments at different depths. The y-axis is labeled "Tiefe [cm]" and ranges from 0 to 20. The x-axis is labeled "Korngröße [phi]" and ranges from 0 to 3.5. A line graph shows the distribution of grain sizes at various depths, with a label "Beprobungstiefe" pointing to the curve.

Abb. 44: Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/88

Abb. 45: Kornverteilungen der Beprobungsserie 10/88



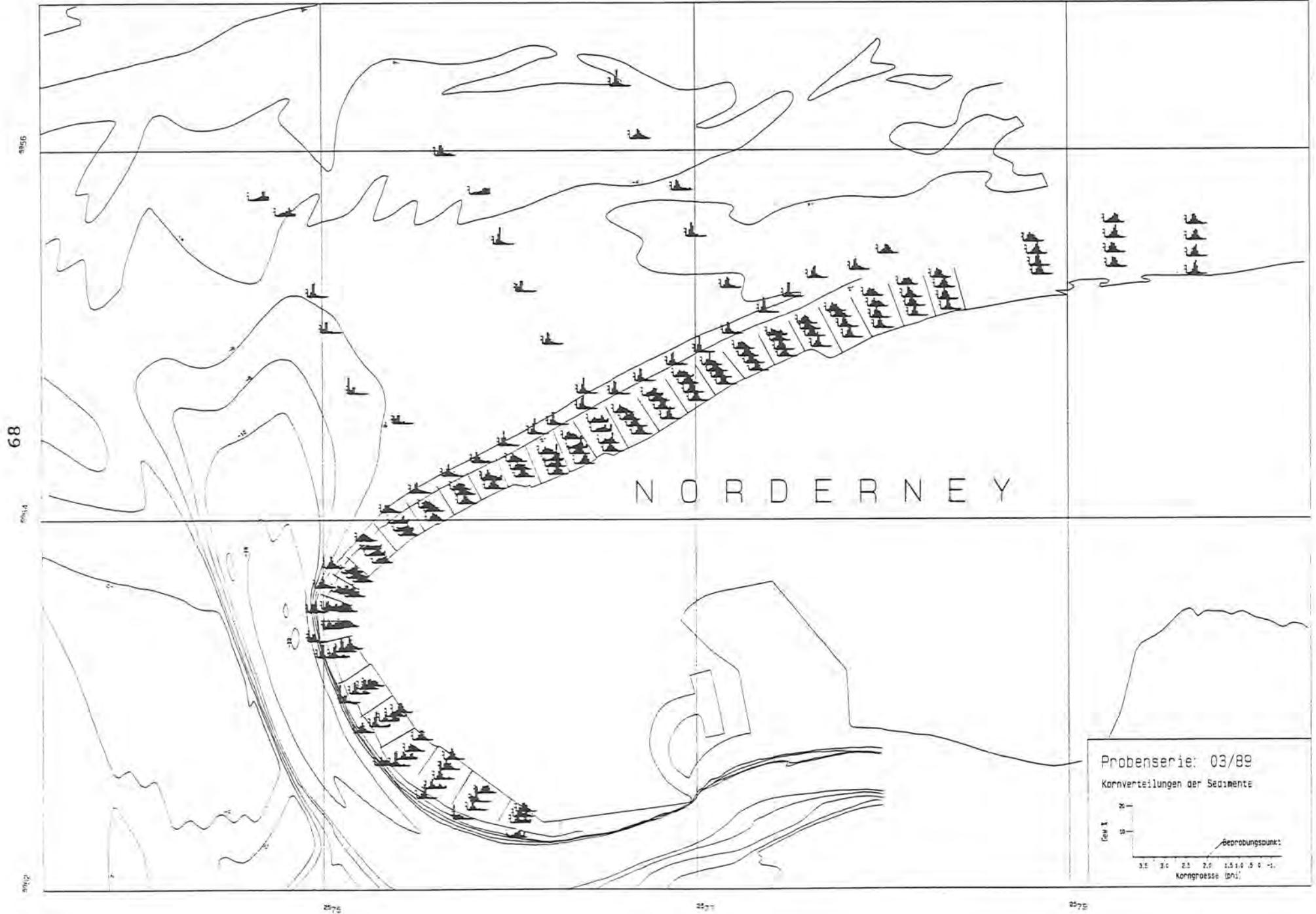


Abb. 46: Kornverteilungen der Beprobungsserie 03/89

Zum inneren Riffbogen hin werden die Vorstrandsedimente wieder gröber und lassen sich als mittelsandige Feinsande bis grobsandige Mittelsande ansprechen. Im Bereich der Bühnenstreichlinie des Norderneyer Nordweststrandes sind die Sedimente sehr gleichförmig zusammengesetzt. Sie lassen sich als reine Feinsande beschreiben, wobei im westlichen Abschnitt die Anteile der Mittelsandfraktionen leicht zunehmen. Im Bereich der Bühnenstreichlinie am Weststrand von Norderney sind sehr unterschiedliche Sedimente entnommen worden. Diese weisen z. T. große Schluff- und Tonanteile auf, die entweder während der Kenterphase des Tidestroms sedimentierten oder aus dem anstehenden, feinkörnigen, holozänen Sedimente des Inselsockels stammen (DECHEND & RICHTER 1953).

Die saisonal bedingten Änderungen der Kornspektren der Sedimente des Seegebiets sind nicht allzu stark. Die Kornverteilungen der Frühjahr- (Abb. 40, 41, 43 und 46) und Herbst-Beprobungen (Abb. 42, 44 und 45) stimmen im wesentlichen überein. Nach ruhigen Wetterlagen (Abb. 40, 42) wird das Kornspektrum der Sedimente gegenüber denen jener Sedimente, die nach stärkerer Seegangseinwirkung entnommen wurden (Abb. 41, 43) enger.

8.1.2.1.2. Die Sedimente des Strandes

Der Norderneyer Strand weist gegenüber dem Vorstrandbereich deutlich gröbere Sedimente auf. Dazu muß jedoch bemerkt werden, daß der Strandbereich seit 1951 sechsmal in unregelmäßigen zeitlichen Abständen mit Sanden aus dem Watt, der Robbenplate und dem Inselvorstrandbereich durch Aufspülungen versorgt wurde (KRAMER 1958a, 1958b, 1973, KRAMER et al. 1963, LUCK 1970, PÄTZOLD 1982, ERCHINGER 1986, STEPHAN 1988). Die aufgespülten Mengen betragen zwischen 240000 und 1800000 m³ Sand. Die ursprünglich vorhandenen Strandsande waren Feinsande, deren mittlerer Korndurchmesser zwischen 0.11 und 0.16 mm betrug (STEPHAN 1988).

Die Analysenergebnisse der dieser Arbeit zugrundeliegenden Strandbeprobungen weisen demgegenüber deutlich gröbere Sedimente am Norderneyer Strand aus (RAGUTZKI & WESTHOFF 1987a, 1987b, 1988, 1990).

Der Weststrand von Norderney ist durch stark voneinander abweichende Kornverteilungen der Sedimente gekennzeichnet. Im Bereich der Niedrigwasserlinie kommen z. T. reine Feinsande vor, während im Mittelwasser- und Hochwasserniveau Mittelsande vorherrschen (Abb. 53). Im Divergenzbereich und in den weiter östlich liegenden Bühnenfeldern kommen hingegen zumelst grobsandige Mittelsande vor und heben sich damit deutlich von den reinen Feinsanden des zugeordneten Vorstrandes und den Sedimenten des Weststrands ab.

Welter nach Osten in Richtung auf den Platananlandungsbereich werden die Sedimente wieder feiner und lassen sich im westlichen Strandabschnitt als mittelsandige Feinsande und im östlichen Teil als feinsandige Mittelsande beschreiben. Die leichte Vergrößerung der Sedimente in den am östlichsten gelegenen Bühnenfeldern ist auf Sedimentzufuhr aus dem Riffbogen oder den östlich gelegenen Strandabschnitten zurückzuführen.

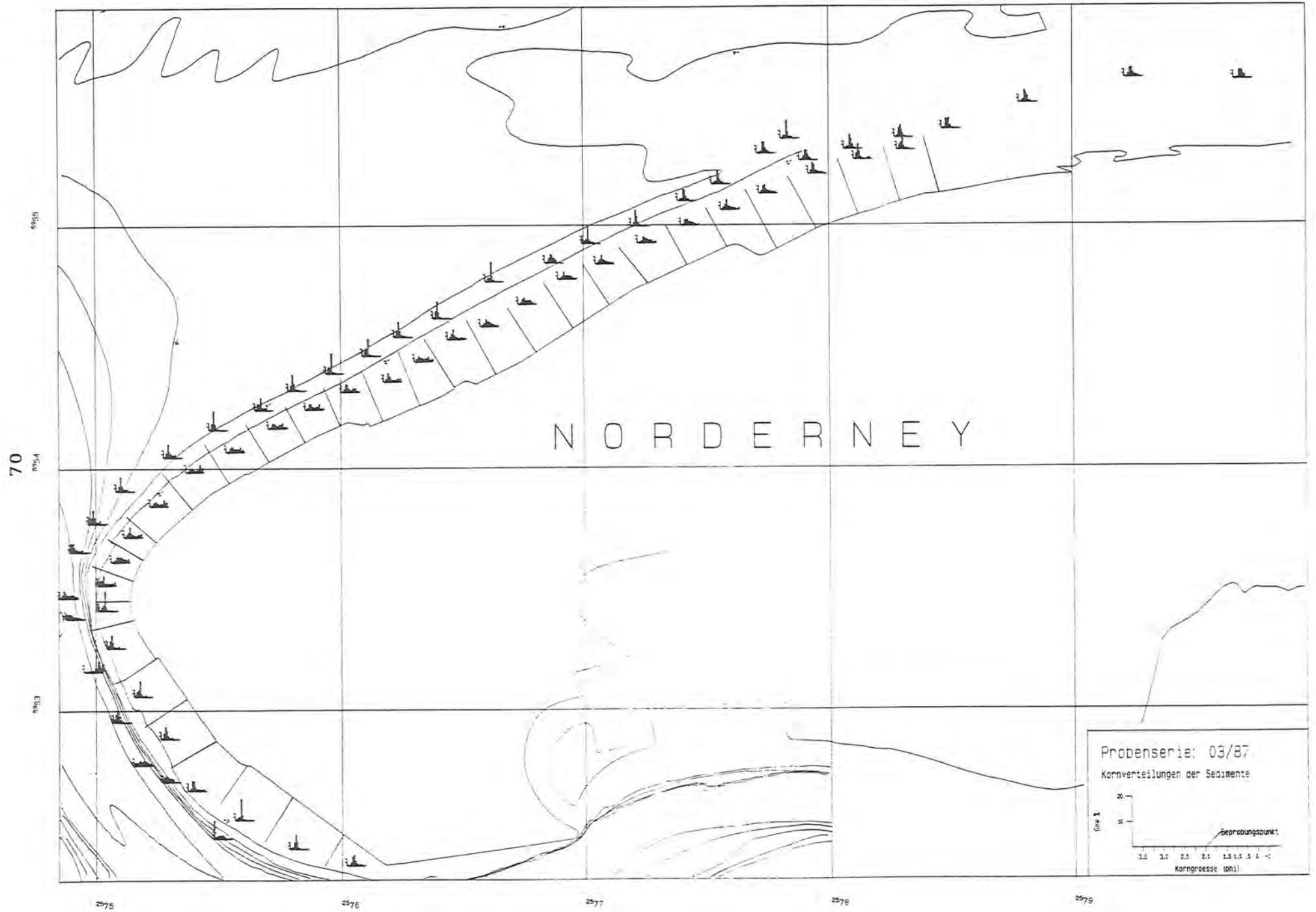


Abb. 47: Kornverteilungen der Beprobungsserie 03/87

Abb. 47:

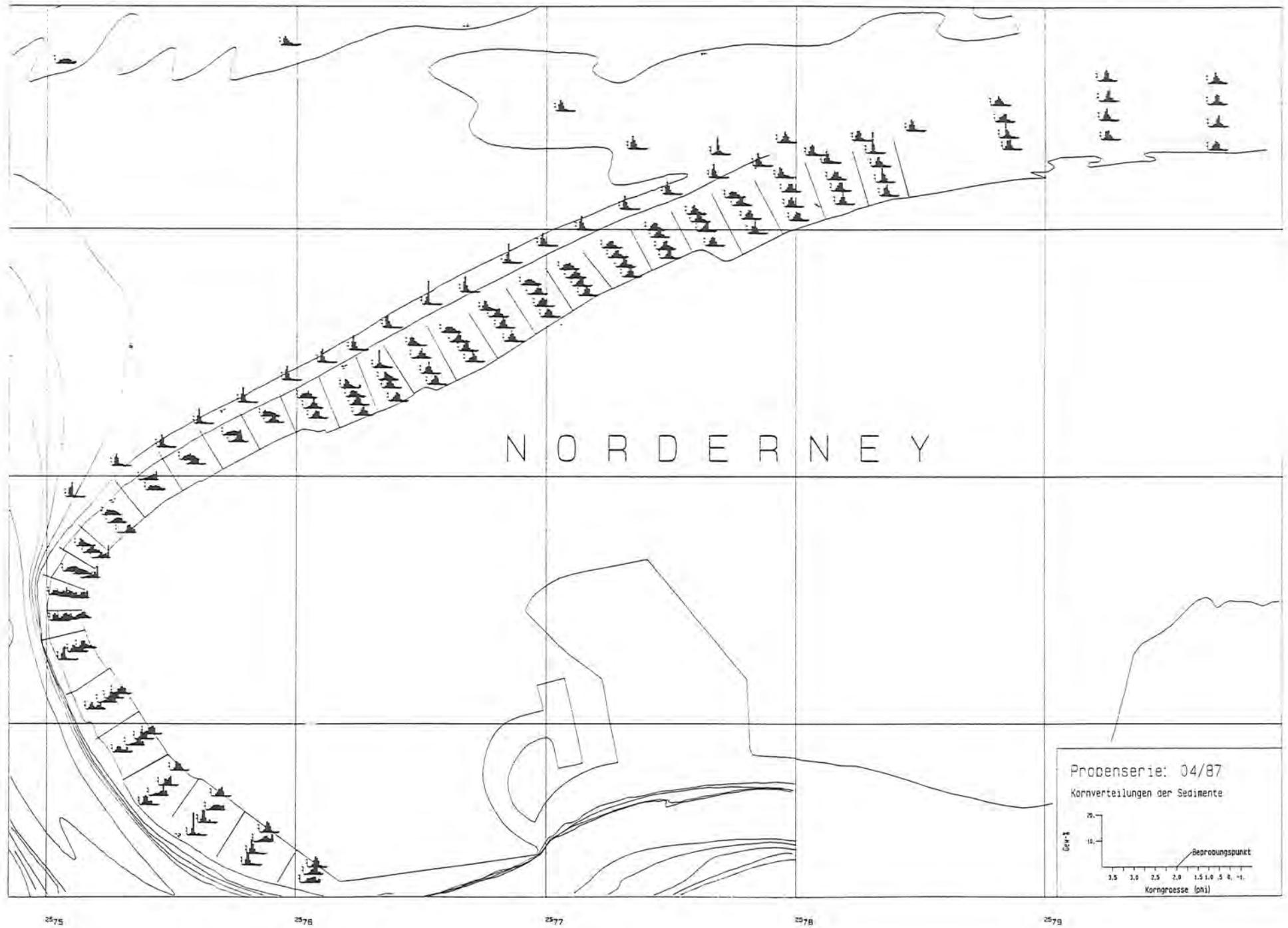


Abb. 48: Kornverteilungen der Beprobungsserie 04/87

54°00' 54°05' 54°10'

2575 2576 2577 2578 2579

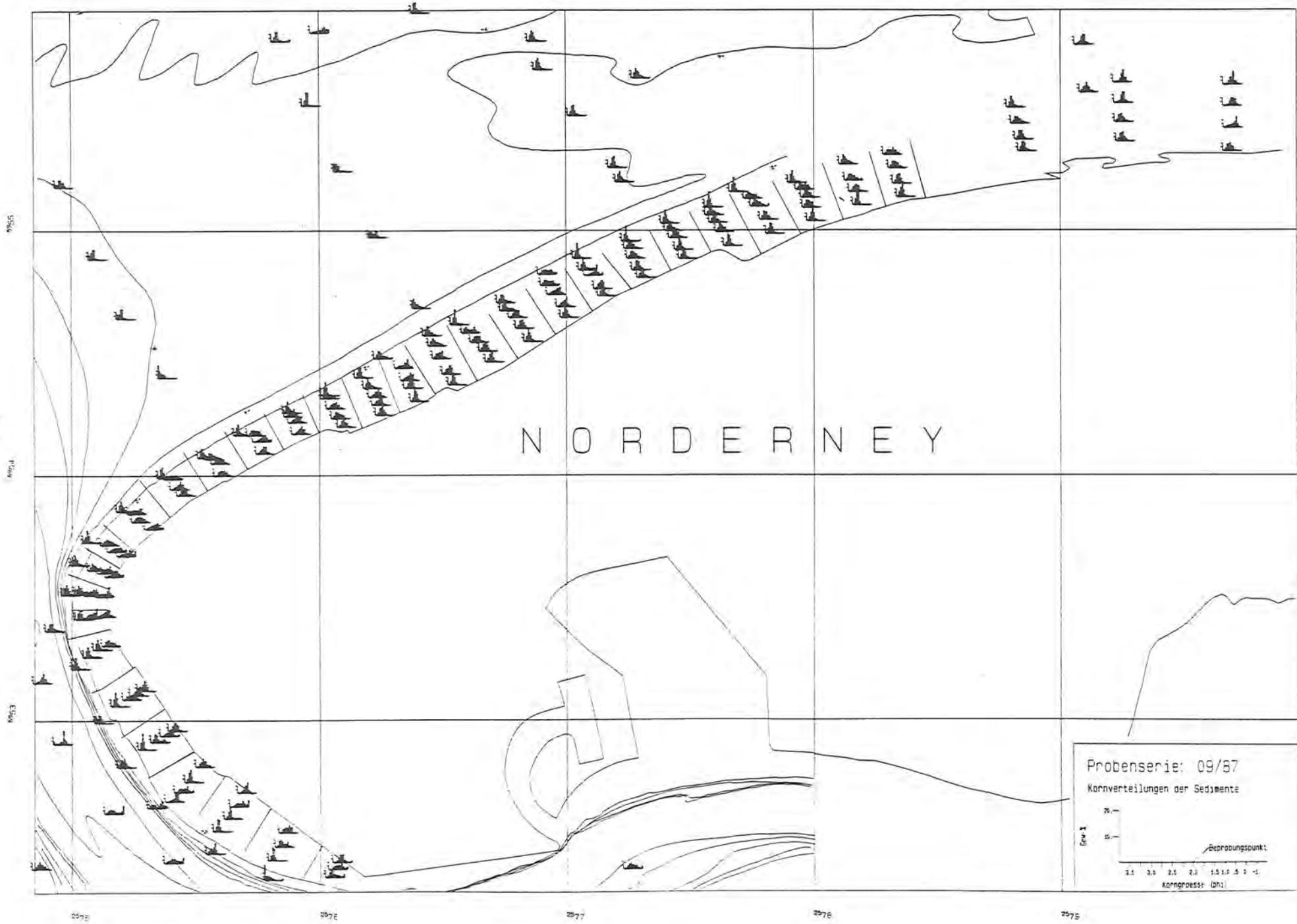
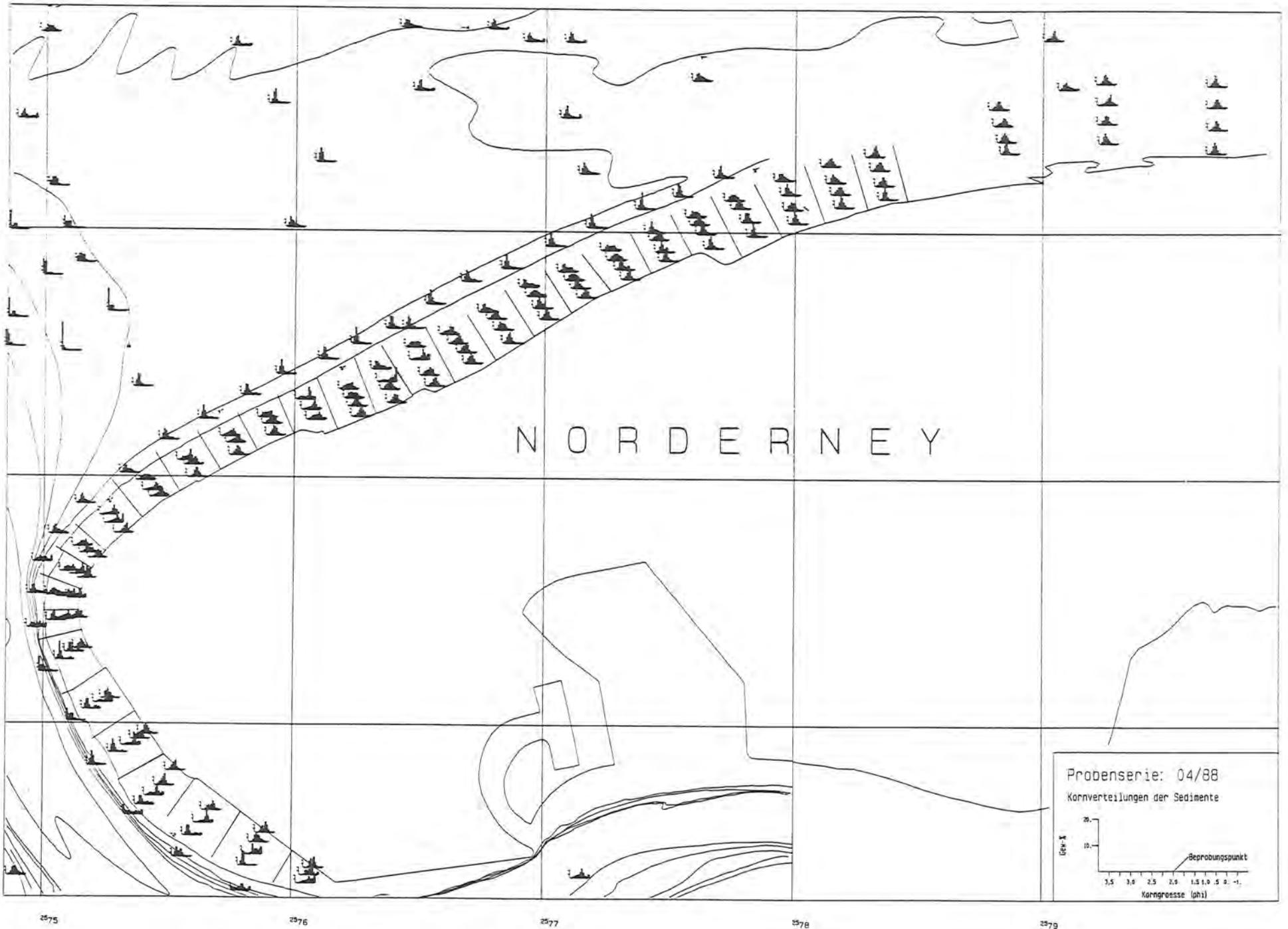


Abb. 49: Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/87

Abb. 49:

Abb. 50:

Kornverteilungen der Beprobungsreihe 04/88



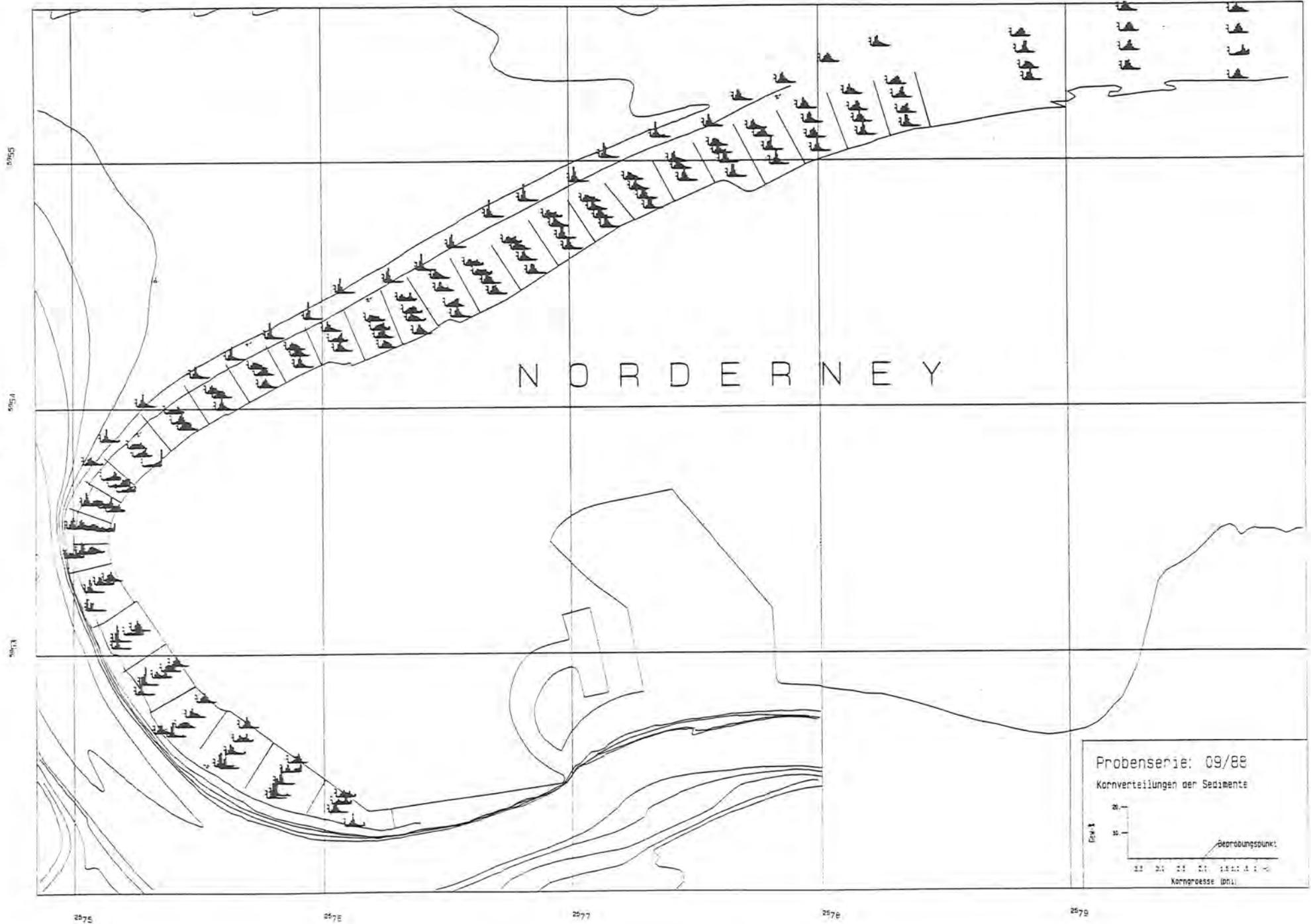
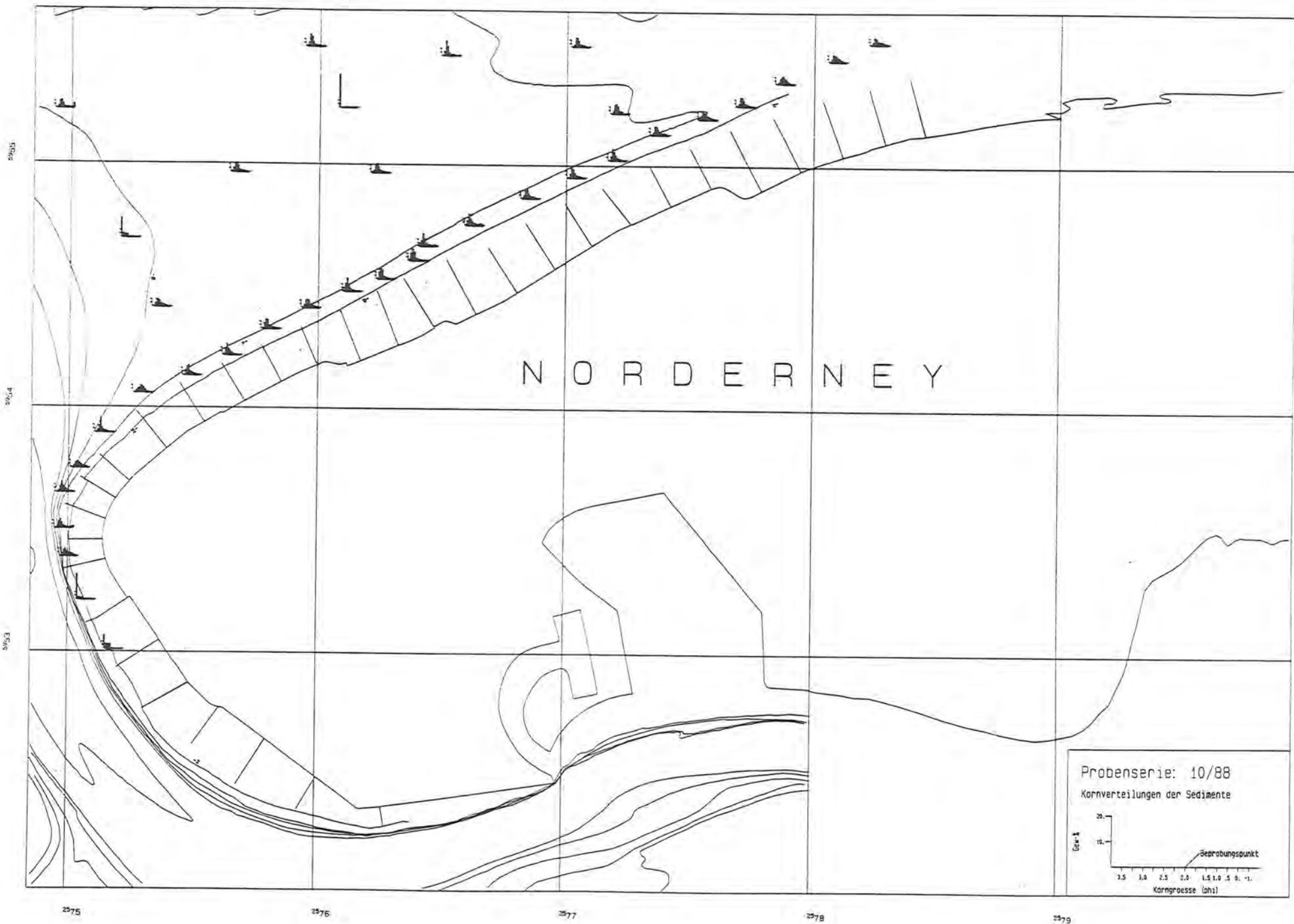
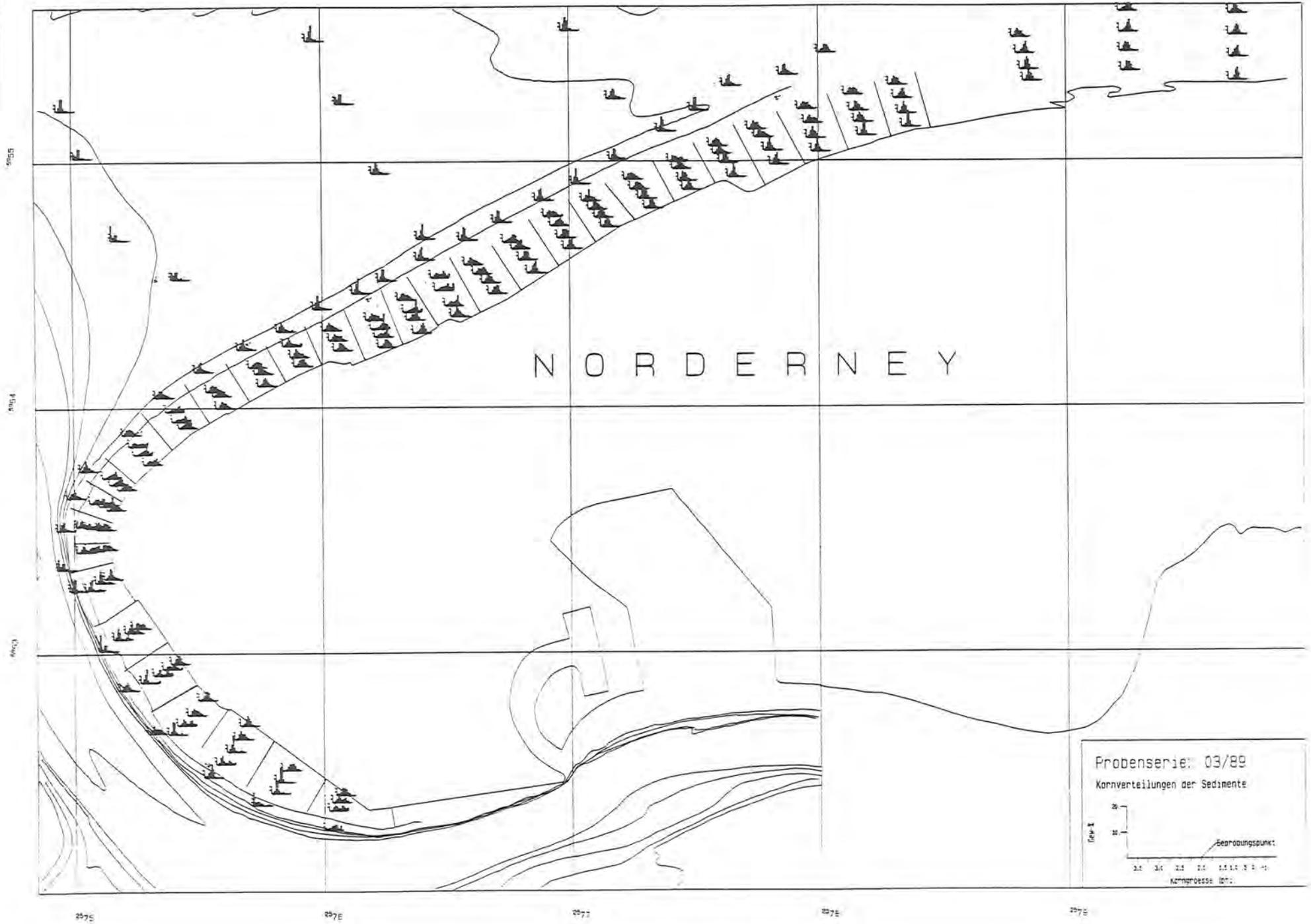


Abb. 51: Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/88

Abb. 52: Kornverteilungen der Beprobungsserie 10/88





Die durch unterschiedlich starke Seegangseinwirkung bedingten Änderungen der Kornverteilungen am Norderneyer Strand sind anhand der Abb. 47-53 gut zu erkennen. Die Histogrammkarten der Probenserien 09/87 und 09/88, die für Sedimentverteilungen nach lange andauernden, ruhigen Wetterlagen typisch sind, zeigen gegenüber den Sedimentverteilungen von Proben, die nach stärkerer Seegangsbeeinflussung entnommen wurden (04/87, 04/88, 03/89), mehr zum feineren Kornspektrum tendierende Kornverteilungen. Das während des erhöhten Energieeintrags durch Seegang erodierte feinere und somit leichter zu transportierende Korn wird zum großen Teil durch die bei starkem Seegang dominierenden, seewärtsgerichteten Brandungsströmungen in den Vorstrandbereich transportiert.

Dieser Sedimenttransport zeigt sich durch erhöhte Anteile der größeren Kornfraktionen in den Vorstrandsedimenten. Die größeren Sedimentfraktionen wurden zwar ebenfalls vom Strand seewärts transportiert, jedoch geschah dies in deutlich geringerem Maße als für die feineren Korngrößen. Dadurch kommt es zur relativen Anreicherung der groben Sedimentfraktionen am Strand. Als Beispiele für diesen Transport können die Abb. 50, 52 und 53 herangezogen werden.

Aus den Histogrammen der Beprobungsserie 03/87 (Abb. 47), die nach einer ausgeprägten Ostwindlage gewonnen wurde, läßt sich gut ein Ost - West gerichteter Sedimenttransport im Bereich der Bühnenstreichlinie erkennen. Die Kornverteilungshistogramme der Sedimente aus der Bühnenstreichlinie, die in den Entnahmeprofilen 23 bis 31 entnommen wurden (Abb. 28), zeigen gegenüber den weiter westlich entnommenen Sedimentproben eine Verschiebung des Kornspektrums zum Groben hin. Der Vergleich dieser Kornverteilungen mit denen der anderen Beprobungsserien zeigt, daß derartige Sedimentverteilungen im Vorstrandbereich atypisch sind. Daher ist davon auszugehen, daß während der Ostwindwetterlage Sediment aus dem Riffbogenbereich, das im allgemeinen gröber ist, nach Westen transportiert wurde und diese Vergröberung hervorrief. Die einen Monat später entnommenen Sedimente (Abb. 48) zeigen schon wieder die normale, sehr gleichförmige Sedimentverteilung im Bereich der Bühnenstreichlinie, wie sie bei westlichen Windlagen vorherrscht.

8.1.2.2. VISHER-Diagramme

Die Darstellung von Kornverteilungen im Wahrscheinlichkeitsdiagramm erlaubt es, Rückschlüsse über die Art des Transportes, dem ein Sediment ausgesetzt war, zu machen (VISHER 1969). Beim VISHER-Diagramm erscheint die Gauss'sche Normalverteilung als eine Gerade. Die meisten Sedimente zeigen jedoch zwei oder mehr linear verlaufende Äste. WALGER (1961), VISHER (1969), ASHLEY (1978) und BRYANT (1986) vertreten die Meinung, daß die einzelnen Äste der Verteilungskurve den unterschiedlichen Transportarten - nämlich rollend (traction load oder bed load), springend (saltation load) und schwebend (suspension load) - zuzuordnen sind (Abb. 54).

Der Beweis, daß die einzelnen Teilpopulationen eines Sedimentes den verschiedenen Transportformen wirklich zuzuordnen sind, ist aber bisher nicht erbracht worden (ZIEGLER 1989). BRYANT (1986) gibt zu bedenken, daß sich diese Hypothese häufig auf Teilpopulationen stützt, die weniger als 5 % vom Gesamtsediment umfassen und daher zu Fehlinterpretationen führen können. Er ist jedoch der Meinung, daß die Interpretation von Teilpopulationen eines Sedimentes hinsichtlich ihrer

Transportart bei Populationsanteilen von über 5 % zulässig ist. Desweiteren sollten zur Beurteilung der Transportart immer mehrere Proben eines definierten Entnahmebereichs analysiert werden, um so die Möglichkeit der Fehlinterpretation zu verringern.

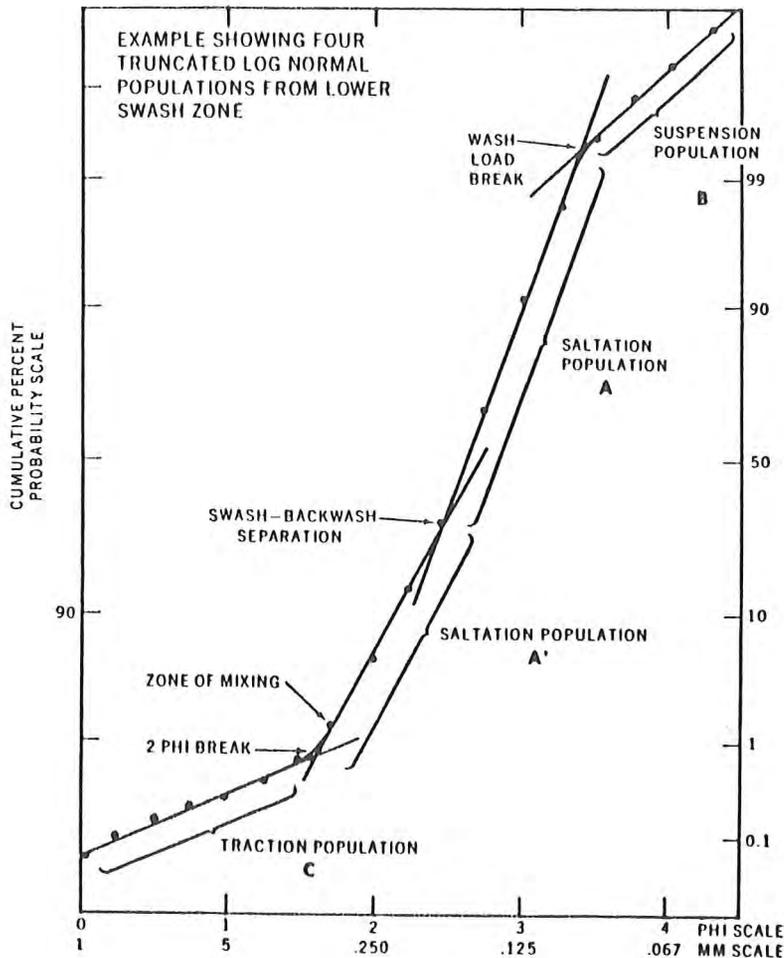


Abb. 54: Wahrscheinlichkeitskurve eines Strandsandes und Zuordnung der Transportarten zu den einzelnen Teilpopulationen des Sedimentes (aus: VISHER 1969)

BAGNOLD & BARNDORFF-NIELSEN (1980) verneinen sogar die Existenz von Teilpopulationen innerhalb eines Sediments und meinen, daß sich die Kornverteilungen von Sedimenten vollständig durch eine hyperbolische Verteilungskurve beschreiben lassen. Diese Meinung vertreten auch GRACE et al. (1978), da sie in Sedimentproben aus einzelnen laminierten Schichten einen hohen Variationsgrad des Grenzwertes, der die einzelnen Teilpopulationen trennt, nachweisen konnten.

Trotz dieser unterschiedlichen Meinungen über die Anwendbarkeit der VISHNER-Diagramme zur Bestimmung der Transportart wurden die Kornverteilungen von jeweils 48 Proben der Entnahmeserien 09/87 (Abb. 55, 56) und 04/88 (Abb. 57, 58) in Wahrscheinlichkeitsdiagrammen dargestellt. Die Abbildungen 55 und 57 umfassen die Strandsedimente der Entnahmeprofile 4, 8, 13, 16, 25 und 34. Fehlten in diesen Profilen die Sedimente des trockenen Strandes, wurden stattdessen die zugeordneten Sedimente aus dem Bereich der Bühnenstreichlinie dargestellt. In den Abbildungen 56 und 58 sind die

Kornverteilungen von Greiferproben aus unterschiedlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes zu sehen. Die Lage dieser Entnahmepunkte ist aus der Abbildung 31 für die Probenserie 09/87 und aus der Abbildung 32 für die Probenserie 04/88 zu entnehmen.

Die Greiferproben P01A, P01F, P02C, P04E, P04L, P04O, P07G und P07J repräsentieren Rinnensedimente, die in unterschiedlichen Tiefen entnommen wurden. Die Proben P05K, P05M, P06L und P03G sind dagegen als Platensedimente zu klassifizieren, während die Proben P08E, P09G, P09I, P10F im Norderneyer Inselvorstrand entnommen wurden. Nördlich des Norderneyer Riffbogens in Tiefen zwischen NN -6.0 und NN -10.0 m wurden die Proben P08N, P08P, P11K und P11M gewonnen. Die Proben der unteren zwei Diagramme der Abbildungen 56 und 58 repräsentieren Sedimente, die in unterschiedlichen Bereichen am äußeren Riffbogen entnommen wurden. Trotz der z. T. unterschiedlichen Probenbezeichnungen sind die Proben der zwei Beprobungsserien jeweils an den gleichen Stellen entnommen worden (s. Abb. 31, 32).

Zur Bewertung der Wahrscheinlichkeitsdiagramme muß noch angemerkt werden, daß es sich bei den entnommenen Proben nicht um definierte Proben aus einer einzelnen Sedimentschicht handelt, die einem einzigen Transportvorgang zuzuordnen ist, sondern um Mischsedimente zumeist mehrerer laminiertes Schichten.

Aus den Abbildungen 55 und 57 ist zu ersehen, daß für die Sedimente des Norderneyer Strandes der "springende" Transport (saltation transport) stark dominierend ist. Dies gilt für den gesamten Strand von Norderney und hier insbesondere für die höher gelegenen Strandbereiche. Suspensionstransport (suspension transport) ist lediglich im Bereich der Bühnenstreichlinie wirksam, wo größere Anteile der feinen Kornfraktionen vorhanden sind, während der "rollende Transport" (traction transport) in den unteren Bereichen des nassen Strandes am Weststrand und am Westkopf wirksam sind.

Durch die stärkere Seegangsbeflussung im Winter 1988 hat sich der Verlauf der Kornverteilungskurven nur wenig geändert. Die Neigung der Kurven ist etwas flacher geworden und der Anteil der durch rollenden Transport bewegten Sedimente ist im Bereich der Niedrig- und Mittelwasserlinie etwas größer geworden.

Die Greiferproben zeigen gegenüber den am Strand entnommenen Sedimenten deutlich vielfältigere Kurvenverläufe im Wahrscheinlichkeitsdiagramm. Die Sedimente, die in den oberen zwei Diagrammen der Abbildungen 56 und 58 dargestellt sind und in den tiefen Rinnen des Untersuchungsgebietes gewonnen wurden, sind sowohl durch "suspension transport", "saltation transport" und "traction transport" geprägt worden. Die Anteile der einzelnen Transportarten sowie die Kornspektren, die durch die unterschiedlichen Transportarten bewegt wurden, weichen stark voneinander ab. Hierzu ist anzumerken, daß in den Rinnen die Stärke und die Richtung des Tidestroms durch den Tidenverlauf ständig wechselt. Dies mag die verschiedenen Kurvenverläufe der Kornverteilungen dieser Sedimente erklären.

Die Sedimente der Robbenplate (P06L, P03G) sind ebenso wie die Sedimente der Steinplate (P05K, P05M) hauptsächlich durch den springenden Sedimenttransport geprägt worden. Die größeren Sedimentfraktionen der Robbenplate-Sedimente sind daneben aber auch noch durch "traction transport" -Vorgänge bewegt worden.

Kornverteilungen vom Herbst 1987

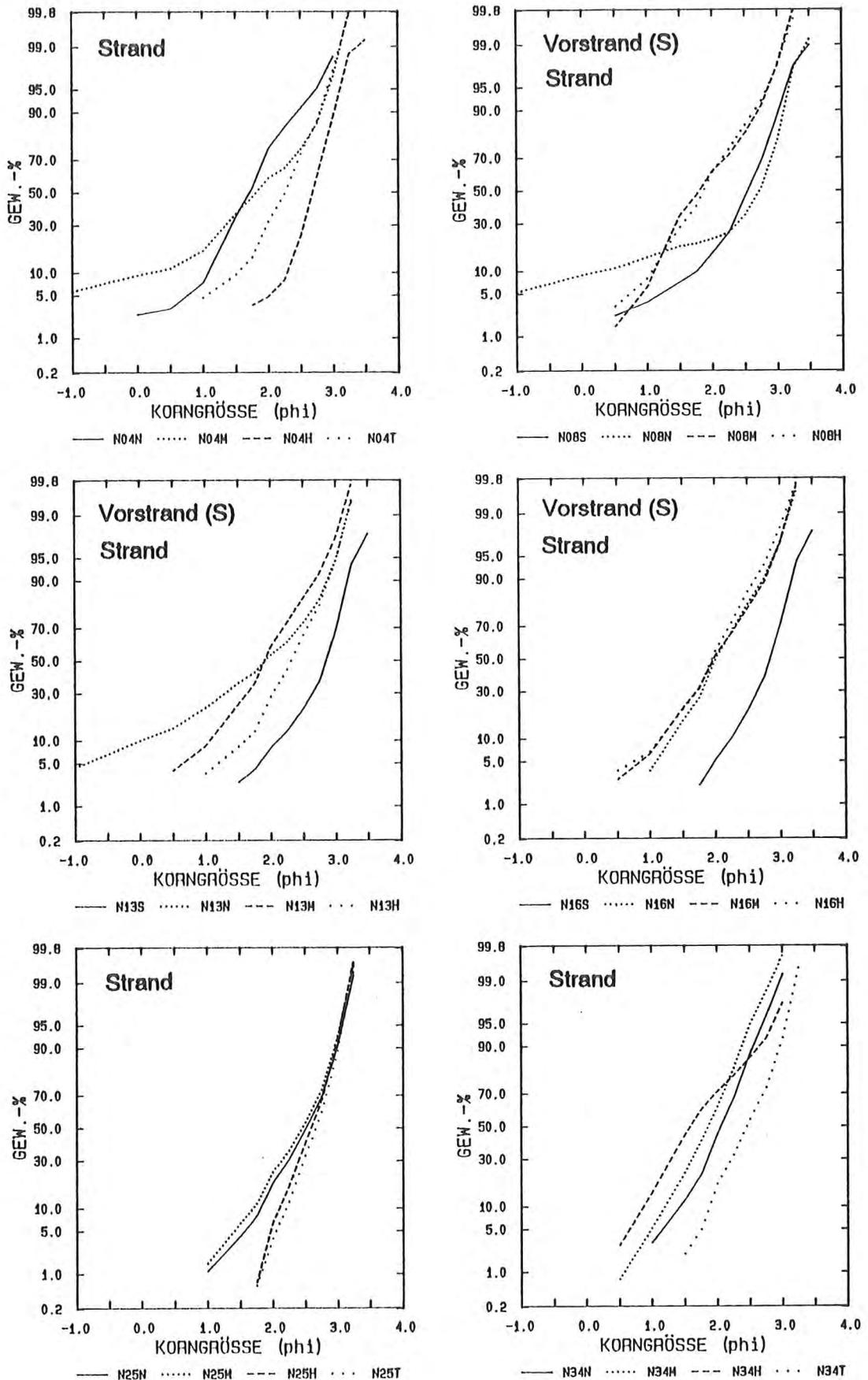


Abb. 55:

Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Strandsanden der Beprobungsserie 09/87

Kornverteilungen vom Herbst 1987

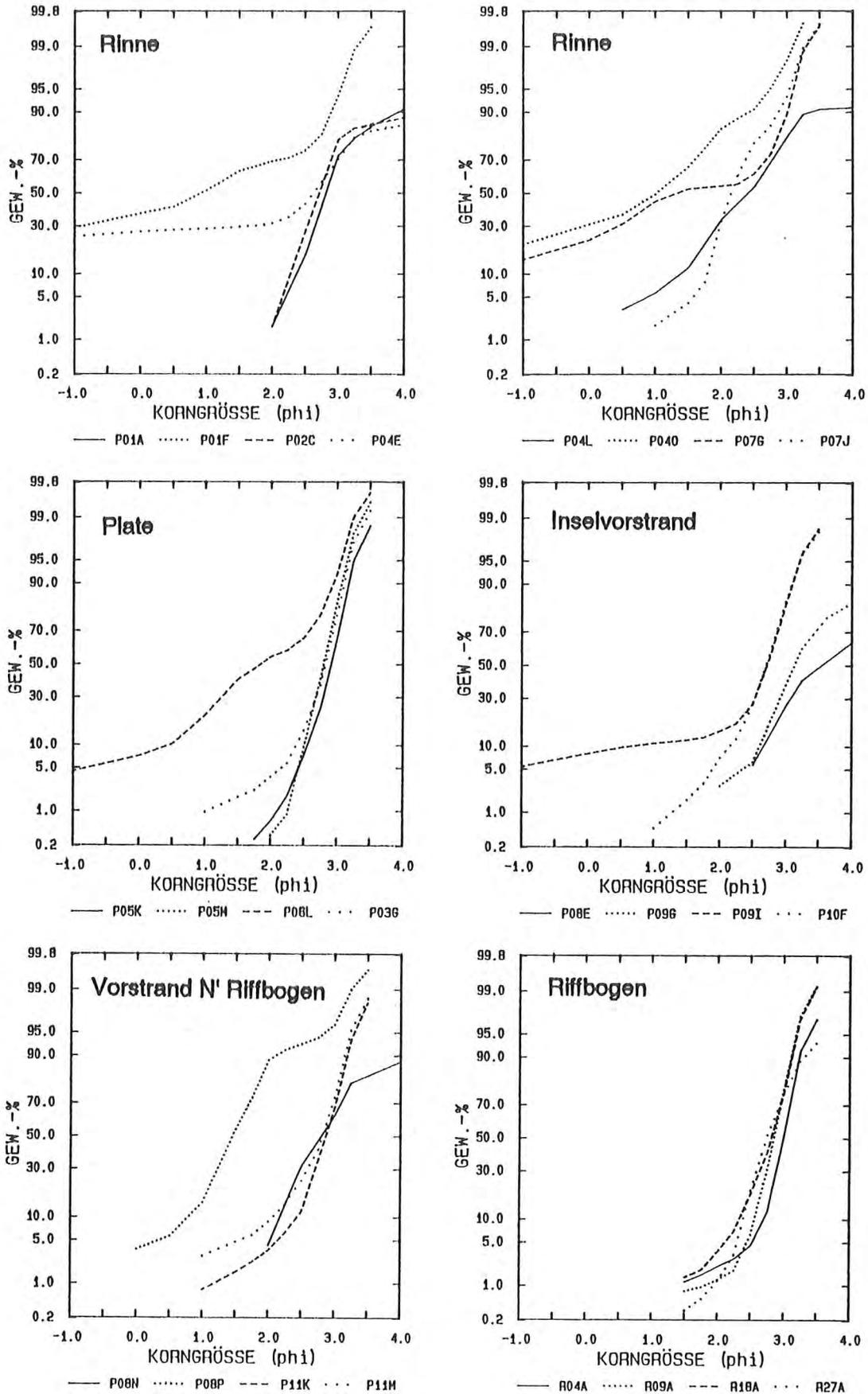


Abb. 56: Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Greiferproben der Beprobungsserie 09/87

Kornverteilungen vom Frühjahr 1988

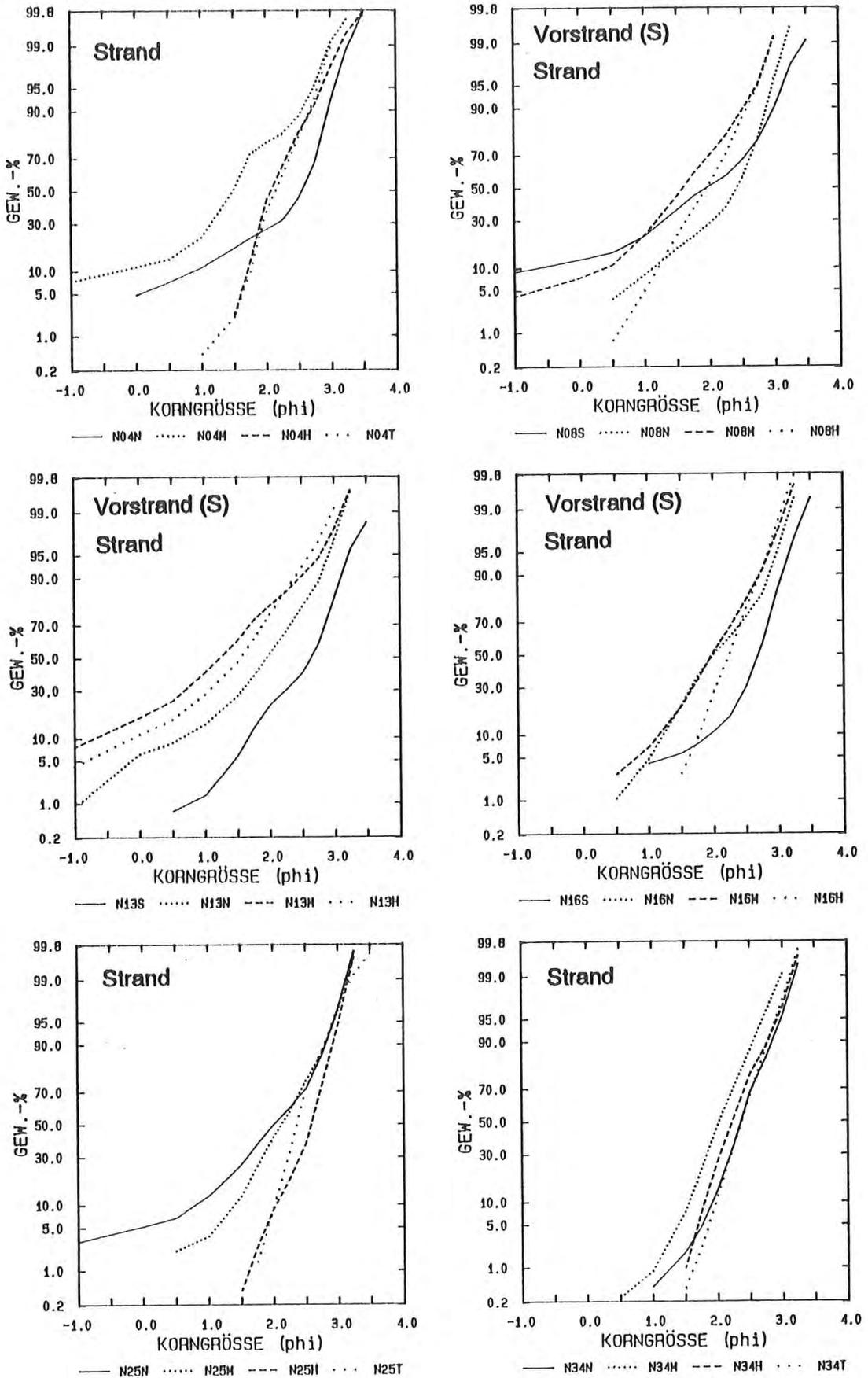


Abb. 57:

Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Strandsanden der Beprobungsserie 04/88

Kornverteilungen vom Frühjahr 1988

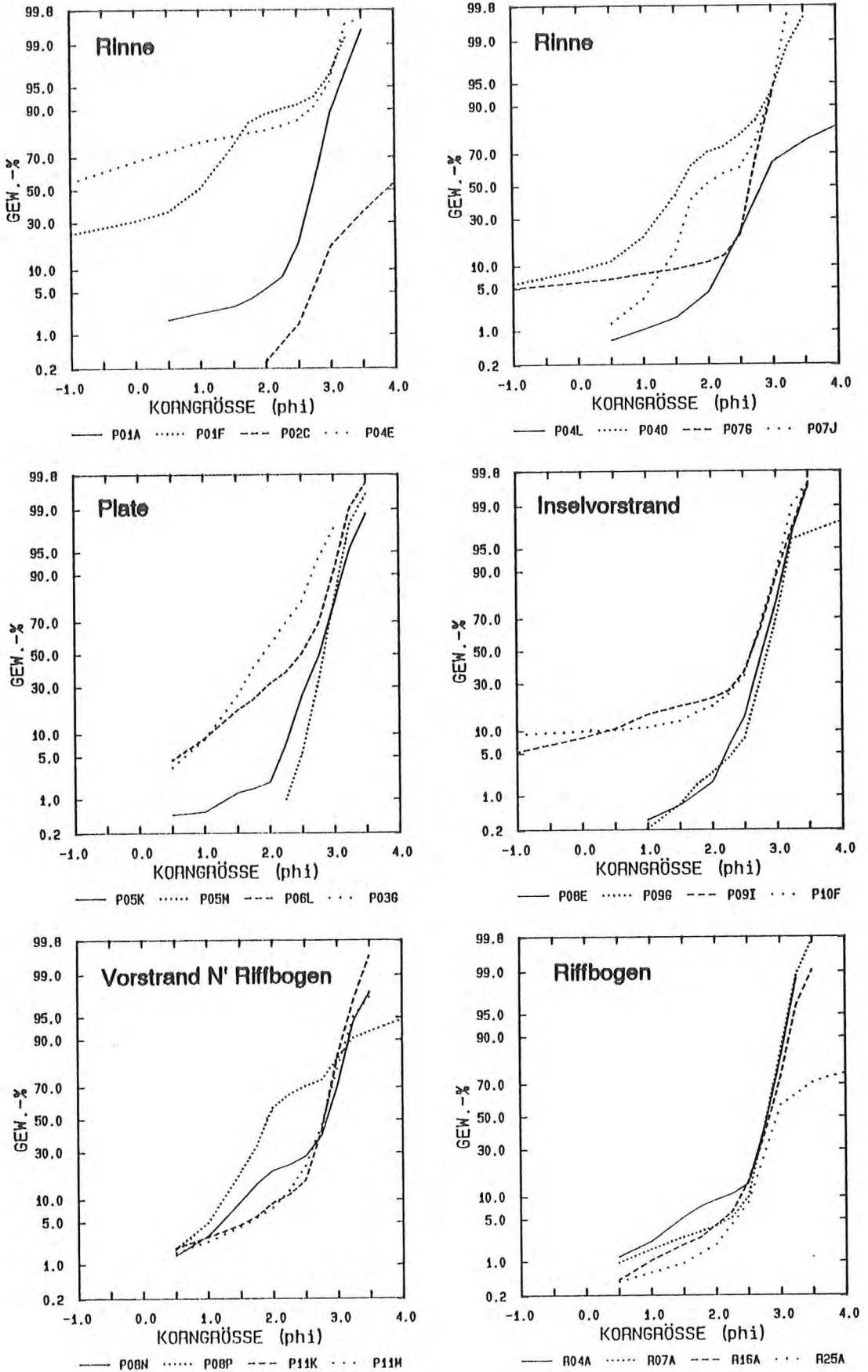


Abb. 58: Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Greiferproben der Beprobungsserie 04/88

Die Platensedimente der Frühjahrsbeprobungen zeigen einen flacheren Kurvenverlauf. Daraus ist zu schließen, daß während der stärkeren Seegangsbeeinflussung auch gröbere Sedimentkörner in den springenden Transport mit einbezogen wurden.

Im Inselvorstrandbereich sind alle drei genannten Transportarten wirksam. Dies geht deutlich aus den Wahrscheinlichkeitskurven der Sedimentproben P08E, P09G, P09I und P10F hervor (Abb. 56, 58). Die durch Suspensionstransport bewegten Sedimentfraktionen sind nur nach ruhigen Wetterlagen in stärkerem Maße vorhanden und umfassen nur die feinen Kornfraktionen. Während stärkeren Seegangs können diese Fraktionen nicht oder nur in geringem Maße sedimentieren und treten in den Kornverteilungskurven nur wenig hervor. In diesem Falle wird das Kornspektrum, das durch springenden Transport geprägt ist, deutlich größer. Im Brandungslee des Riffbogens (P09I, P10F) werden die Kornfraktionen, die größer als $2.25 \phi^{\circ}$ sind, durch rollenden Transport bewegt.

In den tieferen Vorstrandbereichen nördlich des Norderneyer Riffbogens (P08N, P08P, P11K, P11M) überwiegt auch der springende Sedimenttransport. Jedoch setzt diese Transportart erst in den feineren Kornfraktionen kleiner als $2.5 \phi^{\circ}$ ein. Die größeren Sedimentanteile werden hier im rollenden Transport bewegt.

Die Sedimente des äußeren Riffbogenbereichs (R04A bis R25A) werden überwiegend springend transportiert. Diese Transportart umfaßt in den meisten Fällen über 90 % des gesamten Kornspektrums. Die größeren Restanteile werden zumelst rollend bewegt, wobei die Grenze zwischen rollendem und springendem Transport bei $2.5 \phi^{\circ}$ liegt.

8.1.2.3. Sedimentkennwerte

Nicht alle Sedimentkennwerte, die mit dem Fortran-77 Programm "KOKUR" aus den Kornverteilungskurven mittels Spline-Funktionen ermittelt wurden, sind für die Klärung der Transportvorgänge im Norderneyer Seegebiet zu gebrauchen. Hierzu gehören die Kurtosis, der Ungleichförmigkeitsfaktor und z. T. die Schiefe. Der Grund ist in der relativen Gleichförmigkeit der untersuchten Sedimente zu sehen. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten (INMAN 1952, KIRCHNER 1974, TABAT 1978, TINIAKOS 1978, KACHHOLZ 1982), in denen die untersuchten Sedimente verschiedene Alter und Ursprünge aufwiesen und somit kornanalytisch stark differierten, weisen die Sedimente dieser Untersuchung ein enges Korngrößenspektrum auf.

Die Verteilungsmuster der Sedimentkennwerte d_{50} , Sortierung, Schiefe und Karbonatgehalt werden im Untersuchungsgebiet für die Beprobungszeiträume Herbst 1987 und Frühjahr 1988 dargestellt. Der Norderneyer Strand wird daneben noch gesondert einer intensiven Betrachtung der Sedimentkennwertverteilungen unterworfen, in der alle Beprobungsserien dieser Untersuchung mit einbezogen werden.

LUKASCHECK (1989) hat die Verteilung der U-Werte von den im Frühjahr 1988 entnommenen Sedimenten dargestellt. Gegenüber den So-Werten nach INMAN (1952), deren Verteilung im Folgenden noch beschrieben wird, wird deutlich, daß aufgrund der ungenügenden Berücksichtigung der groben

Kornfraktionen die Ungleichkörnigkeitszahl U nur bedingt brauchbar ist. Auf die Darstellung der Herbst 1987-Ergebnisse wurde daher verzichtet.

Als wenig hilfreich erwies sich der Sedimentkennwert Kurtosis nach FOLK & WARD (1957). Dieser Parameter, der mögliche Bimodalitäten in Kornverteilungen erfaßt, brachte keinerlei Ergebnisse im Hinblick auf Transportvorgänge. Nach FOLK (1974) ist die graphische Darstellung der Kurtosis-Werte gegen die Schiefe-Werte zur Unterscheidung von Environments sehr nützlich. Durch die Abbildung 59 wird jedoch deutlich, daß für die Probenreihen 09/87 und 04/88 eine Differenzierung nur schwer möglich ist. Dies ist darin begründet, daß die Ausgrenzung von Environments mit Hilfe der Schiefe und Kurtosis wohl nur bei übergeordneten Environments (marin, fluviatil, äolisch) möglich ist und nur schlecht innerhalb eines dieser Environments funktioniert. Daneben spielt die Überlagerung der verschiedenen Transportvorgänge (Tide, Seegang, Wind) im Untersuchungsgebiet, die eine klare Abgrenzung in verschiedene Environments erschweren oder auch verhindern, eine große Rolle. Daher wurde auf die Darstellung der Kurtosis-Verteilungen verzichtet.

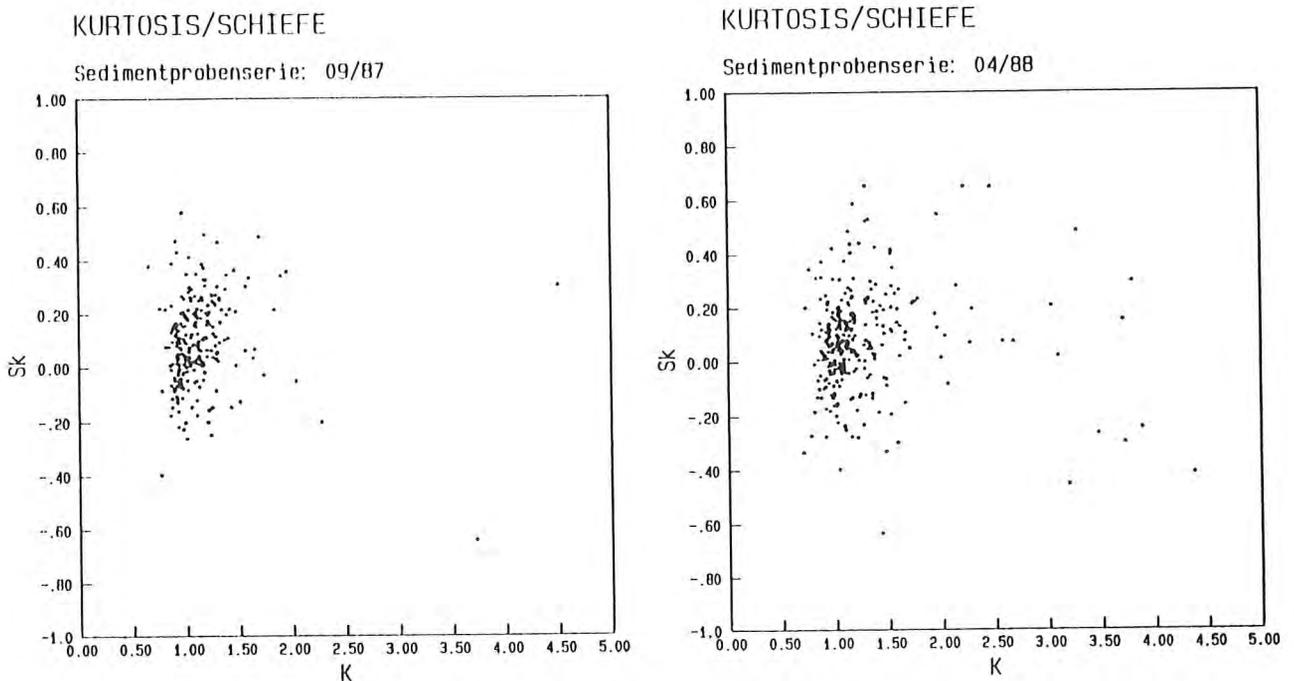


Abb. 59: Darstellung der Kurtosis gegen die Schiefe der Beprobungsserien 09/87 und 04/88

8.1.2.3.1. Mittlerer Korndurchmesser

Der mittlere Korndurchmesser wird in der Literatur am häufigsten zur Kennzeichnung eines Sediments benutzt. In dieser Untersuchung wurden sowohl der d_{50} -Wert als auch der Medianwert nach FOLK & WARD (1957) zur Beurteilung der mittleren Korngröße eines Sediments herangezogen. Die Abweichungen dieser zwei Kennwerte voneinander sind bei einer guten Sedimentsortierung äußerst gering und werden nur bei schlechteren Sortierungswerten größer. Daher wurde auf die Darstellung des Verteilungsmusters der Medianwerte verzichtet und nur eine Verteilungskarte der d_{50} -Werte erstellt.

Die d50-Verteilungen der Beprobungsserien 09/87 und 04/88 (Abb. 60, 61) sind einander sehr ähnlich.

Das Seegebiet nördlich des Riffbogens weist bis auf wenige Ausnahmen Sedimente mit einem mittleren Korndurchmesser zwischen 0.15 und 0.2 mm auf. Der Vorstrandbereich zwischen der NN -9.0 m und NN -4.0 m sowie der dem Riffbogen nördlich von Julst vorgelagerte Vorstrand sind dagegen mit d50-Werten von 0.1 bis 0.15 mm deutlich feiner.

Die Platen des Riffbogens weisen mit d50-Werten über 0.15 mm wiederum höhere d50-Werte auf. Darin spiegelt sich der verstärkte Seegangseinfluß in geringeren Wassertiefen wider. Innerhalb des Platenystems des Norderneyer Riffbogens heben sich die südöstlichen Bereiche der Nordwestgründe deutlich von den umgebenden Platen ab. Die mittleren Korndurchmesser steigen hier auf Werte von über 0.6 mm. Gleichzeitig mit dieser Kornvergrößerung ist auch ein starker Anstieg der Karbonatgehalte der Sedimente verbunden (Abb. 66, 67).

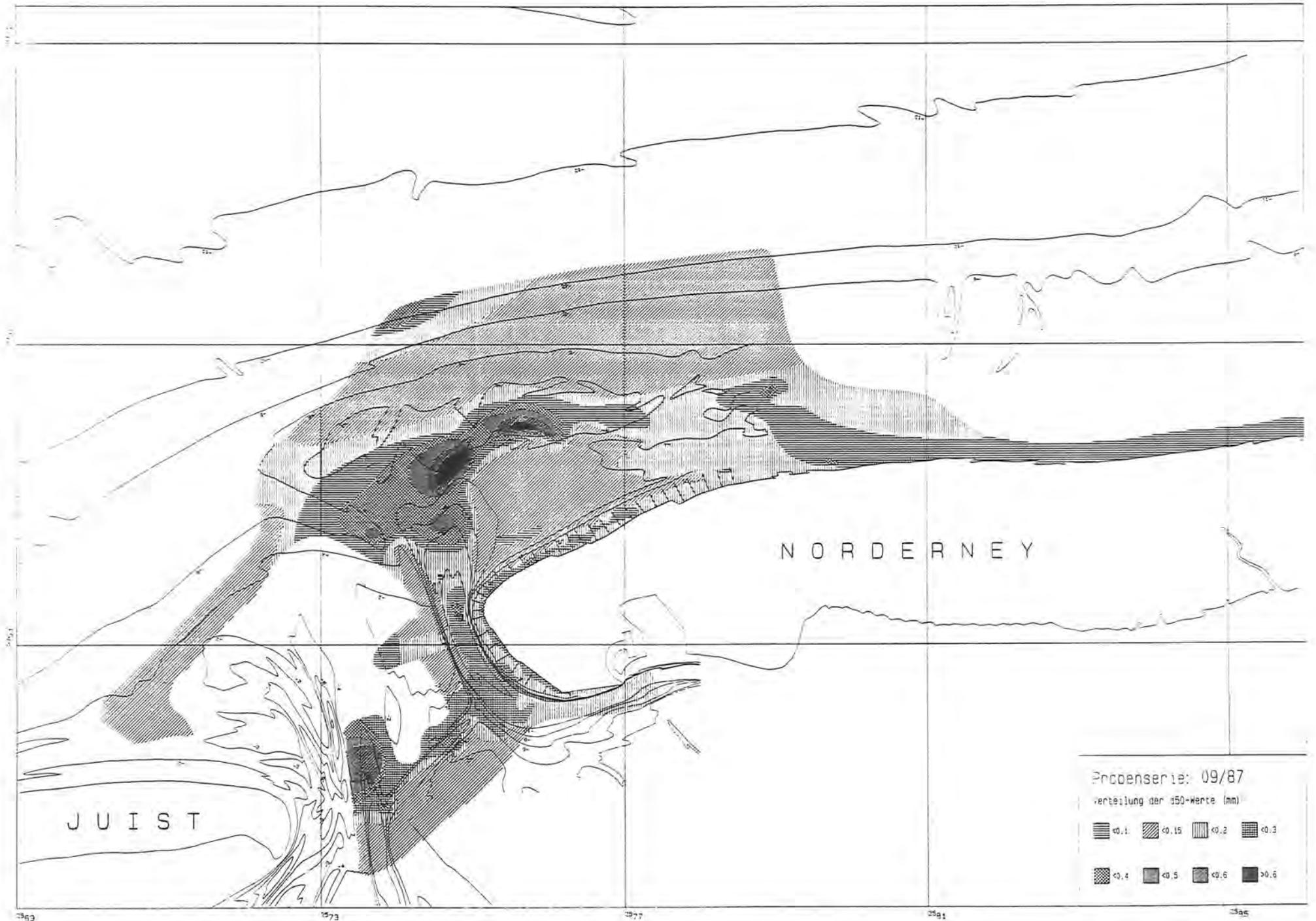
Als Ursache dieser Vergrößerung können zwei Prozesse in Betracht gezogen werden. Zum einen wird wohl ein großer Teil der gröberen Sedimentpartikel mit dem starken Ebbstrom aus dem Seegat heraus nach Norden transportiert und lagert sich mit abnehmenden Transportgeschwindigkeiten, die durch die Auffächerung des Ebbstroms im nördlichen Teil der tiefen Seegatrinne bedingt sind, am südlichen Platenrand des Riffbogens ab. Zum anderen werden die gröberen Körner durch den ein-schwingenden Seegang und den damit verbundenen, durch die Brandung induzierten Strömungen über die Platen des Riffbogens transportiert und reichern sich nach Erreichen größerer Wassertiefen und damit geringerer Brandungsströmungen im Brandungslee des Riffbogens ab.

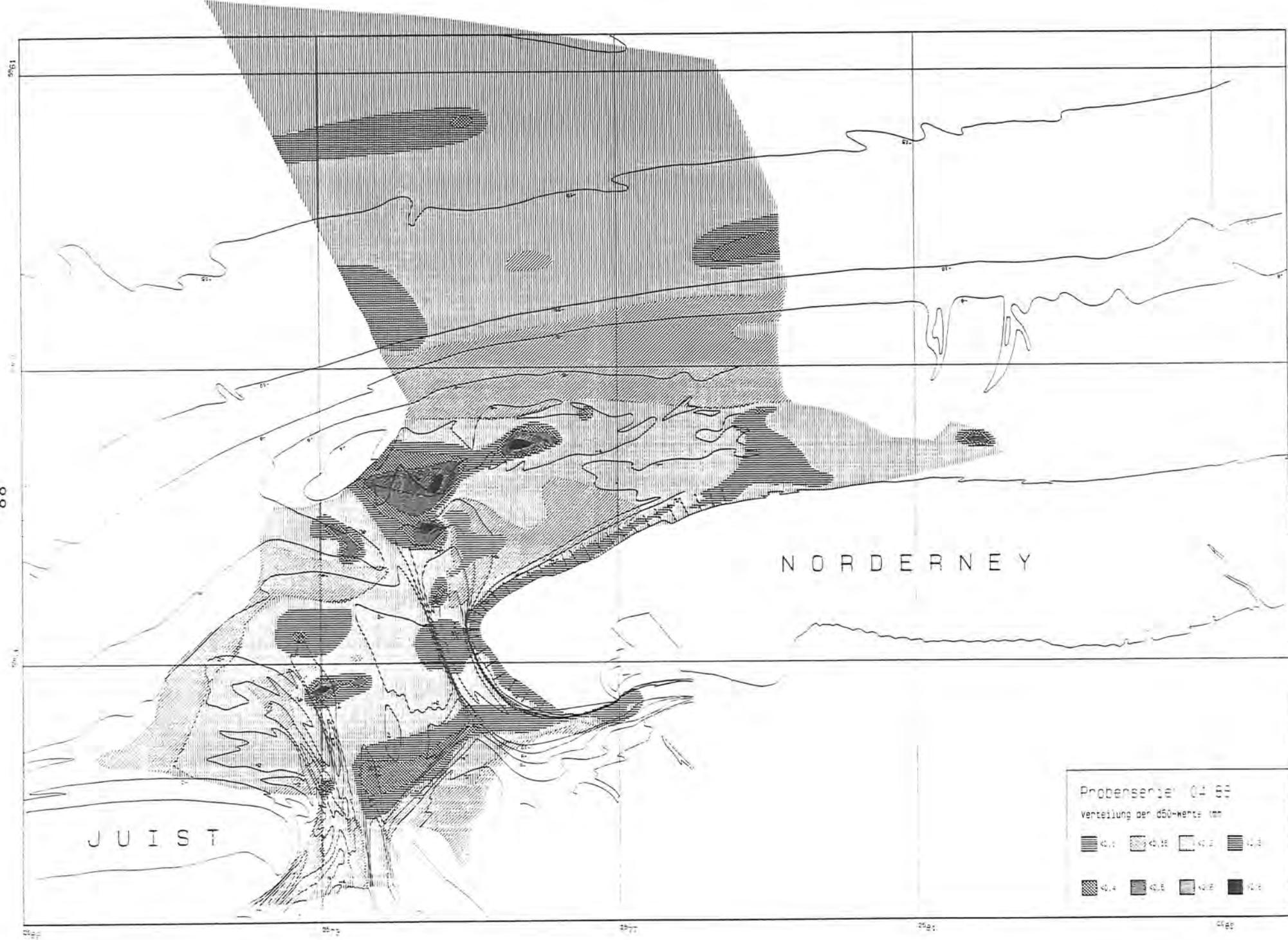
Die Rinnensedimente des Kalfamergats, des Busetiefs, des Riffgats und des Norderneyer Seegats sind mit d50-Werten zwischen 0.15 und 0.5 mm gröber als die der Hohen Plate, Robbenplate und Steinplate. Die Platenbereiche weisen in großen Teilen lediglich mittlere Korndurchmesser zwischen 0.1 und 0.15 mm auf.

Der Inselvorstrand zwischen Riffbogen und dem Nordweststrand von Norderney ist durch die geringsten d50-Werte des Untersuchungsgebiets charakterisiert. Da die Sedimente dieses Bereichs höhere Schluff- und Tonanteile aufweisen, kann der d50-Wert unter 0.1 mm betragen.

Der Norderneyer Strand hebt sich dagegen deutlich durch die höheren d50-Werte vom vorgelagerten Vorstrand ab. Die Sedimente des nassen Strandes weisen zumelst mittlere Korngrößen zwischen 0.2 und 0.3 mm auf. Im Bereich des Norderneyer Westkopfes können die d50-Werte sogar über 0.4 mm betragen. Dies ist Ausdruck einer stärkeren Seegangsbelastung. Der über MThw gelegene Bereich des trockenen Strandes, der zumelst nur äolischen Transport- und Sortierungsprozessen unterliegt, ist gegenüber den Sedimenten des nassen Strands mit d50-Werten zwischen 0.15 und 0.2 mm feiner.

Östlich des Platenanlandungsbereichs sind die Sedimente vom nassen Strand deutlich gröber als die in den weiter westlich gelegenen Strandabschnitten (Abb. 60). Sie weisen d50-Werte zwischen 0.2 und 0.3 mm auf, was in etwa den mittleren Korndurchmessern der Sedimente des seegangsexponierten Strandbereichs am Westkopf Norderneys entspricht. Im Gegensatz zu letzteren Sedimenten weisen sie jedoch nur geringe Karbonatgehalte auf und können deshalb als reine mittel- bis grobsandige Quarzsande angesprochen werden. Die höheren Korndurchmesser sind darauf zurückzuführen, daß östlich des Platenanlandungsbereichs der Seegang relativ ungedämpft den Strand erreichen kann.





8.1.2.3.2. Sortierung

Bei der Berechnung der Sortierung nach INMAN (1952) gehen die d_{16} und d_{84} -Werte in die Formel ein. Da in einigen Fällen der d_{84} -Wert aufgrund eines zu hohen Schillbruchanteils > 2.0 mm nicht berechnet werden konnte und fehlt somit auch der Sortierungswert. Für diese Sedimente, die zumeist ein breites Korngrößenspektrum aufweisen, wurde der Sortierungswert mit 3.0ϕ festgelegt (schlechte Sortierung = $S_o > 1.0 \phi$) und ging damit auch in die Verteilungskarten der Sortierung (Abb. 62 und 63) ein.

Die Verteilungen der Sortierungswerte der zwei dargestellten Beprobungsserien stimmen im großen und ganzen gut überein. Die einzige Ausnahme bildet der Inselvorstrand zwischen dem Riffbogen und dem Nordweststrand von Norderney.

Die Sedimente im Seegebiet nördlich des Riffbogens unterhalb der NN -15.0 m Tiefenlinie sind zumeist sehr gut bis gut sortiert. Die oberhalb dieses Tiefenbereichs bis zur NN -4.0 m Linie oberflächlich anstehenden Sedimente weisen dagegen nur mäßig gute bis schlechte Sortierungen auf. Die nördlichen Platenabschnitte des Riffbogens sind wiederum gut bis sehr gut sortiert. Anhand dieser Zonierung der Sortierungswerte im nördlichen Anstieg zum Riffbogen tritt die schon anhand der Kornverteilungshistogramme dargestellte Mischung zweier unterschiedlicher Ausgangssedimente im Tiefenbereich zwischen NN -15.0 m und NN -4.0 m klar hervor.

Die westlichen Riffbogensedimente selbst weisen im wesentlichen sehr gute bis gute Sortierungen auf. Die nördlich von Julst anstehenden feinkörnigen Sedimente erstrecken sich bis zum Schluchter. Einige wenige Proben mit erhöhten Schillbruchanteilen, die ein breiteres Kornspektrum bedingen, sind nur mäßig gut bis mäßig sortiert. Im Bereich der Nordwestgründe sind die Sedimente mit S_o -Werten zwischen 0.71 und $> 1.0 \phi$ im allgemeinen als schlecht sortiert zu klassifizieren. Von den Nordwestgründen erstreckt sich ein Band mäßig gut bis mäßig sortierter Sedimente bis in die südlichen Platenbereiche der Nordergründe. Weiter nach Osten wird das Kornspektrum wieder schmaler. Dies macht sich durch gute Sortierungswerte bemerkbar.

Die Rinnensedimente des Busettefs, des Riffgats und des Norderneyer Seegats sind in weiten Teilen als mäßig gut bis schlecht sortiert zu klassifizieren. Demgegenüber sind die Sedimente des Kalfamergats zumeist gut bis sehr gut sortiert. Nur in den tiefsten Rinnenabschnitten treten dort mäßig gut bis mäßig sortierte Sedimente auf.

Die Sedimente der Robbenplate, der Hohen Plate und der Steinplate weisen sehr enge Kornspektren auf. Die Ablagerungen in den südwestlichen Teilen der Robbenplate sind durch Zufuhr größerer Sedimentanteile aus dem Busettef schlechter sortiert als die umgebenden Platensedimente.

Der dem Nordweststrand Norderneys vorgelagerte Inselvorstrand ist im Herbst 1987 durch gute bis mäßige Sortierungswerte gekennzeichnet, während im Frühjahr 1988 die Sedimente sehr gute bis gute Sortierungen aufweisen. Diese Unterschiede sind auf größere Schluff- und Tonanteile in den Sedimenten der Herbst-Beprobung gegenüber den Sedimenten der Beprobungsserie 04/88 zurückzuführen. Diese feineren Bestandteile konnten sich während der ruhigen Wetterlage des Sommers 1987 im Inselvorstrandbereich sedimentieren, während dies durch die stärkere Seegangsbelastung im Winter 1987/1988 nicht möglich war.

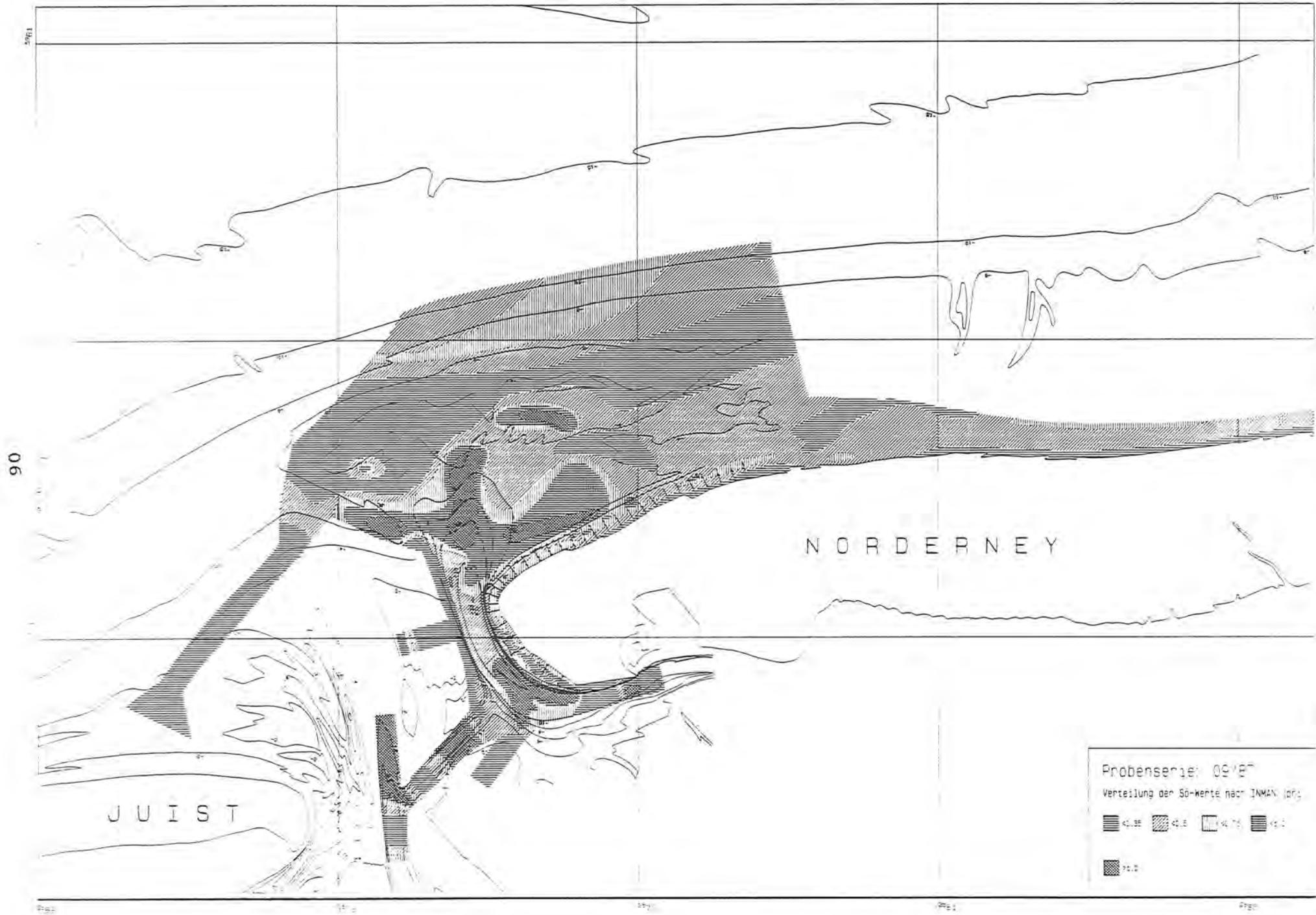
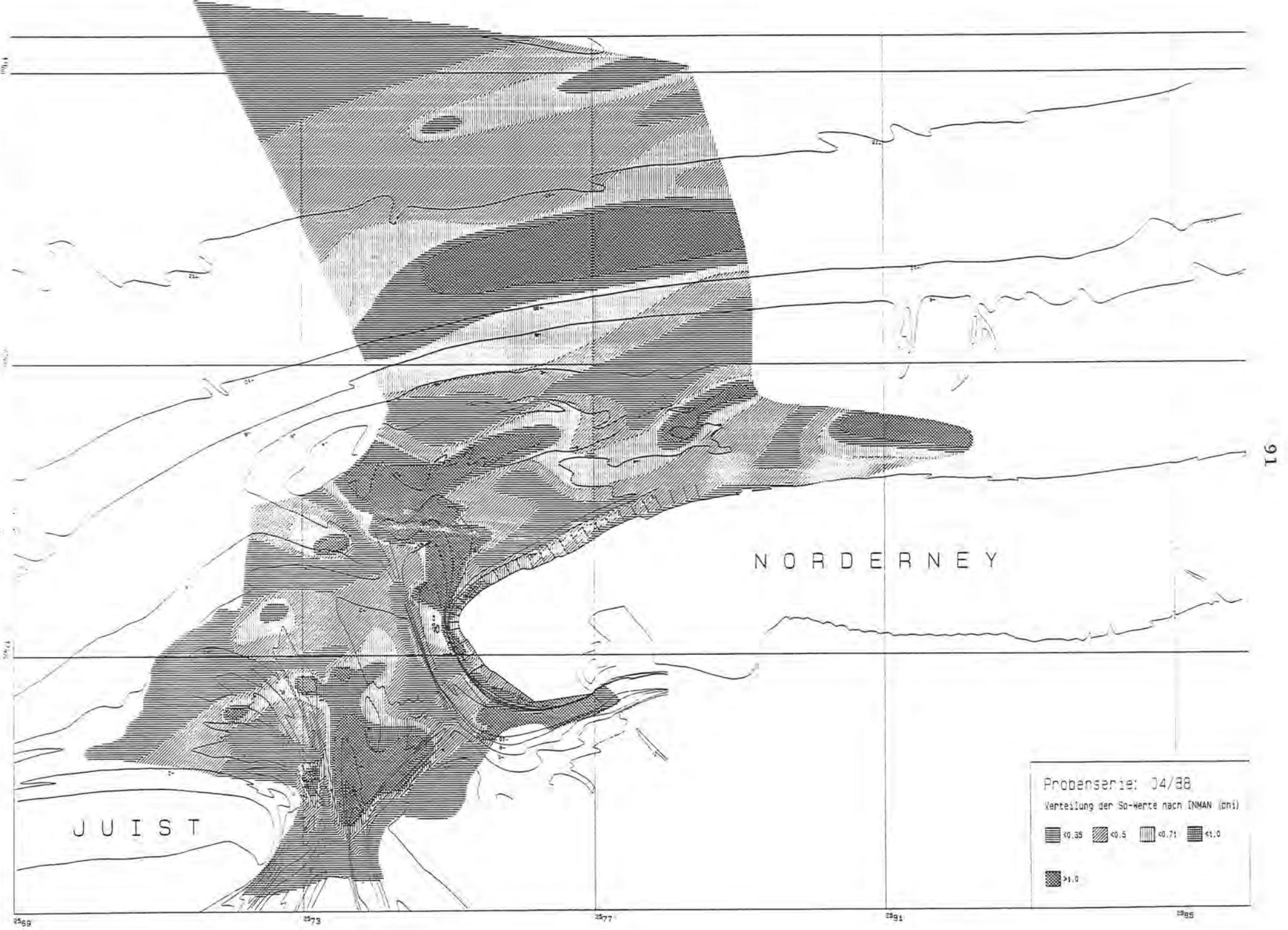


Abb. 62: Verteilung der Sortierwerte (INMAN 1952) im Herbst 1952



Der nasse Strand von Norderney ist sowohl im Herbst 1987 als auch im Frühjahr 1988 von zumelst gut bis mäßig gut sortierten Sedimenten aufgebaut. Lediglich am Westkopf Norderneys macht sich der stärkere Seegangseinfluß des Winters durch breite Korngrößenspektren und somit schlechteren Sortierungswerten bemerkbar. Die Sedimente des nassen Strandes, die sich östlich des Platananlandungsbereichs bis zum östlichen Norderneyer Inselende erstrecken und durch deutlich höhere mittlere Korndurchmesser charakterisiert sind, weisen ebenfalls sehr gute bis gute Sortierungen auf. Lediglich im Bereich der Niedrigwasserlinie können auch mäßig gut sortierte Sedimente auftreten.

Der trockene Strand weist nur sehr gut sortierte Sedimente auf, da in diesem Strandbereich ausschließlich die äolischen Transport- und Sortierungsvorgänge wirksam sind. Untersuchungen über den äolischen Sandtransport auf Norderney haben AKKERMANN (1953, 1956) und SINDOWSKI (1956) ausgeführt.

8.1.2.3.3. Schiefe

Die Schiefe- oder Skewness-Werte sind ein Maß für die Symmetrie einer Kornverteilungskurve. Schon leichte Änderungen im feinen oder groben Kornspektrum eines Sediments machen sich durch negative oder positive Schiefewerte bemerkbar. Dadurch können Bereiche ausgegrenzt werden, denen gröbere oder auch feinere Sedimente zugeführt wurden.

Im Seegatbereich südlich des Norderneyer Riffbogens sind die Sedimentverteilungen in den meisten Fällen symmetrisch bis grob-schief (Abb. 64, 65). Diese schlechtere Sortierung im groben Kornspektrum ist häufig auf größere Anteile von Schillbruch zurückzuführen, die zumelst aus dem Watt stammen (KRAUSE 1950) und mit dem Ebbstrom dorthin transportiert wurden. Ein anderer Teil des Schills stammt nach KRAUSE (1950) auch aus dem Seegebiet und wurde mit dem Flutstrom und den Brandungsströmungen über den Riffbogen bzw. durch die Rinnen, wie Schluchter und Dovetief, in das Brandungslee des Riffbogens transportiert.

Im Seegebiet nördlich des Riffbogens weisen die Sedimente, die in Wassertiefen unter NN -10.0 m entnommen wurden, zumelst fein-schiefe bis symmetrische Kornverteilungen auf. Oberhalb der NN -10.0 m Linie stehen grob-schiefe bis stark grob-schiefe Sedimente an. Daß die Sedimente unterhalb der NN -10 m Linie im feinen Kornspektrum schlechter sortiert sind, kann möglicherweise auf Sedimentation der feinen Sedimentanteile zurückzuführen sein, die mit dem Ebbstrom aus dem Vorstrandbereich hertransportiert wurden und sich erst bei den ruhigen Seegangs- und Tidestrombedingungen in diesem Tiefenbereich absetzen konnten. Die grob-schiefen Kornverteilungen der Sedimente, die oberhalb NN -10 m vorkommen und die feiner als die Sedimente des nördlich gelegenen Küstenvorfeldes und des südlich gelegenen Vorstrands sind (Abb. 61), weisen auf eine Sedimentzufuhr aus den beiden genannten Bereichen hin. Die zugeordneten Kornverteilungshistogramme (Abb. 43) bestätigten dies auch (vgl. Kap. 8.1.2.1.1.).

Die am äußeren Riffbogen nördlich von Julst entnommenen Sedimente sind durch symmetrisch verlaufende Kornverteilungskurven charakterisiert. Im Bereich des Schluchter wurden im Frühjahr 1988 grob-schief verteilte Sedimente entnommen (Abb. 65), während im vorhergehenden Herbst Sedimente mit symmetrischen Kornverteilungskurven entnommen wurden. Hierdurch wird deutlich, daß während

der Winterperioden verstärkt Sedimentumlagerungen aus dem Seegatbereich in den Vorstrand seewärts des Riffbogens vorkommen.

Im Bereich der Nordwestgründe treten in beiden Beprobungsserien symmetrisch verteilte Sedimente auf. Weiter nach Osten, im Bereich der Nordergründe, lassen sich die Kornverteilungen der im Herbst 1987 entnommenen Sedimente als grob-schief klassifizieren, während die Sedimente, die im Frühjahr 1988 in den nördlichen Platenbereichen der Nordergründe gewonnen wurden, symmetrisch verlaufende Kornsummenkurven aufweisen. Die südlichen Bereiche der Nordergründe sind wiederum durch grob-schief verteilte Sedimente charakterisiert, die auf erhöhte Schillanteile der Sedimente zurückzuführen sind. Infolge der dominierenden ostgerichteten Ebb- und Brandungsströmungen wird anscheinend das grobe Sediment entlang des Brandungslee des Riffbogens nach Osten transportiert, weshalb dort zumelst grob-schief verteilte Sedimente auftreten.

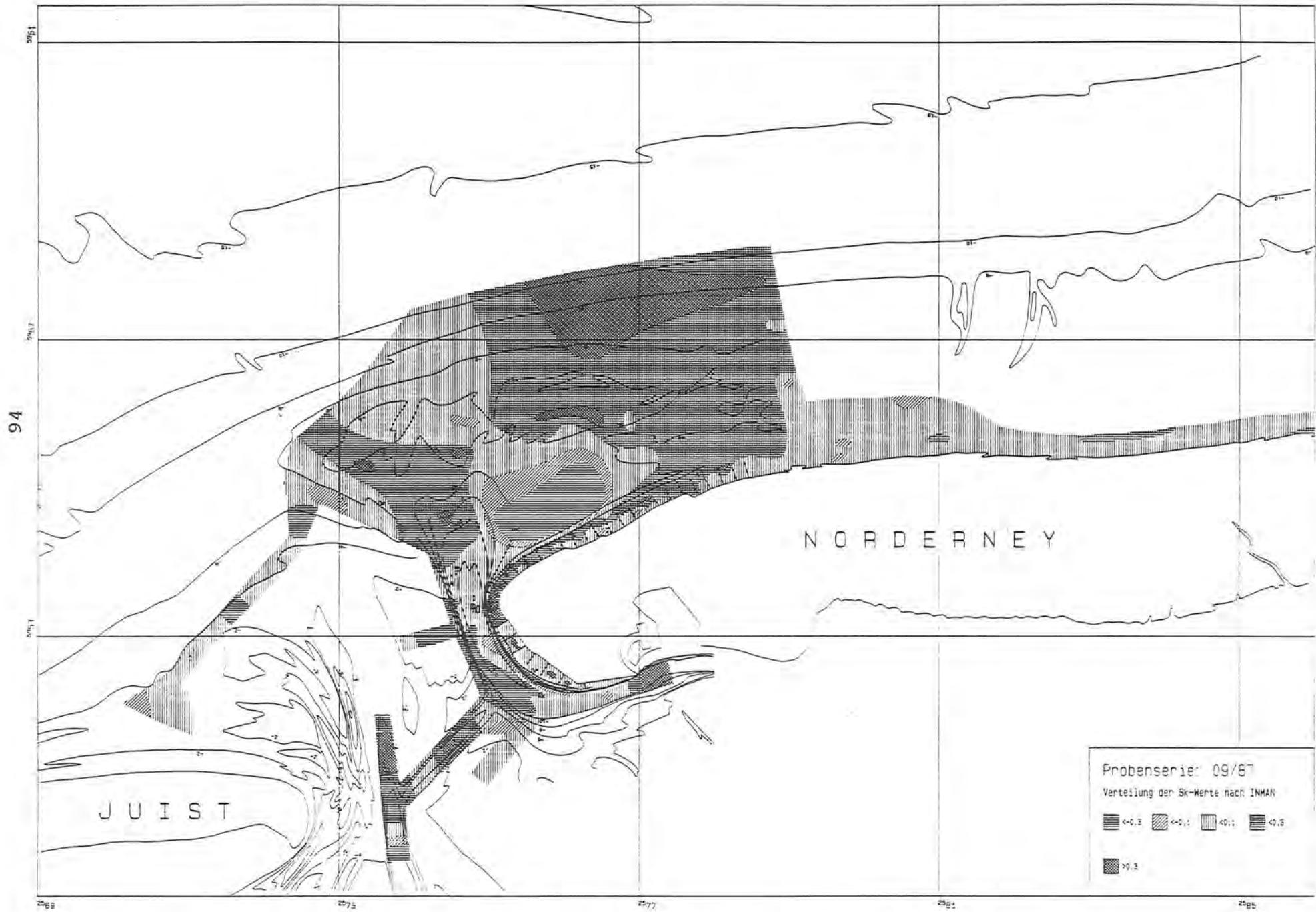
Das Kalfamergat und das Busettef sind durch grob-schief verlaufende Sedimentverteilungskurven gekennzeichnet. Diese Sedimentverteilungen finden sich auch in den umliegenden Bereichen des Osterriffs, der Hohen Plate und in Teilen der Robbenplate.

Im Riffgat und in der Rinne des Norderneyer Seegats stehen neben grob-schief auch symmetrisch verteilte Sedimente an. Die Steinplate und Bereiche im nördlichen und südöstlichen Teil der Robbenplate sind durch solche symmetrisch verlaufende Sedimentverteilungskurven charakterisiert.

Der Inselvorstrand zwischen dem Riffbogen und dem Norderneyer Nordweststrand weist Sedimente auf, die anhand der Sk -Werte als symmetrisch bis stark fein-schief klassifiziert werden konnten. Im Frühjahr 1988 sind die Sedimente im Bereich der Bühnenstreichlinie und in Teilen des weiter nördlich anschließenden Vorstrandes grob-schief. Diese Vergrößerung des groben Kornspektrums dieser Sedimente ist auf Zufuhr von gröberen Strandsanden durch den stärkeren Seegangseintrag während der Wintermonate zurückzuführen. Die ansonsten im allgemeinen als fein-schief klassifizierten Kornverteilungen sind auf die Sedimentation der feinen, suspendierten Sedimentfracht während ruhiger Strömungsbedingungen zurückzuführen.

Der nasse Strand Norderneys ist fast ausschließlich durch symmetrische bis stark grob-schiefe Sedimentverteilungen gekennzeichnet. Im Westkopfbereich treten aufgrund der hohen Schillbruchanteile der Sedimente zumelst grob-schiefe bis stark grob-schiefe Kornverteilungen auf. Am Weststrand und dem östlich des Westkopfbereichs gelegenen Nordwest- und Nordstrand sind die Sedimente zumelst als symmetrisch zu klassifizieren. Im Bereich der Niedrigwasserlinie können dort aber auch häufiger grob-schiefe Verteilungen vorkommen. Am nassen Strand östlich des Platanlandungsbereichs wurden fast ausschließlich symmetrisch verteilte Sedimente gewonnen. Da der Norderneyer Strand am Westkopf in der Regel starken Erosionsprozessen unterliegt, werden vorrangig die feineren Sedimentfraktionen erodiert. Dadurch reichern sich die gröberen Fraktionen relativ an und führen somit zu grob-schlefen Kornsummenkurven.

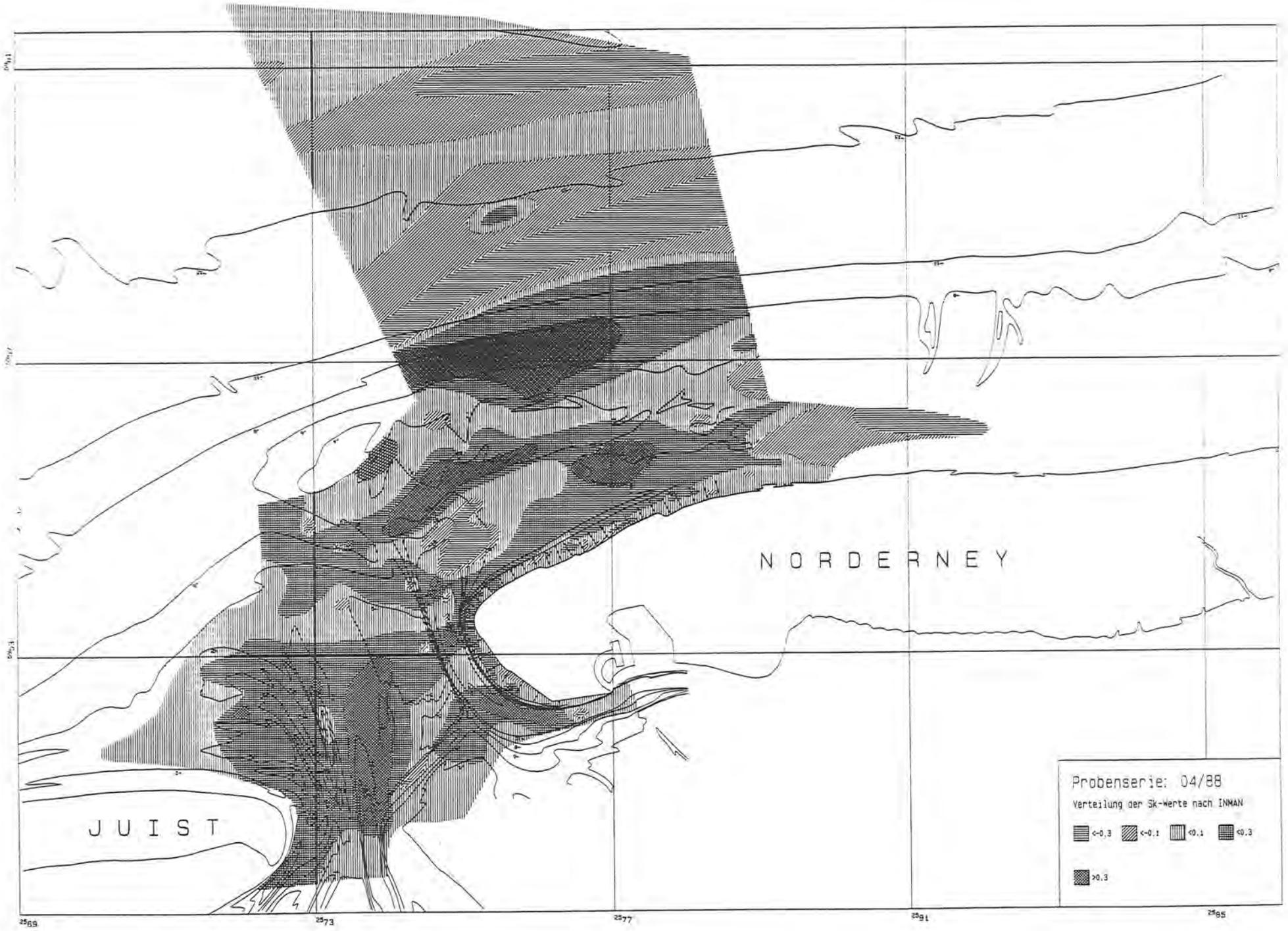
Die Sedimente des trockenen Strandes weisen zumelst symmetrische Kornverteilungen auf. Es können aber auch Sedimente vorkommen, die als fein-schief oder auch grob-schief klassifiziert wurden. Die symmetrischen Kornverteilungen verdeutlichen die gleichmäßige Sortierung durch äolische Selektionsprozesse.



Verteilung der Schiefe-Werte im Herbst 1987

Abb. 64:

Abb. 65: Verteilung der Schlie-Werte im Frühjahr 1988



8.1.2.3.4. Karbonatgehalt

Der Karbonatgehalt der untersuchten Sedimente läßt sich als Parameter zur Kennzeichnung des Schillanteils im Sediment verwenden, da sich die Sande, abgesehen vom Schillanteil, im allgemeinen zu über 90 % aus Quarzkörnern zusammensetzen. Den restlichen Prozentanteilen werden Feldspatkörnern und die verschiedenen Schwerminerale zugeordnet.

KRAUSE (1950) konnte durch die qualitative Differenzierung der Muschelschillanteile in Wattmuscheln, Seemuscheln und Indifferente Muscheln Transportrichtungen deutlich machen. Daneben lassen sich aber auch durch die Betrachtung des Gesamtschillgehalts Aussagen über den Sedimenttransport machen.

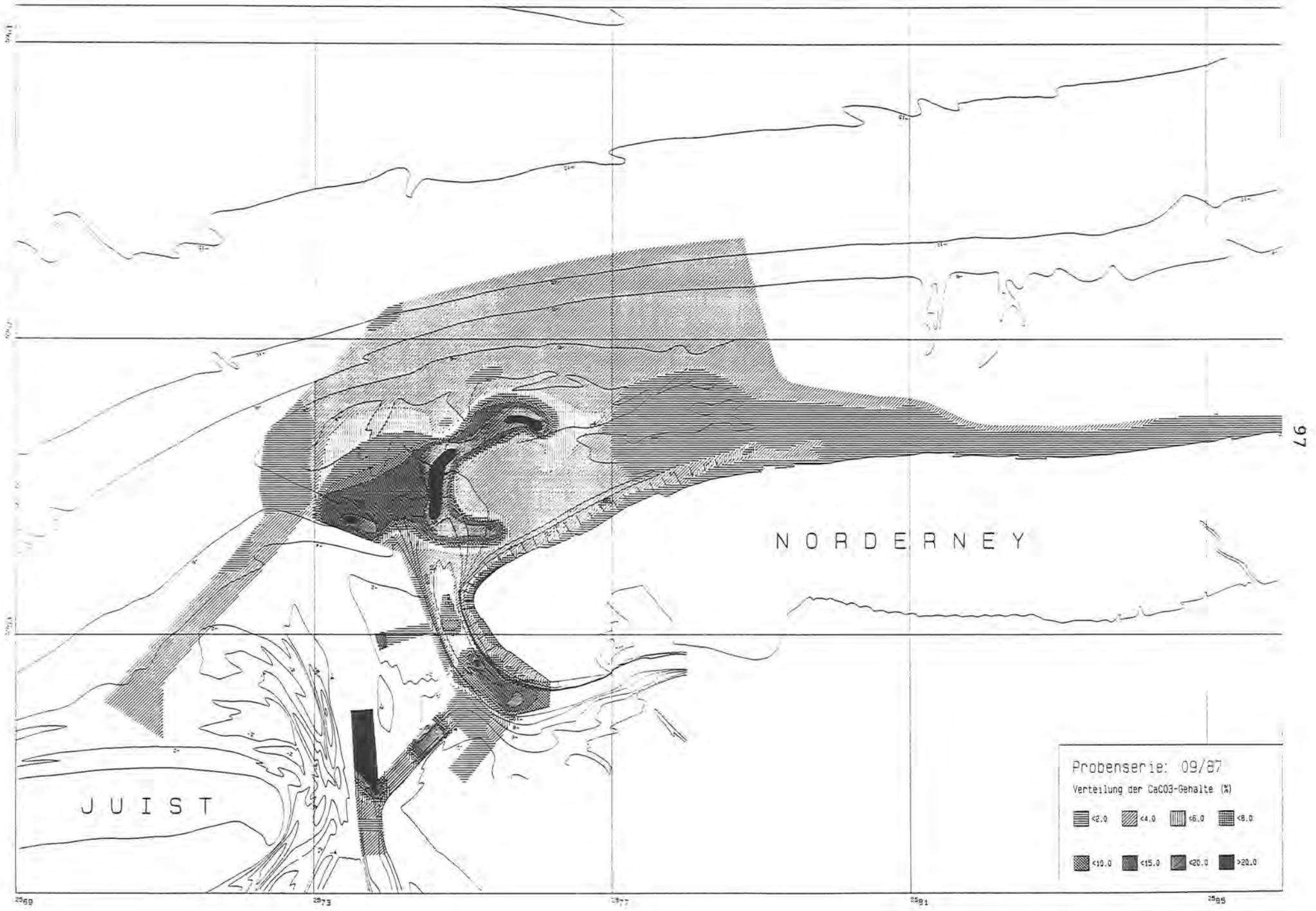
Der Vergleich der Karbonatverteilungskarten (Abb. 66, 67) mit den Darstellungen der d50-Verteilungen zeigt deutlich den engen Zusammenhang zwischen diesen beiden Kennwerten. Dies läßt den Schluß zu, daß die gröberen Bestandteile eines Sediments in den meisten Fällen auf erhöhte Schillbruchanteile und weniger auf grobe Quarzanteile zurückzuführen sind.

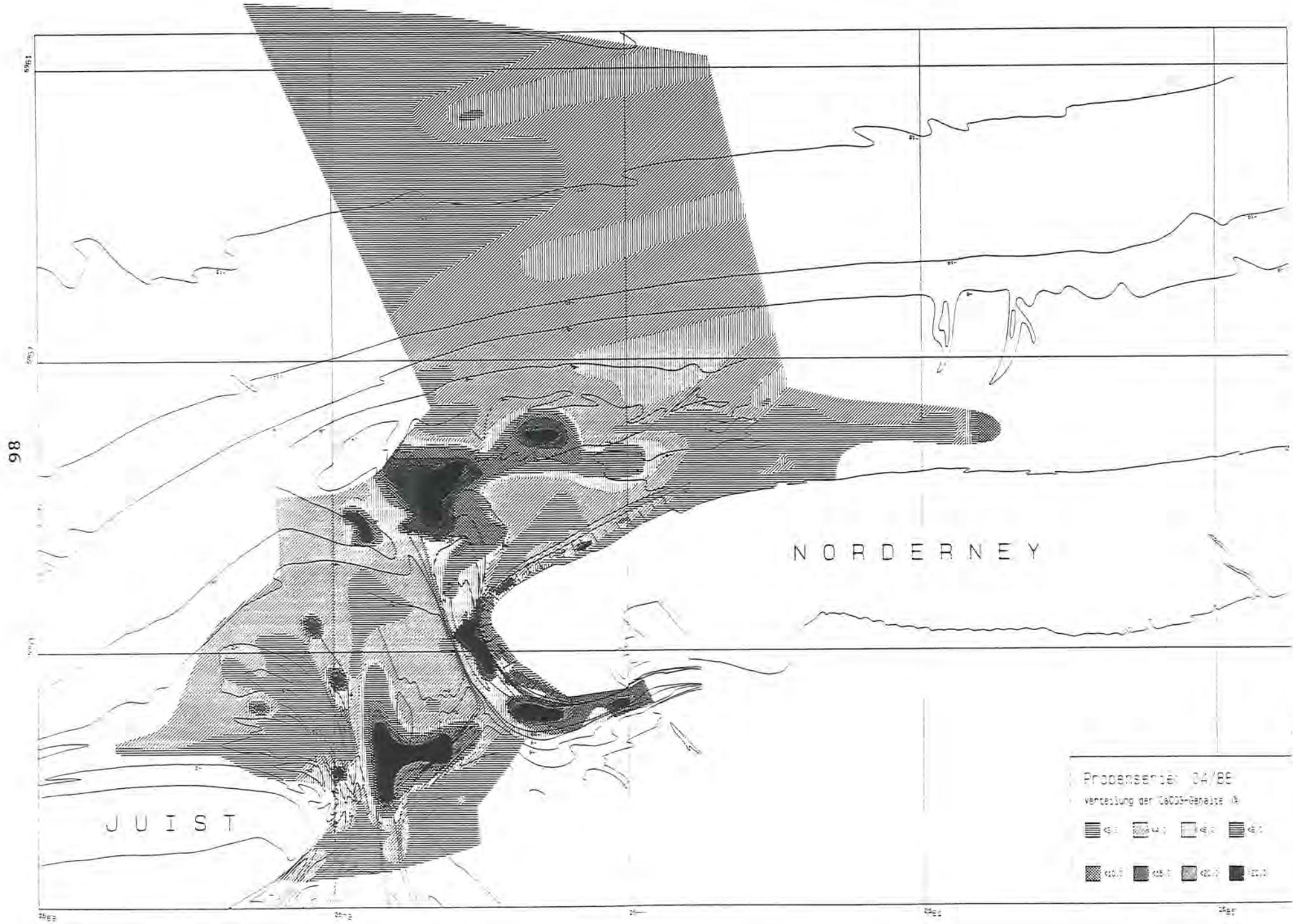
Die Sortierungswerte werden ebenfalls von den Schillanteilen stark beeinflusst. Mit zunehmendem Schillanteil wird die Sortierung des Sediments schlechter, da die Korngrößen der Schillbruchstücke den groben Mittelsand- und Grobsandfraktionen zuzuordnen sind und sich somit das Korngrößenspektrum des Sediments vergrößert.

Die hohen Karbonatgehalte finden sich nur in den Bereichen südlich des Norderneyer Riffbogens (Abb. 67). Im Seegebiet nördlich des Riffbogens betragen die Karbonatgehalte in weiten Teilen weniger als 6 %. Zum Riffbogen hin nehmen die Werte leicht zu. Daraus läßt sich folgern, daß der große Anteil des Schills aus dem Wattgebiet mit dem Ebbstrom in den Riffbogenbereich heraustransportiert worden ist. Diese Schlußfolgerung wird durch Untersuchungen von KRAUSE (1951) gestützt, nach der im inneren Riffbogenbereich der Anteil der Wattmuschel Cardium edule bis zu 40 % am Gesamtschillgehalt beträgt.

Der Riffbogen läßt sich auch anhand der Karbonatgehalte in unterschiedliche Abschnitte gliedern. In den westlich gelegenen Platenbereichen nördlich von Julst treten CaCO_3 -Gehalte von unter 4 % auf. Nördlich des Schluchter steigen die Gehalte im Gebiet der Nordwestgründe und der Nordergründe auf Werte bis über 20 % Karbonat an, wobei sich die höchsten Karbonatanteile in den südlichen Teilen diesen Platenbereichs auffinden lassen. Diese Tatsache läßt sich auf eine schillreiche Sedimentzufuhr aus dem Norderneyer Rückseltenwatt über das Riffgat und das Norderneyer Seegat in den Bereich südöstlich der Nordwestgründe zurückführen, wo durch die Auffächerung der Rinne des Norderneyer Seegats und der damit verbundenen Verringerung der Stromgeschwindigkeiten diese groben Sedimentfraktionen sedimentieren können. Weiter nach Osten hin nehmen die Karbonatgehalte bis unter 2 % ab, da die Transportkapazität der Ebbströmungen zum Transport des Schillbruchs nicht oder nur in geringem Maße ausreicht.

Abb. 66: Verteilung der Karbonatgehalte im Herbst 1987





Verteilung der Karbonatgehalte im Frühjahr 1988

Abb. 67:

In den Rinnen des Kalfamergats, des Busetiefs, des Riffgats und des Norderneyer Seegats sind die Karbonatgehalte deutlich größer als auf den umliegenden Platen. Zumeist treten diese hohen Gehalte in den tiefsten Abschnitten der Rinnen auf. Die Gehalte können bis über 20 % CaCO_3 betragen. Das Kalfamergat weist gegenüber den anderen Rinnen deutlich geringere Werte aus. Diese Schillakkumulationen in den Rinnen sind ein Beleg dafür, daß die Verfrachtung der groben Sedimentfraktionen zumeist über die Rinnen verläuft, da dort die zum Transport benötigten Stromgeschwindigkeiten auftreten. Zur Sedimentation gelangen die groben Schillanteile bei den abnehmenden Stromgeschwindigkeiten während der Kenterphase des Tidestroms.

Die Sedimente der Robbenplate, der Hohen Plate und der Steinplate besitzen nur geringe Schillanteile. Die Karbonatgehalte liegen hier zwischen 0.1 und 4.0 %. Eine Ausnahme bildet hier wiederum der südwestliche Abschnitt der Robbenplate, in dem auch Werte bis über 20 % CaCO_3 auftreten. Der Grund dieser Schillanreicherung ist in einer Sedimentzufuhr aus der nach Norden verlängerten Rinne des Busetiefs zu sehen (vgl. Kap. 8.1.2.3.1.)

Der Inselvorstrand nördlich des Norderneyer Nordweststrandes weist nur geringe Karbonatgehalte unter 4 % aus. Dies gilt sowohl für den Zustand während der Beprobung im Herbst 1987 als auch für die Verteilung im darauffolgenden Frühjahr. Hierhin scheinen die Schillanteile der Sedimentfracht des Norderneyer Seegats aufgrund zu geringer Transportgeschwindigkeiten nicht mehr zu gelangen.

Am Norderneyer Strand treten große Unterschiede hinsichtlich der Karbonatgehaltsverteilung auf. Der Norderneyer Westkopf weist mit Karbonatgehalten bis über 20 % Karbonat deutlich höhere Werte auf, als sie im sich östlich anschließenden Strandabschnitt auftreten. Dort betragen sie zwischen 0.1 und 4.0 % CaCO_3 . Im Bereich des Norderneyer Westkopfes und am Weststrand Norderneys liegen die Karbonatgehalte im Frühjahr 1988 deutlich über den Gehalten im Herbst 1987. Die Sedimente des trockenen Strandes weisen im Gegensatz zu denen des nassen Strandes nur Karbonatgehalte unter 2 % auf. Ein großer Teil des Schills am Westkopf von Norderney ist durch die Aufspülung im Jahr 1984 auf den Strand gebracht worden. Da der Schill aufgrund seiner Größe eine höhere Erosionsresistenz besitzt, reichert er sich gegenüber den feineren Sanden relativ an und trägt somit entscheidend zur Vergrößerung des anstehenden Sedimentes bei. Die erodierten feinen Sandfraktionen gelangen zu großen Teilen in den Vorstrandbereich, was durch die Feinkörnigkeit und die relativ geringen Karbonatgehalte der dort vorkommenden Sedimente kenntlich wird.

8.1.2.3.5. Variabilität der Sedimentkennwerte am Norderneyer Strand und Vorstrand

Der Norderneyer Strand und der unmittelbar vorgelagerte Vorstrandbereich sind einer genaueren Betrachtung wert. Dieser Bereich, der auch das eigentliche Untersuchungsgebiet des KFKI-Forschungsvorhabens ist, reagiert am schnellsten auf wechselnde Tide- und Seegangsbedingungen. Die Tabellen 8 - 13 geben eine Übersicht über die Schwankungsbreiten und Mittelwerte der ermittelten Sedimentparameter für die verschiedenen Entnahmeniveaus und Beprobungsserien.

Zu diesen Tabellen ist noch anzumerken, daß während der Beprobungsserie 03/87 nur die Niedrigwasserlinie (NWL) und der Vorstrand im Bereich der Bühnenstreichlinie (BSL) beprobt werden

konnten, da der höher gelegene Strand mit dicken Eisschollen bedeckt war. Desweiteren wurde im April 1987 die Bühnenstreichlinie nur im Bereich der Bühnenfelder 12 bis 31 beprobt.

Durch die jahreszeitlich bedingten Unterschiede in der Umformung und Beaufschlagung des Strandes durch Seegang und Brandung ergeben sich auch Veränderungen in den Sedimentparametern.

Die arithmetischen Mittel der mittleren Korndurchmesser d_{50} und Median (M_d) lassen für die Sommer- und Winterzustände systematische Änderungen erkennen (Tab. 8, 9). Die Sedimente, die im Herbst entnommen wurden, sind in der Regel gröber als die Sedimente der Frühjahrsbeprobungen. Dies gilt sowohl für die Sedimente des Vorstrandes, des nassen und des trockenen Strandes. Die Unterschiede können bis zu 0.1 mm betragen.

Für die Sortierungswerte lassen sich ebenfalls saisonal bedingte Änderungen herausarbeiten (Tab. 10). Auch diese Werte der Sedimente der BSL, der NWL und der MWL sind im Frühjahr höher als im Herbst. Interessant ist, daß der Anstieg der Kennwerte für die Sedimente an der Hochwasserlinie und des trockenen Strandes nicht gilt, da die Abfolge hier genau umgekehrt ist. Die Sedimente, die im Herbst entnommen wurden, sind schlechter sortiert, als jene, die nach der Winterperiode gewonnenen wurden. Als Ursache sind die äolischen Transport- und Sortierungsprozesse anzusehen, die im Winterhalbjahr aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten stärker wirksam sind.

Die Skewness- und Kurtosis-Werte lassen keine saisonal bedingten Änderungen erkennen (Tab. 11, 12). Jedoch zeigen auch diese Werte die stärkere Wechselwirkung zwischen Sedimenten der Hochwasserlinie und des trockenen Strandes als zwischen denen der Hochwasserlinie und den Sedimenten der Mittelwasserlinie. Anschelnend ist der äolische Transport im Bereich der Hochwasserlinie wirksamer als der aquatische Transport.

Die Karbonatgehalte der Sedimente des nassen Strandes schwanken stark und können Werte bis zu 50 % erreichen (Tab. 13). In der Regel weisen die Sedimente der Frühjahrsbeprobungen höhere Karbonatgehalte auf als die im Herbst entnommenen Sedimente. Ausnahmen bilden wieder die Sedimente an der Hochwasserlinie und die des trockenen Strandes. Durch die stärkere Seegangsbelastung im Winter reichert sich der Schill an, der zumelst als grobkörniges Material vorliegt.

Die Verteilung und Variabilität der Sedimentkennwerte über die verschiedenen Entnahmeniveaus am Strand ist nicht für alle Bühnenfelder identisch. Die Abbildung 68 verdeutlicht die Variabilität und Schwankungsbreite der d_{50} -Werte der Sedimente des Vorstrandes und des nassen Strandes. Dargestellt sind die Minimum-, Maximum- und arithmetischen Mittel aus den Beprobungsserien 04/87 bis 03/89 aus 6 Bühnenfeldern.

Deutlich tritt die größere Schwankungsbreite der mittleren Korndurchmesser im Divergenzbereich des Seegangs am Westkopf Norderneys (Entnahmeprofile 9 und 12) hervor. Die Sedimente der weiter westlich gelegenen Bühnenfelder zeigen eindeutig geringere Spannweiten der ermittelten d_{50} -Werte. Auch die Sedimente des Weststrandes (Entnahmeprofil 4) zeigen geringere Schwankungsbreiten der d_{50} -Werte am nassen Strand. Jedoch können die d_{50} -Werte der Vorstrandsedimente relativ stark streuen, was wohl auf die unmittelbare Nähe zur Rinne des Norderneyer Seegats zurückzuführen ist.

d50 (mm)	BSL						NWL						MWL					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.	0.081	0.132	0.110	0.108	0.131	0.100	0.134	0.147	0.139	0.143	0.137	0.150	0.146	0.146	0.169	0.160	0.150	
Max.	0.635	0.163	0.416	0.280	0.253	0.260	0.402	0.471	0.316	0.556	0.434	0.449	0.488	0.347	1.279	0.776	0.416	
Arith. Mittel	0.174	0.143	0.161	0.166	0.159	0.166	0.203	0.213	0.211	0.243	0.195	0.230	0.249	0.240	0.334	0.256	0.260	
Geom. Mittel	0.163	0.142	0.155	0.161	0.157	0.163	0.196	0.206	0.204	0.230	0.200	0.223	0.241	0.235	0.302	0.240	0.249	
Stand. Abw.	0.090	0.094	0.057	0.044	0.026	0.034	0.057	0.064	0.057	0.091	0.059	0.065	0.073	0.053	0.195	0.115	0.080	

d50 (mm)	HWL						TST					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.		0.181	0.155	0.167	0.152	0.167	0.174	0.148	0.161	0.153	0.168	
Max.		0.578	0.510	0.405	1.700	0.331	0.255	0.241	0.260	0.257	0.267	
Arith. Mittel		0.255	0.235	0.233	0.278	0.218	0.206	0.171	0.197	0.186	0.200	
Geom. Mittel		0.240	0.226	0.227	0.235	0.214	0.205	0.170	0.195	0.184	0.199	
Stand. Abw.		0.104	0.077	0.055	0.270	0.044	0.021	0.023	0.029	0.023	0.025	

Tab. 8: Statistik der d50-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)

Md (mm)	BSL						NWL						MWL					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.	0.052	0.134	0.054	0.037	0.049	0.036	0.134	0.148	0.139	0.148	0.139	0.152	0.149	0.166	0.179	0.158	0.150	
Max.	0.235	0.162	0.375	0.371	0.294	0.243	0.380	0.367	0.323	0.542	0.470	0.474	0.436	0.381	0.605	0.498	0.482	
Arith. Mittel	0.159	0.145	0.160	0.170	0.162	0.161	0.223	0.213	0.223	0.244	0.215	0.249	0.252	0.249	0.300	0.245	0.268	
Geom. Mittel	0.154	0.144	0.151	0.158	0.157	0.149	0.216	0.208	0.217	0.236	0.208	0.241	0.245	0.243	0.284	0.238	0.257	
Stand. Abw.	0.035	0.009	0.059	0.066	0.038	0.048	0.060	0.005	0.055	0.073	0.062	0.072	0.064	0.056	0.106	0.068	0.086	

Md (mm)	HWL						TST					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.		0.179	0.159	0.168	0.154	0.170	0.168	0.235	0.161	0.155	0.171	
Max.		0.411	0.526	0.427	0.621	0.302	0.251	0.147	0.252	0.253	0.265	
Arith. Mittel		0.221	0.235	0.235	0.235	0.218	0.204	0.172	0.196	0.187	0.201	
Geom. Mittel		0.217	0.225	0.229	0.219	0.216	0.203	0.171	0.194	0.185	0.199	
Stand. Abw.		0.051	0.080	0.059	0.113	0.037	0.021	0.022	0.027	0.025	0.025	

Tab. 9: Statistik der Median-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)

So (phi)	BSL						NWL						MWL					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.	0.206	0.183	0.251	0.255	0.197	0.238	0.196	0.168	0.212	0.215	0.212	0.231	0.275	0.295	0.377	0.210	0.205	
Max.	2.416	0.351	2.605	2.908	2.556	2.891	1.274	1.168	1.030	1.038	1.076	1.651	0.946	1.052	1.256	1.311	1.345	
Arith. Mittel	0.497	0.278	0.602	0.678	0.438	0.635	0.683	0.575	0.590	0.631	0.575	0.716	0.552	0.594	0.644	0.606	0.630	
Geom. Mittel	0.390	0.275	0.469	0.503	0.361	0.463	0.589	0.518	0.550	0.593	0.527	0.652	0.519	0.562	0.609	0.562	0.574	
Stand. Abw.	0.477	0.038	0.585	0.659	0.432	0.728	0.344	0.258	0.213	0.204	0.232	0.318	0.202	0.199	0.234	0.245	0.283	

So (phi)	HWL						TST					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.		0.294	0.292	0.208	0.283	0.276	0.275	0.250	0.219	0.230	0.219	
Max.		0.870	1.582	0.916	1.312	0.732	0.537	0.456	0.451	0.525	0.432	
Arith. Mittel		0.439	0.510	0.461	0.538	0.474	0.372	0.350	0.331	0.362	0.331	
Geom. Mittel		0.422	0.467	0.442	0.493	0.459	0.367	0.346	0.326	0.355	0.325	
Stand. Abw.		0.136	0.258	0.148	0.261	0.126	0.058	0.053	0.063	0.073	0.060	

Tab. 10: Statistik der So-Werte nach INMAN am Norderneyer Strand (Profil 1-34)

Sk	BSL						NWL						MWL					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.	-0.595	-0.310	-0.654	-0.834	-0.839	-0.819	-0.347	-0.214	-0.174	-0.330	-0.202	-0.131	-0.262	-0.111	-0.179	-0.162	-0.141	
Max.	0.518	0.175	0.387	0.527	0.441	0.291	0.670	0.502	0.642	0.650	0.414	0.742	0.484	0.578	0.654	0.584	0.598	
Arith. Mittel	0.062	0.054	0.086	0.107	0.107	-0.019	0.227	0.147	0.202	0.148	0.129	0.188	0.059	0.120	0.082	0.086	0.127	
Geom. Mittel																		
Stand. Abw.	0.250	0.144	0.282	0.303	0.244	0.290	0.269	0.149	0.186	0.241	0.156	0.211	0.138	0.161	0.168	0.185	0.182	

Sk	HWL						TST					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.		-0.257	-0.218	-0.275	-0.317	-0.290	-0.293	-0.143	-0.272	-0.278	-0.194	
Max.		0.338	0.305	0.248	0.532	0.294	0.111	0.204	0.153	0.221	0.181	
Arith. Mittel		0.002	0.020	0.029	0.086	0.037	-0.077	0.039	-0.029	0.036	0.012	
Geom. Mittel												
Stand. Abw.		0.160	0.142	0.119	0.177	0.135	0.088	0.096	0.119	0.122	0.104	

Tab. 11: Statistik der Schiefe-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)

K	BSL						NWL						MWL						
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	
Min.	0.697	0.730	0.764	0.722	0.957	0.908	0.728	0.738	0.757	0.822	0.831	0.737			0.949	0.777	0.916	0.753	0.762
Max.	3.269	1.386	4.501	1.664	2.997	2.619	2.713	1.893	1.899	3.788	3.330	3.139			1.908	2.037	1.703	1.821	2.056
Arith. Mittel	1.415	1.092	1.379	1.301	1.310	1.328	1.434	1.150	1.104	1.312	1.287	1.109			1.156	1.091	1.119	1.132	1.126
Geom. Mittel	1.342	1.083	1.248	1.274	1.275	1.291	1.371	1.122	1.088	1.229	1.187	1.047			1.146	1.066	1.103	1.104	1.089
Stand. Abw.	0.520	0.135	0.850	0.257	0.376	0.355	0.447	0.272	0.203	0.590	0.619	0.495			0.168	0.267	0.204	0.269	0.332

K	HWL						TST					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.		0.796	0.812	0.802	0.708	0.760		0.856	0.851	0.771	0.842	0.899
Max.		1.444	1.634	1.325	1.321	1.571		1.250	1.278	1.283	1.444	1.239
Arith. Mittel		0.996	1.012	1.022	0.987	0.947		1.002	0.946	1.042	1.012	1.039
Geom. Mittel		0.987	1.000	1.012	0.977	0.936		0.997	0.942	1.037	1.006	1.035
Stand. Abw.		0.146	0.173	0.140	0.141	0.154		0.150	0.089	0.108	0.121	0.093

Tab. 12: Statistik der Kurtosis-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)

CaCO ₃ (%)	BSL						NWL						MWL						
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	
Min.	0.60	1.70	1.30	1.10	0.50	0.40	0.43	0.45	1.26	0.37	0.40	0.70			0.30	0.25	0.27	0.05	1.10
Max.	11.15	5.65	15.85	18.40	12.85	16.30	7.46	20.10	10.33	19.65	19.40	36.70			17.35	19.87	37.30	42.10	30.95
Arith. Mittel	3.00	2.56	4.30	4.75	2.98	3.28	2.90	5.36	4.31	5.29	3.87	6.65			4.35	5.23	8.15	6.00	6.59
Geom. Mittel	2.10	2.43	3.20	3.25	2.28	2.35	2.34	3.79	3.59	3.38	2.55	4.19			2.97	3.57	3.80	2.94	4.52
Stand. Abw.	2.89	0.97	4.24	4.59	2.77	3.19	1.82	4.77	2.66	4.24	3.97	7.08			4.20	4.89	9.38	7.92	6.45

CaCO ₃ (%)	HWL						TST					
	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89	03/87	04/87	09/87	04/88	09/88	03/89
Min.		0.45	0.39	0.30	0.60	0.10		0.25	0.42	0.30	0.35	0.20
Max.		32.90	28.08	24.90	49.10	6.95		4.60	3.98	6.00	1.40	2.30
Arith. Mittel		5.21	4.91	2.91	7.23	1.82		0.95	1.27	0.88	0.77	0.88
Geom. Mittel		2.17	2.24	1.26	2.37	1.22		0.61	1.09	0.59	0.72	0.70
Stand. Abw.		8.08	6.70	5.04	12.34	1.69		1.20	0.84	1.29	0.26	0.67

Tab. 13: Statistik der Karbonatgehalte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)

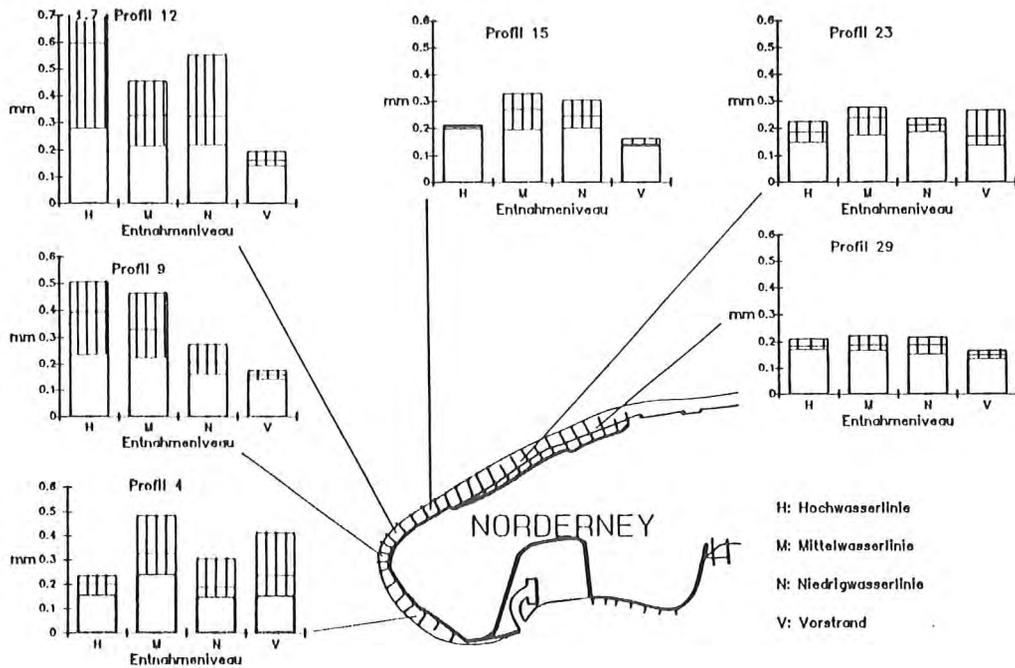


Abb. 68: Minimum-, Maximum- und arithmetische Mittel der d_{50} -Werte in ausgewählten Bühnenfeldern Norderneys

Der Divergenzbereich tritt jedoch nicht nur durch die größeren Schwankungsbreiten sondern auch durch höhere d_{50} -Werte der Sedimente des nassen Strandes hervor. Dies gilt für die Bühnenfelder Zbl-B, A-D1 (Profil 9 und 12) und auch noch für das Bühnenfeld F1-G1 (Profil 15). Hier macht sich deutlich der stärkere Energieeintrag durch Seegang und Brandung bemerkbar.

Während die mittleren Korndurchmesser der Sedimente in den östlich gelegenen Bühnenfeldern im Bereich der Mittelwasserlinie am größten sind und zum Vorstrand und zur Hochwasserlinie hin abnehmen, zeigt sich im unmittelbaren Divergenzbereich eine andere Verteilung. Hier nehmen die d_{50} -Werte vom Vorstrand bis zur Hochwasserlinie hin zu. Anzumerken ist, daß sich durch die niedrigen Strandhöhen im Divergenzbereich im eigentlichen Sinne keine Hochwasserlinie und kein trockener Strand ausbilden können. Als Hochwasserlinie gilt hier der Bereich am Deckwerksfuß. Der stetige Anstieg der mittleren Korndurchmesser ist auf einen erhöhten Energie- und Turbulenzeintrag durch am Deckwerk reflektierte Brandung zurückzuführen. Verdeutlicht wird dieser Effekt im Divergenzbereich durch Abbildung 69, in der die d_{50} -Werte, die Sortierungswerte und die Karbonatgehalte der Sedimente des Vorstrandes und des nassen Strandes dargestellt sind, die im Herbst 1987 entnommen wurden.

Der Divergenzbereich zwischen den Profilen 8 und 14 hebt sich gut von den anderen Strandabschnitten durch die kontinuierlich steigenden d_{50} -, So-Werte und Karbonatgehalte ab (Abb. 69). Mit dieser Abbildung wird auch der enge Zusammenhang zwischen den Karbonatgehalten - also dem Schillanteil im Sediment - und den mittleren Korngrößen und Sortierungswerten deutlich. Die größeren und schlechter sortierten Sedimente im Divergenzbereich des Seegangs am Westkopf Norderneys sind auf Schillanreicherungen in den zugeordneten Bühnenfeldern zurückzuführen.

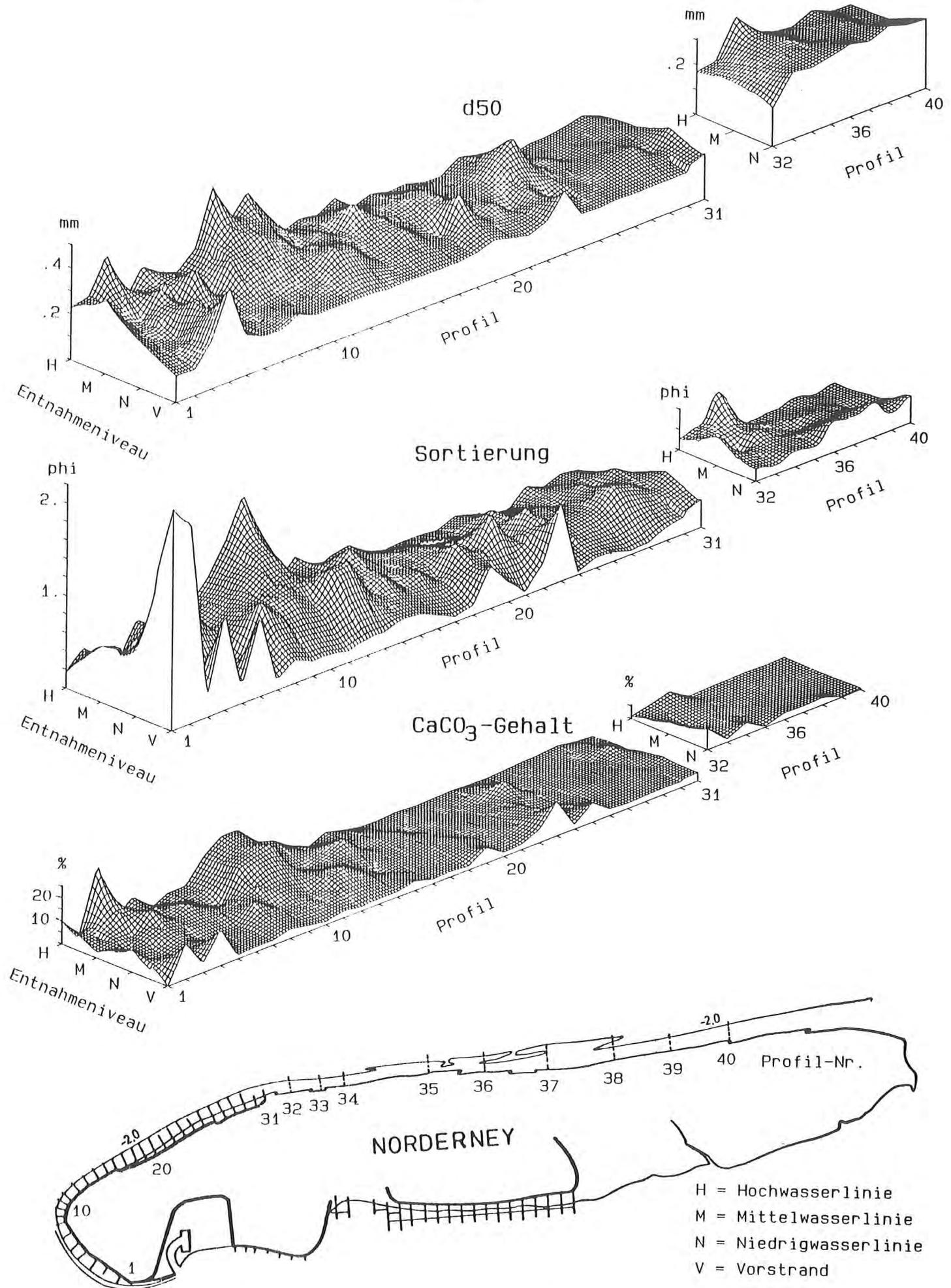


Abb. 69: Verteilung der mittleren Korndurchmesser, der Sortierungswerte und der Karbonatgehalte im Herbst 1987 am Norderneyer Strand und Vorstrand

Anscheinend weist der Schillbruch eine bessere Erosionsresistenz als der Quarzsand auf, da der Schill zum größten Teil in den groben Kornfraktionen vorliegt. Das durch die Porosität etwas geringere spezifische Gewicht des Schills spielt dabei anscheinend keine entscheidende Rolle.

Die Sedimente des Vorstrandes zeichnen sich durch sehr gleichförmige Verteilungen aus und unterscheiden sich dadurch gut von den Strandsedimenten. Nur die Sedimente in der Bühnenstreichlinie vor dem Weststrand heben sich durch schlechtere Sortierungen hervor. Dies ist auf größere Anteile von Schluffen oder Schillbruch im Sediment zurückzuführen, die mit dem Ebbstrom des Seegats aus dem Watt herantransportiert wurden.

Der dem Divergenzbereich vorgelagerte Vorstrand hebt sich nicht besonders hervor. Anscheinend besteht während ruhiger Wetterlagen wie im Sommer 1987 kein seewärts gerichteter Sedimenttransport, der Material vom Strand in den Vorstrandbereich transportiert.

Die Sedimente, die im und östlich des Platananlandungsbereichs (Profile 32 - 40) entnommen wurden, zeigen vollkommen abweichende Verteilungen. Die mittleren Korndurchmesser liegen deutlich über denen der Sedimente westlich des Anlandungsbereichs. Sie erreichen die Größenordnungen der Sedimente im Divergenzbereich am Westkopf Norderneys. Im Gegensatz zu diesen weisen sie jedoch nur sehr geringe Karbonatgehalte - also Schillanteile - auf, wodurch sich auch die guten bis sehr guten Sortierungen erklären lassen.

8.2. Kornformuntersuchungen

8.2.1. Allgemeines

Für die Umlagerungsvorgänge von Sedimenten spielen deren Eigenschaften (Korndichte, Korngröße und Kornform) eine große Rolle. Daher wurde schon häufiger versucht, durch Kornformuntersuchungen die Art und Weise der Umlagerungsprozesse zu verdeutlichen (z. B. McCARTHY 1933, PETTIJOHN & LUNDAHL 1943, BEAL & SHEPARD 1956, WASKOM 1958, SHEPARD & YOUNG 1961, KUENEN 1964, WINKELMOLEN 1971, WINKELMOLEN & VEENSTRA 1974, 1980, VEENSTRA & WINKELMOLEN 1976, MAZZULLO et al. 1984, CLEMENS & KOMAR 1988, 1989, FRANKENBURG & EHRlich 1989).

Der Transport von Sedimentkörnern kann rollend (bed load), springend (saltation load) oder in Suspensionsform (suspension load) vor sich gehen. In der Natur werden diese drei Transportarten gleichzeitig wirksam sein, wobei die größeren Sedimentpartikel vorwiegend rollend, die feineren springend und die sehr feinen zumelst als Suspension transportiert werden. Bei diesen drei verschiedenen Transportarten wirkt sich die Form eines Sedimentkorns in unterschiedlicher Weise aus (Abb. 70).

Beim rollenden Transport kann nach McCARTHY (1933), PETTIJOHN & LUNDAHL (1943) und SHEPARD & YOUNG (1961) davon ausgegangen werden, daß die besser gerundeten Körner leichter bewegt werden können als die kantigeren. Demnach würden die Sedimentkörner beim rollenden Transport in Richtung der abnehmenden Strömungsgeschwindigkeit besser gerundet sein (Abb. 70). Die suspensionsartig und springend verfrachteten Sedimentkörner zeigen hingegen eine bessere Transportierbarkeit mit abnehmendem Rundungsgrad. Dies beruht auf den kleineren Sink- bzw. Absetzgeschwindigkeiten der kantigen Körner gegenüber gut gerundeten, wodurch das kantigere Korn

länger suspendiert bleibt und daher mit dem Transportmedium weiter transportiert werden kann. Nach McCARTHY (1933) und WINKELMOLEN (1969) nimmt daher beim Suspensionstransport der Rundungsgrad in Transportrichtung ab (Abb. 70) und zeigt damit eine dem rollenden Transport entgegengesetzte Verteilung der Kornformen. Natur- und Laborversuche zu dieser Fragestellung von den beiden o. g. Autoren bestätigten dies.

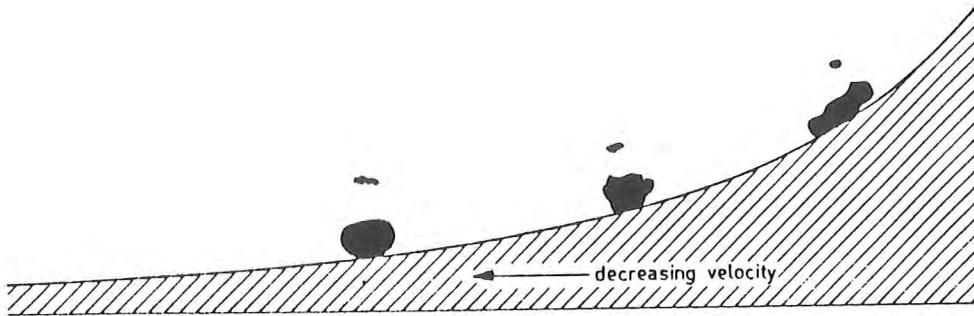


Abb. 70: Kornformsortierung in einem Fluß mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit (aus WINKELMOLEN 1969)

WINKELMOLEN (1969) hat jedoch nicht nur den Einfluß der Kornform auf den Suspensionstransport durch Laborversuche untersucht, sondern auch Versuche mit derselben Zielsetzung für den rollenden Transport ausgeführt. Gerade hinsichtlich des Einflusses der Kornform auf den rollenden Transport kommt er zu anderen Ergebnissen als die oben angeführten Resultate von McCARTHY (1933), PETTIJOHN & LUNDAHL (1943) und SHEPARD & YOUNG (1961). Die Ergebnisse seiner Versuche faßt WINKELMOLEN (1969: S. 48) wie folgt zusammen:

"a) In suspension transport less rollable grains will be moved faster than better rollable grains. The better rollable grains showed a pronounced tendency to be concentrated in the lower levels of the suspension, where lower velocities occur and where bottom contacts with the resulting increase in friction will be more frequent. Furthermore, there are indications that in saturated saltation loads, where an exchange of suspended and bottom particles occurs, the best rollable grains will tend to occupy bottom positions in favour of less rollable grains, in saltation.

b) For bottom transport also the experiments point to a better transportability in general for less rollable grains. Although only a limited number of situations was tested and the presented evidence is perhaps less convincing than for suspension transport, not one experiment showed that better rollable grains had moved faster than less rollable ones.

It must be stressed again therefore that the term "rollability" should be used only in reference to the measuring principle, but that it is not a clue to the behaviour in natural transport.

On the contrary, in some bottom traction processes as rolling over a flat grain packing and traction in ripple transport, the less rollable grains are the ones that show the best transportabilities.

c) The less rollable grains tend to go into suspension more easily when suction forces are applied.

The simple hypothesis, formulated by McCARTHY and universally accepted by sedimentologists, was that (1) more spherical and rounded grains travel faster in bottom transport, than more angular and elongated grains, and (2) that there exists an opposite transportability behaviour for grains in bottom traction and in suspension induced by their shape characteristics. The main conclusion of this chapter is that it should be at least qualified and perhaps even rejected.

There appears to exist a strong probability that for most if not all bottom traction conditions, the shape selection will act in the sense as with suspension transport, i.e. that the less rollable grains will show the best transportability.

However, there remains a qualitative difference between both processes. The experimental data all show a much more pronounced shape sorting during suspension transport than during bottom traction".

8.2.2. Ergebnisse der Rollsorter-Analysen

8.2.2.1. Allgemeines

Die ersten Untersuchungen mit dem Rollsorter wurden zur Prüfung der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse ausgeführt. Dabei zeigte sich, daß bei diesen Mehrfachmessungen in der Regel mit Abweichungen von weniger als 1% zu rechnen ist. Der Vergleich dieser Abweichungen mit der Schwankungsbreite der Rolligkeiten gleicher Fraktionen von verschiedenen Sedimentproben, die nach WINKELMOLEN (1969) bis zu 40 % erreichen können, verdeutlicht die hohe Genauigkeit und gute Differenzierbarkeit.

Die Rolligkeit eines Sedimentes wird für jede $\frac{1}{4}$ -phi Fraktion getrennt bestimmt, um zu erfahren, ob es über das gesamte Kornspektrum betrachtet derselben "Transportgeschichte" ausgesetzt war. Daneben läßt sich aber auch noch innerhalb einer Kornfraktion differenzieren. Die Abbildung 71 zeigt die ermittelten Rolligkeiten für Quarzsand, Schillbruch und einem 1:1 Gemisch dieser beiden aus der 0.5 - 0.71 mm (1.0 - 0.5 phi) Fraktion. Dabei weist die Kurve für den Quarzsand auf sehr geringe Kornformunterschiede hin. Demgegenüber sind die Kornformen in der Schillbruchprobe vielfältiger und weisen gegenüber den gleichgroßen Sanden um bis zu 50 % höhere absolute Rolligkeitswerte auf. Durch die Mischprobe läßt sich die gute Trennung der unterschiedlichen Kornformen von Sand und Schillbruch im Rollsorter aufzeigen. Der Verlauf der Rolligkeitskurve von 5 - 50 Gew.-% ist dem Kurvenverlauf der Sandprobe identisch, während der darüber liegende Kurvenabschnitt der Schillbruchkurve gleicht. Deutlich ist auch der Wechsellpunkt im Kurvenverlauf bei der 50 %-Linie zu erkennen. Daher müßte es möglich sein, durch die Rolligkeitskurven die Zusammensetzung bimodaler Sedimente zu ermitteln. Voraussetzung wäre allerdings, daß sich die Ausgangssedimente in ihren Kornformen unterscheiden.

Die Reproduzierbarkeit der Rolligkeitsanalysen schien nach den ersten Versuchen sehr gut zu sein, wie dies auch von WINKELMOLEN (1969) angegeben wurde. Im Laufe der Untersuchungen, bei denen rund 1000 Sedimentproben mit bis zu 10 Fraktionen analysiert wurden, zeigte sich bei Wiederholungsmessungen sehr viel früher untersuchter Sedimentproben, daß die ermittelten Rolligkeitswerte nicht mit den früheren Ergebnissen übereinstimmten. Beim Vergleich der Ergebnisse wurde deutlich, daß die später analysierten Fraktionen eines Sediments schneller durch die Rollsorter-Trommel liefen als bei der ersten Analyse.

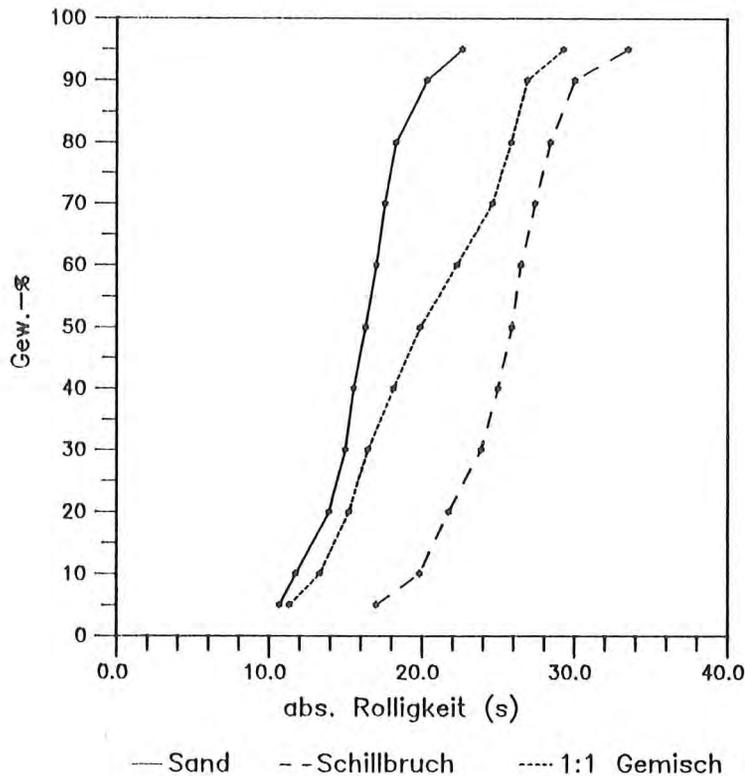


Abb. 71: Absolute Rolligkeitwerte von Sand, Schillbruch und einem 1:1 Gemisch (Fraktion 1.0 - 0.5 phi)

Weitere daraufhin ausgeführte Wiederholungsmessungen machten deutlich, daß mit steigender Anzahl der zwischen der ersten und zweiten Messung durchgeführten Rolligkeitsanalysen, die Abweichungen der einzelnen Fraktionsergebnisse untereinander umso größer waren. Diese Abweichungen in den Messergebnissen lassen sich nur durch einen Feinschliff der Oberflächenrauigkeit des Latexfarbaufrags auf der Innenseite der Rollsorter-Trommel durch die rollenden Sedimentkörner erklären, da alle anderen Geräteeinstellungen wie Neigung und Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel regelmäßig überprüft wurden.

Da ein quantitativer Vergleich der absoluten und relativen Rolligkeitwerte aus diesem Grund nur über eine Angleichung mittels Regressionskoeffizienten möglich war, wurde im Rahmen dieser Arbeit darauf verzichtet.

WINKELMOLEN (1969) und WINKELMOLEN & VEENSTRA (1971, 1974) machen über die oben angeführten Fehlerquellen bei der Ermittlung der Rolligkeitwerte bzw. deren Berücksichtigung bei der Auswertung keinerlei Angaben. Daher ist davon auszugehen, daß der messungsbedingte Fehler nicht berücksichtigt wurde. Somit ist die Interpretation der quantitativen Unterschiede zweier zeitlich unterschiedlicher Beprobungserien von WINKELMOLEN & VEENSTRA (1980) im Hinblick auf sedimentologische Umlagerungsprozesse teilweise wohl nicht haltbar.

Neben der quantitativen Auswertung wurde von den o. g. Autoren jedoch auch noch eine qualitative Bewertung der Rolligkeitsdaten mit Hilfe von Shape Distribution Character-Diagrammen (S.D.C.) vorgenommen. Hierzu ist es jedoch nötig, die absoluten Rolligkeitswerte in relative umzuwandeln. Dazu ist es nach WINKELMOLEN (1969) notwendig, für jede Kornfraktion das arithmetische Mittel der absoluten Rolligkeitswerte eines Untersuchungsgebietes zu bestimmen.

Die Beprobung des Norderneyer Seegebietes, die der Bestandsaufnahme der Rolligkeiten zur Berechnung der "relativen Rolligkeitswerte" zugrundeliegt, wurde im Frühjahr 1988 ausgeführt. In der Tabelle 14 sind die arithmetischen Mittel der absoluten Rolligkeiten, die Minimum- und Maximum-Werte einschließlichs deren %-Abweichungen vom Mittelwert für jede Kornfraktion aufgelistet. Die Schwankungsbreiten der Werte für jede Kornfraktion sind in der Abbildung 72 dargestellt.

Fraktion	Mittel	Min.	%-Abw.	Max.	%-Abw.
>0.09	43.11	37.69	-12.57	52.62	22.06
>0.106	39.22	31.34	-20.09	46.91	19.61
>0.125	34.85	30.44	-12.65	41.37	18.71
>0.15	32.46	26.85	-17.28	39.29	21.04
>0.18	28.94	25.75	-11.02	35.30	21.98
>0.212	26.02	21.15	-18.72	34.36	32.05
>0.25	23.97	17.57	-26.70	33.34	39.09
>0.30	22.41	16.38	-26.91	35.09	56.58
>0.355	20.99	17.95	-14.48	35.09	67.17
>0.50	20.87	17.48	-16.24	31.67	51.75

Tab. 14: Statistik der absoluten Rolligkeitswerte jeder analysierten Kornfraktion der Beprobungsserie 04/88

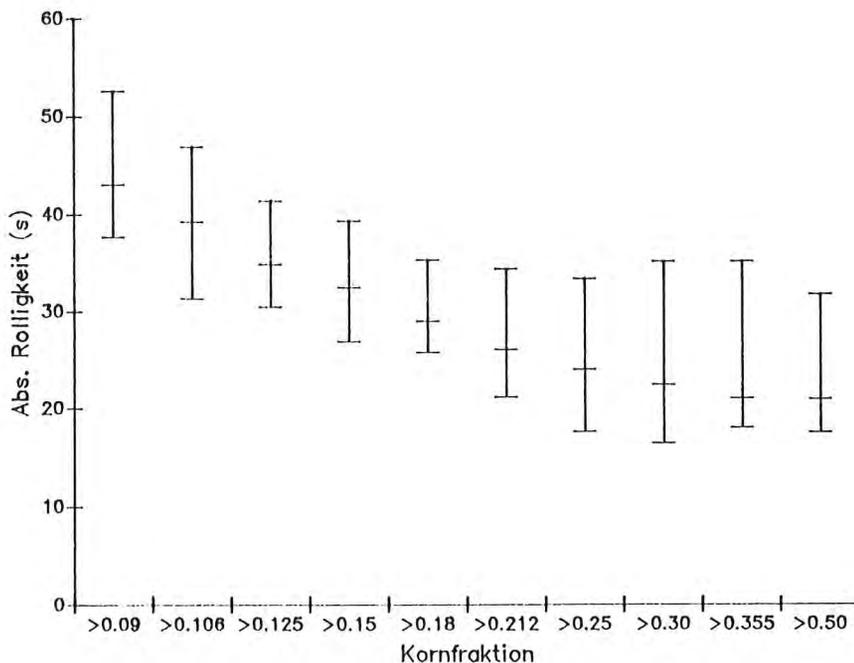


Abb. 72: Arithmetisches Mittel und Schwankungsbereich der absoluten Rolligkeitswerte jeder Siebfraktion im Untersuchungsgebiet (Probenserie 04/88)

Mit zunehmender Korngröße verringern sich die absoluten Rolligkeitswerte, während die Schwankungsbreiten - insbesondere im schlechter gerundeten Kornbereich - größer werden. Hierbei spielt der zunehmende Schillanteil in den größeren Fraktionen eine große Rolle.

Ausgehend von den in der Tabelle 14 aufgeführten Mittelwerten, wurden für jede der in diesem Bericht bearbeiteten Sedimentproben und deren untersuchte Kornfraktionen die relativen Rolligkeitswerte als prozentuale Abweichung vom arithmetischen Mittelwert der zugehörigen Kornfraktion bestimmt. Alle weiteren Rolligkeitsuntersuchungen von Norderneyer Sedimenten werden ebenfalls auf diese Mittelwerte bezogen, damit ein Vergleich zwischen zeitlich verschiedenen Entnahmeserien möglich ist.

Der Kornform Verteilungs-Charakter (Shape Distribution Character) eines Sediments bezeichnet die Verteilung der relativen Rolligkeitswerte über die Korngrößenfraktionen (WINKELMOLEN 1971). Um die messungsbedingten Fehler zu eliminieren und die Vergleichbarkeit zu erleichtern, wurden in dieser Arbeit jedoch nicht die relativen Rolligkeitswerte, sondern die Differenz der relativen Rolligkeitswerte der einzelnen Kornfraktionen zum niedrigsten dieser gemessenen Werte über die Kornfraktionen dargestellt.

Nach KUENEN (1964) lassen diese Änderungen des Kornformspektrums eines Sediments Rückschlüsse auf das Environment zu. Denn jeder Umlagerungs- bzw. Transportvorgang bewirkt nicht nur eine Sortierung des Ursprungssediments nach der Korngröße und spezifischem Gewicht, sondern auch nach der Kornform. Sedimente eines Erosionsbereichs besitzen in ihrem größeren Kornspektrum zumeist gut gerundete Kornformen, die ein geringes Oberflächen/Gewichts-Verhältnis aufweisen und dadurch ähnliche hydraulische Eigenschaften eines noch größeren, aber schlechter gerundeten Korns besitzen.

Dieses Konzept von KUENEN war die Grundlage für die Klassifizierung der Kornform-Verteilungskurven (S.D.C.) von WINKELMOLEN (1971) und deren Interpretation im Hinblick auf die Art von Transport- und Selektionsprozessen.

WINKELMOLEN (1971) unterschied vier verschiedene S.D.C.-Kurven (Abb. 73), die im Folgenden charakterisiert werden.

Der A-Typ umfaßt Sedimente, deren relative Rolligkeitswerte mit zunehmendem Korndurchmesser abfallen. Dieser Kurvenverlauf ist kennzeichnend für Restsedimente eines Erosionsbereichs, da größere, gut gerundete Körner aufgrund ihrer geringeren Transportsuszeptibilität zurückbleiben, während die kantigeren Körner leichter suspendiert und somit besser transportiert werden können. Da die Kornform-Selektionsprozesse mit geringer werdendem Korndurchmesser abnehmen, werden im feineren Korngrößenbereich auch die gut gerundeten Sedimentkörner abtransportiert, so daß es dort zu keiner Anreicherung besser gerundeter Kornformen kommt.

Der S-Typ beschreibt mit zunehmender Korngröße einen steigenden Kurvenverlauf. Das bedeutet, daß ein Sediment eine schlechtere Kornrundung im größeren Kornspektrum gegenüber dem feineren aufweist. Dieser Kurventyp ist typisch für Bereiche, in denen Sedimentationsvorgänge dominieren, da größere und kantigere Körner mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit zusammen mit besser gerundetem, feinerem Sediment abgelagert werden. Die feineren, kantigen Sedimentbestandteile

können sich aufgrund ihrer geringeren Sinkgeschwindigkeiten noch nicht absetzen und werden daher weiter in Suspension gehalten. Sie sedimentieren erst bei sehr ruhigen Bedingungen.

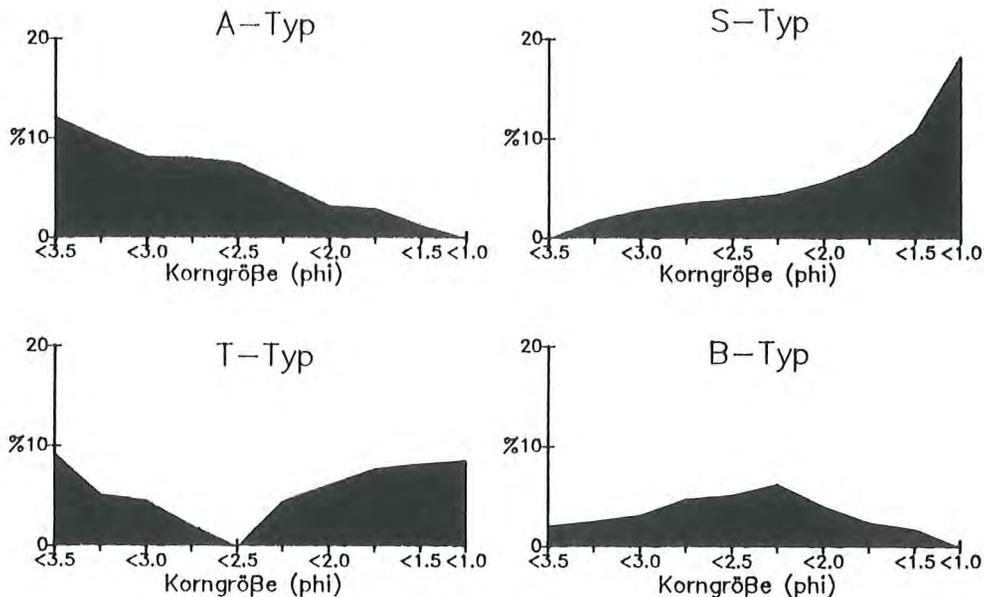


Abb. 73: Die verschiedenen Shape Distribution Character-Typen nach WINKELMOLEN (1969)

Talartig verlaufende Rolligkeitskurven (T-Typ) kennzeichnen Sedimente, deren beste Kornrundung im mittleren Kornspektrum anzutreffen ist, wobei häufig die beste Kornrundung mit den gewichtsmäßig größten Kornfraktionen einhergeht. Nach WINKELMOLEN (1971) ist dieser Kurvenverlauf auch für Flußbettablagerungen typisch. Die größeren kantigeren Sedimentkörner werden bei abnehmenden Transportkapazitäten zusammen mit den feineren, aber besser gerundeten Körnern sedimentiert. Dieser Verlauf entspricht dem S-Typ. Der Anstieg der Rolligkeitswerte zur feinsten Kornfraktion, ist auf Zufuhr von Sedimenten während geringer Strömungsgeschwindigkeiten zurückzuführen, bei denen nur die kantigeren, feinen Sedimentpartikel in Suspension gebracht bzw. gehalten werden konnten.

Der B-Typ weist im feinen und groben Kornspektrum besser gerundete Kornformen als im zentralen Kornspektrum auf. Diese Rolligkeitsverteilung charakterisiert Mischsedimente, bei denen der größere Anteil des Sediments die Merkmale eines Restsediments (A-Typ) aufweist, das sich bei starken Strömungen gebildet hat, und dem bei geänderten Strömungsverhältnissen (abnehmende Transportgeschwindigkeit) feineres und besser gerundetes Material zugeführt wurde.

8.2.2.2. Auswertung der Kornformanalysen

8.2.2.2.1. Vorbemerkungen

Bisher wurden über eintausend der im Untersuchungsgebiet entnommenen Sedimente mit dem Rollsorter bearbeitet. Die analysierten Sedimente umfassen die Proben der Entnahmeserien 09/87,

04/88, 09/88 und 10/88. Die Ergebnisse sind in Form von S.D.C.-Diagrammen für den Strand (Abb. 78-80) und das Seegebiet (Abb. 74-77) getrennt dargestellt. Für die Interpretation dieser Diagramme sind die Abbildungen 42-45 und 49-52 hilfreich, in denen die prozentualen Gewichtsanteile der einzelnen Kornfraktionen jedes Sediments dargestellt sind. Zu diesen Diagrammen ist noch anzumerken, daß in den einzelnen Kornverteilungshistogrammen drei Kornfraktionen mehr dargestellt sind als in den Rolligkeitsdiagrammen. Diese drei (gröberen) Kornfraktionen wurden nicht mit dem Rollsorter bearbeitet, da nach WINKELMOLEN (1969) nur Sedimentfraktionen zwischen 3.5 und 0.5 ϕ° analysiert werden sollten.

Als Ausgangspunkt der Bewertung wird die Beprobungsserie 04/88 herangezogen. Ein erster Überblick verdeutlicht die verwirrende Vielfalt der möglichen S.D.C.-Kurventypen, die nicht auf die vier oben angeführten Typen nach WINKELMOLEN (1969) beschränkt sind. Dadurch wird die Bewertung deutlich erschwert.

8.2.2.2.2. S.D.C.-Kurven im Seegebiet

Der dem Norderneyer Riffbogen nördlich vorgelagerte Vorstrandbereich und das anschließende Küstenvorfeld sind durch Sedimente charakterisiert, die tendenziell eine abfallende S.D.C.-Kurve aufweisen und somit als Restsediment anzusprechen sind. Die zuweilen auftretenden ansteigenden Kurvenverläufe im größten analysierten Kornspektrum können außer acht gelassen werden, da sie zumelst unter 2% des Gesamtsediments umfassen.

Im Verlauf des Riffbogens von Westen nach Osten lassen sich Bereiche unterschiedlicher S.D.C.-Diagramme ausgrenzen. Im westlichen, äußeren Abschnitt des Norderneyer Riffbogens treten zumelst Sedimente des B-Typs auf. Bei diesen Sedimenten umfaßt jedoch der aufsteigende Ast der S.D.C.-Kurve den größten Gewichtsanteil des Sediments, während der abfallende Ast nur wenige Prozent des Gesamtsediments charakterisiert. Damit wäre dieser Abschnitt als Sedimentationsbereich zu charakterisieren, in dem feinere, gut gerundete Körner mit gröberen, weniger gut gerundeten Körnern sedimentieren. Die gut gerundeten gröberen Sedimentfraktionen des abfallenden Astes lassen sich als Ergebnis des rollenden Transports erklären.

Im Bereich der Nordwestgründe und der westlichen Nordergründe ist im allgemeinen die abfallende Kurve (A-Typ) vertreten. Die besten Kornrundungen liegen hier im groben Kornspektrum, wodurch diese Ablagerungen als Restsedimente angesprochen werden müssen. Aufgrund der exponierten Lage gegenüber dem Seegang ist dies auch nicht weiter verwunderlich.

Weiter nach Osten wird dieser Kurventyp vom S- oder T-Typ abgelöst. Die guten Kornrundungen liegen bei diesen Sedimenten im Kornspektrum der gewichtsmäßig größten Fraktionen. Der ansteigende Kurvenverlauf ist auf das grobe Kornspektrum beschränkt.

Im Bereich des Kalfamergats und des Osterriffs zeigen die Sedimente einen ähnlichen oder gleichen Verlauf der S.D.C.-Kurven wie die Sedimente des äußeren Riffbogens nördlich des Ostendes von Juist. Auch hier sind die gewichtsmäßig größten Sedimentfraktionen durch steigende Rolligkeitskurven und somit durch schlechtere Kornrundung mit steigendem Korndurchmesser gekennzeichnet.

114

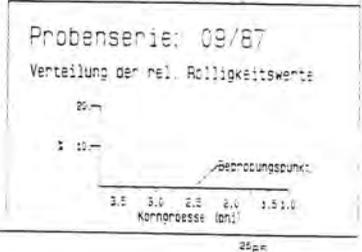
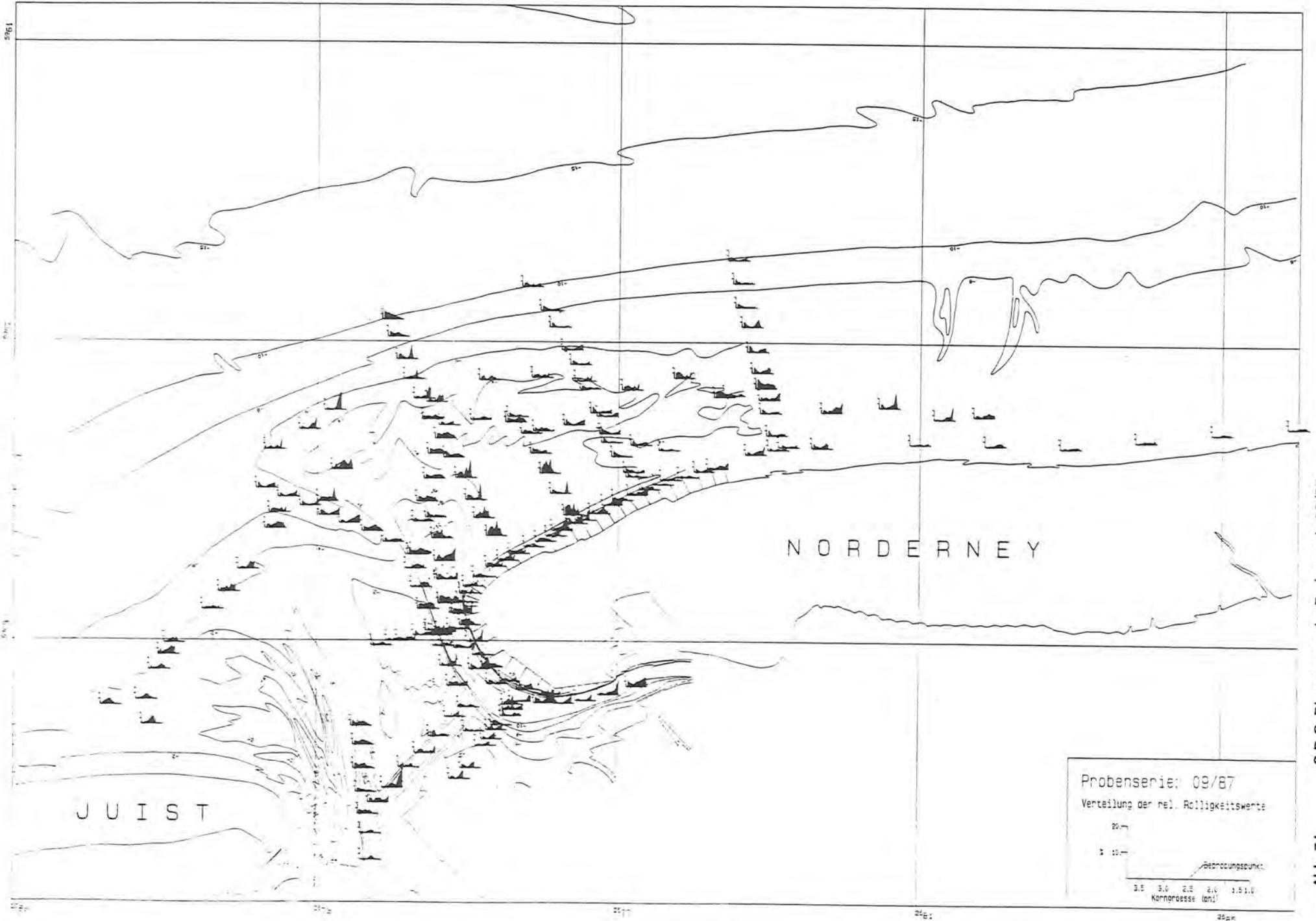


Abb. 74:

S.D.C.-Diagramme der Probenserie 09/87

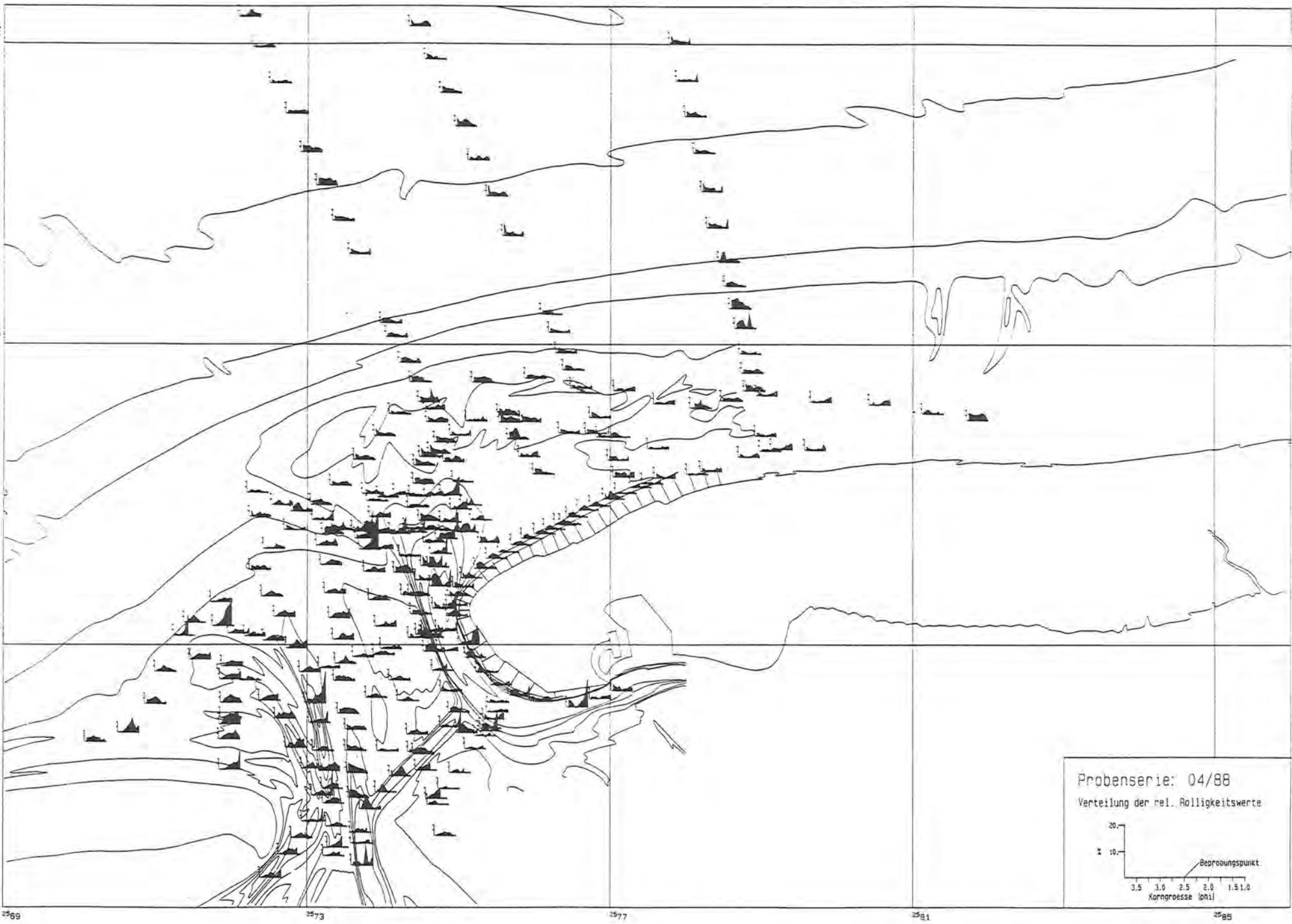


Abb. 75:

S.D.C.-Diagramme der Probenreihe 04/88

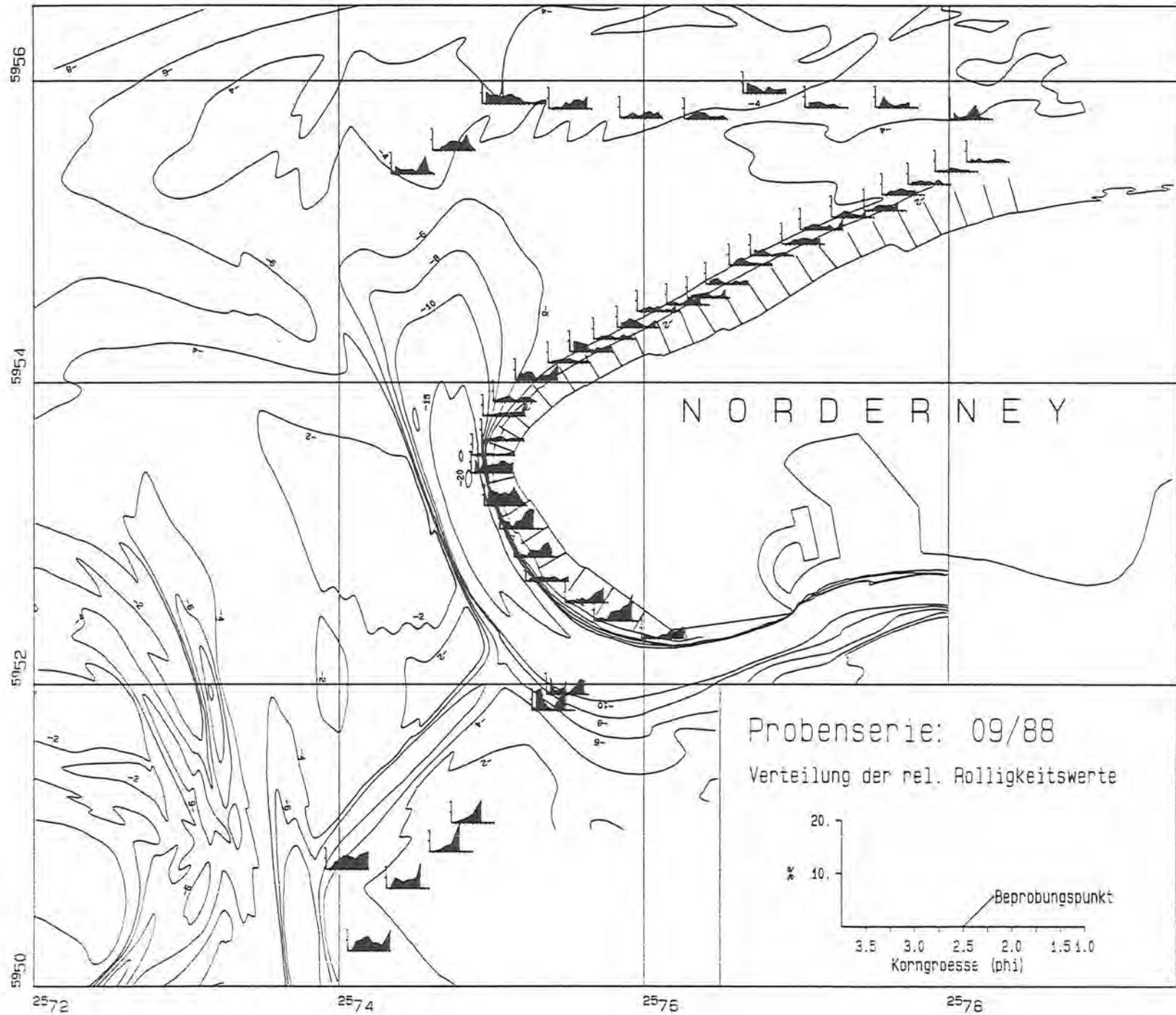
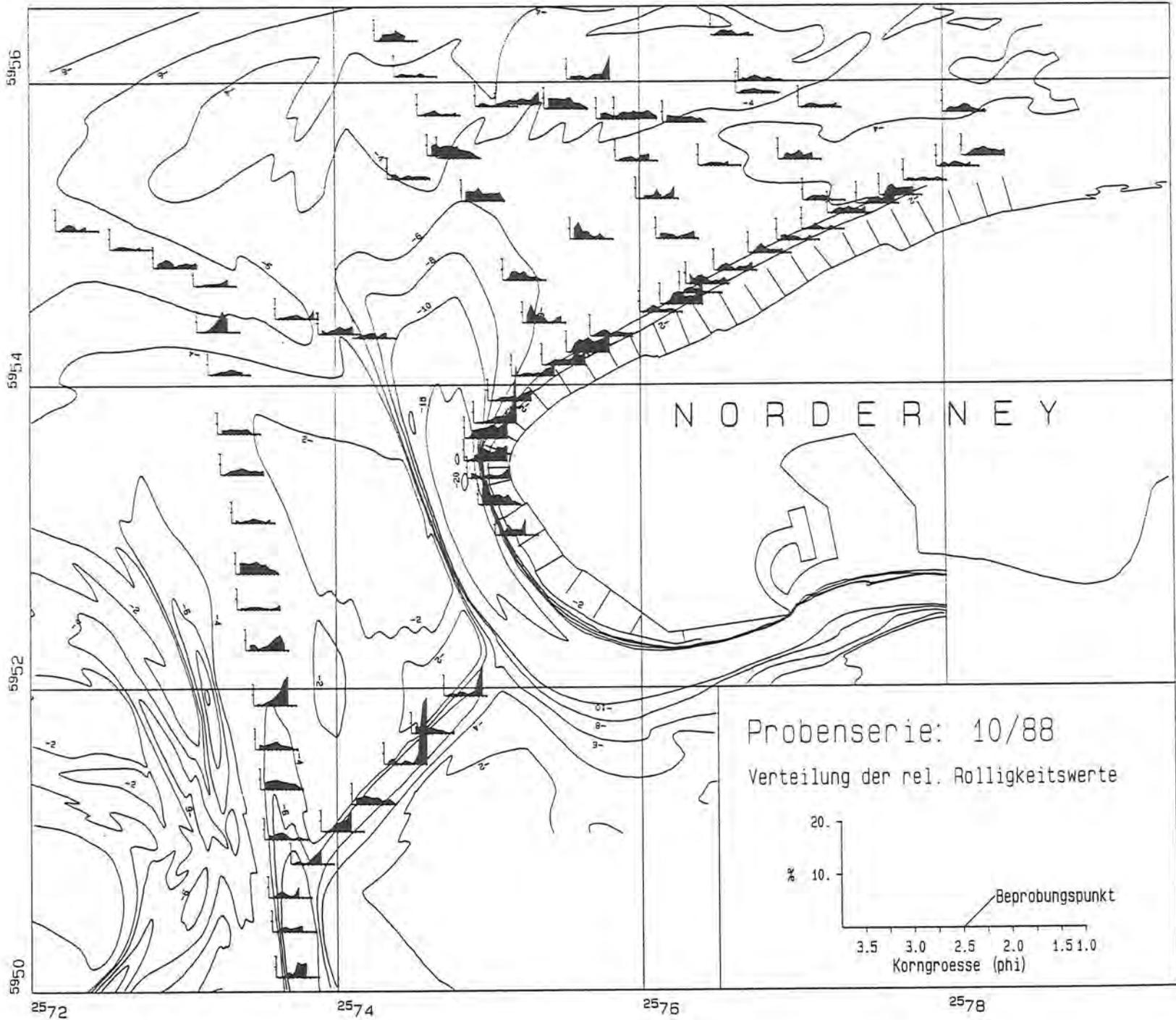


Abb. 76: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 09/88

Abb. 77: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 10/88



Im Verlauf des Busetlefs treten die verschiedensten S.D.C.-Kurven auf. Die Sedimente in den tiefsten, noch beprobten Rinnenteilen zeigen tendenziell leicht steigende Rolligkeitskurven (S-Typ). Die daran nördlich anschließenden Sedimente weisen demgegenüber deutlich stärkere Änderungen im Kurvenverlauf auf. Bei diesen Sedimenten liegen die besten Kornrundungen in den groben Fraktionen vor. Zum feineren Korn hin steigen die relativen Rolligkeitswerte kontinuierlich an. Daher sind die Ablagerungen als Sedimente vom A-Typ und somit als Erosionssedimente zu klassifizieren. Dies geht auch mit den Ergebnissen der Sedimentkennwerte und -verteilungen einher. Im weiteren nördlichen Verlauf nehmen die S.D.C.-Diagramme die Form der Diagramme der westlich gelegenen Sedimente an.

Im Riffgat, im Norderneyer Seegat und im Schluchter sind zumeist S.D.C.-Kurven des T-Typs vertreten. Die besten Kornrundungen liegen dabei in den gewichtsmäßig größten Sedimentfraktionen vor. Neben diesen talartig verlaufenden Kurven können auch Rolligkeitsdiagramme des steigenden Typs auftreten.

Die Sedimente der Robbenplate weisen eine bergartig verlaufende Kurvenform (B-Typ) auf. Die schlechtesten Kornrundungen kommen in den Fraktionen mit den höchsten Gewichtsanteilen vor. Die Differenzen zwischen den minimalen und maximalen Abweichungen der Rolligkeitswerte sind geringer als die der weiter westlich gelegenen Sedimente mit S.D.C.-Kurven des B-Typs. Dies geht einher mit breiteren Kornverteilungen und somit schlechteren Sortierungen. Am Ostrand der Robbenplate weisen die entnommenen Sedimente S.D.C.-Kurven des S- und T-Typs auf.

Auf der Steinplate stehen Sande an, die durch bergartig verlaufende oder steigende Rolligkeitskurven im feinen Kornspektrum und steigende Kurvenverläufe bei den gröberen Kornfraktionen gekennzeichnet sind. Die besten Kornrundungen liegen zumeist beim Maximum der Kornverteilungen.

Der Norderneyer Inselvorstrand weist im Bereich der Bühnenstreichlinie des Nordweststrands Sedimente mit sehr ähnlich verlaufenden S.D.C.-Kurven des B-Typs auf. Dabei stimmen das Maximum der Rolligkeitswerte und das Maximum in den Kornverteilungshistogrammen überein.

Weiter nördlich zum Riffbogen hin sind die Kurven unterschiedlichen Typen zuzuordnen. Hierbei spielen auch die starken Unterschiede in der Kornzusammensetzung der Sedimente eine große Rolle. Im östlichen Teil des zwischen Riffbogen und Norderneyer Strand gelegenen Vorstrandes sind zumeist S.D.C.-Kurven des A-Typs charakteristisch. Dies ist nach WINKELMOLEN (1971) für Restsedimente typisch.

8.2.2.2.3. S.D.C.-Kurven am Strand

Die Strandsedimente weisen in der Regel geringere Differenzen zwischen den relativen Rolligkeitswerten der einzelnen Kornfraktionen untereinander auf als es die Sedimente im Seegat- und Inselvorstrandbereich zeigen. Dies gilt insbesondere für den Nordwest- und Nordstrand von Norderney. Am Weststrand hingegen ist die Variabilität im Verlauf der S.D.C.-Kurven etwas größer.

N O R D E R N E Y

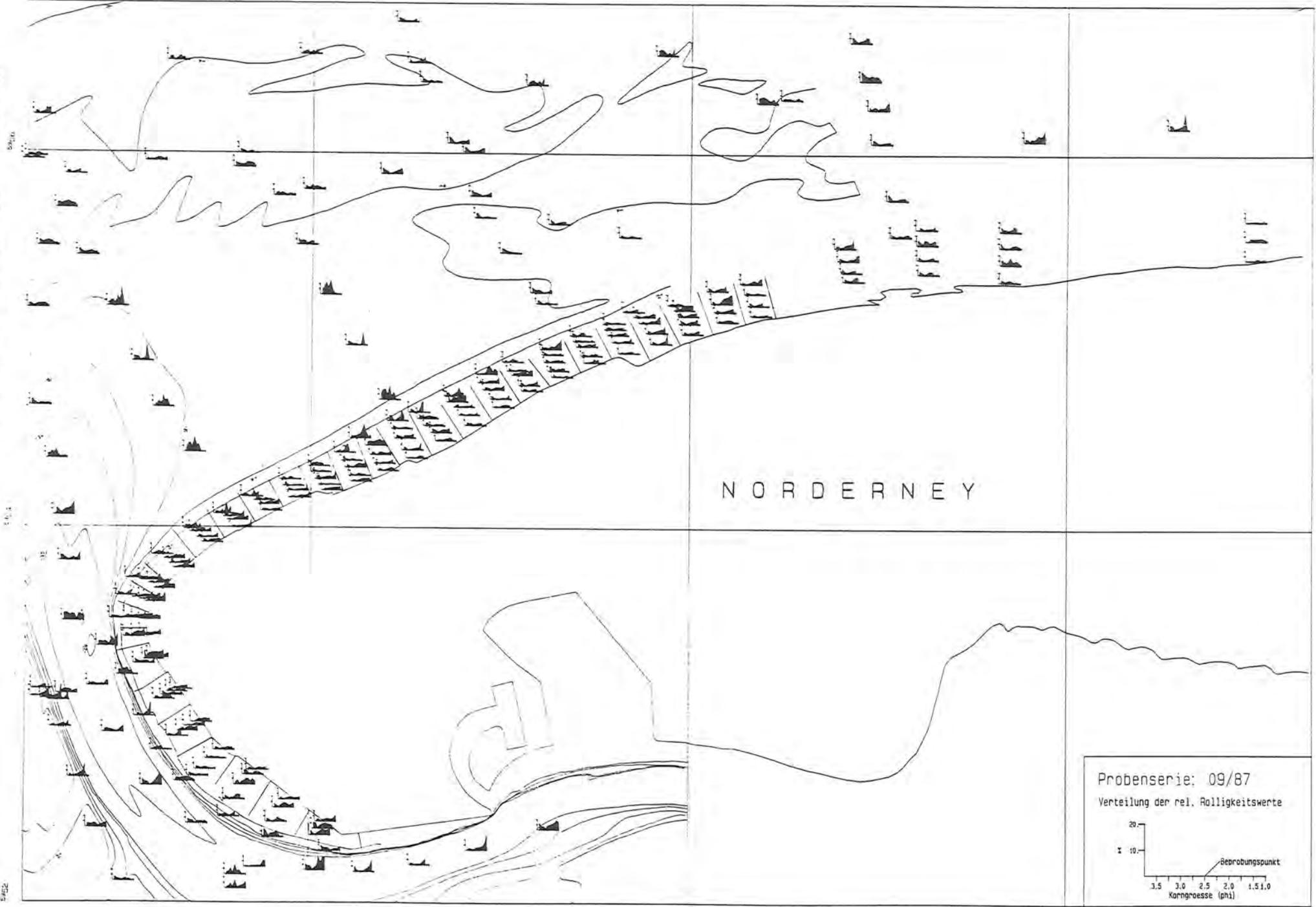
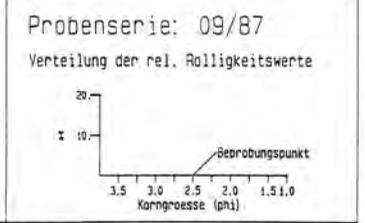


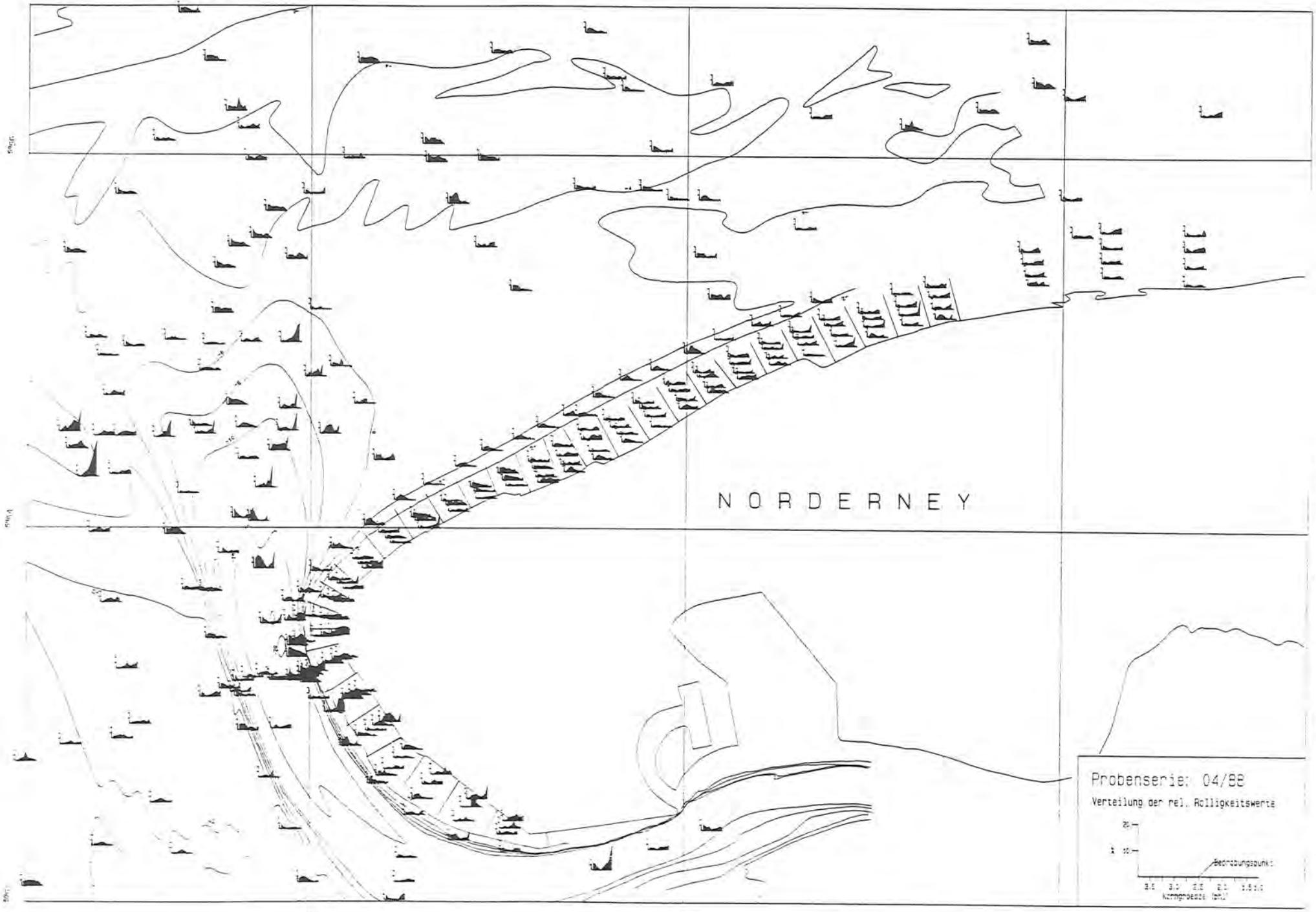
Abb. 78: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 09/87

256

257

257a

258



Die Rolligkeitskurven der Strandsedimente lassen sich zumeist als leicht steigend (S-Typ) bis horizontal verlaufend beschreiben. Im Bereich des Westkopfes können aber auch abfallende S.D.C.-Kurven (A-Typ) auftreten.

Der Vergleich der absoluten Rolligkeitswerte aufeinanderfolgend analysierter Sedimente vom Strand und Vorstrand läßt den Schluß zu, daß die Sedimente des Strandes etwas besser gerundet sind als die des Vorstrandbereichs.

8.2.2.2.4. Saisonal bedingte Änderungen der S.D.C.-Kurven

Generell lassen sich keine Änderungen im Verlauf der Rolligkeitskurven auf saisonale Einflüsse zurückführen. Insbesondere am Norderneyer Strand ist kaum eine Variation in den Kurvenverläufen der zwei Herbstbeprobungen und der Frühjahrsbeprobung zu erkennen (Abb. 78-80). Im Seegebiet sind die Unterschiede der Sedimente aus den verschiedenen Probenentnahmen deutlich größer, jedoch läßt sich kein allgemein gültiger Trend herausarbeiten.

8.3. Schwermineraluntersuchungen

8.3.1 Vorbemerkung

Als Schwerminerale werden alle Minerale bezeichnet, deren spezifisches Gewicht größer als 2.89 g/cm^3 ist (BOENIGK 1983). Die Zusammensetzung eines Schwermineralspektrums ist vom Liefergebiet des herantransportierten Sedimentes, den Umlagerungs-, Sortierungs- und Aufarbeitungsvorgängen während des Transportes sowie der Verwitterung abhängig (VAN ANDEL 1959). Daher wurden schon häufig Schwermineralverteilungen zur Klärung von Transportvorgängen im Küstenbereich herangezogen (z. B. VON ENGELHARDT 1937, DECHEND 1950, TRASK 1952, AKKERMANN 1956, BRAND 1955, 1956, McMASTER 1960, POMERANCBLUM 1966, WALGER 1966, ANWAR 1974, LUDWIG & FIGGE 1979, KOMAR & WANG 1984, CLEMENS 1987, CLEMENS & KOMAR 1988, 1989, MEISBURGER 1989).

Nach BAAK (1936) und LÜTTIG (1974) sind die pleistozänen Abrasionsflächen im Küstenvorfeld sowie die Einzugsgebiete der in die Nordsee mündenden Flüsse - insbesondere des Rheins - als Liefergebiet der Schwerminerale des ostfriesischen Küstenraums anzusehen. Daneben müssen aber auch erodierte holozäne Sedimente als Schwerminerallieferanten mit in Betracht gezogen werden. Zwischen holozänen und pleistozänen Sedimenten ist jedoch qualitativ-schwermineralanalytisch keine Unterscheidung möglich (SCHRAPS 1966), da diese ein Aufarbeitungsprodukt des pleistozänen Materials sind.

BAAK (1936) hat für die Nordsee eine Verteilung der rezenten Schwermineralprovinzen erstellt (Abb. 81). Danach liegt das Untersuchungsgebiet in der sog. H-Gruppe, die durch eine Granat-Epidot-Saussurit-Hornblende-Assoziation charakterisiert ist. Das kennzeichnende "Mineral" dieser Gruppe ist der Saussurit, der typisch für den Einflußbereich der Rheinsedimente ist (EDELMANN 1933, BAAK 1936). Der Saussurit ist jedoch kein Mineral, sondern ein feinkörniges Mineralaggregat, das aus Zersetzungsprozessen von Plagioklasen entstanden ist.

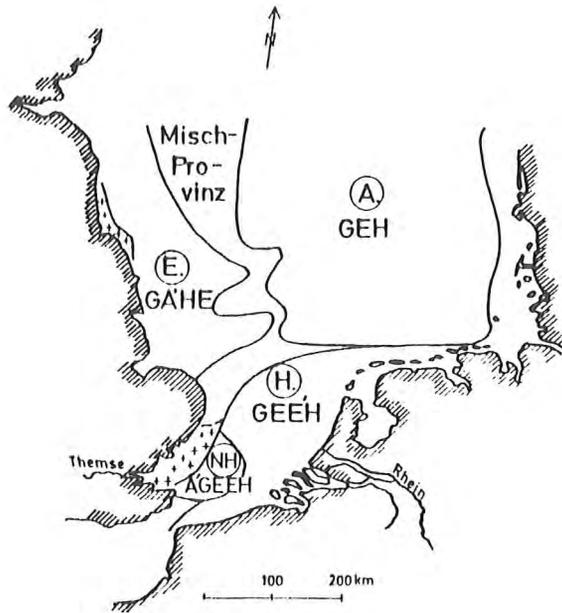


Abb. 81: Schwermineralprovinzen der Nordsee nach BAAK (1936)

8.3.2. Ergebnisse der Schwermineraluntersuchungen

8.3.2.1. Allgemeines

Um den qualitativen Schwermineralbestand im Seegebiet von Norderney zu bestimmen, wurden die drei aus einer Mischprobe (Korngröße 0.106 - 0.125 mm) abgetrennten Schwermineralfraktionen mit einem Röntgendiffraktometer "Siemens Kristalloflex D 500" des Geologischen Instituts der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster analysiert. Die Auswertung erfolgte mit dem Softwarepaket "Diffrac 11". Zusätzlich wurden noch polarisationsmikroskopische Untersuchungen an Streupräparaten ausgeführt.

In der 0.4 Ampère-Fraktion (Schwermineralfraktion I) konnten die Schwerminerale Granat - im wesentlichen Minerale der Mischungsreihe Almandin und Spessartin -, Ilmenit, Hastingsit und Quarz mit Schwermineraleinschlüssen nachgewiesen werden. Die 0.8 Ampère-Fraktion (Schwermineralfraktion II) ist durch Hastingsit, Epidot, Saussurit, etwas Staurolith und Quarz mit Einschlüssen charakterisiert, während in der 1.2 Ampère-Fraktion (Schwermineralfraktion III) Turmalin (Dravit), Staurolith, Epidot, Saussurit, Muskovit, Titanit und wiederum Quarz mit Einschlüssen analysiert werden konnten.

BAAK (1936) ermittelte für Norderney die folgenden Schwerminerale, die nach ihrer Häufigkeit geordnet sind: Granat, Epidot, Amphibole - im wesentlichen Hornblende -, opake Minerale (Ilmenit), Staurolith, Saussurit, Turmalin, Titanit, Kyanit, Augit, Zirkon, Andalusit und Sillimanit.

Die drei letztgenannten Minerale und der Kyanit sind nicht magnetisch suszeptibel und können daher nicht mit dem Frantz-Magnetschleuder vom Sediment abgetrennt werden, wodurch sich ihr Fehlen in den Ergebnissen der Röntgendiffraktometeranalyse erklärt. Da diese Schwerminerale aber nur in sehr

geringen Anteilen vorkommen, ist die Aussagefähigkeit der Analysenergebnisse nicht in Frage zu stellen. Ansonsten stimmt der in der Mischprobe bestimmte qualitative Schwermineralbestand gut mit dem von BAAK (1936) ermittelten überein.

Schwermineralanalysen von Sedimenten unbekannter Körnung lassen sich nicht gegenüberstellen. Um vergleichbare Analysen zu erzielen, empfiehlt es sich nach RICHTER (1939), bei allen Proben stets dieselbe Fraktion zu untersuchen. Die feineren Fraktionen sind hierbei vorzuziehen, da sich in diesen die Schwerminerale stärker anreichern und somit besser analysieren lassen. In Anlehnung an die sedimentologische Arbeit von VEENSTRA & WINKELMOLEN (1976) wurde daher bei der Schwermineralanalyse nur die Kornfraktion 2 (0.106 - 0.125 mm) untersucht.

Der Schwermineralgehalt der einzelnen Kornfraktionen erhöht sich mit abnehmendem Korndurchmesser. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Schwerminerale gegenüber den leichten Mineralen - im wesentlichen Quarz - der gleichen Kornfraktion andere hydraulische Eigenschaften aufweisen (RITTENHOUSE 1943, McINTYRE 1959, SIEVER 1989).

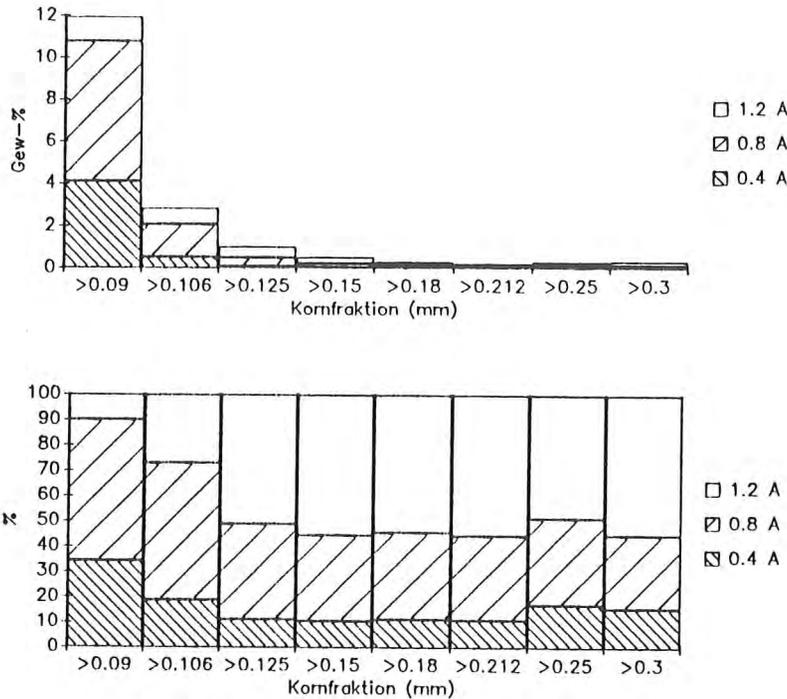


Abb. 82: Prozentuale Gehalte und Verteilung der drei abgetrennten Schwermineralfraktionen in den einzelnen Siebfraktionen der Probe N09N

Damit jedoch auch die Schwermineralverteilung im gesamten Sediment verdeutlicht werden kann, wurden bei einigen Proben alle Kornfraktionen in ¼ phi Schritten analysiert.

Als Beispiel ist die Probe N09N aus dem Strandprofil 9 dargestellt, die an der Niedrigwasserlinie entnommen wurde (Abb. 82). Der Schwermineralgehalt schwankt in den Kornfraktionen zwischen 0.125 und 0.3 mm um 0.5 - 1.0 %, während er in den kleinsten Siebfraktionen (0.09 und 0.106 mm) bei 12.0 und 3.0 % liegt. Daraus ist zu schließen, daß in der Zeit vor der Probenentnahme die zwei Kornfraktionen mit dem kleinsten Korndurchmesser bevorzugt umgelagert worden sind.

WEYL (1937) erkannte an marinen Erz-Granatseifen, daß "die Schwermineralanteile der einzelnen Korngrößenklassen durch die Sonderung nach der Schwere bedingt sind". Danach reichern sich die schwersten Minerale in der kleinsten Kornfraktion und die etwas leichteren in der nächst größeren Kornfraktion an. Dieses Ergebnis läßt sich auch auf die untersuchten Norderneyer Strandsande übertragen (Abb. 82), in denen mit abnehmender Korngröße der Anteil der Schwermineralfraktion I gegenüber den Fraktionen II und III deutlich zunimmt. Diese Anreicherungs-effekte der unterschiedlichen Schwerminerale sind auf die voneinander abweichenden hydraulischen Eigenschaften dieser Minerale zurückzuführen. Die Schwerminerale können als natürliche Tracer zur Erkennung von Transportvorgängen herangezogen werden, da sie aufgrund ihrer höheren Dichte vom Quarzsand spezifisch abweichende hydrodynamische Eigenschaften aufweisen. Aus dem Verhältnis der drei Schwermineralfraktionen untereinander und ihrem Anteil an der Gesamtmenge der analysierten Sedimentfraktion lassen sich Aussagen über Umlagerungsvorgänge machen.

Nach VEENSTRA & WINKELMOLEN (1976) lassen sich die unterschiedlichen Schwermineralfraktionen hinsichtlich ihrer hydrodynamischen Eigenschaften mit Quarzsanden vergleichen, die einen abweichenden Korndurchmesser aufweisen. Den Schwermineralen der Fraktion I (Tab. 15) entsprechen $\frac{1}{2}$ - ϕ -größere Quarze ($\pm 1,5$ -facher Durchmesser), denjenigen der Fraktion II $\frac{1}{4}$ - ϕ -größere Quarze ($\pm 1,25$ -facher Durchmesser) und Fraktion III gleichgroße Quarze.

Für die Schwermineralanteile der Siebfraktion 0.106-0.125 mm, die bei der Schwermineralbestimmung analysiert wurde, läßt sich danach folgendes festlegen: Die abgetrennten Schwerminerale der 0.4-Ampère-Fraktion (I) entsprechen in ihrem hydraulischen Verhalten Quarzkörnern von 0.15-0.18 mm Durchmesser, jene der 0.8-Ampère-Fraktion (II) Quarzkörnern zwischen 0.125-0.15 mm und die Minerale der 1.2-Ampère-Fraktion (III) Quarzen gleichen Durchmessers.

Da die analysierten Schwermineralspektren zum großen Teil in rezenten Prozessen entstanden sind, lassen sie sich zu einem Mischungsparameter α zusammenfassen:

$$\alpha = \frac{I \cdot 1.5 + II \cdot 1.25 + III}{100} \quad I, II, III: \text{Anteil der Fraktionen in \%}$$

Die α -Werte können theoretisch zwischen 1.0 und 1.5 liegen, wobei eine Zunahme des α -Wertes anzeigt, daß der zugeordnete Bereich verstärkten Selektionsprozessen ausgesetzt ist. Diese Selektionsprozesse können sowohl äolischer als auch aquatischer Natur sein.

Durch Clusteranalysen mit den Analyseergebnissen der Beprobungsserie vom Frühjahr 1988 konnten die Sedimente des Norderneyer Seegebietes und der Strände schwermineralogisch drei verschiedenen Typen (A, B, C) zugeordnet werden, die jeweils durch unterschiedliche Anteile der abgetrennten Fraktionen (I, II, III) am Schwermineralgehalt gekennzeichnet sind (Tab. 15).

In den Abbildungen 83 und 84 sind die Ergebnisse der Schwermineralanalysen der Beprobungsserien Herbst 1987 und Frühjahr 1988 in einem Dreiecksdiagramm dargestellt. Die eingezeichneten Mittelpunkte der drei Schwermineralverteilungstypen verdeutlichen die Güte und Rechtfertigung einer clusteranalytischen Differenzierung der untersuchten Sedimente in drei Klassen.

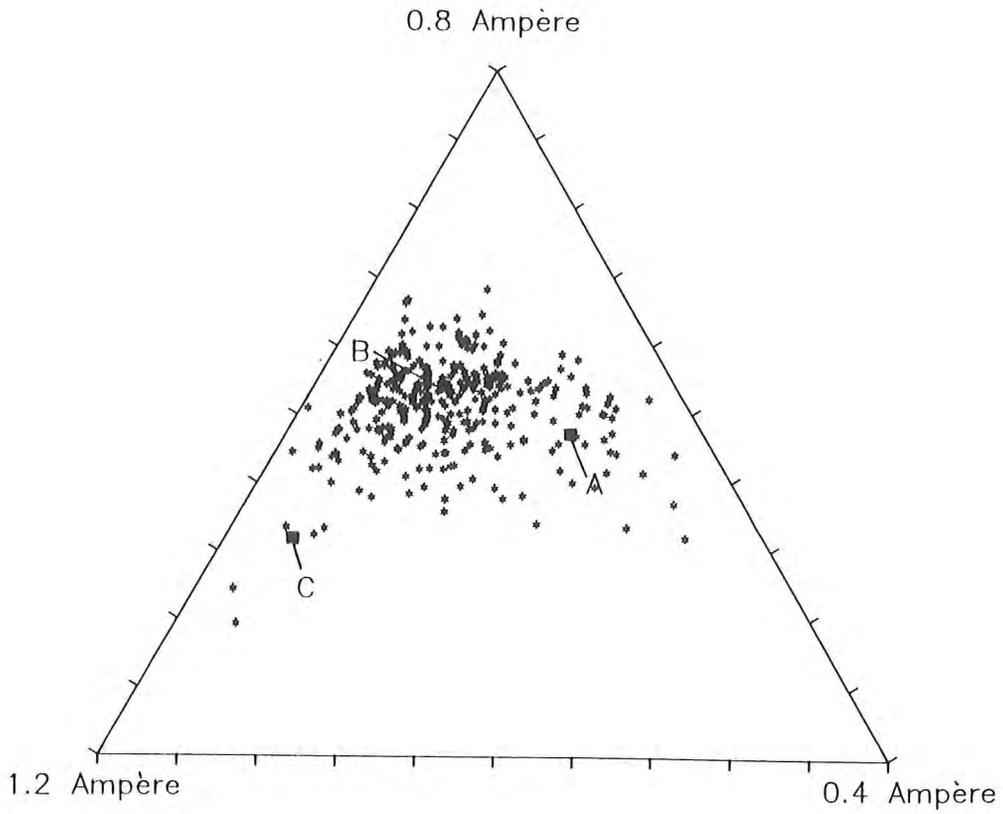


Abb. 83: Zuordnung der analysierten Schwermineralgehalte der Beprobungsserie 09/87 zu den Klassenmitteln der Schwermineral-Clusteranalyse

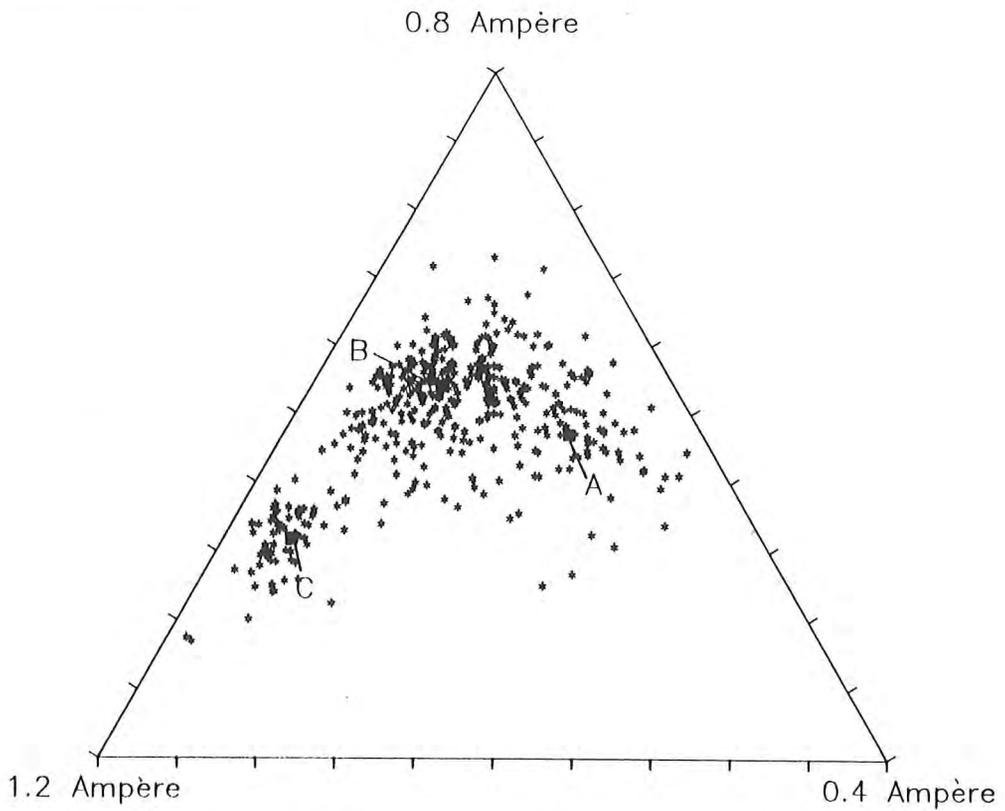


Abb. 84: Zuordnung der analysierten Schwermineralgehalte der Beprobungsserie 04/88 zu den Klassenmitteln der Schwermineral-Clusteranalyse

Der Typ A wird durch einen erhöhten Anteil der 0.4 Ampère-Fraktion (I) charakterisiert, der bei den im Seegebiet anstehenden pleistozänen Sedimenten als das Ergebnis eines fossilen Sedimentationsprozesses anzusehen ist, während er bei den holozänen Sedimenten auf einen hohen seegangsbedingten Energieeintrag und die dadurch bewirkten Selektionsvorgänge zurückzuführen ist.

SM-Fractionen				
SM-Typ	I 0.4 Amp. Granat Ilmenit	II 0.8 Amp. Hastingsit Epidot	III 1.2 Amp. Epidot Turmalin	Typ- Wert α
A	36.1 %	47.0 %	16.9 %	1.30
B	16.5 %	54.0 %	29.4 %	1.22
C	8.7 %	31.7 %	59.4 %	1.12

Tab. 15: Klassifizierung der Sedimente anhand der Schwerminerale in die Typen A, B, C

Die Sedimente des Typ B weisen eine Schwermineralverteilung auf, die als normal für Bereiche des Norderneyer Seegats und der Strände angesehen werden kann, die mittleren Seegangs- und Strömungsverhältnissen ausgesetzt sind.

Der Typ C ist durch den niedrigsten α -Wert gekennzeichnet, der auf hohe Anteile der Schwermineralfraktion III zurückzuführen ist. Anscheinend unterlagen diese Sedimente nur geringen Umlagerungskräften.

8.3.2.2. Verteilung der Schwermineralgehalte

Ausgehend von der im Frühjahr 1988 entnommenen Sedimentserie, welche den größten Teil des Seegatbereichs erfaßte, wird die Verteilung der Schwermineralgehalte (Abb. 87) und -typen (Abb. 93) im Untersuchungsgebiet dargelegt. In den Kartendarstellungen der Schwermineralgehalte können aufgrund sehr eng beieinander liegender Isolnien - insbesondere im Strandbereich - einzelne Isolnien entfallen. In diesem Fall umfaßt das schraffierte Gebiet sowohl den zugeordneten als auch den darauffolgenden Wertebereich. Einen Überblick über die Ergebnisse der Schwermineralanalysen der Sedimente, welche im Frühjahr 1988 entnommen wurden, vermittelt die Abbildung 85, in der die Schwermineralanalysen in Form von Kreisdiagrammen dargestellt sind.

Die Schwermineralgehalte der Sedimente der Deutschen Bucht sind schon von LUDWIG & FIGGE (1979) im Rahmen einer Lagerstättenstudie untersucht worden. Bei der Schwermineralanalyse wurde jedoch ein sehr viel größeres Kornspektrum (63 - 355 μ m) der Sedimente untersucht. Für das Untersuchungsgebiet liegen daher die Gesamtschwermineralgehalte deutlich unter den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werten. Sie betragen nach o. g. Autoren zwischen <0.5 und 2.0 %.

Die Schwermineralgehalte der analysierten Siebfraktion liegen dagegen zwischen <1.0 % und >30.0 %. Die höchsten Schwermineralgehalte kommen im Bereich des trockenen Strandes, in stark

seegangsexponierten Strandabschnitten sowie im Küstenvorfeld nördlich des Riffbogens vor. Die Sedimente des letztgenannten Bereichs weisen in der untersuchten Kornfraktion Werte bis zu 15 % Schwerminerale auf und heben sich dadurch deutlich vom weiter südlich liegenden Vorstrand und Seegat ab (Abb. 87). Der Übergangsbereich zwischen dem Küstenvorfeld und dem Vorstrand läßt sich lithologisch mit der Pleistozän/Holozän-Grenze verknüpfen, die in dieser Tiefenlage oberflächlich ausstreicht.

Im Bereich des Norderneyer Seegats, des Inselvorstrandes und des Riffbogens, die von holozänen Sedimenten aufgebaut sind, liegen die Schwermineralgehalte zumeist zwischen 2.0 und 4.0 %. In einigen kleinräumigen Gebieten - insbesondere im Kalfamergat, dem Seegat und dem Norderneyer Inselvorstrand - können auch höhere Schwermineralgehalte bis 6 % auftreten.

Für die Interpretation der Schwermineralanalysenergebnisse ist jedoch nicht nur der Gesamtgehalt interessant, sondern auch die Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15.

Im Frühjahr 1988 wurden die größten Bereiche des untersuchten Gebiets oberhalb NN -10 m vom Sedimenttyp B, dem "Normaltyp" des Seegatbereichs, eingenommen (Abb. 87). Neben diesen Sedimenten lassen sich jedoch auch Bereiche abweichender Schwermineralspektren ausgliedern, die Hinweise auf Transportvorgänge geben können.

Die nördlich des Riffbogens unterhalb NN -10 m anstehenden Sedimente sind zumeist dem Sedimenttyp A zugeordnet. Diese Schwermineralverteilung ist als Relikt pleistozäner Umlagerungsprozesse zu werten, da in diesem Tiefenbereich die pleistozänen Sedimente oberflächlich anstehen. Mit der Änderung der Schwermineralverteilung geht dabei auch eine Vergrößerung der Sedimente einher. Die Bereiche im Seegat südlich des Riffbogens, die Schwermineralverteilungen des Typ A aufweisen, unterliegen zum großen Teil starker Seegangs- und Strömungsbeeinflussung. Durch die damit verbundenen Selektionsprozesse reichern sich die schwereren Schwerminerale gegenüber den leichteren an. Insbesondere der Norderneyer Strand weist in weiten Teilen derartige Schwermineralverteilungen auf, da dort die einlaufenden Seegangsenergien vollständig abgebaut werden.

Der Schwermineralverteilungstyp C tritt nur in eng begrenzten Bereichen auf. Dieser Sedimenttyp ist im Kalfamergat und in den sich nördlich bis nordöstlich anschließenden Seegatbereichen verbreitet. Die klare Anbindung der Sedimente an das Kalfamergat und seinem nördlichen Verlauf läßt den Schluß zu, daß diese mit dem Ebbstrom während der ruhigen Wetterlage im März 1988 in Richtung Schluchter transportiert wurden.

In den flacheren Bereichen sind sie dann durch die alternierenden Tideströmungen im "Zig-Zag-Transport" (HANISCH 1981, EHLERS 1988) in NW-SE Richtung flächig über die Robbenplate verteilt worden. Ein SW-NE gerichteter resultierender Riffbogen-paralleler Transport über die Robbenplate in das Seegat und den Inselvorstrandbereich ist dabei zu erkennen und steht in Einklang mit den von NUMMEDAL & PENLAND (1981) veröffentlichten Transportrichtungen. Als Quelle dieser 1.2-Ampère dominanten Sedimente kommen das Julster Rückseitenwatt oder spätpleistozäne Ablagerungen in Frage. Analysen von Sedimenten aus den Julster und Norderneyer Rückseitenwatten haben jedoch keine derartigen Schwermineralverteilungen ergeben. Dies wird auch durch die im Busetief anstehenden Sedimente des Typs B gestützt, die stark durch Wattensedimente geprägt sind.

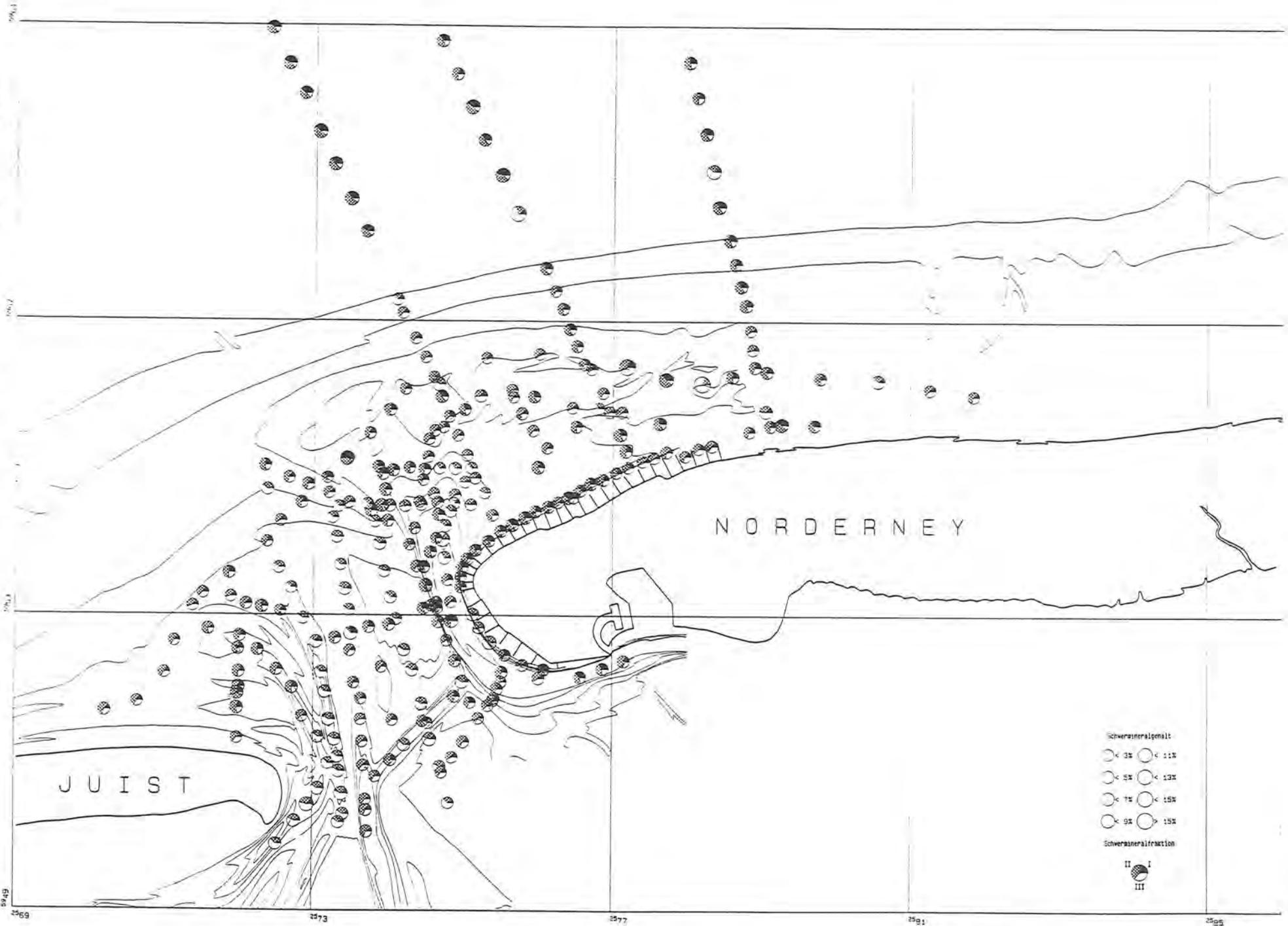
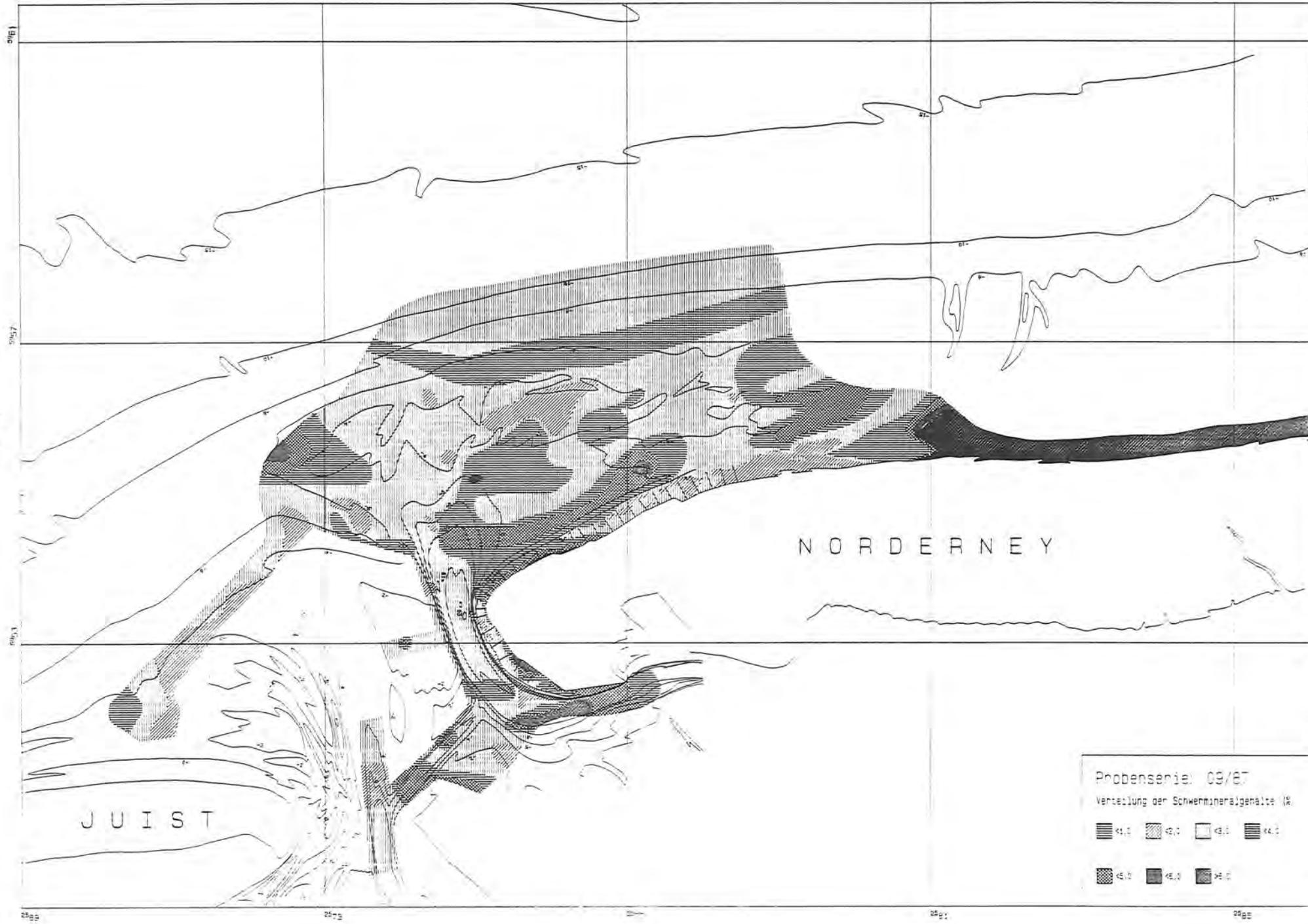


Abb. 85:

Schwermineralegehalte und Anteile der Schwermineralfractionen I-III im Frühjahr 1988
(Detaillausschnitt s. Abb. 101)



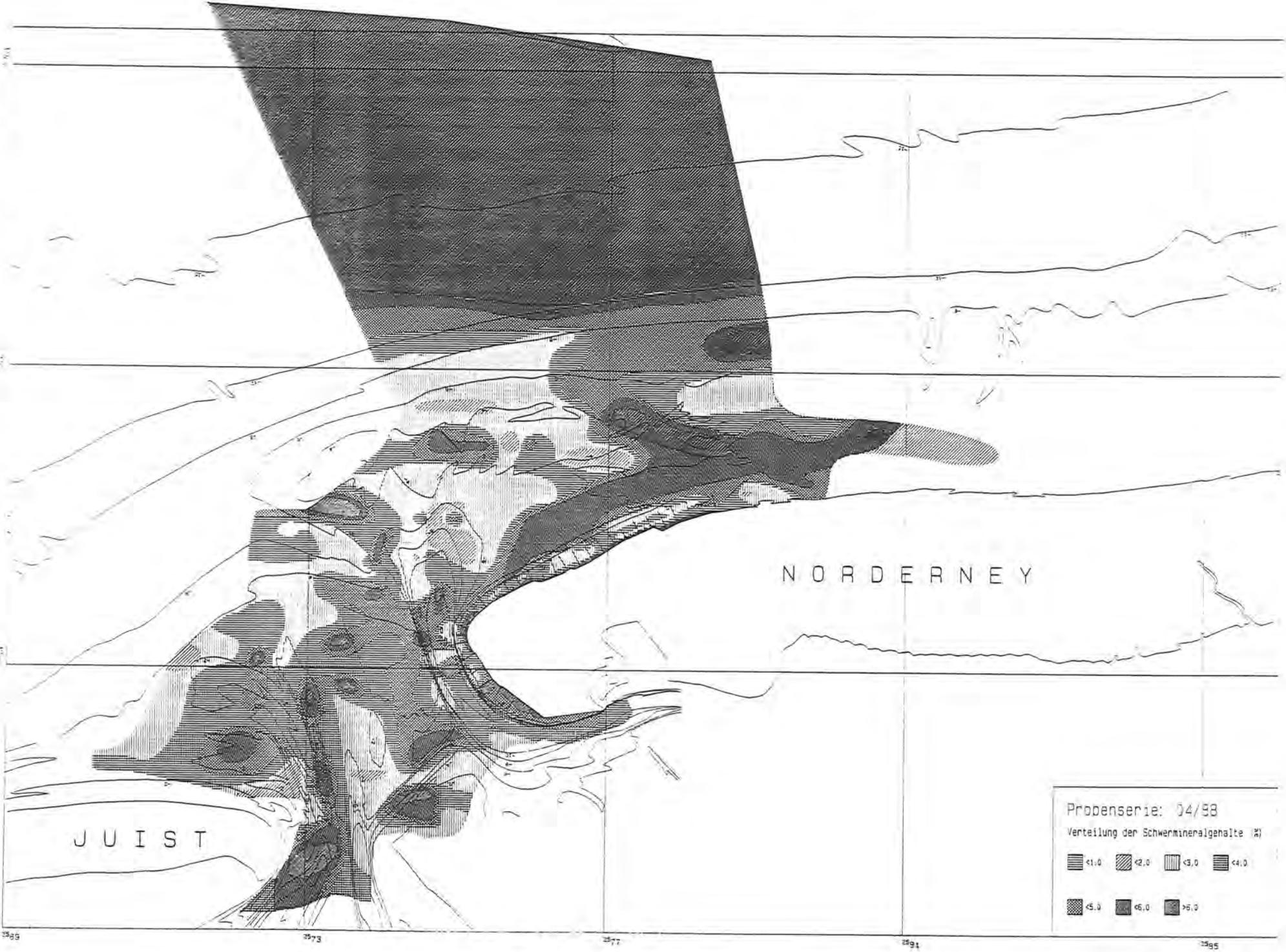


Abb. 87:

Schwermineralgehalte der Siebfraktion 0.106-0.125 mm im Frühjahr 1988

Bemerkenswert ist ein Vorkommen von Sedimenten des Typs C nördlich des Riffbogens im vermutlichen Übergangsbereich zwischen pleistozänen und holozänen Sedimenten. Daher ist davon auszugehen, daß es sich bei den im Kalfamergat angetroffenen Sedimenten um Erosionsprodukte spätpleistozäner Sedimente aus dem Übergangsbereich Pleistozän/Holozän handelt, die in den tieferen Teilen des Kalfamergats anstehen und dort erodiert wurden.

Der Riffbogen, über den der Ost-West gerichtete Sedimenttransport vor den Ostfriesischen Inseln erfolgt (LUCK 1975, EHLERS 1988), ist eine gesonderte Betrachtung wert.

Im Riffbogenbereich des Norderneyer Seegats weisen die im seewärtigen Teil entnommenen Sedimentproben einen etwas niedrigeren Schwermineralgehalt auf als jene am inneren Riffbogen gewonnenen Proben. Der Gesamtschwermineralgehalt und der Anteil der 0.4 Ampère-Fraktion steigt von Westen nach Osten. Eine vergleichbare Verteilung der Schwermineralfraktionsanteile im Riffbogen haben auch VEENSTRA & WINKELMOLEN (1976) für den Riffbogen zwischen Ameland und Schlermonnikoog herausgearbeitet.

Der Riffbogen läßt sich nach den Schwermineralgehalten in zwei Abschnitte teilen, zwischen denen die Grenze im Bereich des Schluchters (Abb. 88) verläuft. Südlich des Schluchters weisen die Riffbogensedimente (R01A - R13A) deutlich geringere Anteile der Schwermineralfraktion I auf, während nach Norden hin diese doch deutlich höher sind.

Die Ursachen sind in den für diese Bereiche geltenden hydrodynamischen Bedingungen zu suchen. Schon DECHEND & RICHTER (1953) untergliederten den Riffbogen anhand ihrer sedimentologischen und morphologischen Untersuchungen in unterschiedlich hydrodynamisch beeinflusste Gebiete:

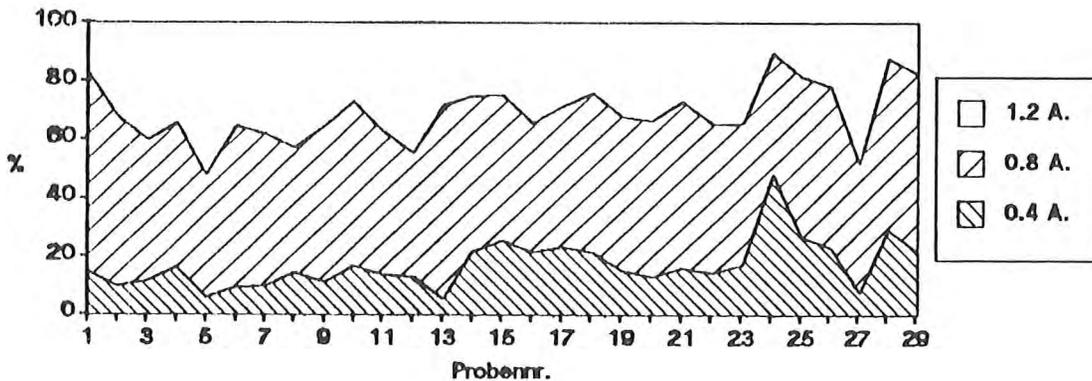


Abb. 88: Verteilung der Schwermineralanteile von Sedimenten des äußeren Riffbogens im Herbst 1987

"a": Gebiete, deren Sedimente durch Strömung gebildet werden. Sie sind am meisten verbreitet und finden sich auf dem Vorstrand, dem Westteil der Barre (Riffbogen, Anm. d. Verf.), beginnend bei den Riffen im NE des Ostendes der Insel Juist bis etwas nördlich des Schluchters, nördlich und südöstlich der Nordergründe und in der Seegatrinne.

b: Gebiete, die durch Brandung sortierte Sedimente enthalten: Die Nordergründe

c: Das Spaniergat, dessen Sedimente stellenweise durch Seegang gebildet werden" (DECHEND & RICHTER 1953: S. 27).

Diese Gliederung steht in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der eigenen Schwermineralanalysen der Riffbogensedimente.

Die relative Zunahme der Schwermineralfraktion I gegenüber den zwei anderen Fraktionen in dem von den Nordwestgründen und dem Platananlandungsbereich begrenzten Gebiet läßt auf eine Abnahme der Umlagerungsintensität nach Osten hin schließen. Durch die Abminderung der in diesem Gebiet sehr starken Transportenergie sedimentieren die schweren Schwerminerale (hauptsächlich Granate und Ilmenite) eher als die anderen Schwermineralfraktionen und Quarze der gleichen Korngröße. Schon DECHEND & RICHTER (1953) verwiesen darauf, daß der Einfluß des Ebbstroms von den Nordwestgründen - die o. g. Autoren bezeichnen sie als "Kampfgebiet zwischen den hohen Ebbstromgeschwindigkeiten und den von außen wirkenden Faktoren: Flutstrom, Seegang und Brandung" - bis zum Platananlandungsbereich stark abnimmt. Damit bestätigt sich der aus dem "Zig-Zag-Transport" resultierende Riffbogenlängstransport der Sedimente.

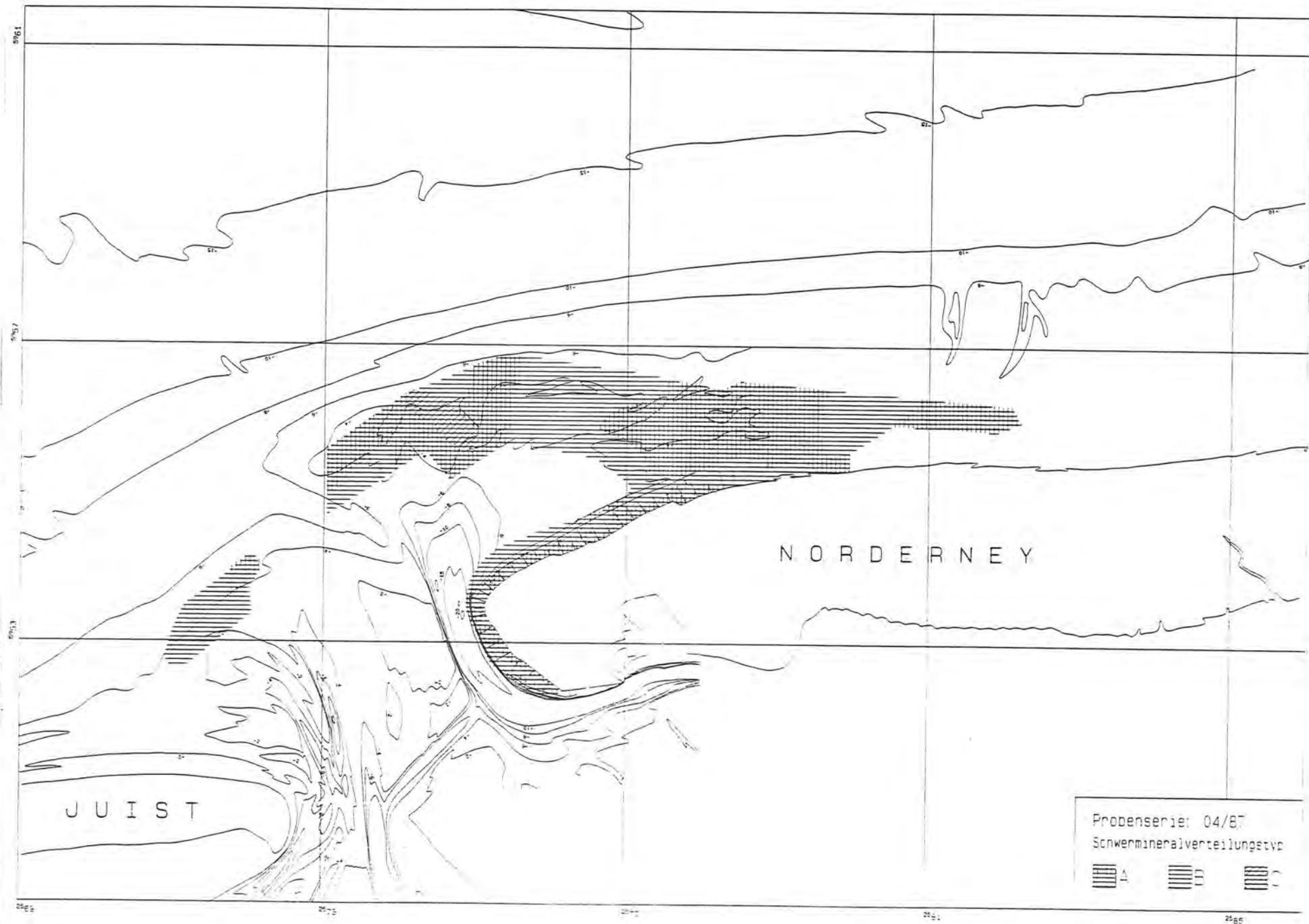
8.3.2.3. Saisonal bedingte Änderungen der Schwermineralgehalte und -anteile

8.3.2.3.1. Seegebiet

Die Schwermineralgehalte zeigen im allgemeinen über das Jahr nur geringe Änderungen. In der Regel weisen die im Frühjahr entnommenen Sedimente einen etwas höheren Schwermineralgehalt auf als jene im Herbst gewonnenen Sedimentproben, da der Energieeintrag durch Seegang und Tide in den Wintermonaten deutlich stärker ist. Die Abbildung 86 zeigt die Verteilung der Schwermineralgehalte im Herbst 1987. Beim Vergleich dieser Karte mit der entsprechenden der Beprobung des Frühjahrs 1988 ist die o. g. Entwicklung ersichtlich. Die saisonal bedingten Änderungen der Schwermineralgehalte liegen zumelst unter 1%. Daher wird auf die kartographische Darstellung der Schwermineralgehalte der Beprobungsserien 04/87, 09/88 und 03/89 verzichtet.

Im Herbst 1987 wurde auch der östlich des Platananlandungsbereich gelegene Strandabschnitt fast bis zum östlichen Norderneyer Inselende beprobt. Dieser Strandbereich weist gegenüber dem weiter westlich gelegenen deutlich höhere Schwermineralgehalte auf (Abb. 86), was auf den fehlenden seegangsdämpfenden Einfluß eines vorgelagerten Riffbogens zurückzuführen ist, so daß hier besonders starke Umlagerungs- und Selektionsprozesse stattfinden. Die Erhöhung der Schwerminerale geht mit einer Vergrößerung der Sedimente einher.

Ebenso wie die Schwermineralgehalte unterliegt auch die Einteilung der Sedimente in die drei Schwermineralverteilungstypen einer saisonalen Beeinflussung. So sind die Herbst-Beprobungen (Abb. 90, 92) zumelst durch eine größere Verbreitung des Schwermineralverteilungstyps B - dem Normaltyp des Norderneyer Seegalbereichs - charakterisiert. Demgegenüber zeichnen sich die Frühjahrsbeprobungen und Beprobungen nach Sturmereignissen (Abb. 89, 91, 92, 93) durch eine größere Ausdehnung des Sedimenttyps A aus.



Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Frühjahr 1987

Abb. 89:

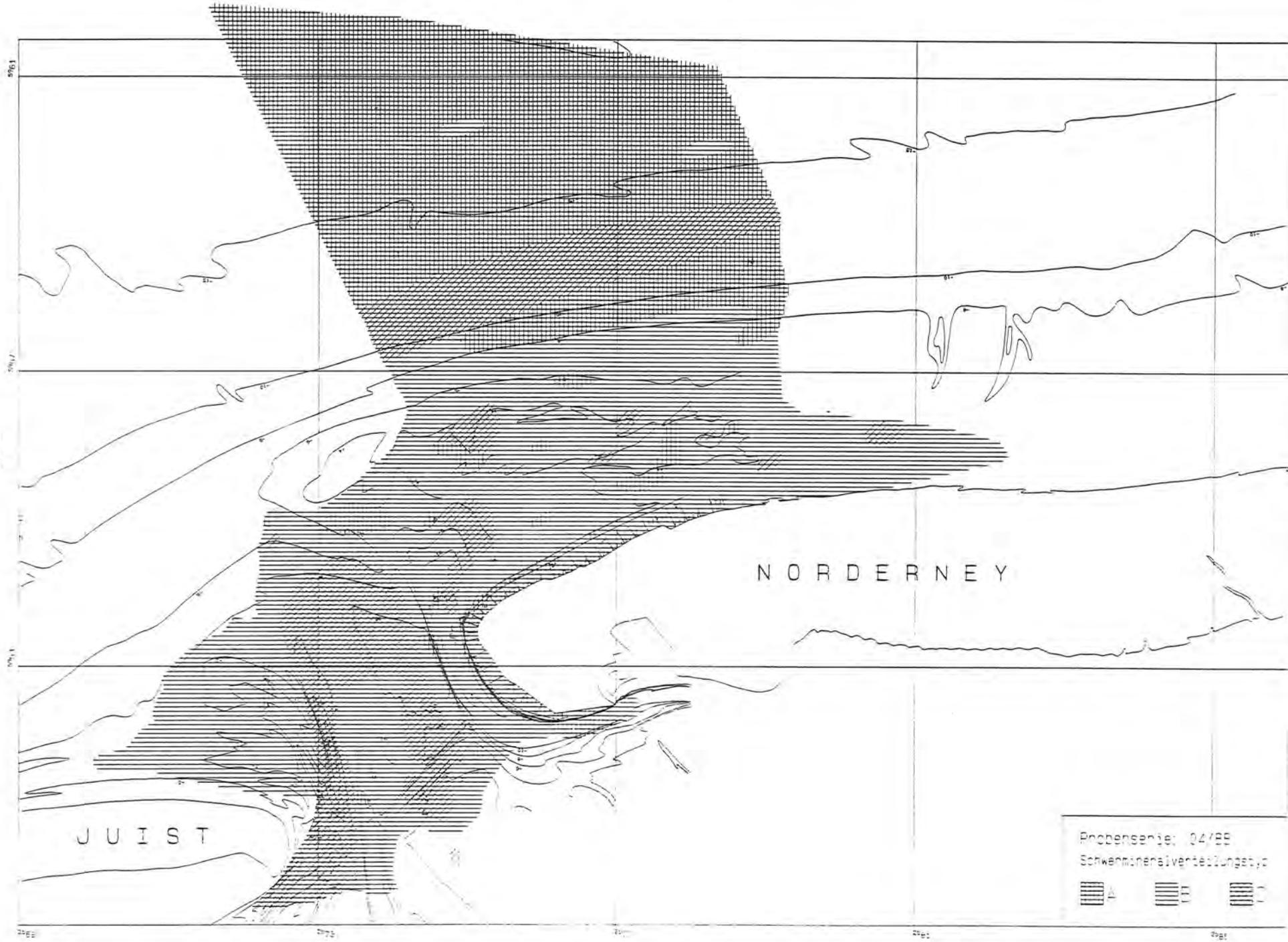


Abb. 91: Verteilung der Schwermetalltypen nach Tabelle 15 im Frühjahr 1988

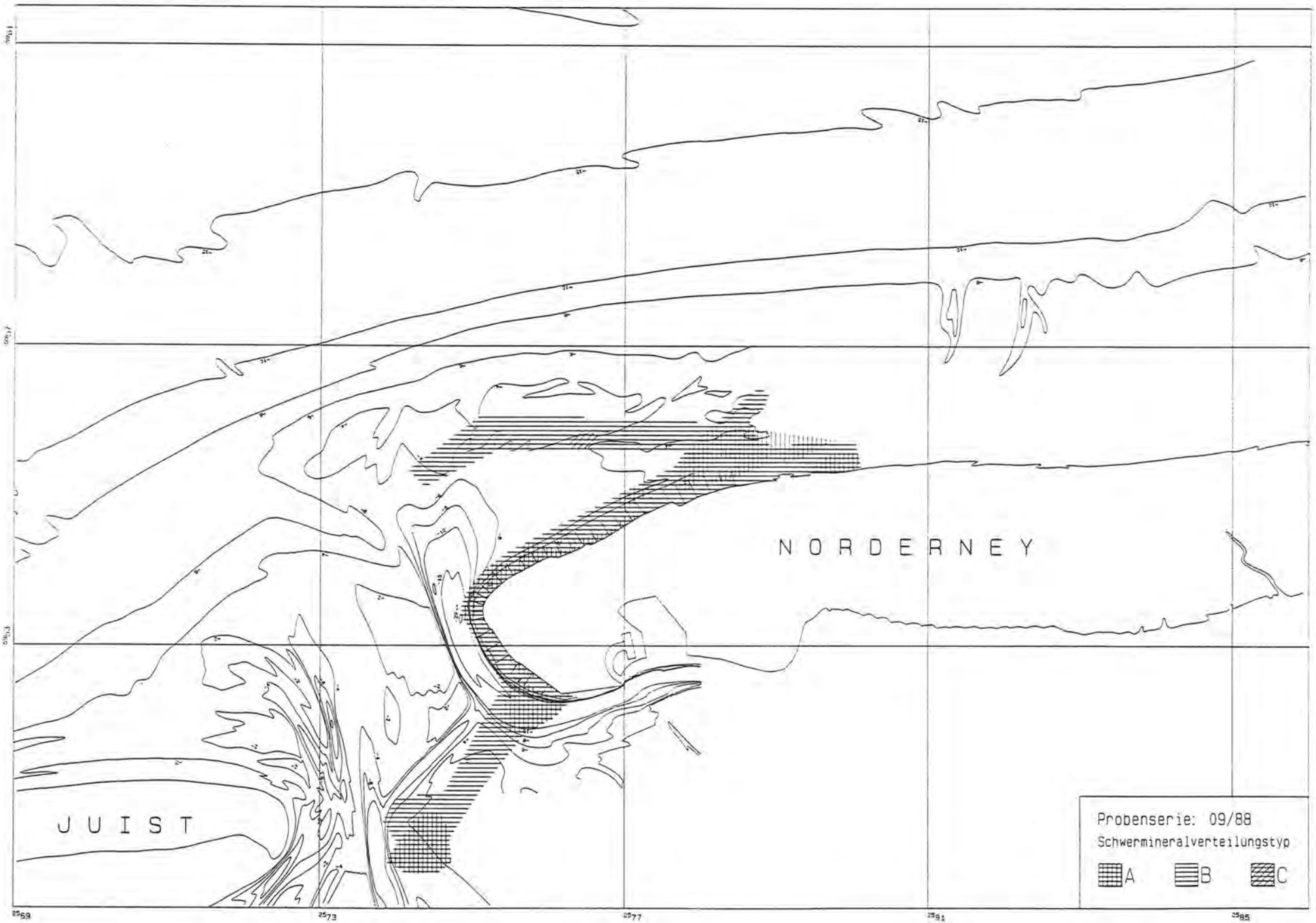


Abb. 92:

Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im September 1988

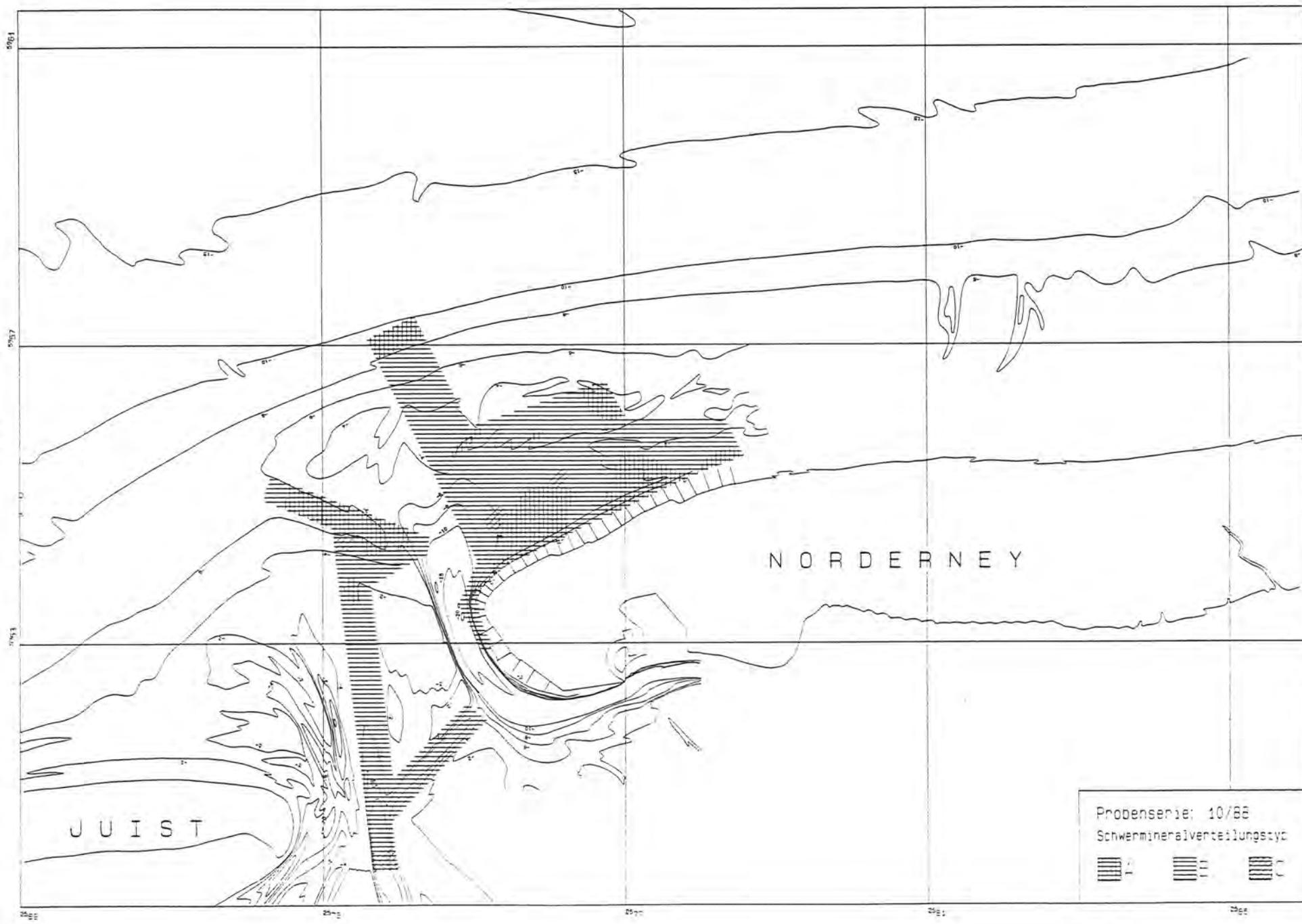


Abb. 93:

Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Oktober 1988

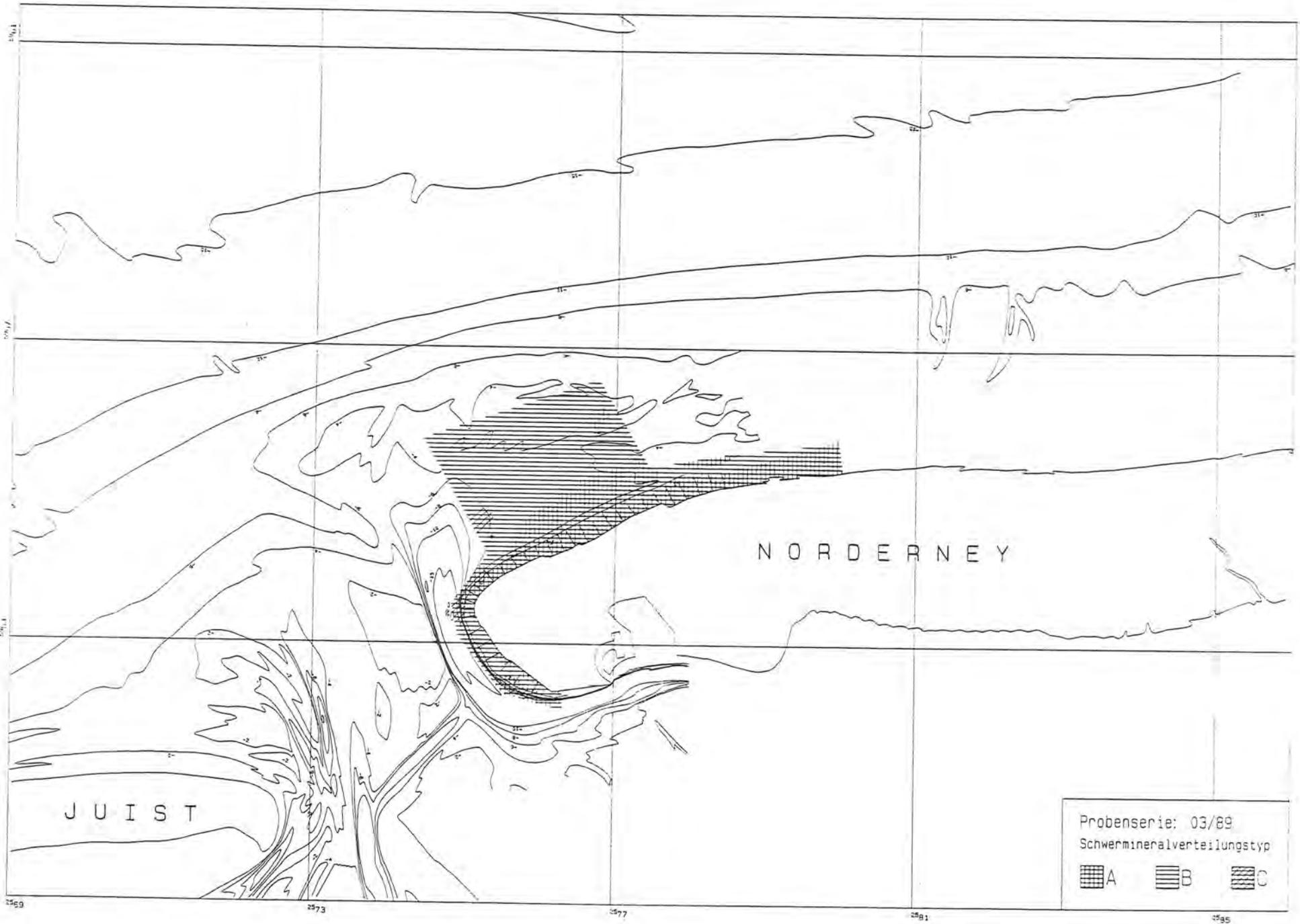


Abb. 94: Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Frühjahr 1989

Die Typenkarte der Beprobung im Herbst 1987 (Abb. 90) zeigt im Gegensatz zur Beprobungsreihe 04/88 eine deutliche Dominanz des Schwermineralverteilungstyps B im Untersuchungsgebiet. Auch der sonst häufig durch den Typ A charakterisierte Strandbereich am Norderneyer Westkopf weist im Herbst 1987 zum großen Teil den Normaltyp B auf. Diese Änderungen der Schwermineralanteile sind auf unterschiedlich starke hydrodynamische Belastungen vor den Beprobungen zurückzuführen.

8.3.2.3.2. Strand

Nach den Ergebnissen der schwermineralanalytischen Bearbeitung der Strandproben steigen die arithmetischen Mittel der Schwermineralgehalte von der Bühnenstreichlinie bis zum trockenen Strand an (Tab. 16).

Die stärksten Zunahmen der Schwermineralanteile weist die Schwermineralfraktion I in der strandnormalen Richtung von der BSL zum TSt auf. Dagegen sind die relativen Zuwächse der 0.8-Ampère-Gehalte schon deutlich geringer, während sich signifikante Änderungen der %-Anteile der Schwermineralfraktion III nicht feststellen lassen.

Die Zunahme der Schwermineralgehalte in strandnormaler, landwärtiger Richtung läßt den wachsenden Einfluß des äolischen Transportes erkennen. Die hohen Schwermineralanteile der Sedimente des trockenen Strandes sind allein auf äolische Transport- und Selektionsprozesse zurückzuführen.

Demgegenüber unterliegen die Sedimente des nassen Strandes sowohl äolischen als auch aquatischen Umlagerungsvorgängen. Die mittleren Korndurchmesser nehmen vom Vorstrand bis zum Mittelwasserbereich zu und zum trockenen Strand hin wieder ab. Diese Abfolge läßt darauf schließen, daß die stärkste Seegangsbelastung im Mittelwasserniveau auftritt. Da die Schwermineralverteilungen jedoch eine kontinuierliche Zunahme zum trockenen Strand hin ausweisen, ist zu folgern, daß die Selektionsprozesse, die die Schwermineralanreicherung bedingen - insbesondere im höher gelegenen Strandabschnitt - verstärkt äolischer Natur sind. Die Überlagerung von aquatischen und äolischen Transportvorgängen im Bereich der Hochwasserlinie läßt sich gut aus den Schwermineraldiagrammen der verschiedenen Strandprobenserien erkennen (Abb. 95-100). Insbesondere die Probenserien 04/88, 09/88 und 03/89 verdeutlichen für den Bereich zwischen den Profilen 20 und 34 diesen Prozeß. Bei diesen Probenserien nehmen in der Regel die Anteile der Schwermineralfraktion I (0.4 Ampère) in der Niedrigwasser- und Mittelwasserlinie von Westen nach Osten zu, während im Bereich des trockenen Strandes ein deutlich ausgeprägter, gegenläufiger Trend zu erkennen ist.

Die Schwermineralverteilung im Bereich der Hochwasserlinie zeigt dagegen in einem uneinheitlichen, zwischen diesen beiden o. g. Trends liegenden Verlauf.

In strandparalleler Richtung nehmen die Schwermineralgehalte am Nordweststrand vom Divergenzbereich nach Osten hin und am Weststrand nach Süden hin ab (Abb. 97, 98). Das Maximum der Schwermineralgehalte liegt jedoch im Bereich der Entnahmeprofile 14 - 17 und nach RAGUTZKI & WESTHOFF (1988) somit etwas östlich des Bereichs der größten Sedimente (Entnahmeprofil 10 - 14).

Ebenso nehmen auch am Nordweststrand die Gehalte der Schwermineralfraktion I gegenüber der leichteren Schwermineralfraktion III ab. Diese Abnahmen der Schwermineralgehalte sind auf eine Abminderung des Seegangseinflusses und somit der Transportkraft nach Osten hin zurückzuführen.

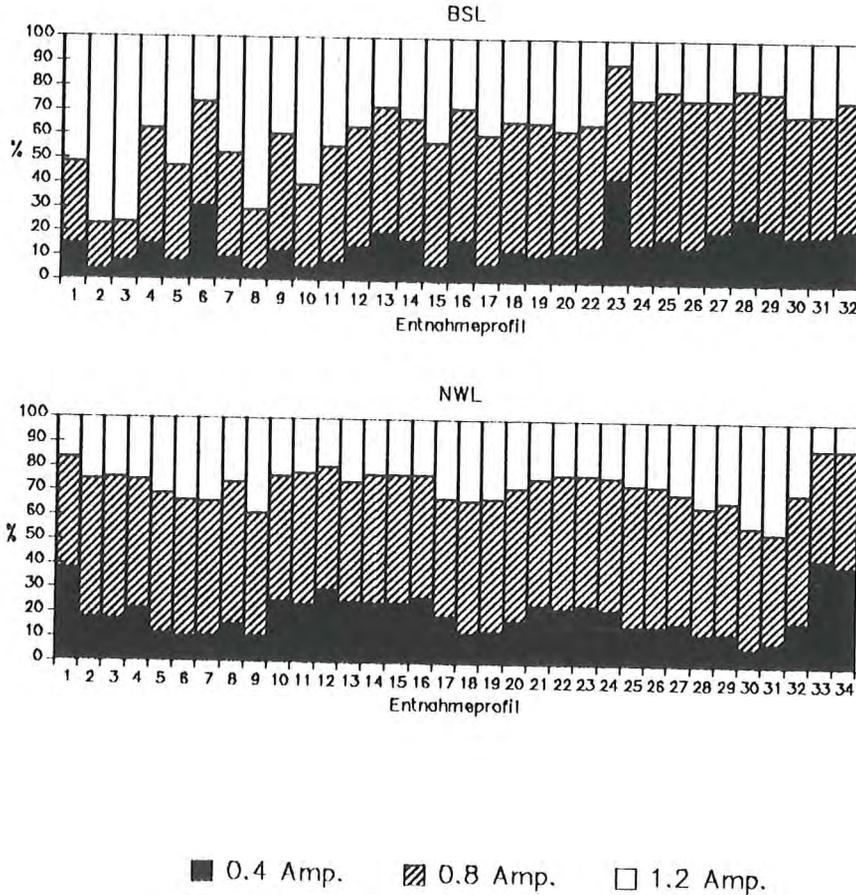
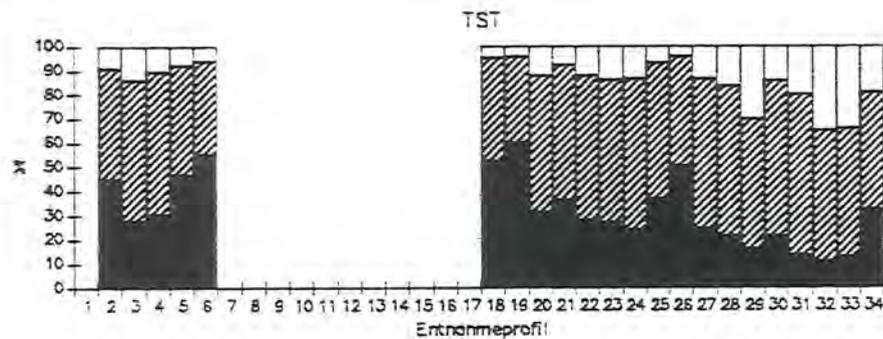
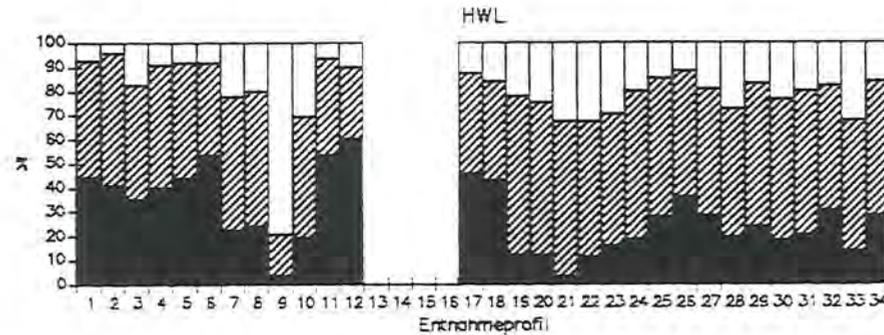
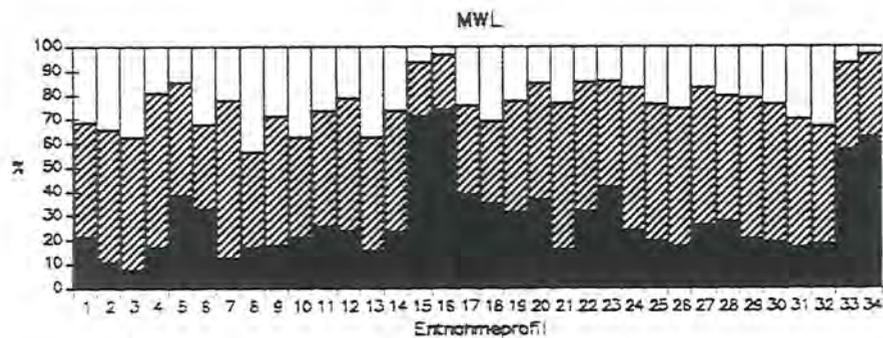
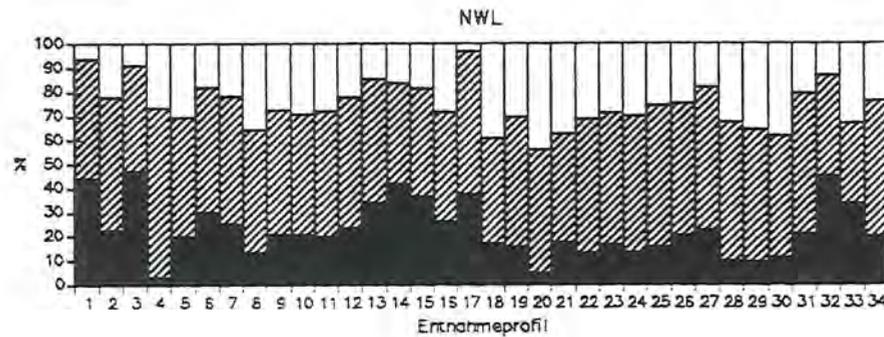
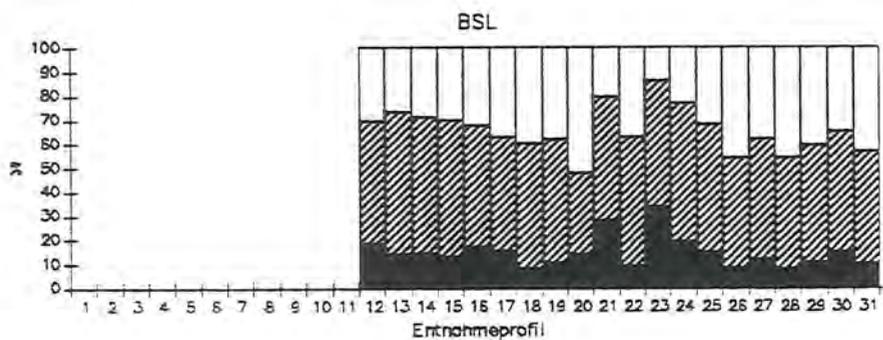


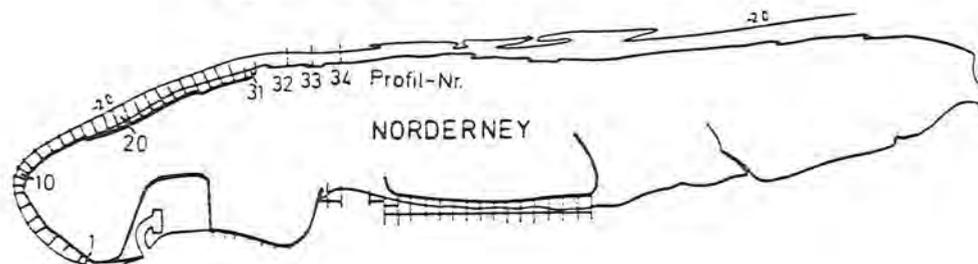
Abb. 95: Schwermineralverteilung im Vorstrandbereich und an der Niedrigwasserlinie im März 1987

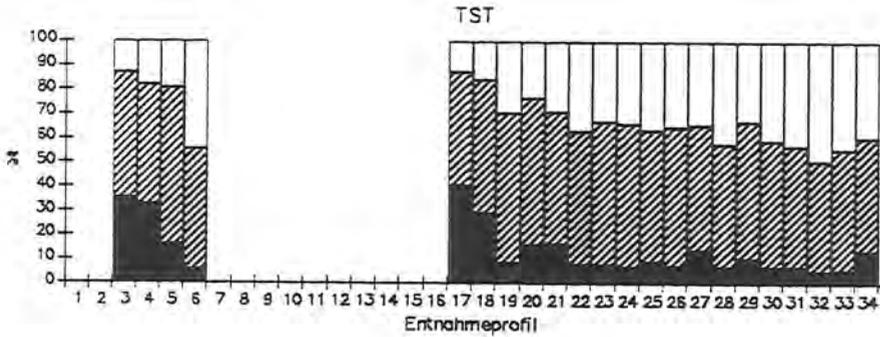
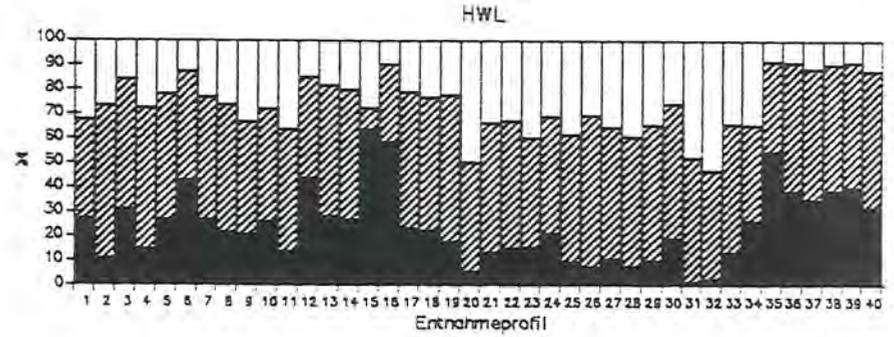
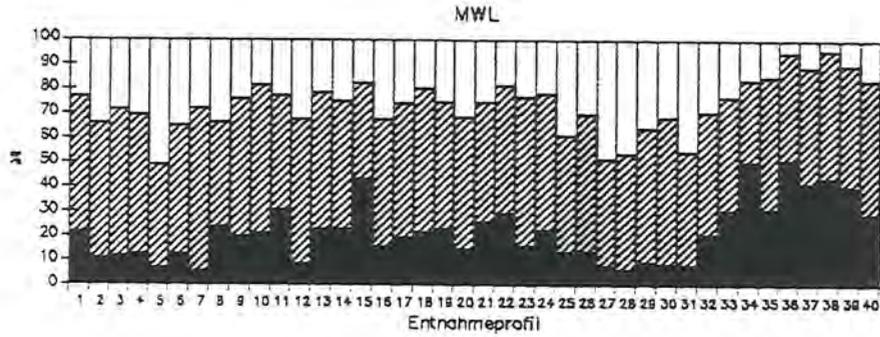
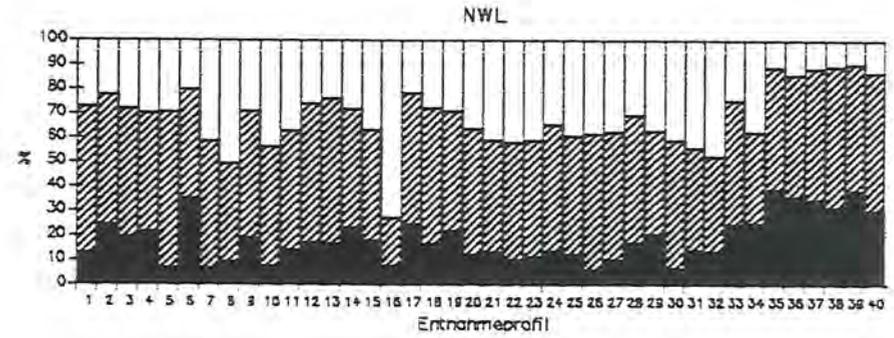
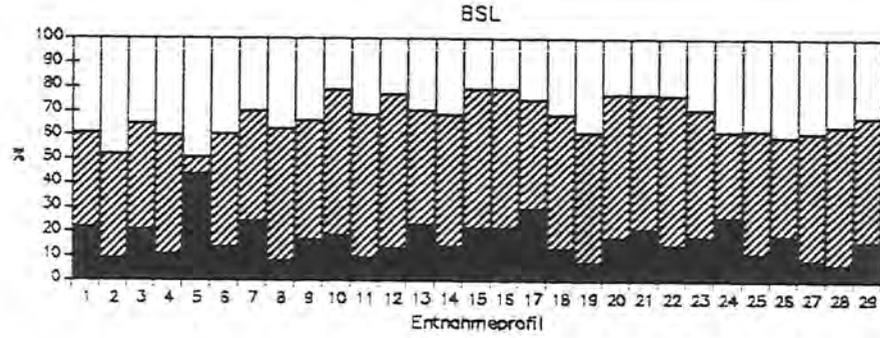
Am Weststrand von Norderney sind entsprechende Zuordnungen weniger signifikant, jedoch deutet sich für die Sedimente aus der BSL, NWL und MWL eine Abnahme der Schwermineralgehalte von Norden nach Süden an. Die Sedimente aus dem Bereich der Hochwasserlinie und des trockenen Strandes weisen dagegen höhere Schwermineralgehalte auf, ohne jedoch einen Trend erkennen zu lassen. Als Ursache kann auch hier eine Überlagerung von aquatischem und äolischem Sedimenttransport vermutet werden.

Der Divergenzbereich des Seegangs am Norderneyer Westkopf und der sich östlich anschließende Strandabschnitt weisen in weiten Teilen den Typ A auf und bestätigen damit die anhand der korngößenanalytisch ermittelten Sedimentparameter bereits angesprochene seegangsbedingte Sortierung (Abb. 89-94). Dieser Strandabschnitt zeichnet sich durch einen hohen seegangsbedingten Energieeintrag aus (NIEMEYER 1986).

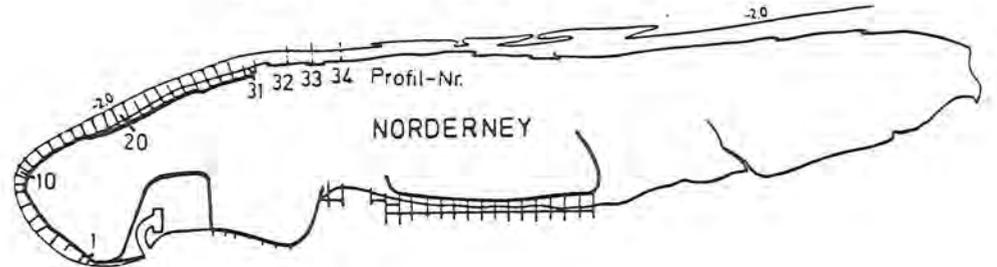


■ 0.4 Amp. ▨ 0.8 Amp. □ 1.2 Amp.





■ 0.4 Amp. ▨ 0.8 Amp. □ 1.2 Amp.



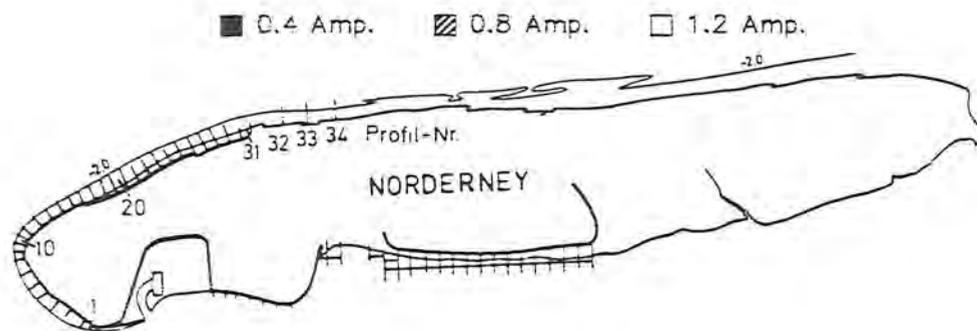
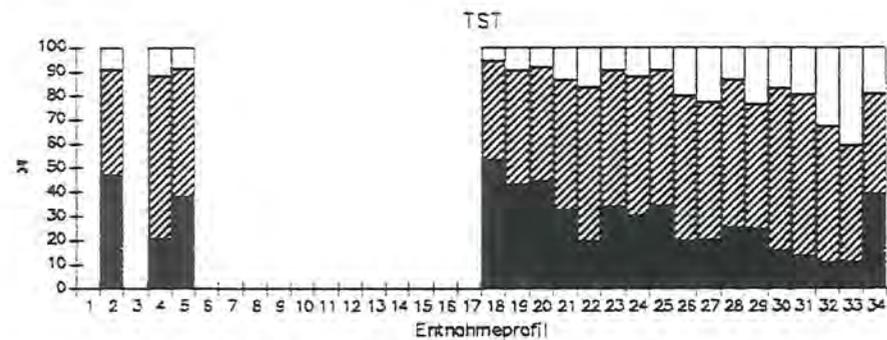
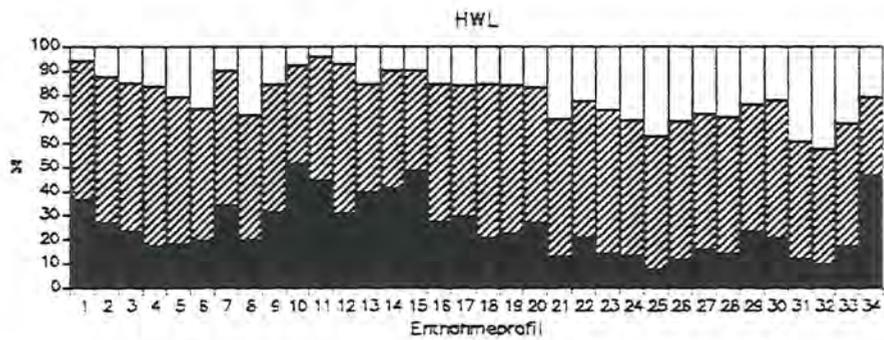
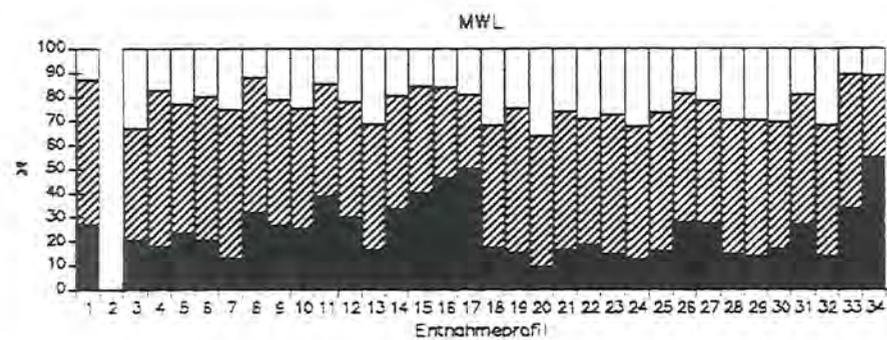
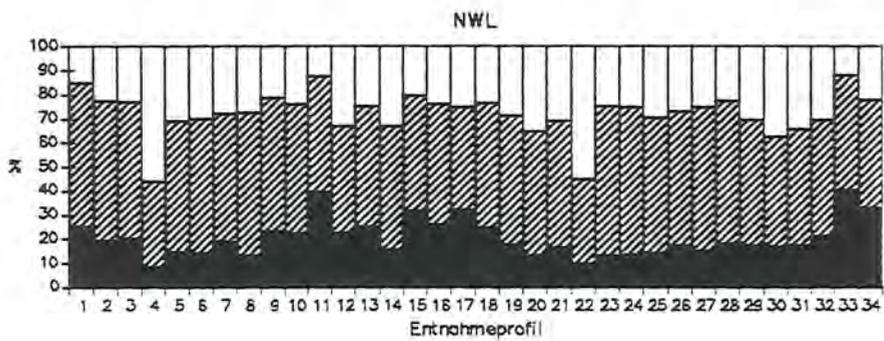
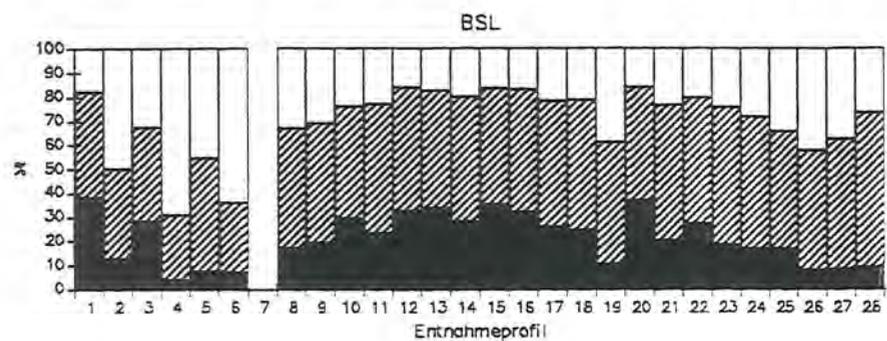
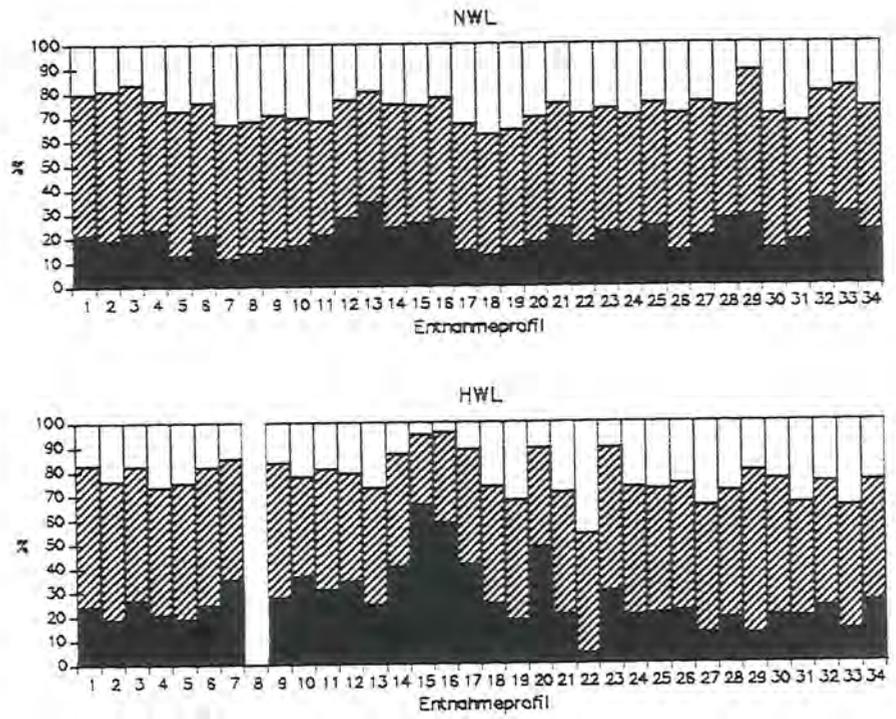
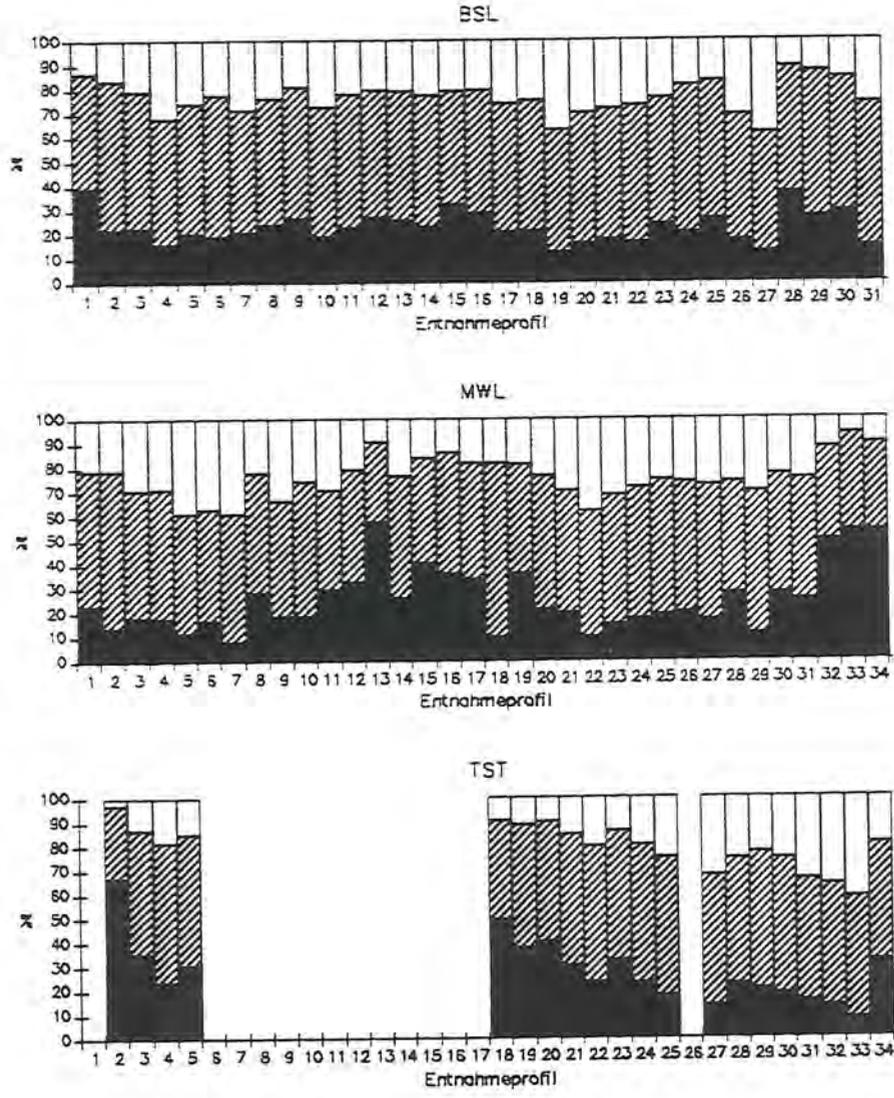
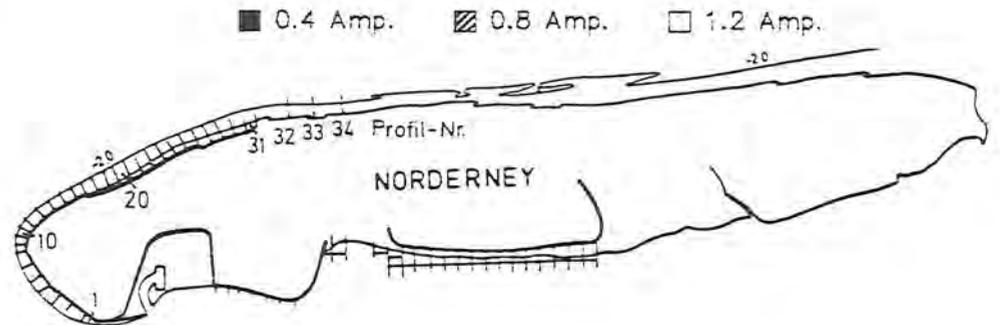
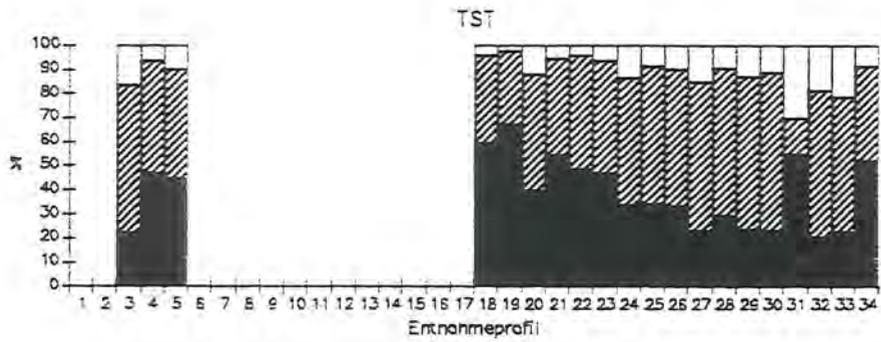
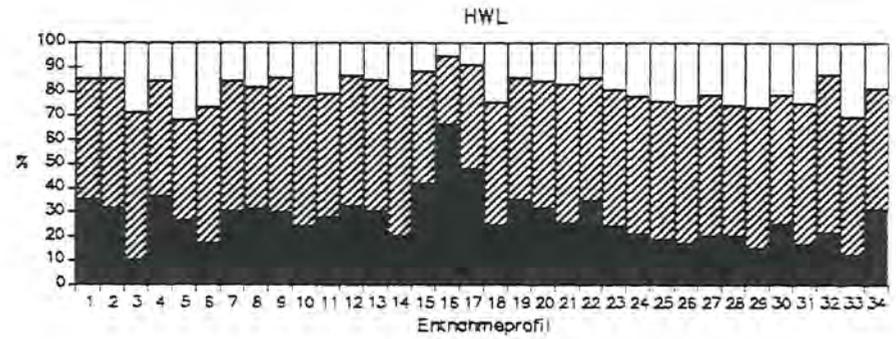
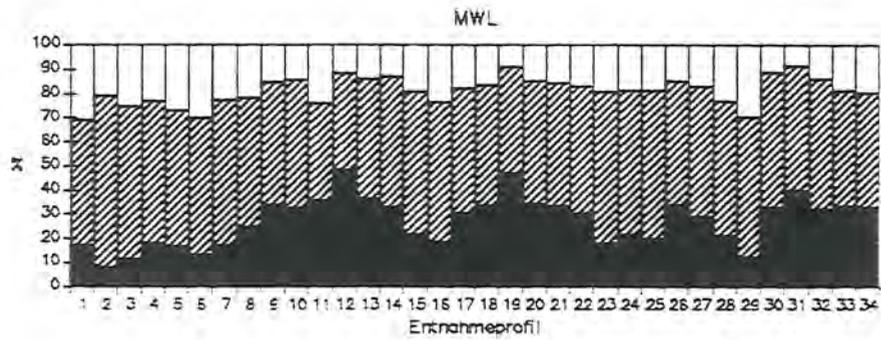
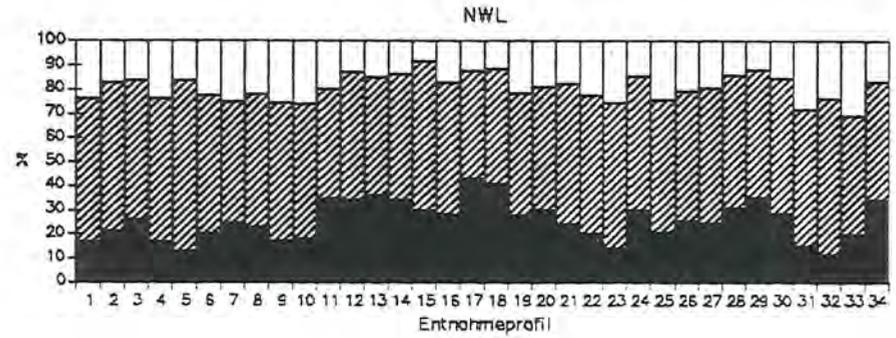
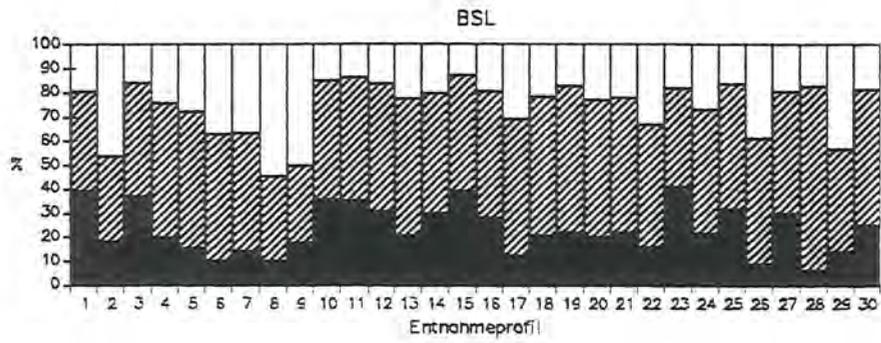


Abb. 98: Schwermetallverteilung am Norderneyer Strand und Vorstrand im Frühjahr 1988





BSL	0.4 Ampere I	0.8 Ampere II	1.2 Ampere III	SM-Gesamt
03/87	0.62	1.63	1.81	3.61
04/87	0.41	1.23	0.75	2.39
09/87	0.43	1.29	0.77	2.48
04/88	0.85	1.80	1.14	3.79
09/88	1.11	2.42	0.92	4.45
10/88	0.99	2.23	3.11	6.32
03/89	1.23	2.43	1.15	4.65

NWL	0.4 Ampere I	0.8 Ampere II	1.2 Ampere III	SM-Gesamt
03/87	0.90	1.94	0.89	3.73
04/87	1.30	2.25	1.02	4.56
09/87	0.40	1.24	0.94	2.61
04/88	0.78	1.85	0.97	3.60
09/88	0.78	1.87	0.86	3.51
03/89	1.65	3.27	1.06	6.06

MWL	0.4 Ampere I	0.8 Ampere II	1.2 Ampere III	SM-Gesamt
04/87	2.87	2.69	1.03	6.58
09/87	0.64	1.62	0.86	3.12
04/88	1.19	2.26	0.93	4.38
09/78	1.36	2.06	0.89	4.31
03/89	1.76	3.17	1.03	5.96

HWL	0.4 Ampere I	0.8 Ampere II	1.2 Ampere III	SM-Gesamt
04/87	3.05	4.07	1.36	8.48
09/87	1.38	2.06	1.21	4.65
04/88	2.11	3.58	1.01	6.69
09/88	2.42	2.87	0.96	6.25
03/89	2.17	3.38	1.11	6.58

TSt	0.4 Ampere I	0.8 Ampere II	1.2 Ampere III	SM-Gesamt
04/87	6.40	8.16	1.53	16.08
09/87	0.89	2.14	1.00	4.05
04/88	4.27	6.68	1.51	12.46
09/88	3.87	4.28	1.26	9.40
03/89	9.81	9.83	1.67	21.31

Tab. 16: Arithmetische Mittel der Schwermineralanteile und -gehalte (%) der Norderneyer Strand- und Vorstrandsedimente

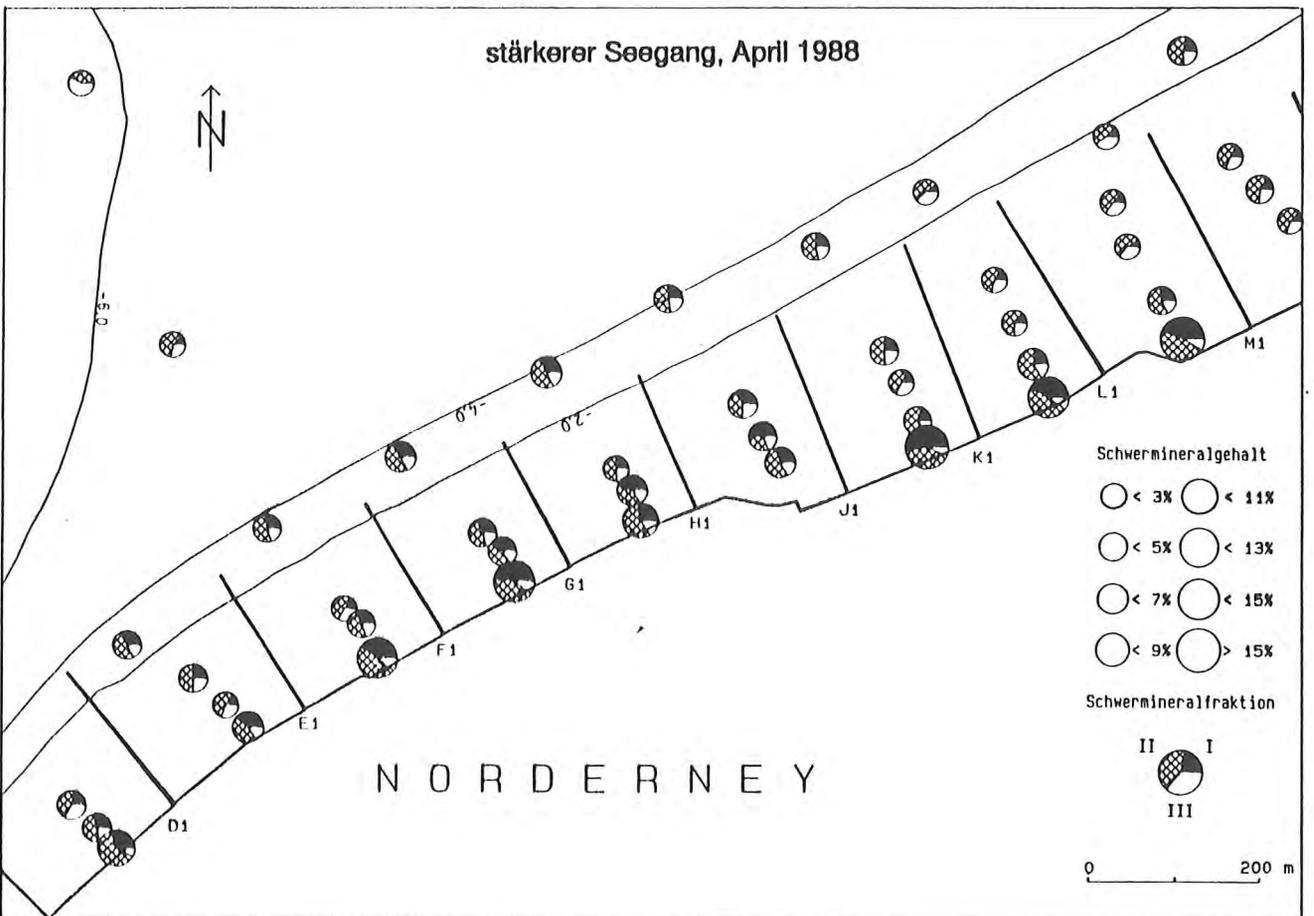
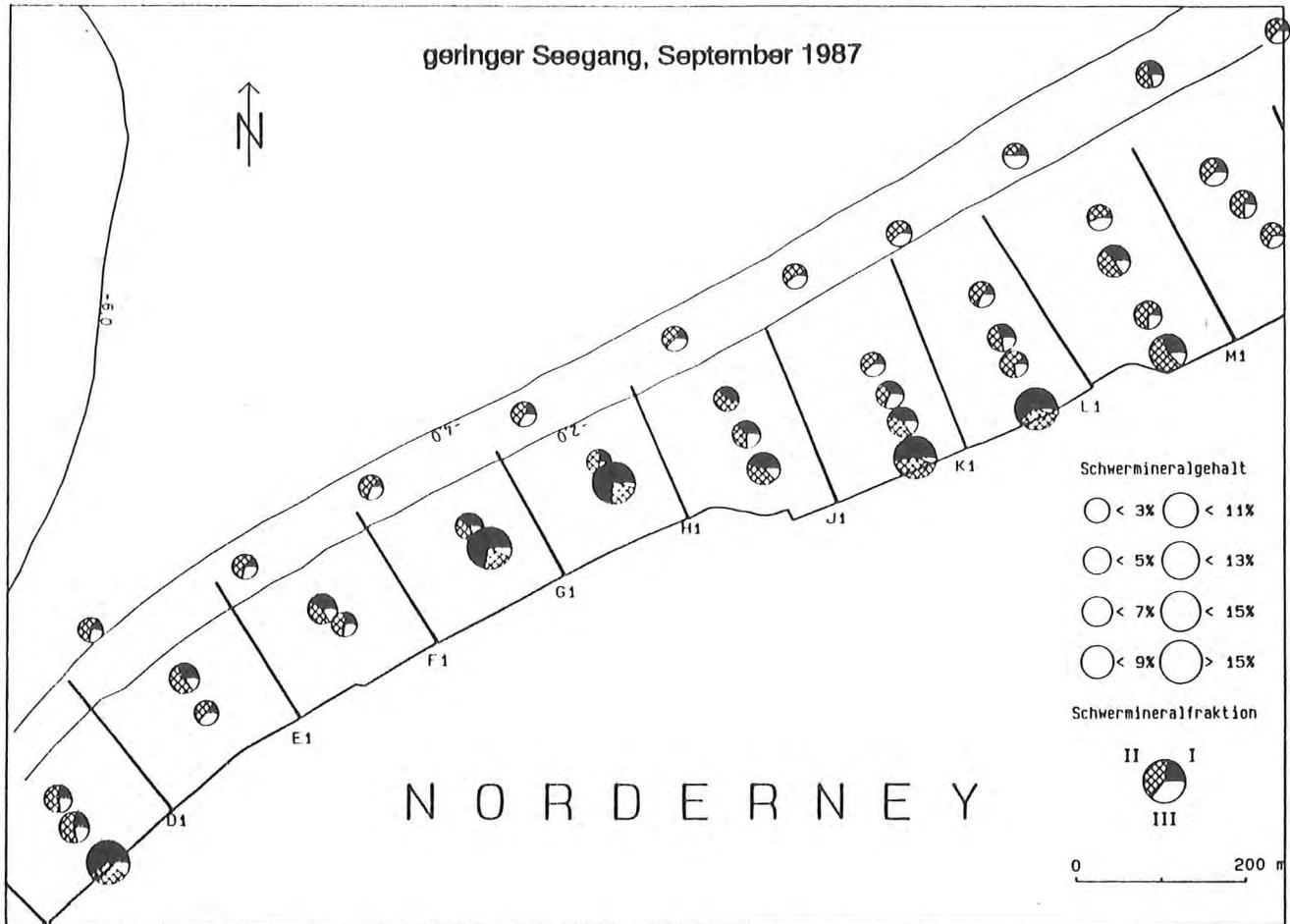


Abb. 101: Schwermineralgehalte und Anteile der Schwermineralfraktionen I-III am Nordweststrand Norderneys im Herbst 1987 und Frühjahr 1988

Die Schwermineralverteilung ist für den Divergenzbereich typisch und verändert sich bei unterschiedlichen Wetterlagen nur wenig. Die Sedimente aus dem vorgelagerten Vorstrandbereich, die bei ruhigeren Wetterlagen dem Typ B zugeordnet werden, weisen jedoch bei stärkerem Seegang ein Schwermineralspektrum des Typ A auf. Diese Änderung läßt sich nur durch strandnormalen Transport von Strandsedimenten in den Vorstrandbereich erklären, bei dem aufgrund des starken Seegangs die Selektion der Sedimentkörner gegenüber dem Transport zurücktritt (Abb. 101). Der für den trockenen Strand östlich Buhne H1 herausgehobene Typ A-Bereich ist auf äolische Selektionsprozesse zurückzuführen.

Die saisonalen Einflüsse des Seegangs zeigen sich durch erhöhte Schwermineralgehalte der im Frühjahr entnommenen Sedimente. Diese Zunahme beruht auf dem höheren Energieeintrag durch Seegang und Wind in den Wintermonaten und den damit verbundenen stärkeren Selektionsprozessen am Strand und Vorstrand.

8.4. Seegangs- und tidebedingte Sedimentumlagerungsprozesse in einem Bühnenfeld

Das Bühnenfeld D1-E1 am Nordweststrand von Norderney wurde während drei aufeinander folgender Tiden beprobt. Neben den vier Niedrigwasserbeprobungen wurden während der mittleren Tide drei weitere Sedimententnahmen durch Taucheinsätze, jeweils zu Mittelwasser und zu Hochwasser, ausgeführt. Bei jeder Entnahmeserie im Bühnenfeld wurden in fünf Profilen jeweils an sechs Punkten, die mit Pflöcken und Bojen markiert waren, Sedimentproben entnommen (Abb. 102).

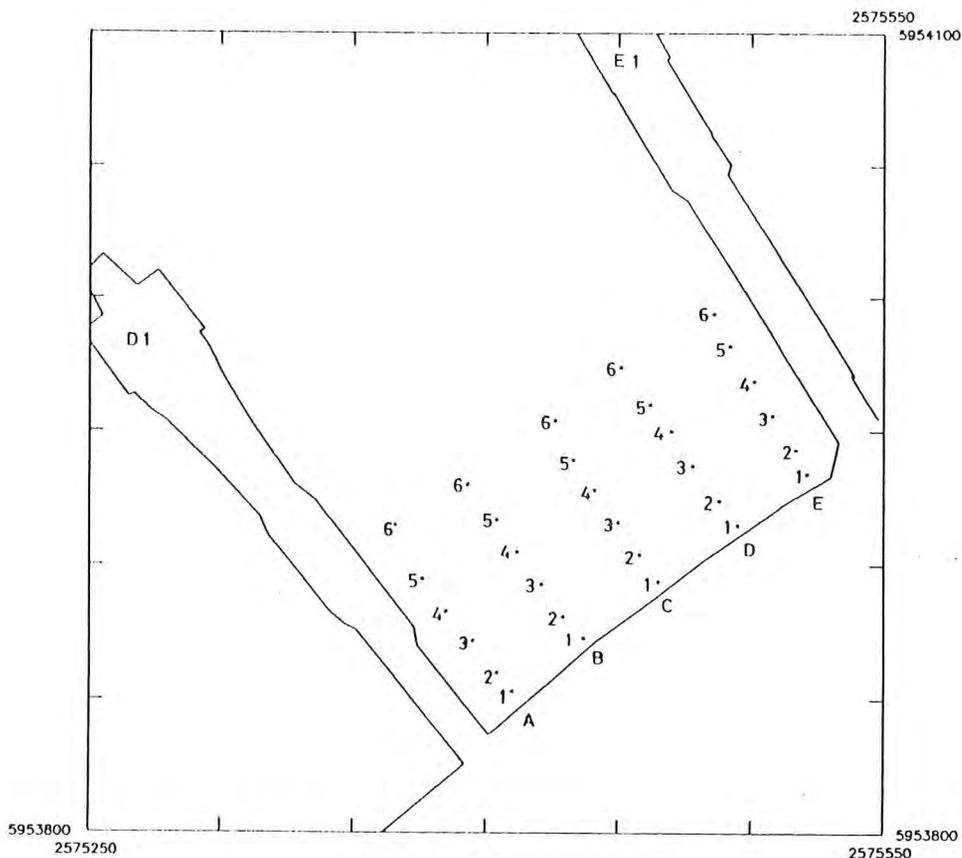


Abb. 102: Lageplan der Sedimententnahmepunkte

Zusätzlich wurde das Bühnenfeld jeweils zu Niedrigwasser in einem 10 m-Raster tachymetrisch erfaßt, um eine quantitative Abschätzung der umgelagerten Sedimentmassen zu ermöglichen. Demselben Zweck dienten drei Farbsandkörper, die an der Niedrigwasserlinie eingebaut waren und mit denen sich die Mächtigkeit der erodierten und sedimentierten Sedimentschicht ermitteln ließ. Gleichzeitig sind teilweise die hydrodynamischen Randbedingungen während der Untersuchung mit dem hydrographischen Meßnetz der Forschungsstelle Küste im Bühnenfeld erfaßt worden.

Das Ziel dieser Untersuchung war, die Sedimentumlagerungsvorgänge mit auflaufendem (Flut) und mit ablaufendem (Ebbe) Wasser zu erfassen und modellhaft darzustellen.

8.4.1. Topographie des Bühnenfelds D1-E1

Die Strandhöhen im Bühnenfeld D1-E1 hatten nach der letzten Aufspülung im Jahr 1984 stark abgenommen und erreichten an der unteren Deckwerksspundwand nur noch Höhen bis NN +0.2 m und in den Bühnenwurzelbereichen bis NN +1.0 m. Die Strandbreite bis zur MTnw-Linie betrug 70 - 80 m (Abb. 103). Die Sedimente wurden im Höhenbereich zwischen NN und NN -1.6 m entnommen (Tab. 17).

Pkt.-Nr.	1	2	3
Profil	Höhe (m NN)	Höhe (m NN)	Höhe (m NN)
A	-0.13 (± 0.03)	-0.30 (± 0.01)	-0.46 (± 0.01)
B	-0.14 (± 0.02)	-0.35 (± 0.03)	-0.36 (± 0.01)
C	-0.24 (± 0.03)	-0.35 (± 0.02)	-0.29 (± 0.02)
D	-0.11 (± 0.02)	-0.37 (± 0.02)	-0.27 (± 0.01)
E	+0.02 (± 0.03)	-0.49 (± 0.04)	-0.57 (± 0.03)

Pkt.-Nr.	4	5	6
Profil	Höhe (m NN)	Höhe (m NN)	Höhe (m NN)
A	-0.70 (± 0.01)	-0.83 (± 0.01)	-1.19 (± 0.01)
B	-0.61 (± 0.03)	-1.01 (± 0.01)	-1.49 (± 0.03)
C	-0.68 (± 0.03)	-1.13 (± 0.02)	-1.60 (± 0.02)
D	-0.60 (± 0.02)	-0.99 (± 0.01)	-1.45 (± 0.04)
E	-0.69 (± 0.02)	-0.85 (± 0.02)	-1.06 (± 0.05)

Tab. 17: Mittlere Höhenlagen der Sedimententnahmepunkte während der Untersuchung

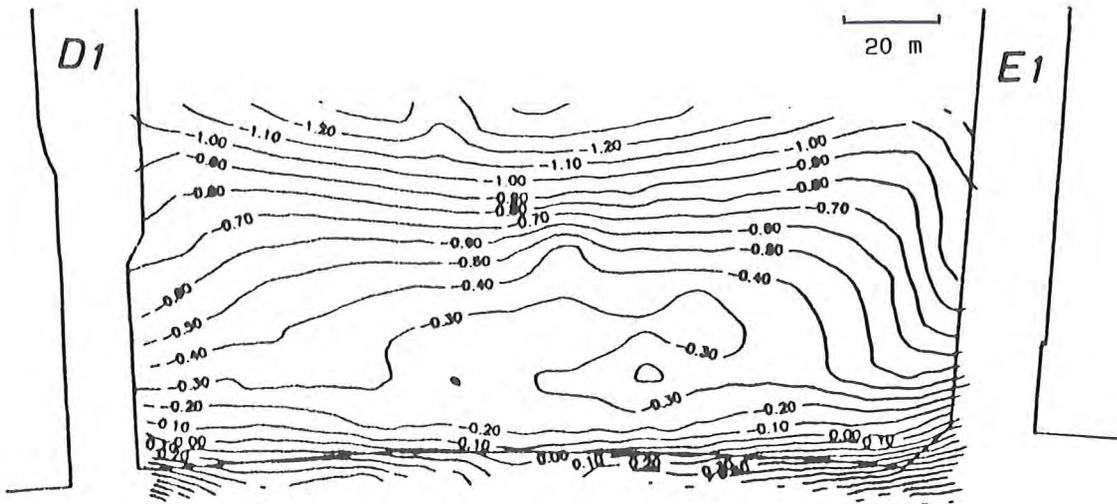


Abb. 103: Topographie des Bühnenfelds D1-E1 am 20.07.88

8.4.2. Sedimentverteilung Im Bühnenfeld

Das Bühnenfeld D1-E1 wurde schon einmal im August 1987 für eine Varianzuntersuchung bei Niedrigwasser in ähnlicher Weise beprobt (RAGUTZKI & WESTHOFF 1987b). Die Verteilung der mittleren Korndurchmesser ist in der Abbildung 104 zu sehen. Gegenüber den ca. ein Jahr später erfolgten Beprobungen, die im Folgenden beschrieben werden, sind die Sedimente dieser früheren Beprobung sehr viel feinkörniger, besser sortiert und weisen deutlich geringere CaCO_3 -Gehalte auf.

Die Verteilung der d50- und Medianwerte im Juli 1988, für die stellvertretend jene der Md-Werte dargestellt ist (Abb. 106), lässt sich wie folgt beschreiben: Die höchsten Werte und somit die größten Sedimente befinden sich im zentralen Teil des Bühnenfeldes. In Richtung auf das Deckwerk, auf die Bühnen sowie auf den Vorstrand nehmen die mittleren Korndurchmesser ab. Der Vergleich der vier Verteilungen während Niedrigwasser zeigt eine große Übereinstimmung in der Verteilung und den Absolutgrößen der Medianwerte. Die größten Sedimente weisen einen mittleren Korndurchmesser >0.45 mm auf, während die randlichen Sedimente bis zu 0.25 mm feiner sind.

Mit auflaufendem Wasser nehmen diese Sedimentkennwerte bis zum Hochwasser um ca. 0.1 mm ab und erreichen mit ablaufendem Wasser bis zum darauffolgenden Niedrigwasser wieder in etwa die Ausgangsverteilung. Der zeitliche Ablauf dieser Änderungen ist für die Medianwerte des Entnahmeprofils C in Abbildung 105 dargestellt.

Die Karbonatgehalte der Sedimente, die als Parameter für den Schillanteil im Sediment gelten können, sind zu einem großen Teil für die erhöhten d50- und Medianwerte verantwortlich. Dies wird durch die große Übereinstimmung der Verteilungen dieser Sedimentkennwerte deutlich. Jedoch zeigen die Verteilungspläne der Karbonatgehalte eine größere Variabilität. Die Veränderungen der Karbonatgehalte über eine Tide lassen sich wie folgt beschreiben:

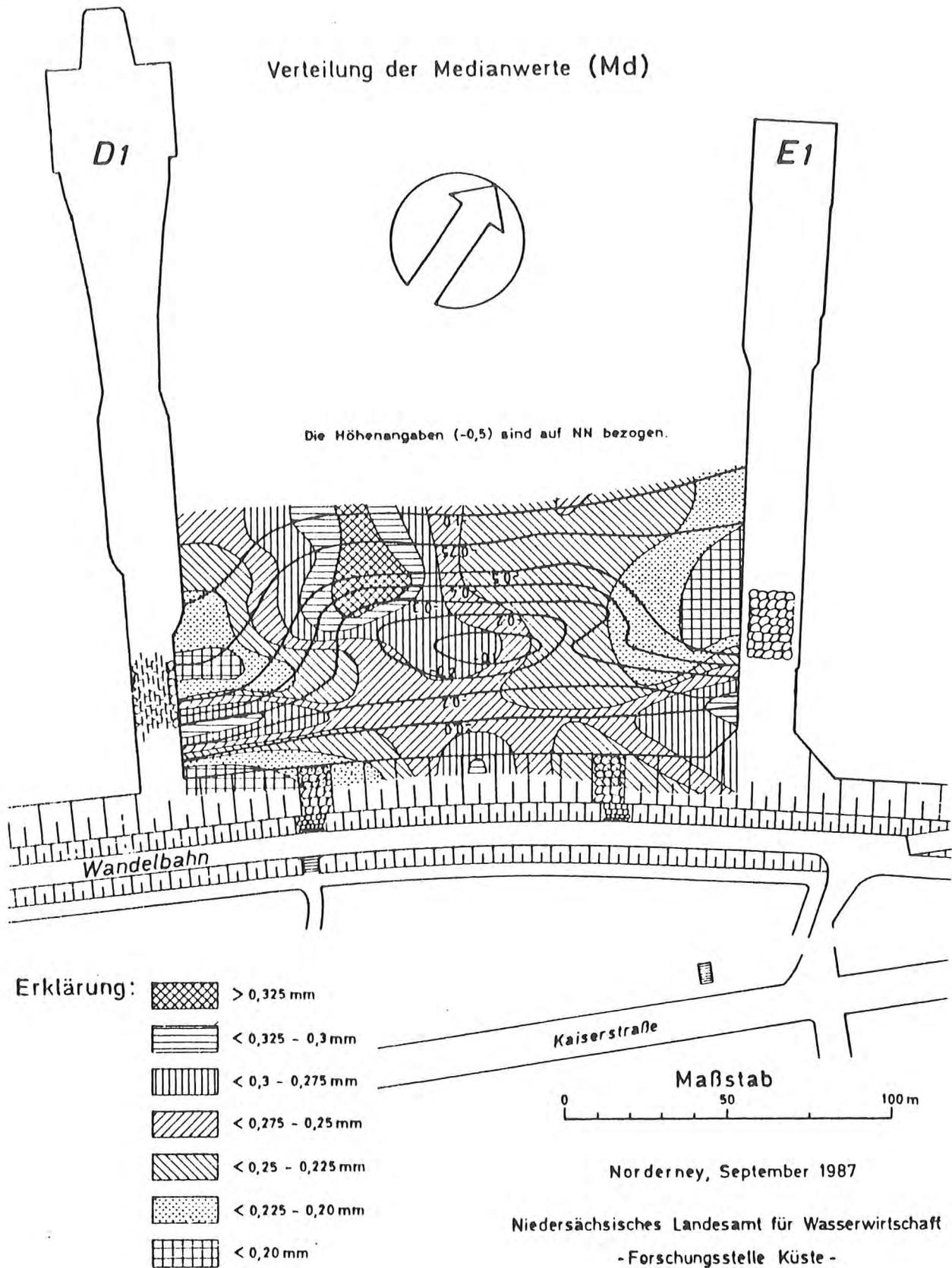


Abb. 104: Verteilung der Median-Werte im Bühnenfeld D1-E1 im Sept. 1987
(aus RAGUTZKI & WESTHOFF 1987b)

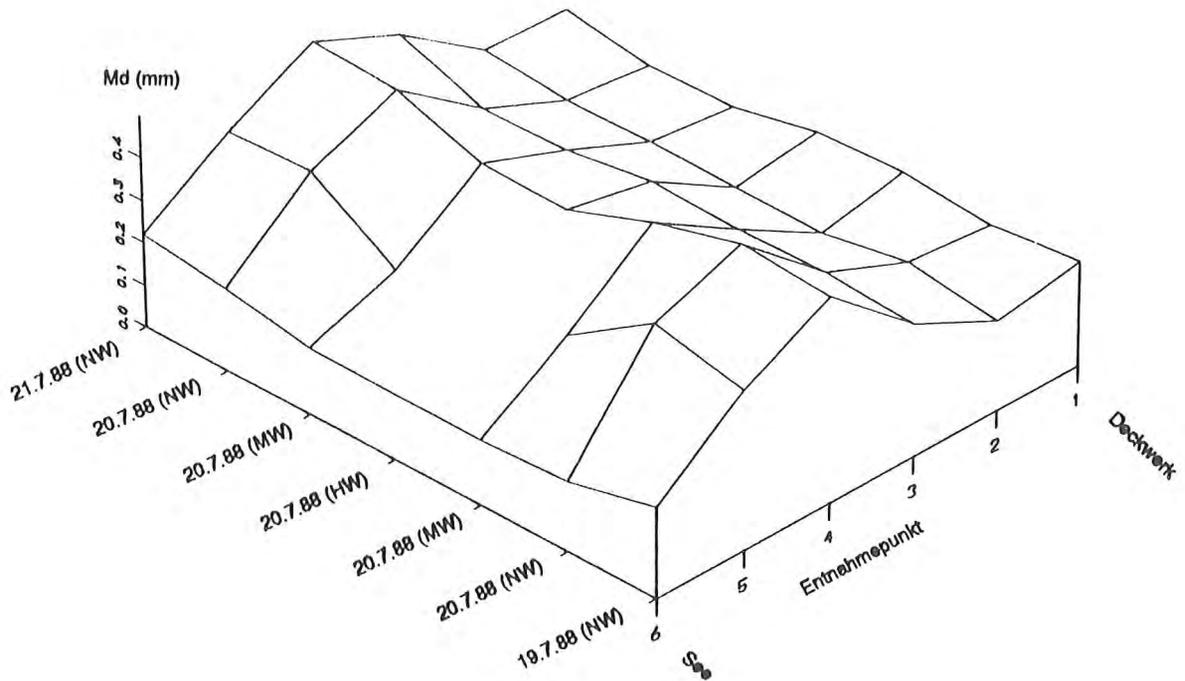


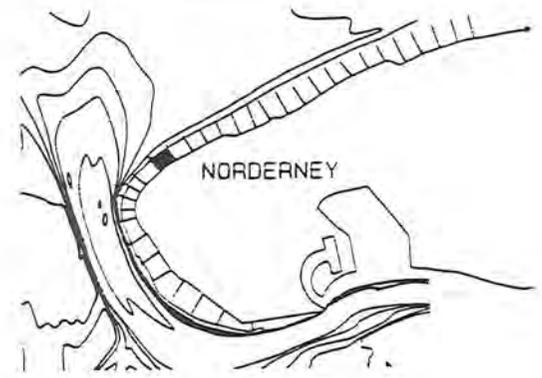
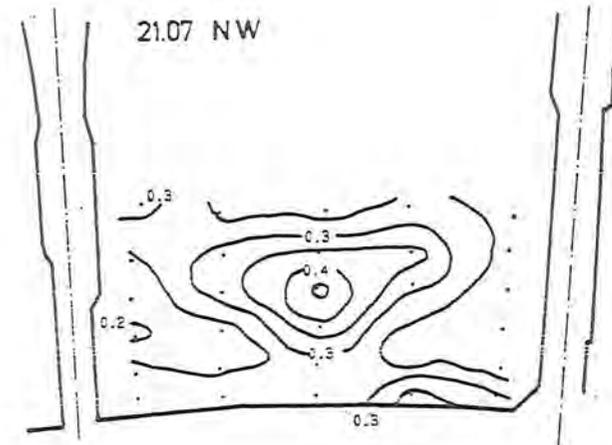
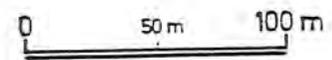
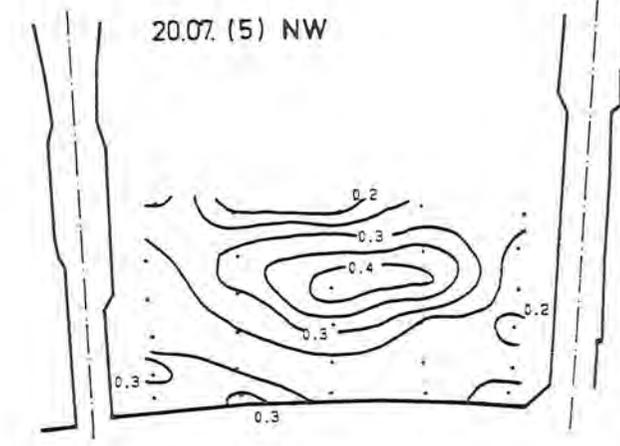
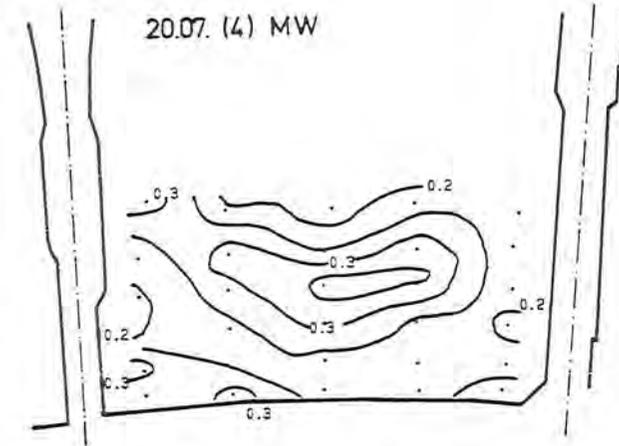
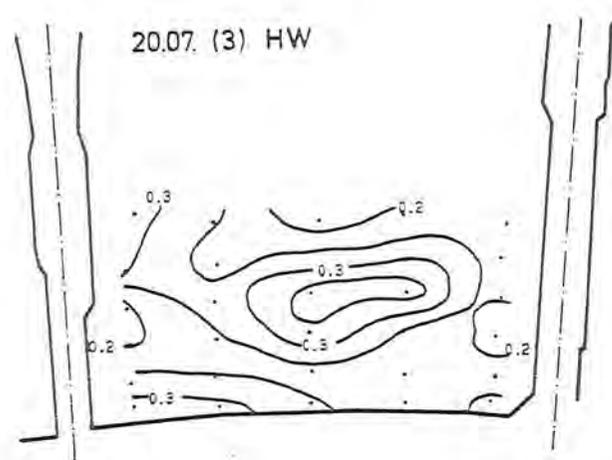
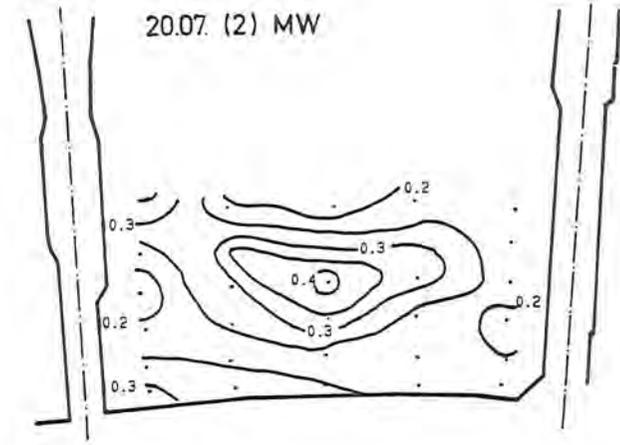
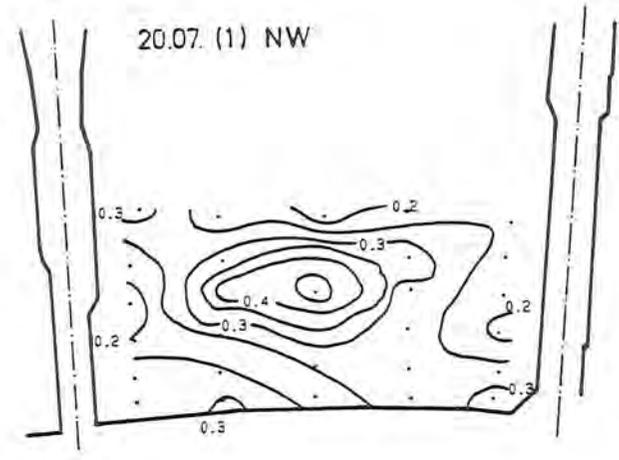
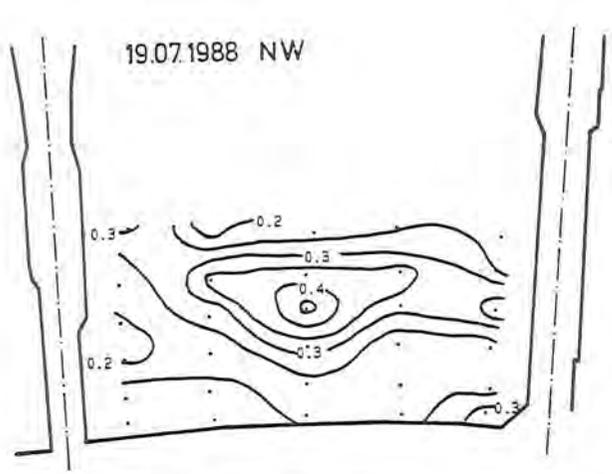
Abb. 105: Zeitliche Änderungen der Medianwerte im Profil C

Vom Niedrigwasser bis zum folgenden Mittelwasser nehmen die Karbonatgehalte stark ab und bleiben bis zum Hochwasser in etwa konstant. Die Verteilung während des nachfolgenden Mittelwassers verdeutlicht ein Ansteigen der Karbonatgehalte. Während Niedrigwasser ist fast schon wieder der Zustand hergestellt, wie er zu Beginn der Tide bestand (Abb. 107). Nur die hohen Karbonatgehalte werden nicht mehr erreicht.

Die Sortierungswerte zeigen ein den Verteilungen der mittleren Korndurchmesser sehr ähnliches Bild. Die am schlechtesten sortierten Sedimente finden sich im mittleren Teil des Bühnenfeldes. Die im Umfeld abgelagerten Sedimente sind gut bis mäßig gut sortiert, weisen also ein engeres Kornspektrum auf. Mit der Flut werden die Kornspektren der anstehenden Sedimente - insbesondere im zentralen Bereich - enger und weisen bei dem folgenden Niedrigwasser wieder in etwa die Ausgangsverteilung auf (Abb. 108).

Die Isolinienpläne der Schiefewerte (Abb. 109) sind nicht so konzentrisch aufgebaut wie die vorher beschriebenen Verteilungen, sondern eher strandparallel ausgerichtet. Die "am stärksten grob-schiefen Sedimentverteilungen" sind in der Niedrigwasserlinie zu finden, während zu Niedrigwasser im zentralen Teil des Bühnenfeldes grob-schiefe Verteilungen vorherrschen. Mit auflaufendem Wasser nimmt die Asymmetrie der Kornverteilungskurven - verdeutlicht durch die geringeren Schiefewerte - ab. Nach Hochwasser nehmen sie wieder zu.

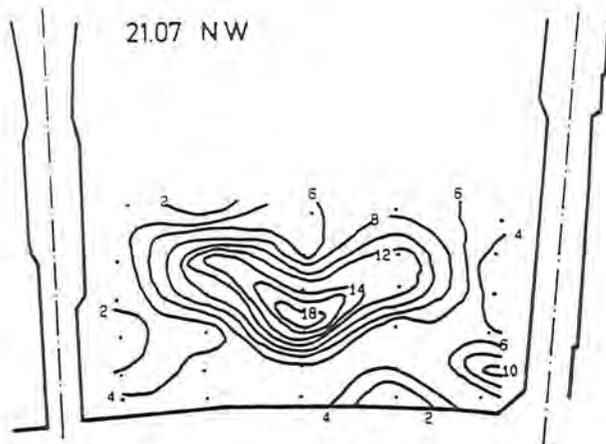
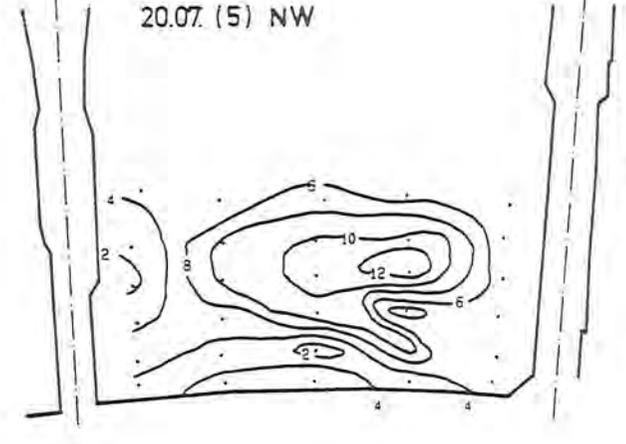
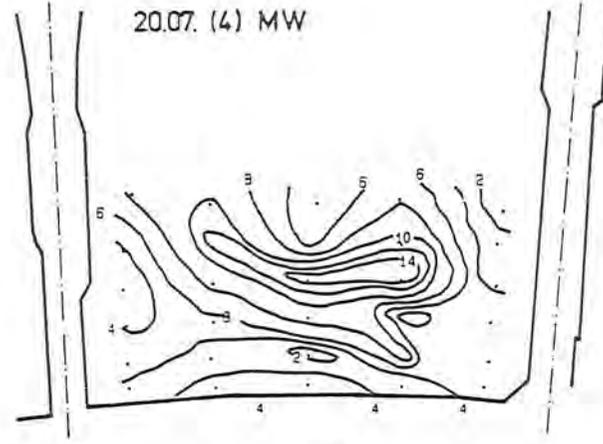
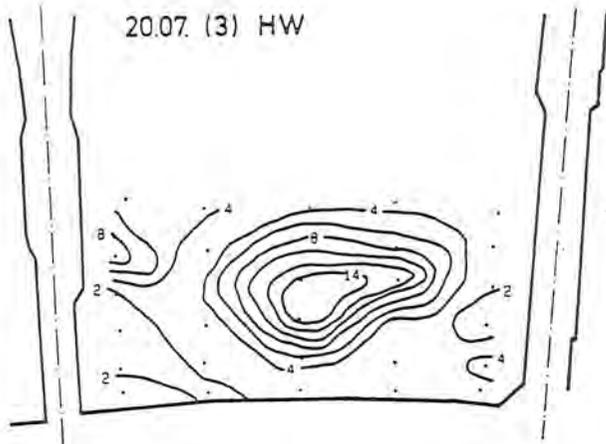
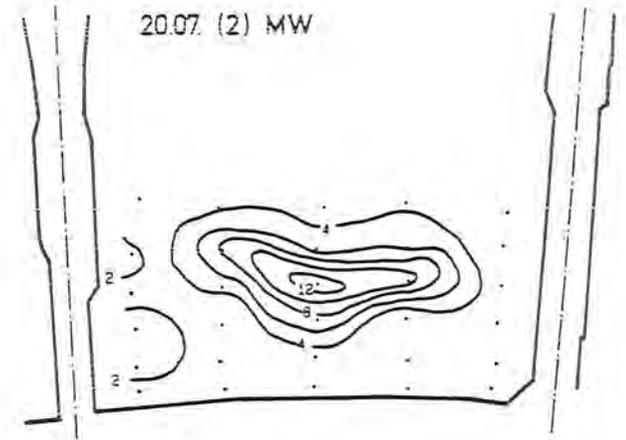
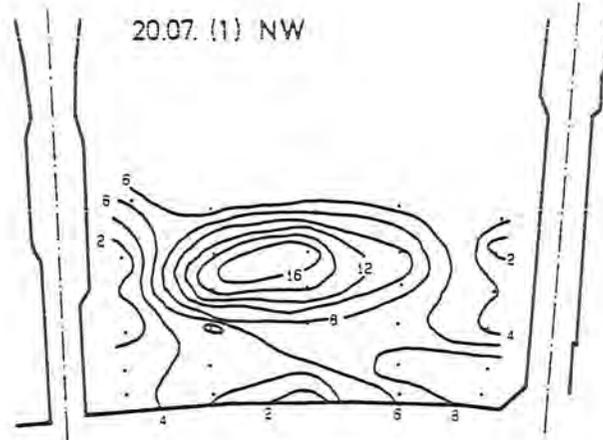
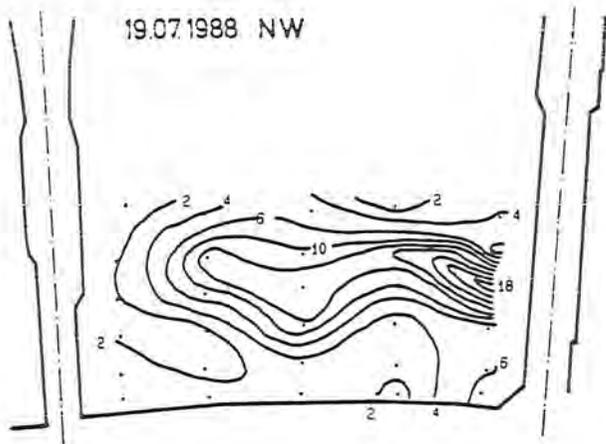
Die Verteilungspläne der Kurtosis- und U-Werte wurden nicht dargestellt, da ihre Aussagekraft zur Deutung von Umlagerungsvorgängen nur sehr gering ist bzw. durch andere Sedimentparameter besser beschrieben wird.



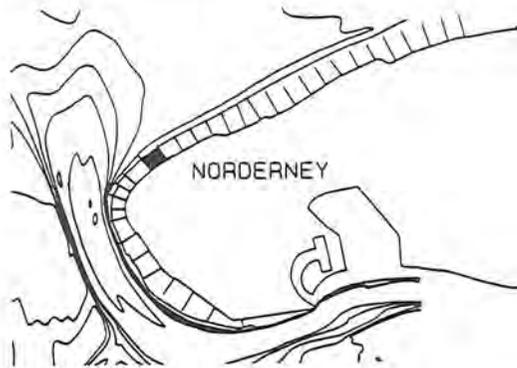
Norderney
 Bühnenfeld D1-E1
 Verteilung der Md-Werte (mm)

Abb. 106: Verteilung der Median-Werte während der 3 Tiden

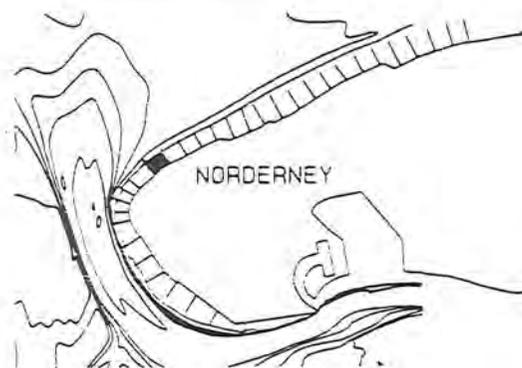
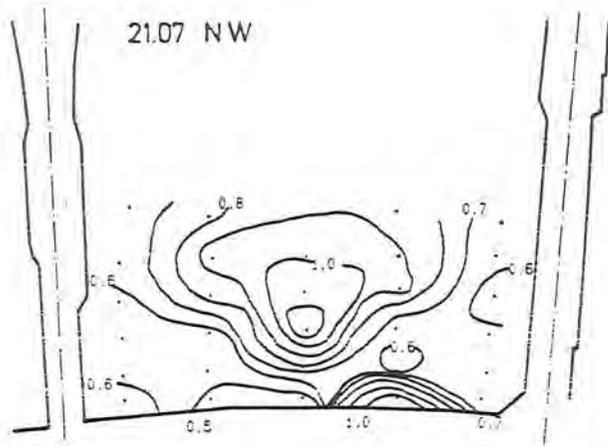
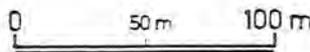
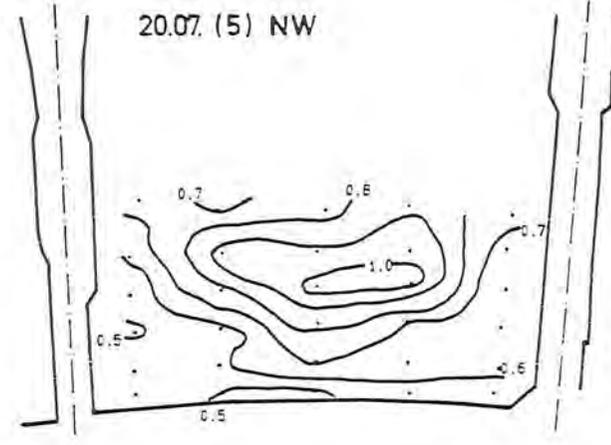
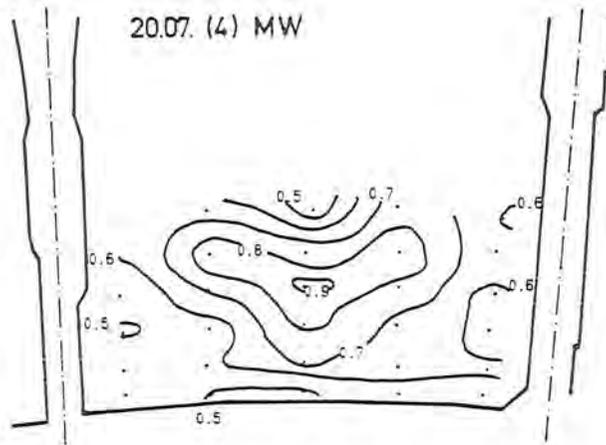
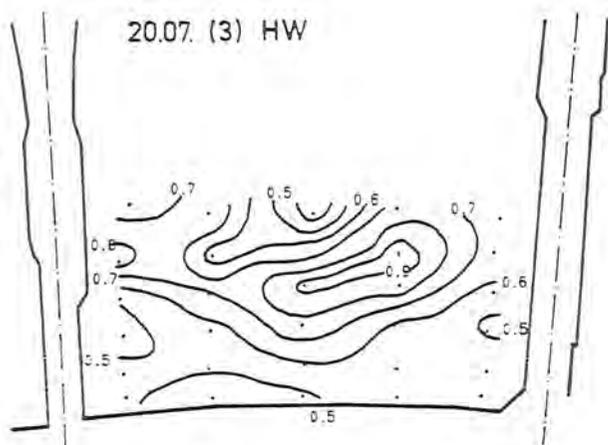
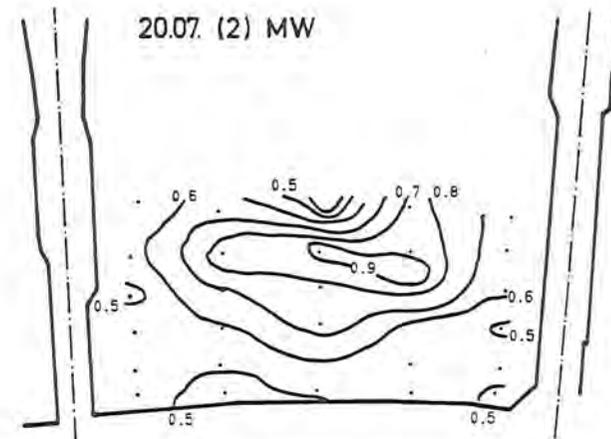
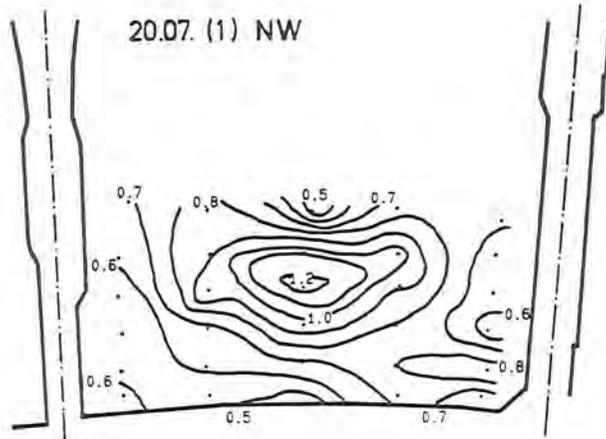
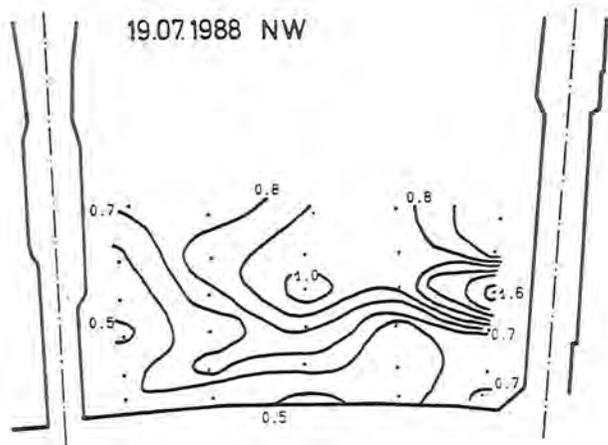
Abb. 107: Verteilung der Karbonatgehalte während der 3 Tiden



0 50 m 100 m



Norderney
Buhnenfeld D1-E1
Verteilung der CaCO₃-Gehalte (%)

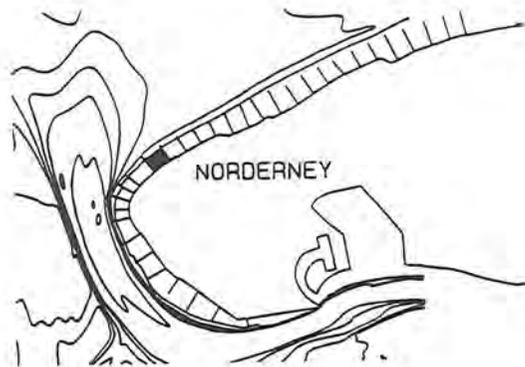
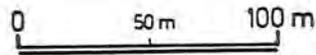
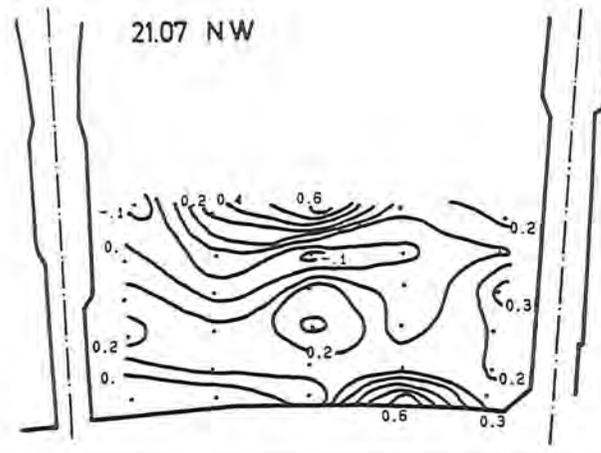
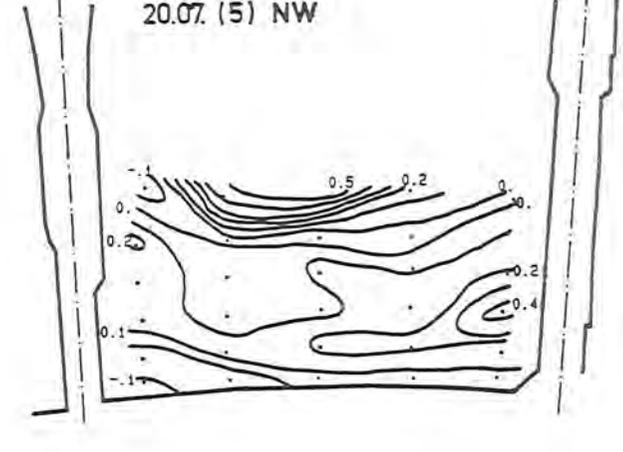
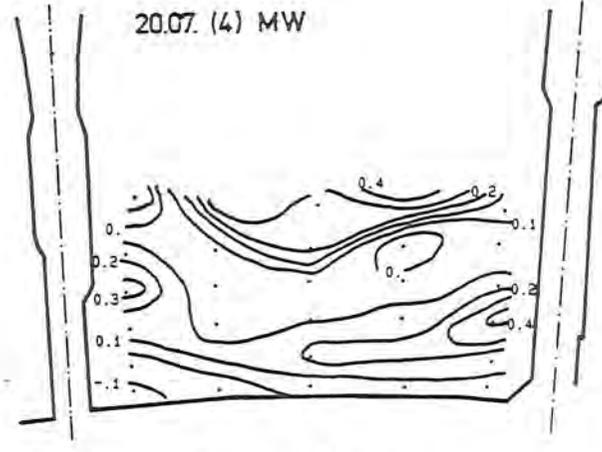
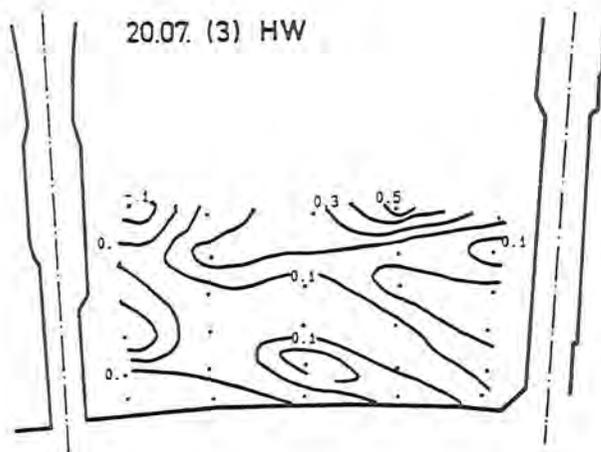
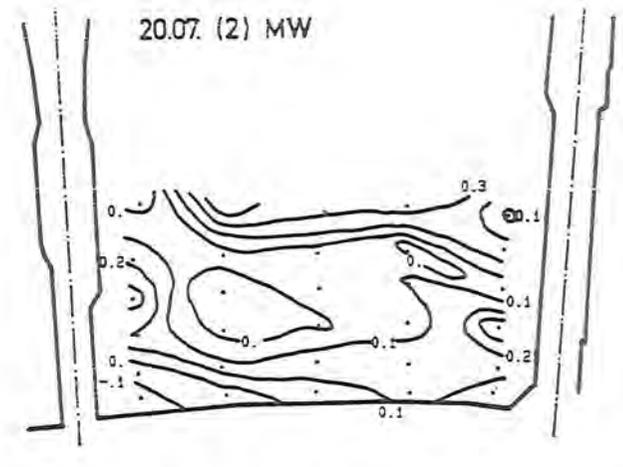
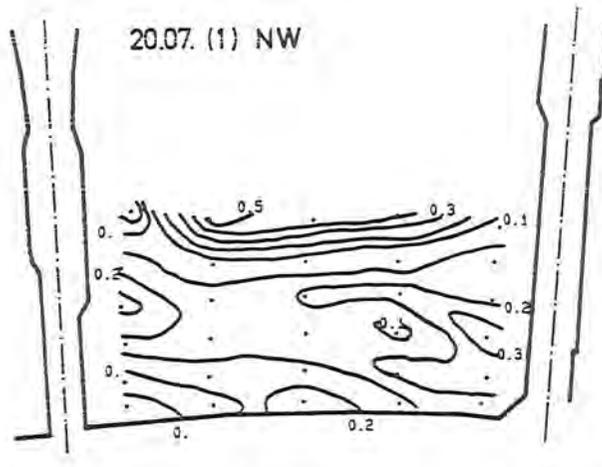
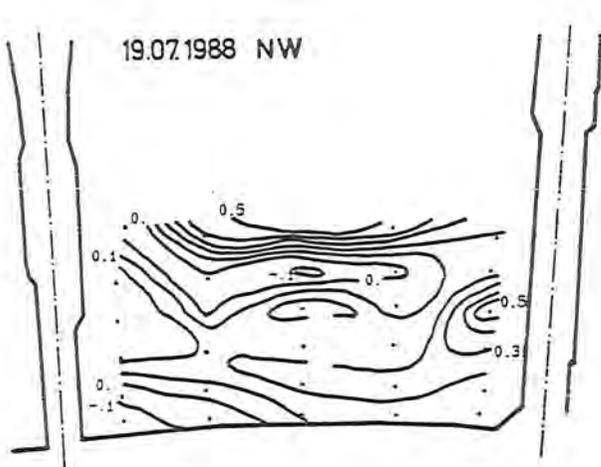


Norderney
 Bühnenfeld D1-E1
 Verteilung der So-Werte (phi)

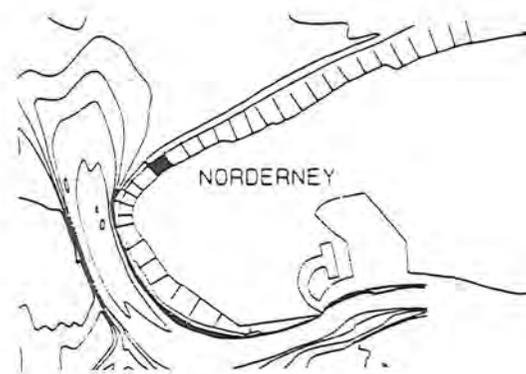
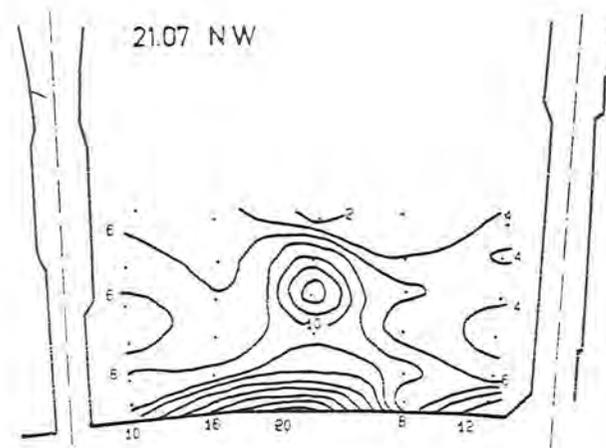
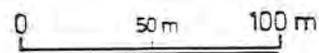
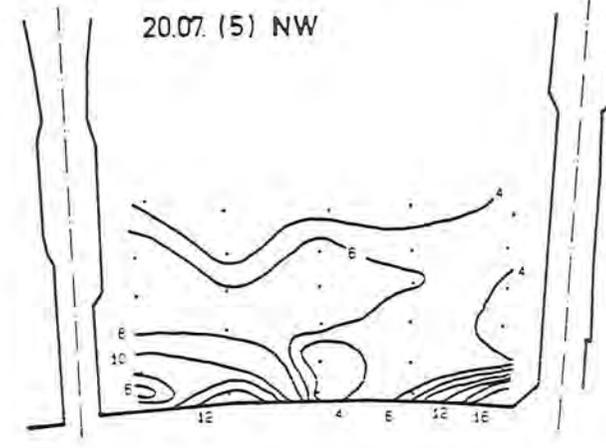
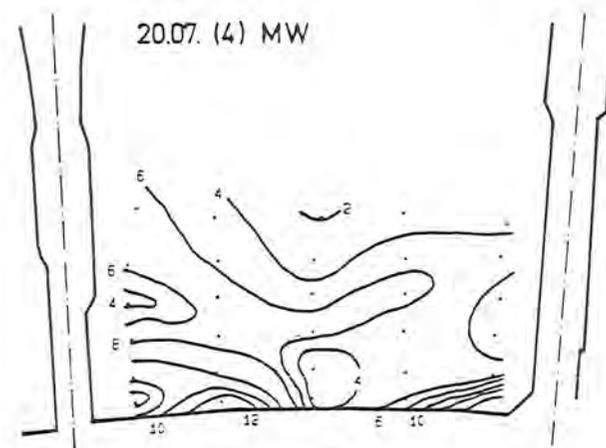
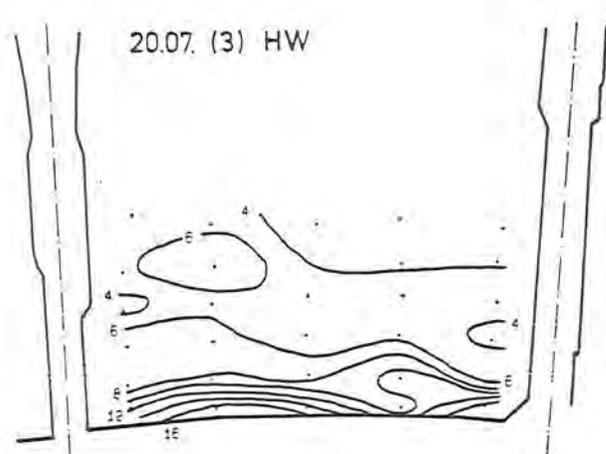
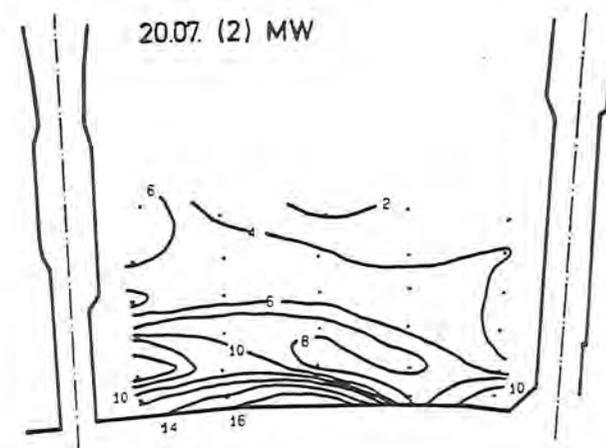
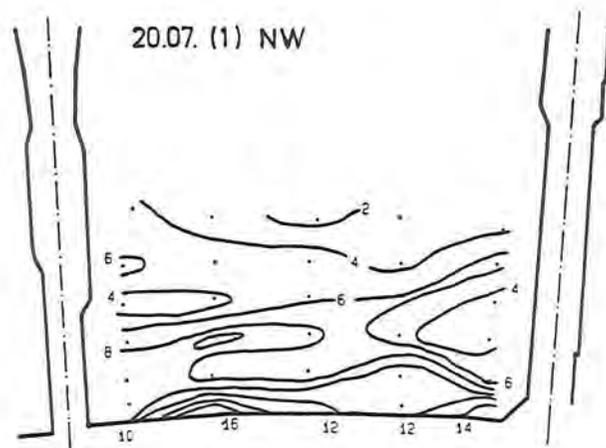
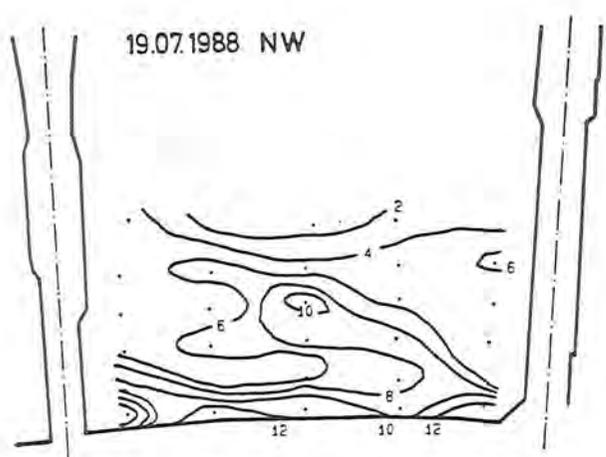
Abb. 108: Verteilung der Sortierungswerte während der 3 Tiden

Abb. 109:

Verteilung der Schiefe Werte während der 3 Tiden



Norderney
 Bühnenfeld D1-E1
 Verteilung der Sk-Werte



Norderney
 Buhnenfeld D1-E1
 Verteilung der SM-Gehalte (%)

Verteilung der Schwermetallgehalte während der 3 Tiden

Abb. 110:

Die Rollsorteranalysen der entnommenen Sedimente erbrachten keine Änderungen der S.D.C.-Kurven über den Untersuchungszeitraum. Auf eine Darstellung dieser Ergebnisse wurde daher ebenfalls verzichtet.

Die Verteilungskarten der Schwermineralgehalte (Abb. 110) verdeutlichen einen kontinuierlichen Anstieg von der Niedrigwasserlinie zum Deckwerk hin. Diese höheren Schwermineralgehalte im oberen Strandabschnitt sind auf den zunehmenden Energie- und Turbulenzeintrag durch den am Deckwerk reflektierten Seegang zurückzuführen.

Im Tidenverlauf nehmen die Schwermineralgehalte im zentralen Bühnenfeldbereich leicht ab. Diese Verringerung ist auf die Zufuhr schwermineralärmerer Sande aus den tieferen Abschnitten des nassen Strandes und des vorgelagerten Vorstrandes zurückzuführen. Mit ablaufendem Wasser stellt sich der ursprüngliche Zustand wieder ein.

8.4.3. Die hydrographischen Randbedingungen

Die Ursachen der Sedimentumlagerungen im Bühnenfeld können in den Tideströmungen, in seegangserzeugten Strömungen bzw. in dem Zusammenwirken beider Kräfte gesehen werden. Wie jedoch NIEMEYER (1987) dargelegt hat, können die tidebedingte Strömungen als Ursache der Umlagerungen im Bühnenfeld D1-E1 vernachlässigt werden, da diese dort nur zwischen 0 und 5 cm/s betragen (Abb. 19).

Datum	Tide	V_{Wind} (m/s)	Windrichtung
18.7.	2	10.1	w - wnw
19.7.	1	7.3	wnw
	2	3.5	wnw - wsw
20.7.	1	5.0	wsw - wnw
	2	5.2	w - wnw
21.7.	1	1.9	wnw - s

Tab. 18: Winddaten der Wetterstation Norderney im Juli 1988

Daher müssen die Veränderungen der Kornspektren im Bühnenfeld auf seegangserzeugte Strömungen zurückgeführt werden. Abbildung 111 vermittelt einen Eindruck des Seegangs während des Hochwassers der zweiten Tide. Die während der Untersuchung herrschenden Winddaten der Wetterstation Norderney sind in der Tabelle 18 zusammengefasst.

Zur Erfassung der hydrographischen Bedingungen während der Bühnenfelduntersuchung wurden zwei Seegangsmessungen an der Niedrigwasserlinie in Bühnenfeldmitte ausgeführt. Die dabei gemessenen signifikanten Wellenhöhen und Wellenperioden sind in der Tabelle 19 zusammengefaßt.

	auflaufendes Wasser 1: 19.7.88 bei Thw 2: 19.7.88 bei Thw		ablaufendes Wasser 3: 20.7.88 bei Thw 4: 20.7.88 bei Thw	
	1	2	3	4
H_S	0.47 m	0.46 m	0.17 m	0.15 m
TH_S	4.2 s	4.5 s	4.0 s	3.5 s

Tab. 19: Signifikante Wellenhöhe (H_S) und signifikante Wellenperiode (TH_S) während des Beprobungszeitraums im Bühnenfeld D1-E1

Obwohl die Windverhältnisse am 19. und 20.7.88 (Tab. 18) in etwa gleich sind, treten am 19.7.88 fast dreimal so große signifikante Wellenhöhen auf als es am 20.7.88 der Fall ist. Ob dies auf die stärkeren Winde am 18. Juli oder auf einschwingende Dünung zurückzuführen ist, läßt sich nicht eindeutig klären. Die signifikanten Wellenperioden lassen zwar eher auf Windseen schließen, jedoch wird die vom Küstenvorfeld her einschwingende Dünung mit ihren größeren Wellenperioden am Riffbogen stark verformt und aufgesplittet (NIEMEYER 1986), wodurch ähnliche Wellenperioden wie bei Windseen auftreten und somit eine klare Zuordnung unmöglich wird.

Die gleichzeitig während des Mittelwassers mit elektromagnetischen Sensoren erfolgten Strömungsmessungen sind in den Abbildungen 112 und 113 dargestellt in Form von Stromstärkerosen dargestellt.

Station: m1

0.00	bis	0.20	m/sec
0.20	bis	0.40	m/sec
0.40	bis	0.60	m/sec
0.60	bis	0.80	m/sec
0.80	bis	1.20	m/sec

19.7.88 0.35 h - 0.45 h (Mittelwasser, auflaufend)

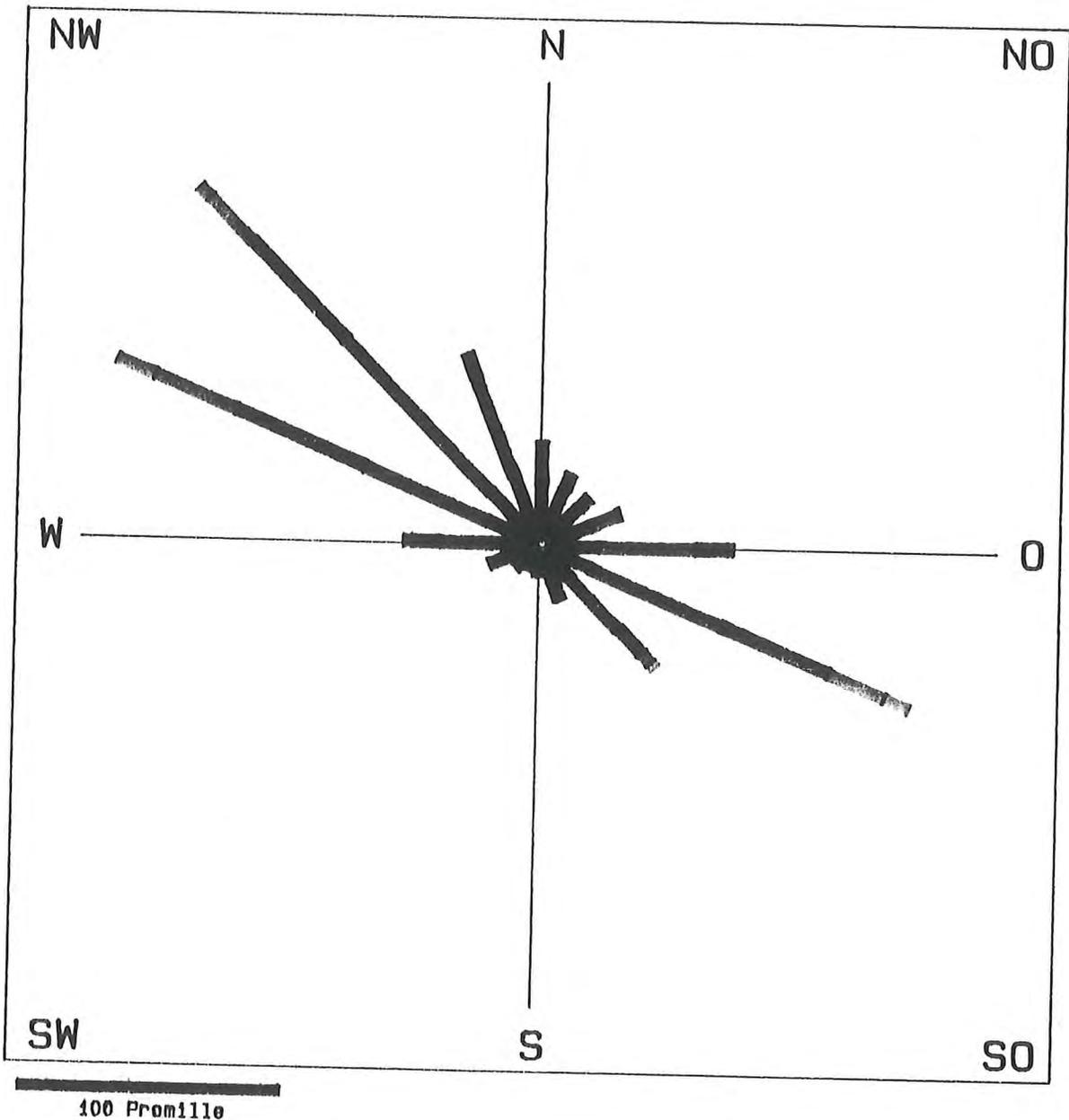
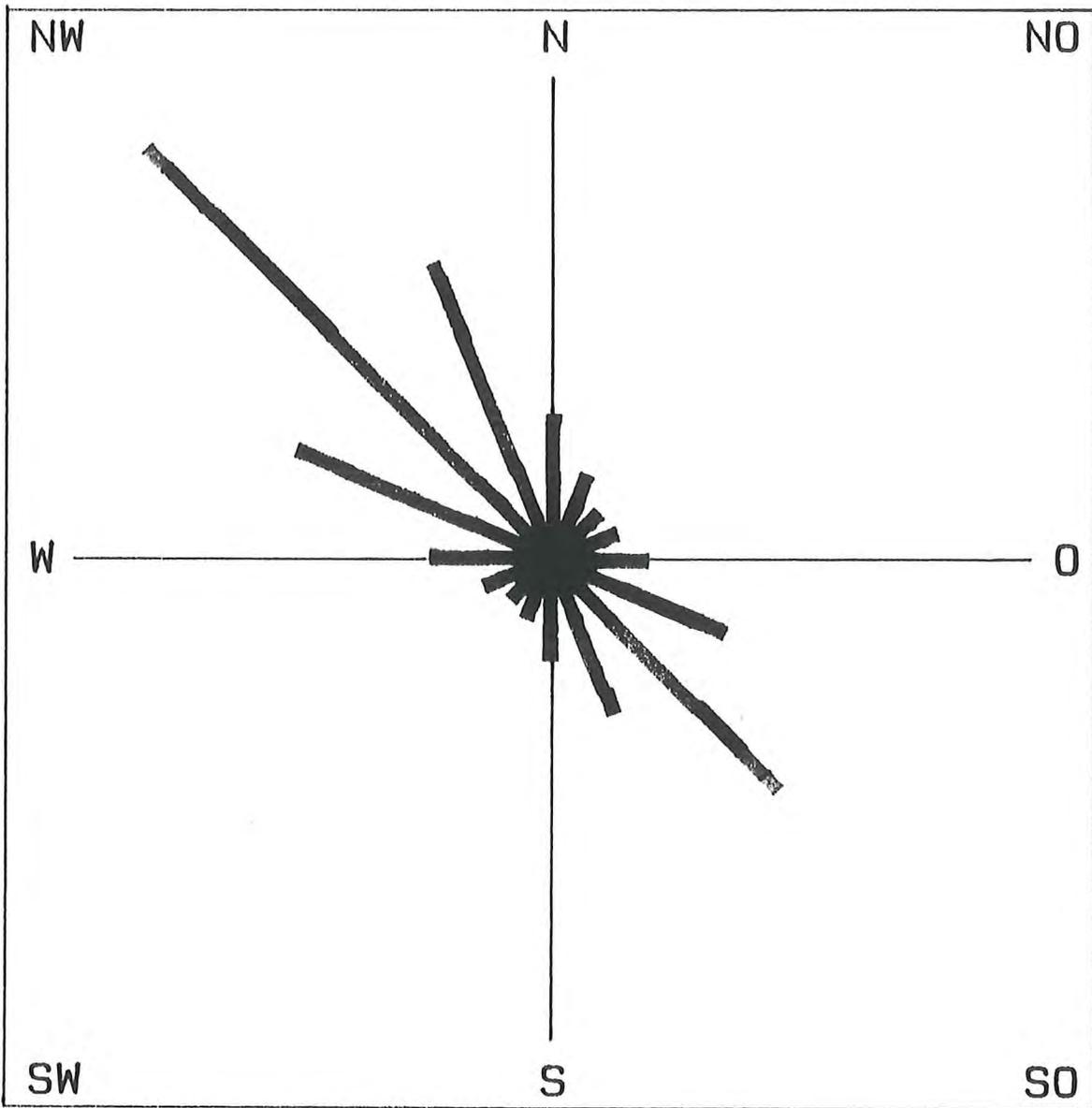


Abb. 112: Stromstärkerose vom 19.7.88 (Mittelwasser, auflaufend); dargestellt ist der Anteil der Stromgeschwindigkeiten (5 Klassenintervalle) in 22.5°-Sektoren während einer 10 minütigen Messung; Hydrographische Datenbank der Forschungsstelle Küste

Station: m1

0.00	bis	0.10	m/sec
0.10	bis	0.20	m/sec
0.20	bis	0.30	m/sec
0.30	bis	0.40	m/sec
0.40	bis	0.60	m/sec

20.7.88 18.50 h - 19.00 h (Mittelwasser, ablaufend)



100 Promille

Abb. 113: Stromstärkerose vom 20.7.88 (Mittelwasser, ablaufend); dargestellt ist der Anteil der Stromgeschwindigkeiten (5 Klassenintervalle) in 22.5°-Sektoren während einer 10 minütigen Messung; Hydrographische Datenbank der Forschungsstelle Küste

Beim Vergleich der zwei Strömungsrosen fällt auf, dass sowohl während des auflaufenden als auch während des ablaufenden Wassers die seewärtige Komponente der oszillierenden Strömungen gegenüber der landwärtigen Komponente eindeutig überwiegt. Die seewärtsgerichteten Strömungen betragen am 19.07.88 bis zu 1.2 m/s, während diese am 20.07.88 nur bis zu 0.6 m/s erreichten.

8.4.4. Ergebnisse der tachymetrischen Aufnahmen und Farbsandversuche

Das Bühnenfeld D1-E1 wurde jeweils während der vier Niedrigwasserzeiten in einem 10 x 10 m-Raster tachymetrisch erfaßt. Die damit erstellten topographischen Karten wurden digitalisiert und einer Massenbilanzierung unterzogen. Die Sedimentmengen innerhalb des Bühnenfeldes wurden für 10 cm mächtige Schichten von NN -1.1 m bis NN +0.5 m berechnet und sind in der Tabelle 21 aufgeführt. Die Spundwände der Bühnen und des Deckwerks sind bei der Massenermittlung als Begrenzung in die Berechnung eingeflossen.

Während der Untersuchung waren im Bühnenfeld D1-E1 ca. 6500 m³ Sand oberhalb NN -1.1 m vorhanden, wovon zur Zeit der ersten Aufnahme aufgrund der niedrigen Strandhöhen nur ca. 62 m³ oberhalb NN lagen. Während der ersten Tide vom 19. auf den 20.7.88 sind leichte Zunahmen der Sedimentmengen zu verzeichnen. In den beiden darauffolgenden Tiden sind demgegenüber verstärkt Sedimente aus dem Bühnenfeld heraustransportiert worden.

Interessant ist, daß der deutlich stärkere Seegang während der ersten Tide anscheinend weniger Sediment umgelagert hat als jener der folgenden beiden Tiden. Die stärksten Strandhöhenabnahmen traten an den Flanken der Bühnen D1 und insbesondere E1 auf. Der mittlere Strandabschnitt im Bühnenfeld war hingegen nur von geringen Strandhöhenabnahmen betroffen.

Die Farbsandkörper, die an der Niedrigwasserlinie in den Beprobungsprofilen A, C und E (Abb. 102) eingebaut waren, ließen eine quantitative Erfassung der erodierten und sedimentierten Sedimentmächtigkeiten zu (Tab. 20).

Profil	2. Tide (20.7.88)		3. Tide (20.-21.7.88)	
	Erosion	Sedimentation	Erosion	Sedimentation
A	2.8 cm	3.8 cm	4.7 cm	3.7 cm
C	0.5 cm	2.0 cm	4.6 cm	3.3 cm
E	3.8 cm	1.3 cm	-----	-----

Tab. 20: Erodierete und sedimentierte Sedimentmächtigkeiten im Bühnenfeld D1-E1

Anhand der Ergebnisse aus den Farbsandversuchen ist zu erkennen, daß die Sedimentumlagerungen im tieferen Teil des nassen Strandes beträchtlich gewesen sein müssen. Die erodierten Sedimentmengen sind dabei an gleicher Stelle in etwa auch wieder sedimentiert worden, so daß bei einer reinen tachymetrischen Strandvermessung der Eindruck entsteht, daß eine Sedimentumlagerung nur in geringem Maße stattgefunden hat.

Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, die aus tachymetrischen Aufnahmen gewonnenen Massenbilanzierungen nicht für kurzfristige Umlagerungsvorgänge, sondern nur für langfristige morphologische Untersuchungen zu verwenden. Zur Erfassung der kurzfristigen Transport- und Umlagerungsprozesse sind dagegen Farbsandversuche viel besser geeignet und gestatten tiefergreifende Interpretationen des Geschehens.

Höhe m NN	19.7.	20.7.(1)	20.7.(2)	21.7.
-1.1 - -1.0	1078.78	+ 0.47	- 0.66	- 9.92
-1.0 - -0.9	1004.09	+ 5.01	- 4.52	-12.44
-0.9 - -0.8	925.96	+ 5.03	-11.84	-13.24
-0.8 - -0.7	842.71	+ 2.76	-12.80	-14.10
-0.7 - -0.6	756.00	- 0.22	- 9.50	-14.52
-0.6 - -0.5	663.49	- 0.43	- 9.51	- 8.50
-0.5 - -0.4	554.56	- 0.89	- 6.90	- 7.83
-0.4 - -0.3	394.45	+ 6.13	-31.63	+ 9.35
-0.3 - -0.2	207.62	+ 8.56	-26.77	+ 4.53
-0.2 - -0.1	97.19	- 0.03	+ 3.85	-17.29
-0.1 - 0.0	58.75	- 2.66	+ 2.89	-11.99
0.0 - 0.1	35.12	- 3.63	- 0.53	- 3.52
0.1 - 0.2	18.39	- 2.45	- 0.79	- 0.07
0.2 - 0.3	6.81	+ 0.20	+ 0.07	- 0.23
0.3 - 0.4	1.78	+ 0.37	+ 0.72	- 0.18
0.4 - 0.5	0.26	+ 0.11	+ 0.56	- 0.15
Erosion/Sedim		+ 18.36	-107.36	-100.10
Gesamt D1-E1	6645.96	6664.35	6557.12	6456.97

+ = Sedimentation - = Erosion

Tab. 21: Massenbilanzierung im Bühnenfeld D1-E1 vom 19.7.-21.7.1988

8.4.5. Modellhafte Beschreibung der Umlagerungsvorgänge

Die Sedimentumlagerungen während der 2. Tide müssen sich im wesentlichen in folgender Weise abgespielt haben:

Ausgehend von der Verteilung der Sedimente im Bühnenfeld während Niedrigwassers, wurden mit dem Ansteigen des Wasserspiegels die feineren und gut sortierten Sedimente aus dem tieferen Teil des nassen Strandes auf diesen hochgearbeitet und dabei deckenartig über den gröberen Sedimenten abgelagert. Bei der Entnahme der Sedimente während Mittel- und Hochwassers wurden sowohl Teile der anstehenden als auch der transgredierten Sedimentschichten erfaßt. Die Sedimentkennwerte dieses "bimodalen Sediments" sind ein Produkt der unterschiedlichen Kornzusammensetzung der zwei Ausgangssedimente, nämlich der des anstehenden und der des hochgearbeiteten Sediments.

Mit fallender Tide wird das hochgearbeitete Sediment wieder strandnormal zur See hin verfrachtet und lagert sich im ursprünglichen Sedimentationsraum wieder ab. Dadurch steht das ehemals überlagerte Sediment in den höheren Strandbereichen wieder oberflächlich an, wodurch eine dem vorherigen Niedrigwasser ähnliche Sedimentverteilung vorliegt.

Gestützt werden diese Überlegungen durch die starke Übereinstimmung der Verteilungen während Niedrigwasser, durch die Änderungen der Sedimentcharakteristik über eine Tide sowie durch die Ergebnisse der Farbsandversuche, nach denen die erodierten Sedimentmengen ungefähr den resedimentierten entsprechen.

Jedoch läßt sich dieses Modell nicht mit den gemessenen Strömungsrosen in Einklang bringen, nach denen über eine Tide ständig der seewärts gerichtete (offshore) gegenüber dem landwärts gerichteten (onshore) Transport dominiert.

9. Sedimentdynamik im Norderneyer Seegebiet

9.1. Vorbemerkungen

Der Sedimenttransport im Ebbdeltabereich eines Seegats ist schon lange ein Objekt der Küstenforschung, insbesondere im Hinblick auf den Insel- und Küstenschutz. Schon frühzeitig wurde die Bedeutung dieser Transportvorgänge für die Sandversorgung der Ostfriesischen Inselstrände erkannt und daher zur Beurteilung der Entwicklung der Strand- und Dünenbereiche näher untersucht.

Die ersten Versuche zur Beschreibung der Transportvorgänge in den Seegaten wurden von KRÜGER (1911) durch Kartenvergleich und Naturbeobachtungen vorgenommen. Dabei verwandte er zur Charakterisierung dieser Prozesse den Begriff Platenwanderung, der auch in die spätere Literatur übernommen und häufig verwandt wurde. KRÜGER (1911) umschreibt mit dem Begriff Platenwanderung nicht ein gleichzeitiges Verschieben der gesamten Plate, sondern war sich der sukzessiven Umlagerung des Sandes einer Plate bewußt. "Bei Wangeroog und vermutlich auch bei den

anderen Inseln gestaltet sich die Wanderung der Riffe folgendermaßen. Im Norden der Inseln wird von der Barre des Seegatts durch die Wellen ein in Richtung WSW nach ONO liegendes Riff herangedrückt, indem die Wellen den Sand von der Nordwestseite des Riffs wegnehmen und an der Südostseite fallen lassen, wodurch das langgestreckte Riff auf der Nordwestseite einen flachen Anstieg, auf der Südostseite einen steilen Abfall erhält" (KRÜGER 1911: S. 461). Dieses Kenntnis der Umlagerungsprozesse wird wohl auch für die anderen Bearbeiter zutreffen (GAYE & WALTER 1933, 1935, HOMEIER & KRAMER 1957, LUCK & WITTE 1974, LUCK 1976, NUMMEDAL & PENLAND 1981), die den Begriff "Platenwanderung" zur Beschreibung der Transportvorgänge in Seegaten benutzen. Die Platenwanderung sollte nach den o.g. Autoren vom östlichen Ende einer Insel entlang des Riffbogens bis zur nächsten, östlich gelegenen Insel in Form eines Riffbogenlängstransportes erfolgen.

In jüngster Zeit wurde dieses Sedimenttransportmodell in den Seegaten als zu einfach und zu ungenau erachtet (HANISCH 1981, EHLERS 1984, 1988). Als Kritikpunkte dieses Modells sehen sie zum einen den Begriff Platenwanderung an, da die Platen nicht als Ganzes wandern, und zum anderen den Riffbogenlängstransport als dominierende Transportform. Ihrer Meinung nach überwiegt nämlich der Riffbogenquertransport deutlich gegenüber dem -längstransport, der nur ein Resultat des ständig alternierenden Quertransports sei. HANISCH (1981) spricht in diesem Zusammenhang vom "Zig-Zag-Transport".

Die Dominanz des Riffbogenquertransportes ist den früheren Bearbeitern bekannt gewesen (DECHEND & RICHTER 1953). Es ist jedoch anzumerken, daß es sich bei diesen Autoren um Küsteningenieure handelt, deren Aufgabe der Inselschutz war. Für den Inselschutz ist jedoch einzig und allein die langfristige morphologische Entwicklung der Strände und Randdünen wichtig, die natürlich stark von der Sedimentzufuhr über den Riffbogen geprägt wird.

Im Rahmen dieser Aufgabe war daher nur von Interesse, in welchem Umfang und mit welcher Geschwindigkeit die Strände der Inseln über den Riffbogen mit Sand versorgt wurden. Daher war der Riffbogenquertransport gegenüber dem -längstransport, obschon ersterer in deutlich stärkerem Maße wirksam war, nur von untergeordnetem Interesse und wurde demnach auch nicht als dominierende Größe beim Sedimenttransport über den Riffbogen herausgestellt.

9.2. Beschreibung des Sedimenttransports

Die Sedimentumlagerungen im Bereich des Norderneyer Seegatts waren schon häufiger Gegenstand der Küstenforschung. In diesem Zusammenhang sind die Arbeiten von KRAUSE (1950), DECHEND & RICHTER (1953), AKKERMANN (1956), HOMEIER & KRAMER (1957), NUMMEDAL & PENLAND (1981) zu nennen. Dabei wurden die unterschiedlichsten Verfahren und Untersuchungsmethoden zur Erfassung der Transportvorgänge angewandt.

Krause (1950) analysierte die Schillanteile im Sediment und konnte durch die Klassifikation der gefundenen Schalen in Watt- und Seefauna Rückschlüsse auf die Transportwege ziehen. DECHEND & RICHTER (1953) hingegen benutzten die Kornverteilungen und Farben der Sedimente sowie Schwebstoffmessungen zur Klärung dieser Frage. AKKERMANN (1956) und HOMEIER & KRAMER (1957) wandten wiederum andere Untersuchungsverfahren an. Ersterer untersuchte den Ätzgrad der Granate sowie die Erz- und Granatgehalte der Sedimente des Seegebets und insbesondere der Dünenbereiche Norderneys, während die beiden letztgenannten Autoren topographische

Vermessungen des Seegatbereichs zur Grundlage ihrer Erforschung der Umlagerungsvorgänge machten. LUCK & WITTE (1974) benutzten Luftbildaufnahmen zur Erfassung der morphologischen Vorgänge im Bereich der ostfriesischen Riffbögen. NUMMEDAL & PENLAND (1981) hingegen führten zur Klärung der Transportprozesse kleinräumige Tracerversuche mit Luminophorensanden aus.

Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen decken sich in weiten Teilen mit denen, die in dieser Arbeit dargestellt sind. Es konnten jedoch weitere Erkenntnisse - insbesondere in Bezug auf den Küstenlängstransport und Küstenquertransport gewonnen werden. Die Unterschiede in den Auffassungen über das Transportgeschehen beruhen zum einen auf den großen, morphologischen Umgestaltungen des Seegatbereichs und zum anderen auf ein zu enges Spektrum an Untersuchungsmethoden.

Für die Bewertung der Transportvorgänge in dieser Untersuchung haben sich die Kornverteilungen, die Sedimentkennwerte d_{50} , Median, Sortierung und Schiefe, der Karbonatgehalt sowie die Schwermineralanalysen als sehr nützlich erwiesen.

Die Parameter Kurtosis und Ungleichförmigkeitszahl waren für diese Aufgabe wenig geeignet bzw. ließen sich durch andere, besser deutbare Kennwerte ersetzen.

Die Kornformuntersuchungen nach WINKELMOLEN (1969) erbrachten ebenfalls einige Hinweise. Die Aussagefähigkeit dieses Analyseverfahrens könnte durch Beseitigung der messtechnisch bedingten Abweichungen wahrscheinlich deutlich erhöht werden. Dies wäre durch den Einbau einer Edelstahltrommel anstelle der mit einem Latexfarbaufrag versehenen Messingtrommel möglich. Dadurch wären ebenfalls statische Aufladungen während der Messung zu verhindern. Die Oberflächenrauigkeit, die WINKELMOLEN (1969) durch den Farbaufrag erreicht hat, könnte durch einen zylinderparallelen Anschliff der Innenseite der Edelstahltrommel erzielt werden. Diese Gerätekonfiguration hätte gegenüber der von WINKELMOLEN (1969) den Vorteil, daß aufgrund der Materialhärte der Trommel ein Feinschliff der Oberflächenrauigkeit vermieden werden könnte und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse auch über längere Analysenzelträume gegeben wäre.

Aus der Vielzahl der Untersuchungsergebnisse lassen sich die Transportvorgänge und Transportwege des Sandes im Norderneyer Seegebiet in folgender Weise beschreiben (Abb. 114):

Die am stärksten wirksamen Transportwege sind durch die Rinnen des Kalfamergats, des Busetiefs, des Riffgats, des Schluchters und des Norderneyer Seegats vorgegeben. In diesen Rinnen dominiert der ca. alle 6 Stunden alternierende Tidestrom als Transportmedium, wobei aufgrund der relativ gleichmäßigen Strömung der rollende und springende Transport überwiegt. Aufgrund der hohen Stromgeschwindigkeiten können alle auftretenden Korngrößen transportiert werden.

In den flacheren Bereichen des Seegats und am Strand tritt verstärkt der welleninduzierte Sedimenttransport auf. Die Richtung hängt dabei von der Richtung des einschwingenden Seegangs ab und kann daher stark variieren.

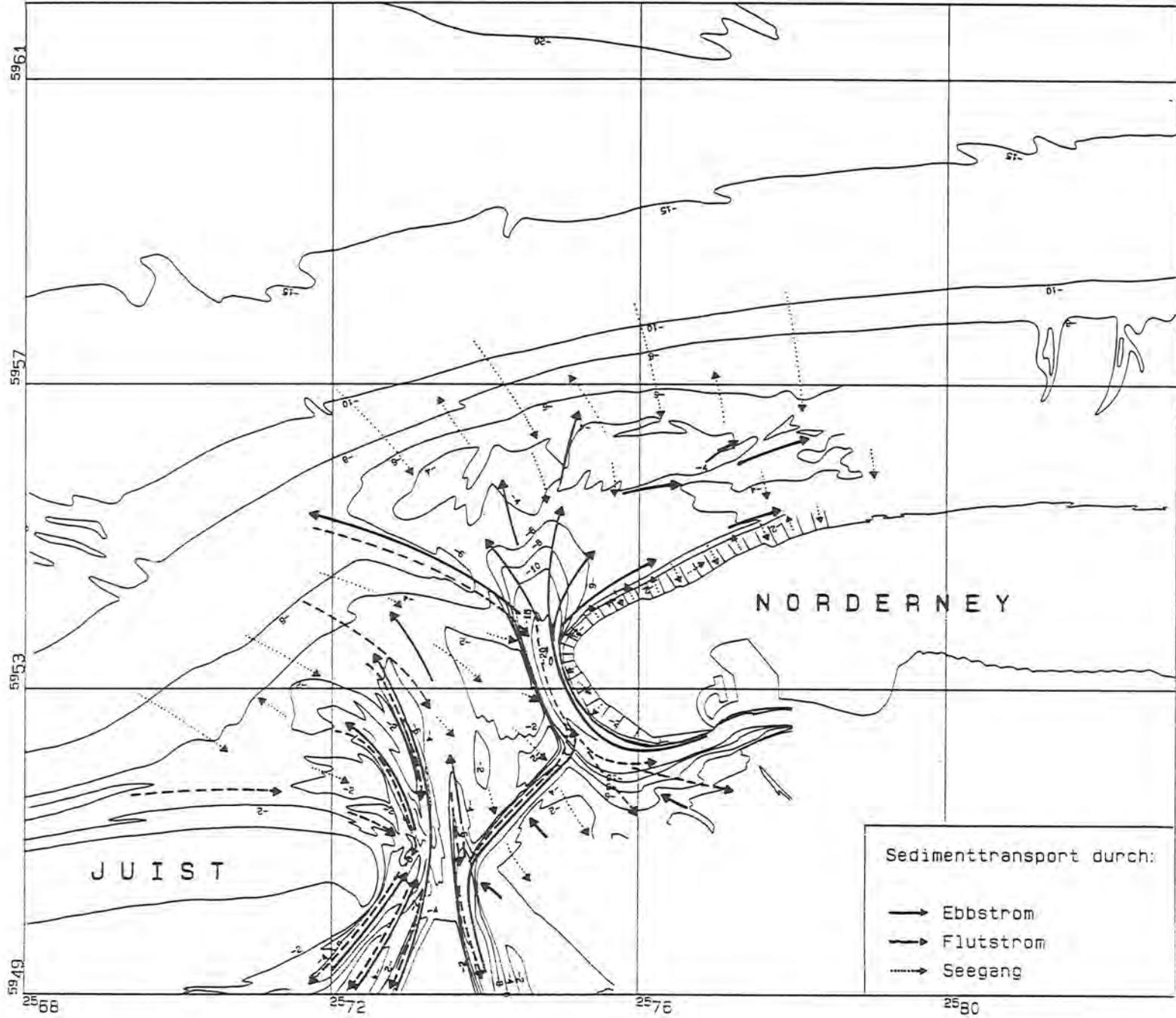


Abb. 114: Sedimentdynamik im Untersuchungsgebiet

Aufgrund der vorherrschenden westlichen Winde und der von West nach Ost laufenden Tidewelle ist der Sedimenttransport vor den Inseln hauptsächlich nach Osten gerichtet (LUCK 1976, HANISCH 1981).

Im Bereich des Kalfamergats akkumulieren sich die herantransportierten Sande im Bereich des hydrodynamischen Gleichgewichts zwischen den Flutströmungen und dem einschwingenden Seegang auf der einen Seite und den Ebbströmungen auf der anderen Seite. Da diese wirksamen Kräfte durch die stark variiierenden Wetterbedingungen und die ständig wechselnden astronomischen Konstellationen hervorgerufen werden, weisen sie große Änderungen in der Stärke und der Richtung auf. Die topographischen Änderungen in diesem Bereich, die natürlich an Sedimentumlagerungen geknüpft sind, sind ein Ausdruck des Versuchs zur Herstellung eines Gleichgewichts zwischen aktiven (Seegangs- und Tideströmungen) und passiven Kräften (Sandakkumulation in Form von Platen).

Die ermittelten Sedimentkennwerte lassen den Schluß zu, daß die Sedimente, die nördlich von Juist in östlicher Richtung transportiert werden, im Bereich des Kalfamergats durch die alternierenden Strömungen resultierend in eine nordöstliche Richtung bis zum Schluchter bewegt werden. Dies zeigt sich durch die gute Übereinstimmung aller Kennwerte der Sedimente dieses Riffbogenabschnitts. Durch den Schluchter, der genau senkrecht zur resultierenden Transportrichtung verläuft und durch gleichgerichtete starke Tideströmungen geprägt ist, wird dieser Transportweg unterbrochen. Zum Ausdruck kommt dies durch die völlig unterschiedlich zusammengesetzten Sedimente nördlich des Schluchters. Der Großteil der herangeführten Sedimente wird wohl durch die Brandungs- und Flutströme in Richtung der Robbenplate transportiert werden. Der andere Teil gelangt in die tieferen Bereiche des Schluchters und wird je nach Tidephase mit dem Ebbstrom nach Nordwesten oder mit dem Flutstrom in Richtung Norderneyer Seegat verfrachtet.

Der Sedimenttransport in Richtung der Robbenplate konnte der Schwermineralverteilungen im Frühjahr 1988 nachgewiesen werden. Daß aber hier auch mit dem Ebbstrom entgegengesetzt wirksame Sedimenttransporte vorkommen, ließ sich durch die Sedimentverteilungen in der Vertiefung des Busetlefs zwischen der Hohen Plate und der Robbenplate belegen. Diese alternierenden Transportrichtungen können im Sinne des "Zig-Zag-Transport" nach HANISCH (1981) verstanden werden. Die Sedimente, die auf die Robbenplate gelangen, werden dort durch die häufig starke Brandung in die Rinne des Seegats und des Busetlefs transportiert. Von dort aus gelangen sie durch die in den Rinnen dominierenden Ebbströmungen zum größeren Teil in den Inselvorstrandbereich von Norderney. Der Rest wird mit dem Flutstrom tiefer in das Wattgebiet transportiert.

Nordwestlich des Westkopfs von Norderney fächert sich die Rinne des Seegats auf, wodurch die Stromgeschwindigkeiten herabgesetzt werden und sich die gröberen Sedimente absetzen können. Dies kommt auch deutlich in den Sedimentverteilungskarten durch die groben Sedimente im Auffächerungsbereich und am Inneren Riffbogen südlich der Nordwestgründe und der Nordergründe heraus. Die feineren Sedimentanteile werden noch weiter nach Norden bzw. nach Osten transportiert und sedimentieren bei weiter abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten. Wo sich die feineren Sedimente letztendlich absetzen können, hängt natürlich auch in erheblichem Maße von der Stärke des einschwingenden Seegangs ab, der am Riffbogen einen Großteil seiner Energie durch Brandung verliert (NIEMEYER 1986).

Zwischen dem Küstenvorfeld und dem Riffbogen besteht ein Sedimenttausch, der durch seegangsinduzierte Transportprozesse hervorgerufen wird. Bei ruhigen Wetterlagen mit schwächer

ausgeprägtem Seegang werden die Platen durch Sedimentzufuhr aus den tieferen Bereichen erhöht, wie dies auch an den Stränden der Inseln erfolgt und sich dort durch den Wechsel von dissipativen über Intermediären zu reflektiven Strandprofilen (Abb. 115) kenntlich macht (SHORT 1979, WRIGHT et al. 1982, FLEMMING & FRICKE 1983, SHORT & WRIGHT 1983, SHORT 1985, Wright et al. 1985, FLEMMING 1987). Bei stärkerem Seegang kann der seewärtige Sedimenttransport überwiegen und die Platen verstärkt erodieren. Dieser Sedimentaustausch zwischen dem Riffbogen und dem vorgelagerten Vorstrand bzw. Küstenvorfeld konnte gut durch die Sedimentverteilungen belegt werden. Durch diese ständigen Umlagerungen - insbesondere bedingt durch die aus westlichen Richtungen einlaufenden Wellen und die dadurch erzeugten östlich gerichteten Brandungsströmungen - ergibt sich ein resultierender Sedimenttransport nach Osten in Richtung auf den Platananlandungsbereich am Nordstrand von Norderney. Dieser ostgerichtete Transport konnte durch die Schwermineralanalysen der Riffbogensedimente belegt werden, die eine ähnliche Verteilung aufweisen wie sie schon VEENSTRA & WINKELMOLEN (1976) für den Riffbogen zwischen Ameland und Schiermonnikoog belegt haben.

Der Strand am Westkopf Norderneys unterliegt aufgrund seiner exponierten Lage gegenüber dem einschwingendem Seegang überwiegend starken Erosionsprozessen, die große Strandhöhenabnahmen bewirken. Dieser Entwicklung wird durch Strandauffüllungen, die alle vier bis zehn Jahre ausgeführt werden, entgegengewirkt. Wie die Untersuchungen von NIEMEYER (1987) gezeigt haben, lassen sich die Erosionsvorgänge allein auf Seegangseinflüsse zurückführen, da die Tideströmungen am Nordweststrand nur sehr schwach ausgeprägt sind.

Die durch den Seegang induzierten Strömungen bewirken sowohl einen strandnormalen als auch strandparallelen Sedimenttransport, wovon ersterer eindeutig dominiert. Dies ersten Auswertungen der im Naturmessprogramm des Forschungsvorhabens gewonnenen hydrographischen Daten (NIEMEYER 1990) belegen dies durch eine deutliche Dominanz der strandnormal gerichteten Stromvektoren gegenüber den strandparallel gerichteten. Weiterhin lassen sich für die strandnormal gerichteten Strömungen bei unterschiedlich starkem Seegang folgende Aussagen machen. Für stärkeren Seegang deutet sich ein stark dominierender, seewärts gerichteter Sedimenttransport an, während bei geringerem Seegang mit schwach ausgeprägter Brandung ein landwärts gerichteter, strandnormaler Sedimenttransport überwiegt. Die Ergebnisse dieser hydrographischen Messungen konnten auch durch die sedimentologischen Untersuchungen - insbesondere durch die Schwermineral- und Korngrößenanalysen - gestützt werden. Ebenso stützen morphologische Untersuchungen diese Ergebnisse, da nach stärkerer Seegangsbeaufschlagung - z.B. durch Sturmfluten - die Strandsande bevorzugt in den höher gelegenen Bereichen erodiert und in den Vorstrandbereich transportiert werden, wo sie dann sedimentieren. Bei ruhigeren Wetterlagen wird das erodierte Material zum Teil wieder auf den Strand transportiert. Zumeist erfolgt dies in Form von strandparallel ausgerichteten Strandriffen.

Der strandparallel ausgerichtete Sedimenttransport scheint im deckwerksgeschützten Strandbereich weniger stark ausgeprägt zu sein. Dies läßt sich durch die hydrographischen und sedimentologischen Untersuchungen belegen.

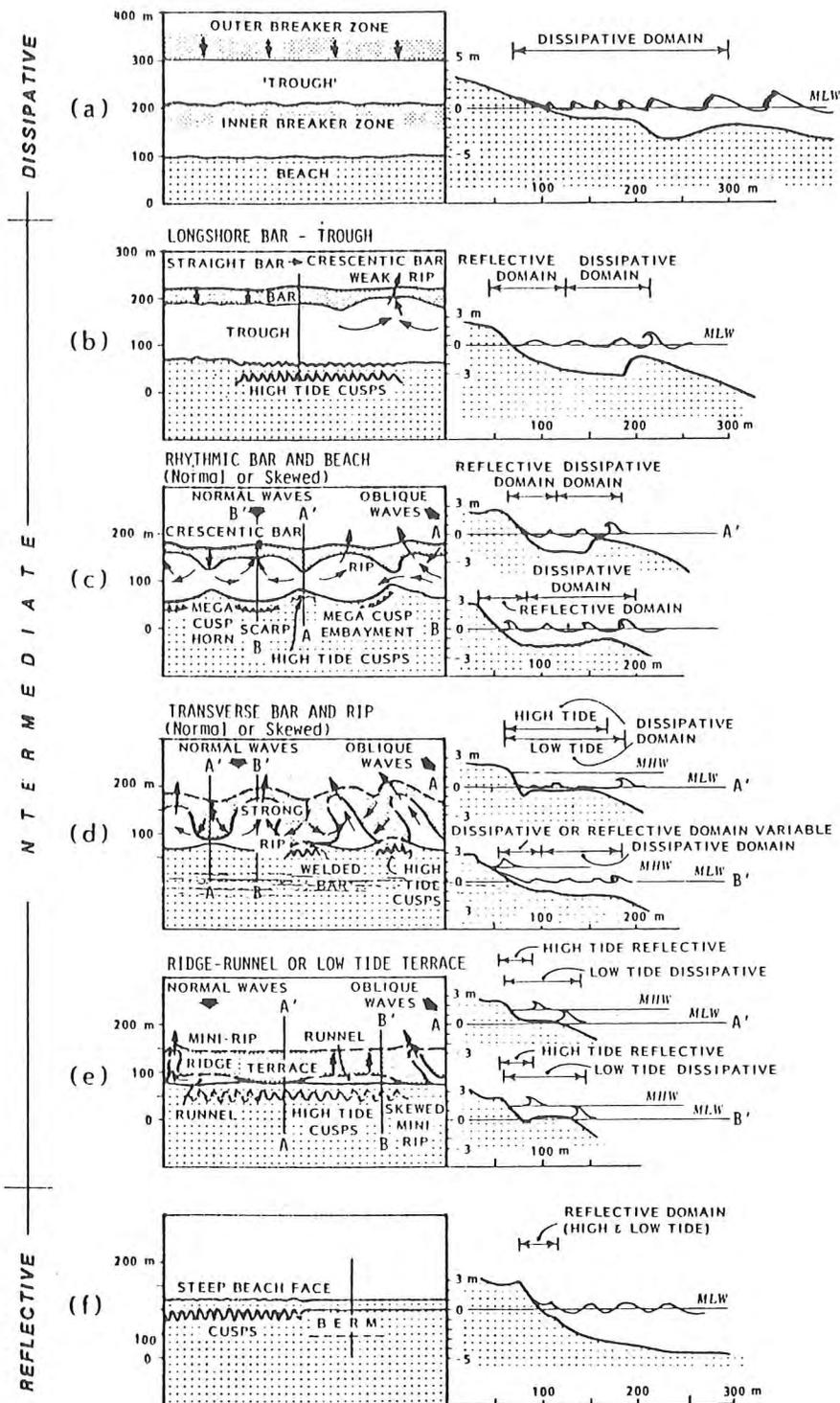


Abb. 115: Morphologische Ausbildung der drei Strand-Typen (dissipativ, intermediär und reflektiv) nach SHORT (1985)

Durch den dominierenden, strandnormalen Sedimenttransport lassen sich die starken morphologischen Veränderungen des Strandes erklären. Die zum Teil beträchtlichen Strandhöhenabnahmen resultieren aus einer erhöhten Seegangsbeaufschlagung des nassen Strandes,

durch die die Strandsedimente in den Vorstrandbereich gelangen. Bei ruhigeren Wetterlagen mit geringem Seegang werden die erodierten Sedimente teilweise wieder auf den Strand hochgearbeitet, so daß sich ähnliche Strandprofile wie vor der Erosion ausbilden. Die Dynamik diese Geschehens ist von SHORT 1979, WRIGHT et al. 1982, FLEMMING & FRICKE 1983, SHORT & WRIGHT 1983, SHORT 1985, Wright et al. 1985, FLEMMING 1987 ausführlich dargestellt worden und kann zum Teil auf die Verhältnisse in Norderney übertragen werden (Abb. 115).

10. Zusammenfassung

Im Küstenvorfeld, auf dem Inselvorstrand, im Seegatbereich sowie am Strand von Norderney sind in den Jahren 1987 bis 1989 umfangreiche sedimentologische Untersuchungen ausgeführt worden. Ziel dieser Arbeiten war es, die Umlagerungsvorgänge der zumelst sandigen Sedimente zu erfassen.

Durch Korngrößenanalytische Untersuchungen, Karbonatgehaltsbestimmungen sowie Schwermetall- und Kornform-Analysen an Norderneyer Strand- und Vorstrandsedimenten konnte ein detailliertes Bild der Sedimenttransportvorgänge in diesem Bereich erarbeitet und die Aussagefähigkeit der ermittelten Sedimentparameter für die Kennzeichnung dieser Prozesse bewertet werden.

Die bisherigen Erkenntnisse über den Transport der Sedimente am Norderneyer Riffbogen konnten vertieft und erweitert werden, dies insbesondere im Hinblick auf die Frage der Bedeutung des Riffbogenlängstransports gegenüber dem -quertransport. Diese Frage war in jüngster Zeit häufiger Gegenstand der Küstenforschung (HANISCH 1981, EHLERS 1984, 1988).

Ebenso ließen sich die Transportwege der Strandsande, die bei stärkerem Seegang erodierten werden, anhand der ermittelten Sedimentparameter belegen und nachvollziehen. Durch statistische Auswertungen konnte auch die Reaktion der Strandsedimente auf die saisonal bedingten, unterschiedlich starken Seegangsbeaufschlagungen erfaßt werden.

Die kurzfristigen, während einer Tide stattfindenden Umlagerungsprozesse der Sedimente am Strand konnten sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht durch eine kleinräumige Untersuchung in einem Bühnenfeld ermittelt werden. Eine Korrelation dieser Ergebnisse mit einigen gleichzeitig erfaßten Seegangsdaten erbrachte jedoch keine Übereinstimmungen.

11. Literatur

- AKKERMANN, M. (1953): Bericht über die sedimentologischen Untersuchungen zur Frage der Umlagerungen des Sandes.- Jber. 1952, Forschungsstelle Norderney, Bd. 4; Norderney
- AKKERMANN, M. (1956): Die Umlagerungen des Sandes im Seegebiet vor Norderney und auf der Insel.- Jber. 1955, Forschungsstelle Norderney, Bd. 7; Norderney
- ANWAR, J. (1974): Der holozäne Meeressand im Seegebiet westlich von Sylt zwischen Kampen und Rantum.- Meynlana, Bd. 24, S. 43-55
- ASHLEY, G. M. (1978): Interpretations of polymodal sediments.- J. Geol., 86, p. 411-422
- BAAK, J. A. (1936): Regional petrology of the southern North Sea.- Proefschrift, 127 S.; Wageningen
- BAGNOLD, R.A. & BARNDORFF-NIELSEN, O. (1980): The pattern of natural size distribution.- Sedimentology, 27, p. 199-207
- BARCKHAUSEN, J. (1969): Entstehung und Entwicklung der Insel Langeoog. Beitrag zur Quartärgeologie und -paläogeographie eines ostfriesischen Küstenabschnittes.- Oldenbg. Jb., 68, S. 239-281; Oldenburg
- BEAL, M. A. & SHEPARD, F. P. (1956): A use of roundness to determine depositional environments.- J. Sed. Petrol., vol. 26, no. 1, p. 49-60
- BEHRE, K.E., MENKE, B. & STREIF, H. (1979): The Quaternary geological development of the German part of the North Sea.- Acta Univ. Ups. Symp. Univ. Ann. Quing. Cel.: 2, p. 85-113; Uppsala
- BOENIGK, W. (1983): Schwermineralanalyse.- Enke-Verlag, 158 S., 77 Abb., 4 Taf., 8 Tab.; Stuttgart
- BOWEN, A. J. & INMAN, D. L. (1969): Ripp currents II - Laboratory and field investigations.- J. Geophys. Res., 74
- BRAND, G. (1955): Sedimentpetrographische Untersuchungen zum Erkennen der Sandwanderungsvorgänge am Strand, im Flachwasser und dem daran anschließenden Seegebiet.- Meynlana, Bd. 4, S. 84-111
- BRAND, G. (1956): Riffsanduntersuchungen als Beitrag zu den Fragen der Riffentstehung und der Wasserbewegung innerhalb der Brandungszone.- Meynlana, Bd. 5, S. 87-91
- BRYANT E. (1986): Sample site variation in settling velocity distribution subpopulations using curve dissection analysis.- Sedimentology, 33, p. 767-775
- BULLER, A.T. & McMANUS, J. (1972): Simple metric sedimentary statistics used to recognize different environments.- Sedimentology, 18, p. 1-21
- CLEMENS, K. E. (1987): Along-coast variations of Oregon beach-sand compositions produced by the mixing of sediments from multiple sources under a transgressing sea.- Unpubl. Master's Thesis, Oregon State Univ., 75 p.; Corvallis
- CLEMENS, K. E. & KOMAR, P. D. (1988): Oregon beach-sand compositions produced by the mixing of sediments under a transgressing sea.- J. Sed. Petrol., vol. 58, p. 519-529
- CLEMENS, K. E. & KOMAR, P. D. (1989): Tracers of sand movement on the Oregon Coast.- Proc. 21. Coast. Eng. Conf., vol. 2, p. 1339-1351; Malaga, Spain

- DECHEND, W. (1950): Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sandumlagerungen im Watt Nordfrieslands.- Deut. Hydrog. Z., Bd. 3, H. 5/6, S. 294-303
- DECHEND, W. (1951): Eustatische und tektonische Einflüsse im Quartär der südlichen Nordseeküste.- Geol. Jb., Bd. 68, S. 501-516
- DECHEND, W. (1952): Die erdgeschichtliche Entwicklung im Raum um Norderney.- Jber. 1951, Forschungsstelle Norderney, Bd. 3; Norderney
- DECHEND, W. (1954): Eustatische und tektonische Einflüsse im Quartär der südlichen Nordseeküste.- Geol. Jb., Bd. 68, S. 501-516
- DECHEND, W. & RICHTER, K. (1953): Geologische Untersuchungen zur Frage der Materialumlagerungen im Norderneyer Seegat.- Arbeiten aus der Forschungsstelle Norderney, Nr. 1, unveröff.; Norderney
- DEUTSCHES HYDROGRAPHISCHES INSTITUT (1981): Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht.- DHI, Karte Nr. 2900, Begleitheft, 13 S.; Hamburg
- DOEGLAS, D. J. (1946): Interpretation of the results of mechanical analyses.- J. Sed. Petrol., v. 16, p. 19-40
- DOEGLAS, D. J. (1968): Grain-size indices, classification and environment.- Sedimentology, 10, p. 83-100
- DUANE, D. B. (1964): Significance of skewness in recent sediments, Western Pamlico Sound, North Carolina.- J. Sed. Petrol., vol. 34, no. 4, p. 864-874
- EDELMAN, C. H. (1933): Petrologische Provincies in het Nederlandsche Kwartair.- Amsterdam
- EHLERS, J. (1988): Morphodynamics of the wadden sea.- 397 S., 393 Abb., 40 Taf.; Rotterdam (Balkema)
- EHRlich, R. & WEINBERG, B. (1970): An exact method for characterization of grain shape.- J. Sed. Petrol., v. 40, p. 205-212
- ERCHINGER, H. F. (1986): Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog.- Die Küste, H. 43
- FAIRBRIDGE, R. W. (1961): Eustatic changes in sea level.- Phys. Chem. Earth, 4, p. 99-185, London
- FLEMMING, B. W. (1987): Strandmorphodynamik: Ein quantitativer Ansatz zu Aufklärung von Ursache/Wirkungsprozessen an klastischen Küsten.- 54. Tag. NWDG Norderney, Kurzfassungen der Vorträge, S. 12-14; Norderney
- FLEMMING, B. W. & FRICKE, A. H. (1983): Beach and nearshore habitats as a function of internal geometry, primary sedimentary structures and grain size.- Junk Publ., The Hague, p. 115-132
- FOLK, R. L. (1966): A review of grain-size parameters.- Sedimentology, 6, p. 73-93
- FOLK, R. L. (1974): Petrology of sedimentary rocks.- Hemphill Publ. Co.; Austin, Texas
- FOLK, R. L. & WARD, W. C. (1957): Brazos river bar, a study in the significance of grain-size parameters.- J. Sed. Petrol., vol. 27, p. 3-27

- FORSCHUNGSSTELLE FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ (1970): Reisefibel.- 2. Aufl., 149 S., Nieders. Wasserwirtschaftsverwaltung; Norderney
- FRANKENBURG, A. C. & EHRLICH, R. (1989): Dredge disposal monitoring by fourier shape analysis.- In: STAUBLE, K. D. (ed.): Barrier Islands: Process and management.- ASCE, p.285-295; New York
- FRIEDMAN, G. M. (1961): Distinction between dune, beach and river sands from their textural characteristics.- J. Sed. Petrol., vol. 31, p. 517-529
- FRIEDMAN, G. M. (1967): Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands.- J. Sed. Petrol., vol. 37, no. 2, p. 327-354
- GAYE, J. & WALTHER, F. (1933): Untersuchung der Sandwanderung vor den Ostfriesischen Inseln.- Bericht Wasserbauamt Norden, unveröff.; Norderney
- GAYE, J. & WALTHER, F. (1935): Die Wanderung der Sandriffe vor den Ostfriesischen Inseln.- Die Bautechnik, Bd. 13, S. 555-567
- GERHARDY, H. (1979): Die hydrogeologischen Verhältnisse auf der Insel Norderney.- H. u. K., 31, S. 78-83
- GERHARDY, H., HOFFMANN, A., MEYER, H. H. & WICHMANN, M. (1976): Wasserhaushalt der Ostfriesischen Inseln - Geologische und hydrologische Datenbestandsaufnahme für die Insel Norderney.- Archiv SFB 79 TU Hannover, Tech. Ber., 9: 30 S., unveröff.; Hannover
- GEYH, M. A. (1969): Versuch einer chronologischen Gliederung des marinen Holozäns an der Nordseeküste mit Hilfe der statistischen Auswertung von ^{14}C -Daten.- Z. dt. geol. Ges., 118, S. 351-360; Hannover
- GRACE, J. T., GROTHAUS, B. T. & EHRLICH, R. (1978): Size frequency distributions taken from within sand laminae.- J. Sed. Petrol., vol. 48, p. 1193-1202
- GRIPP, K. (1944): Entstehung und künftige Entwicklung der Deutschen Bucht.- Arch. dt. Seewarte, 63; Hamburg
- GROHNE, U. (1957): Zur Entwicklungsgeschichte des ostfriesischen Küstengebietes auf Grund botanischer Untersuchungen.- Probleme Küstenforsch., 6, S. 1-48; Hildesheim
- HAILS, J. R. & HOYT, J. H. (1969): The significance and limitations of statistical parameters for distinguishing ancient and modern sedimentary environments of the lower Georgia coastal plain.- J. Sed. Petrol., vol. 39, no. 2, p. 559-580
- HANISCH, J. (1981): Sand transport in the tidal inlet between Wangerooge and Spiekeroog (W. Germany).- Spec. Publ. Int. Ass. Sediment., 5, p. 175-185
- HEYBROCK, P., HAANSTRA, U. & ERDMAN, D. A. (1967): Observations on the geology of the North Sea area.- 7th. World Petr. Congr., vol. 2, p. 905-916; Leiden
- HINTZ, R. A. (1956): Methodisch-sedimentpetrologische Untersuchungen in der Strander Bucht.- Meyniana, Bd. 5, S. 93-102
- HOMEIER, H. (1964): Beiheft zu: Niedersächsische Küste, Historische Karte 1:50000 Nr. 5.- Forschungsstelle Norderney, Historisches Kartenwerk, Nr. 5, S. 1-28; Norderney
- HOMEIER H. & KRAMER, J. (1957): Verlagerung der Platen im Riffbogen vor Norderney und ihre Anlandung an den Strand.- Jber. 1956, Forschungsstelle Norderney, Bd. 8; Norderney

- HOUGH, J. L. (1940): Sediments of Buzzards Bay, Massachusetts.- J. Sed. Petrol., vol. 10, no. 1, p. 19-32
- INMAN, D. L. (1949): Sorting of sediments in the light of fluid mechanics.- J. Sed. Petrol., vol. 19, no. 2, p. 51-70
- INMAN, D. L. (1952): Measures for describing the size distribution of sediments.- J. Sed. Petrol., vol. 22, p. 125-145
- INMAN, D. L. (1953): Areal and seasonal variations in beach and nearshore sediments at La Jolla, California.- Beach Erosions Board, TM-No. 39
- INMAN, D. L. & CHAMBERLAIN, T. K. (1955): Particle-size distribution in nearshore sediments.- S. E. P. M. Spec. Bull. No. 3, p. 106-127
- ISPHORDING, W. C. (1972): Analysis of variance applied to measures of central tendency and dispersion in sediments.- J. Sed. Petrol., 42, no. 1, p. 107-121
- JELGERSMA, S. (1961): Holocene sea level changes in the Netherlands.- Med. geol. Sticht, C-VI-7; Maastrich
- JOHNSON, J. W. & EAGLESON, P. S. (1966): Coastal processes.- In IPPEN, A. T. (ed): Estuary and coastline hydrodynamics, Mac Graw-Hill
- KACHHOLZ, K. D. (1982): Statistische Bearbeitung von Probandaten aus Vorstrandbereichen sandiger Brandungsküsten mit verschiedener Intensität der Energieumwandlung.- Diss. Univ. Kiel, 381 S.; Kiel
- KIRCHNER, H. (1974): Die Sedimentverteilung des strandnahen Seebereiches vor Westerland/Sylt.- Meynlana, Bd. 24, S. 57-62
- KIRCHNER, H. (1978): Sedimentparameter der Riffzone vor Westerland/Sylt und die Verteilung einer künstlichen Sandbühne.- Meynlana, Bd. 30, S. 7-28
- KOCH, M. & NIEMEYER, H. D. (1978): Sturmfluten-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats.- Jber. 1977, Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 29; Norderney
- KOLDIJK, W. S. (1968): On environment-sensitive grain-size parameters.- Sedimentology, 10, p. 57-69
- KOMAR, P. D. (1989): Environmental controls on littoral sand transport.- Proc. 21. Coast. Eng. Conf., vol. 2, p. 1239-1252; Mallaga, Spain
- KOMAR, P. D. & WANG, C. (1984): Processes of selective grain transport and the formation of placers on beaches.- J. Geol., vol. 92, p. 637-655
- KÖRITZ, D. (1955): Quantitative Untersuchung der Wasservertriftung über das Julster Watt.- Jber. 1954, Forschungsstelle Norderney, Bd. 6; Norderney
- KÖSTER, R. (1960): Junge Isostatische und eustatische Bewegungen im südlichen und westlichen Ostseeraum.- N. Jb. Geol. Paläont. Min., S. 70-75; Stuttgart
- KRAMER, J. (1958a): Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52.- Jber. 1957, Forschungsstelle Norderney, Bd. 9; Norderney

- KRAMER, J. (1958b): Die Strandaufspülung Norderney 1951/52 und ein Plan zu ihrer Fortführung.- Die Küste, H. 7
- KRAMER, J. (1973): Stranderhaltung durch künstliche Sandzufuhr an der deutschen Nordseeküste.- Die Küste, H. 24
- KRAMER, J. & BARDELMEIER, E. (1954): Wasservertriftung über das Julster Watt.- Jber. 1953, Forschungsstelle Norderney, Bd. 5; Norderney
- KRAMER, J., LUCK, G. & MÜLLER, C. D. (1963): Stellungnahme zur versuchswisen Stranderhöhung durch Kies am Westkopf von Norderney.- Jber. 1962, Forschungsstelle Norderney, Bd. 14; Norderney
- KRAUSE, H. R. (1950): Bericht über die Ergebnisse der Schilluntersuchungen im See- und Wattgebiet von Norderney und Julst.- Bericht Forschungsstelle Norderney; Norderney, unveröff.
- KRÜGER, W. (1911): Meer und Küste bei Wangeroog und die Kräfte, die auf ihre Gestaltung einwirken.- Zelt. f. Bauwesen, 56: S. 451-464, S. 584-610
- KRUMBEIN, W. C. (1938): Local areal variation of beach sands.- Bull. Geol. Soc. Amer., vol. 40, p. 653-658
- KUENEN, PH. H. (1964): Pivotability studies of sand by a shape-sorter.- Dev. in Sediment., 1, Deltaic and shallow marine depos., Elsevier, p. 207-215
- LIEBIG, W. & RAGUTZKI, G. (1987): Rechnergestützte Klassifizierung von Wattsedimenten.- Jber. 1986, Forschungsstelle Küste, Bd. 38; Norderney
- LONGUET-HIGGINS, M. S. (1972): Longshore currents.- In MEYER, R. E. (ed.): Waves on beaches and resulting sediment transport, Academic Press
- LUCK, G. (1970): Die zweite Strandaufspülung am Weststrand von Norderney.- Jber. 1968, Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 20; Norderney
- LUCK, G. (1972): Wie "die Sieben" wurden, was sie sind.- Merian, H. 3
- LUCK, G. (1975): Der Einfluß der Schutzwerke der Ostfriesischen Inseln auf die morphologischen Vorgänge im Bereich der Seegaten und ihrer Einzugsgebiete.- Mittl. Leichtweiss Inst., H. 47, S. 1-81; Braunschweig
- LUCK, G. (1976): Protection of the littoral and seabed against erosion - Fallstudie Norderney.- Jber. 1975, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Bd. 27; Norderney
- LUCK, G. & WITTE, H. H. (1974): Erfassung morphologischer Vorgänge der ostfriesischen Riffbögen in Luftbildern.- Jber. 1973, Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 25; Norderney
- LÜDERS, K. (1953): Die Entstehung der ostfriesischen Inseln und der Einfluß der Dünenbildung auf den geologischen Aufbau der ostfriesischen Küste.- Probl. d. Küstenforsch. im südl. Nordseegebiet, Bd. 5, S. 5-14
- LÜDERS, K. (1956): Was ist eine Sturmflut?.- Wasser und Boden, 8. Jg., H. 1
- LÜDERS, K. (1975): "Sturmflut" - Begriffserläuterung und Einteilung in Höhenstufen.- Jber. 1974, Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 26; Norderney
- LÜDERS, K. & LUCK, G. (1976): Kleines Küstenlexikon - Natur und Technik an der deutschen Nordseeküste.- 3. Aufl., 240 S., 315 Abb., 2 Taf.; Hildesheim (Lax)

- LUDWIG, G. & FIGGE, K. (1979): Schwermineralvorkommen und Sandverteilung in der Deutschen Bucht.- Geol. Jb., Reihe D, H. 32, S. 23-68; Hannover
- LUKASCHECK, T. (1989): Teil 1: Zusammensetzung und Sedimentationsverlauf der Quartärablagerungen im Wattenmeer von Norderney mit einer sedimentologischen Kartenaufnahme des Meeresbodens, Teil 2: Sedimentationsversuche zum Einfluß von Bühnenbauwerken auf die Schillakkumulation am Westkopf der Insel Norderney.- Dipl. Kart. und Dipl. Arb., Univ. Münster, unveröff.; Münster
- LÜTTIG, G. (1974): Seifenlagerstätten an der niedersächsischen Küste.- Glückauf, 110, Nr. 5, S. 169-171
- MARTINS, L. R. (1965): Significance of skewness and kurtosis in environmental interpretation.- J. Geol., vol. 73, p. 768-770
- MASON, C. C. & FOLK, R. L. (1958): Differentiation of beach, dune, and aeolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas.- J. Sed. Petrol., vol. 28, no. 2, p. 211-226
- MAZZULLO, J., EHRLICH, R. & HEMMING, M. A. (1984): Provenance and areal distribution of Late Pleistocene and Holocene quartz sand on the southern New England continental shelf.- J. Sed. Petrol., vol. 54, p. 1335-1348
- McANDREW, J. (1957): Calibration of a Frantz Isodynamic Separator and its application to mineral separation.- Proc. Aus. I.M.M., no. 181
- McCAMMON, R. B. (1962): Efficiencies of percentile measures for describing the mean size and sorting of sedimentary particles.- J. Geol., 70, p. 453-465
- McCARTHY, G. R. (1933): The rounding of beach sands.- Amer. Jour. Sci., vol. 225, p. 205-224
- McCULLOCH, D., MOSER, F. & BRIGGS, L. (1960): Hydraulic shape of mineral grains.- Bull. Geol. Soc. Amer., vol. 71
- McINTYRE, D. D. (1959): The hydraulic equivalence and size distributions of some mineral grains from a beach.- J. Geol., 66, p. 278-300
- McMASTER, R. L. (1960): Mineralogy as an indicator of beach sand movement along the Rhode Island shore.- J. Sed. Petrol., vol. 30, no. 3, p. 404-413
- MEISBURGER, E. P. (1989): Cross shore variations in heavy minerals in beaches of the barrier dominated Southeast Atlantic Coast.- Stauble, D. K. (ed.): Barrier Islands: Process and management, p. 93-105; New York
- MENARD, H. W. Jr. (1949): Synthesis of sand mixtures.- J. Sed. Petrol., vol. 19, no. 2, p. 71-77
- MILLER, R. L. & OLSEN, E. C. (1955): The statistical stability of quantitative properties as a functional criterion for the study of environments.- J. Geol., 63/4, p. 376-387
- MOUSSA, M. T. (1977): Phi-mean and phi standard deviation of grain-size distributions in sediments: method of moments.- J. Sed. Petrol., vol. 47, no. 3, p. 1295-1298
- MUIR WODD, A. M. (1969): Coastal Hydraulics.- Mac Millan
- NIEMEYER, H. D. (1974): Wellenerzeugte Strömungen und Sedimenttransport.- Mitt. Franzius-Inst. Univ. Hannover, H. 41, S. 124-257; Hannover

- NIEMEYER, H. D. (1979a): Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste.- Die Küste, H. 34, S. 53-70
- NIEMEYER, H. D. (1979b): Wave climate study in the region of the East Frisian Islands and coast.- Proc. 16th. Int. Conf. Coast. Eng. Hamburg, ASCE; New York
- NIEMEYER, H. D. (1983): Über den Seegang an einer Inselgeschützten Wattküste.- BMFT-Forschungsber. MF 0203
- NIEMEYER, H. D. (1986): Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney.- Jber. 1985, Forschungsstelle Küste, Bd. 37; Norderney
- NIEMEYER, H. D. (1987): Tidestrommessungen in Bühnenfeldern.- Jber. 1986, Forschungsstelle Küste, Bd. 38; Norderney
- NIEMEYER, H. D. (1990): Field measurements and analysis of wave induced nearshore currents.- Abstracts 22th Int. Conf. Coastal Eng; Delft
- NORDSTROM, K. F. (1977): The use of grain-size statistics to distinguish between high- and moderate-energy beach environments.- J. Sed. Petrol., v. 47, no. 3, p. 1287-1294
- NUMMEDAL, D. (1980): Geometry and stratification of selected modern tidal sand bodies.- In: Hobday, D. K. (ed.): Middle eocene coastal plains and nearshore deposits of East Texas.- Soc. Econ. Paleont. Mineralogists, p. 86-93
- NUMMEDAL, D. & FISCHER, I. A. (1978): Process-response models for depositional shorelines: The German and the Georgia Bights.- Proc. 16th Coast. Eng. Conf. ASCE, p. 1215-1231; Hamburg
- NUMMEDAL, D. & PENLAND, S. (1981): Sediment dispersal in Norderneyer Seegat, West Germany.- Spec. Publ. Int. Ass. Sedimentology, 5: p. 187-210; Oxford
- OELE, E. (1969): The quaternary geology of the Dutch part of the North Sea, north of the Frisian Isles.- Geol. en Mijnb., 48, 467-479; s'Gravenhage
- OERTEL, G. F. (1975): Ebb-tidal deltas of Georgia estuaries.- In: Estuarine Research, Academic Press, p. 267-276; New York
- OERTEL, G. F. (1977): Geomorphic cycles in ebb deltas and related pattern of shore erosion and accretion.- J. Sed. Petrol., vol. 47, p. 1121-1131
- OTTO, G. H. (1939): A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analyses of sediments.- J. Sed. Petrol., vol. 9, p. 62-76
- PÄTZOLD, U. (1982): Bilanz und Verformung aufgespülter Strände.- Jber. 1980, Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 32; Norderney
- PETTIJOHN, F. J. & LUNDAHL, A. C. (1943): Shape and roundness of Lake Erie beach sands.- J. Sed. Petrol., vol. 13, no. 2, p. 69-78
- POMERANCBUM, M. (1966): The distribution of heavy minerals and their hydraulic equivalence in sediments of the Mediterranean continental shelf of Israel.- J. Sed. Petrol., vol. 36, no. 1, p. 162-174
- RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. (1987a): Erster Zwischenbericht zu den sedimentologischen Untersuchungen des Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und mariner Umwelt".- Bericht Forschungsstelle Küste, unveröff.; Norderney

- RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. (1987b): Zweiter Zwischenbericht zu den sedimentologischen Untersuchungen des Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und mariner Umwelt".- Bericht Forschungsstelle Küste, unveröff.; Norderney
- RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. (1988): Dritter Zwischenbericht zu den sedimentologischen Untersuchungen des Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und mariner Umwelt".- Bericht Forschungsstelle Küste, unveröff.; Norderney
- RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. (1990): Vierter Zwischenbericht zu den sedimentologischen Untersuchungen des Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und mariner Umwelt".- Bericht Forschungsstelle Küste, unveröff.; Norderney
- REINECK, H. E. (1979): Sandversatzzone im Vorstrand von Norderney.- In: Deutsche Forschungsgemeinschaft (ed.): Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick, S. 293-298
- REINHARDT, W. (1958): Zum Bodenaufbau des Quartärs, besonders des Holozäns, der ostfriesischen Küste von Juist bis Langeoog.- Jber. 1957, Forschungsstelle Norderney, Bd. 9; Norderney
- RICHTER, W. (1939): Zur Methodik der Schwermineralanalyse von sandigen Sedimenten.- Zbl. Min. Geol. Paläont., Abt. A, S. 70-80; Stuttgart
- RITTENHOUSE, G. (1943): Transportation and deposition of heavy minerals.- Bull. Geol. Soc. Amer., 54: p. 1725-1780; New York
- SAHU, B. K. (1964): Significance of the size-distribution statistics in the interpretation of depositional environments.- Research Bull. Panjab Univ., vol. 15, parts III-IV, p. 213-219
- SCHAUBERGER, K., THILO, R., KURZAK, G., LINKE, O. & DECHEND, W. (1950): Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordwest-Strand der Insel Norderney und die Beurteilung der zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen.- Jber. 1949, Forschungsstelle Norderney, Bd. 1; Norderney
- SCHRAPS, A. (1966): Schwermineraluntersuchungen an quartären Sanden im Bereich der ostfriesischen Inseln Baltrum, Langeoog, Splekeroog.- Mitt. Geol. Inst. TH Hannover, H. 4, 149 S.
- SCHWARZER, K. (1989): Sedimentdynamik in Sandriffsystemen einer tidefreien Küste unter Berücksichtigung von Rippströmen.- Berichte-Reports, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, Nr. 33, 270 S., 177 Abb.; Kiel
- SEVON, W. D. (1968): First and second degree regression correlation of the size analysis statistical parameters of Trask, Inman, Folk and Ward and Friedman.- J. Sedim. Petrol., vol. 37, p. 238-240
- SHA, L. P. (1990): Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, the Netherlands.- Geologica Ultralectina, no. 64, Univ. Utrecht
- SHEPARD, F. P. & INMAN, D. L. (1951): Nearshore circulation.- Proc. 1. Conf. Coast. Eng., Council on wave research
- SHEPARD, F.P. & YOUNG, R. (1961): Distinguishing between beach and dune sands.- J. Sed. Petrol., vol. 31, p. 196-214
- SHORT, A. D. (1979): Three dimensional Beach-stage model.- J. Geol., vol. 87, p. 553-571
- SHORT, A. D. (1985): Rip-current type, spacing and persistence, Narrabeen Beach, Australia.- Marine Geol., 65, p. 47-71

- SHORT, A. D. & WRIGHT, L. D. (1983): Physical variability of sandy beaches.- Junk Publ., The Hague, p. 133-145
- SIEVER, R. (1989): Sand - Ein Archiv der Erdgeschichte.- 254 S. Spektrum-Bibl., Bd. 22, Spektrum-Verlag; Heidelberg
- SIMON, W. G. (1935): Über die in Sedimenten erhaltene petrographische Abbildung dynamischer Vorgänge.- Z. Deut. Geol. Ges., Bd. 87, H. 4
- SINDOWSKI, K. H. (1956): Korngrößen- und Kornformen-Auslese beim Sandtransport durch Wind (nach Messungen auf Norderney).- Geol. Jb., Bd. 71, S. 517-526
- SINDOWSKI, K. H. (1957): Die geologische Entwicklung des Wattengebietes südlich der Inseln Baltrum und Langeoog.- Jber. 1956, Forschungsstelle Norderney, Bd. 8; Norderney
- SINDOWSKI, K. H. (1959): Das Eem im Wattgebiet zwischen Norderney und Spiekeroog.- Geol. Jb., 76, S. 151-174; Hannover
- SINDOWSKI, K. H. (1960): Die geologische Entwicklung des ostfriesischen Wattgebietes und der Inseln im Laufe des Quartärs.- Z. deut. geol. Ges., 112/III, S. 527-529; Hannover
- SINDOWSKI, K. H. (1965): Das Eem im ostfriesischen Küstengebiet.- Z. deut. geol. Ges., 115, S. 163-166; Hannover
- SINDOWSKI, K. H. (1973): Das ostfriesische Küstengebiet - Inseln, Watten und Marschen.- Samml. Geol. Führer, 57: 162 S., 56 Abb.; Berlin, Stuttgart (Borntraeger)
- SINDOWSKI, K.-H. & STREIF, H. (1974): Die Geschichte der Nordsee am Ende der letzten Eiszeit und im Holozän.- In: Woldstedt, P. & Duphorn, K.: Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter, Koehler-Verlag, S. 411-431; Stuttgart
- SONU, C. J. (1972): Bimodal composition and cyclic characteristics of beach sediments in continuously changing profiles.- J. Sed. Petrol., vol. 42, no. 4, p. 852-857
- SPÄTH, H. (1978): Cluster-Analyse-Algorithmen zur Objektklassifizierung und Datenreduktion.- R. Oldenbourg-Verlag; München
- SPÄTH, H. (1983): Cluster-Formation und Analyse.- R. Oldenbourg-Verlag; München
- STAPOR, F. W. & TANNER, W. F. (1975): Hydrodynamic implications of beach, beach ridge and dune grain size studies.- J. Sed. Petrol., vol. 45, no. 4, p. 926-931
- STEPHAN, H. J. (1988): Fünf Strandauffüllungen vor Norderney - Ergebnisse morphologischer Untersuchungen.- Bericht Forschungsstelle Küste, unveröff.; Norderney
- STREIF, H. (1971): Stratigraphie und Faziesentwicklung im Küstengebiet von Woltzeten in Ostfriesland.- Beih. geol. Jb., 119: 59 S., 10 Abb., 6 Tab., 2 Taf.; Hannover
- STREIF, H. (1986): Zur Altersstellung und Entwicklung der Ostfriesischen Inseln.- Offa, Bd. 43, S. 29-43; Neumünster
- STREIF, H. J. (1987): Die Entwicklung der Ostfriesischen Inseln, Watten und Marschen als Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg.- 54. Tagung NWD-Geologen 1987, Kurzfassungen der Vorträge, S. 3-5; Norderney

- STREIF, H. (1990): Das ostfriesische Küstengebiet. - Nordsee, Inseln, Watten und Marschen.- Sammlung geologischer Führer, 57, Borntraeger; Berlin
- STREIF, H. & SCHUBERT, T. (1988): Lagerstättenkundliche Auswertung von Bohrungen auf der Robbenplate, Norderneyer Seegat, zur Beurteilung der angetroffenen Sandqualitäten im Hinblick auf eine versuchsorientierte Strandaufspülung auf Norderney.- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, unveröffentl. Bericht; Hannover
- TABAT, W. (1978): Sedimentologische Untersuchungen des Seegrundes westlich von Amrum, Nordsee.- Meyniana, Bd. 30, S. 77-88
- TABAT, W. (1979): Sedimentologische Verteilungsmuster in der Nordsee.- Meyniana, Bd. 31, S. 83-123
- TINIAKOS, L. (1978): Transportdifferenzierung von Korngrößenspektren klastischer Sedimentgesteine aus der Westküste Schleswig-Holsteins.- Diss. Univ. Kiel, unveröffentl.; Kiel
- TRASK, P. D. (1932): Origin and environment of source sediments of petroleum.- 323 p., Houston, Texas
- TRASK, P. D. (1952): Sources of beach sand at Santa Barbara, California, as indicated by mineral grain studies.- Beach Erosion Board Tech. Memo. No. 28, U.S. Army Corps of Eng., 24 p.
- VAN ANDEL, T. H. (1959): Reflections on the interpretation of heavy mineral analyses.- J. Sed. Petrol., vol. 29, no. 2, p. 153-163
- VAN VEEN, J. (1950): Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijwateren.- Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, Tweede Reeks LXXIII: 1-6
- VEENSTRA, H. J. & WINKELMOLEN, A. M. (1976): Size, shape and density around two barrier islands along the north coast of Holland.- Geologie en Mijnbouw, vol. 55 (1-2), p. 87-104; s'Gravenhage
- VISHER, G. S. (1969): Grain size distributions and depositional processes.- J. Sed. Petrol., vol. 39, no. 3, p. 1074-1106
- VON ENGELHARDT, W. (1937): Über die Schwermineralsande der Ostseeküste zwischen Warnemünde und Darsser Ort und ihre Bildung durch die Brandung.- Zeitschr. f. angew. Min., 1, S. 30-59
- WADELL, H. (1933): Sphericity and roundness of rock particles.- J. Geol., vol. 41, p. 310-331
- WALGER, E. (1961): Die Korngrößenverteilung von Einzellagen sandiger Sedimente und ihre genetische Bedeutung.- Geol. Rdsch., Bd. 51, S. 494-507
- WALGER, E. (1966): Untersuchungen zum Vorgang der Transportsonderung von Mineralien am Beispiel von Strandsanden der westlichen Ostsee.- Meyniana, Bd. 16, S. 55-106
- WALGER, E. (1971): PARKOR, Programm zur Berechnung von Korngrößendaten in FORTRAN-IV f. IBM 7090.- Manuskript, Univ. Kiel, unveröffentl.; Kiel
- WALTHER, F. (1969): Überblick über die Untersuchungen des Wasserbauamtes Norden von 1920 bis 1933 über die Veränderungen der Ostfriesischen Inseln und ihre Ursachen.- Jber. 1967, Forschungsstelle Norderney, Bd. 19; Norderney
- WASKOM, J. D. (1958): Roundness as an indicator of environment along the coast of Panhandle Florida.- J. Sed. Petrol., vol. 28, no. 3, p. 351-360

- WEYL, R. (1937): Marine Erz-Granatseifen der schleswig-holsteinischen Küsten und Ihre Regelmäßigkeiten in der Korngrößen- und Mineralverteilung.- Z. Geschiebeforsch., 13, S. 63-76
- WILDEVANG, D. (1936): Der tiefere Untergrund der Ostfriesischen Nordseeinseln.- Veröff. Naturforsch. Ges. Emden, 52 S.; Emden
- WILDEVANG, D. (1938): Die Geologie Ostfrieslands.- Abh. Preuß. Geol. LA., H. 181; Berlin
- WINKELMOLEN, A. M. (1969): The rollability apparatus.- Sedimentology, 13, p. 291-305
- WINKELMOLEN, A. M. (1971): Rollability, a functional shape property of sand grains.- J. Sed. Petrol., vol. 41, no. 3, p. 703-714
- WINKELMOLEN, A. M. & VEENSTRA, H. J. (1974): Size and shape sorting in a Dutch tidal inlet.- Sedimentology, 21, p. 107-126
- WINKELMOLEN, A. M. & VEENSTRA, H. J. (1980): The effect of a storm surge on near-shore sediments in the Ameland-Schiermonnikoog area (N. Netherlands).- Geologie en Mijnbouw, vol. 59 (2), p. 97-111; s'Gravenhage
- WINTON, T. C., CHOU, I. B., POWELL, G. M & CRANE, J. D. (1981): Analysis of coastal sediment transport processes from Wrightsville Beach to Fort Fisher, North Carolina.- CERC, MR-No. 81-6; Fort Belvoir
- WOLDSTEDT, P. & DUPHORN, K (1974): Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter.- Koehler-Verlag; Stuttgart
- WRIGHT, L. D., GUZA, R. T. & SHORT, A. D. (1982): Dynamics of a high-energy dissipative surf zone.- Marine Geology, 45, p. 41-62
- WRIGHT, L. D., MAY, K. S., SHORT, A. D. & GREEN, M. O. (1985): Beach and surf zone equilibria and response times.- Proc. 19th Int. Conf. Coastal Eng, p.2150-2164
- ZIEGLER, K. (1989): Holozäne Entwicklung, Aktuogeologie und Sedimentdynamik des Spiekerooger Rückseitenwattes.- Diplomarbeit, Univ. Clausthal-Zellerfeld, 129 S., unveröff.; Clausthal-Zellerfeld
- ZIEGLER, P. A. (1975a): North Sea basin history in the tectonic framework of North-Western Europe.- In: Woodland, A. W. (Ed.): Petroleum and the continental shelf of North- West Europe, vol. 1, Geology; London
- ZIEGLER, P. A. (1975b): Geologic evolution of the North Sea and its tectonic framework.- Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull., vol. 59, no. 7, p. 1073-1097
- ZIEGLER, P. A. & LOUWERENS, C. J. (1979): Tectonics of the North Sea.- In: Oele, E., Schüttenhelm, R. & Wiggers, A. (Ed.): The quaternary history of the North Sea.-7-22. Acta Univ. Ups., Symp. Ups. Annum Quin. Cel.: 2, p. 7-22; Uppsala
- ZIEGLER, W. H. (1975): Outline of the geological history of the North Sea.- In: Woodland, A. W. (Ed.): Petroleum and continental shelf of North-West Europe, vol. 1, Geology; London
- ZINGG, T. (1935): Beitrag zur Schotteranalyse.- Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. 15, S. 39-141

13. Verzeichnis der Abkürzungen

BSL	= Bühnenstreichlinie
D_e	= Ebbestromdauer
D_f	= Flutstromdauer
H_s	= signifikante Wellenhöhe
HWL	= Hochwasserlinie
MNpThw	= mittleres Nipptidehochwasser
MNpTnw	= mittleres Nipptideniedrigwasser
MThw	= mittleres Tidehochwasser
MTnw	= mittleres Tideniedrigwasser
MSpThw	= mittleres Springtidehochwasser
MSpTnw	= mittleres Springtideniedrigwasser
MWL	= Mittelwasserlinie
NN	= Normalnull
NWL	= Niedrigwasserlinie
TH_s	= signifikante Wellenperiode
TSt	= trockener Strand
V_{em}	= mittlere Ebbestromgeschwindigkeit einer Tide
V_{fm}	= mittlere Flutstromgeschwindigkeit einer Tide
V_{emax}	= maximale Ebbestromgeschwindigkeit einer Tide
V_{fmax}	= maximale Flutstromgeschwindigkeit einer Tide
$\int v_e dt$	= Ebbestromintegral
$\int v_f dt$	= Flutstromintegral

14. Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen:

- Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes
- Abb. 2: Luftbildaufnahme des Norderneyer Seegats vom 23.5.1989
- Abb. 3: Entwicklung der Küste, des Wattes und der Inseln zwischen Osterems und Wichter Ee
- Abb. 4: Morphologische Querschnitte im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste
- Abb. 5: Ausbildung von Ebbstrom-orientierten Deltas in Abhängigkeit von den relativen Stärken der verschiedenen Strömungen
- Abb. 6: Lageplan des Deckwerks und der Bühnen auf Norderney
- Abb. 7: Übersicht über die Lage der morphologischen Großformen im Untersuchungsgebiet
- Abb. 8: Geologischer Schnitt durch Norderney

- Abb. 9: Isolinien-Plan der Holozän-Basis
- Abb. 10: Schematischer Schnitt von der Nordsee bis zum Geestrand
- Abb. 11: Geologische Profile durch Juist und Norderney
- Abb. 12: Kurven des relativen Meeresspiegel-Anstieges im Holozän
- Abb. 13: Schnitt durch das Küstenholozän unter dem ostfriesischen Watt
- Abb. 14: Gezeltengrundwerte des Pegels Norderney
- Abb. 15: Strömungsverlauf und Wasserstände im Norderneyer Seegat
- Abb. 16: Strömungsverlauf und Wasserstände im Kalfamergat
- Abb. 17: Lageplan der Tidestrommessungen
- Abb. 18: Tidestromrosen im Seegat und Küstenvorfeld
- Abb. 19: Mittlere Tidestromvektoren am Norderneyer Westkopf im Verlauf einer Tide
- Abb. 20: Sektor der für die Seegangsentwicklung bedeutendsten Windrichtungen
- Abb. 21: Ablauf des Wellenangriffs auf die Küste und seine Folgeerscheinungen
- Abb. 22: Beugung der Wellenkämme vom Tiefwasser zum Ufer
- Abb. 23: Resultierende vertikale Geschwindigkeitsverteilung beim wellenerzeugten Massentransport
- Abb. 24: Refraktion des Seegangs im Untersuchungsgebiet bei MThw und westlichen Winden
- Abb. 25: Wetter- und Wasserstandsentwicklung 1987
- Abb. 26: Wetter- und Wasserstandsentwicklung 1988
- Abb. 27: Wetter- und Wasserstandsentwicklung 1989
- Abb. 28: Lageplan der Beprobungsprofile am Strand
- Abb. 29: Lageplan der Greiferproben im März 1987
- Abb. 30: Lageplan der Greiferproben im April 1987
- Abb. 31: Lageplan der Greiferproben im Herbst 1987
- Abb. 32: Lageplan der Greiferproben im Frühjahr 1988
- Abb. 33: Lageplan der Greiferproben im September 1988
- Abb. 34: Lageplan der Greiferproben im Oktober 1988
- Abb. 35: Lageplan der Greiferproben im Frühjahr 1989
- Abb. 36: FRANTZ-Schwermineralseparator
- Abb. 37: Während der Schwermineralseparation auf ein Mineralkorn einwirkende Kräfte
- Abb. 38: Rollsorter
- Abb. 39: Verhältnis der So-Werte nach FOLK & WARD zu den So-Werten nach OTTO, INMAN
- Abb. 40: Kornverteilungen der Beprobungsserie 03/87
- Abb. 41: Kornverteilungen der Beprobungsserie 04/87
- Abb. 42: Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/87
- Abb. 43: Kornverteilungen der Beprobungsserie 04/88
- Abb. 44: Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/88
- Abb. 45: Kornverteilungen der Beprobungsserie 10/88
- Abb. 46: Kornverteilungen der Beprobungsserie 03/89
- Abb. 47: Kornverteilungen der Beprobungsserie 03/87
- Abb. 48: Kornverteilungen der Beprobungsserie 04/87
- Abb. 49: Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/87
- Abb. 50: Kornverteilungen der Beprobungsserie 04/88
- Abb. 51: Kornverteilungen der Beprobungsserie 09/88

- Abb. 52: Kornverteilungen der Beprobungsserie 10/88
- Abb. 53: Kornverteilungen der Beprobungsserie 03/89
- Abb. 54: Wahrscheinlichkeitskurve eines Strandsandes und Zuordnung der Transportarten zu den einzelnen Teilpopulationen des Sedimentes
- Abb. 55: Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Strandsanden der Beprobungsserie 09/87
- Abb. 56: Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Greiferproben der Beprobungsserie 09/87
- Abb. 57: Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Strandsanden der Beprobungsserie 04/88
- Abb. 58: Wahrscheinlichkeitsdiagramme von Greiferproben der Beprobungsserie 04/88
- Abb. 59: Darstellung der Kurtosis gegen die Schiefe der Beprobungsserien 09/87 und 04/88
- Abb. 60: Verteilung der d₅₀-Werte im Herbst 1987
- Abb. 61: Verteilung der d₅₀-Werte im Frühjahr 1988
- Abb. 62: Verteilung der Sortierungswerte (INMAN 1952) im Herbst 1987
- Abb. 63: Verteilung der Sortierungswerte (INMAN 1952) im Frühjahr 1988
- Abb. 64: Verteilung der Schiefe-Werte im Herbst 1987
- Abb. 65: Verteilung der Schiefe-Werte im Frühjahr 1988
- Abb. 66: Verteilung der Karbonatgehalte im Herbst 1987
- Abb. 67: Verteilung der Karbonatgehalte im Frühjahr 1988
- Abb. 68: Minimum-, Maximum- und arithmetische Mittel der d₅₀-Werte in ausgewählten Bühnenfeldern Norderneys
- Abb. 69: Verteilung der mittleren Korndurchmesser, der Sortierungswerte und der Karbonatgehalte im Herbst 1987 am Norderneyer Strand und Vorstrand
- Abb. 70: Kornformsortierung in einem Fluß mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit
- Abb. 71: Absolute Rolligkeitwerte von Sand, Schillbruch und einem 50:50 Gemisch (Fraktion 1.0 - 0.5 phi)
- Abb. 72: Arithmetisches Mittel und Schwankungsbereich der absoluten Rolligkeitwerte jeder Siebfraktion im Untersuchungsgebiet (Probenserie 04/88)
- Abb. 73: Die verschiedenen Shape Distribution Character-Typen nach WINKELMOLEN (1969)
- Abb. 74: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 09/87
- Abb. 75: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 04/88
- Abb. 76: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 09/88
- Abb. 77: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 10/88
- Abb. 78: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 09/87
- Abb. 79: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 04/88
- Abb. 80: S.D.C.-Diagramme der Probenserie 09/88
- Abb. 81: Schwermineralprovinzen der Nordsee nach BAAK (1936)
- Abb. 82: Prozentuale Gehalte und Verteilung der drei abgetrennten Schwermineralfraktionen in den einzelnen Siebfraktionen der Probe N09N
- Abb. 83: Zuordnung der analysierten Schwermineralgehalte der Beprobungsserie 09/87 zu den Klassenmitteln der Schwermineral-Clusteranalyse
- Abb. 84: Zuordnung der analysierten Schwermineralgehalte der Beprobungsserie 04/88 zu den Klassenmitteln der Schwermineral-Clusteranalyse
- Abb. 85: Schwermineralgehalte und Anteile der Schwermineralfraktionen I-III im Frühjahr 1988
- Abb. 86: Schwermineralgehalte der Siebfraktion 0.106-0.125 mm im Herbst 1987

- Abb. 87: Schwermineralgehalte der Siebfraction 0.106-0.125 mm im Frühjahr 1988
- Abb. 88: Verteilung der Schwermineralanteile von Sedimenten des äußeren Riffbogens im Herbst 1987
- Abb. 89: Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Frühjahr 1987
- Abb. 90: Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Herbst 1987
- Abb. 91: Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Frühjahr 1988
- Abb. 92: Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im September 1988
- Abb. 93: Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Oktober 1988
- Abb. 94: Verteilung der Schwermineraltypen nach Tabelle 15 im Frühjahr 1989
- Abb. 96: Schwermineralverteilung am Norderneyer Strand und Vorstrand im April 1987
- Abb. 97: Schwermineralverteilung am Norderneyer Strand und Vorstrand im Herbst 1987
- Abb. 98: Schwermineralverteilung am Norderneyer Strand und Vorstrand im Frühjahr 1988
- Abb. 99: Schwermineralverteilung am Norderneyer Strand und Vorstrand im Herbst 1988
- Abb. 100: Schwermineralverteilung am Norderneyer Strand und Vorstrand im Frühjahr 1989
- Abb. 101: Schwermineralgehalte und Anteile der Schwermineralfraktionen I-III am Nordweststrand Norderneys im Herbst 1987 und Frühjahr 1988
- Abb. 102: Lageplan der Sedimententnahmepunkte
- Abb. 103: Topographie des Bühnenfelds D1-E1 am 20.07.88
- Abb. 104: Verteilung der Median-Werte im Bühnenfeld D1-E1 im Sept. 1987
- Abb. 105: Zeitliche Änderungen der Medianwerte im Profil C
- Abb. 106: Verteilung der Median-Werte während der 3 Tiden
- Abb. 107: Verteilung der Karbonatgehalte während der 3 Tiden
- Abb. 108: Verteilung der Sortierungswerte während der 3 Tiden
- Abb. 109: Verteilung der Schiefewerte während der 3 Tiden
- Abb. 110: Verteilung der Schwermineralgehalte während der 3 Tiden
- Abb. 111: Blick auf das Bühnenfeld D1-E1 während des Hochwassers am 20.7.88
- Abb. 112: Stromstärkerose vom 19.7.88 (Mittelwasser auflaufend); dargestellt ist der Anteil der Stromgeschwindigkeiten (5 Klassenintervalle) in 22.5 °-Sektoren während einer 10-minütigen Messung
- Abb. 113: Stromstärkerose vom 20.7.88 (Mittelwasser, ablaufend); dargestellt ist der Anteil der Stromgeschwindigkeiten (5 Klassenintervalle) in 22.5 °-Sektoren während einer 10-minütigen Messung
- Abb. 114: Sedimentdynamik im Untersuchungsgebiet
- Abb. 115: Morphologische Ausbildung der drei Strand-Typen (dissipativ, intermediär und reflektiv) nach SHORT (1985)

Tabellen:

- Tab. 1: Stratigraphische Gliederung des ostfriesischen Pleistozäns
- Tab. 2: Profil der Bohrungen B27a und B29
- Tab. 3: Lithostratigraphische Gliederung des ostfriesischen Küstenholozäns
- Tab. 4: Strömungskennwerte des Norderneyer Seegats und des Kalfamergats
- Tab. 5: Entnahmezellräume der verschiedenen Beprobungsserien
- Tab. 6: Maschenweite der Analysensiebe
- Tab. 7: Magnetisches Verhalten der Schwerminerale im Frantz-Magnetscheider
- Tab. 8: Statistik der d₅₀-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)
- Tab. 9: Statistik der Median-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)
- Tab. 10: Statistik der So-Werte nach INMAN am Norderneyer Strand (Profil 1-34)
- Tab. 11: Statistik der Schiefe-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)
- Tab. 12: Statistik der Kurtosis-Werte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)
- Tab. 13: Statistik der Karbonatgehalte am Norderneyer Strand (Profil 1-34)
- Tab. 14: Statistik der absoluten Rolligkeitswerte jeder analysierten Kornfraktion der Beprobungsserie 04/88
- Tab. 15: Klassifizierung der Sedimente anhand der Schwerminerale in die Typen A, B, C
- Tab. 16: Arithmetische Mittel der Schwermineralanteile und -gehalte (%) der Norderneyer Strand- und Vorstrandsedimente
- Tab. 17: Mittlere Höhenlagen der Sedimententnahmepunkte während der Untersuchung
- Tab. 18: Winddaten der Wetterstation Norderney im Juli 1988
- Tab. 19: Signifikante Wellenhöhe (H_s) und signifikante Wellenperiode (T_{H_s}) während des Beprobungszeitraums im Bühnenfeld D1-E1
- Tab. 20: Eroderte und sedimentierte Sedimentmächtigkeiten im Bühnenfeld D1-E1
- Tab. 21: Massenbilanzierung im Bühnenfeld D1-E1 vom 19.7.-21.7.1988

Lebenslauf

- Geboren:** 28. Januar 1960 in Gronau/Westf.
- Familienstand:** Verheiratet seit dem 30. November 1989 mit Andrea Westhoff, geb. Thelle
- Abitur:** 1978 am Missionsgymnasium St. Antonius Bardel in Bentheim 2
- Studium:** WS 1978 am Geologisch-Paläontologischen Institut der Ruhr-Universität Bochum; SS 1979 bis SS 1984 am Geologisch-Paläontologischen Institut der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
- Diplom:** April 1985
- Beruf:** Mai 1985 bis Mai 1986 Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie (Prof. K. Poll). Seit Juni 1986 wissenschaftlicher Angestellter bei der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamts für Wasser und Abfall