

# Suspensionsgehalte in Flachwassergebieten

## Messungen im Watt von Scharhörn

Von Hans Peter D ü c k e r

### Z u s a m m e n f a s s u n g

Messungen des Suspensionsgehaltes in der Natur liegen bisher nur in sehr geringem Umfang vor. Da aber gerade die hiermit verbundenen Fragen der morphologischen Veränderung für den im Küstengewässer planenden und bauenden Ingenieur von großer Bedeutung sind, ist bei den Untersuchungen im Gebiet Neuwerk/Scharhörn ein Meßprogramm zur Bestimmung des Suspensionsgehaltes bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen durchgeführt worden. Ziel dieses Programms ist es gewesen, neben den von CHRISTIANSEN (1974) im Elbestrom angegebenen Zusammenhängen auch Aussagen für die Vorgänge auf dem hohen Watt zu treffen.

Da aufgrund von Naturbeobachtungen immer wieder auf den mit zunehmendem Windeinfluß stark ansteigenden Suspensionsgehalt hingewiesen worden ist (z. B. GÖHREN und LAUCHT, 1972 u. 1979; WOHLBERG, 1954), ist das Meßprogramm unter besonderer Berücksichtigung der auf dem Watt in Abhängigkeit von der Seegangscharakteristik (SIEFERT, 1973) unterschiedlichen Wellenverhältnisse durchgeführt worden. Hierfür sind im Bereich des brandungsbeaufschlagten Randwattes (Standort (S)) und des brandungsfreien Wattes (Standort (SB)) die Suspensionskonzentration (C) und die Parameter Windgeschwindigkeit (V), Windrichtung (R), Strömungsgeschwindigkeit (u), Wellenhöhe um Hochwasser (H) und Wassertemperatur (T) gemessen worden.

Das Datenmaterial ist nach Windeinflußrichtungen (Windsektoren), durch die auch die Unterschiede in den morphologischen und Tide-Randbedingungen erfaßt werden, gegliedert. Das Meßmaterial des für die morphologischen Veränderungen maßgebenden auflandigen Windsektors (SW-N) ist detailliert aufbereitet worden zu Suspensionsganglinien über eine Tide für unterschiedliche Windstärken und Wellenhöhen sowie zu mittleren Suspensionsgehalten während einer Tide in Abhängigkeit von den Parametern Windgeschwindigkeit, Wellenhöhe und Stromweg. Aufgrund der Streuung der Einzelmesswerte hat sich eine am Einzelwert orientierte Aufbereitung als nicht sinnvoll erwiesen. Deshalb sind sowohl die Ganglinien als Mittelwert aus mehreren Messungen als auch die über eine Tide integrierten Suspensionskonzentrationen den Untersuchungen zugrundegelegt worden. Zur Feststellung des Einflusses des Seegangs sind anhand der von SIEFERT (1973) angegebenen Beziehungen Grundberührung bzw. Brechen des Seegangs unterschieden und die für die Aufwirbelung in Suspension maßgebende Schergeschwindigkeit (35 cm über Sohle) aus Überlagerung der mittleren Tideströmung mit der aus der mittleren Wellenhöhe um Hochwasser abgeleiteten Orbitalgeschwindigkeit gebildet worden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschn. 5.3 zusammengefaßt. Als wesentlichste sollen nachstehende angeführt werden:

- Brandungsbeaufschlagte Wattens sind wesentliches Entstehungsgebiet von Suspensionen, die dann mittels der Tide- und Triftströmung versetzt werden.
- In Wattgebieten mit ausgedehnter Brandung geht bei auflandigen Winden ab etwa 6 Bft mit einsetzendem Brechen des Seegangs, bedingt durch die erhöhten Turbulenzen und den Luftein-schlag, der bis dahin lineare Konzentrationsanstieg mit der Windstärke in einen überproportionalen Anstieg über. Zur gleichen Zeit kommt es auf den brandungsfreien Wattens durch den ab 6 Bft stark ansteigenden Triftstrom ebenfalls zu diesem Übergang.
- Für den auflandigen Windsektor kann die Zunahme der Suspensionskonzentration mit der Windgeschwindigkeit, bezogen auf den Konzentrationswert (4 °C) bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten (> 6 Bft), für die untersuchten Wattgebiete mit unterschiedlicher Seegangscharakteristik durch den gleichen Ansatz in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit ( $\bar{V}_T$ ) während einer Tide beschrieben werden. Der Konzentrationsanstieg erfolgt bis zum Einsetzen der Brandung bzw. mittleren Windgeschwindigkeiten  $\bar{V}_T = 11,5$  m/s linear und dann überproportional mit der dritten Potenz von  $\bar{V}_T$ .
- Die Maximalwerte der Konzentration sind wesentlich von der Größe der strömungsbedingten Einzugsgebiete und der dort maßgebenden Seegangsverhältnisse abhängig. Sie ergeben sich, bezogen auf 4 °C (DILLO, 1960) und ein Bezugsniveau von 0,35 m über der Sohle, zu: max. 500 mg/l (S) und max. 1200 mg/l (SB).

- Der anhand der gemessenen Suspensionskonzentrationen für das untersuchte Wattgebiet ermittelte Suspensionstransport als Trockenmasse beträgt für den auflandigen Windsektor bei mittleren Tideverhältnissen:
- |                      |      |                            |
|----------------------|------|----------------------------|
| (10 °C)              | (S)  | ca. 225 t/Tide nach SW     |
|                      | (SB) | ca. 75 t/Tide nach SW      |
| Sturmtiden (20 m/s): | (S)  | ca. 42 000 t/Tide nach O   |
| (4 °C)               | (SB) | ca. 63 000 t/Tide nach O   |
| über einem Jahr:     | (S)  | ca. 530 000 t/p. a. nach O |
|                      | (SB) | ca. 750 000 t/p. a. nach O |

Allgemein zeigen die Ergebnisse, daß für genauere Suspensionsgehaltsuntersuchungen in Tidegebieten für befriedigende Aussagen großräumige Betrachtungsweisen wesentlich in ihrer Bedeutung und lokale Messungen in diesen Zusammenhang einzuordnen sind. Dieser Gesichtspunkt ist insbesondere bei der Übertragung von im Labor ermittelten Ergebnissen auf die Natur zu beachten, da hierbei die Umgebungseinflüsse meist nur unzureichend erfaßt sind.

Für die praktische Nutzenanwendung ist gezeigt worden, daß die erzielten Ergebnisse im Rahmen von großräumig angelegten EDV-Programmen Anwendung finden und damit bei einer großräumigen Meßanordnung behilflich sein können.

### Summary

To date there exist only a very limited number of field measurements of sediment concentrations in suspension. Obviously, however, the related questions of morphological changes in the coastal environment are of significant importance to engineers engaged in planning and construction in these areas. For this reason the studies in the region Newwerk/Scharhörn included a program of measurements to determine the sediment concentration for various weather conditions. The goal of this program was to augment the conclusions derived by CHRISTIANSEN (1974) for the river Elbe to enable prediction of behavior in the upper portions of the „Watt“, as the tidal shoals along west coast of Germany are known.

Previous authors (e.g. GÖHREN and LAUCHT, 1972 and 1979 and WOHLBERG, 1954) have observed and reported a significant dependence between wind strength and increased sediment concentrations. As a result, the program of measurements was designed to take into special consideration the different wave types in the "Watt" region associated with salient characteristics of sea motion (SIEFERT, 1973). For an exposed location at the edge of the "Watt" subjected to surf action (point (S)) and a sheltered surf-free location (point (SB)) the sediment concentration (C) was measured as a function of the wind velocity (V), wind direction (R), current (u), wave height at high tide (H) and water temperature (T).

To take into account morphological and tidal boundary conditions, the data are organized with respect to the wind-influence direction (wind sector). The wind sector (SW-N), corresponding to land-directed wind, is of predominant importance for morphological changes. The measured data in this direction are processed in detail to yield time histories of sediment concentration during a single tide for various wind strengths and wave heights. Furthermore, the average sediment concentration during a tidal period is computed in relationship to the parameters wind velocity, wave height and length of flow. Because of scatter it is difficult to draw significant conclusions from single measurements. As a result, the study is based on statistically averaged time histories and sediment concentrations integrated over a tidal period. In order to determine the influence of sea motion, the criteria proposed by SIEFERT (1973), namely "bed contact" and "breaking", are employed. The critical velocity for sediment uptake (35 cm above the sea bed) is computed as the sum of the average tidal current and the orbital velocity associated with the average wave height at high tide. The principal conclusions are listed below:

- "Watt" areas subjected to surf action are the principal sources for suspensions, which are subsequently transported by tidal and drift currents.
- In "Watt" areas subjected to surf action, waves begin to break when the wind velocity toward land exceeds about 6 Bft. This results in higher turbulence and air entrainment. The relationship between sediment concentration and wind speed, which is approximately linear for lower velocities, becomes strongly non-linear. The same effect is also observed in sheltered, surf-free regions of the "Watt" and is caused by the rapid increase in drift current for winds in excess of 6 Bft.

- Regardless of nature of sea motion and for "Watt" regions studied, the same empirical relationship for the increase in sediment concentration ( $4^{\circ}\text{C}$ ) is derived. The governing parameter is the average wind velocity toward land ( $\bar{V}_T$ ) during a tidal period. The increase in concentration is linear up to the onset of breaking, that is, up to an average wind velocity  $\bar{V}_T$  of 11,5 m/s. For higher velocities the concentration increases with the third power of  $\bar{V}_T$ .
- The maximum concentrations depend significantly upon the size of the current-dependent tributary area and the salient characteristic of sea motion; for a reference depth 0.35 m above the sea bed and a temperature of  $4^{\circ}\text{C}$  (DILLO, 1960): (S): max. 500 mg/l, (SB): max. 1200 mg/l.
- Corresponding to the measured sediment concentration, the transport of suspended materials (dry weight) was computed as follows for the "Watt" region under study and wind toward land:
 

|                          |      |                             |
|--------------------------|------|-----------------------------|
| average tidal conditions | (S)  | approx. 225 t/tide to SW    |
| ( $10^{\circ}\text{C}$ ) | (SB) | approx. 75 t/tide to E      |
| storm tides (20 m/s)     | (S)  | approx. 42 000 t/tide to E  |
| ( $4^{\circ}\text{C}$ )  | (SB) | approx. 63 000 t/tide to E  |
| per year                 | (S)  | approx. 530 000 t/year to E |
|                          | (SB) | approx. 750 000 t/year to E |

In general the results show that widespread measurements are a prerequisite for more exact studies of sediment concentration in suspension in tidal regions. The role of localized measurements must be understood in this global context. Particular care must be taken in the extrapolation of laboratory results to predict large-scale natural phenomena.

It is shown that the results of the present study can be incorporated into large-scale computer programs employed to design the widespread network of measurement stations mentioned above.

## Inhalt

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 1.      | Einführung   | 88  |
| 1.1     | Allgemeines  | 88  |
| 1.2     | Aufgabenstellung und Zielsetzung   | 91  |
| 2.      | Zur Theorie des Suspensionstransportes                                   | 91  |
| 2.1     | Problemabgrenzung  | 91  |
| 2.2     | Vertikale Verteilung suspensierter Feststoffe                            | 92  |
| 2.3     | Erörterung einzelner Einflussfaktoren                                    | 98  |
| 2.3.1   | Seegang und Strömung   | 98  |
| 2.3.2   | Temperatur des Wassers   | 105 |
| 2.3.3   | Salzgehalt und Koagulation   | 106 |
| 2.4     | Folgerungen für die Aufgabenstellung                                     | 107 |
| 3.      | Messungen und Fehlerabschätzungen  | 107 |
| 3.1     | Meßprogramm und Geräteinsatz   | 107 |
| 3.2     | Meßgeräte und Meßverfahren mit Fehlerabschätzung                         | 108 |
| 3.2.1   | Suspensionsmessungen   | 108 |
| 3.2.2   | Messungen weiterer Parameter   | 118 |
| 4.      | Aufbereitung der Messungen   | 119 |
| 4.1     | Allgemeines zum Datenmaterial  | 119 |
| 4.2     | Suspensionskonzentration, Windsektoren                                   | 120 |
| 4.3     | Seegang  | 121 |
| 4.4     | Strömung   | 121 |
| 4.5     | Wind   | 125 |
| 4.6     | Tide   | 125 |
| 4.7     | Sohlmaterial   | 125 |
| 4.8     | Übersicht  | 126 |
| 5.      | Meßergebnisse aus dem Watt und ihre Diskussion                           | 126 |
| 5.1     | Ergebnisse früherer Untersuchungen                                       | 126 |
| 5.2     | Ergebnisse der Untersuchungen der Jahre von 1972 bis 1977                | 131 |
| 5.2.1   | Suspensionskonzentrationen und ihre morphologischen Randbedingungen      | 131 |
| 5.2.1.1 | Abhängigkeit der Konzentrationen von Abweichungen von der mittleren Tide | 131 |
| 5.2.1.2 | Veränderung der Konzentration mit der Windstärke                         | 136 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5.2.2   | Verhältnisse im auflandigen Windsektor und ihre Parameter (Sektoren 4 [S, SB]) | 141 |
| 5.2.2.1 | Suspensionsganglinien über die Tide  | 141 |
| 5.2.2.2 | Über die Tide integrierte Konzentrationswerte                                  | 148 |
| 5.2.2.3 | Einfluß der wellenerzeugten Strömungen und der Brandungen                      | 154 |
| 5.2.3   | Extremwertbetrachtungen zur Suspensionskonzentration                           | 162 |
| 5.3     | Schlußfolgerungen aus Abschn. 5.2  | 165 |
| 6.      | Anwendungsmöglichkeiten  | 166 |
| 6.1     | Mathematische Modellierung des Sedimenttransports                              | 166 |
| 6.1.1   | Allgemeines  | 166 |
| 6.1.2   | Modelle zur Untersuchung des Sedimenttransports                                | 167 |
| 6.1.3   | Folgerungen  | 169 |
| 6.2     | Abschätzung der Suspensionstransportmengen im Untersuchungsgebiet              | 171 |
| 7.      | Meßdatenzusammenstellung   | 175 |
| 8.      | Verzeichnis der Symbole  | 180 |
| 9.      | Schriftenverzeichnis   | 181 |

## 1. Einführung

### 1.1 Allgemeines

Die Freie und Hansestadt Hamburg hat seit 1962 im Rahmen ihrer zukunftsgerichteten, langfristigen Hafenpolitik die Planung und Vorbereitung für einen Tiefwasserhafen mit direktem Zugang zur 20 m tiefen Stromrinne der Außenelbe im Watt von Neuwerk und Scharhörn betrieben (Abb. 1.01). Die Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk beim Amt Strom- und Hafenbau der Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft hat als Voraussetzung für diese Planung ein Forschungsprogramm durchgeführt mit dem Ziel, die bis dahin noch unzureichend erfaßten Zusammenhänge in Tideästuarien näher zu beschreiben. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten sind in der Schriftenreihe „Hamburger Küstenforschung“ veröffentlicht, in deren ersten Heft LAUCHT (1968) über die Ziele dieser Arbeiten berichtet.

Dieses Programm sollte u. a. auch die Entstehungsursachen und die Transportmechanismen suspendierter Feststoffe zu klären versuchen. Hierzu liegen bislang nur wenige Meßergebnisse aus anderen Tidegebieten vor (z. B. GRY, 1942; POSTMA, 1961; WOHLBERG, 1954), die wegen nicht angegebener bzw. anderer Randbedingungen nur bedingt übertragbar sind. GÖHREN (1971) hat im Rahmen seiner Untersuchung der Sandbewegungen im Elbemündungsgebiet Messungen auf den Watten durchgeführt. Diese ermöglichen jedoch wegen der Streuung der Meßergebnisse nicht die Zuordnung der Suspensionskonzentrationen zu einzelnen Tideparametern. CHRISTIANSEN (1974) hat in der Stromrinne der Elbe ein Meßprogramm durchgeführt und daraus u. a. einen empirischen Ansatz für die Abhängigkeit des Suspensionstransportes vom Stromweg entwickelt.

Um vergleichbare Angaben für die Wattgebiete machen zu können, haben GÖHREN und LAUCHT (1972) ein automatisch arbeitendes, sogenanntes „Schwebstoffmeßgerät“ für Meßreihen über längere Zeiträume auch bei schlechten Witterungsbedingungen entwickelt. Die Ergebnisse hieraus werden mit den gleichzeitig zu messenden Tideparametern – Strömung, Seegang, Wind, Wasserstand und Wassertemperatur – in Zusammenhang gebracht. In den Jahren 1972, 1975 und 1976 sind mit diesem Gerät Messungen durchgeführt worden. Das in diesen Jahren gewonnene Datenmaterial ist gekennzeichnet durch besonders schlechte Witterungsbedingungen während der Messungen, so daß eine ausreichende Auswertungssub-

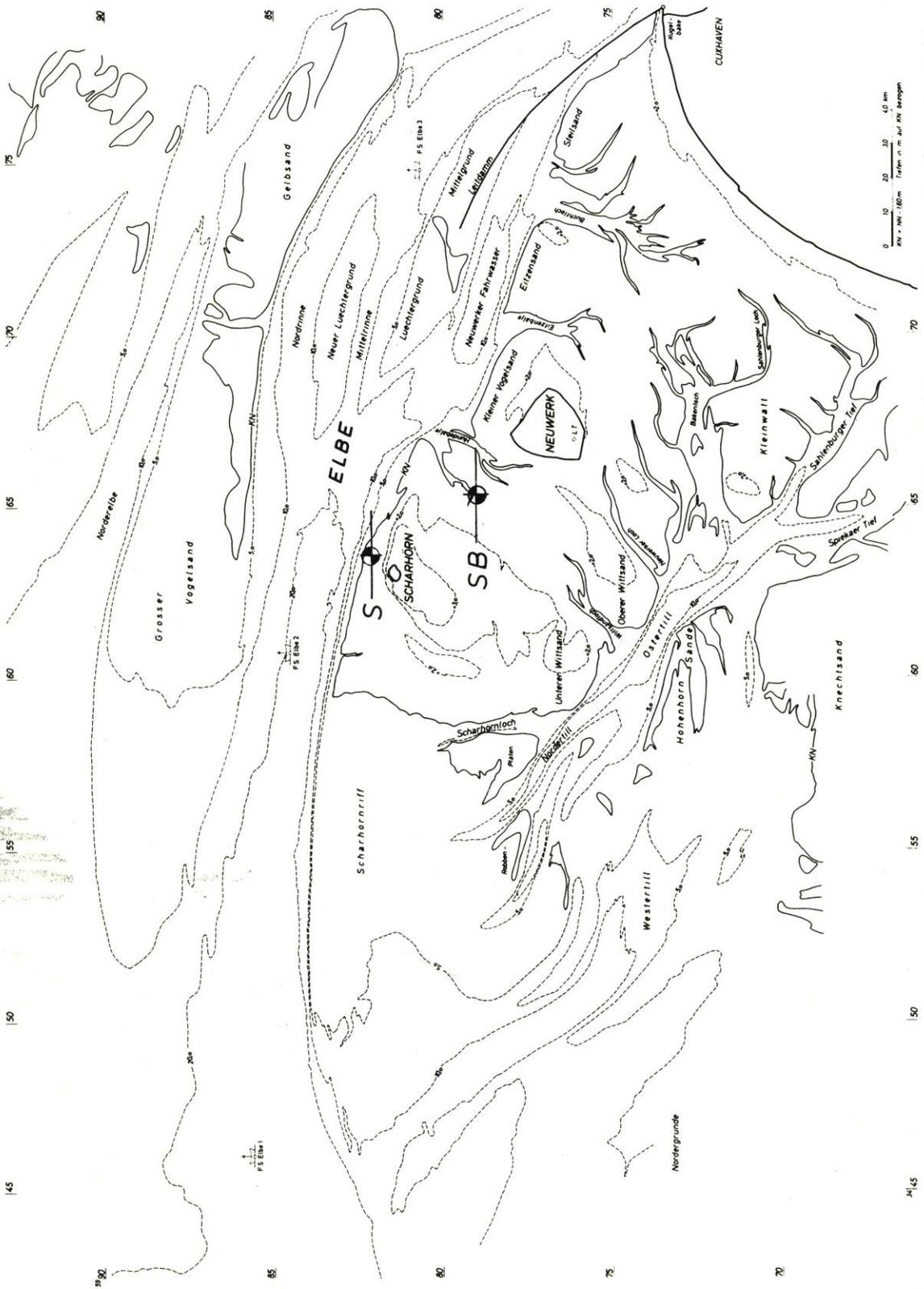


Abb. 1.01. Übersicht der Meßstationen im Elbemündungsgebiet



stanz noch nicht gegeben war. Der Verfasser hat deshalb 1977 ein weiteres Meßprogramm durchgeführt mit dem Ziel, vorhandenes Datenmaterial zu ergänzen und eine umfassende Auswertung zu ermöglichen.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Es wird allgemein davon ausgegangen, daß die auf der Gewässersohle liegenden Sedimentteilchen durch strömungsbedingte Schubkräfte in Bewegung kommen. Mit zunehmender Schubspannung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern werden sie in Suspension gehoben. Wie Messungen in Tidegebieten zeigen, z. B. auch von WÜNSCHE (1976), beinhalten bislang diese nur auf der Strömung aufbauenden Schubansätze den für die Aufwirbelung des Sohlmateriale wesentlichen Einfluß des Seegangs nicht.

Da die direkte Messung der wellenbedingten Orbitalgeschwindigkeiten im Rahmen von längerfristigen, auch in den Wintermonaten durchzuführenden Meßprogrammen in der Natur nur mit erheblichem Aufwand gelingt (BÜSCHING, 1974; DETTE, 1974), sollen über die Wellenhöhen die für grundberührenden bzw. brechenden Seegang maßgebenden Orbitalgeschwindigkeiten (WIEGEL, 1964) ermittelt und der Tidebewegung überlagert werden. Der Einfluß der bei brechenden Wellen in das Wasser eingeschlagenen Luft (FÜHRBÖTER, 1971) muß dabei gesondert betrachtet werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die mit zunehmendem Windeinfluß auftretenden Veränderungen der Suspensionskonzentrationen auf dem Watt unter besonderer Berücksichtigung des Seegangs zu beschreiben. Für den auflandigen Windsektor soll ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen den Suspensionskonzentrationen und den Windverhältnissen angegeben werden. Daneben sind Suspensionsganglinien über die Tide zu entwickeln, Extremwerte der Konzentrationen abzuschätzen und die gewonnenen Ergebnisse in den Zusammenhang bereits vorliegender Arbeiten zu stellen.

Wegen der örtlich grundsätzlich unterschiedlichen Seegangscharakteristik auf den Watt (STEFERT, 1973, s. Abb. 1.02) sind die Standorte der Meßstationen im Brandungs- bzw. Randwatt vor Scharhörn (S) und im brandungsfreien Watt zwischen Neuwerk und Scharhörn an der Scharhörnbalje (SB) angeordnet.

## 2. Zur Theorie des Suspensionstransportes

### 2.1 Problemabgrenzung

Ein theoretischer Ansatz für den Transport von Feststoffen in Suspension muß in den Zusammenhang des Gesamttransportes von Feststoffen in Flachwassergebieten gestellt werden. Dieses ergibt sich aus:

- der bisher nicht möglichen, exakten Abgrenzung zwischen den zu unterscheidenden Bereichen „bed-load“ und „suspension-load“ (VANONI, 1977). Während der erste Bereich die sohlnahe Wasserschicht umfaßt, in der der Feststofftransport überwiegend durch eine rollende und hüpfende Bewegung größerer Feststoffteilchen über Grund gekennzeichnet ist (Geschiebetrieb), beschreibt der zweite Bereich nur den in Suspension erfolgenden Feststofftransport. Der Übergang ist naturgemäß fließend. Eine theoretische Abgrenzung der Bereiche erfolgt anhand der von ROUSE (1937) mitgeteilten Ergebnisse, in denen „suspension-load“ für den Tiefenbereich 0,05 bis 1,0 d über der Sohle festgelegt wird (Abb. 2.08).

- Dieser Ansatz hat allgemein Eingang in die Literatur gefunden (VANONI, 1977; RAUDKIVI, 1976; GRAF, 1971);
- der Vielzahl in Wattgebieten zu erfassender, sich wechselseitig beeinflussender bzw. voneinander abhängiger Parameter
  - windbeeinflussten Tideparametern
    - Wasserstand
    - Strömungsgeschwindigkeit
    - Triftstrom
    - Seegang
- } Turbulenzintensität
- Ortsparametern
    - Seegangscharakteristik
    - Sohlprofil
    - Sohlmaterial
    - umgebenden Wattgebieten
  - weiteren Parametern
    - Salzgehalt
    - Wassertemperatur
    - Koagulation
    - Oberwasser

Die durch den Wind ausgelösten wechselseitigen Beziehungen zwischen Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Seegang sind in Abhängigkeit von der Seegangscharakteristik und der Umgebung eines Standortes die für den Feststofftransport wichtigen Parameter. Sie bestimmen über die Turbulenzintensität und die Stromversetzung den Transport in den Bereichen „bed-load“ und „suspension-load“. Wegen der Vielzahl in ihrer Größenordnung örtlich und über die Tide laufend wechselnder Parameter sowie der Schwierigkeit der Einflußtrennung der einzelnen Parameter ist eine Abgrenzung beider Bereiche voneinander bisher nicht gelungen. Dieses ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß für die Bereiche „bed-load“ und „suspension-load“ physikalisch unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten gelten (GRAF, 1971) und deshalb der Übergangsbereich in Abhängigkeit von den sich ändernden Parametern nicht ausreichend beschrieben werden kann.

Die in der Literatur (z. B. VANONI, 1977) angegebenen theoretischen Beziehungen für den Feststofftransport sind deshalb gesondert für den jeweilig gültigen Bereich angegeben bzw. durch Vergleich mit Messungen empirisch auf den Gesamttransport umgesetzt (z. B. EINSTEIN-BROWN-Formel [„total-load“]). Im Rahmen dieser Arbeit wird bei den weiteren theoretischen Betrachtungen nur der Suspensionsbereich erläutert. Für den Bereich „bed-load“ wird auf die Angaben in der Literatur (z. B. RAUDKIVI, 1976) verwiesen.

Nachfolgend werden die für die Suspensionskonzentration maßgebenden Ansätze über die Turbulenzintensität zusammengestellt und der Einfluß des Seegangs erörtert.

## 2.2 Vertikale Verteilung suspendierter Feststoffe

Die Bewegung eines Feststoffteilchens in Suspension ist so definiert, daß während eines Bewegungsvorganges das Teilchen ständig von Flüssigkeit umgeben ist. Entsprechend des Gewichts dieses Teilchens muß während des Bewegungsvorganges für eine bestimmte Zeiteinheit Gleichgewicht zwischen der nach unten gerichteten Schwerkraft und der nach oben wirkenden Komponente der Turbulenzbewegung bestehen. Die Turbulenzintensität

bestimmt damit, ob ein Feststoffteilchen aus der unteren Wasserschicht („bed-load“) in Suspension gehoben wird und wie lange es dort verbleiben kann, bevor es wieder absinkt.

Aufbauend auf der hierfür formulierten Gleichgewichtsbeziehung (Abb. 2.01)

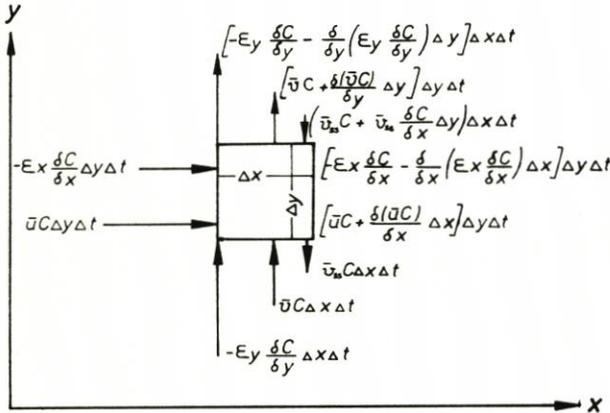


Abb. 2.01. Suspensionstransport durch ein Volumenelement für zweidimensionale Strömungsverhältnisse (VANONI, 1977)

$$0 = v_{ss} \cdot C + \epsilon_s \frac{dC}{dy} \tag{Gl. 2.01}$$

hat SCHMIDT (1925) die Verteilung von Staubteilchen in der Luft beschrieben. Diese Beziehung ist von JAKUSCHOFF und LEIGHTLY (1932) auf den Transport suspendierter Feststoffe im Wasser übertragen, von O'BRIEN weiter entwickelt und von ROUSE (1937) als sogenanntes „Diffusions- und Dispersions-Modell“ in nachstehende Form gebracht worden:

$$\frac{C_y}{C_a} = \left( \frac{d-y}{y} \cdot \frac{a}{d-a} \right)^z \tag{Gl. 2.02}$$

- $C_y$ : Konzentration der suspendierten Feststoffe in der Wassertiefe  $y$  [mg/l]
- $C_a$ : bekannte Konzentration in einer Wassertiefe  $a$  (Bereich 0,05 bis 1,0  $d$  über der Sohle [mg/l])
- $d$ : Wassertiefe im betrachteten Querschnitt [cm]
- $y$ : mit  $C_y$  korrespondierende Wassertiefe [cm]
- $a$ : mit  $C_a$  korrespondierende Wassertiefe [cm]
- $z$ : Exponent der Suspensionsverteilung

Die Gleichung beschreibt die relative Veränderung der Suspensionskonzentration über die Wassertiefe bei bekannter Konzentration auf einem Niveau. Der Exponent  $z$  beinhaltet in der Form

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_s} \cdot \frac{v_{ss}}{k \cdot u_*} = z \tag{Gl. 2.03}$$

den Einfluß der für Flüssigkeiten ( $\epsilon$ ) und Feststoffteilchen ( $\epsilon_s$ ) unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten [cm<sup>2</sup>/s], die materialabhängige Absinkgeschwindigkeit des Feststoffteilchens  $v_{ss}$  [cm/s], die im Querschnitt maßgebende Schubspannungsgeschwindigkeit an der Sohle  $u_*$

[cm/s] und die vertikale Geschwindigkeitsverteilung mit der sogenannten KARMAN-Konstante  $k = 2,3 u_* S$ .  $S$  ist die Steigung der im halblogarithmischen Maßstab dargestellten linearen Geschwindigkeitsverteilung. Für  $k$  ist aufgrund der von VANONI und EINSTEIN durchgeführten Untersuchungen (GRAF, 1971) zu berücksichtigen, daß der für klares Wasser gültige Wert  $k = 0,4$  mit anwachsender Suspensionskonzentration kleiner wird (Abb. 2.02), was zu einer Veränderung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung führt (Abb. 2.03).

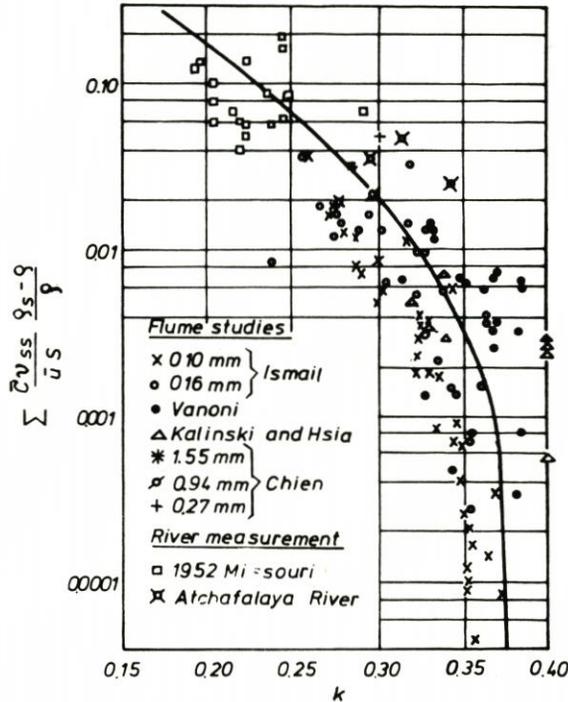


Abb. 2.02. Veränderung der KARMAN-Konstante mit der Suspensionskonzentration (EINSTEIN und CHIEN, 1954)

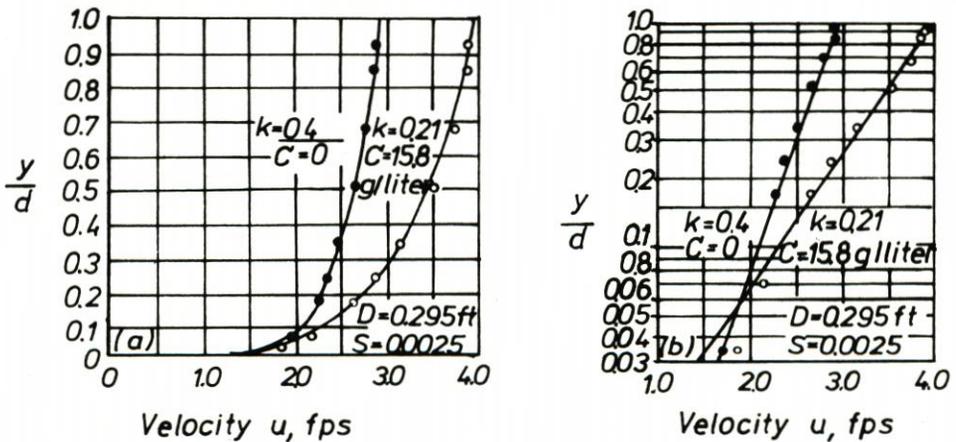


Abb. 2.03. Vertikale Geschwindigkeitsverteilung für unterschiedliche Suspensionskonzentrationen (VANONI, 1960)

Ab einem Tiefenverhältnis  $y/d = 0,15$  kann die Geschwindigkeitsverteilung zur Sohle hin nicht mehr mit einer linearen Beziehung im halblogarithmischen Maßstab beschrieben werden, weil die Schubkräfte in Sohlnähe zum Teil in Rotation der Feststoffteilchen umgesetzt werden (Abb. 2.04). Neben diesen Veränderungen sind bei der Absinkgeschwindigkeit eines Feststoffteilchens der Einfluß aus der zur Sohle hin anwachsenden Suspensionskonzentration (Abb. 2.05), der Einfluß der Änderung der Wassertemperatur (Abb. 2.06) und der Einfluß der Kornform und Dichte (Abb. 2.07) zu beachten. Der Parameter der Turbulenz ist über die Diffusionskoeffizienten und die KARMANKONSTANTE berücksichtigt, wobei nach FIELD und HOUGHTON (VANONI, 1977) der Schlupf zwischen den Feststoffteilchen und der Flüssigkeit ( $\epsilon/\epsilon_s$ ) die Absinkgeschwindigkeit gegenüber ruhigem Wasser verringert.

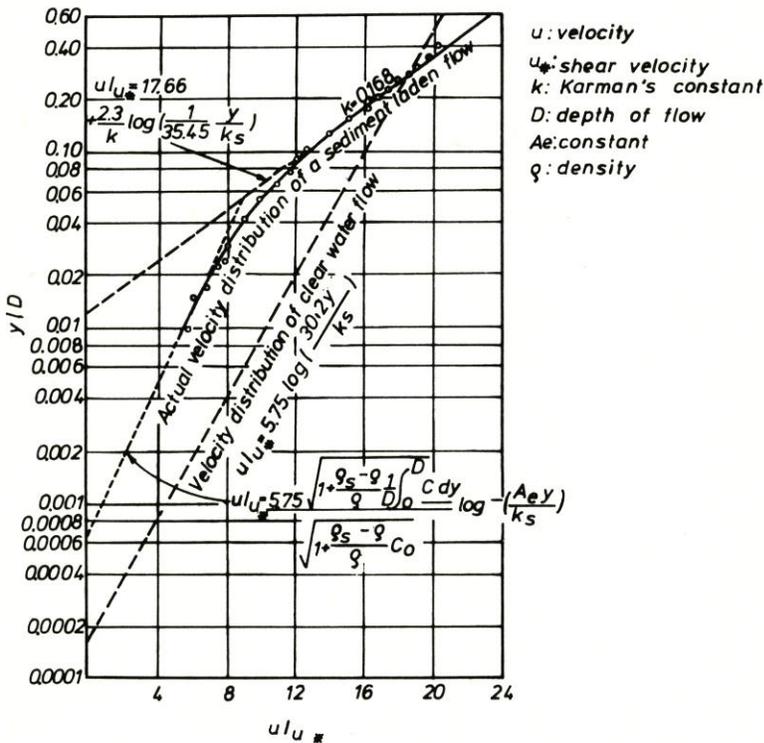


Abb. 2.04. Vertikale Geschwindigkeitsverteilung für unterschiedliche Suspensionskonzentrationen im Übergangsbereich „bed-suspension-load“ (EINSTEIN und CHIEN, 1955)

Für diesen auf ROUSE zurückgehenden Ansatz hat VANONI im Labor- und Feldversuch gute Übereinstimmung der Werte nachgewiesen (GRAF, 1971). Die ermittelten vertikalen Suspensionsverteilungen sind in Abb. 2.08 dargestellt und beruhen auf Vereinfachungen folgender Randbedingungen:

Ansatz immanente Randbedingungen:

- Die Abflußverhältnisse sind stationär und zweidimensional darstellbar.
- Die Dichte der Suspension ist gleich der des Wassers.
- Der Turbulenzmechanismus im Untersuchungsgebiet ist über den zu beschreibenden

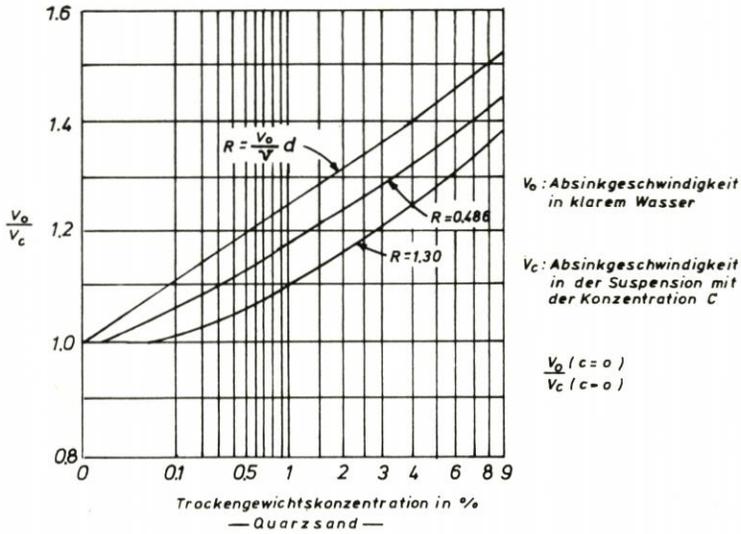


Abb. 2.05. Einfluß der Konzentration auf die Absinkgeschwindigkeit der Suspensionsteilchen für Einheitsquarzsand (McNOWN u. LIN, 1952)

Zeitraum unverändert.

- Die Summe der auf- und abwärtsgerichteten Turbulenzströmungen durch eine Einheitsfläche ist Null.

Parameterimmanente Randbedingungen:

- Der Schlupf ( $\epsilon/\epsilon_s$ ) kann nur qualitativ beschrieben werden, und zwar so, daß mit wachsender Turbulenz und Teilchengröße der Schlupf zunimmt.
- Örtliche Messungen des Diffusionskoeffizienten sind nicht möglich.
- Die mit der KARMAN-Konstante beschriebene vertikale Geschwindigkeitsverteilung enthält die turbulenzbedingten Geschwindigkeitsglieder höherer Ordnung „secondary-flow“ (GRAF, 1971) nicht, die nach Beobachtungen von VANONI et al. die Geschwindigkeitsverteilung in ihrer Form und Regelmäßigkeit verändern und zur Ausbildung von in Strömungslängsachse orientierten Bändern höherer Suspensionskonzentration führen.
- Die Beschreibung des Einflusses der Suspensionskonzentration auf die Absinkgeschwindigkeit der Feststoffteilchen kann bisher nur im STOKESCHEN Bereich des Reibungsgesetzes, d. h. für REYNOLDSZahlen  $< 2$  und für kleinere Konzentrationen bis ca. 6 %, ausreichend genau angegeben werden.

Bei der Anwendung dieser Beziehung auf tidebeeinflusste Flachwassergebiete sind die instationären und nicht mehr richtungskonstanten Abflußvorgänge sowie die windbedingten Veränderungen des Wellenklimas (DETTE, 1977) und der Strömungsverhältnisse (GÖHREN, 1969) zu beachten. In der Literatur (s. weiter unten) sind Beziehungen zwischen dem Suspensionsgehalt und einzelnen Parametern angegeben, ohne daß die jeweiligen Ansätze vollständige Beschreibungen des Gesamtproblems hergeben. CHRISTIANSEN (1974) hat eine Vielzahl dieser Ansätze zusammengestellt. Im wesentlichen sind hierbei Beziehungen zwischen dem Suspensionsgehalt (gemittelt über die gesamte oder für eine bestimmte Wassertiefe) und folgenden Parametern hergestellt:

- Mittlere Strömungsgeschwindigkeit (VICK, 1952; NIEBUHR, 1955)
- Tidehub und Temperatur (HALLIWELL, O'CONNOR, 1966; JACKSON, 1964)
- Mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Wassertiefe (ROY, 1969)

- Temperatur und Salzgehalt (DILLO, 1960)
- Stromweg (CHRISTIANSEN, 1974; GÖHREN, 1971)

Die angegebenen Beziehungen führen gebiets- bzw. versuchsabhängig zu unterschiedlichen Ergebnissen, so daß eine allgemeingültige Erweiterung der mit Gl. 2.02 gegebenen vertikalen Suspensionsverteilung für tidebeeinflusste Abflußvorgänge, wie von O'CONNER (1971) angestrebt, noch nicht möglich ist.

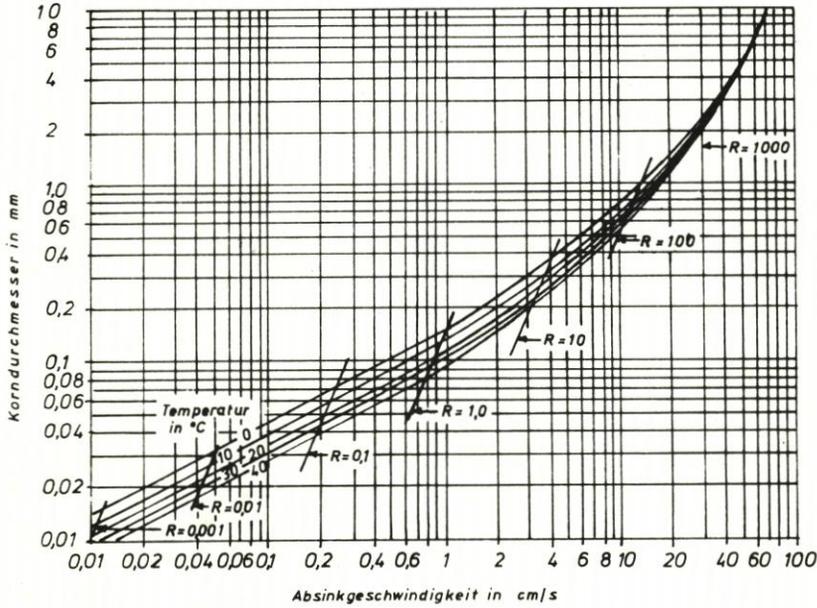


Abb. 2.06. Absinkgeschwindigkeit von Einheitsquarzsand für unterschiedliche Wassertemperaturen (ROUSE, 1937)

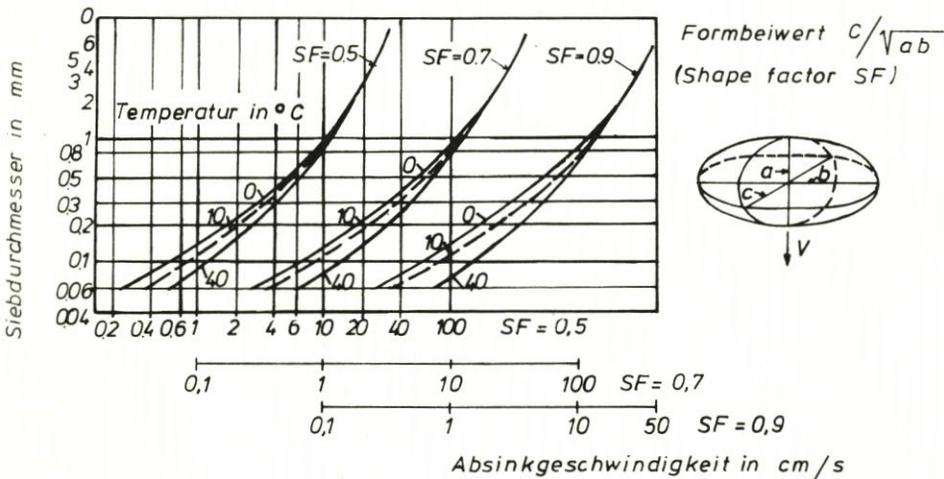


Abb. 2.07. Absinkgeschwindigkeit von natürlichem Quarzsand in destilliertem Wasser für unterschiedliche Formbeiwerte (INTERAGENCY COMMITTEE, 1957)

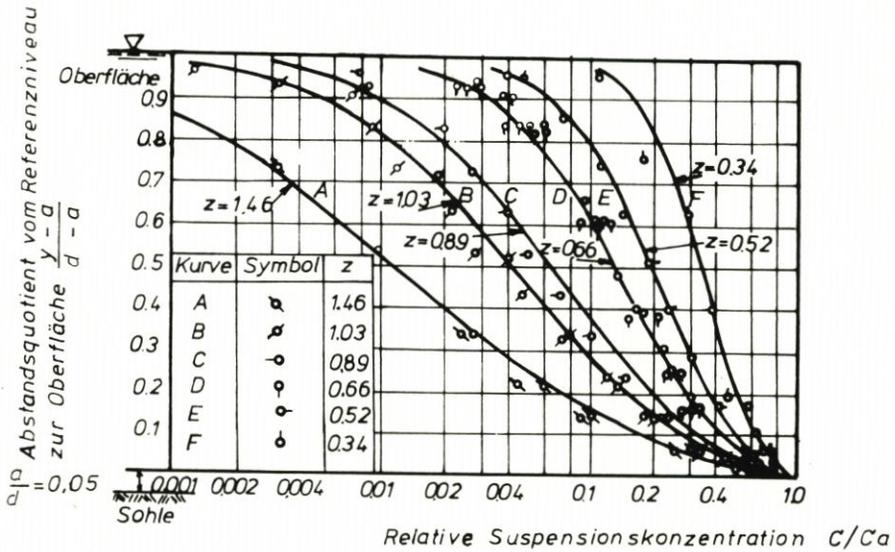


Abb. 2.08. Vertikale Suspensionsverteilung (VANONI, 1977)

### 2.3 Erörterung einzelner Einflußfaktoren

#### 2.3.1 Seegang und Strömung

In der Literatur ist vielfach auf den mit der Seegangsintensität zunehmenden Suspensionsgehalt im Flachwassergebiet hingewiesen. GÖHREN (1971) führt hierzu sinngemäß aus, daß unmittelbare Beobachtungen des Einflusses von Orbital- und Brandungsströmungen auf den Suspensionsgehalt im Wattgebiet bisher nicht vorliegen und nach dem Stand der Meßtechnik (vgl. z. B. HOM-MA, HORIKAWA, KOMORI, 1966) vorläufig nicht zu erwarten seien; derartige Unterlagen seien aber für den Materialtransport bei höheren Windstärken von wesentlicher Bedeutung. Inzwischen sind einige qualitative und auch quantitative Aussagen für den Brandungstransport gemacht (RAUDKIVI, 1976; WÜNSCHE, 1976; BIJKER und VELLINGA, 1976). Sie erfassen aber nur den klassischen Brandungsstrand, gekennzeichnet durch ein vorgelagertes Riff und ein verhältnismäßig steiles Strandprofil, bei dem auf kleinstem Raum die gesamte Wellenenergie umgewandelt wird. Aus der Wellenrichtung zur Strandlinie läßt sich über einen Schubspannungsansatz der strandparallele Transport ermitteln. Hierfür haben MADSON et al. (1976) nachgewiesen, daß die auf stationäre Abflußvorgänge zurückgehenden Diagramme von SHIELDS und HYULSTRÖM (Abb. 2.15) auch auf instationäre Abflußvorgänge in Tidegebieten übertragbar sind. Die Aussagen beschränken sich in der Regel aber auf den Geschiebetrieb („bed-load“). Der hier interessierende Transport in Suspension wird vernachlässigt bzw. nur mit Näherungsansätzen erfaßt. Wie die von SIEFERT (1969 u. 1973) für seine Seegangsuntersuchungen in Flachwassergebieten aufgenommenen Luftbilder des Wattgebietes (Abb. 2.09) westlich von Scharhörn bei Windstärke um 6 Bft aus WNW zeigen, trifft die Randbedingung einer vollständigen Wellenenergieumwandlung im Bereich der Brandungskante dort nicht zu. Vielmehr wird, wie anhand der langgestreckten weißen Schaumbrecher in Abb. 2.09 erkennbar ist, die Wellenenergie flächenhaft über weite Bereiche des Flachwassergebietes abgegeben.

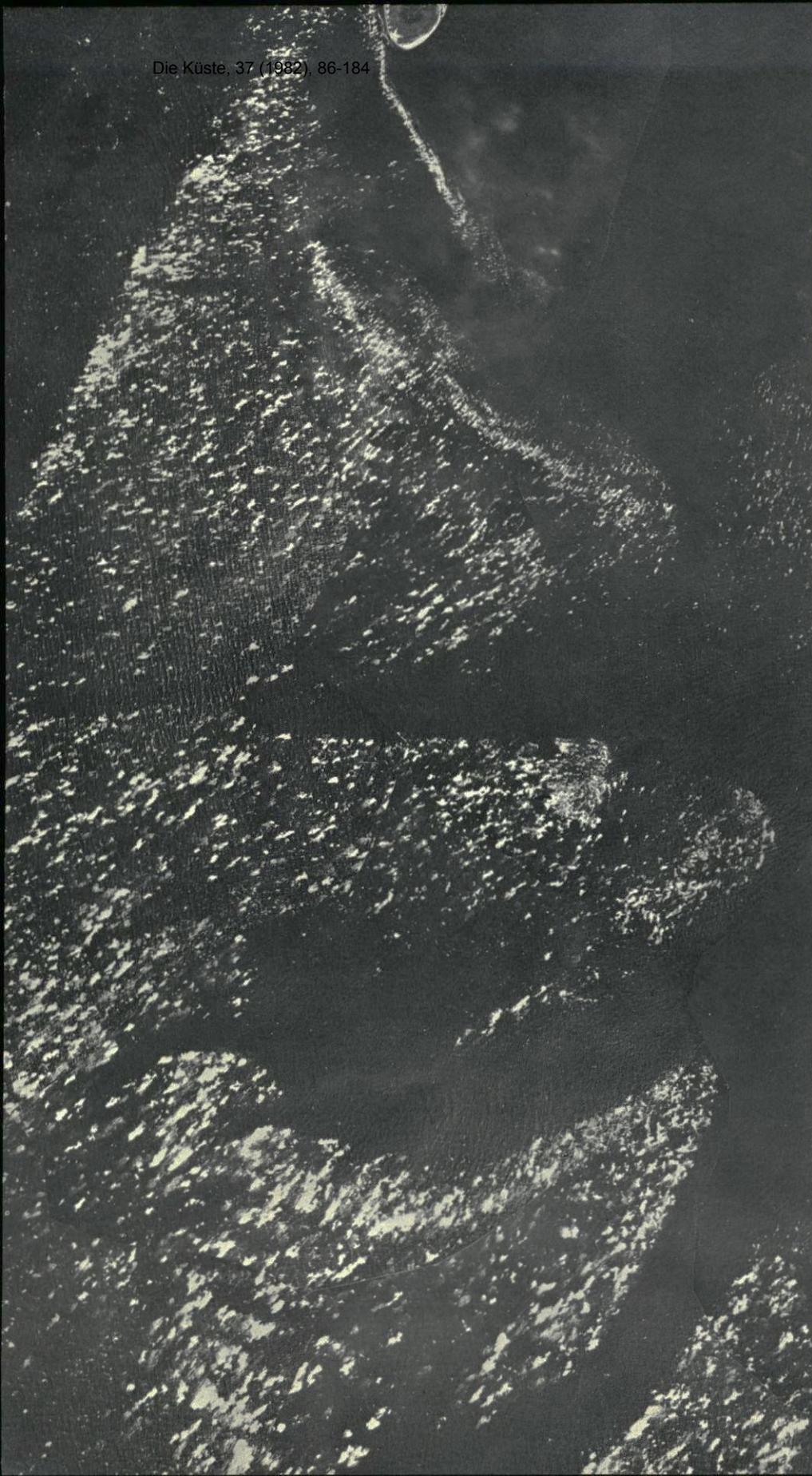
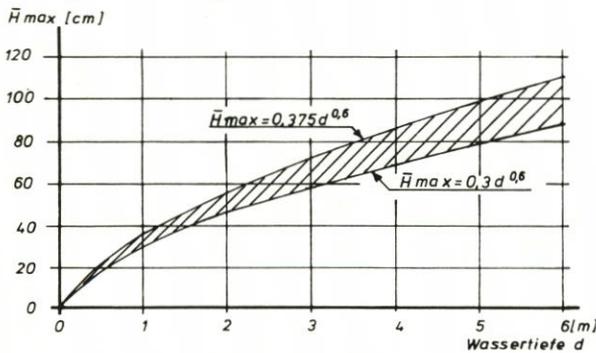


Abb. 2.09. Luftaufnahme der Brandungszonen im südlichen Elbemündungsgebiet (Robbenplaten bis Scharhörn) bei WNW-Wind um 6 Bft aus rd. 4000 m Höhe (GÖHREN, 1971)

Den vielschichtigen Mechanismus der Veränderung der Wellenkennwerte beim Lauf der Welle aus tiefem in flaches Wasser hat SIEFERT (1973 u. 1974) erläutert. Die qualitative Feststellung, daß beim Lauf einer Welle über die Diskontinuitätszone in gleichmäßig flaches Wasser die relative Wellenhöhe um so mehr zunimmt, je höher die Ausgangswelle, je flacher die Böschung und je kleiner die Wassertiefe ( $d$ ) ist, hat SIEFERT durch eigene Messungen untermauert. Er hat hierbei die Veränderung der Wellenhöhe, der Wellenperiode und der Wellensteilheit betrachtet. Die wesentlichen Ergebnisse sind nachstehend zusammengestellt:

- Standort und Morphologie der Umgebung bestimmen die Seegangscharakteristik und damit, ob der Übergang der Wellen in flaches Wasser weitgehend brandungsfrei oder mit ausgedehnter Brandung erfolgt (Abb. 1.02).
- Die Wellenhöhen ( $H$ ) sind in Flachwassergebieten wesentlich abhängig von der Wassertiefe ( $d$ ), wobei der Einfluß mit abnehmender Wassertiefe zunimmt (Abb. 2.10).
- Der Quotient aus kennzeichnender und mittlerer Wellenhöhe ( $H_{1/3}/\bar{H}$ ) ist in Abhängigkeit von der Seegangscharakteristik kleiner als in tiefem Wasser und für größere Wellenhöhen konstant (Abb. 2.11).
- Der Zusammenhang zwischen den Mittelwerten von Wellenhöhe ( $\bar{H}$ ) und -periode ( $\bar{T}$ ) verändert sich beim brandungsfreien Übergang nur unwesentlich. Bei ausgedehnter Brandung werden davon abweichend die Perioden größer (Abb. 2.11).
- Die Perioden der Wellen sind nicht nur von der Wellenhöhe und der Wassertiefe, sondern auch von der Tidephase abhängig. Die größten Wellenperioden ( $\bar{T}$ ) und -höhen ( $\bar{H}$ ) treten kurz nach Tidehochwasser (Thw) auf, wenn mit fallendem Wasserstand leichte Dünungseffekte wirksam werden (Abb. 2.12).
- Die Welle wird beim Übergang in Abhängigkeit vom Quotienten  $\bar{H}/d$  aufgesteilt und zunehmend asymmetrisch, bis der obere Teil des Wellenspektrums bricht (Abb. 2.13).
- Die Wellen überlaufen die Diskontinuitätszonen weitgehend ohne Richtungsänderung; sie folgen allerdings tieferen Rinnen und Prielen auch unter starken Richtungsänderungen (Abb. 2.14).
- Die Wellen zerfallen beim Überschreiten einer von der Wassertiefe abhängigen Grenzperiode ( $T_{gr}$ ) in Sekundärwellen unterschiedlicher Höhe.

A. Weitgehend brandungsfreies Watt



B. Gebiete mit ausgedehnter Brandung

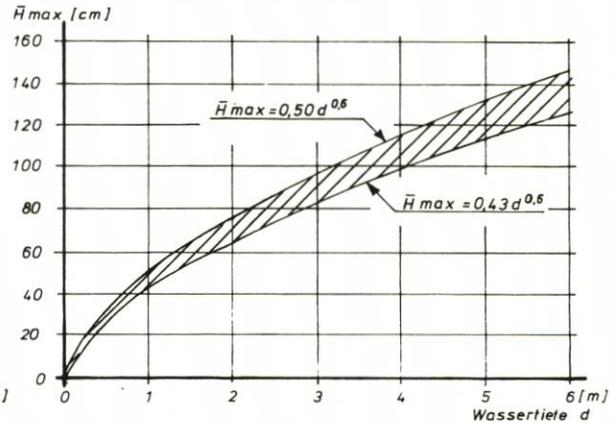


Abb. 2.10. Maximale mittlere Wellenhöhen  $\bar{H}_{max}$  auf dem Watt in Abhängigkeit von der Wassertiefe (nach SIEFERT, 1973)

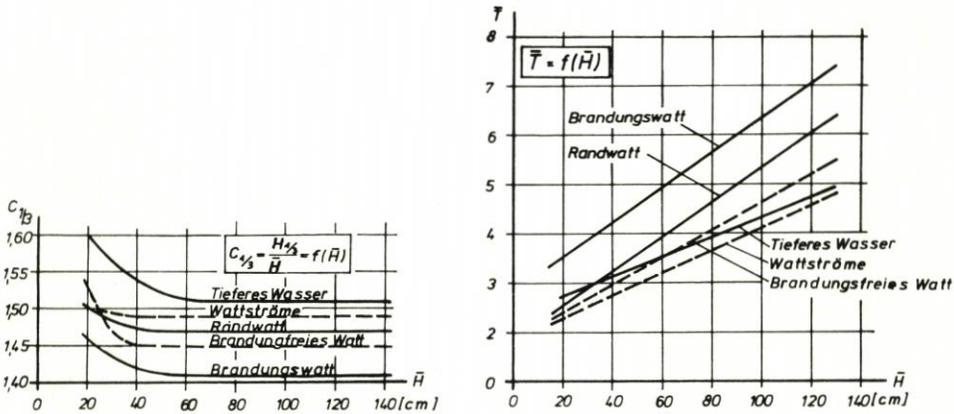


Abb. 2.11. Seegangskennwerte im küstennahen Flachwasserbereich (nach SIEFERT, 1973)  
 links: Veränderung der Zusammenhänge zwischen mittlerer und kennzeichnender Wellenhöhe beim Übergang in flaches Wasser  
 rechts: Veränderung der Zusammenhänge zwischen den Mittelwerten von Wellenhöhe und -periode beim Übergang in flaches Wasser.

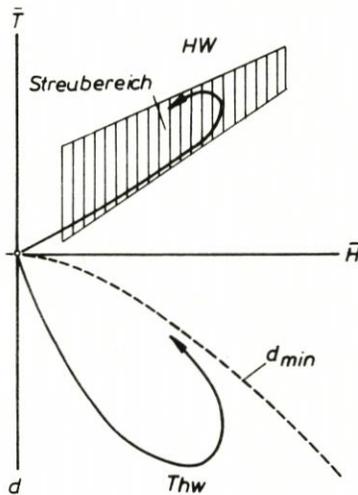


Abb. 2.12. Veränderung der Wellenkennwerte im Watt über die Tide (SIEFERT, 1973)

Die Beschreibung dieser Veränderungen des Seegangs ist für die Aufwirbelung des Sohlmaterials in Suspension von Bedeutung, da hierdurch die Grenzwerte für die Grundberührung des Seegangs im Watt bestimmbar sind. Mit Überschreitung des Grenzwertes wirkt die Orbitalbewegung auf das Sohlmaterial ein. Nach der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE hat eine Welle Grundberührung, wenn

$$L / 2 \geq d \tag{Gl. 2.04}$$

ist.

Für den nichtlinearen natürlichen Seegang gibt es einen gleichwertigen Ansatz nicht. Um in jedem Fall eine Grundberührung zu erfassen, wird die für Einzelwellen gültige Beziehung (Gl. 2.04) auf die Parameter einer mittleren Welle ( $\bar{H}$  u.  $\bar{T}$ ) im natürlichen Spektrum übertragen.

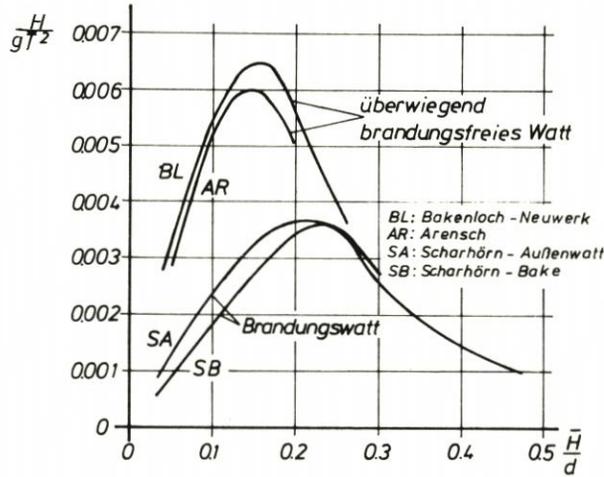


Abb. 2.13. Obere Begrenzung des Streubereichs für  $\frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2}$  über  $\frac{\bar{H}}{d}$  für vier Stationen im Watt (SIEFERT, 1973)

Unter Verwendung der von SIEFERT (1973) in Abhängigkeit von der Seegangscharakteristik für mittlere Wellenperioden  $\bar{T}$  angegebenen Beziehung

$$\bar{T}_w = a_w \bar{H} + b_w \quad (\text{Gl. 2.05})$$

( $a_w$  und  $b_w$ : von der Wassercharakteristik abhängige Konstanten) und mit dem für Flachwasser geltenden Mittelwert

$$\bar{L} = \bar{T}^2 \quad (\text{Gl. 2.06})$$

ergeben sich nachstehende mittlere Wellenhöhen für grundberührenden Seegang als Minimalwerte:

brandungsfreies Watt:  $d \text{ (MThw)} \leq 5 \text{ m}$

$$\bar{H}_{g \text{ min}} = 0,5 \cdot \sqrt{d} - 0,64 \text{ [m]} \quad (\text{Gl. 2.07})$$

Randwatt:  $d \text{ (MThw)} \geq 2 \text{ m und } \leq 5 \text{ m}$

$$\bar{H}_{g \text{ min}} = 0,4 \cdot \sqrt{d} - 0,51 \text{ [m]} \quad (\text{Gl. 2.08})$$

Brandungswatt:  $d \text{ (MThw)} \geq 1 \text{ m und } \leq 4 \text{ m}$

$$\bar{H}_{g \text{ min}} = 0,4 \cdot \sqrt{d} - 0,8 \text{ [m]} \quad (\text{Gl. 2.09})$$

Voraussetzung für das Entstehen dieser Wellenhöhen ist in Abhängigkeit von der Windstärke eine ausreichende Streichlänge des Windes.

Die Größenordnung der horizontalen Orbitalgeschwindigkeit der so in Abhängigkeit von der Wassertiefe ( $d$ ) angebbaren minimalen Wellenhöhen kann über die Theorien von LAITONE und MAC COWAN (WIEGEL, 1964) abgeschätzt werden. Die hierfür geltenden Beziehungen sind in Abb. 2.15 dargestellt, wobei für die Laufgeschwindigkeit ( $c$ ) der Wellen im flachen Wasser ausreichend genau nach SIEFERT (1973) gilt

$$\bar{c} = \sqrt{g \cdot d \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\bar{H}}{d}\right)} \quad (\text{Gl. 2.10})$$



Abb. 2.14. Beispiele für die Wellenbeugung in Prieln (SIEFERT, 1973)

Vergleichsweise gibt ZENKOVICH (1967) für die maximale Orbitalströmungsgeschwindigkeit über Grund bei  $d/L < 0,5$ , hergeleitet aus dem hydrodynamischen Ansatz der Wellenbewegung, den Ausdruck an:

$$\max \bar{u}_H = \pi \cdot \bar{H} / \sqrt{\pi \cdot \frac{\bar{H}}{g} \cdot \sinh 4 \pi \frac{d}{L}} \quad (\text{Gl. 2.11})$$

Die hiermit ermittelten Orbitalgeschwindigkeiten weichen erheblich von den im Labor und in der Natur gemessenen Werten ab (ZENKOVICH, 1967), was u. a. auf die in diesem Ansatz nicht berücksichtigten Sohlreibungskräfte und Turbulenzeinflüsse zurückzuführen ist.

Eine Abschätzung der maßgebenden Orbitalgeschwindigkeit kann nur unter Berücksichtigung der Parameter für Sohlreibung und Turbulenz erfolgen. Die o. g. Ansätze von LAITONE und MAC COWAN (WIEGEL, 1964) bieten diese Voraussetzungen, kommen aber insbesondere für größere Verhältnisse  $\bar{H}/d (> 0,3)$  zu unterschiedlichen Ergebnissen (vgl. Abb. 2.15).

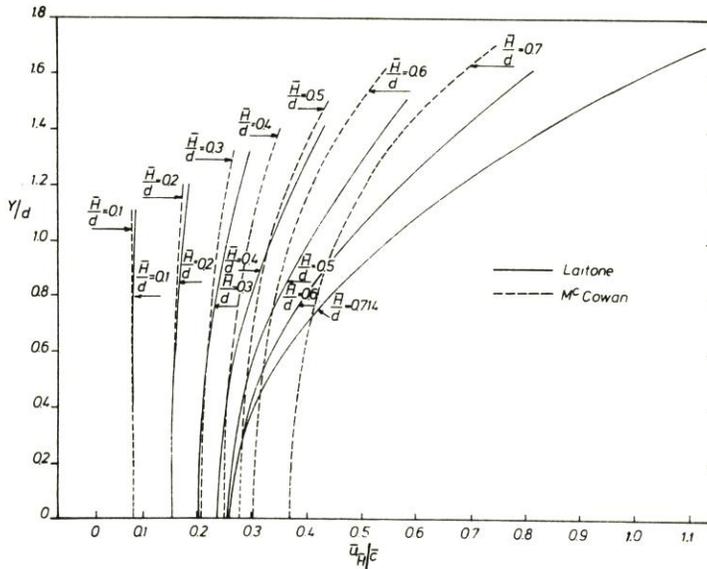


Abb. 2.15. Bestimmung der höchsten horizontalen Orbitalgeschwindigkeit  $\bar{u}_{max}$  für mittlere Wellenhöhen  $\bar{H}$  nach Einzelwellentheorien (nach LAITONE u. McCOWAN, WIEGEL, 1964)

Es ist somit in Abhängigkeit von der Wassertiefe ( $d$ ) der untere Grenzwert der Wellenhöhe  $\bar{H}$  angebar, ab dem der Einfluß auf das Sohlenmaterial einsetzt. Dieser Einfluß wächst mit steigender Wellenhöhe weiter an und hat in der höchstmöglichen, dann brechenden Welle mit zusätzlichen Turbulenzen durch den Lufteinschlag (FÜHRBÖTER, 1971) sein Maximum. Auf dem Watt brechen allerdings nicht nur die Wellen der Höhe  $H_{max}$ , sondern, in Abhängigkeit von der Wassertiefe und der Seegangcharakteristik, ein größerer Teil des Seegangsspektrums. SIEFERT (1973) schlägt vor, den brechenden Teil des Höhengspektrums zwischen  $H_{b\ min}$  und  $H_{max}$  zu legen, und zwar in der Form

$$H_{b\ min} = 0,5 d \text{ für } d < 0,1 T^2 \quad (\text{Gl. 2.12})$$

Dieser Grenzwert kann allerdings von den Naturmessungen heutiger Durchführung nicht geliefert werden, wie SIEFERT (1973) selbst angibt. Der Wert kann als plausibler Richtwert angesehen werden wegen des überwiegenden Einflusses der Wassertiefe auf die Wellenhöhe im Flachwasser unter Vernachlässigung der Wellensteilheit und weiterer Parameter.

Bei  $H > H_{b\ min}$  setzen Brandungserscheinungen ein. Auf  $\bar{H}$  bezogen, läßt sich somit unter Verwendung der von SIEFERT angegebenen Beziehungen

$$H_{max} \sim 2,5 \bar{H} \quad (\text{Gl. 2.13})$$

der Schwellenwert der einsetzenden Brandung mit

$$\bar{H}_{b\ min} > 0,2 d \quad (\text{Gl. 2.14})$$

angeben, wobei der auf mittlere Perioden  $\bar{T}$  umzurechnende Gültigkeitsbereich in Flachwassergebieten immer erfüllt ist.

Für den Bereich der sohlbeeinflussenden Wellenhöhen kann damit in Abhängigkeit von der Wassertiefe die Größenordnung der horizontalen Komponente der Orbitalgeschwindigkeit angegeben werden und mit der windbeeinflussten Tideströmung (Triftstrom, vgl. GÖH-

REN, 1968) überlagert werden. Mit Hilfe der von HJULSTRÖM (1935) angegebenen und von ZANKE (1977) erweiterten Beziehung (Abb. 2.16) ist der für den einsetzenden Geschiebetrieb („bed-load“) und die Aufwirbelung maßgebende Geschwindigkeitsgrenzwert in Abhängigkeit vom Korndurchmesser des Sohlenmaterials bestimmt, über den dann auf eine zunehmende Suspensionskonzentration geschlossen werden kann.

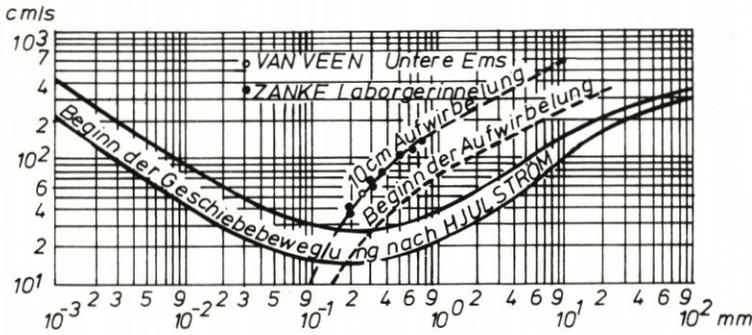


Abb. 2.16. Grenzgeschwindigkeit für einsetzenden Geschiebetrieb und beginnende Aufwirbelung in Suspension (nach HJULSTRÖM und ZANKE, 1977)

### 2.3.2 Temperatur des Wassers

CHRISTIANSEN (1974) hat im Elbemündungsgebiet den Einfluß der Wassertemperatur auf die Suspensionskonzentration festgestellt und mit der temperaturabhängigen Zähigkeit des Wassers und der damit verbundenen Änderung der Sinkgeschwindigkeit der suspendierten Feststoffteilchen begründet. Danach steigt bei sonst gleichen Voraussetzungen mit abnehmender Temperatur die Suspensionskonzentration an. Er stützt sich hierbei auf die von DILLO (1960) im Modellgerinne ermittelte, nicht dimensionsreine Beziehung (Abb. 2.17)

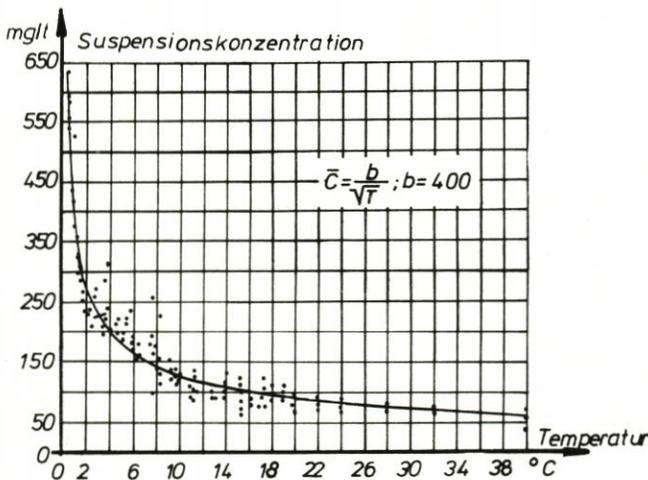


Abb. 2.17. Veränderung der Suspensionskonzentration mit den Wassertemperaturen für Süßwasser (DILLO, 1960)

$$\bar{C} = b \sqrt{T_C} \quad (\text{Gl. 2.15})$$

$$\bar{C} \text{ [mg/l], } b = 400 \text{ [-], } T_C \text{ [}^\circ\text{C]}$$

und den von LANE, CARLSON und MANSON (1949) angegebenen Korngrößenbereich  $< 0,3$  mm. Die aufgrund der temperaturabhängigen Sinkgeschwindigkeit (Abb. 2.06) zu erwartende Veränderung des Exponenten  $z$  (Gl. 2.02 und 2.03) hat DILLO allerdings nicht eindeutig feststellen können.

### 2.3.3 Salzgehalt und Koagulation

Beim Einfluß des Salzgehaltes sind grundsätzlich die Abhängigkeiten der Suspensionskonzentration vom Absolutwert des Salzgehaltes und vom Wert der Salzgehaltsschwankungen zu unterscheiden. Für steigende Absolutwerte des Salzgehaltes kommt DILLO (1960) im Versuchserginis zu dem Ergebnis, daß mit dem Salzgehalt auch die Suspensionskonzentration wächst (Abb. 2.18) und bei 30 ‰ etwa viermal so groß ist wie in reinem Wasser. Weiterhin wird die vertikale Verteilung der Suspension mit zunehmendem Salzgehalt gleichmäßiger, d. h., der Exponent  $z$  der Gl. 2.02 wird kleiner. In oberflächennahen Schichten ist demnach die Konzentrationszunahme größer als in tieferen Schichten. Die in Abb. 2.18 angegebene Beziehung gibt Mittelwerte der Konzentration dieser Verteilung an.

Die in Tideflüssen in Abhängigkeit vom Oberwasser und der Tidephase vorhandene Verschiebung der Brackwasserzone führt je nach Standort zu Schwankungen des Salzgehaltes. Diese lösen chemische und biologische Prozesse aus, die u. a. die Koagulation sehr feiner Partikel zu größeren Einheiten bewirken. Das Partikelpaket erhält hierdurch eine erhöhte Absinkgeschwindigkeit, was wiederum zu den bekannten Ausfällungen und Ablagerungen, insbesondere zu Stauwasserzeiten führt. LUCHT (u. a. 1953 u. 1964) hat über diese Erscheinung des Schlickfalles für das Elbeästuar umfangreiches Material zusammengestellt, auf das hier nicht näher eingegangen wird (vgl. Abschn. 3.2.2).

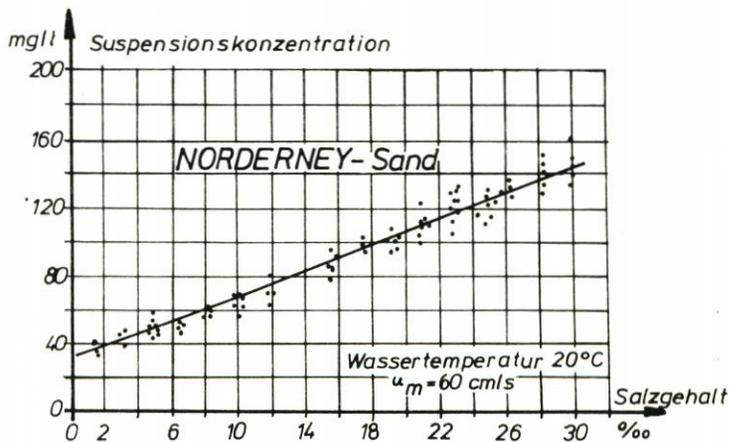


Abb. 2.18. Veränderung der Suspensionskonzentration mit dem Salzgehalt (DILLO, 1960)

## 2.4 Folgerungen für die Aufgabenstellung

Mit den vorgehenden Ausführungen ist erläutert, daß befriedigende Ansätze für die Suspensionsverteilung bisher nicht angegeben werden können. Dieses gilt insbesondere für die instationären Tidevorgänge. Es liegen heute nur vereinfachende Beschreibungen einzelner Einflußfaktoren (Parameter) auf die Suspensionsverteilung und -konzentration vor. Sie gehen auf Modellversuche mit den auftretenden Verzerrungen aus den Modellmaßstäben und auf Naturmessungen mit den jeweiligen ortsgebundenen Randbedingungen zurück.

In Anbetracht dieser Voraussetzungen wird das im Rahmen dieser Arbeit vorzustellende Datenmaterial beschrieben und kritisch gewertet mit dem Ziel, allgemeinere Aussagen über die Suspension in Flachwassergebieten zu erarbeiten.

## 3. Messungen und Fehlerabschätzungen

### 3.1 Meßprogramm und Geräteeinsatz

Für die in Abschn. 1 formulierte Zielsetzung sind die Suspensionskonzentrationen mit dem von GÖHREN und LAUCHT (1979) entwickelten Gerät für automatische Messungen und Registrierungen suspendierter Feststoffe durchgeführt worden. Dieses Gerät ist im Rahmen des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ entwickelt worden.

Aufbauend auf die mit diesem Gerät durch GÖHREN vor Scharhörn (S) in den Jahren 1972, 1975 und 1976 erzielten Meßergebnisse, ist das weitere Meßprogramm 1977 sowohl vor Scharhörn als auch an der Scharhörnbalje (SB) durchgeführt worden. Die Wahl des zusätzlichen Standorts Scharhörnbalje (SB) ergab sich aus dem Bestreben, nicht nur aus dem brandungsbeaufschlagten Bereich vor Scharhörn, sondern auch aus brandungsfreien Watten Meßergebnisse vorzulegen und damit unterschiedliche Seegangscharakteristiken zu erfassen.

Die Standorte der Stationen sind in Abb. 1.01 eingetragen und mit nachstehenden GAUSS-KRÜGER-Koordinaten beschrieben:

- Scharhörn (S), brandungsbeaufschlagtes Randwatt:  $R = 34636 / H = 59822$
- Scharhörnbalje (SB), brandungsfreies Watt:  $R = 34655 / H = 59791$

Zur Messung der wesentlichen Einflußparameter sind den Hauptgeräten weitere Geräte für die Messungen von Wellen, Strömung und Wassertemperatur zugeordnet worden. Die Winddaten wurden von der ständig arbeitenden Windstation auf Scharhörn geliefert.

Die Geräte und insbesondere die elektrischen Anlagenteile des Schwebstoffmeßgeräts (vgl. hierzu Abschn. 3.2) sind wöchentlich gewartet worden. Auf die erschwerten Bedingungen für die praktische Durchführung der Wartungsarbeiten wird hier nicht näher eingegangen. Die ordnungsgemäße Arbeitsweise der Schwebstoff-, der Wellen- und der Temperaturmeßgeräte ist nur in der Zeit der Wasserführung (ca. 3 Stunden vor bis nach Hochwasser), die des Strömungsmeßgerätes aber nur um Niedrigwasser überprüfbar.

Die Höhenkoten der Geräte sind bestimmt einerseits durch das Streben nach möglichst langen Meßreihen und demzufolge tiefen Standorten und andererseits durch die für Aufbau, Wartung und Reparatur erforderliche, ausreichend lange Trockenfallzeit und damit hohen Standorten. Unter Berücksichtigung mittlerer Tideverhältnisse sind deshalb beide Stationen auf einer Höhenkote von +0,5 m SKN aufgestellt worden.

Die Einsatzzeit der Geräte über das Jahr ist durch die eisfreie Zeit vorgegeben und schwankt je nach Dauer des Winters. Da die Geräte in jedem Fall über Winter abgebaut

werden mußten, konnten die eigentlichen Meßprogramme nur in der eisfreien Zeit etwa zwischen Anfang April und Ende November jeden Jahres abgewickelt werden. Dabei ist der besonders interessierende Zeitraum der Starkwindmessungen im allgemeinen begrenzt auf die Monate Oktober und November.

### 3.2 Meßgeräte und Meßverfahren mit Fehlerabschätzung

#### 3.2.1 Suspensionsmessungen

Zur Ermittlung des Feststoffgehaltes im Wasser gibt es zahlreiche ältere Verfahren, die überwiegend von der Bestimmung der Feststoffmasse durch Filtern oder Zentrifugieren ausgehen (CHRISTIANSEN, 1974). Daneben sind auch fotoelektrische Trübungsmessungen mit gutem Erfolg angewendet worden (WÜNSCHE, 1976). Alle diese Meßmethoden erfordern aber einen erheblichen manuellen Bedienungsaufwand. Sie können deshalb nur vom Schiff oder von größeren bemannten Stationen aus durchgeführt werden und verbieten in der Regel einen Einsatz bei stürmischem Wetter (etwa ab 5 Bft).

Das von GÖHREN und LAUCHT (1972) entwickelte Gerät ist so konzipiert, daß es auch bei schweren Wetterlagen zu Meßergebnissen führt, um gerade diesen für die küstenmorphologischen Veränderungen wichtigen Windstärkenbereich erfassen zu können. Diesem Gerät (Abb. 3.01 bis 3.07) liegt als meßtechnisches Verfahren die direkte Bestimmung der Feststoffmasse in der Volumeneinheit Wasser zugrunde. Hierbei wird auf den Einsatz der fotoelektrischen Trübungsmessmethode wegen des zu erwartenden Bewuchses der Optik und der Schwierigkeit der Eichung bei sich verändernder Zusammensetzung der suspendierten Feststoffe verzichtet.

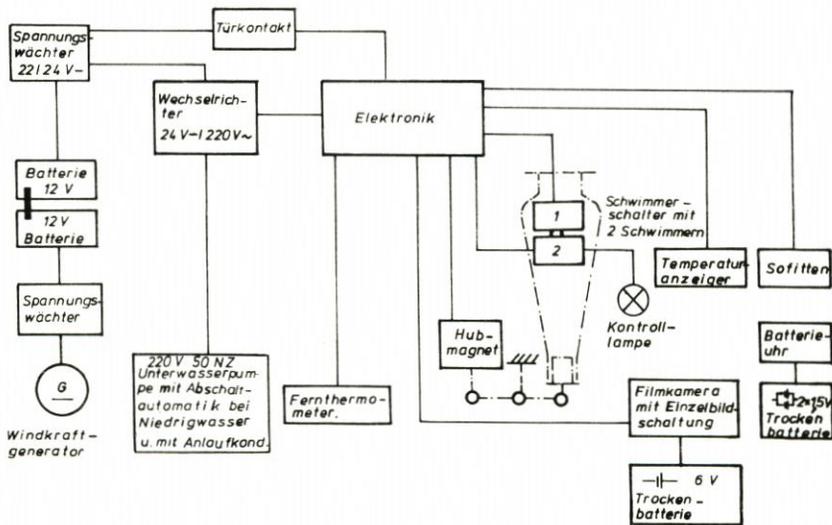


Abb. 3.01. Übersichtsplan Schwebstoffmeßgerät

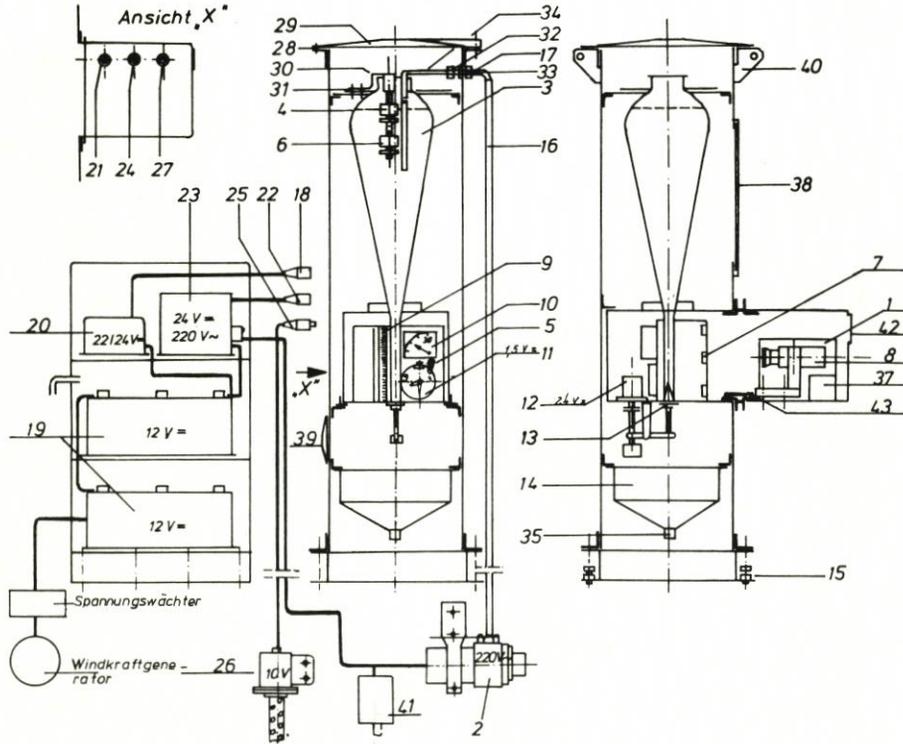


Abb. 3.02. Schwebstoffmeßgerät (nach GÖHREN und LÄUCHT)

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Elektronik zur Funktionssteuerung</li> <li>2. Wechselstrompumpe, 220 V, zur Förderung der Probe</li> <li>3. Absetzgefäß, Inhalt 20 l</li> <li>4. Schwimmerschalter zur Begrenzung der Füllhöhe</li> <li>5. Kontrolllampe für ordnungsgemäßes Arbeiten des Gerätes</li> <li>6. Schwimmerschalter als Geber für die Kontrolllampe</li> <li>7. Soffitten zur Beleuchtung der Meßeinheiten</li> <li>8. Super-8-Filmkamera in Einzelbildschaltung</li> <li>9. Meßskala für Suspensionsmessung</li> <li>10. Anzeigergerät des Fernthermometers</li> <li>11. batteriegetriebene Zeit- und Datenuhr</li> <li>12. Hubmagnet zum Öffnen des Meßrohrverschlusses</li> <li>13. konischer Meßrohrverschluß</li> <li>14. Abflußtrichter</li> <li>15. Justierschrauben für lotrechte Aufstellung</li> <li>16. Förderleitung zwischen Pumpe (2) und Absetzgefäß (3)</li> <li>17. Schlauchanschluß</li> <li>18. Stromversorgungskabel für das Schwebstoffmeßgerät</li> <li>19. 2 Pufferbatterien, 12 V</li> <li>20. Überspannungswächter</li> <li>21. Gerätestecker für Stromversorgung am Schwebstoffmeßgerät</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>22. Steuerkabel für die Förderpumpe (2)</li> <li>23. Wechseltrichter für den Betrieb der Wechselstrompumpe (2)</li> <li>24. Gerätebuchse für Wechseltrichter am Schwebstoffmeßgerät</li> <li>25. Stromversorgungs- und Meßkabel für Thermometer</li> <li>26. Temperaturegeber</li> <li>27. Gerätebuchse für Thermometer am Schwebstoffmeßgerät</li> <li>28. Griffmuttern</li> <li>29. Deckel des Schwebstoffmeßgeräts</li> <li>30. Halterung der Schwimmerschalter</li> <li>31. Schraubverbindung zum Herausnehmen der Schwimmerschalter</li> <li>32. Überwurfmutter</li> <li>33. Rohrverschraubung zum Lösen des Einlaufrohres (34)</li> <li>34. Einlaufrohr</li> <li>35. Stützen des Abflußtrichters (14)</li> <li>36. Auffangbehälter (entfallen)</li> <li>37. Hochleistungsbatterie für Kamera (8)</li> <li>38. mit Deckel verschlossene Kontrollöffnung</li> <li>39. Kontrollöffnung für Magnetverschluß</li> <li>40. Heisaugen für Transport</li> <li>41. Gerätabshalter bei Niedrigwasser</li> <li>42. abdeckbares Sichtfenster</li> <li>43. Schalter für Stromunterbrechung beim Öffnen des Deckels</li> </ol> |
|--|---|

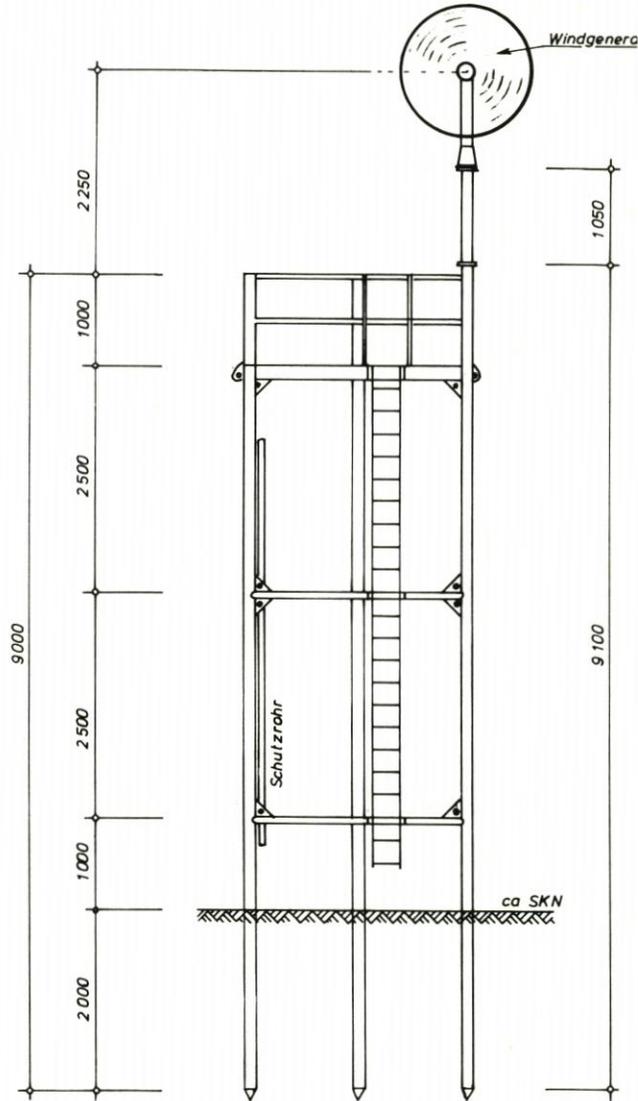


Abb. 3.03. Träger des Schwebstoffmeßgerätes

Eine Unterwasserpumpe fördert in regelmäßigen Zeitabständen eine Wasserprobe in einen hochwasserfrei angebrachten Absetztrichter. Die suspendierten Feststoffe setzen sich dann in einem darunterliegenden zylindrischen Meßrohr ab und werden am Ende der Sedimentierzeit fotografisch registriert. Danach wird der Behälter über ein Magnetventil geleert und steht zum neuen Meßvorgang zur Verfügung. Das Auffangen der ablaufenden Suspension zur Feststellung der Kornverteilung ist wegen räumlicher und auch meßtechnischer Beschränkungen nicht durchführbar gewesen (GÖHREN u. LAUCHT, 1972).

Die für die Pumpen, die fotografische Beleuchtung und die Verschlussöffnung erforderliche Energie wird durch einen Windkraftgenerator mit zwischengeschalteten Pufferbatterien erzeugt. Das Gerät ist somit unabhängig von fremden Energiequellen.

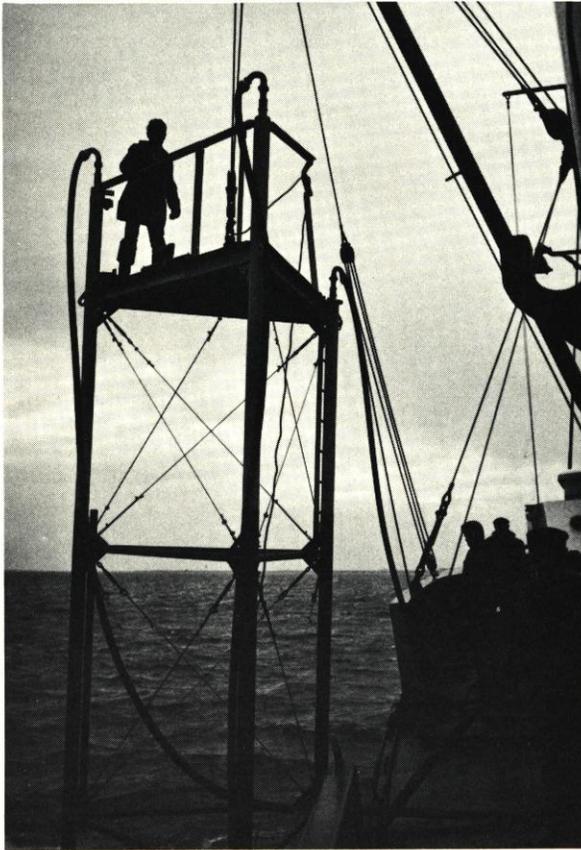


Abb. 3.04. Aufbau der Station – Einspülvorgang



Abb. 3.05. Meßstation vor Scharhörn mit „MS Hundebalje“

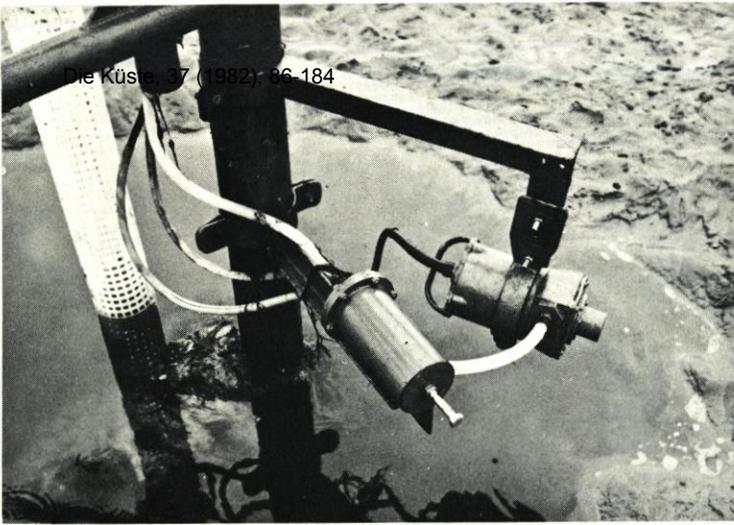
Das Probenvolumen beträgt 20 l bei einer geringfügig mit der Förderhöhe schwankenden Pumpenförderzeit von 3 bis 4 Minuten. Dieses Volumen ergibt auch bei geringen Feststoffkonzentrationen noch meßbare Absetzmengen. Das Volumen des Meßrohres selbst ist in Anlehnung an die bisher im Watt vor Cuxhaven/Neuwerk gemessenen Feststoffkonzentrationen auf einen maximalen Wert von 2000 mg/l (GÖHREN, 1971) ausgelegt worden. Für die Messungen ist ein einstündiger Zeitrhythmus gewählt worden, um zwischen den Pumpvorgängen eine ausreichende Zeitspanne (ca. 55 Minuten) für das Absetzen zur Verfügung zu haben.

Die eigentliche Registrierung der Meßdaten erfolgt mittels handelsüblicher Super-8-Schmalfilmkamera, die in Einzelbildschaltung, gesteuert über einen an die Elektronik angeschlossenen Magnetauslöser, zu jeder vollen Stunde den Meßzylinder, die Zeituhr, den Temperaturanzeiger und die Kontrollampe der Pumpe fotografiert (vgl. Abb. 3.07).

Bezüglich der Fehlermöglichkeiten beim Pumpvorgang der Probenentnahme müssen folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Höhe des Absaugstutzens der Pumpe über der Sohle,
- Absauggeschwindigkeit und Absaugrichtung im Pumpenstutzen relativ zur Anströmung,
- Entmischung in der Förderleitung,
- Eichung der Meßeinheit.

Die Höhe des Absaugstutzens wird dadurch bestimmt, daß ROUSE für turbulente Fließvorgänge den Wert  $y = 0,05 d$  für den Trennungsbereich zwischen „bed-load“ und „suspension-load“ angibt. Angewandt auf die Tiefenverhältnisse der beiden Stationen (S) und (SB) mit  $d = \text{ca. } 3 \text{ m}$  bei mittlerem Tidehochwasser, ergibt dieses einen Wert von  $a = 0,15 \text{ m}$

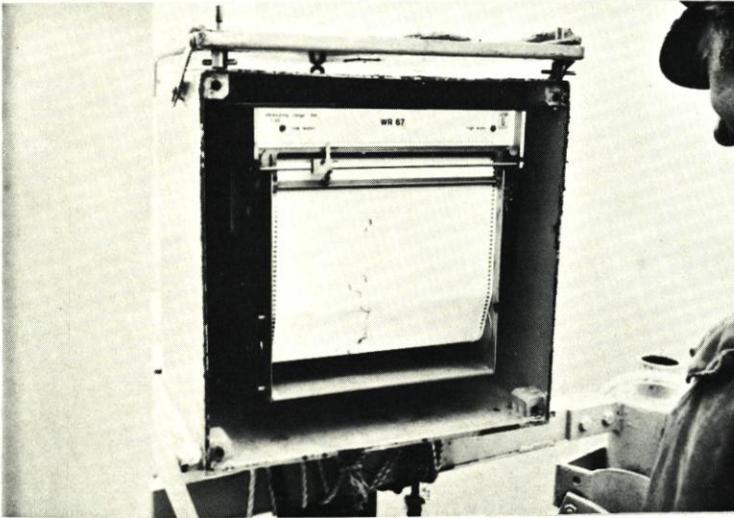


113

Förderpumpe

Tnw-Abschalter

Wellenrohr



Wellenschreiber  
( DHI )



Wattstrommesser

Abb. 3.06. Einzelgeräte

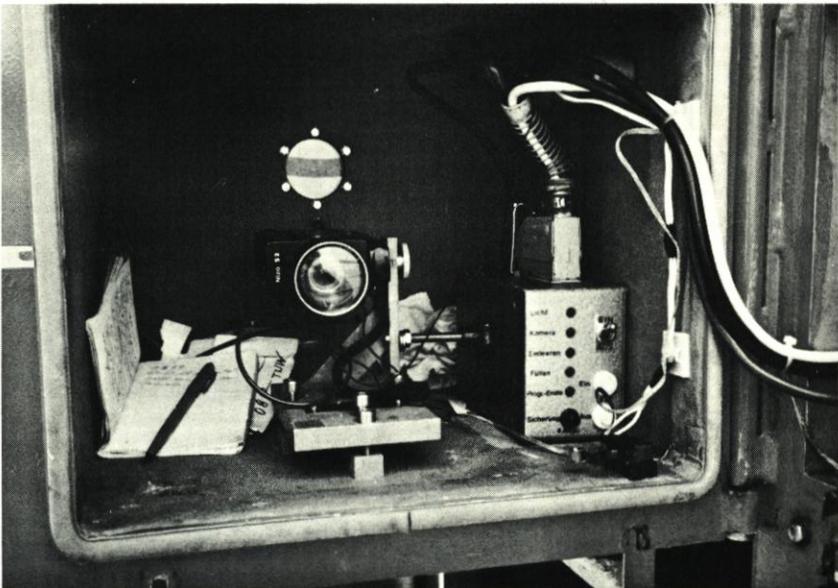
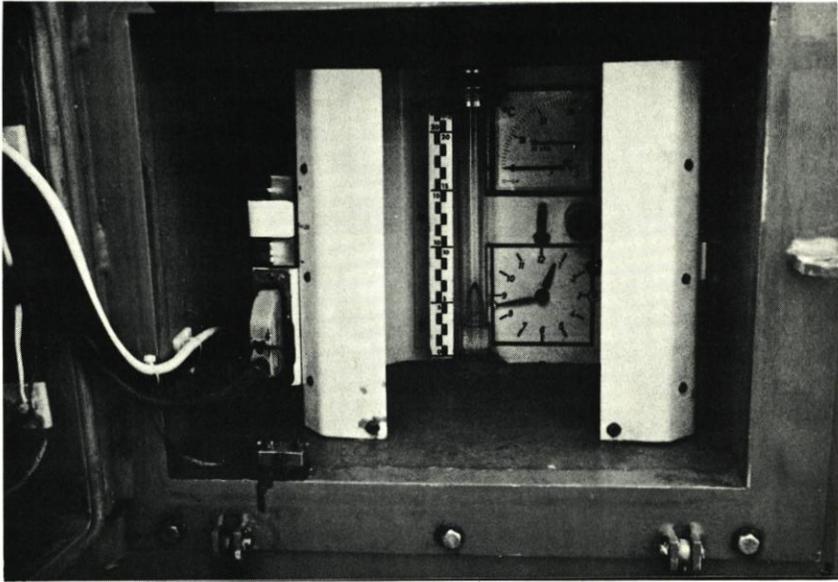


Abb. 3.07. Meß- und Registriereinheit

über der Sohle. Da aber insbesondere bei auflandigen Starkwinden bei mehr als 5 m hohen Wasserständen zu messen ist, wird dann  $a = 0,25$  bis  $0,3$  m. Um für die schwankenden Wassertiefen in jedem Fall oberhalb des Übergangsbereiches von „bed-load“ zu „suspension-load“ zu messen, ist  $a = 0,35$  m gewählt worden.

Der Einfluß der Geschwindigkeit und der Richtung beim Absaugen der Meßprobe ist von CHRISTIANSEN (1974) anhand der Untersuchungsergebnisse von NELSON und BENEDICT (1931) diskutiert worden. Das für Stromrinnen ermittelte Ergebnis kann sinngemäß auf die Verhältnisse auf dem Watt übertragen werden. Ideale Verhältnisse liegen vor, wenn

- die Anströmgeschwindigkeit gleich der Absauggeschwindigkeit ist,
- der Absaugstutzen in Richtung auf die Strömung zugestellt wird,
- ein gleichmäßiger Abpumpvorgang gewährleistet ist,
- die Absaugvorrichtung möglichst strömungsgerecht ausgebildet ist.

Diese Voraussetzungen sind bei einem automatisch arbeitenden Gerät mit sich über die Tide ändernden Strömungsrichtungen und mit in Abhängigkeit von den Windverhältnissen schwankenden Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu erfüllen. Deshalb sind die auftretenden Fehler abzuschätzen und in die weiteren Betrachtungen mit einzubeziehen. Die Pumpe ist aus konstruktiven Gründen starr montiert worden (ohne die ideal um  $360^\circ$  schwenkbare Absaugvorrichtung), unter Berücksichtigung der Hauptstromrichtungen für die Tidephasen.

Die Absauggeschwindigkeiten in der durch ein Reduzierstück verjüngten Absaugöffnung der Pumpe beträgt rd.  $50$  cm/s. Sie entspricht damit nach GÖHREN (1971) dem Häufigkeitsmaximum der Strömungsgeschwindigkeit bei Starkwinden (Abb. 3.08).

CHRISTIANSEN (1974) hat die von NELSON/BENEDICT angegebene Beziehung zwischen gemessenem und wahren Suspensionsgehalt interpretiert in Hinblick auf die für das Elbestuar geltenden Verhältnisse (mittlerer Korndurchmesser der Suspension  $d \sim 0,08$  mm in Abhängigkeit vom Quotienten Absaug-/Anströmgeschwindigkeit). Der Einfluß der Vergrößerung der Absaugstutzenöffnung von  $6,4$  auf  $20$  mm ist in Abb. 3.09 eingetragen. Auch der Fehlereinfluß der Schräganstellung des Absaugstutzens zur Stromrichtung ist aus der hierfür

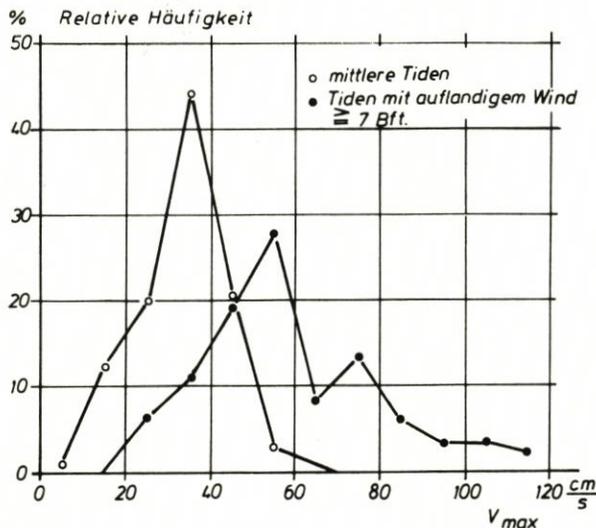


Abb. 3.08. Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Neuwerker Watt bei mittlerer Tide und Starkwindwetterlagen (GÖHREN, 1971)

|  | Min. | Max (90%) |        |
|--|------|-----------|--------|
| Anströmgeschwindigkeit ( $u_{An}$ )      | 0    | 80        | [cm/s] |
| Absauggeschwindigkeit ( $u_{Ab}$ )       | 40   | 50        | [ " ]  |
| Quotient $u_{Ab}/u_{An}$ (90%)           | 0,5  | $\infty$  |        |
| Ansaugöffnung $\phi$                     | 20   | 20        | [mm]   |
| Schräganströmung                         | 0    | 90        | [°]    |
| Mittlerer Korndurchmesser der Suspension | 0,08 | 0,08      | [mm]   |

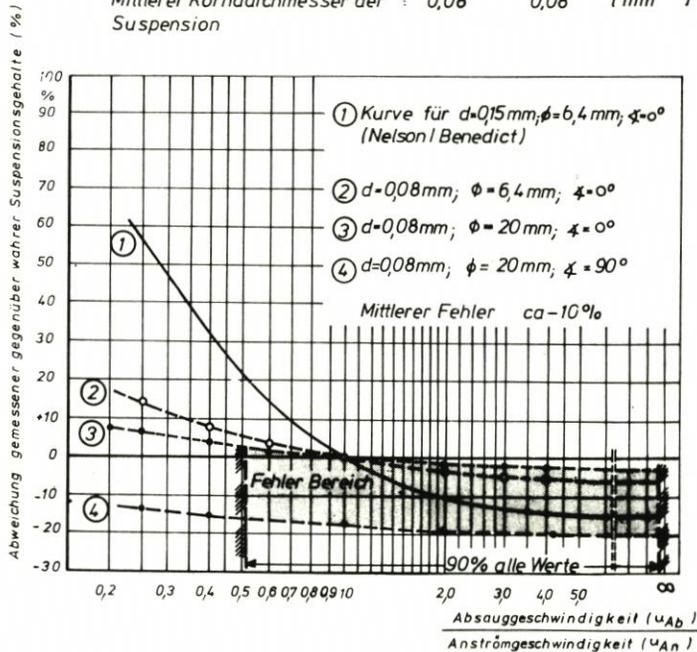


Abb. 3.09. Fehlerabschätzung beim Ansaugen der Wasserprobe nach NELSON und BENEDICT (1931)

von NELSON/BENEDICT angegebenen Beziehung herzuleiten. Bei Beachtung der demgegenüber geringeren Korngrößen und der größeren Anströmwinkel ist eine mittlere Fehlersumme von 10 % plausibel abzuschätzen. Die gemessenen Konzentrationen liegen damit etwa 10 % unter den tatsächlich vorhandenen.

Die Proben können sich in der Förderleitung in gewissem Umfang wegen des Schlupfes zwischen Feststoffteilchen und dem transportierten Wasser (größen- und gewichtsbedingte Unterschiede der Sinkgeschwindigkeiten der Feststoffteilchen) entmischen. Bei einem Größtkorn von  $d_{max} \sim 0,3\text{ mm}$  (Abb. 4.03) ergibt sich unter Berücksichtigung der von ROUSE (Abb. 2.06) angegebenen Fallgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen Größt- und Kleinstkorn für eine mittlere Geschwindigkeit in der Förderleitung von rd. 50 cm/s eine Fehlermöglichkeit von etwa 1 %. CHRISTIANSEN (1974) kommt bei seinen mit größerem Material und größerer Fördergeschwindigkeit durchgeführten Versuchen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Die Eichung der Meßeinheit ist von GÖHREN und LAUCHT (1972) mitgeteilt. Die dort beschriebenen Eichkurven sind für die hier vorliegenden Verhältnisse durch Kontrollversuche überprüft worden. Für die Eichung des Gerätes geht es um die Beziehungen

- Feststoffkonzentration [ $\text{cm}^3/\text{l}$  bzw.  $\text{mg}/\text{l}$ ] in Abhängigkeit von der Absetzhöhe im Meßzylinder und
- Absetzvolumen [% v. Ges.Vol.] in Abhängigkeit von der Absetzzeit.

Kornverteilungen des Versuchsmaterials und mit diesem Material im IMHOFF-Becher ermittelte Absetzkurven sind in Abb. 3.10 dargestellt. Sie bestätigen im Mittel den von

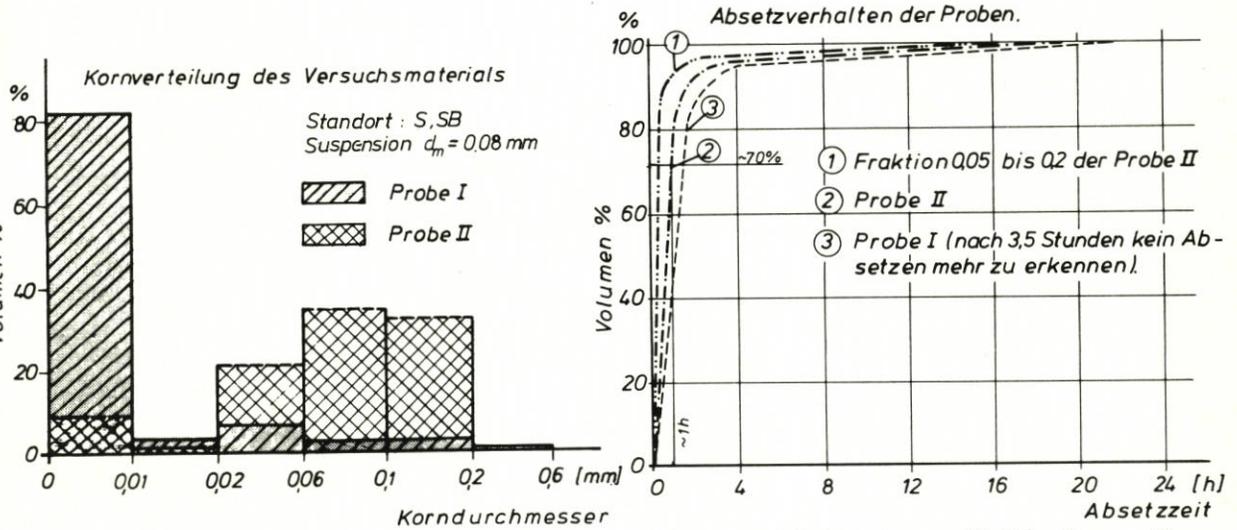


Abb. 3.10. Bestimmung des Absetzverhaltens an zwei Proben mit unterschiedlicher Kornverteilung

GÖHREN und LAUCHT (1972) bei einer Streuung von rd. 10 % angegebenen Kurvenverlauf (Abb. 3.11). Die Anwendung des Mittelwertes auf die Standorte S und SB im Watt vor Cuxhaven ist plausibel, zumal es sich in beiden Fällen nicht um „Schlickwatt“ mit feinem Material und entsprechend langen Absetzzeiten handelt. Der in der Eichfunktion auf eine Stunde Absetzzeit bezogene Maßstab der Feststoffkonzentration ist anhand der mittleren Absetzkurve auf 24 Stunden Absetzzeit und damit auf 100 % Feststoffvolumen umrechenbar (Abb. 3.12). Die Umrechnung des aus der Eichfunktion abzulesenden Feststoffvolumens in die Trockengewichtseinheit aus den bei unterschiedlichen Wetter- und Tidebedingungen genommenen Proben ergibt als Mittelwert ein Verhältnis von Feststoffvolumen zu Trocken-

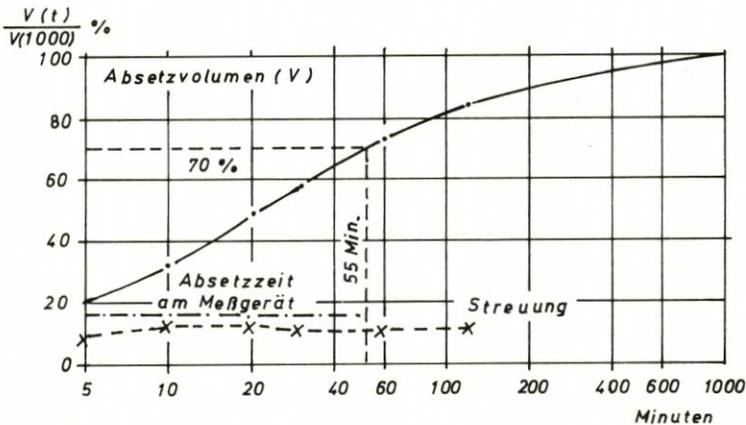


Abb. 3.11. Normierte Absetzkurve für Meßbehälter, ermittelt aus 16 Einzelversuchen (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

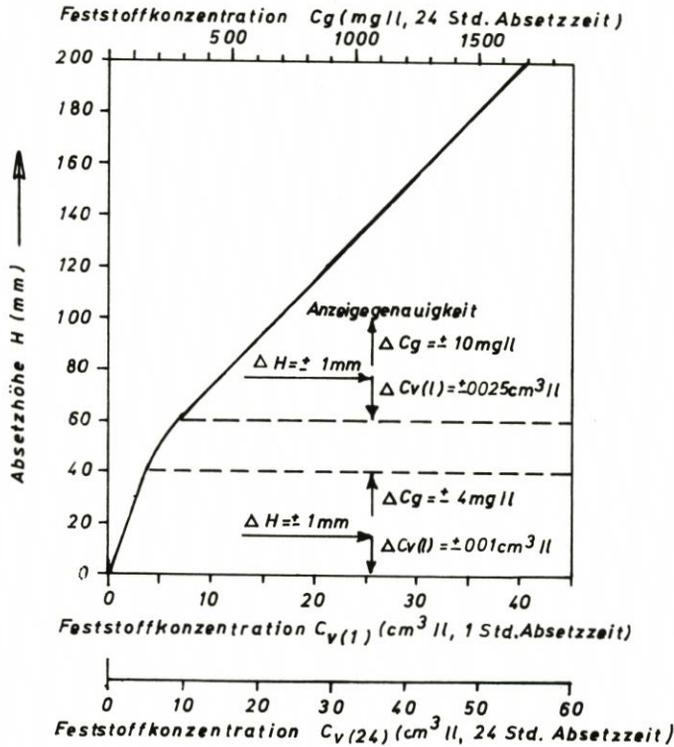


Abb. 3.12. Eichfunktion (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

gewicht von 3,3 mit einer Streuung von 30 %. Auf diese Streuungen haben auch GÖHREN und LAUCHT (1972) hingewiesen und mit der von den wechselnden Kornverteilungen abhängigen Lagerungsdichte erklärt.

### 3.2.2 Messungen weiterer Parameter

Neben den in Abschn. 3.2.1 beschriebenen Messungen sind nach den gegebenen personellen und witterungsabhängigen Möglichkeiten nachstehende Parameter gemessen worden:

- Richtung und Geschwindigkeit der Tideströmungen,
- Wellenkennwerte,
- Wassertemperaturen,
- Kornverteilung des Sohlmaterials im Umfeld der Stationen,
- Windrichtung und -stärke am Standort Scharhörn,
- Tidekurve am Pegel Scharhörn.

Für die Strömungsmessungen sind die von GÖHREN (1964 u. 1968) für den Einsatz im Flachwasser entwickelten und in vielen Meßreihen bewährten Wattdauerstrommesser (Abb. 3.06) verwendet und auf gleicher Höhenkote wie das Schwebstoffgerät (0,35 m über der Sohle) installiert worden.

Die Wellenmessungen sind mit fest auf den Meßgerüsten (Abb. 3.03) montierten

„DHI-Wellenschreibern“ durchgeführt worden. Die Aufzeichnungen der Geräte erfolgen in Abhängigkeit von der Wellenintensität und ermöglichen über die mittlere Wellenperiode  $\bar{T}$  die Berechnung der mittleren Wellenhöhe  $\bar{H}$  und der sich daraus ableitenden weiteren Kenngrößen (vgl. SCHRADER, 1968). Mit dieser Meßeinheit hat u. a. auch SIEFERT (1973) einen Teil seiner Messungen zur Bestimmung der Seegangscharakteristik im Flachwassergebiet durchgeführt.

Die Wassertemperaturen sind elektrisch über ein Fernthermometer gemessen und unter Mitbenutzung der Filmkamera als Registriereinheit aufgezeichnet worden.

Die Kornverteilung des Sohlmaterials wurde im Umkreis von rd. 50 m der Station anhand von Proben aus den oberen 10 cm des Wattes bestimmt.

Windrichtung und Windstärke standen als 3-Stunden-Mittelwerte über die Hamburger Windstation auf Scharhorn zur Verfügung (ANTFANG, 1969; SIEFERT, 1972). Die auf Scharhorn gemessenen Winddaten wurden als Bezugswerte für beide Standorte herangezogen, da die Stationen (S) und (SB) nur 1 bzw. 3 km bei flachem Watt von der Windstation Scharhorn entfernt lagen und damit ausreichend genau die Windverhältnisse erfaßt haben.

Die Tidekurven wurden dem von der Wasser- und Schiffsverkehrsverwaltung betriebenen Schreibpegel Scharhorn entnommen. Diese Aufzeichnungen sind genügend genau für die Stationen (S) und (SB) gültig.

Auf die Messung der Parameter Salzgehalt und Koagulation ist verzichtet worden. SIEFERT (1970) hat zu den Salzgehaltsverhältnissen im Elbemündungsgebiet erläutert, daß der Salzgehalt im Watt um Scharhorn für mittlere Verhältnisse etwa 24 bis 26 ‰ beträgt und über die Tide und die Tiefe nur wenig schwankt. Lediglich das Oberwasser führt zu Salzgehaltsveränderungen von etwa  $\pm 3$  ‰. Unter Zuhilfenahme der von DILLO (1960) angegebenen Beziehung (Abb. 2.18) ergibt sich hieraus eine Fehlermöglichkeit für die Suspensionswerte von etwa  $\pm 10$  mg/l.

Über die Koagulation, wie sie aus Schwankungen des Salzgehaltes abgeleitet wird, hat CHRISTIANSEN (1974) berichtet, daß sie im Bereich Neuwerk/Scharhorn praktisch ohne Einfluß auf die Suspensionskonzentrationen ist. Hierbei wird nicht ausgeschlossen, daß kleinere Flockenteilchen anderer Herkunftsorte durch die Strömungsverhältnisse den Meßstellen zugeführt und damit meßtechnisch erfaßt werden.

#### 4. Aufbereitung der Messungen

##### 4.1 Allgemeines zum Datenmaterial

Die Messungen der Suspension sind, wie bereits w. o. ausgeführt, mit Streuungen und systematischen Fehlern behaftet. Für die weitere Auswertung wurde eine Idealisierung in folgender Form vorgenommen:

Wegen der Streuung wurden aus zugeordneten Einzelmessungen Mittelwerte gebildet. Die in Abschn. 3.2.1 angegebenen systembedingten Fehlereinflüsse (max. etwa 11 % zu geringe Werte) beziehen sich jeweils auf eine vollständige Tide. Sie können wegen der Veränderungen während einer Tide nicht ohne weiteres auf den einzelnen Meßwert übertragen werden. Der hieraus resultierende Fehlereinfluß blieb deshalb unberücksichtigt. Die angegebene Fehlermöglichkeit aus den Salzgehaltsschwankungen von  $\pm 10$  mg/l wurde ebenfalls nicht in Ansatz gebracht.

Weiter wurde in Anlehnung an SCHRADER (1968) der Begriff „Windsektor“ eingeführt,

und zwar zwecks Unterscheidung der bereichsweise unterschiedlichen Zusammenhänge zwischen Suspension, Wind, Strömung und Tide für die zwei Standorte (S) und (SB) mit deren unterschiedlichen morphologischen und Tiderandbedingungen.

#### 4.2 Suspensionskonzentrationen, Windsektoren

Insgesamt sind etwa 400 Meßreihen mit über 3000 Einzelwerten bearbeitet worden. Eine Meßreihe umfaßt bei mittleren Tideverhältnissen etwa acht Einzelmessungen. Je nach Windstärke und -richtung verändert sich diese Anzahl für eine Tide in Abhängigkeit vom Wasserstand.

Die Suspensionsmessungen wurden nach den Schmalfilmen über Kleinbildprojektoren mit einer Ablesegenauigkeit der Höhen der abgesetzten Feststoffe von  $\pm 1$  mm ausgewertet. Über die Eichkurve (Abb. 3.12) ergeben diese im unteren Bereich des Suspensionsgehaltes eine Genauigkeit von  $\pm 4$  mg/l, im Bereich höherer Konzentrationen von  $\pm 10$  mg/l.

Da die Suspensionsmessungen über einen mehrmonatigen Zeitraum und damit bei unterschiedlichen Wassertemperaturen durchgeführt worden sind, bleiben die von DILLO (1960) im Gerinne ermittelte Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen (vgl. 2.3.2) und die Übertragbarkeit auf die Meßreihen zu überprüfen. Die Versuche von DILLO basieren auf  $d_{50} = 0,2$  mm für Norderney-Sand. Das Sohlmaterial des Standortes Scharhörn (S) hat einen Mittelwert  $d_{50} = 0,15$  mm und das des Standortes Scharhörnbalje (SB) einen Mittelwert  $d_{50} = 0,13$  mm. Wegen der Vergleichbarkeit der Korngrößen und wegen  $d < 0,3$  mm (vgl. 2.3.2) wird von der Übertragbarkeit dieser Beziehung ausgegangen. Die Suspensionswerte wurden nach DILLO zum Meßwert mit der niedrigsten Wassertemperatur ( $T_C = 4$  °C) in der Form

$$C_C = C \cdot \sqrt{T_C} \quad (\text{Gl. 4.02})$$

ins Verhältnis gesetzt. Die Suspensionsmessungen sind dann für die weitere Bearbeitung als temperaturbereinigte und auf 4 °C bezogene Konzentrationswerte anzusehen.

Zur Beschreibung der Veränderung der Suspensionskonzentration über die Tide – Suspensionsganglinie – sind aus Einzelwerten  $C_C$  der Meßreihen für zugehörige Wellenergebnisse  $\bar{H} = n \cdot 10 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}$  die Mittelwerte  $\bar{C}_{CH}$  aus 4 bis 10 Einzelwerten gebildet worden. Die so ermittelten Werte geben die zu einem vorgegebenen Wellenergebnis gehörende mittlere Suspensionskonzentration zu einem bestimmten Tidezeitpunkt an.

Weiterhin sind zur Beschreibung einer vollständigen Tide die Einzelwerte einer Meßreihe zu Mittelwerten  $\bar{C}_C$  zusammengefaßt. Eine Aufgliederung in Halbtidewerte, wie in der Literatur häufig vorgenommen (z. B. CHRISTIANSEN, 1974) erfolgte nicht, da eine sinnvolle Trennung mit zunehmendem Windeinfluß nicht mehr möglich ist, wie später erläutert wird (vgl. 5.2.2.1). Der über eine Tide integrierte Wert wurde mit Hilfe des Quotienten  $t_T/t_M$  (Dauer der zugehörigen Tide zur Dauer der mittleren Tide) auf mittlere Tideverhältnisse bezogen:

$$\bar{C}_{CT} = 1/n \cdot t_T/t_M \int_0^n C_C \cdot dn \quad (\text{Gl. 4.01})$$

(n: Anzahl der Meßwerte  $C_C$  während einer Tide [Tnw bis Tnw])

$\bar{C}_{CT}$  gibt dann die auf eine mittlere Tidedauer bezogene mittlere Feststoffkonzentration pro Liter Wasserprobe an.

Die nach vorstehenden Betrachtungen aufbereiteten Suspensionswerte werden weiterhin nach Windsektoren geordnet (vgl. Abschn. 4.1). Diese Aufgliederung ist bereits von SCHRADER (1968) und insbesondere von SIEFERT (1971 u. 1973) eingeführt worden, um bei den Wellenuntersuchungen die Unterschiede der Wellenkennwerte für die einzelnen Bereiche (Sektoren) und für die verschiedenen Standortbedingungen (hier für S und SB) zu bestimmen. Diese sektorale Gliederung wird wegen der besonderen Bedeutung der Wellen für die Suspensionskonzentration auf die Ordnung der Meßwerte übertragen. Die über drei Stunden ermittelten Windwerte mit den darin enthaltenen Richtungsschwankungen rechtfertigen hier nicht die genaue Sektorentrennung nach SIEFERT (1971). Die Sektoren werden deshalb mit 10° Überlappung wie folgt festgelegt:

Standort Scharhörn:

Sektor 1: Windrichtung: 350°–120°

Sektor 2: Windrichtung: 110°–220°

Sektor 3: Windrichtung: 210°–250°

Sektor 4: Windrichtung: 240°–360°

Standort Scharhörnbalje:

Sektor 1: Windrichtung: 350°– 70°

Sektor 2: Windrichtung: 60°–120°

Sektor 3: Windrichtung: 110°–220°

Sektor 4: Windrichtung: 210°–360°

Die Windsektoren sind in Abb. 4.01 eingetragen.

#### 4.3 Seegang

Die Wellenmessungen sind aus Block- und Schnellschrieben mit jeweils 50 aufeinanderfolgenden Wellen ausgewertet. Aus den ermittelten Wellenkennwerten wurden die mittleren Wellenhöhen um Hochwasser ( $\bar{H}$ ) als Bezugsgrößen zur Suspension gewählt. Der sonst häufig für Wellenbetrachtungen angesetzte Quotient aus  $\bar{H}/d$  bleibt hier wegen der im Tidegebiet wechselnden Wassertiefen und des dadurch in den Bereich kleinerer Wasserstände verschobenen Maximums außer Betracht. Auf eine Verknüpfung der mittleren Wellenhöhe mit der Tidedauer wurde verzichtet, da die Wellenhöhe nur sekundär von der Tidedauer, aber primär von der Einwirkdauer des Windes auf die tieferen Wasserbereiche sowie von der für den Windangriff verfügbaren Streichlänge abhängt.

Aus meßtechnischen Gründen sind die Wellenmessungen nicht geeignet für eine den Suspensionsganglinien entsprechende Aufbereitung (die Veränderungen der Wellenkennwerte über eine Tide sind nicht ausreichend erfaßt). Die durch zeitlich begrenzten Geräteausfall fehlenden Wellenmessungen sind ergänzt worden in Übereinstimmung mit SIEFERT (1971), vgl. Abb. 4.02.

#### 4.4 Strömung

Die Strömungsmessungen mit Wattdauerstrommesser (vgl. Abschn. 3.2.2) wurden mit EDV-Programm zu Geschwindigkeits- und Richtungsganglinien ausgewertet. Damit sind dann, entsprechend der Auswertung der Suspensionswerte für Wellenereignisse  $\bar{H} = n \cdot 10 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}$ , aus 5 bis 10 Meßtiden die mittleren Strömungsganglinien (Richtung und Geschwindigkeit) ermittelt worden.

Der Stromweg, der zu den über eine Tide gebildeten Suspensionsmittelwerten gehört, ergibt sich aus den Strömungsganglinien zu

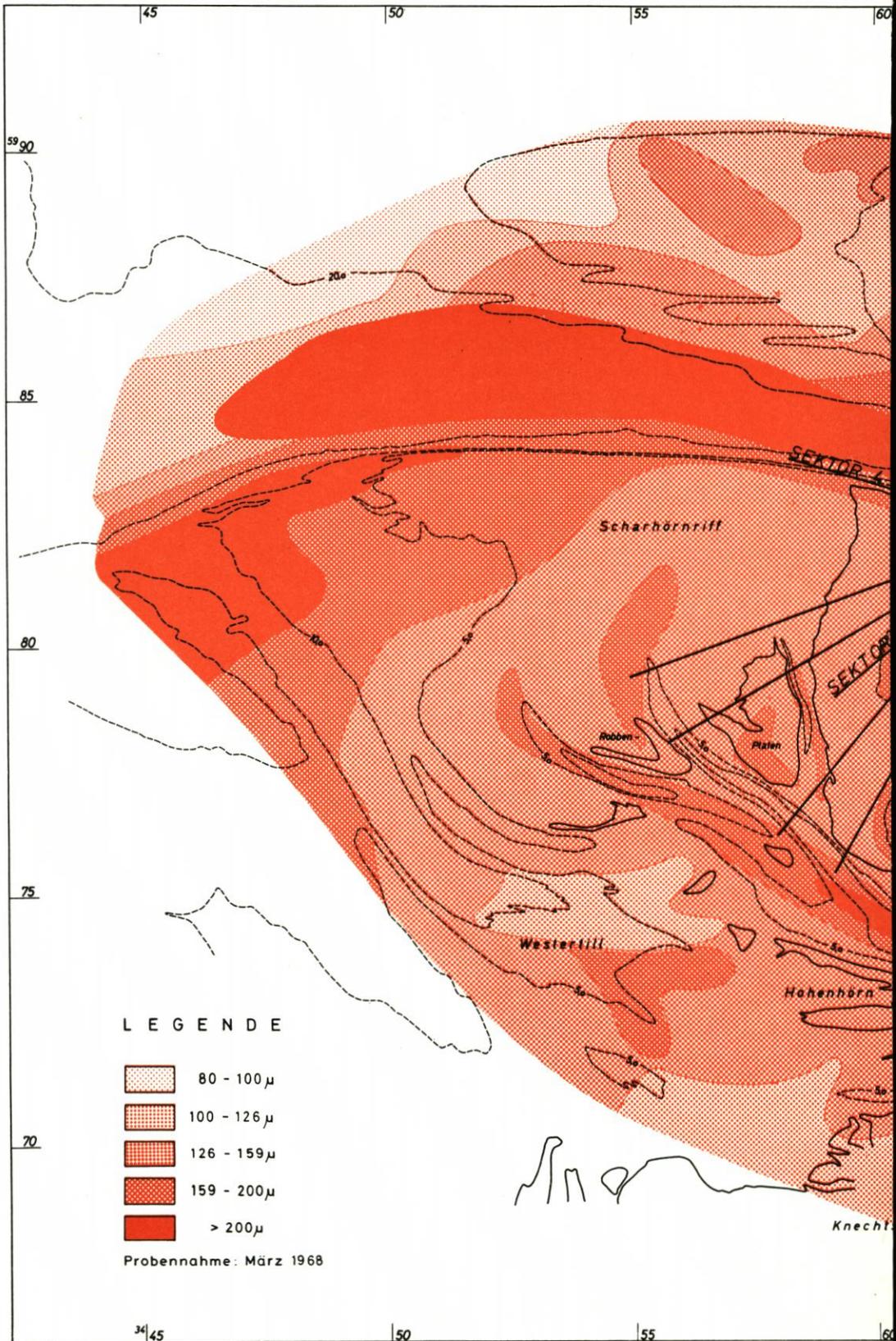
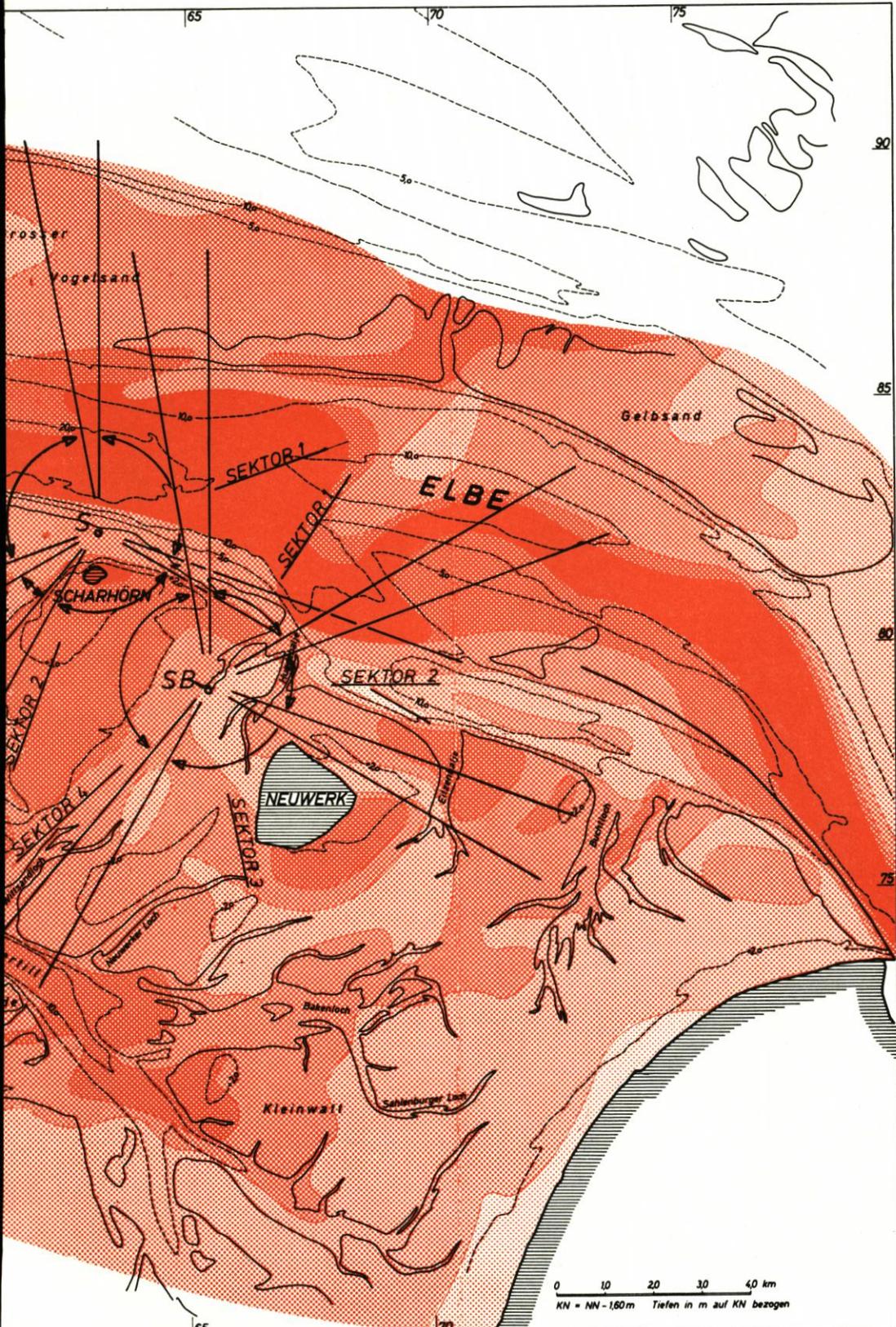
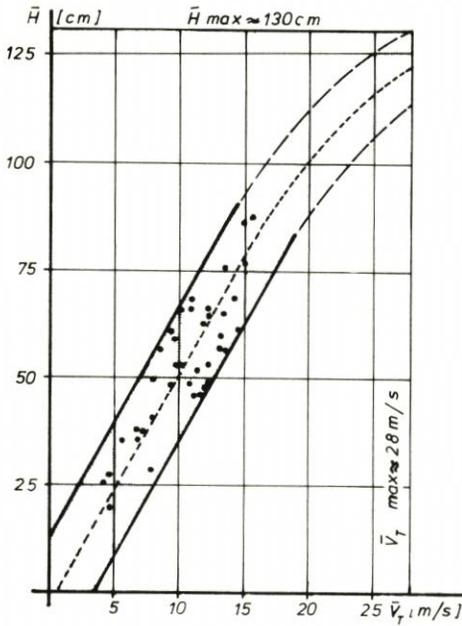


Abb. 4.01. Sedimentpetrographische Karte (Medianwert)

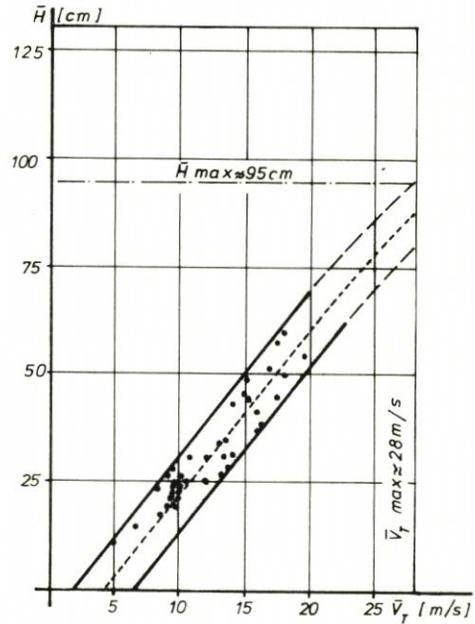


nach LINKE, 1970) mit Windsektoreneinteilung

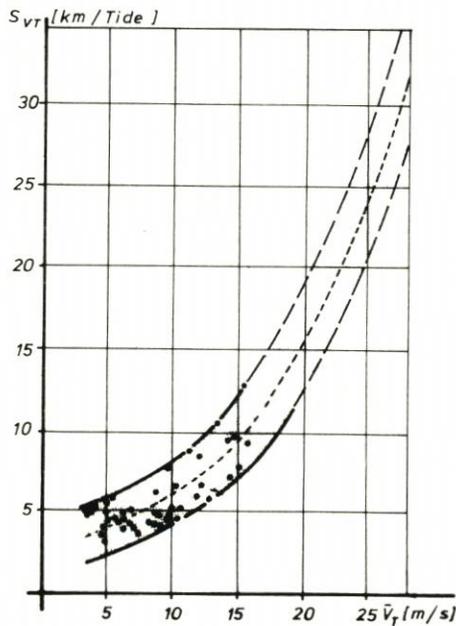
Standort: Scharhörn  
(Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje  
(Windrichtung: 210° - 360°)



Standort: Scharhörn  
(Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje  
(Windrichtung: 210° - 360°)

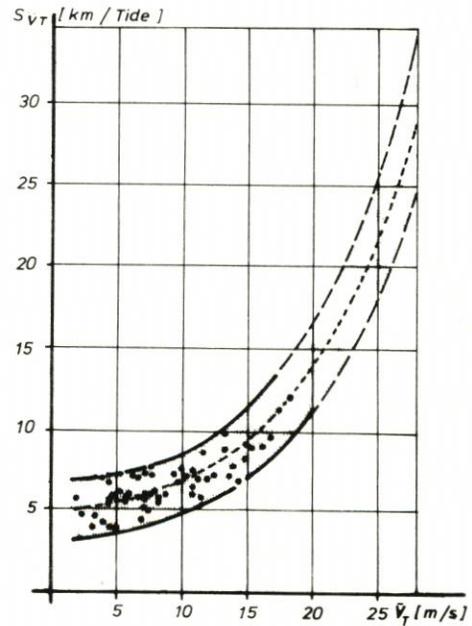


Abb. 4.02. Veränderung der Wellenhöhe ( $\bar{H}$ ) und des Stromweges ( $S_{VT}$ ) mit der Windgeschwindigkeit

$$S_V = \int_0^{t_E} u_E \cdot dt + \int_0^{t_F} u_F \cdot dt \text{ [km]} \quad (\text{Gl. 4.03})$$

und auf mittlere Tide bezogen zu

$$S_{VT} = \frac{t_T}{t_M} \cdot S_V \text{ [km]} \quad (\text{Gl. 4.04})$$

Durch zeitlich begrenzten Geräteausfall fehlende Strömungsmessungen sind ergänzt worden in Übereinstimmung mit GÖHREN (1969 u. 1971), vgl. Abb. 4.02.

#### 4.5 Wind

Windmessungen liegen von Scharhörn als 3-h-Mittelwerte für Richtung und Stärke vor. Sie waren Grundlage für die Beziehungen Wind/Strömung und Wind/Welle, die zur Ergänzung bei Geräteausfällen herangezogen worden sind (vgl. Abschn. 4.3 und 4.4). Die der jeweiligen Tide zugehörigen Windwerte sind  $\bar{V}_T$  (Geschwindigkeit) und  $\bar{R}_T$  (Richtung). Der für die Herstellung der Beziehungen zu den Suspensionsmessungen verwendete Zeitraum beginnt drei Stunden vor der ersten Einzelmessung des Schwebstoffmeßgeräts und endet mit der letzten. Dadurch wurde erreicht, daß auch die zeitlich vor der Suspensionsmessung liegenden Windereignisse erfaßt werden konnten. Der Dreistundenzeitraum ist in Anlehnung an die von SIEFERT (1973 u. 1979) für seine Seegangsuntersuchungen und für seine neueren Sturmflutüberlegungen angegebene wirksame Winddauer gewählt worden.

#### 4.6 Tide

Die Tidekurve wurde nach Wasserstandsganglinien mit eingetragenen Pegelablesungen für Hoch- und Niedrigwasser gezeichnet. Zur Beschreibung der Abweichung vom mittleren Tideverlauf wurde die Wasserstandsganglinie über die zum jeweiligen Suspensionswert gehörende Tidedauer, d. h. von Niedrigwasser bis Niedrigwasser, integriert und zum für mittlere Tideverhältnisse geltenden Integrationswert in Beziehung gesetzt.

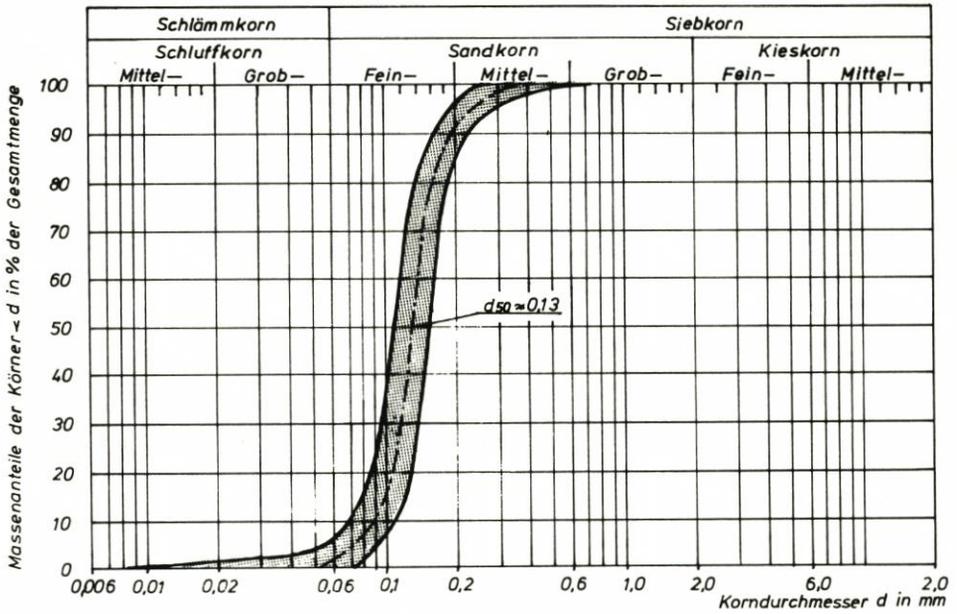
$$K_T = \int_0^{t_T} d \, dt / \int_0^{t_M} d \, dt \text{ [-]} \quad (\text{Gl. 4.05})$$

Mit  $K_T$  ist die durch Windrichtung und Windstärke bestimmte Abweichung des Tideverlaufs von mittleren Verhältnissen beschrieben. Die durch den Wind vorgegebenen Strömungs- und Wellenverhältnisse sind in  $K_T$  impliziert. Die Tidekurve wird für die Bestimmung von  $K_T$  genügend genau als Parabel zweiter Ordnung ausgerundet. Hierbei bleibt der von DILLO (1960) genannte Einfluß der Tidebeschleunigung ( $dd/dt$ ) unberücksichtigt.

#### 4.7 Sohlmaterial

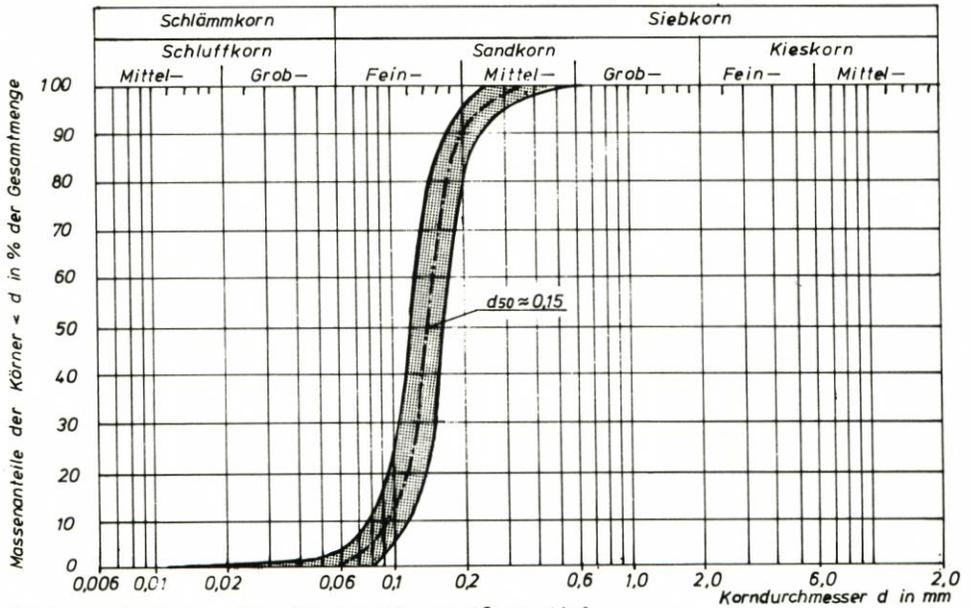
Für die Kornanalyse des Sohlmaterials sind für beide Stationen (S und SB) Proben von jeweils sieben Punkten (vgl. 3.2.2) genommen worden. Die Kornverteilung wurde durch Sieben und Schlämmen bestimmt. Eine exakte Bestimmung innerhalb des Schluffbereiches ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) ist trotz des mit ca.  $1000 \text{ cm}^3$  möglichst groß gewählten Probenvolumens wegen

Standort: Scharhörnbalje



Probenentnahme: Oberfläche bis ca. 10cm tief  
 Probenvolumen : Im Mittel ca. 1000cm<sup>3</sup>  
 Entnahmezeit : Mai bis September 1977

Standort: Scharhörn



Probenentnahme : Oberfläche bis ca. 10cm tief  
 Probenvolumen : Im Mittel ca. 1000m<sup>3</sup>  
 Entnahmezeit : Mai bis September 1977

Abb. 4.03. Kornverteilungskurven

des geringen Schluffanteils meßtechnisch schwierig. Der für die Betrachtung wichtige Gesamtanteil des Schluffkorns an der Probe ist aber in jedem Fall bestimmt. Die Einhüllenden der ermittelten Körnungslinien sind in Abb. 4.03 dargestellt.

#### 4.8 Übersicht

Das nach den Erläuterungen unter Abschn. 4.1 bis 4.7 aufbereitete Meßmaterial kann aufgrund des Umfangs genutzt werden zur Untersuchung der Suspensionskonzentrationen (vgl. hierzu 5.2):

für alle Windsektoren in Abhängigkeit von

- der Abweichung gegenüber der mittleren Tide,
- der Windstärke und

für die Windsektoren 240°–360° (S) sowie 210°–360° (SB) in Abhängigkeit von

- dem Tideverlauf,
- der Windgeschwindigkeit und -stärke,
- dem Stromweg,
- den Wellenhöhen,
- der Orbitalgeschwindigkeit,
- der überlagerten Orbital- und Tideströmung.

Das Datenmaterial ist in den Tabellen 1 bis 4 zusammengestellt.

### 5. Meßergebnisse aus dem Watt und ihre Diskussion

#### 5.1 Ergebnisse früherer Untersuchungen

Systematische Untersuchungen der Suspensionsfrage auf dem Watt liegen bisher nur in geringem Umfang vor. GÖHREN (1965) begründet dieses mit den Schwierigkeiten bei den Meßverfahren. Insofern haben Göhren und andere Autoren im allgemeinen nur Messungen von Suspensionskonzentrationen ohne nähere Angabe der die Konzentration beeinflussenden Parameter vorgelegt. Auch sind deshalb die jeweiligen Probenvolumen meist nur auf 1000 cm<sup>3</sup> begrenzt gewesen, was bei der häufig in „Konzentrationswolken“ auftretenden Suspension zu erheblichen Streuungen der Ergebnisse geführt hat. Das für die vorliegende Arbeit verwendete Meßgerät ist deshalb für ein Probenvolumen von 20 000 cm<sup>3</sup> und eine Förderzeit von 3 bis 4 Minuten ausgerüstet.

GÖHREN (1971) hat in den Jahren 1964 und 1965 mit einem von ihm entwickelten Vorläufer des hier verwendeten Gerätes (GÖHREN, 1965) 0,35 m über der Sohle Proben entnommen und analysiert (vgl. Abschn. 1.1). Als Ergebnis sind Mittelwerte der Suspensionskonzentration für einzelne Wattbereiche (Abb. 5.01) sowie Häufigkeitsverteilungen der Konzentrationen (Abb. 5.02) mitgeteilt worden. Das Datenmaterial ist wegen der begrenzten Eignung des Meßgerätes auf Messungen bei gemäßigten Windstärken beschränkt. Hiernach sind im Untersuchungsgebiet Neuwerk Konzentrationen zwischen 100 und 150 mg/l am häufigsten, wobei nur 15 % aller Meßwerte über 300 mg/l liegen. Konzentrationen über 500 mg/l sind nur bei stärkerer Windeinwirkung mit zugehörigem Seegang festgestellt worden. GÖHREN hat hierzu zwei besondere Meßreihen jeweils über eine volle Tide bei westlichen Winden von 6 und 7 Bft angegeben (Abb. 5.03).

Die von GÖHREN für das Untersuchungsgebiet Neuwerk-Scharhörn festgestellten Kon-

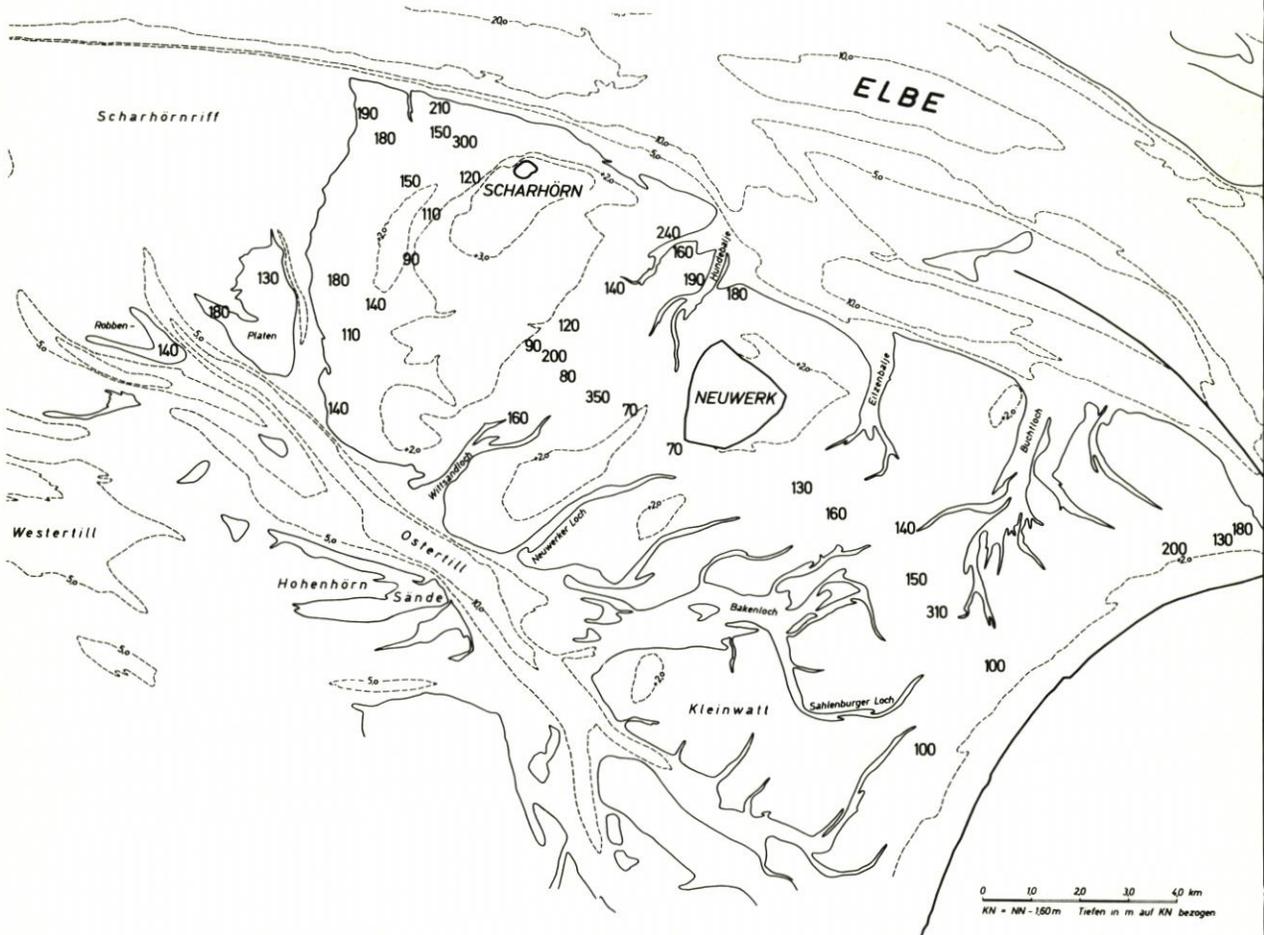


Abb. 5.01. Mittlere Schwebstoffkonzentration im Watt (mg/l, Serienmittelwerte, 35 cm über Sohle) (GÖHREN, 1971)

zentrationen decken sich in der Tendenz gut mit Messungen von GRY (1942) im Watt von Skallingen und von POSTMA (1961) in holländischen Watten sowie von WÖHLENBERG (1954) am Hindenburgdamm.

Weiterhin haben GÖHREN und LAUCHT (1972) Mittelwerte über jeweils eine Tide aus den Testreihen des auch für diese Arbeit verwendeten Meßgerätes veröffentlicht. Es handelt sich um kurze Meßzeiträume bei einer Entnahmehöhe von nur 0,15 m über der Sohle. Trotz der geringen Entnahmehöhe zeigt das Maximum der Verteilungskurve (Abb. 5.04) für die Standorte „Kleiner Vogelsand“ und „Arensch“ eine erheblich geringere Suspensionskonzentration als die oben für 0,35 m Entnahmehöhe angegebenen Ergebnisse von GÖHREN (1971), obwohl die Messungen überwiegend bei Starkwindwetterlagen durchgeführt worden sind. GÖHREN und LAUCHT erklären die Abweichungen in den Konzentrationen mit den unterschiedlichen Absetzverfahren insofern, als die von GÖHREN (1971) beschriebenen Meßwerte durch Filtrieren von Literproben gewonnen sind und damit einen größeren Teil feinsten, nicht absetzbarer Partikel enthalten, während die mit dem neuen Gerät gemessenen Werte auf der reinen Absetzung in der vorgegebenen Zeiteinheit von ca. 55 Minuten basieren. Bei letzteren

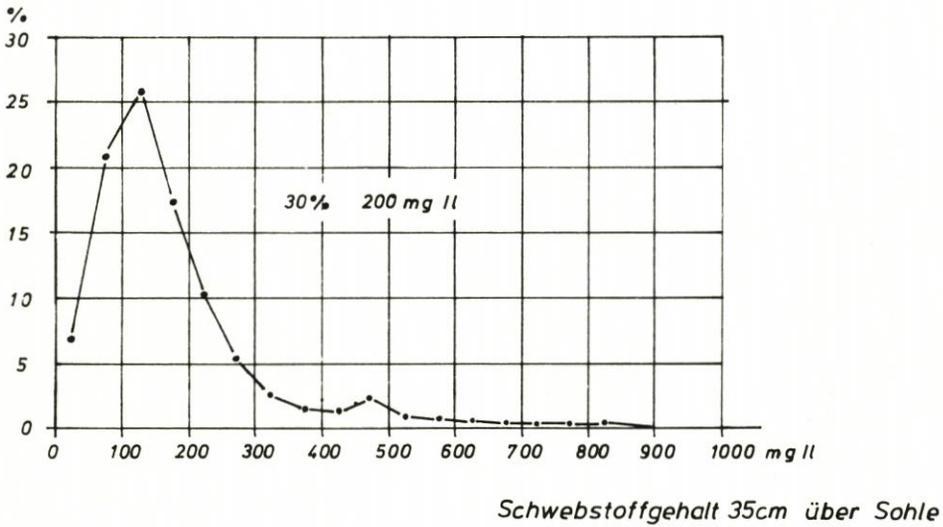


Abb. 5.02. Häufigkeitsverteilung gemessener Schwebstoffkonzentration im Neuwerker Watt, 1500 Proben (nach GÖHREN, 1971)

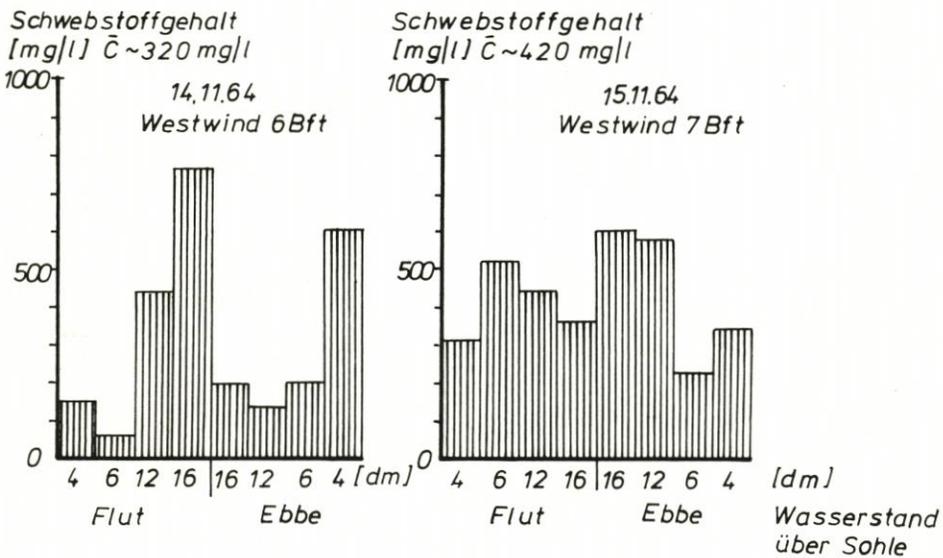


Abb. 5.03. Ergebnisse von Schwebstoffmessungen im Neuwerker Watt (nach GÖHREN, 1965)

werden nur die absetzbaren Feststoffteilchen und damit entsprechend weniger Feststoffvolumen erfasst. GÖHREN und LAUCHT (1972) weisen darauf hin, daß aber gerade dieses Absetzverfahren den für küstenmorphologische Veränderungen bedeutsamen Gehalt an suspendierten Feststoffen wiedergibt. GÖHREN und LAUCHT (1972) haben aus den Testreihen mit dem neuen Gerät auch eine vier Tage umfassende Meßreihe an der Station „Kleiner Vogelsand“ bei Windstärken zwischen 5 und 7 Bft angegeben (Abb. 5.05). Die stündlich gemessenen Suspensionswerte bestätigen den Einfluß des Windes auf die Konzentrationswerte. Am Anfang der

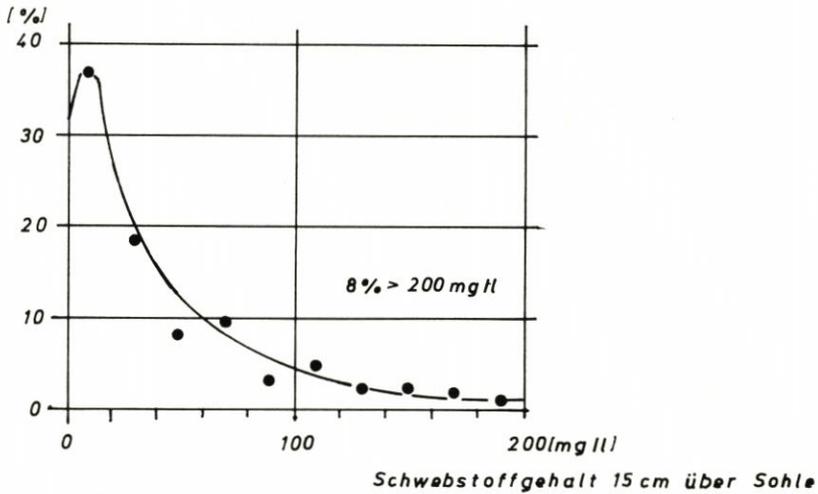


Abb. 5.04. Häufigkeitsverteilung gemessener Schwebstoffkonzentrationen an den Stationen Kl. Vogel- sand und Arensch (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

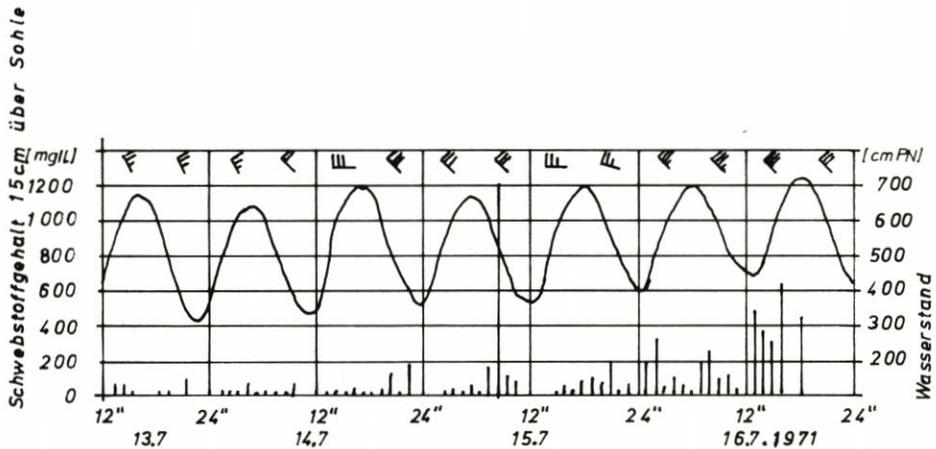


Abb. 5.05. Meßserie über 7 Tiden an der Station Kl. Vogelsand (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

Meßreihe bei etwa 5 Bft liegen die Konzentrationen im Mittel bei 30 mg/l und steigen mit zunehmender Windstärke bei etwa 7 Bft im Mittel auf etwa 200 mg/l an. Diese Meßreihe unterstreicht die von WOHLBERG (1954) gemachte allgemeine Beobachtung der starken Suspensionszunahme bei höheren Windstärken.

Außerhalb des Wattgebietes Neuwerk/Scharhörn hat WÜNSCHE (1976) vor Sylt auf einem Sandriff Suspensionskonzentrationen gemessen. Er hat ebenfalls festgestellt, daß bei zunehmendem Seegang und insbesondere bei starker Brandung die Suspensionskonzentration deutlich ansteigt. Bezogen auf eine Meßebe 40 cm über der Sohle, kommt er bei ruhigem Wetter zu Konzentrationen von 200 mg/l, während er für starke Brandung Spitzenwerte von etwa 1000 mg/l angibt. Darüber hinaus macht er Angaben über die Luftkonzentration in brechenden Wellen mit deren Bedeutung für die Energieumwandlung (vgl. FÜHRBÖTER, 1971) und daraus folgender Aufwirbelung des Sohlmaterials.

## 5.2 Ergebnisse der Untersuchungen der Jahre 1972 bis 1977

Die Messungen an beiden Standorten (S) und (SB) werden parallel diskutiert, um die aus den Standortbedingungen herrührenden Unterschiede vergleichen zu können.

Unter Abschn. 4.8 ist der unterschiedliche Aufbereitungsaufwand für die Meßergebnisse aufgelistet. Dieser ist begründet durch den Datenumfang in den einzelnen Windsektoren, wie er sich aus der Windhäufigkeit ergibt. Die Daten nur für den Sektor 4 mit auflandigen Winden aus SW bis N (Sturmflutbereich enthalten) überwiegen mit rd. 50 % der Gesamtdaten (vgl. Tab. 1 bis 4) und eignen sich vom Umfang her für eine weitere Aufbereitung entsprechend Abschn. 4.8.

### 5.2.1 Suspensionskonzentrationen und ihre morphologischen Randbedingungen

#### 5.2.1.1 Abhängigkeit der Konzentrationen von Abweichungen von der mittleren Tide

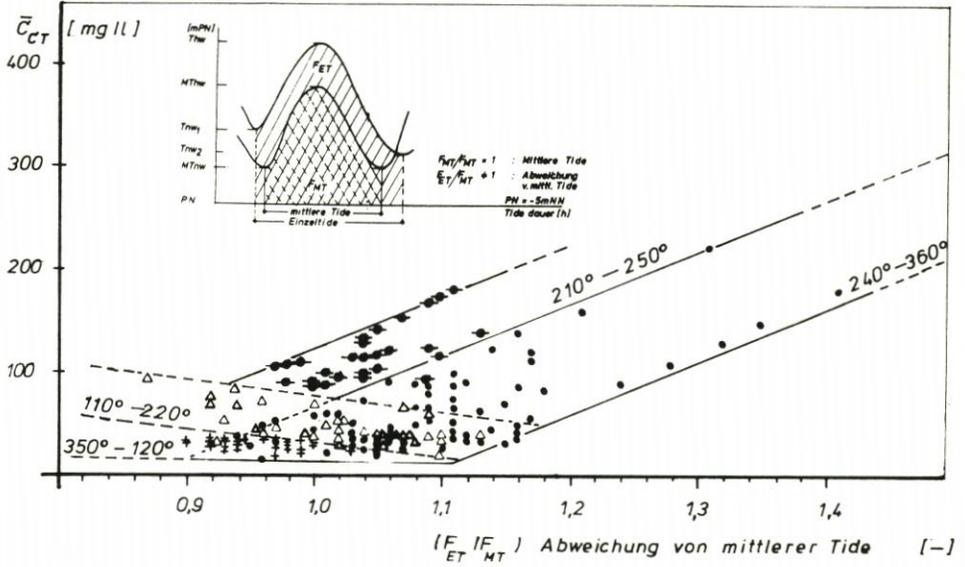
Abb. 5.06 zeigt für die Standorte (S) und (SB) die mittleren Suspensionskonzentrationen für verschiedene Tiden, wobei die mittlere Tide mit der Abszisse 1,0 angegeben ist. Die Richtungen der Windsektoren 1 bis 4 (vgl. Abb. 4.01) sind außerdem eingetragen. Die Änderungen der Konzentrationswerte sind für beide Standorte einander ähnlich. Bei den auflandigen Winden der Sektoren 3 und 4 – Standort (S) – bzw. des Sektors 4 – Standort (SB) – mit erhöhten Wasserständen steigt die Suspensionskonzentration etwa linear mit der Abweichung von der Mitteltide an. Auch für die ablandigen Winde der Sektoren 1 und 2 (S) bzw. 1 bis 3 (SB) mit abgesenkten Wasserständen zeigen sich gleiche Erscheinungen.

Diese sind plausibel, da die Abweichungen gegenüber den mittleren Tidewasserständen – Spring- und Nippenflüsse vernachlässigt – auf zunehmenden Windeinflüssen beruhen, mit Folgeerscheinungen für die Turbulenz des Wassers auf dem Watt. Mit der eingetragenen Energie ändern sich die Seegangs- und Strömungsverhältnisse und mit ihnen die Suspensionskonzentrationen. Der unterschiedliche Anstieg der Konzentrationen in den einzelnen Sektoren wird durch die verschiedenen Standortbedingungen bestimmt, wie sie sich wesentlich aus der Morphologie (Abb. 1.01), der Sedimentverteilung (LINKE, 1970, s. Abb. 4.01 u. REINECK, 1975, s. Abb. 5.07) und den von GÖHREN (1969) aufgezeigten Strömungsverhältnissen im Watt von Neuwerk/Scharhörn ergeben.

Die gemessenen Suspensionsgehalte sind Ergebnisse aus den Witterungsverhältnissen, wie sie im Zeitintervall vor der Messung in Strömungsrichtung vor der Entnahmestelle und wie sie zur Entnahmezeit am Standort selbst herrschen. Sie sind somit Summen aus Werten der lokalen Ereignisse und den durch die Tideströmungen bzw. durch die windorientierten Triftströmungen (GÖHREN, 1969) an die Entnahmestelle herangeführten Materialien, wie nachstehend für die einzelnen Windsektoren der Standorte (S) und (SB) gezeigt wird.

Der Sektor 1 des Standortes (S) –  $350^\circ$  bis  $120^\circ$  – hat keine vorgelagerten Wattflächen, da er durch die Wattkante und das unmittelbar anschließende tiefe Wasser der Elbe begrenzt ist. Wegen der ablandigen Lage des Sektors werden mit zunehmendem Windeinfluß die Wasserstände abgesenkt. Die dann für den Suspensionsgehalt maßgebenden Einflußfaktoren sind durch die Brandung und durch den zu den Wattkanten parallelen Brandungsstrom des über der Elbe aufgebauten Seegangs gekennzeichnet. Der Seegang folgt unter erheblichen Abweichungen von der Windrichtung mit seinen hohen Wellen den tiefen Rinnen und damit der

Standort: Scharhörn



Standort: Scharhörnbalje

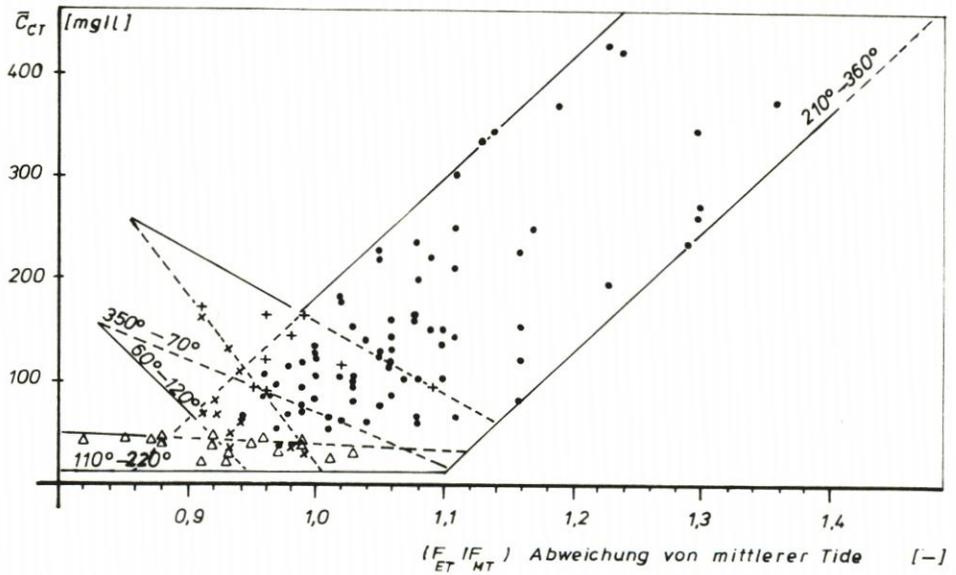
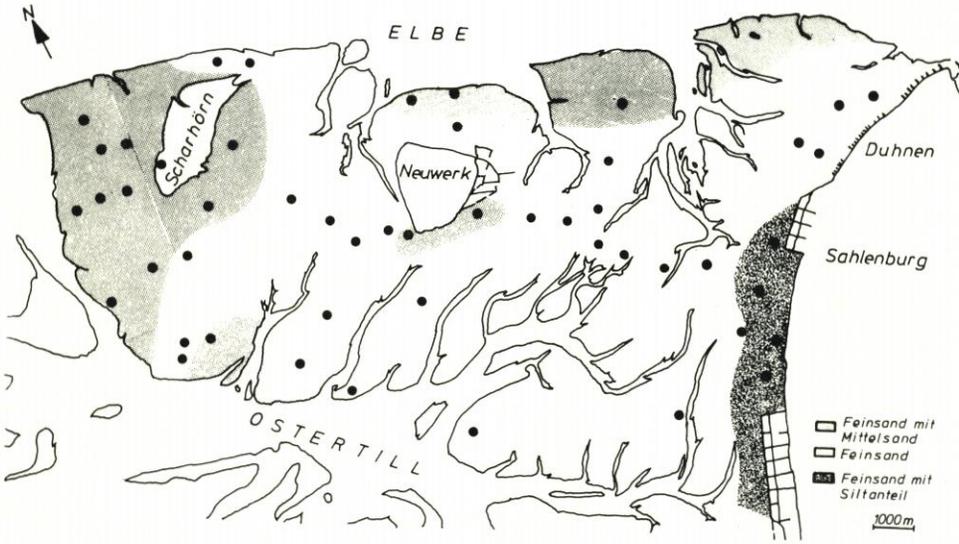
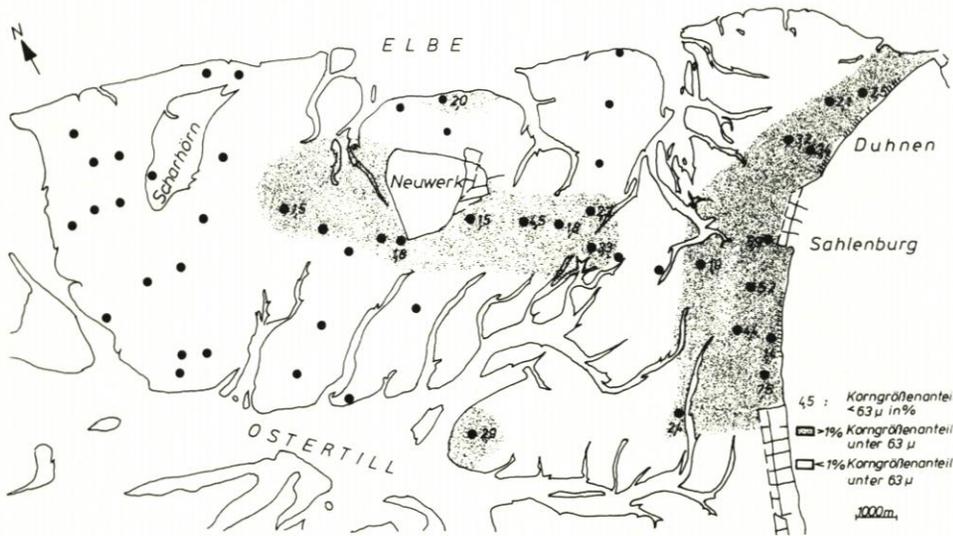


Abb. 5.06. Gesamtübersicht: Suspensionskonzentration/Abweichung von mittlerer Tide - sektoral



Sedimentverteilung, dargestellt in der Sedimenteinteilung nach DIN 4188. Nach dieser Darstellung besteht das Sediment an der Oberfläche des Wats aus Feinsanden. An der Elbseite, im Norden und NW sind es Feinsande mit einer mittelsandigen Komponente > 5 %. Am Festland beginnt ab Sahlenburg nach S ein Gebiet mit einem Silt- und Tonanteil. Dieser Anteil wurde dann angegeben, wenn er mehr als 5 % betrug (nach REINECK, 1975)



Verteilung der Sedimente mit einem Silt- und Tonanteil < 1 % und > 1 %. Bei einem Anteil von > 1 % wurde der Meßwert in Gewichtsprozenten neben dem Entnahmepunkt angegeben. Außer dem Streifen vor dem Festland liegt auch auf der Wattenwasserscheide ein Gebiet mit einer schwachen Siltanreicherung (nach REINECK, 1975)

Abb. 5.07. Korngrößenverteilung der oberflächennahen Sedimente

Elbe, so daß der Welleneinfluß auf das Watt begrenzt ist. Dieses gilt insbesondere für die mit diesem Sektor erfaßten östlichen Windrichtungen. Nur die auf den Strand hin gebeugten Wellen werden wirksam. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß der unmittelbar benachbarte tiefe Elbestrom bei diesen Windrichtungen einen erheblichen Austausch mit suspensionsärmerem Elbewasser bewirkt.

Der Suspensionsgehalt ist deshalb mit 30 mg/l sehr gering und steigt mit der Abweichung von der mittleren Tide nur schwach an.

Die Sektoren 1 und 2 des Standortes (SB) – 350° bis 120° – unterscheiden sich in den maßgebenden Einflußfaktoren von dem in der Windrichtung vergleichbaren Sektor 1 des Standortes (S). Im Sektor 1 des Standortes (SB) – 350° bis 70° – folgen Wellen und Strömung der gegenüber dem Watt tieferen Rinne des Priels Scharhörnbalje, der direkt auf die Meßstation zuführt (vgl. Abb. 2.14). Hierdurch gelangt ein höherer Teil des auf der Elbe entstehenden Seegangsspektrums in das Wattinnere und wird erst dort an den Prielbegrenzungen in Abhängigkeit von der kritischen Wassertiefe energiemäßig umgesetzt. Die dadurch bedingten erhöhten Turbulenzen werden an die umgebenden und allseitig vorgelagerten Wattflächen abgegeben. Sie führen in Verbindung mit der im Priel erhöhten Suspensionsfracht (CHRISTIANSEN, 1974), die bei Flutstrom direkt an der Meßstelle vorbeigeführt wird, zu einer Suspensionskonzentration von etwa 130 mg/l.

Im Sektor 2 des Standorts (SB) – 60° bis 120° – ist aufgrund der unterschiedlichen morphologischen Randbedingungen die Suspensionskonzentration im Bereich der mittleren Tide mit ca. 40 mg/l kleiner als im Sektor 1. Dieses ergibt sich aus den für mittlere Tideverhältnisse geltenden Strömungen (GÖHREN, 1969), die in beiden Tidephasen keinen wesentlichen Transport aus dem Einzugsgebiet zur Meßstelle hin zeigen. Dieses ändert sich jedoch bei zunehmender Abweichung von der mittleren Tide. Der dann einsetzende Triftstrom, der während der Ebbephase noch durch die normale Tideströmung vergrößert wird, transportiert in Verbindung mit dem zwischen dem Leitdamm und der Wattkante aufgebauten Seegang das in Suspension aufgewirbelte Material parallel zur Wattkante in den Meßbereich. Die gut 1 km nach NO vorspringende Wattkante begünstigt in ihrer Trichterwirkung diese Situation zusätzlich. Unter weiterer Berücksichtigung des mit zwei Gewichtsprozenten relativ hohen Silt- und Tonanteils im nordöstlich vorgelagerten flachen, auf NN – 0,5 m liegenden Wattgebiet von Neuwerk (vgl. Abb. 4.01 und 5.07) ist der sehr rasch mit der Abweichung von der mittleren Tide auf 130 mg/l ansteigende Suspensionsgehalt plausibel. Er entspricht dann dem des Sektors 1 (SB).

Für den über das hohe Watt hinweg angreifenden Wind (Sektor 2 (S) und Sektor 3 (SB)) – 110° bis 220° – weisen die Konzentrationen nur eine geringere Zunahme mit der Abweichung von der mittleren Tide auf. Bemerkenswert sind die absolut und auch in der Steigerung größeren Suspensionskonzentrationen am Standort (S) gegenüber den sonst in allen anderen Sektoren stets größeren Konzentrationen am Standort (SB).

Dieses ist zunächst nicht verständlich, da um Neuwerk (SB) großflächig das Sohlmaterial mit Silt- und Tonanteilen (bis zu 1,8 %) angereichert ist, während vor Scharhörn (S) gröberes Material ansteht (vgl. Abb. 5.07). Der Welleneinfluß gibt hierzu wegen der an beiden Standorten vorgelagerten Inseln bzw. hohen Wattrücken und der bei dieser Windlage abgeminderten Wasserstände keine Erklärung. Somit müssen besondere Strömungsverhältnisse die Suspensionskonzentrationen beeinflussen.

Die von GÖHREN (1969) für mittlere Tiden angegebenen und im Hinblick auf größeren Windeinfluß interpretierten Strömungsverhältnisse zeigen, daß die Strömung bei (SB) hart westlich an Neuwerk entlang setzt. Sie folgt dem Sattel der zwischen der Insel und der NO-SW verlaufenden Watterhöhung, die zwischen dem Wittsandloch und dem Neuwerkloch auf

über SKN +2 m ansteigt, und mündet direkt in die Hundebalje (Abb. 5.01). Dadurch werden die von feinerem Sohlmaterial (Silt und Ton) herrührenden Suspensionsanteile überwiegend durch die Hundebalje ohne Wirkung auf (SB) abgeführt. Außerdem ist bei Wasserständen unter SKN +2 m, d. h. bei Absenkung des Wasserspiegels um mehr als 1 m gegenüber MThw, die Überströmung des Watttrückens zwischen Scharhorn und Neuwerk höhenmäßig unterbunden. Diese Strömungsverhältnisse begründen also absolut und im Anstieg geringere Suspensionskonzentrationen am Standort (SB).

Am Standort (S) ist im Gegensatz zu (SB) eine kräftige und zur Wattkante parallele Strömung vorhanden, die die vom Watt abgeschwemmten Feinstoffe an die Meßstelle (S) führt. Wegen der Durchmischung mit dem suspensionsärmeren Elbewasser bleibt der Anstieg der Konzentration allerdings relativ gering. Die Suspensionskonzentrationen steigen bei (S) von etwa 40 auf 65 mg/l an. Am Standort (SB) liegen diese Werte zwischen 35 und 45 mg/l. Das Datenkollektiv der Suspensionskonzentrationen für die von Land über das Watt angreifenden Winde weist somit im Vergleich zu den übrigen Windsektoren sowohl bei (S) als auch bei (SB) die geringsten Absolut- und Anstiegswerte der Konzentrationen aus, wenn man von den besonderen Randbedingungen des Sektors 1 am Standort (S) absieht.

Die auflandigen Windsektoren 3 und 4 (S) und Sektor 4 (SB) – 210° bis 360° – mit durch Windeinfluß erhöhten Wasserständen zeigen die deutlichsten Steigerungen der Suspensionsgehalte mit der Tideabweichung (Abb. 5.06). Während bei mittleren Tideverhältnissen die Konzentrationswerte in der Größenordnung der anderen Sektoren (S) bzw. leicht darüber (SB) liegen, nimmt die Konzentration mit steigender Wasserbewegung (erhöhte Hoch- und Niedrigwasser) stark zu. Sie erreicht am Standort (S) Werte um 200 mg/l und am Standort (SB) um 400 mg/l. Diese Suspensionsanreicherungen erklären sich aus Brandungserscheinungen an der Wattkante und auf den Wattflächen gemäß Seegangscharakteristik (vgl. Abschn. 2 und Abb. 1.02 sowie 2.09) in Verbindung mit dem Triftstrom (Abb. 5.08). Dieses bedeutet für den

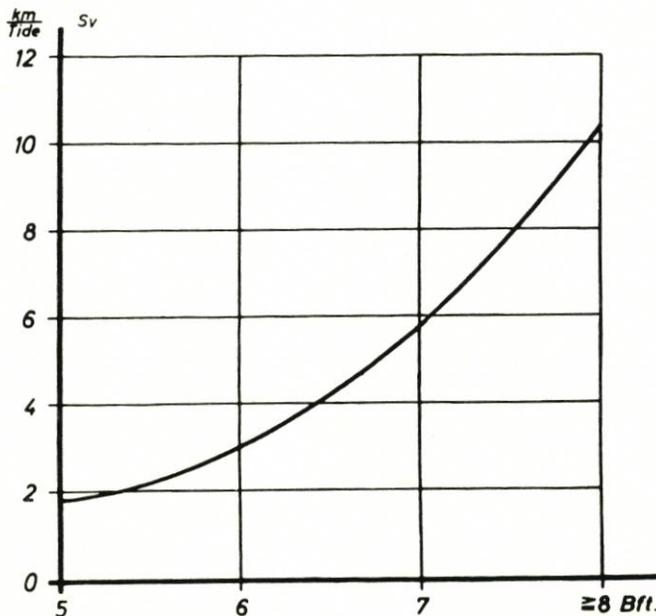


Abb. 5.08. Mittlere Triftströmung im Watt in Abhängigkeit von der Windstärke bei auflandigem Wind (nach GÖHREN, 1968)

Standort (SB), daß das auf den vorgelagerten großen Wattflächen zwischen Till und Elbe und auf dem Scharhörnriff aufgewirbelte Material mit dem Triftstrom zwischen den Inseln Scharhorn und Neuwerk hindurch der Meßstelle zugeführt wird. Der in Verlängerung des Wittsandloches SW-NO orientierte und bis zur Hundebalje und Scharhornbalje reichende Sattel begünstigt diese Strömungsrichtung (Abb. 1.01). Der Vergleich der Einzugsgebiete für die Windsektoren 3 und 4 (S) sowie 4 (SB) ergibt für (SB) eine erheblich größere Einflußfläche gegenüber (S). Letztere ist auf Teile des Scharhörnriffs und den wattkantenparallelen Transport beschränkt. Nach Abb. 4.01 und 5.07 sind für den Standort (S) und sein Einzugsgebiet größere Sohlmaterialien mit Feinsand- und Mittelsandanteilen als auf dem Wattrücken des Einzugsbereichs von (SB) vorhanden. Das gröbere Sohlmaterial muß größere Grenzgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 2.16) bis zur Mobilisierung überwinden. Die an beiden Standorten der Höhe und dem Anstieg nach unterschiedlichen Konzentrationswerte sind demnach plausibel.

Nach den besonderen morphologischen Randbedingungen und den dadurch bestimmten Strömungsverhältnissen ist der Sektor 3 am Standort (S) gesondert abgegrenzt. Die Konzentrationen liegen in diesem Sektor bei mittlerer Tide höher als im Sektor 4 (S) und vergleichsweise auch höher als am Standort (SB). Der Anstieg mit der Tideabweichung erfolgt beim Sektor 3 (S) parallel zu dem des Sektors 4. GÖHREN (1970) hat hierfür bei seinen Überlegungen zum Sandtransport eine auf den Suspensionstransport übertragbare Erklärung gegeben. Auf Abb. 5.09 sind diese Zusammenhänge wiedergegeben. Sie weisen einen parallel zur Scharhorn-Düne verlaufenden Brandungs- und Triftstrom aus. Das auf der südwestlich vorgelagerten Sandbank (SKN + 2 m) und an der gleichfalls SW-NO orientierten Dünenkante (SKN > + 2 m) aufgewirbelte Material wird in einer parallel zur Dünenkante laufenden, kräftigen Strömung in Richtung auf die Meßstelle geführt. In ihr sind auch die auf den in Luv vorgelagerten Wattflächen entstandenen Suspensionsanteile enthalten. Hieraus ergeben sich Gesamtkonzentrationen von 100 bis 170 mg/l.

Für den Windsektor 4 (S) treten gleichgroße Werte erst mit größerer Abweichung von der Mitteltide auf. Bei mittleren Tiden wird das Watt westlich von Scharhorn überflutet mit überwiegender NS-Stromrichtung, wobei nur eine kleinere Komponente durch die Dünenkante in Richtung auf den Standpunkt (S) verbleibt (GÖHREN, 1969), so daß deshalb bei Mitteltide nur geringere Konzentrationen verzeichnet werden. Erst bei der in Abb. 5.09 dargestellten intensiven Überströmung der steilen Dünenkante mit brechendem Seegang werden die höheren Werte der Konzentrationen im Sektor 3 (S) erreicht und überschritten.

Die vorstehenden Betrachtungen über die Abhängigkeit der Suspensionskonzentrationen von den Abweichungen zur Mitteltide und von den Standortbedingungen zeigen, daß die gem. Abschn. 4.2 gewählte Zuordnung zu Windsektoren sinnvoll ist.

#### 5.2.1.2 Veränderung der Konzentration mit der Windstärke

Die Beschreibung der Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Abweichung vom mittleren Tideverlauf enthält den Nachteil, daß die Wasserstandsveränderungen den Windereignissen mit einer Phasenverschiebung folgen. Dieses führt zu größeren Streuungen der Ergebnisse. Auf dem Watt, im flachen Wasser, werden die Windkräfte schneller in entsprechende Wellen und Strömungen und damit auch veränderte Suspensionswerte umgesetzt, als dies durch die Abweichungswerte zur Mitteltide angegeben wird. Die Einführung der Abhängigkeit von der Windstärke stellt somit eine straffere Beziehung zur Suspensionskonzentration her.

Zunächst sind in Abb. 5.10 die Suspensionskonzentrationen in Abhängigkeit von den

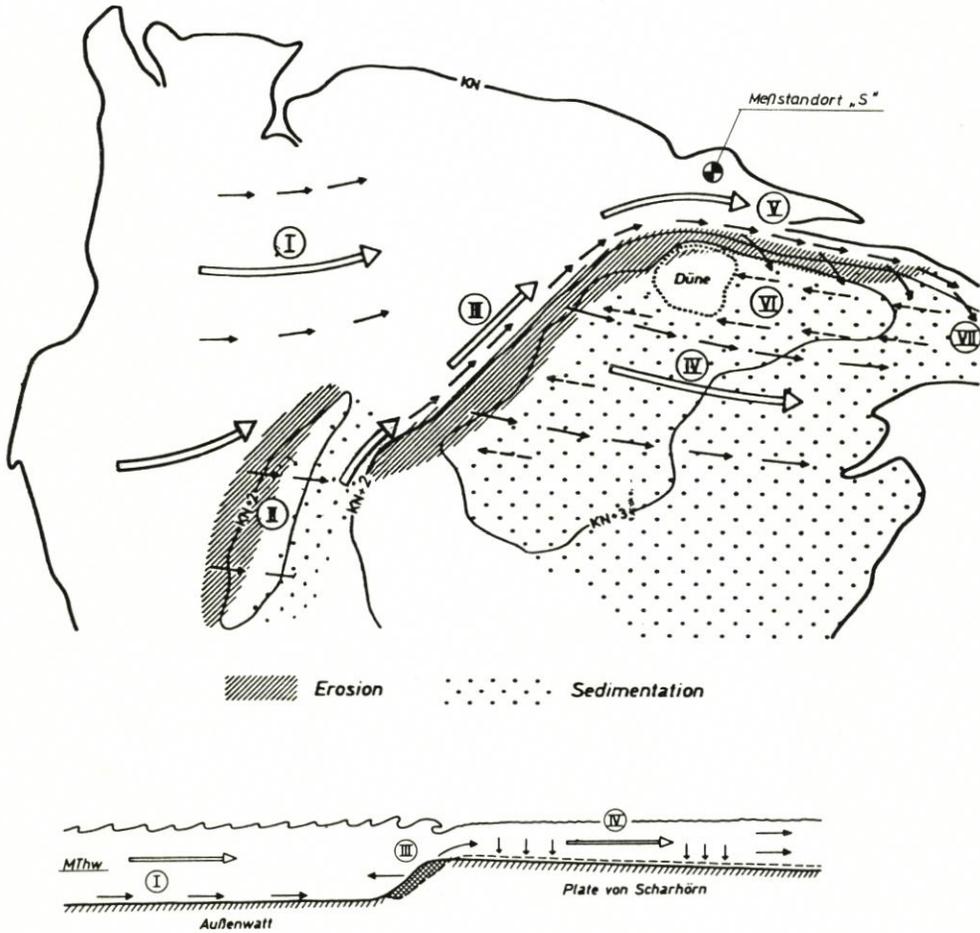


Abb. 5.09. Transportvorgänge und morphologische Formung von Scharhorn (schematisch)  
(GÖHREN, 1970)

- I Vorherrschender Sandtransport mit östlicher Triftströmung im Außenwatt (Bei ungestörter Gezeitenbewegung verläuft die Materialbewegung in südlicher Richtung.)
- II Materialüberschüttung auf den Brandungsbänken; Erosion auf der Luvseite, Sedimentation auf der Leeseite
- III Brandungserosion am Nordwestrand der Plate, Transport des erodierten Materials im strandparallelen Brandungsstrom und in dem über die Plate setzenden Triftstrom
- IV Triftstrom auf der Plate bei erhöhten Wasserständen, Sedimentation des Materials aus dem Strandabbruch. Dabei Sortierung grob-fein mit zunehmender Entfernung von der Brandungszone
- V Brandungserosion und strandparalleler Transport am Nordstrand; Aufschüttung der Plate durch Strandwallvorbau; Triftstrom und Brandungsstrom setzen bei allen auflandigen Windrichtungen von West nach Ost
- VI Äolischer Sandtransport, vorwiegend bei östlichem Wind und beschränkt auf die hochliegenden, schluffarmen Zonen der Plate. Die Düne wird ausschließlich aus Flugsand von der östlichen, riffartigen Plate aufgebaut
- VII Riffartiger Vorbau der Plate nach Osten durch Sedimentation des strandparallelen Materialstromes am auslaufenden Strand

Windstärken (ohne Untergliederung nach Windsektoren) aufgetragen. Dabei ist der jeweilige Konzentrationswert das Mittel aus den Werten bei einer Windstärke. Die Werte sind außerdem nach DILLO (1960) auf  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  bezogen (vgl. Abschn. 4.2).

$$\bar{C}_{CT} = \tau_r / \tau_M \bar{C}^{1/2} \sqrt{T_C} \quad (\text{Gl. 4.01 u. 4.02})$$

Die zugehörigen Kurven sind einander ähnlich. Bei den gemessenen Werten ist im Mittel von Wassertemperaturen von rd.  $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$  auszugehen, was zwecks Temperaturbereinigung auf  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  einem Zuschlag zu den Konzentrationswerten entspricht, wie er sich nach DILLO und Gl. 4.02 zu rd. 65 % ergibt.

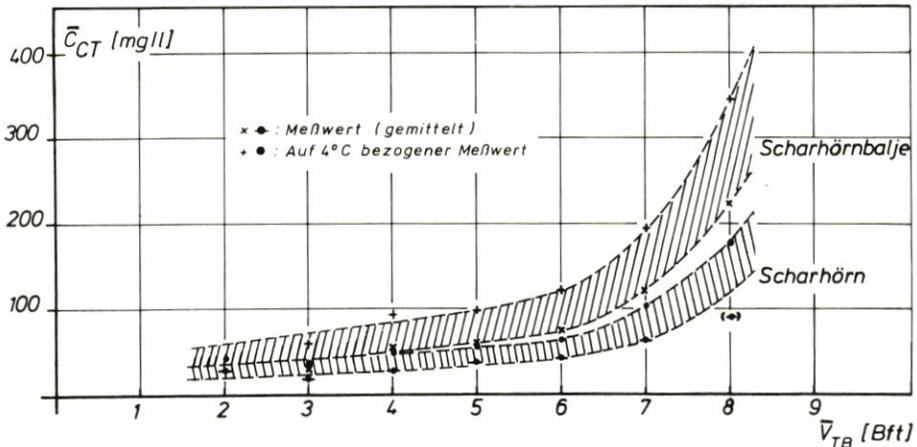


Abb. 5.10. Veränderungen der Suspensionskonzentration mit der Windstärke. Mittelwerte aller Messungen für einzelne Windstärken Scharhör/Scharhörnbalje

Der Kurvenvergleich für beide Standorte ergibt einander ähnliche Anstiege der Suspensionskonzentration mit der Windstärke. Im Wattinnern (SB) liegen die Konzentrationswerte etwa doppelt so hoch wie am Wattrand (S). Sie steigen bis 6 Bft linear nur wenig mit der Windstärke an, wobei für Windstille am Standort (S) etwa  $20\text{ mg/l}$  und am Standort (SB) etwa  $40\text{ mg/l}$  angegeben sind.

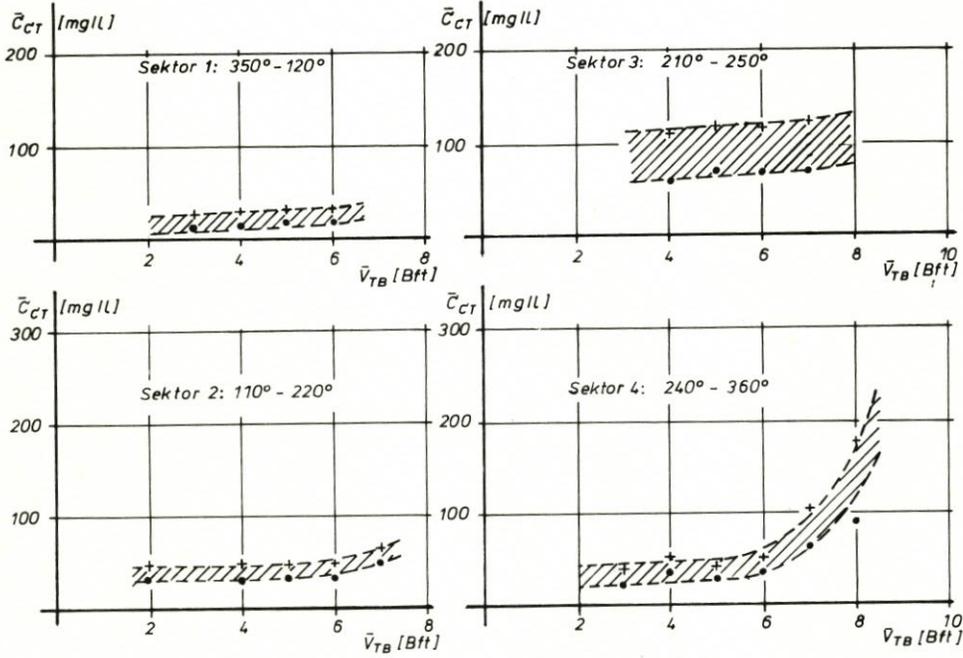
Bei Windstärken ab 6 Bft steigt die Suspensionskonzentration überproportional an. Die Mittelwerte der temperaturbereinigten Kurven liegen bei 6 Bft für (SB) bei etwa  $120\text{ mg/l}$ , für (S) bei etwa  $60\text{ mg/l}$  und steigen bis 8 Bft auf über  $300\text{ mg/l}$  (SB) bzw.  $150\text{ mg/l}$  (S) an.

Unter Zugrundelegung der bisher über einen Tidezeitraum (12 + 3 Stunden) gemessenen Windstärken von max. 10 Bft erfaßt die Kurve der Abb. 5.10 mit Windstärken bis 8 Bft den größten Teil des abzudeckenden Bereichs.

Der vorstehend über die Windstärken gemittelte Kurvenverlauf gibt keine Auskunft über die Verhältnisse in den einzelnen Windsektoren. Die Meßergebnisse werden deshalb für diese Einzelsektoren noch einmal getrennt analog aufbereitet (Abb. 5.11).

In den Sektoren 1 (S) sowie 1 und 2 (SB) wird das bei der Tideabweichung festgestellte Ergebnis dahingehend bestätigt, daß die Suspensionskonzentration bei (S) mit der Windstärke nur unwesentlich ansteigt. Meßergebnisse liegen nur bis 6 Bft vor, so daß der mit einsetzender Brandung zu erwartende überproportionale Anstieg hier nicht erfaßt ist. Die Konzentrationen werden aber aus den bereits erläuterten Gründen (vgl. Abschn. 5.2.1.1) kleiner als in den anderen Sektoren bleiben, da im wesentlichen nur das lokale Ereignis Einfluß hat.

Standort: Scharhörn ((·) Meßwert gemittelt, (+) auf 4 ° C bezogen)



Standort: Scharhörnbalje ((·) Meßwert gemittelt, (+) Meßwert auf 4 ° C bezogen)

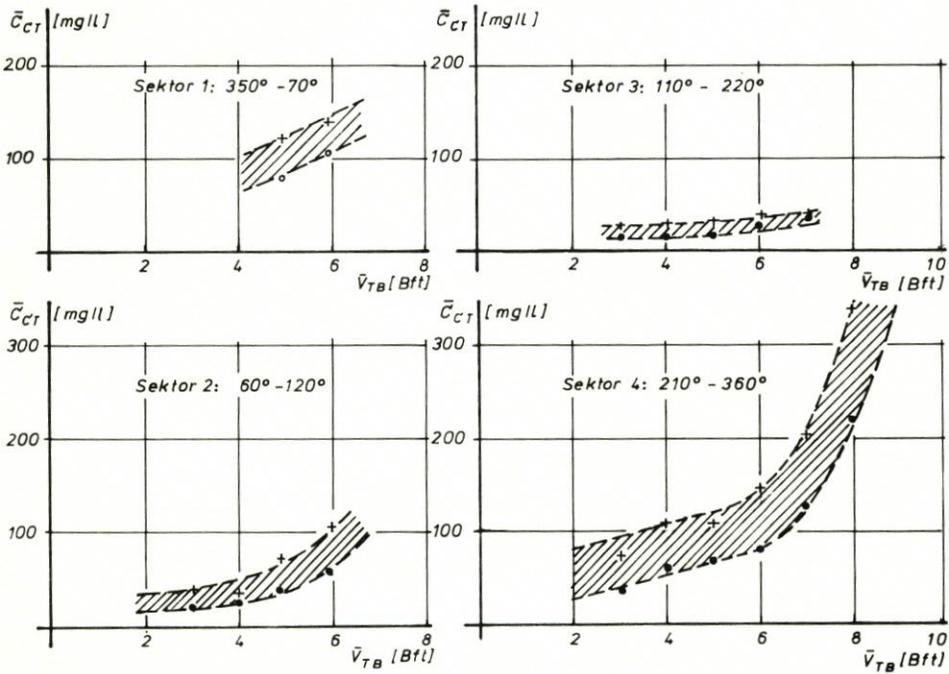


Abb. 5.11. Mittelwerte der Suspensionskonzentration pro Tide und Windstärke – sektoral

Für (SB) liegen im Windsektor 1 keine Messungen für niedrige Windstärken vor. Aufgrund des Datenumfanges kann lediglich im Sektor 2 eine deutliche Zunahme der Suspensionskonzentration mit der Windstärke angegeben werden. Im Sektor 1 liegen Werte nur für 5 und 6 Bft vor, die entsprechend der Abweichung zur mittleren Tide (Abb. 5.06) höhere Konzentrationen als im Sektor 2 aufweisen.

Im Sektor 2 (SB) tritt die überproportionale Steigerung der Konzentration bereits bei Windstärken  $> 4$  Bft auf. Dieses stimmt mit der Erklärung des steilen Anstieges bei der Tideabweichung überein. Die an der Wattkante und auf den vorgelagerten Watten aufgewirbelten Feststoffteilchen gelangen also, durch den Wattkantenvorsprung begünstigt, bereits bei Windstärken um 5 Bft mit der Strömung zur Meßstelle. Für Windstärken  $> 6$  Bft liegen hierzu keine Meßergebnisse vor. Es kann aber aufgrund der weiter bei hohen Windstärken ansteigenden Turbulenz davon ausgegangen werden, daß die Suspensionskonzentrationen im Sektor 2 weiter überproportional wachsen, wie der Kurvenverlauf (Abb. 5.11) bereits andeutet. Bei entsprechender Extrapolation des Kurvenverlaufs werden beide Sektoren bei Windstärken von etwa 7 Bft gleiche Konzentrationswerte aufweisen.

Für die ablandigen Windsektoren 2 (S) und 3 (SB) liegen Meßergebnisse bis 7 Bft vor. Die Konzentrationen steigen bis 6 Bft linear nur sehr gering von 45 mg/l (S) bzw. 30 mg/l (SB) auf 55 mg/l (S) bzw. 40 mg/l (SB) an. Bei Windstärken  $> 6$  Bft sind einsetzende überproportionale Steigerungen zu erkennen.

Der Kurvenverlauf ist damit für beide Standorte bis 7 Bft ähnlich, wobei die Konzentrationen bei (S) etwas höher als bei (SB) liegen. Der Anstieg bei Windstärken  $> 7$  Bft wird, wie bei der Tideabweichung erläutert, am Standort (S) größer sein als am Standort (SB), da bei diesen Windstärken wegen der abgesenkten Wasserstände keine nennenswerten Mengen suspendierter Feststoffe mit der Wasserbewegung über den Wattrücken dem Standort (SB) zugeführt werden (vgl. Abschn. 5.2.1.1).

In den auflandigen Windsektoren 3 und 4 (S) sowie 4 (SB) zeigt sich erwartungsgemäß die deutlichste Zunahme der Suspensionskonzentration mit der Windstärke. Bis 6 Bft ist der Anstieg an beiden Standorten linear und relativ gering. Für (S) steigt die Konzentration von ca. 40 mg/l auf ca. 50 mg/l, für (SB) von ca. 80 mg/l auf ca. 130 mg/l an. Bei Windstärken größer 6 Bft nehmen die Konzentrationen überproportional zu, und zwar für (S) auf etwa 170 mg/l und für (SB) auf 350 mg/l bei 8 Bft. Die Zunahme der Konzentrationen an beiden Standorten paßt zu den über alle Sektoren gebildeten Mittelwerten (Abb. 5.10), was auf einen mit steigender Windstärke abnehmenden Einfluß der örtlichen Faktoren und auf die Zunahme des Einflusses der großräumigen Zusammenhänge (Strömungsverhältnisse) hindeutet. Da für die Sektoren 3 und 4 (S) sowie 4 (SB) die weitergehenden Parametermessungen vorliegen, werden hierzu ausführlichere Betrachtungen in Abschn. 5.2.2 angestellt.

Insgesamt gilt für die Windsektoren des Standorts (S), daß die Anstiege der Konzentration mit der Windstärke bis 6 Bft ähnlich verlaufen und lediglich die Konzentrationshöhen entsprechend der durch die Morphologie bedingten Strömungsverhältnisse (vgl. Sektor 3) gegeneinander verschoben sind. Soweit Meßergebnisse vorliegen, steigt in allen Sektoren des Standorts (S) ab 7 Bft die Konzentration überproportional an. Eine Ausnahme stellt lediglich der Sektor 3 (S) mit den oben erläuterten besonderen Strömungsverhältnissen dar. Wegen der bereits bei geringen Windstärken hohen Konzentration setzt der überproportionale Anstiegsbereich hier erst ab 8 Bft ein. Die für den auflandigen Windbereich charakteristischen Konzentrationen des Sektors 4 überschreiten erst ab 8 Bft die Konzentrationen des Sektors 3.

Ein vergleichbar einheitliches Bild ergibt sich am Standort (SB) nicht. Lediglich in den Sektoren 3 und 4 entspricht es mit seinem linearen Anstieg bis 6 Bft und dem anschließenden Überproportionalitätsbereich dem des Standortes (S). In den Sektoren 1 und 2 ist das Bild

wegen der besonderen Randbedingungen verändert, wobei der überproportionale Anstieg bereits bei kleinerer Windstärke (4/5 Bft) einsetzt.

Die mittlere Suspensionskonzentration kann demnach unter Vernachlässigung eines linearen Gliedes in erster Näherung mit dem allgemeinen Ansatz

$$\bar{C}_{CT} = a \cdot \bar{V}_T^b + \bar{C}_0 \quad (\text{Gl. 5.01})$$

beschrieben werden. Die Konstanten (a) und (b) fassen dabei den Einfluß der einwirkenden Parameter zusammen, deren Zusammenwirken, bezogen auf den Konzentrationswert, bisher nicht ausreichend beschrieben werden kann. Die Konstante (a) wird wesentlich durch die den Standort kennzeichnenden morphologischen und strömungsmäßigen Randbedingungen bestimmt, während der Exponent (b) vornehmlich durch die maßgebende Windrichtung und damit durch den Windsektor mit dem zugehörigen Seegang und den daraus resultierenden Turbulenzen und Orbitalbewegungen bestimmt wird.  $\bar{C}_0$  gibt den sich rein aus der Tidedrömung für Windstille ergebenden Konzentrationswert an.

### 5.2.2 Verhältnisse im auflandigen Windsektor und ihre Parameter (Sektoren 4 [S, SB])

Durch die unter Abschn. 5.2.1 abgeleiteten Zusammenhänge zwischen der Suspensionskonzentration und der Abweichung zur mittleren Tide bzw. der Windstärke werden die ursächlich suspensionserzeugenden Parameter überwiegend nur indirekt beschrieben. Entsprechend Abschn. 4.8 wird deshalb die Suspensionskonzentration mit den gemessenen und direkt beschreibenden Parametern – Strömung und Wellenhöhe – in Verbindung gebracht. Zunächst werden für Wellenhöhen um Hochwasser Suspensionsganglinien über die Tide mit Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsrichtung verglichen. Sodann werden Beziehungen ermittelt zwischen den über eine Tide integrierten Suspensionskonzentrationen und den Windgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und Stromwegen.

Danach werden aus den Wellenhöhen hergeleitete Orbitalgeschwindigkeiten und Seegangscharakteristiken mit den Suspensionskonzentrationen in Zusammenhang gebracht.

#### 5.2.2.1 Suspensionsganglinien über die Tide

Die Suspensionsganglinien sind für 10-cm-Stufen der mittleren Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (vgl. Abschn. 4.2) mit zugehörigen Strömungs- und Richtungsganglinien aufgetragen (Abb. 5.12 bis 5.14). Mit Hilfe der Beziehungen zwischen mittlerer Wellenhöhe  $\bar{H}$  und Windgeschwindigkeit  $\bar{V}_T$  (Abb. 4.02) ist gleichzeitig die zugehörige Windstärke numerisch angegeben.

Die Wahl der mittleren Wellenhöhe um Hochwasser ergibt sich aus dem Meßverfahren (vgl. Abschn. 4.3). Sie ist sinnvoll, da hiermit die Grenzwerte (vgl. Abschn. 2.3.1) für grundberührenden und brechenden Seegang beschrieben werden können. Näherungsweise gleichbleibende Wellenhöhen vorausgesetzt, hat der Einfluß der Orbitalbewegung auf die Sohle bei maximaler Wassertiefe sein Minimum. Sind die Wellenhöhen bereits bei dieser Wassertiefe höher als die o. a. Grenzwerte, so ist auch bei geringerer Wassertiefe und größerem Verhältnis  $\bar{H}/d$ , d. h. während der gesamten Tide, von einem Überschreiten der Grenzwerte auszugehen.

Die für den einzelnen Meßwert charakteristische Seegangsart ist in den Tabellen 1 bis 4

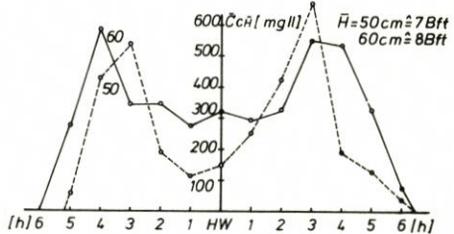
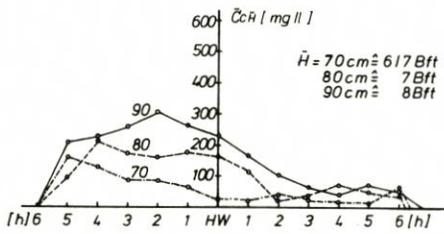
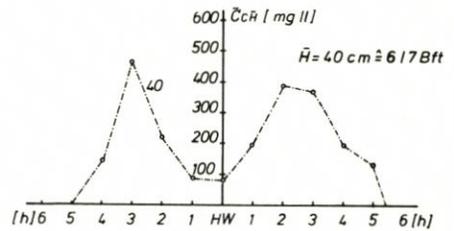
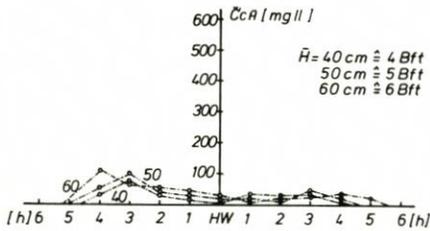
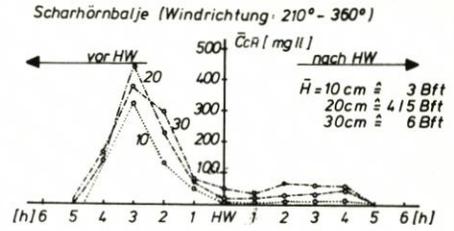
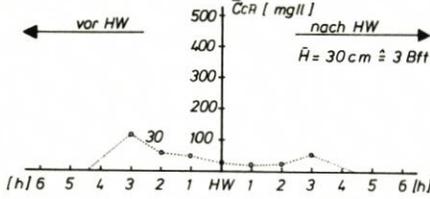


Abb. 5.12. Suspensionskonzentrationsganglinien über die Tide für Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

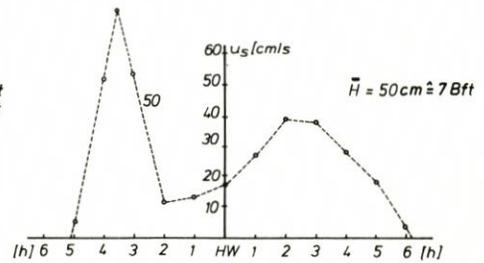
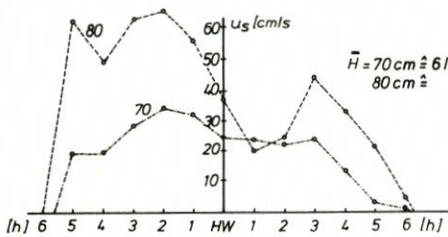
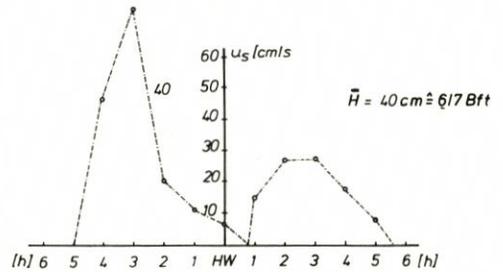
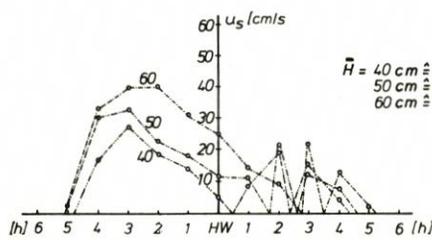
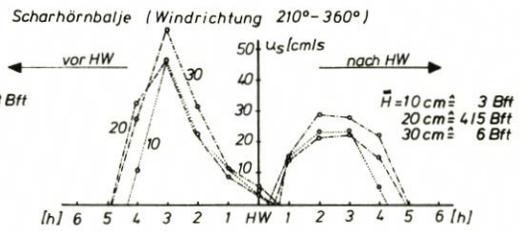
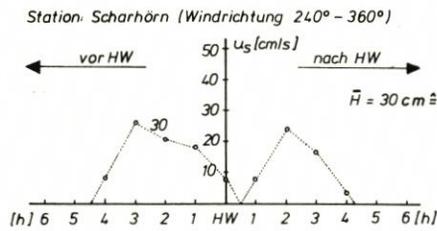


Abb. 5.13. Strömungsgeschwindigkeitsganglinie über die Tide für Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

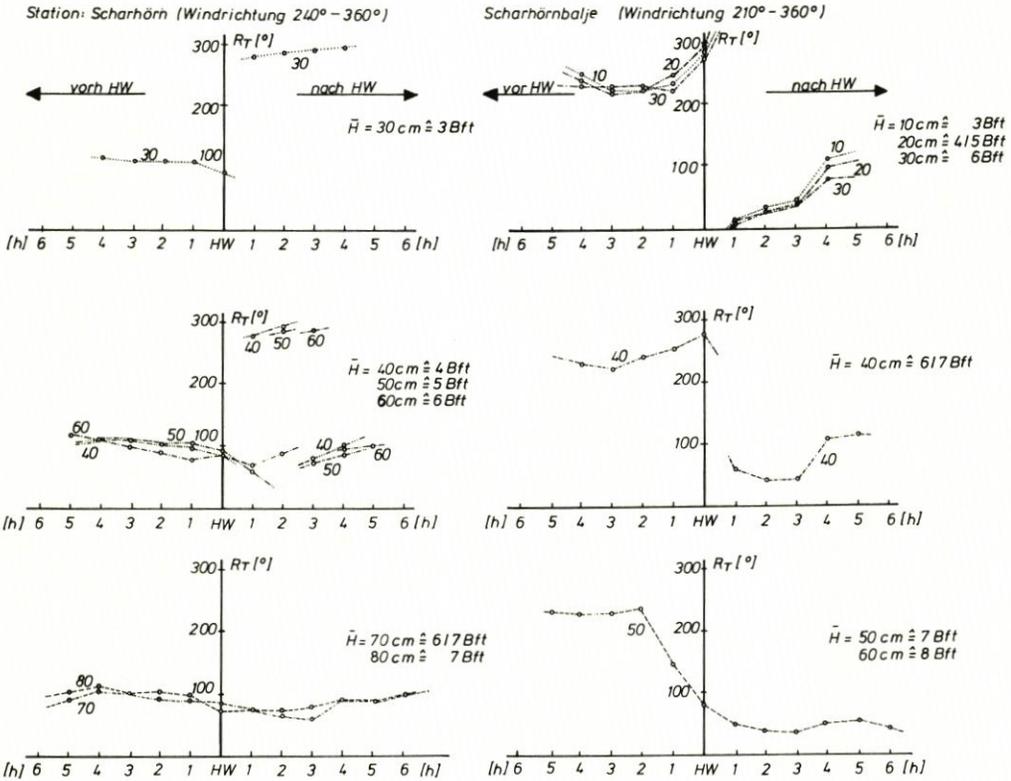


Abb. 5.14. Strömungsrichtungsganglinie über die Tide für Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

(vgl. hierzu auch Abb. 5.19) angegeben. Hiernach setzt am Standort (S), Randwatt, der grundberührende Seegang in Abhängigkeit von der Wassertiefe bereits bei mittleren Wellenhöhen  $\bar{H}$  um 10 cm ein und bricht spätestens bei Wellenhöhen  $\bar{H}$  um 70 cm. Am Standort (SB), brandungsfreies Watt, setzt die Grundberührung spätestens bei mittleren Wellenhöhen  $\bar{H}$  um 30 cm ein.

Für den Standort Scharhörh (S) ist bei Wellenhöhen bis 30 cm, das entspricht einer Windstärke bis etwa 3 Bft, die normale Tidebewegung ausgebildet mit Flut-, Stauwasser- und Ebbe-Phase. Die Stromrichtungen sind bei Flut und Ebbe parallel zum Wattrand gegenläufig. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit (rd. 25 cm/s) in der Flutphase stimmt zeitlich mit dem der Suspensionskonzentration (rd. 120 mg/l) überein. In der Ebbe-Phase ist das Maximum der Konzentration schwächer ausgebildet (50 mg/l) und tritt gegenüber dem Strömungsmaximum (rd. 25 cm/s) etwa um 1 Stunde später ein. Diese Verschiebung ergibt sich aus der entgegengesetzt zur Windrichtung verlaufenden Strömung, was zu einer Aufsteilung des mit dem Wind laufenden Seegangs, insbesondere bei geringen Wassertiefen, führt. In der Flutphase liegen die Werte der Suspensionskonzentration im Mittel etwa doppelt so hoch wie die in der Ebbe-Phase. In der Tendenz entsprechen sie damit der Strömungsganglinie.

Bei Wellenhöhen zwischen 40 und 60 cm, d. h. Windstärken bis 6 Bft, ändert sich die Konzentrationsganglinie nur unwesentlich. Deutliche Veränderungen treten nur in den Strömungsganglinien auf. Sie zeigen während der Flut mit  $\bar{H}$  steigende und während der Ebbe verminderte Strömungsgeschwindigkeiten bei mehreren Stromkenterpunkten. Eine Unter-

scheidung in Ebbe- und Flutphasen ist problematisch, da die Flutdauer 1 bis 2 Stunden über das Hochwasser hinaus andauert, der Ebbstrom nur 1 bis 2 Stunden läuft und gegen Ende der Tide bereits wieder in die Flutstromrichtung kentert. Das mehrfache Kentern des Stromes vor Scharhörn ist mit der Ausbildung einer küstenparallelen Walzenströmung während der Ebbphase erklärt (GÖHREN, 1971). Die in Abschn. 4.2 als nicht sinnvoll bezeichnete Einteilung der Suspensionskonzentration, z. B. nach Halbzeiten, wird hier deutlich. Eine Orientierung am Hochwasser oder am Kenterpunkt ist anhand der Strömungs- und Richtungsganglinien nicht gerechtfertigt. Nach dem Vergleich der Strömungsganglinien mit den Suspensionsganglinien ist auffällig, daß in der Tidezeit nach Hochwasser höhere Suspensionskonzentrationen eintreten, als die Strömungsganglinien im Hinblick auf die Betrachtungen für  $\bar{H} = 30$  cm erwarten lassen.

Für weiter zunehmende Windstärken und gemessene mittlere Wellenhöhen bis 90 cm, das entspricht etwa 8 Bft, steigt die Suspensionskonzentration in der Zeit vor Hochwasser bis etwa 2 Stunden danach überproportional bis auf 300 mg/l an, während in den letzten 4 Tidestunden nur ein kleinerer Konzentrationsanstieg bis auf maximal 70 mg/l zu verzeichnen ist. Die Strömungsrichtung-Ganglinie weist ab 70 cm Wellenhöhe, d. h. bei 6 bis 7 Bft, keine Kenterpunkte mehr auf und läuft nahezu richtungskonstant in Flutstromrichtung während der ganzen Tide. Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen ab  $\bar{H} = 80$  cm (ca. 7 Bft) in der Zeit vor Hochwasser 50 bis 60 cm/s und in der Zeit nach Hochwasser 20 bis 40 cm/s. Für  $\bar{H} = 90$  cm (8 Bft) liegen keine Strömungsmessungen vor. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend  $\bar{H} = 80$  cm weiter steigen und insbesondere in der Flutphase die von GÖHREN (1971) für Sturmfluten angegebenen Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 100 cm/s erreichen werden.

Die Interpretation der von HYULSTRÖM/ZANKE (vgl. Abschn. 2.3.1, Abb. 2.16) für wellenfreie Verhältnisse angegebenen Kurven ergibt bei Korngrößen  $d_{50} = 0,15$  mm eine Grenzgeschwindigkeit der Aufwirbelung 35 cm über der Sohle von etwa 60 cm/s. Dieses stimmt mit Naturmessungen von FÜHRBÖTER et al. (1981) überein, die unter Berücksichtigung einer biogenen Stabilisierung des Wattbodens für  $d_{50} = 0,16$  mm zu kritischen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zwischen rd. 45 und 65 cm/s kommen. Nach den Strömungsmessungen (vgl. Abb. 5.13) für Scharhörn (S) wird  $u_s = 60$  cm/s erstmals bei Wellenhöhen  $\bar{H} = 80$  cm (entsprechend etwa 7 Bft) erreicht. Dagegen zeigen die Vergleiche der Suspensionsganglinien (Abb. 5.12) bereits bei  $\bar{H} = 70$  cm und  $u_s = 30$  cm/s den die Aufwirbelung kennzeichnenden Anstieg der Suspensionskonzentration, da die Einflüsse von Wellen einschließlich Brandung nicht berücksichtigt sind. Bei Überlagerung der Geschwindigkeiten aus Tideströmung und aus wellenbedingter Orbitalbewegung ergibt sich die genannte Grenzgeschwindigkeit (60 cm/s) bereits bei 3 Bft mit mittleren Wellenhöhen  $\bar{H} = 30$  cm (vgl. Abschn. 5.2.2.3), ohne daß damit der erwartete Anstieg der Suspensionskonzentration eintritt (vgl. Abb. 5.12). Der Geschwindigkeitsgrenzwert (60 cm/s) allein ist also ungeeignet, das Einsetzen des Konzentrationsanstieges zu erklären. Es bleiben noch die Einflüsse des Brechens der Wellen zu berücksichtigen.

Bei Wellenhöhen  $\bar{H} = 70$  cm bricht der Seegang auf dem Randwatt großflächig und im Bereich der Brandungskante konzentriert. Es kommt zu Schwallbrechern (SIEFERT, 1973), die in gleichmäßig flachen Gebieten auch als Rollbrecher bezeichnet werden, weil sie auf langen Brandungs-(Reibungs-)strecken die vorgelagerten Flachwassergebiete durchlaufen (Abb. 2.09). Das Brechen der Wellen führt zu einem sprunghaften Anstieg der Turbulenz, wobei insbesondere durch den Lufteinschlag ein erheblicher Teil der Brandungsenergie in Durchmischungsturbulenz und Schwingungen des wassergesättigten Bodens (FÜHRBÖTER, 1971) umgesetzt wird. Der Größtwert der Wasser-Boden-Wechselwirkung ist unmittelbar am

Brechpunkt zu erwarten, wo hohe Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen auf die Sohle einwirken.

ZENKOVICH (1967) weist darauf hin, daß die eingeschlagenen Luftblasen imstande sind, beim Aufsteigen nach dem „Air-lift-Prinzip“ Sand in höhere Wasserschichten zu fördern. Hierbei sind Sandwolken mit maximal 30 000 mg/l und im Mittel mit 10 000 mg/l festgestellt worden. Im Watt von Scharhörn, wo das Sohlmaterial nur wenig feinste Bestandteile enthält (vgl. Abb. 4.03 u. 5.07), sind bei Windstärken bis 8 Bft maximale Einzelwerte von 550 mg/l (Abb. 5.25) und maximale Tidemittelwerte von 300 mg/l (bezogen auf + 4 °C) gemessen worden. Diese Werte werden bei weiterem Ansteigen der Windgeschwindigkeit überschritten. Wie die Grenzwertbetrachtungen in Abschn. 5.2.3 zeigen, werden die von ZENKOVICH angegebenen Extremwerte jedoch nicht erreicht. Vermutlich beruhen die hohen Werte von ZENKOVICH auf Messungen bei Sturzbrechern an stärker geneigten Brandungskanten, wo auf kürzestem Weg die gesamte Wellenenergie umgesetzt wird. Diese Voraussetzung trifft jedoch für den Standort (S) nicht zu. Außerdem gehen die Angaben von ZENKOVICH auf Messungen an Einzelbrechern zurück und sind nicht mit den Messungen vor Scharhörn (S) bei drei- bis vierminütiger Probenförderzeit vergleichbar.

Der überproportionale Anstieg der Suspensionskonzentration bei Windstärken  $> 6$  Bft ( $\bar{H} > 60$  cm) ist somit verursacht durch:

- die Überschreitung des Grenzgeschwindigkeitswertes (Beginn der Aufwirbelung des Sohlmaterials) und
- die Brandung mit sprunghaft erhöhter Turbulenz, insbesondere durch den Lufteinschlag der Wellen.

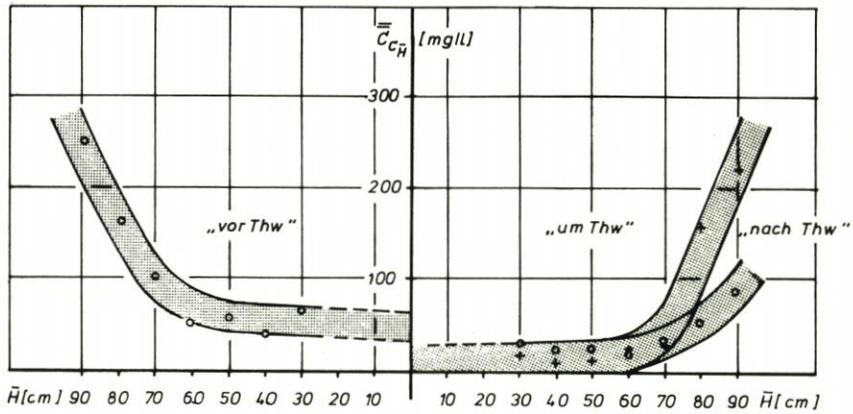
Eine genauere Trennung dieser beiden Einflußgrößen ist schwierig, da hohe Wellen zwangsläufig mit größeren Strömungsgeschwindigkeiten und umgekehrt verbunden sind. Der Einfluß der brechenden Welle dominiert bei Windstärken  $> 6$  Bft, da der Geschwindigkeitsgrenzwert für die Aufwirbelung bei einer Überlagerung von Tide- und von Orbitalströmung bereits bei kleineren Windstärken überschritten wird, ohne zu überproportionalen Suspensionssteigerungen zu führen.

Zusätzlich ist auch der mit dem Triftstrom aus den vorgelagerten Watten herangeführte Suspensionsanteil zu betrachten, der nicht einem am Standort Scharhörn (S) gemessenen Ereignis zugeordnet werden kann und damit zusätzlich eine Trennung erschwert.

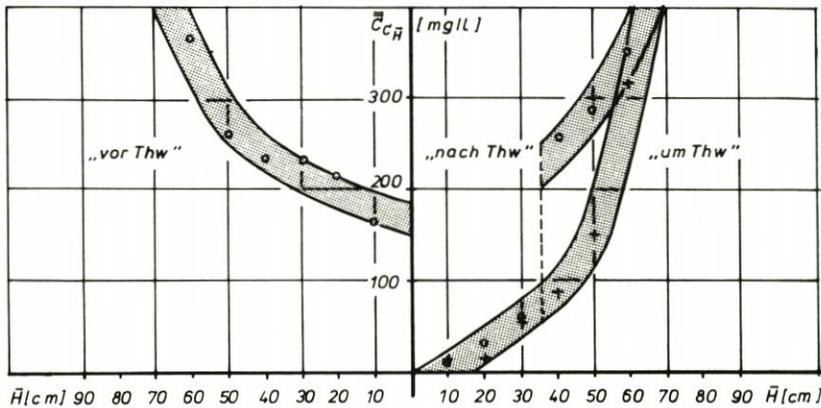
Zur Veranschaulichung des überproportionalen Anstiegs der Suspensionsganglinien (Abb. 5.12) für die Zeiträume vor, um und nach Hochwasser werden für gleiche Wellenenergien zusätzlich Konzentrationsmittelwerte aufgetragen (Abb. 5.15).

Für den Standort Scharhörnbalje (SB) sind entsprechend der Seegangscharakteristik (Abb. 1.02, brandungsfreies Watt) die gemessenen Wellenhöhen für gleiche Windstärken geringer als am Standort (S). Bei Wellenhöhen bis  $\bar{H} = 30$  cm (Windstärken bis etwa 6 Bft) ist eine „normale“ Tidebewegung ausgebildet. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit bei Flut hat etwa den doppelten Wert der Geschwindigkeit bei Ebbe. Die max. Strömungsgeschwindigkeit bei Flut liegt mit ca. 50 cm/s im Bereich der beginnenden Aufwirbelung des Sohlmaterials (vgl. FÜHRBÖTER et al., 1981, und Abb. 2.16). Im Vergleich zum Standort Scharhörn (S), wo die Grenzgeschwindigkeit mit 60 cm/s angegeben ist, erklärt sich für (SB) der niedrigere Wert von ca. 50 cm/s aus dem gegenüber (S) etwas feinkörnigerem Material ( $d_{50} = 0,13$  mm). In der Flutphase ist die Suspensionsganglinie dem Strömungsverlauf ähnlich, und die max. Konzentrationen steigen mit zunehmenden Windstärken auf Werte zwischen 300 und 450 mg/l an. Die Strömung läuft in dieser Tidephase etwa entgegengesetzt zur Windrichtung und führt mit zunehmender Windstärke zur Ausbildung asymmetrisch aufgesteilter Wellen, die nur am Anfang der Tide bei geringeren Wassertiefen und bei

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° - 360°)

Abb. 5.15. Suspensionskonzentrationen für Tidephasen und steigende Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

Wellenhöhen  $\bar{H} \geq 30$  cm Grundberührung haben. Das ausgeprägte Suspensionsmaximum liegt in der zweiten Tidestunde und ist bestimmt durch die aufgestellten Wellen, das zur gleichen Zeit auftretende Strömungsmaximum und durch die der Meßstelle aus östlich vorgelagerten Wattflächen zugeführten Materialien. Die parallel zum Elbelauf liegenden Wattflächen sind zum großen Teil dem Rand- bzw. Brandungswatt zuzuordnen (Abb. 1.02), auf denen der in Prielrichtung gebeugte Seegang (Abb. 2.14) energiemäßig in entsprechende Turbulenzen und damit Suspensionskonzentrationen umgesetzt wird. Der Anteil der durch den Priel mit der Tideströmung herangeführten Suspension ist signifikant, wie sich aus den Beobachtungen für Windstärken  $> 6$  Bft ergibt.

In der Ebbephase ist eine Ähnlichkeit der Suspensionsganglinie mit der Strömungsganglinie nicht festzustellen. Die Konzentrationen sind hier über die Zeit wenig verändert und steigen von 10 mg/l bei 3 Bft auf Konzentrationen bis 70 mg/l bei 6 Bft an. Da die gegenüber der Flutphase sehr geringen Konzentrationen bereits zur Stauwasserzeit erreicht sind, ist der

oben als signifikant bezeichnete Herantransport der Suspension mit der Tideströmung von vorgelagerten Wattflächen als wesentlich bestätigt. Bei Ebbestrom liegt das Einzugsgebiet im Schutz des Wattrückens und der vorgelagerten Scharhörn-Düne, so daß sich ein ausgeprägter, grundberührender Seegang nicht ausbilden kann. Die damit für die Suspensionsaufwirbelung maßgebende Tideströmung erreicht mit max. 20 bis 30 cm/s Strömungsgeschwindigkeit den Grenzwert der Aufwirbelung (50 cm/s) nicht. Eine Wechselwirkung zwischen Wasser und Sohlmaterial findet somit nur noch in sehr geringem Maße statt. Dieses drückt sich unmittelbar in den abgeminderten Konzentrationswerten aus.

Bei Windstärken von 6 bis 7 Bft ( $\bar{H}$  etwa 40 cm) ändert sich der Verlauf der Suspensionsganglinie während der Zeit vor Hochwasser unbedeutend; lediglich das Konzentrationsmaximum steigt auf Werte zwischen 400 und 500 mg/l an. Demgegenüber ergibt sich in der Zeit nach Hochwasser (HW) ein sprunghafter Anstieg der Konzentration auf gleiche Werte wie vor HW. Die Steigerung der max. Flutstromgeschwindigkeit auf über 70 cm/s beeinflusst die Konzentrationswerte nur wenig. In der Zeit nach Hochwasser ist die Strömungsganglinie fast identisch mit deren Verlauf bei geringeren Windstärken. Trotzdem ist der sprunghafte Anstieg der Konzentration zu verzeichnen.

Die bereits für Winde  $< 6$  Bft gegebene Erläuterung zu den Suspensionsganglinien für die Zeit vor HW gelten auch hier. Die über dem Watt durch die gegenläufige Strömung asymmetrisch aufgesteilteten Wellen laufen in Windrichtung und treffen auf die sich entgegengesetzt bewegendes Wellen aus dem Elbeseegang (Abb. 2.14), was im Bereich des östlich vorgelagerten Randwatts zum frühzeitigen Brechen der Wellen führt. Die hieraus resultierende Erwartung größerer Suspensionskonzentrationen wird durch die Messungen am Standort (SB) nicht bestätigt (Abb. 5.12).

Der Anstieg der Suspensionskonzentration in der Zeit nach HW bei Windstärken von 6 bis 7 Bft ist durch Veränderungen auf den Watten in Luv von der Meßstelle bedingt. Sie sind durch eine flächenhafte Brandung auf den westlich vorgelagerten Rand- und Brandungswatten gekennzeichnet, wie sie auch am Standort (S) zum überproportionalen Anstieg der Konzentrationen führen. Außerdem wird durch den bei diesen Windstärken zunehmend einsetzenden Triftstrom (Abb. 5.08) das an der Wattlufseite aufgewirbelte Material über den hohen Wattrücken hinweg zur Meßstelle geführt. Das Einsetzen des Triftstroms ist durch die Änderung des Drehsinns der Stromrichtung angezeigt (Abb. 5.14). Die Strömungsrichtung dreht nicht mehr wie bei geringeren Windstärken von West über Nord nach Ost, sondern über Süd. Nach den Suspensionsganglinien für diesen Windstärkenbereich sind die örtlichen Wellenverhältnisse auf dem brandungsfreien Watt von untergeordneter Bedeutung. Vielmehr sind die Verhältnisse auf den in Stromrichtung vorgelagerten Wattflächen in Verbindung mit den Strömungen, die das aufgewirbelte Material zur Meßstelle verfrachten, maßgebend.

Bei weiter bis auf 8 Bft ansteigenden Windstärken, Wellenhöhen  $\bar{H}$  bis 60 cm, wird die triftstrombedingte Drehsinnveränderung der Strömungsrichtung deutlich. Ein Kenterpunkt mit Stauwasserzeit tritt nicht mehr auf. Die Drehung in die Ebbestromrichtung setzt bereits um die vierte Tidestunde ein. Die Strömung setzt danach zunehmend richtungskonstant über den zwischen Scharhörn und Neuwerk ausgebildeten Sattel. In Verbindung mit der Geschwindigkeitganglinie ergibt sich hieraus ein kräftiger Triftstrom von der Lufseite zur Leeseite des Wattes mit maximalen Strömungsgeschwindigkeiten vor Hochwasser von über 70 cm/s und nach Hochwasser von rd. 40 cm/s.

Der Einfluß des Triftstroms ist an der Suspensionsganglinie abzulesen. Die Ganglinie ist in der Zeit nach Hochwasser in der Regel ausgerundeter, die Konzentrationsmaxima sind gleich oder größer als in der Zeit vor HW, und die Konzentrationswerte um HW steigen wegen des bereits laufenden Triftstroms erheblich an. Die Werte der Suspensionskonzentra-

tionen werden wie im vorhergehenden Windstärkenbereich auch hier durch die Ereignisse auf den in Strömungsrichtung vorgelagerten Watten bestimmt. Die Maxima der Strömungsgeschwindigkeiten decken sich auch hier gut mit denen der Suspensionsganglinien. Letztere steigen gegenüber denen bei geringeren Windstärken um über 100 mg/l auf 550 bis 600 mg/l in der Zeit vor HW und auf 550 bis 650 mg/l in der Zeit nach HW an.

Analog zum Standort (S) ist auch für den Standort (SB) die Veränderung der Konzentrations-Mittelwerte über der Wellenhöhe in den Zeiten vor HW, um HW und nach HW aufgetragen (Abb. 5.15). Auch hier setzt der überproportionale Anstieg der Konzentration bei einer bestimmten Wellenhöhe ein. Der Kurvenverlauf ist an beiden Standorten ähnlich. Allerdings differieren die zugehörigen Wellenhöhen entsprechend der Seegangskarakteristik. Bei Wellenhöhen  $\bar{H}$  bis 30 cm, d. h. ca. 6 Bft, ist der Anstieg der Suspensionskonzentration im Vergleich zu Scharhörn steiler. Hier kommen die im Bereich des brandungsfreien Wattes ansteigenden Turbulenzen in Verbindung mit dem feineren Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,13$  mm) der näheren Umgebung sowie die weiträumig vorgelagerten Wateinzugsflächen zum Ausdruck. Der sprunghafte Anstieg der Konzentration in der Zeit nach HW bei Windstärken  $> 6$  Bft ( $\bar{H} \approx 40$  cm) tritt hervor. Zur gleichen Zeit setzt der überproportionale Anstieg der Konzentration ein, wie es dem Standort (S) entspricht. Der Anstieg der Konzentrationswerte mit der Wellenhöhe ist in allen Phasen bei Windstärken  $> 6$  Bft im Vergleich zum Standort (S) nur wenig steiler. Die anhand von Suspensions-Mittelwerten bereits angegebene Windstärke von 6 Bft für das Einsetzen des überproportionalen Anstiegs der Konzentrationen (Abb. 5.10 u. 5.11) wird aufgrund der Suspensionsganglinie und der vorgenommenen Trennung nach Phasen (Abb. 5.15) als richtig bestätigt.

Aufbauend auf obige Feststellungen kann die Suspensionskonzentration an einem Standort auf dem Watt durch den allgemeinen Ansatz

$$C = f(C_2, S_V) + f(C_1) + C_w \quad (\text{Gl. 5.02})$$

beschrieben werden. Hierbei ist  $C_2$  die auf den vorgelagerten Watten aufgewirbelte Suspension, die mit der Strömung (Stromweg  $S_V$ ) dem Meßstandort zugeführt wird,  $C_1$  die örtlich am Standort aufgewirbelte Suspension und  $C_w$  die von außerhalb des Betrachtungsraumes herangeführte Suspension.  $C_1$  und  $C_2$  sind anhand der wesentlichen örtlichen Einflußgrößen durch

$$C_{1/2} = f(D_H, \bar{d}) + f(F_{(u_s + u_H)}, \bar{d}) \quad (\text{Gl. 5.03})$$

näher bestimmt. Die örtlich aufgewirbelte Suspension wird hierbei mit Hilfe der seegangsbedingten (inkl. Luftschlag der brechenden Welle) Turbulenzkräfte ( $D_H$ ) und mit Hilfe der strömungsbedingten Schubkräfte ( $F_{(u_s + u_H)}$ ) auf das Sohlmaterial ( $\bar{d}$ ) ausgedrückt. Für  $C_w$  kann aufgrund der großen Variationsbreite der Randbedingungen keine weitergehende Angabe gemacht werden. Die Ergebnisse im Untersuchungsgebiet weisen allerdings für  $C_w$  auf einen sehr geringen Anteil an der Gesamtkonzentration hin.

### 5.2.2.2 Über die Tide integrierte Konzentrationswerte

Die vorhergehenden Ausführungen zeigen, daß mit zunehmendem Windeinfluß die Diskussion der Konzentrationen anhand von Teilabschnitten einer Tide erschwert wird, da der Einfluß des Triftstroms durch die an den Standorten (S) und (SB) gemessenen Strömungsgrößen nicht ausreichend beschrieben wird. Es fehlt die Erfassung der großräumigen Strömungsverhältnisse im Umfeld der Standorte, um die Materialzufuhr als wesentlichen Konzentrationsanteil zu erfassen. Für mittlere Tideverhältnisse hat GÖHREN (1969) zwar eine

Beschreibung der Strömungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet angegeben. Es fehlen aber, mit Ausnahme einiger Triftstromvektoren, die unter Abschn. 5.2.2.1 bereits zur qualitativen Abschätzung der Einzugsgebiete verwendet worden sind, Angaben für Starkwinde.

Für die weiteren Betrachtungen sind die Suspensionskonzentrationen als über die Tide integrierte Mittelwerte gewählt und in Beziehung gebracht zu Parametern gemäß Abschn. 5.2.2. Hierdurch werden auch die Einflüsse aus den Ganglinien der Strömungsverhältnisse berücksichtigt, die die Parallelität von Wind- und Strömungsrichtungen bei steigenden Windstärken ausweisen.

Die entsprechend Abschn. 4.2 aufbereiteten Mittelwerte der Suspensionskonzentrationen sind über der Windgeschwindigkeit/-stärke (Abb. 5.16), über der mittleren Wellenhöhe  $\bar{H}$  um Hochwasser (Abb. 5.17) und über dem Stromweg (Abb. 5.18) aufgetragen. Zusätzlich sind die Suspensionswerte anhand der zugehörigen Wellenereignisse in Abhängigkeit von der Wassertiefe klassifiziert nach brechendem, grundberührendem bzw. nicht grundberührendem Seegang (vgl. Abschn. 2.3.1 u. Abb. 5.19).

Es ergeben sich am Standort (S) nur Werte bei brechendem bzw. grundberührendem Seegang. Meßwerte für nicht grundberührenden Seegang, d. h. Wellenhöhen  $< 5$  bzw.  $15$  cm, liegen nicht vor und sind auf Windstärken  $< 1$  bis  $2$  Bft bei anhaltenden Ruhigwetterphasen beschränkt.

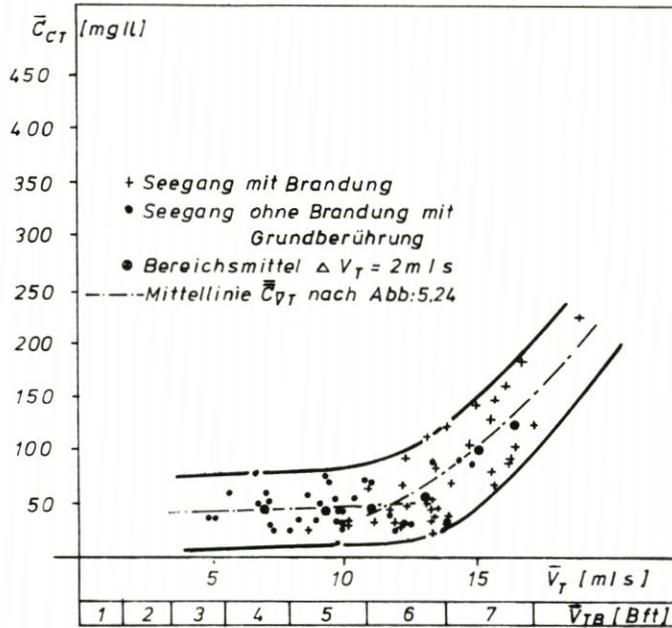
Am Standort (SB) liegen entsprechend der Definition „brandungsfreies Watt“ nur Meßwerte mit grundberührendem bzw. nicht grundberührendem Seegang vor. Das Einsetzen des grundberührenden Seegangs ist in Abhängigkeit von der Wassertiefe  $d$  bei Wellenhöhen  $\bar{H}$  zwischen  $15$  und  $35$  cm, d. h. etwa ab  $5$  Bft, gegeben. Die vorstehenden Klassifizierungen beziehen sich auf die um Hochwasser vorherrschende Seegangsart und gelten für die Gesamttiefe näherungsweise (vgl. Abschn. 5.2.2.3).

Die über die Windgeschwindigkeit bzw. Windstärke aufgetragenen Suspensionskonzentrationen (Abb. 5.16) zeigen, daß der Übergang vom linearen zum überproportionalen Anstieg bei einer Windgeschwindigkeit von etwa  $6$  Bft ( $11,5$  m/s) beginnt. Dies entspricht dem Ergebnis der über der Windstärke aufgetragenen Konzentrationsmittelwerte (Abb. 5.10).

Am Standort (S) ist die Windgeschwindigkeit von  $11,5$  m/s mit dem Einsetzen des überwiegend brechenden Seegangs gekoppelt, so daß der Einfluß des Brechens der Wellen als wesentlicher Parameter für die überproportionale Erhöhung der Konzentrationswerte bestätigt ist. Am Standort (SB) setzt bei etwa gleichen Windverhältnissen die Grundberührung des Seegangs ein und läßt zunächst eine Kopplung des Konzentrationsanstiegs mit diesem Ergebnis vermuten. Für gleiche Windgeschwindigkeiten weist aber die von GÖHREN (1968) angegebene Veränderung des Triftstroms mit der Windstärke (Abb. 5.08) ab  $6$  Bft eine ausgeprägte Zunahme des Triftstroms aus. Unter Berücksichtigung des an beiden Standorten nur wenig differierenden Sohlmaterials – (S):  $d_{50} = 0,15$  mm, (SB):  $d_{50} = 0,13$  mm (vgl. Abb. 4.01 u. 4.03) – müßte der überproportionale Anstieg am Standort (S) ebenfalls an das Ereignis des grundberührenden Seegangs gekoppelt sein. Wie weiter oben ausgeführt, ist dieses jedoch nicht der Fall, so daß am Standort (SB) der einsetzende Triftstrom und damit der Transport aus den vorgelagerten Watten als Steuerelement anzusehen ist. Das lokale Ereignis (SB) tritt damit bei Windstärken  $> 6$  Bft in der Bedeutung hinter dem Triftstrom zurück. Ursache des überproportionalen Anstiegs ist demnach auch am Standort (SB) das Brechen des Seegangs auf den in Luv vorgelagerten Brandungs- und Randwatten bei Windstärken  $> 6$  Bft.

Die Zusammenhänge zwischen dem Suspensionsgehalt und der Wellenhöhe bzw. dem Stromweg (Abb. 5.17 und 5.18) bestätigen die oben getroffene Feststellung. Am Standort (S) ergibt sich in Übereinstimmung mit den Suspensionsganglinien (Abb. 5.12) bei einer Wellenhöhe  $\bar{H}$  von ca.  $70$  cm und überwiegend brechendem Seegang ( $> 6$  Bft) der Übergang zum

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° - 360°)

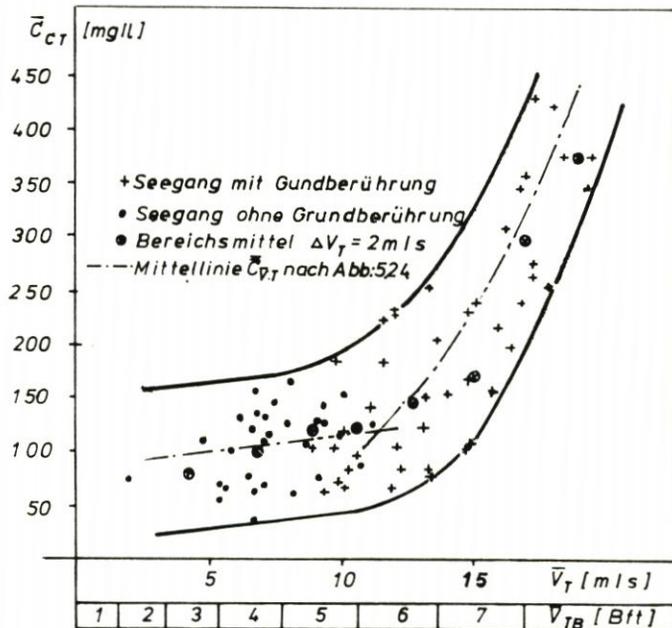
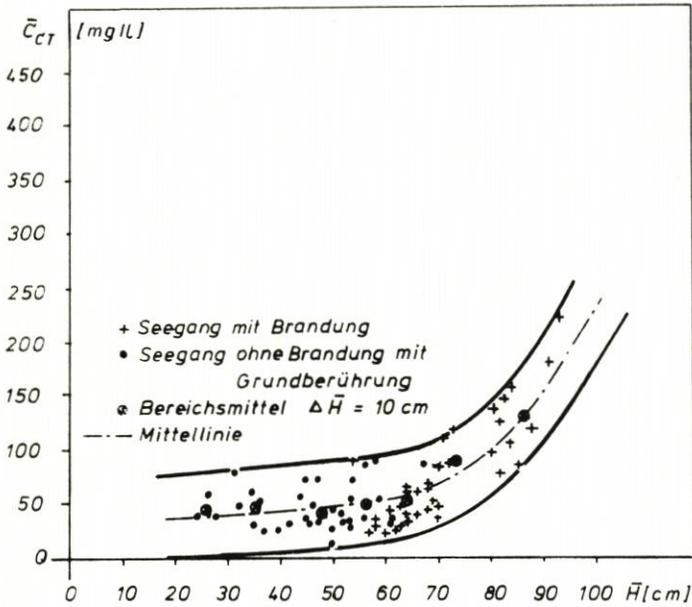


Abb. 5.16. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Windgeschwindigkeit - tidebezogene Mittelwerte

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° - 360°)

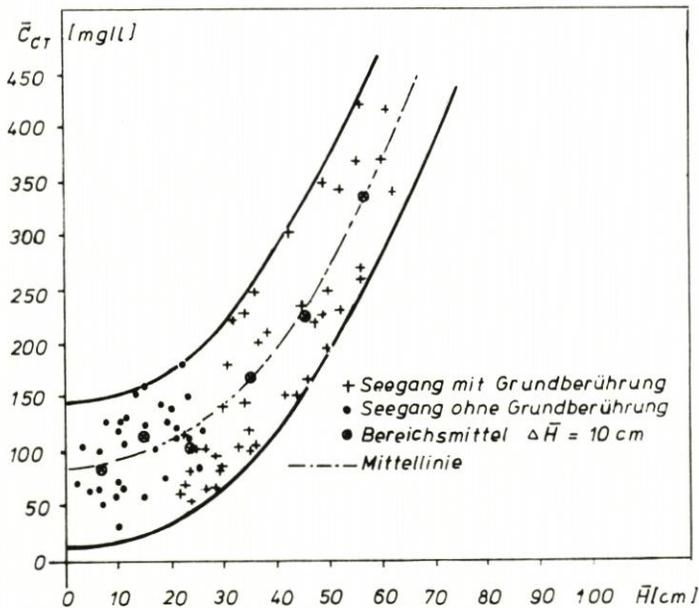
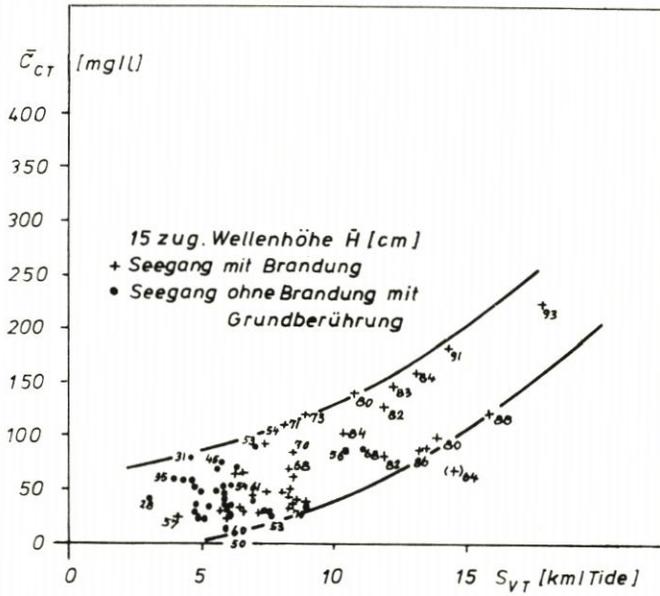


Abb. 5.17. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Wellenhöhe - tidebezogene Mittelwerte

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240 ° – 360 °)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210 ° – 360 °)

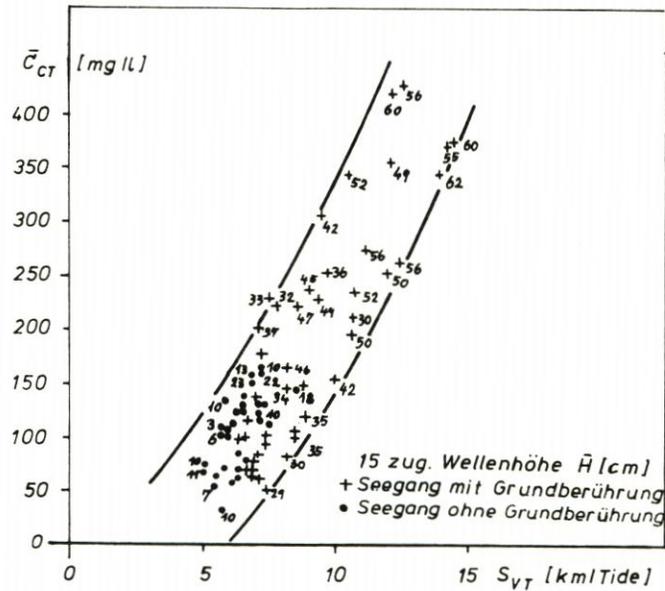
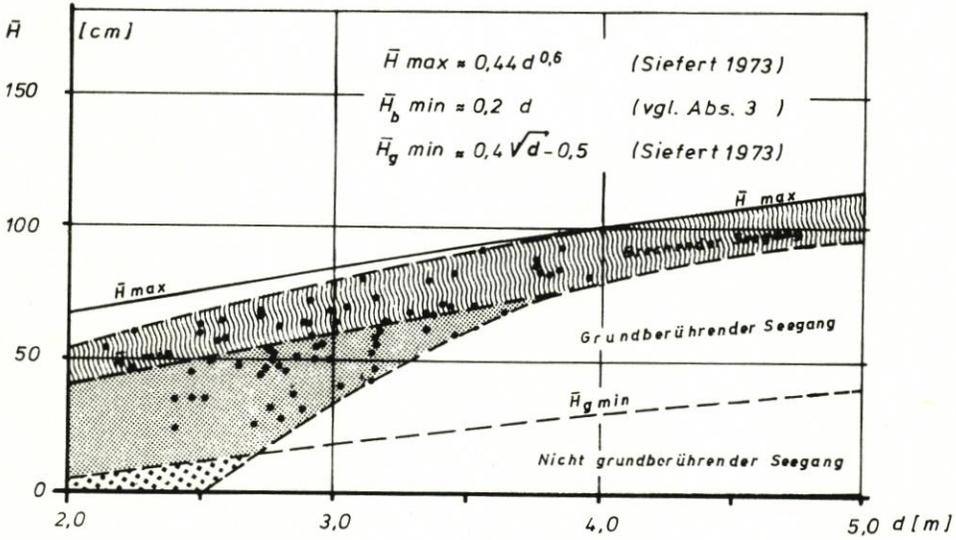


Abb. 5.18. Veränderung der Suspensionskonzentration mit dem Stromweg – tidebezogene Mittelwerte

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° - 360°)

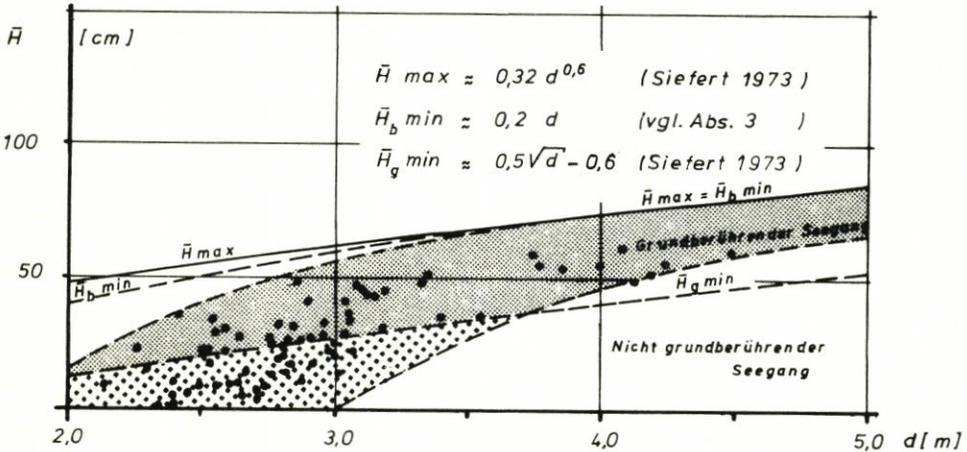


Abb. 5.19. Einflußbereiche des grundberührenden und brechenden Seegangs in Abhängigkeit von der Wassertiefe

überproportionalen Anstieg der Suspensionskonzentration. Am Standort (SB) ist eine derart deutliche Veränderung nicht erkennbar. Vielmehr steigt die Suspensionskonzentration von Anbeginn zunehmend mit der Wellenhöhe an.

Die Abhängigkeit der Konzentrationswerte vom Stromweg zeigt ein ähnliches Bild. Am Standort (SB) steigen die Konzentrationswerte erheblich steiler mit dem Stromweg an als am Standort (S), was für (SB) auf den besonderen Einfluß des Triftstroms hinweist. Die Abweichungen im Sohlmaterial sind nicht so erheblich, als daß sie eine derart unterschiedliche Abhängigkeit an beiden Standorten durch zunehmende Strömungsgeschwindigkeiten erklären können.

Zur Verdeutlichung der maßgebenden und an beiden Standorten unterschiedlichen Einflußgrößen auf die Suspension ist die Beziehung zwischen dem Stromweg und der Suspensionskonzentration (Abb. 5.18) um die zugehörigen mittleren Wellenhöhen um Hochwasser ergänzt. Hieraus ergibt sich für den Standort (S) ein geordneter Anstieg der Wellenhöhe mit dem Stromweg und damit eine klarere Abhängigkeit von der Wellenhöhe als am Standort (SB). Dort streuen die Werte der mittleren Wellenhöhen bei gleichem Stromweg stärker, was den vorherrschenden Einfluß des Triftstroms bestätigt.

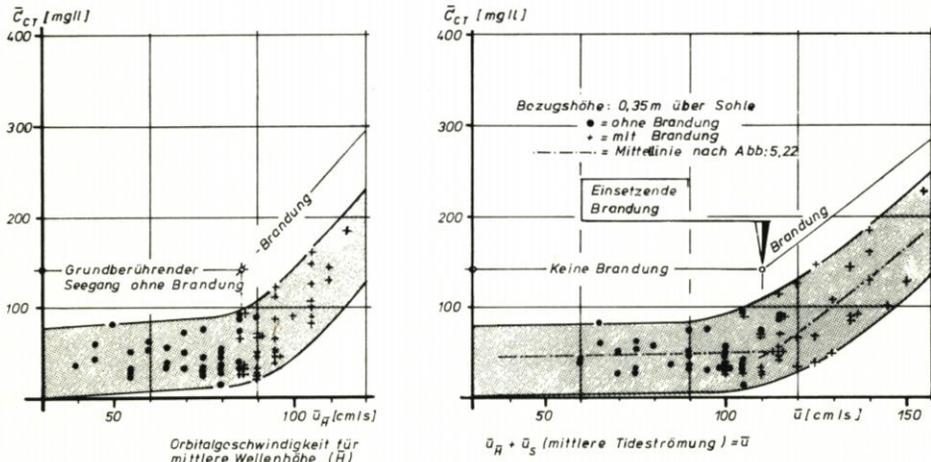
Der Streubereich der gemessenen Suspensionskonzentrationen ergibt sich für das Einsetzen des brechenden Seegangs auf den Rand- und Brandungswatten bei 6 Bft am Standort (S) zu 15 bis 85 mg/l (im Mittel etwa 50 mg/l) und am Standort (SB) zu 50 bis 210 mg/l (im Mittel etwa 130 mg/l).

GÖHREN (1971, s. Abb. 5.01) gibt vergleichsweise für beide Standorte – (S und SB) – mittlere Suspensionskonzentrationen von 120 bis 140 mg/l an. Die außerdem von GÖHREN (1965, s. Abb. 5.03) bei 6 Bft angegebene Meßreihe im Neuwerker Watt (ohne nähere Orts- und Parameterbezeichnung) zeigt demgegenüber mit einer mittleren Konzentration von etwa 320 mg/l höhere Werte. Die bei 7 Bft gemessenen Konzentrationen betragen am Standort (S) maximal etwa 200 mg/l und am Standort (SB) maximal etwa 350 mg/l (Abb. 5.16). Sie liegen damit für den Standort (SB) ebenfalls unter dem aus der von GÖHREN angegebenen Einzelmessreihe (Abb. 5.03) gebildeten Mittelwert von ca. 420 mg/l. Die Maximalwerte der gemessenen Suspensionskonzentrationen ergeben sich bei Windstärken von 8 Bft am Standort (S) zu etwa 220 mg/l und am Standort (SB) zu etwa 420 mg/l.

### 5.2.2.3 Einfluß der wellenerzeugten Strömungen und der Brandungen

Weiteren Aufschluß über den Einfluß der Wellen auf die Konzentrationshöhe liefert die Untersuchung der maßgebenden Strömungsgeschwindigkeiten 0,35 m über der Sohle unter Berücksichtigung der wellenerzeugten Orbitalgeschwindigkeiten. Die Abschätzung der für mittlere Wellenhöhen um Hochwasser anzusetzenden Orbitalgeschwindigkeit erfolgt entsprechend Abschn. 2.3.1 nach LAITONE und MCCOWAN (Abb. 2.15). Die über der Orbitalgeschwindigkeit aufgetragenen Suspensionskonzentrationen sind außerdem entsprechend der dem Einzelwert zuzuordnenden Seegangsart gekennzeichnet (Abb. 5.20). Für den Standort (SB) ergeben sich Orbitalgeschwindigkeiten nahe der Sohle auch für den von SIEFERT als nicht grundberührend klassifizierten Seegang. Auf diese Abweichungen, die auf unterschiedliche Ansätze zurückzuführen sind, ist bereits hingewiesen worden. Während LAITONE und MCCOWAN die höchstmögliche Orbitalgeschwindigkeit für eine Einzelwelle angeben, geht SIEFERT von mittleren Wellen im natürlichen Spektrum aus. Die ermittelten Orbitalgeschwindigkeiten sind demnach Maximalwerte für mittlere Wellenhöhen. Die Angabe von Orbitalge-

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° - 360°)

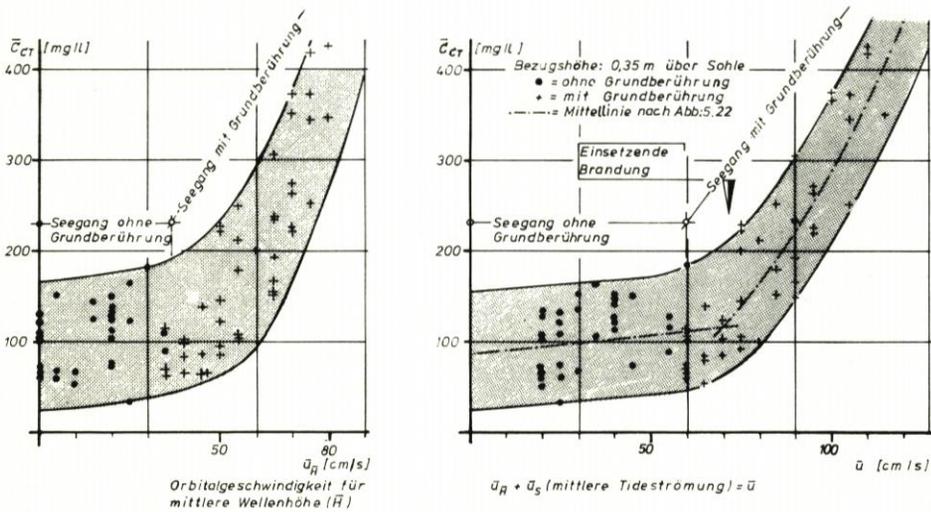


Abb. 5.20. Veränderung der Suspensionkonzentration mit  $\bar{u}_H$  (Orbitalströmung) und mit  $\bar{u}_H + \bar{u}_S = \bar{u}$  (überlagerte Orbital- und Tideströmung)

schwindigkeiten in einem Übergangsbereich auch unterhalb des von SIEFERT angegebenen Grenzwertes ist damit plausibel.

Die wellenerzeugten Orbitalströmungen sind mit der zum Welleneignis gehörenden Tideströmung zu überlagern. Nach der geltenden Wellentheorie oszillieren die Orbitalströmungen und führen in Abhängigkeit von Strömungs- und Wellenfortschrittsrichtung im Wellental bzw. auf dem Wellenberg zu einer beschleunigten oder verzögerten Tideströmung. Für die hier anzustellenden Betrachtungen wird von der für die Aufwirbelung ungünstigen Addition der beiden Strömungsanteile ausgegangen. Die zu überlagernde Tideströmung wird dabei als Mittelwert aus dem ermittelten Stromweg gebildet, der auf die tatsächliche Tidedauer bezogen ist.

Dieses Vorgehen stimmt mit den Feststellungen von WÜNSCHE (1976) überein, der in Wellenfortschrittsrichtung unter dem Wellenberg die maßgebenden Geschwindigkeiten für die Aufwirbelung des Materials ermittelt hat, da mit zunehmender Windstärke in diesem Windsektor Wellenfortschrittsrichtung und Strömungsrichtung übereinstimmen.

Für die weiteren Untersuchungen sind die für die Orbitalgeschwindigkeit zugrundegelegten Wellenhöhen um Hochwasser bezüglich ihrer Gültigkeit für das gesamte Tideereignis zu überprüfen. Um Hochwasser ergeben sich die höchsten mittleren Wellenhöhen, aber nicht zwingend gleichzeitig die größten Orbitalgeschwindigkeiten. Bei abnehmenden Wasserständen vergrößert sich das Verhältnis  $\bar{H}/d$  und  $y/d$  (Abb. 2.12), während die Wellenfortschritts-  
geschwindigkeit  $c$  abnimmt. Die Wellensteilheit  $\bar{H}/(g \cdot T^2)$  wächst dabei solange, bis die Welle nach Erreichen des oberen Grenzwertes der Wellensteilheit (Abb. 2.13) und nach Maßgabe der Seegangscharakteristik unter weiterem Anstieg des Verhältnisses  $\bar{H}/d$  bricht. Entsprechend Abschn. 2.3.1 gelten für das Einsetzen der Brandung der Grenzwert

$$\bar{H}_b \text{ min} \approx 0,2 d \quad (\text{Gl. 5.04})$$

und für die maximale Wellenhöhe

$$(\text{S}) : \bar{H}_{\text{max}} = 0,44 d^{0,6} \quad (\text{Gl. 5.05})$$

$$(\text{SB}) : \bar{H}_{\text{max}} = 0,32 d^{0,6} \quad (\text{Gl. 5.06})$$

Entsprechend Abb. 2.12 baut sich die maximale Wellenhöhe kurz nach Thw auf. Bei dann absinkenden Wasserständen wird den aufgebauten Wellen die erforderliche Wassertiefe  $d_{\text{min}}$  entzogen, so daß bei ablaufendem Wasser schnell die maximalen Wellenhöhen  $\bar{H}_{\text{max}}$  erreicht werden. Dieses wirkt sich auf die Orbitalgeschwindigkeiten aus, wie nachstehend am Beispiel eines Meßwertes für die Zeit von Hochwasser bis Niedrigwasser deutlich wird.

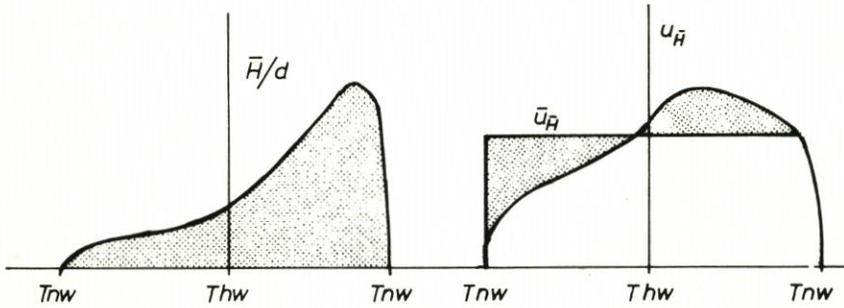
Tabelle 5.01

| d<br>[cm] | $\bar{H}$<br>[cm] | $\bar{H}_b \text{ min}$<br>[cm] | $\bar{H}_{\text{max}}$<br>[cm] | $\bar{H}/d$<br>[-] | $y/d$<br>[-] | $\bar{c}$<br>[cm/s] | $u_{\text{H}}/c$<br>[-] | $u_{\text{H}}$<br>[cm/s] |
|-----------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 350       | 60                | 70                              | 93                             | 0,17               | 0,10         | 622                 | 0,13                    | 81                       |
| 250       | 70                | 50                              | 76                             | 0,28               | 0,14         | 544                 | 0,19                    | 103                      |
| 150       | 56                | 30                              | 56                             | 0,37               | 0,23         | 433                 | 0,24                    | 104                      |
| 100       | 44                | 20                              | 44                             | 0,44               | 0,35         | 361                 | 0,27                    | 97                       |
| 50        | 29                | 10                              | 29                             | 0,58               | 0,70         | 265                 | 0,34                    | 90                       |

Für den Zeitraum von Niedrig- bis Hochwasser sind die Verhältnisse umgekehrt. Der Wasserstand steigt schneller, als sich die zugehörigen maximalen Wellenhöhen aufbauen können (Abb. 2.12). Da keine Meßergebnisse für die Veränderung der Wellenkennwerte über die Tide vorliegen, kann das oben gegebene Beispiel nicht für den Zeitraum vor Hochwasser ergänzt werden. Es kann aber nach Abb. 2.12 davon ausgegangen werden, daß die Orbitalgeschwindigkeiten hinter den Maximalwerten bei ablaufendem Wasser zurückbleiben, wie schematisch auf Abb. 5.21 dargestellt.

Die Ganglinie der Orbitalgeschwindigkeiten über eine Tide zeigt, daß die mit der Wellenhöhe um Hochwasser ermittelte Orbitalgeschwindigkeit  $u_{\text{H}}$  einen brauchbaren Tide-mittelwert  $\bar{u}_{\text{H}}$  ergibt, der mit dem ebenfalls über die Tide gebildeten Suspensionswert gekoppelt werden kann.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Ausführungen werden die aufgetragenen Ergebnisse (Abb. 5.20) interpretiert.

Abb. 5.21. Veränderung von  $\bar{H}/d$  und  $u_{\bar{H}}$  über eine Tide (schematisch)

Am Standort (S) ergibt sich ein etwa linearer Anstieg der Suspensionskonzentration bis zum Einsetzen des weitgehend brechenden Seegangs bei 6 Bft. Die diesem Ereignis zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten sind bei isolierter Betrachtung der Orbitalgeschwindigkeit mit rund 80 cm/s, bei der Überlagerung von Orbital- und Tideströmung mit rund 110 cm/s angegeben. Sie liegen damit weit oberhalb der von HYULSTRÖM/ZANKE für das Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,15$  mm) in Abschn. 5.2.2.1 genannten Grenzwerte der Aufwirbelung (ca. 60 cm/s). Der Kurvenverlauf am Standort (SB) ist ähnlich dem von (S), allerdings sind die zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend der Seegangscharakteristik kleiner. Der lineare Anstiegsbereich ist begrenzt auf maximale Geschwindigkeitswerte  $\leq 40$  cm/s für reine Orbitalströmung bzw. auf  $\leq 70$  cm/s für die überlagerten Strömungen. Die überlagerten Strömungsgeschwindigkeiten liegen damit für das Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,13$  mm) ebenfalls über den Grenzwerten der Aufwirbelung (ca. 50 cm/s). Nach den Messungen ist der überproportionale Anstieg der Suspensionskonzentrationen für beide Standorte an etwa 40 cm/s voneinander abweichende Strömungsgeschwindigkeiten gekoppelt, obwohl demgegenüber die Grenzwerte der Aufwirbelung aufgrund des an beiden Standorten nur wenig differierenden Sohlmaterials nur etwa um 10 cm/s voneinander abweichen. Wie unter Bezug auf Abb. 5.20 in Abschn. 5.2.2.1 bereits ausgeführt, kann demnach der überproportionale Anstieg nicht mit Hilfe des Überschreitens eines Geschwindigkeitsgrenzwerts allein näher beschrieben werden. Vielmehr zeigen auch die über den überlagerten Strömungsgeschwindigkeiten aufgetragenen Konzentrationen die Bedeutung der einsetzenden Brandung auf den Rand- und Brandungswatten. Auch WÜNSCHE (1976) hat hierauf anhand der von ihm in brechenden Wellen gemessenen Lufteinschlagsmengen von bis zu 47 % hingewiesen.

Am Standort (SB) kann das vorhergehend festgestellte gleichzeitige Einsetzen der Grundberührung des Seegangs an der Meßstelle und das Brechen des Seegangs auf den Brandungs- und Randwatten dahingehend differenziert werden, daß der Beginn des grundberührenden Seegangs noch in den linearen Anstiegsbereich der Suspensionskonzentrationen fällt und erst mit dem Einsetzen der Brandung auf den vorgelagerten Watten der überproportionale Anstieg beginnt (Abb. 5.20). Der untergeordnete Einfluß der Grundberührung des Seegangs auf die Suspensionskonzentrationen wird hierdurch bestätigt.

Da am Standort (SB) ein brechender Seegang nicht möglich ist, aber gleichwohl mit dem Einsetzen der Brandung auf den Randwatten und Brandungswatten der überproportionale Anstieg beginnt, bestätigt sich hier die bereits festgestellte Bedeutung des Triftstromes. Er transportiert das aufgewirbelte Material zur Meßstelle und führt darüber hinaus in Verbindung mit dem nicht brechenden Seegangsanteil zu einer etwa linear mit der überlagerten Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  ansteigenden Suspensionsgrundlast. Diese Grundlast steigt in

Abhängigkeit von der Größe und der Charakteristik der in Luv vorgelagerten Wattflächen, wobei das einmal aufgewirbelte Material wegen der hohen Turbulenzen nur in geringem Umfang wieder sedimentiert (vgl. WÜNSCHE, 1976) und damit zu einer fortschreitenden Konzentrationsanreicherung führt. Dieser Suspensionsanteil wird dann bei entsprechenden Windvoraussetzungen durch die erhöhte und überproportional mit der Wellenhöhe ansteigende Brandungssuspension überlagert.

Zur weiteren Untersuchung der Zusammenhänge von Konzentrationsanstieg und überlagerter Orbital- und Tideströmung sind die Suspensionswerte über der Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  zu Mittelwerten zusammengefaßt aufgetragen (Abb. 5.22). Der lineare und der überproportionale Anstiegsbereich der Kurven werden anhand der festgestellten Veränderung mit dem Einsetzen überwiegender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten abgegrenzt. Am Standort (S) ist der Beginn des Wellenbrechens durch das Wellenerignis

$$\bar{H}_b \min \approx 0,2 d \quad (\text{Gl. 5.04})$$

beschrieben. Für den Standort (SB) liegen Parallelmessungen der Wellenhöhen auf den vorgelagerten Rand- und Brandungswatten nicht vor. Vereinfachend wird die Unterscheidung der Anstiegsbereiche anhand der für das Einsetzen der Brandung maßgebenden Windgeschwindigkeit (Abb. 5.16) von 11,5 m/s gewählt.

Die aus den Meßergebnissen gebildeten Mittelwerte (Abb. 5.22) bestätigen für beide

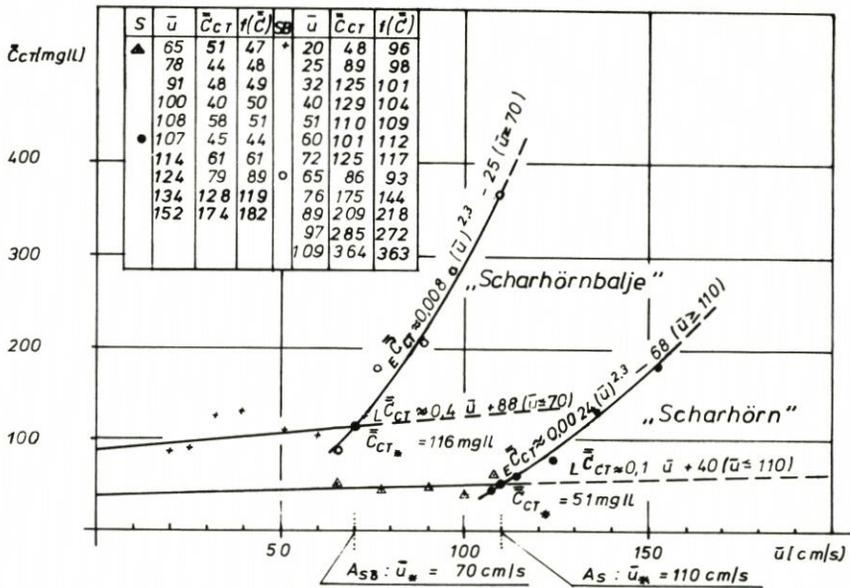


Abb. 5.22. Mittelwerte der Suspensionskonzentration/überlagerte Strömungsgeschwindigkeit ( $\bar{u}_H + \bar{u}_S = \bar{u}$ )

Standorte (S und SB) grundsätzlich den Kurvenverlauf mit anfänglich linearem und anschließend überproportionalem Anstieg mit dem Einsetzen der Brandung.

Der Vergleich der Kurven für beide Standorte zeigt auch, daß im linearen Bereich der Anstieg der Suspensionskonzentrationen mit der Strömungsgeschwindigkeit am Standort (SB) stärker, im überproportionalen Bereich sogar deutlich stärker als am Standort (S) ist. Die unterschiedlichen Anstiegsbereiche an beiden Standorten können näherungsweise mit nachstehenden, nicht dimensionsechten Funktionen beschrieben werden:

(S):  $L\bar{C}_{CT} = 0,1 \bar{u} + 40$  [mg/l];  $\bar{u} \leq 110$  [cm/s] (Gl. 5.07)

$E\bar{C}_{CT} = 0,0024 \bar{u}^{2,3} - 68$  [ " ];  $\geq 110$  [ " ] (Gl. 5.08)

(SB):  $L\bar{C}_{CT} = 0,4 \bar{u} + 88$  [mg/l];  $\bar{u} \leq 70$  [cm/s] (Gl. 5.09)

$E\bar{C}_{CT} = 0,008 \bar{u}^{2,3} - 25$  [ " ];  $\geq 70$  [ " ] (Gl. 5.10)

Eine Weiterentwicklung zu dimensionsechten Beziehungen ist wegen der in Abschn. 2 erläuterten Einschränkung nicht sinnvoll. Hiernach ist zu bedenken, daß weniger die Überwindung der kritischen Schubspannung, die z. B. mit dem Ansatz von HYULSTRÖM oder SHIELDS (vgl. z. B. VANONI, 1977) beschrieben werden kann, als vielmehr die hohen Turbulenzen in den brechenden Wellen mit dem schwer zu erfassenden Lufteinschlag wesentlichen Einfluß auf die Suspensionskonzentration haben.

Zur weiteren Diskussion werden die Quotienten gebildet aus den Mittelwerten  $\bar{C}_{CT}$  und  $\bar{C}_{CT_0}$  (Abb. 5.23). Hierbei gibt  $\bar{C}_{CT_0}$  den Konzentrationsmittelwert am Standort bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten bzw. die Schnittpunkte der Kurven für  $L\bar{C}_{CT}$  und  $E\bar{C}_{CT}$  (vgl. Abb. 5.22) an. Diese Werte sind in Abb. 5.23 über  $\Delta\bar{u} = \bar{u} - \bar{u}_0$

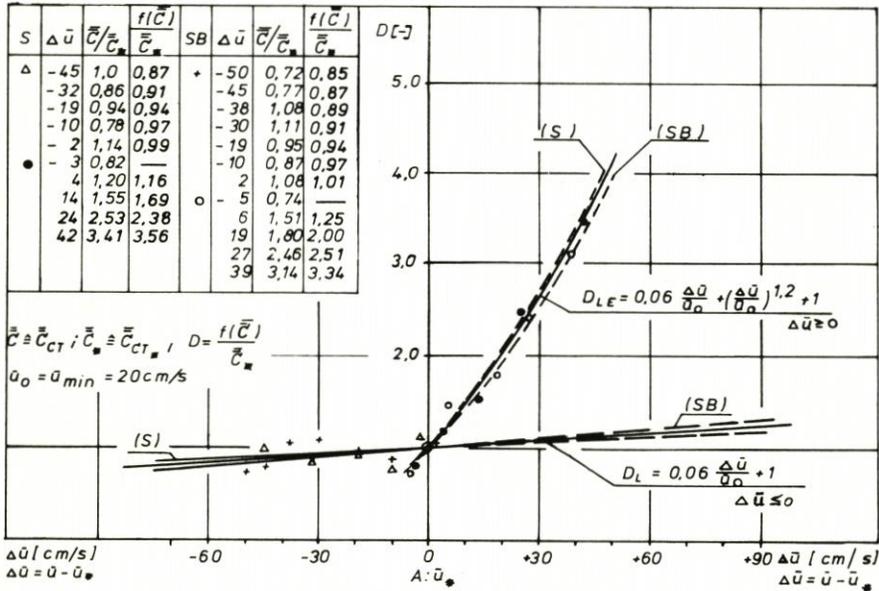


Abb. 5.23. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der überlagerten Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$ , bezogen auf den Konzentrations- und Geschwindigkeitswert ( $\bar{C}_{CT_0}$  u.  $\bar{u}_0$ ) bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten

aufgetragen, wobei  $\bar{u}_0$  dem Wert  $\bar{C}_{CT_0}$  zugeordnet ist. Die Kurven beschreiben den relativen Konzentrationsanstieg an den Standorten (S und SB), bezogen auf den Konzentrationswert bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten in Abhängigkeit von der Differenz  $\Delta\bar{u}$  der Strömungsgeschwindigkeiten (Differenz zwischen der Geschwindigkeit für das Einzelereignis und der Geschwindigkeit für das Ereignis des Einsetzens der Brandung auf den Rand- und Brandungswatten). Für beide Standorte zeigen sich praktisch einander deckende Kurven, die genähert in den beiden Anstiegsbereichen durch folgende Funktionen beschrieben werden:

linearer Anstiegsbereich (keine Brandung,  $\Delta \bar{u} \leq 0$ )

$$D_L = 0,06 \frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}_0} + 1 \quad (\text{Gl. 5.11})$$

überproportionaler Anstiegsbereich (mit Brandung,  $\Delta \bar{u} \geq 0$ )

$$D_{LE} = 0,06 \frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}_0} + 1 + \left( \frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^{1,2} \quad (\text{Gl. 5.12})$$

(Strömungs-Brandungsanteil)

$\Delta \bar{u} = \bar{u} - \bar{u}_*$ ,  $\bar{u}_*$ : Bezugsströmungsgeschwindigkeit am Standort bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten.

$$\bar{u}_0 = \bar{u}_{\min} = 20 \text{ cm/s}$$

Die Absolutwerte der Suspensionskonzentration ergeben sich durch Multiplikation des Konzentrationswertes  $\bar{C}_{CT_0}$  mit dem Anstieg  $D$ .

Die mit den o. a. Gleichungen angegebenen Beziehungen lassen erkennen, daß unabhängig von der Seegangsscharakteristik beider Standorte der relative Suspensionsanstieg gleich groß ist, wenn die Strömungsverhältnisse auch die Zufuhr suspendierten Materials aus in Strömungsrichtung vorgelagerten und mit Brandung beaufschlagten Watten ausweisen. Eine Übertragbarkeit dieser Beziehung auf andere Wattgebiete wird nur nach Überprüfung durch weitere Vergleichsmessungen an anderen Standorten möglich sein. Allgemeinere Aussagen können hier nur insoweit getroffen werden, als das Verhältnis der Suspensionskonzentrationen an beiden Standorten (z. B. 116 mg/l zu 51 mg/l  $\approx 2,3$ ) etwa den aus den Strömungsverhältnissen herzuleitenden Einzugsgebieten entspricht und damit die Konzentrationshöhe etwa der Größe des Einzugsgebietes proportional ist. Dieses ist in Übereinstimmung mit Meßergebnissen aus Prielen, die im Vergleich zur Umgebung höhere Konzentrationswerte ausweisen (CHRISTIANSEN, 1974).

Der in Abb. 5.23 dargestellte Zusammenhang setzt voraus, daß neben der Suspensionskonzentration auch die mit dem Windeinfluß veränderte mittlere Tideströmung sowie die aus der mittleren Wellenhöhe um Hochwasser zu berechnende Orbitalgeschwindigkeit bekannt sind. Entsprechende Messungen sind mit erheblichem Aufwand verbunden und erschweren damit die Handhabung. Da für die hier durchgeführten Messungen auch die zugehörigen Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten vorliegen, kann dieser Zusammenhang unter geringfügiger Vergrößerung in Abhängigkeit von der Windstärke dargestellt werden (Abb. 5.24). Diese Beziehung zeigt dann am anschaulichsten, welche Windverhältnisse zu welcher Größenordnung der Suspensionskonzentration führen. Ab Windstärken um 6 Bft und dem dann deutlich in der Natur auf den Rand- und Brandungswatten zu erkennenden Brechen des Seegangs steigt die Suspensionskonzentration mit jeder weiteren Windstärke um etwa das Zweifache des Ausgangswertes an.

Die Anstiegsbereiche können dabei mit nachstehenden vereinfachten Funktionen angegeben werden:

Linearer Anstieg ( $\bar{V}_T \leq 11,5 \text{ m/s}$ )

$$F = F_L = 0,23 \frac{\bar{V}_T}{\bar{V}_*} + 0,77 [-] \quad (\text{Gl. 5.13})$$

Überproportionaler Anstieg ( $\bar{V}_T \geq 11,5 \text{ m/s}$ )

$$F = F_L + F_E = 0,23 \frac{\bar{V}_T}{\bar{V}_*} + 0,77 \left( \frac{\bar{V}_T}{\bar{V}_*} \right)^3 \quad \text{[Gl. 5.14]}$$

$\bar{V}_* = 11,5 \text{ m/s}$ : Windgeschwindigkeit bei einsetzendem Brechen des Seegangs auf den Rand- und Brandungswatten

Die Suspensionskonzentration  $\bar{C}_{\bar{V}_T}$  am Standort ergibt sich dann in Abhängigkeit von dem Konzentrationswert  $\bar{C}_{CT_*}$  bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten ( $\bar{V}_* = 11,5 \text{ m/s}$ ) mittels der o. a. Gleichungen zu

$$\bar{C}_{\bar{V}_T} = F \times \bar{C}_{CT_*} \quad \text{[Gl. 5.15]}$$

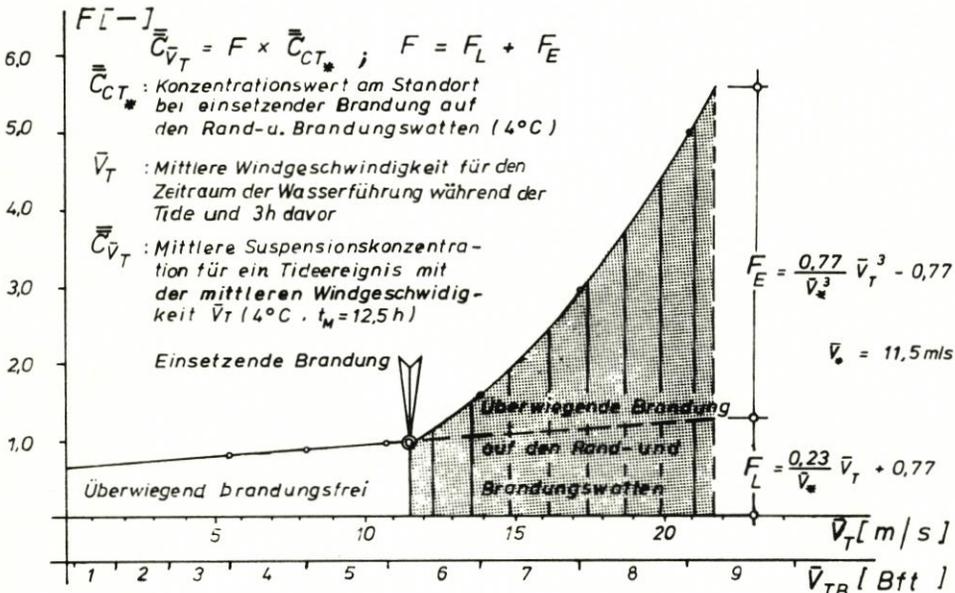
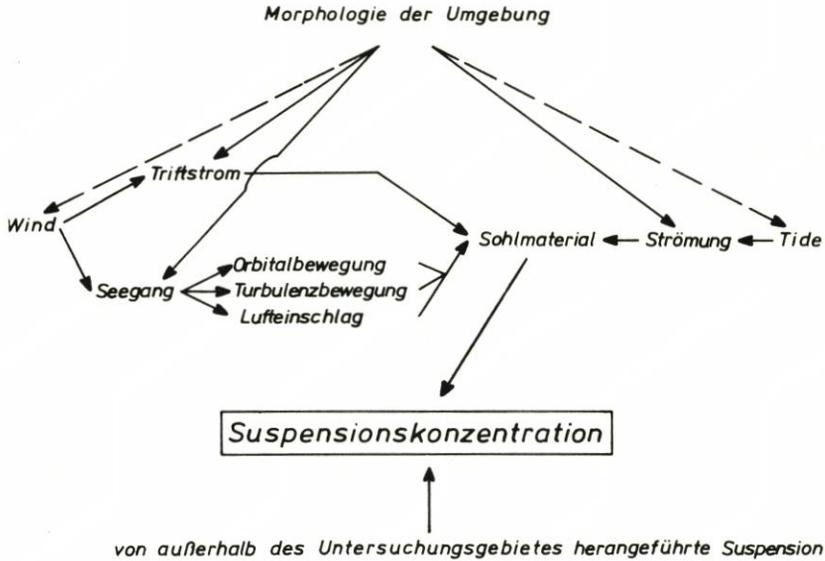


Abb. 5.24. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Windstärke, bezogen auf den Konzentrationswert beim Einsetzen der Brandung (Rand- u. Brandungswatt)

Die Verwendung eines so vereinfachten Ansatzes ist gerechtfertigt, da die physikalisch exakte Beschreibung der vielfältigen Zusammenhänge, insbesondere zwischen dem angreifenden Wind, den dadurch ausgelösten Orbital- und Triftstrombewegungen, der Tideströmung, den morphologischen Randbedingungen und dem Sohlmaterial, bisher nicht gelungen ist.

Die in den Abb. 5.16 bis 5.18 und 5.20 aufgetragenen Abhängigkeiten der Suspensionskonzentration von verschiedenen Parametern zeigen in jedem Fall eine erhebliche Streuung der Konzentrationen um die Mittellinie. Die Genauigkeit der näher untersuchten Beziehung zwischen den Orbital- und Triftströmungen (Abb. 5.20) und den Konzentrationswerten entspricht dabei der einfacheren Betrachtungsweise über die Windgeschwindigkeiten (Abb. 5.16). In ihr sind dann die Vielzahl der Einflußgrößen impliziert und durch die über die Tide integrierten Konzentrationen für steigende Windstärken auch die Parallelität von Wind- und Strömungsrichtung erfaßt.



### 5.2.3 Extremwertbetrachtungen zur Suspensionskonzentration

Suspensionsmeßergebnisse liegen für Windstärkenmittelwerte über eine Tide (ca. 15-Stundenmittel) von maximal 8 Bft vor mit zugehörigen Wellen- und Strömungskennwerten. Die integrierten Werte der Suspensionskonzentrationen sind in Abhängigkeit von den nachstehenden Parametern aufgetragen und werden im Hinblick auf ihre Extremwerte extrapoliert.

- |   |           |
|---|-----------|
| 1. Abweichung von der mittleren Tide        | Abb. 5.06 |
| 2. Windstärke (Mittelwerte aller Messungen) | Abb. 5.10 |
| 3. Wellenhöhe und Tidephase                 | Abb. 5.15 |
| 4. Windgeschwindigkeit                      | Abb. 5.16 |
| 5. Wellenhöhe                               | Abb. 5.17 |
| 6. Stromweg                                 | Abb. 5.18 |
| 7. Orbital- und Strömungsgeschwindigkeit    | Abb. 5.20 |

Die für die Extremwertextrapolation geltenden Grenzwerte der Parameter werden anhand von vorliegenden maximalen Meßwerten wie folgt bestimmt:

Zu 1: Sturmflut vom 3. 1. 1976; Abweichung von der mittleren Tide rd. 1,8

Zu 2 u. 4: Maximalwert der über eine Tide gemessenen Windgeschwindigkeit rd. 28 m/s, d. h. ca. 10 Bft (vgl. Abb. 4.02)

Zu 3 u. 5: Maximalwert der Wellenhöhen bei (S)  $\bar{H}_{\max} = 130$  cm, bei (SB)  $\bar{H}_{\max} = 95$  cm (vgl. Abb. 4.02)

Zu 6: Oberer Grenzwert des Stromweges ortsabhängig und nur näherungsweise aus den von GÖHREN (1968) angegebenen Meßwerten herzuleiten mit rd. 30 bis 35 km/Tide. Angabe gilt für das Neuwerker Watt (SB). Für Scharhörn liegen keine näheren Angaben vor. Aufgrund besonderer Strömungsbedingungen (richtungskonstante Strömung ab 7 Bft) kann vor Scharhörn von mindestens gleichgroßem Stromweg wie auf dem hohen Watt ausgegangen werden.

Zu 7: Maximalwerte der maßgebenden Orbitalgeschwindigkeit um Hochwasser ergeben sich aus den maximalen Wellenhöhen sowie dem zugehörigen größten Verhältnis  $\bar{H}/d$

von 0,22 für (S) und 0,16 für (SB) (Abb. 2.13). Nach Abb. 2.15 ist die maximale mittlere Orbitalgeschwindigkeit rd. 140 cm/s für (S) und rd. 110 cm/s für (SB) bei  $y/d < 0,1$ . Die Maximalwerte der mittleren richtungskonstanten Tideströmungsgeschwindigkeit ergeben sich aus maximalem Stromweg (vgl. vorstehend zu 6) zu rd. 80 cm/s für (S) und zu rd. 70 cm/s für (SB). Durch Überlagerung beider Geschwindigkeitsmaxima wird für (S)  $\max. \bar{u} = 220$  cm/s, für (SB)  $\max. \bar{u} = 180$  cm/s.

Die Ergebnisse der mit diesen Grenzwerten der Parameter durchgeführten Extrapolation sind in nachstehender Tabelle 5.02 zusammengestellt, wobei der aus den Meßergebnissen abzuleitende Anstiegstrend bis zum jeweiligen Grenzwert fortgesetzt worden ist.

Tab. 5.02

| lfd.<br>Nr. | Parameter  | max. Suspensionskonz.<br>max. $\bar{C}_{CT}$ [mg/l] |          |
|-------------|--|---|----------|
|             |  | (S)   | (SB)     |
| 1           | Abweichg. v. d. mittl. Tide  | 500   | 1200     |
| 2           | Windstärke (alle Sektoren)   | (500)   | (1000)   |
| 3           | Wellenhöhe/Tidephasen  | 500   | 1150     |
| 4           | Windgeschwindigkeit  | 550   | 1150     |
| 5           | Wellenhöhen  | 550   | 1150     |
| 6           | Stromweg   | 500   | 1250     |
| 7           | Orbital- und Strömungsgeschwindigkeit                                | 500   | 1200     |
| 8           | Im Mittel max. $\bar{C}_{CT}$  | rd. 500   | rd. 1200 |
| 9           | Verhältnis der max. Suspensionskonzentration der Standorte (S)/(SB): | 1   | 2.4      |

Die angegebenen Extremwerte sind maximale Mittelwerte der Suspensionskonzentration über eine Tide ( $t_M = 12.5$  h) bei einer Bezugstemperatur des Wassers von 4 °C. Bei weiter absinkenden Temperaturen erhöhen sich diese Werte nach der von DILLO (1960) angegebenen Beziehung (Gl. 2.15, Abb. 2.17), wobei zu berücksichtigen ist, daß diese bei Temperaturen  $< 4$  °C stark exponentiell ansteigt. Sie ist im Salzwasser mit abgesenktem Gefrierpunkt bisher nicht überprüft worden. Da Messungen bei Temperaturen  $< 4$  °C nicht vorliegen, wird hier auf eine weitere Extrapolation anhand der o. a. Beziehung von DILLO verzichtet. Es sei angemerkt, daß sich nach DILLO die Konzentrationswerte bis zum Gefrierpunkt gut verdoppeln.

Das Verhältnis der Suspensions-Extremwerte beider Standorte ergibt sich zu 1:2,4 und entspricht damit in der Größenordnung dem unter Abschn. 5.2.2.3 angegebenen Verhältnis der Konzentrationswerte bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten. Die Überlegungen bezüglich der Bedeutung der Größe der Einzugsgebiete werden insofern auch auf die Extremwerte zu übertragen sein, zumal die Einzugsverhältnisse auch bei extremem Windeinfluß keine wesentliche Veränderung mehr erfahren können. Die mit Brandung beaufschlagten Wattflächen sind durch tiefes Wasser ( $> 10$  m) zur offenen See bzw. zur Till hin abgegrenzt und können damit auch bei extremen Strömungsverhältnissen keine zusätzliche Suspensionszufuhr aus anderen Brandungsgebieten bringen. Die angegebene Beziehung des gleichen relativen Anstieges der Suspensionskonzentration mit der Windstärke (Abb. 5.24) kann unter dieser Voraussetzung für beide Standorte entsprechend bis zum Extremwert extrapoliert werden.

Die Häufigkeitsverteilung der tatsächlich gemessenen Konzentrationseinzelwerte (ohne Temperaturbereinigung, Abb. 5.25) zeigt, daß die Extremwerte bereits bei Windstärken von 7 bis 8 Bft als Einzelwerte erreicht werden. Die als Mittelwerte über die Tide angegebenen Extremwerte erscheinen demnach bei weiterem Anstieg der Windstärken auf maximale Tidemittelwerte von etwa 10 Bft erreichbar.

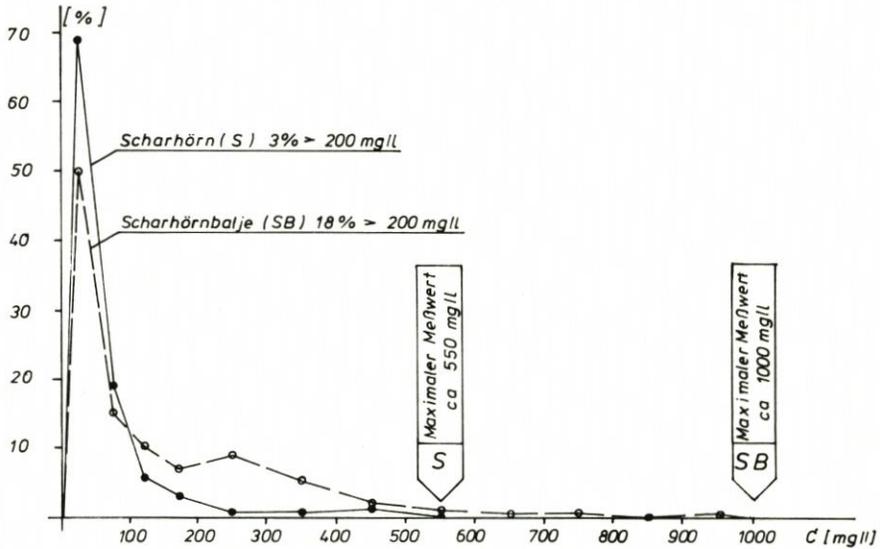


Abb. 5.25. Häufigkeitsverteilung der gemessenen Suspensionskonzentrationen für die Windsektoren  $240^{\circ}$ - $360^{\circ}$  (Scharhörn) und  $210^{\circ}$ - $360^{\circ}$  (Scharhörnbalje); Anzahl der Meßwerte: Scharhörn 650, Scharhörnbalje 680

Die Maximalwerte der von GÖHREN (1965, 1971, 1972; Abb. 5.02, 5.03 und 5.05) für das Neuwerker Watt angegebenen Konzentrationen liegen mit über 800 mg/l in der Größenordnung derjenigen des Standortes (SB) (vgl. Tab. 5.02). Mit Suspensionskonzentrationen von 1000 mg/l als maximalem Meßwert, ermittelt aus einem Probenvolumen von 210 l bei 2 bis 3 Minuten Pumpzeit, kommt WÜNSCHE (1976) zu ähnlichen Werten. Seine Angaben gehen auf Messungen mit vergleichsweise größerem Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,2$  mm) auf einem Riff vor Sylt (Brandungswatt) zurück. Die Meßergebnisse vor Scharhörn, Standort (S), weisen derart hohe Konzentrationen nicht auf (etwa nur 50 %). Die Abweichung kann durch die unterschiedlichen Neigungen der Strandprofile (SIEFERT, 1973 und WÜNSCHE, 1976) erklärt werden. Die Strandneigung vor Scharhörn weist weniger als den halben Wert der Neigung von Sylt auf, so daß vor Sylt die Wellenenergie auf kürzerem Wege in örtlich stärkere Turbulenzen umgesetzt wird. Weiterhin ist der Meßstelle von Scharhörn kein Riff mit den daraus resultierenden erhöhten Turbulenzen und Suspensionsaufwirbelungen vorgelagert (vgl. Abschn. 5.2.1). Darüber hinaus ist der wesentliche Einfluß der aus der Brandung und der Tidebewegung kommenden küstenparallelen Transportströmung von WÜNSCHE nicht näher angegeben.

Es soll nachfolgend noch auf die von WOHLBERG (1954) am Hindenburgdamm bei WSW-Sturm, Stärke 8 Bft, gemessenen Suspensionskonzentrationen hingewiesen werden. Bei einer Entnahmetiefe von nur 10 cm unter der Oberfläche kommt WOHLBERG mit dem von ihm entwickelten Schöpfgerät (WOHLBERG, 1950) zu mittleren Suspensionskonzentrationen von über 2500 mg/l auf der Luvseite des Damms. Diese hohen Konzentrationswerte in

geringer Entnahmetiefe sind nach den morphologischen Randbedingungen plausibel. Das Sohlmaterial ist erheblich feinkörniger (Korngrößenanteil  $< 0,02$  mm zwischen rd. 10 und 70 %) als am Standort (S) mit weniger als 1 % Anteil  $< 0,02$  mm. Dieses führt in Verbindung mit den erhöhten Turbulenzen im Bereich des Dammes mit Energieumsetzung auf kürzestem Wege zu den großen Suspensionskonzentrationen nach WOHLBERG.

### 5.3 Schlußfolgerungen aus Abschn. 5.2

Für beide Standorte (S und SB) gilt:

- Der Gehalt an suspendierten Feststoffen ist abhängig von Richtung und Stärke des Windes und den dadurch beeinflussten Seegangs- und Strömungsverhältnissen.
- Die Konzentrationen der Suspensionen steigen in allen Windsektoren bei ähnlichen Randbedingungen (Morphologie und Tide) linear und unterschiedlich stark an mit den während einer Tide bewegten Wassermengen (Abweichung zur mittleren Tide).
- Die Suspensionskonzentrationen an einem Standort setzen sich, abhängig von der Seegangscharakteristik und der Windstärke, aus einem Anteil lokal aufgewirbelter Suspensionen und einem Anteil mit der Strömung aus luvseitig liegenden Einzugsgebieten herangeführter Suspensionen zusammen.
- Die Suspensionskonzentrationen sind in Wattgebieten mit ausgedehnter Brandung überwiegend von der Wellenhöhe und in brandungsfreien Watten mehr vom Stromweg abhängig. Im brandungsfreien Watt werden mit zunehmenden Windstärken und zunehmendem Triftstrom die Suspensionskonzentrationen wesentlich durch in Luv vorgelagerte Turbulenzonen bestimmt, während in Watten mit ausgedehnter Brandung mehr das lokale Ereignis die Konzentrationen bestimmt.
- In den Wattgebieten mit ausgedehnter Brandung beginnt ab etwa 6 Bft mit einsetzendem Brechen des Seegangs ein überproportionaler Anstieg der Suspensionskonzentrationen. Zur gleichen Zeit kommt es auf dem brandungsfreien Watt mit in Luv vorgelagerten Brandungswatten durch den bei 6 Bft stark ansteigenden Triftstrom ebenfalls zum überproportionalen Anstieg.
- Mit wachsender Windstärke und größerem Triftstrom nimmt der Anteil der aus angrenzenden Watten herangeführten Suspension zu.
- Ein wesentlicher Einfluß des grundberührenden und nicht brechenden Seegangs auf die Suspensionskonzentration ist nicht festgestellt worden.
- Auf den Rand- und Brandungswatten ist der überproportionale Suspensionsanstieg an die erhöhten Turbulenzen insbesondere aus dem Lufteinschlag des brechenden Seegangs mit überlagerten Tide- und Orbitalströmungen  $> 110$  cm/s geknüpft.
- Die ursprüngliche Aufwirbelung der Suspension erfolgt überwiegend in den brandungsbefschlagten Wattgebieten.
- Der Triftstrom ist das hauptsächliche Transportmittel des in den Brandungswatten suspendierten Materials.
- Die auf einen Standort gerichteten Strömungen (Einzugsgebiet) bestimmen die Höhe des Suspensionswertes. Der Konzentrationswert steht dabei in einer direkten Beziehung zur Größe und zum morphologischen Charakter des Einzugsgebietes.
- Die relative Konzentrationszunahme mit der überlagerten Orbital- und mittleren Tideströmungsgeschwindigkeit ist, bezogen auf den Konzentrationswert bei einsetzender Brandung ( $\sim 6$  Bft) auf den Rand- und Brandungswatten, an beiden Standorten gleich (Gl. 5.11 u. 5.12). Sie kann auch in Abhängigkeit von der Windstärke (Geschwindigkeit) mit einheitlichen Beziehungen beschrieben werden (Gl. 5.13 und 5.14).

- Für den auflandigen Windsektor steigen die mittleren Suspensionskonzentrationen über eine Tide (bezogen auf 4 °C) bei mittleren Windstärken für den Referenzzeitraum (Abb. 5.24) zwischen 0 und 6 Bft am Standort
  - Scharhörn (S) von rd. 40 auf 50 mg/l (Brandungs-/Randwatt)
  - Scharhörnbalje (SB) von rd. 85 auf 115 mg/l (brandungsfreies Watt)
- und bei maximal gemessenen Windstärken von 8 Bft am Standort
  - Scharhörn (S) auf rd. 200 mg/l
  - Scharhörnbalje (SB) auf rd. 400 mg/l
- Die Extremwertextrapolation ergibt für maximal im Referenzzeitraum mögliche mittlere Windstärken (10 Bft) Suspensionskonzentrationen, bezogen auf 4 °C, für
  - Scharhörn (S) von rd. 500 mg/l
  - Scharhörnbalje (SB) von rd. 1200 mg/l
- Die Suspensionsganglinie über die Tide ist der der Strömung ähnlich, wobei die Konzentrationshöhe wesentlich durch die in Strömungsrichtung vorgelagerten Ereignisse und die morphologischen Randbedingungen bestimmt ist.
- Die Asymmetrie der Wellen bei Gegenläufigkeit von Wellen (Wind) und Strömung führt zu frühzeitigem Brechen der Wellen und damit zu erhöhten Turbulenzen und Suspensionskonzentrationen.
- Die über das Jahr aufgenommenen Bodenproben im Umfeld des Standorts weisen in den Sommermonaten eine Zunahme, in den Wintermonaten eine Abnahme der Feinstteile aus und korrelieren eng mit höheren Suspensionskonzentrationen im Winter und entsprechend niedrigeren im Sommer.

## 6. Anwendungsmöglichkeiten

### 6.1 Mathematische Modellierung des Sedimenttransportes

#### 6.1.1 Allgemeines

Für den im Küsteningenieurwesen tätigen Ingenieur ist der Sedimenttransport, bestehend aus dem Geschiebetrieb und der hier zu betrachtenden Suspension, von besonderer Bedeutung, da mit ihm die Fragen der ausreichenden Tiefen der Schiffsfahrtswege im Ausbau und in der Unterhaltung, des Bestandes der Küstenschutzbauwerke sowie der Randbedingungen für Planungsaufgaben eng verbunden sind. Vornehmlich bei der Planung von Großbauvorhaben sind die Auswirkungen auf den bestehenden Sedimenthaushalt aufzuzeigen und zu beurteilen. Da das vorhandene natürliche Gleichgewicht entweder so wenig wie möglich oder aber nach bestimmten Zielsetzungen verändert werden soll, ist eine möglichst umfassende Beschreibung des „Ist-Zustandes“ und der dann aus den Bauwerken zu erwartenden Veränderungen von Interesse.

Dem Ingenieur stehen bisher außer einigen empirisch ermittelten Zusammenhängen und Erfahrungen über die Sedimentbewegung nur wenige geeignete Hilfsmittel zur Verfügung. Mathematische Modelle können ein derartiges Hilfsmittel sein, wenn sie mit ausreichender Genauigkeit die tatsächlichen Ereignisse beschreiben.

Die Modelle müssen sowohl auf den als gesichert geltenden physikalischen Beziehungen als auch auf Ergebnissen aus Natur- und Modellmessungen aufbauen. SÜNDERMANN (1978) führt hierzu aus, daß für die Modelle im Sinne der praktischen Nutzenanwendung Vereinfachungen und Arbeitshypothesen formuliert werden müssen, die die Konzipierung eines

großräumigen Modells erlauben. Die so vereinfachten Modelle können dann schrittweise verbessert und an den neuesten Kenntnisstand angepaßt werden, wobei als oberstes Ziel eine in der Praxis verwendbare Abschätzung des Transportes gilt. Nach SÜNDERMANN führt diese Betrachtung weg vom mikroskopischen Einzelkorn (mikroscale) hin zu vereinfachenden, größeren Formulierungen der physikalischen Zusammenhänge.

### 6.1.2 Modelle zur Untersuchung des Sedimenttransportes

Der Aufbau eines Modells wird wesentlich durch die Art des Transportes bestimmt. Es ist zu beachten, daß z. B. für überwiegenden Transport in Suspension nicht Ansätze verwendet werden, die auf Überlegungen und Messungen mit vorherrschendem Geschiebetrieb („bed-load“) zurückgehen. DILLO (1960) gibt unter Anwendung der von EINSTEIN (VANONI, 1977) ermittelten „bed-load-funktion“ einen Anhalt, welche Transportart für das Untersuchungsgebiet maßgebend ist. Hiernach erfolgt der überwiegende Transport in Suspension für einheitliches Sohlmaterial der Korngröße 0,2 mm ab einer Strömungsgeschwindigkeit von rd. 80 cm/s. Übertragen auf das Untersuchungsgebiet mit  $d_{50}$  zwischen 0,13 und 0,15 mm überwiegt der Transport in Suspension bereits bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten, die etwa zwischen 50 und 80 cm/s liegen. Vergleicht man diese Geschwindigkeiten mit den überlagerten Orbital- und Tidedrömungsgeschwindigkeiten der Standorte (S) und (SB) (vgl. Abschn. 5.2.2.3), so ergibt sich, daß bei (SB) etwa ab 3 bis 4 Bft, bei (S) etwa ab 5 Bft der Transport überwiegend in Suspension erfolgt. Hieraus folgt die Notwendigkeit eines zumindest für größere Windstärken ausreichenden Ansatzes des Suspensionstransportes für das Untersuchungsgebiet Neuwerk/Scharhörn.

Zunächst werden nachfolgend Voraussetzungen benannt, die bei der Modellierung des tideabhängigen Sedimenttransportes zu berücksichtigen sind:

- instationäre und turbulente Strömungsverhältnisse, bedingt durch Tide, Wind und daraus resultierende Wellen- und Triftströmungen sowie Dichteströmungen,
- nicht homogenes Sohlmaterial mit bereichsweise unterschiedlicher Kornverteilung.

Diese Voraussetzungen beinhalten jede für sich sehr komplexe Einzelvorgänge, die in einem ersten Modell aus den unter Abschn. 2. angegebenen Gründen nur vereinfacht formuliert werden können. Wie dort ausgeführt, sind bei Transportbetrachtungen grundsätzlich die Bereiche „bed- und suspension-load“ wegen ihrer abweichenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu unterscheiden. Eine wesentliche Vereinfachung besteht darin, diese Bereiche dennoch zusammenzufassen und mit einer Näherungsbeziehung, wie auch von DILLO (1960) für die Ermittlung der überwiegenden Transportart verwendet, zu beschreiben. Beispiele für solche als „total-load“ bezeichneten Ansätze sind bei VANONI (1977) nachzulesen und z. B. von EINSTEIN-BROWN (BROWN, 1950) und ENGELUND-HANSEN (1967) angegeben.

Unter Verwendung derartiger Ansätze hat SÜNDERMANN (1978) ein Modell vorgestellt, das nachstehend skizziert wird. Es geht von folgenden vereinfachenden Arbeitshypothesen aus:

- schrittweise Homogenität des Sediments
- Sedimenttransport, verursacht durch das dreidimensionale Schubspannungsfeld des sich bewegendes Wassers
- Transportmechanismus aus Wechselwirkung von Strömung, Sediment und Sohle
- Ansätze für richtungskonstante Strömungen auch unter Tideverhältnissen gültig
- Sedimenttransport je nach Genauigkeit des Untersuchungszieles in sog. „scales“ unterteilbar und durch unterschiedliche Modelle beschreibbar

Nach diesen Hypothesen wird der Transport in diesem Modell in Abhängigkeit von der Schubspannung auf das Korn beschrieben, wobei das Einsetzen des Transportes z. B. mit Hilfe des SHIELDS- oder HYULSTRÖM-Diagramms (VANONI, 1977, s. Abb. 2.15) bestimmt wird. Die Anwendbarkeit der Diagramme, die unter stationären und richtungskonstanten Strömungsvoraussetzungen ermittelt worden sind, auf instationäre Tidebewegungen geht auf die von MADSON und GRANT (1976) durchgeführten Betrachtungen zurück. Der eigentliche Transportmechanismus wird dann, wie oben erwähnt, z. B. mit der von EINSTEIN-BROWN angegebenen „total-load-funktion“ beschrieben.

Für die Modellierung im „mesoscale“, d. h. in Bereichen der Sohlveränderungen von Dezimetern bis Metern, wird neben der reinen Schubspannungsbeziehung noch die Vertikal-komponente der Turbulenzströmung mit einem orts- und zeitabhängigen Austauschkoef-fizienten als Näherungsbeziehung erfaßt (SÜNDERMANN, 1978), so daß auch dieser für den Transport wichtige Einfluß berücksichtigt ist. Die mathematische Beschreibung erfolgt dann durch Lösung von dreidimensionalen Gleichgewichtsbeziehungen, wobei das betrachtete Gebiet mit Hilfe eines orthogonalen Rechengitternetzes vertikal und horizontal gegliedert ist. Innerhalb der durch das Rechengitternetz gebildeten Einheiten wird der Gleichgewichtszu-stand formuliert und mittels eines hier nicht näher zu beschreibenden Differenzenverfahrens gelöst.

Die über dieses Modell ermittelten Ergebnisse hat SÜNDERMANN mit denen von hydraulischen Modellen mit beweglicher Sohle verglichen und hierfür ausreichende Übereinstimmung festgestellt. Befriedigende Naturmessungen, die einen direkten Vergleich ermöglichen, liegen aber nur unzureichend vor. Dieses gilt insbesondere für höhere Strömungs- und Orbitalge-schwindigkeiten von Windtiden. Die in dieser Arbeit angegebenen Konzentrationswerte der Suspensionen können deshalb einen Anhalt bieten. Es ist allerdings zu berücksichtigen, daß sie nur den Suspensionsanteil erfassen, nicht aber Aussagen über den sohnahen Transport machen.

Eine Weiterentwicklung des SÜNDERMANN-Modells unter Einbeziehung des winderzeugten Seegangs ist vorgesehen, wobei analog zu dieser Arbeit die Grundströmung (Tide und Trift) durch eine Orbitalströmung überlagert werden soll. Die oszillierende Orbitalströmung trägt zwar direkt nicht zum Transport bei (MADSON und GRANT, 1976), löst aber periodisch das Sediment von der Sohle und macht es für den Transport verfügbar. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit wird im Bereich der Brandungs- und Randwatten mit Einsetzen der Brandung auch der Einfluß des Lufteinschlags auf das Sohlmaterial und dessen Verfügbarkeit für den Transport bei der Weiterentwicklung zu berücksichtigen sein sowie die von FÜHR-BÖTER et al. (1981) angegebene biogene Stabilisierung des Wattbodens, um ausreichende Übereinstimmung mit den Naturvorgängen zu erzielen.

Mit diesem von SÜNDERMANN angegebenen Modell kann der Suspensionstransport entsprechend der zugrundeliegenden Beziehung für „total-load“ nur näherungsweise erfaßt werden. Es sei deshalb hier noch auf ein von KERSSSENS et al. (1979) angegebenes Modell des suspendierten Feststofftransports verwiesen, das in Verbindung mit dem oben angegebenen zu einer Verfeinerung der Aussage des Transports führen kann.

Dieses Modell beschreibt den Transport im „small-scale“-Bereich, der etwa dem des „meso-scale“ von SÜNDERMANN vergleichbar ist. Entsprechend den Ansätzen für den Suspensionstransport greift dieses Modell auf die Lösung der Diffusionsgleichung (vgl. Gl. 2.02) zurück, wobei im wesentlichen von folgenden Vereinfachungen und Voraussetzungen ausgegangen wird:

- schrittweise homogenes und kohäsionsloses Sediment,
- schrittweise eindimensionale Strömungsverhältnisse,

- Beschreibung des Transportes mit einem zweidimensionalen Diffusionsansatz,
- Verteilung des Diffusionskoeffizienten in der Vertikalen entsprechend dem von KERSENS mit Hilfe der Versuche von COLEMAN (1970) ermittelten vereinfachten Verlauf (Abb. 6.01).
- Die Tidebewegung wird mit einer Vielzahl von quasistationären Einzelschritten beschrieben unter der Voraussetzung einer guten Durchmischung und einem nicht signifikanten Schlupf zwischen den Feststoffteilchen und dem Wasser.
- Als Eingangswert wird ein Konzentrationswert nahe der Sohle gewählt, der mit Hilfe einer für das Untersuchungsgebiet geeigneten „total-load“-Beziehung ermittelt wird.

Unter diesen Voraussetzungen kann ein überwiegend in Suspension erfolgender Sedimenttransport mit dem von KERSENS et al. angegebenen Modell beschrieben werden, wie von ihm selbst durchgeführte Vergleiche mit Naturmessungen gezeigt haben. Er weist aber darauf hin, daß die Ergebnisse sehr wesentlich durch eine exakte Vorgabe der repräsentativen Strömungsgeschwindigkeiten und der durchmesser- und formabhängigen repräsentativen Absinkgeschwindigkeit (vgl. Abb. 2.05-2.07) des suspendierten Sediments bestimmt werden. Entsprechende Sorgfalt muß auf die Festlegung dieser Werte verwandt werden.

Bezüglich der in dieser Arbeit u. a. in Abhängigkeit von den Windverhältnissen in 35 cm über der Sohle am Standort ermittelten Suspensionskonzentration bietet das KERSENS-Modell den Vorteil einer direkten Verwendbarkeit dieser Daten als Eingangswerte, so daß mit einem Gewinn an Genauigkeit auf die Ermittlungen der Eingangswerte aus einer „total-load“-Beziehung verzichtet werden kann.

Bei einer Anwendung des KERSENS-Modells auf Sturmtiden erscheint die zugrundeliegende Diffusionsverteilung (vgl. Abb. 6.01) allerdings zu starr, so daß hier bei dann sowohl zeitlich und räumlich stark variierenden Turbulenzen eine Beschreibung der Turbulenz mit Hilfe eines stochastischen Modells, wie z. B. BECHTLER (1980) vorschlägt, Verbesserungsmöglichkeiten bietet. Bezüglich einer näheren Erläuterung wird auf die Ausführungen von BECHTLER verwiesen.

### 6.1.3 Folgerungen

Die aufgeführten Modelle mit den vereinfachten Eingangswerten sind grundsätzlich für eine Beschreibung des Sedimenttransports geeignet; bezüglich der Genauigkeit sind allerdings gewisse Einschränkungen zu machen. Wünschenswert ist eine Verfeinerung des von SÜNDERMANN angegebenen Modells mit Hilfe der von KERSENS aufgezeigten genaueren Beschreibung des Suspensionsanteils unter Verwendung eines stochastischen Modells zur besseren Erfassung der Turbulenz- und Diffusionsschwankungen insbesondere für Sturmtiden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können ohne weiteres nur auf das Suspensionsmodell von KERSENS angewendet werden. Für das von SÜNDERMANN entwickelte Modell bieten sie einen Anhalt, da die Meßergebnisse über den Geschiebetrieb („bed-load“) keine Aussage treffen und auch an anderer Stelle wenig ergänzende quantitative Angaben hierzu vorliegen (GÖHREN, 1971). Ein wesentlicher Anhalt für dieses Modell kann die mit einsetzen der Brandung (bei ca. 6 Bft) überproportional ansteigende Suspensionskonzentration sein, die möglicherweise mittels einer zusätzlichen Vertikalkomponente aus dem Lufteinschlag (FÜHRBÖTER, 1971) berücksichtigt werden kann. Weiterhin erscheint das Ergebnis des, bezogen auf das Einsetzen der Brandung auf den Rand- und Brandungswatten, gleichen Konzentrationsanstieges mit der Windstärke an beiden Standorten wichtig, da hierdurch zumindest für den entscheidenden auflandigen Windbereich eine einheitliche Beschreibung möglich wird. Für

die anderen Windsektoren können die mitgeteilten Ergebnisse als Anhalt verwendet werden (Abb. 5.11).

Die insbesondere für den Suspensionstransport wichtigen Strömungsverhältnisse im Watt von Neuwerk und Scharhörn sind von GÖHREN (1965, 1969) ausführlich beschrieben, wobei allerdings Einschränkungen bezüglich der vertikalen Verteilungen der Suspension (Abb. 6.02) zu machen sind, die von GÖHREN nur für Stromrinnen ermittelt wurden. Auch über das Sohlmaterial bzw. den repräsentativen Korndurchmesser der Suspension liegen von LINKE (1970) und CHRISTIANSEN (1974) entsprechende Angaben vor. Die erforderlichen Eingangsdaten für ein erweitertes Modell, basierend auf dem z. B. von SÜNDERMANN vorgeschlagenen, liegen damit weitgehend vor. Die vertikale Geschwindigkeitsverteilung ist vereinfacht in Anlehnung an die der Stromrinnen anzunehmen. Hierbei sind allerdings wesentliche Einflüsse aus den Dichteströmungen auf dem hohen Watt nicht zu erwarten. Dieses Modell kann in einer ersten Näherung die Transportvorgänge in den Watten um Neuwerk und Scharhörn beschreiben und wertvolle Planungsgrundlagen liefern.

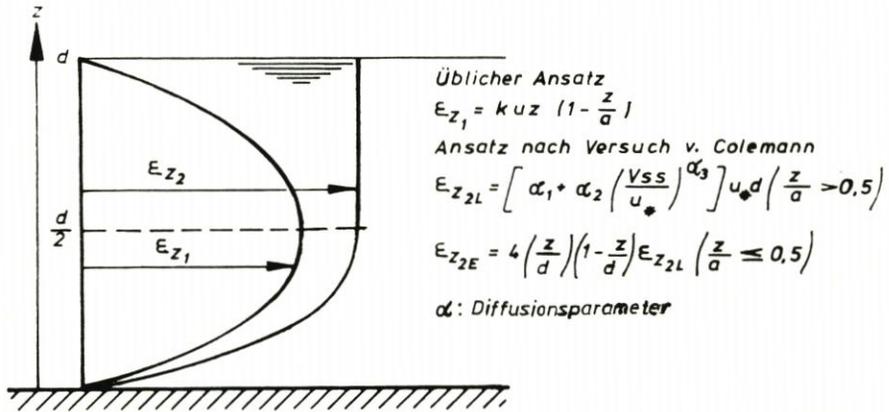


Abb. 6.01. Veränderung des Sediment-Diffusionskoeffizienten über die Wassertiefe (KERSENS et al., 1979)

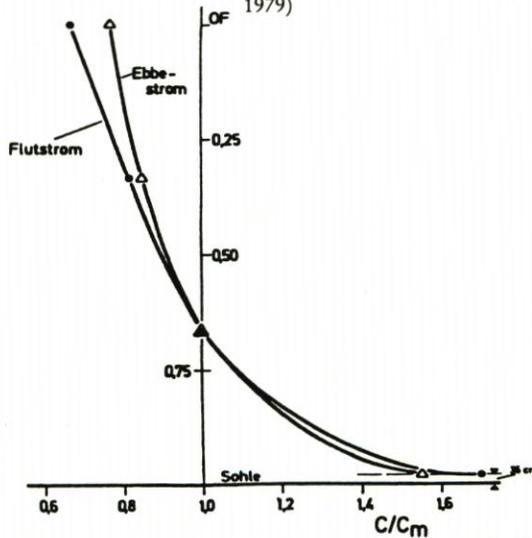


Abb. 6.02. Vertikale Verteilung der Schwebstoffkonzentration (C) (Mittel aus 21 Messungen) (GÖHREN, 1972)

## 6.2 Abschätzung der Suspensionstransportmengen im Untersuchungsgebiet

Nachfolgend werden die Transportmengen über das Watt als Trockenmasse in ihrer Größenordnung für die Bereiche zwischen Neuwerk und Scharhörn sowie über das Scharhörnriff elbwärts abgeschätzt. Hierbei werden nur, wie oben ausgeführt, die in Suspension transportierten Feststoffteile erfaßt. Die Ergebnisse sollen mit denen von GÖHREN (1971) verglichen und mögliche Folgerungen gezogen werden.

Die Bestimmung der Größenordnung des Transports setzt die Kenntnis

- der maßgebenden Suspensionskonzentration,
- der mittleren Verteilungsfunktion der Konzentrationen in der Vertikalen und
- des maßgebenden Wassertransportvolumens pro Zeiteinheit voraus.

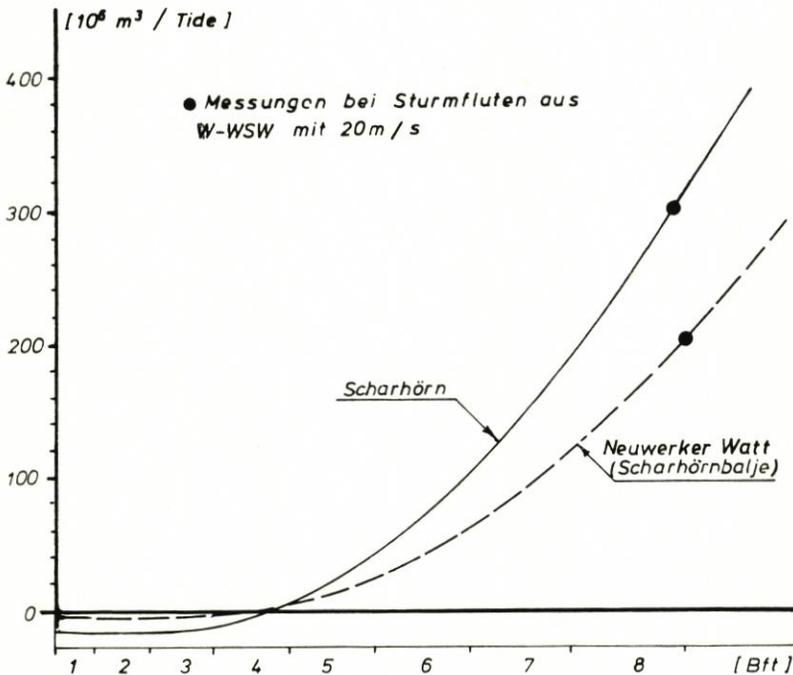


Abb. 6.03. Resultierender Wasserversatz bei auflandigen Winden vor Scharhörn und über dem Neuwerker Watt (Näherung nach Durchfluß- und Reststrommessungen von GÖHREN, 1969 und 1971)

Die vertikale Konzentrationsverteilung ergibt sich aus den von ROUSE (Abb. 2.08) angegebenen Beziehungen, wobei für die weiteren Ermittlungen die von GÖHREN (1971) für Rinnen angegebene Verteilungsfunktion zugrundegelegt wird (Abb. 6.02). Die resultierenden Wasserbewegungen über das Watt vor Scharhörn und über den Wattrücken zwischen Neuwerk und Scharhörn sind ebenfalls von GÖHREN (1969) angegeben bzw. aus dem von ihm angegebenen Reststrom abzuschätzen (vgl. Abb. 6.03). Man erhält pro Tide:

|                    |      |  |
|--------------------|------|--|
| für mittlere Tiden | (S)  | $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ Richtung SW |
| (0 bis 4 Bft)      | (SB) | $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ Richtung SW  |
| für Sturmzeiten    | (S)  | $300 \times 10^6 \text{ m}^3$ Richtung O |

|   |      |   |
|---|------|---|
| mit auflandigem Wind<br>(8 bis 9 Bft)                     | (SB) | 200 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Richtung O |
| Die Suspensionskonzentrationen ergeben sich aus Abb. 5.24 |      |   |
| für mittlere Tiden<br>(2 bis 3 Bft)                       | (S)  | ca. 40 mg/l                                     |
| für Sturmzeiten mit<br>auflandigem Wind<br>(8 bis 9 Bft)  | (SB) | ca. 95 mg/l                                     |
|   | (S)  | ca. 235 mg/l                                    |
|   | (SB) | ca. 535 mg/l                                    |

Unter Berücksichtigung der in Abb. 6.02 dargestellten vertikalen Verteilung sind die Mittelwerte der Konzentrationen

|  |      |              |
|--|------|--------------|
| für mittlere Tiden<br>(2 bis 3 Bft)                      | (S)  | ca. 25 mg/l  |
| für Sturmzeiten mit<br>auflandigem Wind<br>(8 bis 9 Bft) | (SB) | ca. 60 mg/l  |
|  | (S)  | ca. 145 mg/l |
|  | (SB) | ca. 335 mg/l |

Diese Werte stimmen in der Größenordnung mit denen von GÖHREN (1971) überein, der anhand von eigenen Messungen (Abb. 5.01 bis 5.03) und Abschätzungen nach GRY (1942) und POSTMA (1961) Mittelwerte für

|                     |          |
|---------------------|----------|
| mittlere Tiden von  | 30 mg/l  |
| und Sturmzeiten von | 300 mg/l |

genannt hat, ohne diese Werte lokal zu spezifizieren. GÖHREN nennt für die Konzentrationswerte keine Bezugstemperatur, während die in dieser Arbeit angegebenen Werte auf 4 °C bezogen sind. Diese Temperatur entspricht der mittleren Wassertemperatur von Mitte Oktober bis Mitte April (KÜHL, 1973), d. h. dem Zeitraum, in dem vornehmlich mit Sturmzeiten zu rechnen ist. Die Konzentrationswerte für Sturmzeiten stellen somit einen repräsentativen Mittelwert dar. Die Konzentrationswerte der mittleren Tiden sind allerdings auf die Jahresmitteltemperatur des Wassers von 10 °C umzurechnen und ergeben sich gemäß Gl. 2.15 zu

|      |             |
|------|-------------|
| (S)  | ca. 15 mg/l |
| (SB) | ca. 38 mg/l |

Diese Werte entsprechen dann im Mittel knapp dem von GÖHREN angegebenen Wert von 30 mg/l.

Mit den angegebenen resultierenden Wasserbewegungen ergeben sich somit für die Temperaturmittelwerte folgende Feststofffrachten:

|                                   |      |                          |
|-----------------------------------|------|--------------------------|
| mittlere Tideverhältnisse (10 °C) | (S)  | ca. 225 t/Tide nach SW   |
|                                   | (SB) | ca. 75 t/Tide nach SW    |
| Sturmzeiten (20 m/s, 4 °C)        | (S)  | ca. 42 000 t/Tide nach O |
|                                   | (SB) | ca. 63 000 t/Tide nach O |

Für den Standort (SB) entsprechen diese Suspensionsfrachten den Angaben von GÖHREN (1971), der für mittlere Tideverhältnisse 100 t/Tide bzw. für Sturmzeiten 60 000 t/Tide angegeben hat. Am Standort (S) kommt GÖHREN wegen des Ansatzes desselben Konzentrationsmittelwertes wie auf dem Wattrücken zu etwa doppelt so großen Frachten wie hier ermittelt. Nach den hier durchgeführten Messungen bleibt der Ansatz bei GÖHREN entsprechend zu korrigieren.

Mit Hilfe der von SIEFERT (1972) vorgelegten Windstatistik kann für den auflandigen Windsektor (nach GÖHREN etwa 220° bis 320°), der zu einer West-Ost-Überströmung des Wattrückens bei Windfluten führt, eine erste grobe Bilanzierung des Transports in den Gebieten einmal zwischen Neuwerk und Scharhörn (SB) und zum anderen vor Scharhörn über das Scharhörnriff (S) (Tab. 6.01) durchgeführt werden, wenn man den resultierenden

Tabelle 6.01  
Abschätzung des Transportes in Suspension p. a. für den auflandigen Windsektor (Trockenmasse)

| Windstärke<br>(Bft.)                       | (./.) | Anzahl der<br>Tiden p. a.<br>(%) | Result. Wasser-<br>transport<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Maßgebende mittlere<br>Konzentration<br>bei 4 °C<br>(mg/l) | bei 10 °C<br>(mg/l) | Feststofftransport<br>pro Tide<br>(t/Tide) | P. a.<br>(t/a) | Feststofftransport (4 °C)<br>pro Tide<br>(t/Tide) | P. a.<br>(t/a) |
|--|-------|----------------------------------|---|--|---------------------|--|----------------|---|----------------|
| <b>Scharhörn:</b>                          |       |                                  |   |  |                     |  |                |   |                |
| 0-3  | 48    | 7                                | - 15  | 25   | 15                  | - 225                                      | - 10 800       | - 375   | - 18 000       |
| 4  | 63    | 9                                | - 5   | 28   | 18                  | - 90                                       | - 5 670        | - 140   | - 8 820        |
| 5  | 71    | 10                               | + 25  | 30   | 19                  | 475  | 33 725         | 750   | 53 250         |
| 6  | 39    | 6                                | + 70  | 37   | 23                  | 1 610                                      | 62 790         | 2 590   | 101 010        |
| 7  | 26    | 4                                | + 150   | 66   | 42                  | 6 300                                      | 163 800        | 9 900   | 257 400        |
| 8  | 6     | 1                                | + 260   | 121  | 77                  | 20 020                                     | 120 120        | 31 460  | 188 760        |
| 9  | 1     | 1                                | + 380   | 181  | 115                 | 43 700                                     | 43 700         | 68 780  | 68 780         |
|  |       |                                  |   |  |                     |  | 407 665        |   | 642 380        |
| Transport über Watt Richtung O: 10 °C/4 °C |       |                                  |   |  |                     |  |                |   |                |
| Starkwindphasen bei 4 °C bis 10 °C         |       |                                  |   |  |                     |  |                |   |                |
|  |       |                                  |   |  |                     | gerundet:                                  | 410 000        |   | 640 000        |
|  |       |                                  |   |  |                     | gerundeter Mittelwert:                     | 525 000 t      |   |                |
| <b>Scharhörnbalje:</b>                     |       |                                  |   |  |                     |  |                |   |                |
| 0-3  | 48    | 7                                | - 2   | 60   | 38                  | - 76                                       | - 3 648        | - 120   | - 5 760        |
| 4  | 63    | 9                                | + 1   | 66   | 41                  | 41   | 2 583          | 66  | 4 158          |
| 5  | 71    | 10                               | + 15  | 70   | 44                  | 660  | 46 860         | 1 050   | 74 550         |
| 6  | 39    | 6                                | + 40  | 83   | 52                  | 2 080                                      | 81 120         | 3 320   | 129 480        |
| 7  | 26    | 4                                | + 90  | 148  | 94                  | 8 460                                      | 219 960        | 13 320  | 346 320        |
| 8  | 6     | 1                                | + 160   | 274  | 173                 | 27 680                                     | 166 080        | 43 840  | 263 040        |
| 9  | 1     | 1                                | + 260   | 410  | 260                 | 67 600                                     | 67 600         | 106 600   | 106 600        |
|  |       |                                  |   |  |                     |  | 577 972        |   | 918 388        |
| Transport über Watt Richtung O: 10 °C/4 °C |       |                                  |   |  |                     |  |                |   |                |
| Starkwindphasen bei 4 °C bis 10 °C         |       |                                  |   |  |                     |  |                |   |                |
|  |       |                                  |   |  |                     | gerundet:                                  | 580 000        |   | 920 000        |
|  |       |                                  |   |  |                     | gerundeter Mittelwert:                     | 750 000 t      |   |                |

Wassertransport vereinfacht in Anlehnung an die Veränderung des Reststromes mit der Windstärke zwischen den von GÖHREN (1971) angegebenen Werten interpoliert (Abb. 6.03). Die bei mittleren Tideverhältnissen unterschiedlichen Konzentrationswerte in den Flut- und Ebbephasen (vgl. Abb. 5.15) und die am Standort (S) für die Windrichtung 210° bis 240° ermittelten höheren Konzentrationswerte bleiben hierbei unberücksichtigt. Die anderen Windrichtungen verändern dieses Bild nur unwesentlich, da bei ihnen eher reduzierte Wassermengen und meist auch geringere Konzentrationswerte maßgebend sind (vgl. Abb. 5.11). So ergibt sich im auflandigen Windsektor die jährliche Gesamt-Suspensionsfracht in Richtung O für 10 °C Wassertemperatur additiv aus den Werten (Tab. 6.01) für (SB) und (S) zu

$$4,1 \times 10^5 \text{ t} + 5,8 \times 10^5 \text{ t} \approx 1,0 \times 10^6 \text{ t}$$

Da der vorstehenden Abschätzung die Jahresmitteltemperatur des Wassers von 10 °C zugrundeliegt, werden die Transportmengen eher noch höher liegen, weil 80 % und mehr des Gesamttransportes bei Windstärken > 6 Bft, d. h. bei Sturmfluten, auftreten, die vornehmlich im Winterhalbjahr mit reduzierten Wassertemperaturen zu verzeichnen sind. Die Mitteltemperatur im Winterhalbjahr liegt, wie oben angegeben, bei 4 °C. In Tab. 6.01 ist deshalb die Gesamtsuspensionsfracht auch für diese Temperatur mit jährlich

$$6,4 \times 10^5 \text{ t} + 9,2 \times 10^5 \text{ t} \approx 1,5 \times 10^6 \text{ t}$$

angegeben. Eine Zuordnung der Sturmzeiten zu bestimmten Wassertemperaturen ist anhand der vorliegenden Statistik nicht möglich. Die tatsächliche jährliche Gesamt-Suspensionsfracht kann deshalb nur angenähert als Mittelwert aus den Frachten bei 4 °C und 10 °C angegeben werden. Sie ergibt sich zu

$$\text{rd. } 5,3 \times 10^5 \text{ t} + 7,5 \times 10^5 \approx 1,3 \times 10^6 \text{ t}$$

## 7. Meßdatenzusammenstellung

Tabelle 1  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

| Standort: Scharhörn |           | Suspension  |                | Wind     |          |             | Tide        |                | Welle |          | Wasserr.  |               | Strömung  |       | Temp. |          |             |             |           |       |
|---------------------|-----------|-------------|----------------|----------|----------|-------------|-------------|----------------|-------|----------|-----------|---------------|-----------|-------|-------|----------|-------------|-------------|-----------|-------|
| Lfd. Nr.            | $\bar{C}$ | $\bar{C}_C$ | $\bar{C}_{CT}$ | $C_{HW}$ | $C_{HC}$ | $\bar{R}_T$ | $\bar{V}_T$ | $\bar{V}_{TB}$ | $K_T$ | $\tau_T$ | $\bar{H}$ | Grund-berühr. | Bran-dung | $d_p$ | $d$   | $S_{VT}$ | $\bar{u}_H$ | $\bar{u}_s$ | $\bar{u}$ | $T_C$ |
|                     |           |             | [mg/l]         |          |          | [Grad]      | [m/s]       | [Bft]          | [-]   | [h]      | [cm]      |               |           | [mPN] | [m]   | [km/T]   | [cm/s]      | [cm/s]      | [cm/s]    | [°C]  |
| Sektor: 240°-360°   |           |             |                |          |          |             |             |                |       |          |           |               |           |       |       |          |             |             |           |       |
| 1                   | 47        | 71          | 76             | 25       | 37       | 255         | 9,3         | 5              | 1,11  | 13,74    | 45        | g             | -         | 6,26  | 2,46  | 5,8      | 75          | 20          | 95        | 9     |
| 2                   | 59        | 80          | 81             | 28       | 42       | 255         | 6,7         | 4              | 1,09  | 12,60    | 31        | g             | -         | 6,68  | 2,88  | 4,7      | 50          | 15          | 65        | 8     |
| 3                   | 48        | 72          | 73             | 25       | 38       | 255         | 10,8        | 6              | 0,96  | 12,60    | 54        | g             | -         | 6,55  | 2,75  | 6,4      | 85          | 25          | 110       | 9     |
| 4                   | 39        | 62          | 60             | 24       | 38       | 295         | 5,7         | 4              | 1,01  | 12,13    | 26        | g             | -         | 6,50  | 2,70  | 4,4      | 45          | 20          | 65        | 10    |
| 5                   | 27        | 43          | 42             | 18       | 28       | 260         | 4,9         | 3              | 1,03  | 12,15    | 28        | g             | -         | 6,60  | 2,80  | 3,1      | 45          | 15          | 60        | 10    |
| 6                   | 59        | 93          | 91             | 50       | 79       | 250         | 14,4        | 7              | 1,12  | 12,33    | 58        | g             | -         | 6,95  | 3,15  | 7,1      | 85          | 20          | 105       | 10    |
| 7                   | 58        | 87          | 89             | 52       | 78       | 250         | 13,4        | 6              | 1,24  | 12,73    | 68        | g             | -         | 7,43  | 3,63  | 11,2     | 90          | 25          | 115       | 9     |
| 8                   | 47        | 71          | 70             | 38       | 57       | 255         | 14,1        | 7              | 1,15  | 12,40    | 68        | g             | b         | 7,08  | 3,28  | 8,4      | 90          | 25          | 115       | 9     |
| 9                   | 45        | 68          | 67             | 18       | 27       | 250         | 12,3        | 6              | 1,11  | 12,10    | 64        | g             | b         | 6,80  | 3,00  | 6,6      | 90          | 20          | 110       | 9     |
| 10                  | 110       | 145         | 182            | 151      | 213      | 265         | 16,0        | 7              | 1,41  | 15,60    | 91        | g             | b         | 7,35  | 3,55  | 14,4     | 115         | 25          | 140       | 8     |
| 11                  | 40        | 56          | 55             | 16       | 23       | 305         | 10,4        | 5              | 1,09  | 12,12    | 54        | g             | -         | 6,74  | 2,94  | 6,1      | 80          | 20          | 100       | 8     |
| 12                  | 44        | 62          | 61             | 54       | 76       | 305         | 7,1         | 4              | 1,02  | 12,38    | 35        | g             | -         | 6,19  | 2,39  | 4,0      | 60          | 15          | 75        | 8     |
| 13                  | 29        | 37          | 35             | 3        | 4        | 290         | 9,0         | 5              | 1,07  | 12,33    | 45        | g             | -         | 6,61  | 2,81  | 6,1      | 65          | 25          | 90        | 6     |
| 14                  | 49        | 60          | 63             | 18       | 22       | 280         | 11,0        | 6              | 1,13  | 12,98    | 66        | g             | b         | 6,51  | 2,71  | 8,5      | 95          | 25          | 120       | 6     |
| 15                  | 25        | 33          | 34             | 25       | 33       | 265         | 10,2        | 5              | 1,12  | 12,77    | 64        | g             | b         | 6,68  | 2,88  | 6,5      | 90          | 20          | 110       | 7     |
| 16                  | 18        | 24          | 23             | 20       | 26       | 250         | 13,4        | 6              | 1,01  | 12,15    | 60        | g             | b         | 6,29  | 2,49  | 6,0      | 90          | 20          | 110       | 7     |
| 17                  | 24        | 30          | 31             | 21       | 26       | 250         | 12,0        | 6              | 1,13  | 13,02    | 63        | g             | b         | 6,70  | 2,90  | 5,9      | 90          | 20          | 110       | 6     |
| 18                  | 20        | 25          | 25             | 19       | 23       | 250         | 8,7         | 5              | 1,04  | 12,53    | 57        | g             | b         | 6,36  | 2,56  | 4,1      | 65          | 15          | 100       | 6     |
| 19                  | 35        | 39          | 39             | 28       | 31       | 250         | 13,5        | 6              | 1,16  | 12,52    | 70        | g             | b         | 7,23  | 3,43  | 8,5      | 95          | 30          | 125       | 5     |
| 20                  | 36        | 40          | 40             | 20       | 22       | 290         | 11,8        | 6              | 1,12  | 12,37    | 61        | g             | -         | 7,14  | 3,34  | 7,0      | 85          | 20          | 105       | 5     |
| 21                  | 32        | 36          | 36             | 16       | 18       | 260         | 8,3         | 5              | 1,11  | 12,63    | 42        | g             | -         | 6,94  | 3,14  | 5,3      | 65          | 20          | 85        | 5     |
| 22                  | 45        | 50          | 50             | 16       | 18       | 260         | 9,1         | 5              | 1,08  | 12,32    | 46        | g             | -         | 6,95  | 3,15  | 5,6      | 70          | 20          | 90        | 5     |
| 23                  | 28        | 31          | 31             | 9        | 10       | 280         | 7,2         | 4              | 0,97  | 12,28    | 35        | g             | -         | 6,31  | 2,51  | 4,8      | 55          | 20          | 75        | 5     |
| 24                  | 23        | 26          | 26             | 3        | 3        | 250         | 7,4         | 4              | 1,05  | 12,57    | 37        | g             | -         | 6,64  | 2,84  | 4,9      | 55          | 15          | 70        | 5     |
| 25                  | 14        | 16          | 15             | 18       | 20       | 250         | 9,8         | 5              | 0,96  | 12,10    | 50        | g             | -         | 6,33  | 2,53  | 5,9      | 80          | 25          | 105       | 5     |
| 26                  | 36        | 43          | 44             | 25       | 28       | 250         | 11,8        | 6              | 1,06  | 12,68    | 61        | g             | b         | 6,54  | 2,24  | 7,0      | 90          | 25          | 115       | 5     |
| 27                  | 41        | 46          | 44             | 43       | 48       | 250         | 13,4        | 6              | 1,00  | 12,00    | 64        | g             | b         | 6,37  | 2,57  | 8,4      | 95          | 35          | 130       | 5     |
| 28                  | 104       | 214         | 225            | 132      | 251      | 260         | 19,0        | 8              | 1,31  | 13,33    | 93        | g             | b         | 7,65  | 3,85  | 18,0     | 115         | 40          | 155       | 17    |
| 29                  | 40        | 80          | 81             | 71       | 142      | 310         | 15,7        | 7              | 1,18  | 12,73    | 82        | g             | b         | 7,24  | 3,44  | 12,0     | 105         | 30          | 135       | 16    |
| 30                  | 82        | 159         | 160            | 165      | 320      | 330         | 16,2        | 7              | 1,21  | 12,58    | 84        | g             | b         | 7,57  | 3,77  | 13,2     | 105         | 35          | 140       | 15    |
| 31                  | 16        | 25          | 25             | 3        | 5        | 260         | 8,0         | 5              | 1,07  | 12,42    | 40        | g             | -         | 6,82  | 3,02  | 5,1      | 55          | 20          | 35        | 10    |
| 32                  | 21        | 32          | 29             | 9        | 14       | 305         | 12,0        | 6              | 1,05  | 11,70    | 53        | g             | -         | 6,94  | 3,14  | 7,7      | 75          | 25          | 100       | 9     |
| 33                  | 81        | 122         | 129            | 38       | 57       | 340         | 15,7        | 7              | 1,32  | 13,28    | 82        | g             | b         | 7,75  | 3,95  | 12,0     | 110         | 30          | 140       | 9     |
| 34                  | 27        | 30          | 32             | 8        | 9        | 245         | 12,4        | 6              | 1,15  | 13,33    | 46        | g             | -         | 6,54  | 2,74  | 7,5      | 70          | 20          | 90        | 5     |
| 35                  | 41        | 54          | 55             | 21       | 28       | 290         | 9,7         | 5              | 1,17  | 12,68    | 59        | g             | -         | 7,25  | 3,45  | 5,9      | 80          | 20          | 100       | 7     |
| 36                  | 26        | 34          | 33             | 18       | 24       | 325         | 9,8         | 5              | 1,05  | 11,92    | 61        | g             | -         | 6,97  | 3,17  | 5,9      | 85          | 15          | 100       | 7     |
| 37                  | 24        | 32          | 32             | 18       | 24       | 265         | 13,4        | 6              | 1,06  | 12,58    | 58        | g             | b         | 6,71  | 2,91  | 8,4      | 85          | 35          | 120       | 7     |
| 38                  | 30        | 40          | 40             | 20       | 26       | 310         | 14,0        | 7              | 1,16  | 12,75    | 66        | g             | b         | 7,15  | 3,95  | 9,0      | 85          | 30          | 115       | 7     |
| 39                  | 24        | 32          | 30             | 25       | 33       | 270         | 12,6        | 6              | 0,95  | 11,53    | 47        | g             | -         | 6,44  | 2,64  | 7,6      | 75          | 30          | 105       | 7     |
| 40                  | 77        | 102         | 106            | 92       | 121      | 330         | 14,9        | 7              | 1,28  | 13,02    | 84        | g             | b         | 7,64  | 3,84  | 10,5     | 105         | 25          | 130       | 7     |
| 41                  | 26        | 34          | 33             | 3        | 4        | 335         | 10,2        | 5              | 1,04  | 12,17    | 53        | g             | -         | 6,56  | 2,76  | 6,0      | 80          | 20          | 100       | 7     |
| 42                  | 89        | 134         | 148            | 115      | 172      | 265         | 15,8        | 7              | 1,35  | 13,85    | 83        | g             | b         | 7,60  | 3,80  | 12,3     | 105         | 20          | 125       | 9     |
| 43                  | 26        | 32          | 32             | 19       | 23       | 255         | 11,2        | 6              | 1,03  | 12,45    | 58        | g             | b         | 6,39  | 2,59  | 6,6      | 85          | 15          | 100       | 6     |
| 44                  | 26        | 57          | 57             | 10       | 22       | 285         | 8,7         | 5              | 1,00  | 12,52    | 44        | g             | -         | 6,52  | 2,72  | 4,7      | 65          | 15          | 80        | 19    |
| 45                  | 24        | 49          | 50             | 6        | 12       | 330         | 6,8         | 4              | 1,03  | 12,63    | 32        | g             | -         | 6,56  | 2,76  | 5,0      | 55          | 15          | 70        | 17    |
| 46                  | 19        | 39          | 38             | 3        | 6        | 320         | 5,2         | 3              | 0,94  | 12,15    | 24        | g             | -         | 6,20  | 2,40  | 4,8      | 40          | 20          | 60        | 17    |
| 47                  | 26        | 54          | 52             | 6        | 12       | 310         | 7,2         | 4              | 0,97  | 12,17    | 36        | g             | -         | 6,26  | 2,46  | 4,8      | 60          | 15          | 75        | 17    |
| 48                  | 45        | 90          | 93             | 38       | 66       | 315         | 12,4        | 6              | 1,06  | 12,98    | 54        | g             | b         | 5,94  | 2,14  | 7,5      | 85          | 20          | 105       | 16    |
| 49                  | 20        | 41          | 43             | 15       | 31       | 280         | 9,8         | 5              | 1,11  | 12,98    | 51        | g             | -         | 6,65  | 2,85  | 5,9      | 80          | 20          | 100       | 17    |
| 50                  | 26        | 52          | 49             | 24       | 48       | 255         | 12,4        | 6              | 0,96  | 11,73    | 63        | g             | b         | 6,29  | 2,49  | 7,5      | 90          | 25          | 115       | 16    |
| 51                  | 70        | 136         | 142            | 120      | 232      | 310         | 15,1        | 7              | 1,16  | 13,10    | 80        | g             | b         | 6,90  | 3,10  | 10,5     | 110         | 25          | 135       | 15    |
| 52                  | 45        | 87          | 88             | 21       | 41       | 280         | 14,9        | 7              | 1,09  | 12,55    | 56        | g             | -         | 6,95  | 3,15  | 10,5     | 65          | 30          | 115       | 15    |
| 53                  | 19        | 37          | 36             | 9        | 18       | 315         | 14,0        | 7              | 1,06  | 12,35    | 56        | g             | -         | 6,75  | 2,95  | 9,0      | 80          | 25          | 105       | 15    |
| 54                  | 35        | 68          | 67             | 0        | 0        | 325         | 15,8        | 7              | 1,08  | 12,28    | 64        | g             | b         | 6,99  | 3,19  | 14,7     | 85          | 40          | 125       | 15    |
| 55                  | 64        | 111         | 112            | 12       | 21       | 260         | 13,2        | 6              | 1,17  | 12,62    | 71        | g             | b         | 7,20  | 3,40  | 8,2      | 95          | 20          | 115       | 12    |
| 56                  | 49        | 88          | 88             | 3        | 5        | 250         | 16,3        | 7              | 1,11  | 12,45    | 86        | g             | b         | 7,55  | 3,75  | 13,3     | 105         | 30          | 135       | 13    |
| 57                  | 57        | 103         | 100            | 30       | 54       | 260         | 16,6        | 7              | 1,11  | 12,17    | 80        | g             | b         | 7,15  | 3,35  | 14,0     | 110         | 35          | 145       | 13    |
| 58                  | 73        | 131         | 123            | 91       | 164      | 280         | 17,3        | 8              | 1,14  | 11,72    | 88        | g             | b         | 7,55  | 3,75  | 16,0     | 110         | 40          | 150       | 13    |
| 59                  | 28        | 50          | 49             | 20       | 35       | 300         | 13,2        | 6              | 1,16  | 12,10    | 70        | g             | b         | 7,32  | 3,52  | 8,2      | 95          | 20          | 115       | 12    |
| 60                  | 27        | 45          | 44             | 0        | 0        | 320         | 9,8         | 5              | 1,06  | 12,20    | 50        | g             | -         | 6,78  | 2,98  | 5,9      | 75          | 15          | 90        | 11    |
| 61                  | 21        | 35          | 34             | 0        | 0        | 300         | 10,2        | 5              | 1,03  | 12,32    | 52        | g             | -         | 6,56  | 2,76  | 6,0      | 80          | 20          | 100       | 11    |
| 62                  | 73        | 121         | 122            | 34       | 56       | 260         | 14,0        | 7              | 1,17  | 12,60    | 73        | g             | b         | 6,95  | 3,15  | 9,0      | 95          | 25          | 120       | 11    |
| 63                  | 60        | 95          | 90             | 50       | 79       | 270         | 16,4        | 7              | 1,08  | 11,93    | 72        | g             | b         | 6,70  | 2,90  | 13,6     | 100         | 35          | 135       | 10    |
| 64                  | 28        | 44          | 46             | 6        | 10       | 255         | 13,6        | 6              | 1,14  | 13,02    | 68        | g             | b         | 6,52  | 2,72  | 8,6      | 95          | 20          | 115       | 10    |
| 65                  | 52        | 82          | 86             | 9        | 14       | 255         | 13,5        | 6              | 1,16  | 13,02    | 70        | g             | b         | 6,84  | 3,04  | 8,5      | 95          | 20          | 115       | 10    |
| 66                  | 18        | 28          | 29             | 3        | 5        | 260         | 12,1        | 6              | 1,10  | 12,53    | 62        | g             | b         | 6,59  | 2,79  | 7,2      | 90          | 15          | 105       | 10    |
| 67                  | 33        | 52          | 52             | 6        | 10       | 270         | 13,4        | 6              | 1,11  | 12,50    | 69        | g             | b         | 6,78  | 2,98  | 8,4      | 95          | 20          | 115       | 10    |
| 68                  | 19        | 30          | 29             | 3        | 5        | 265         | 9,9         | 5              | 1,05  | 12,12    | 50        | g             | -         | 6,72  | 2,92  | 5,9      | 75          | 20          | 95        | 10    |
| 69                  | 44        | 73          | 72             | 3        | 5        | 255         | 9,4         | 5              | 1,04  | 12,38    | 47        | g             | -         | 6,59  | 2,79  | 5,7      | 70          | 20          | 90        | 11    |
| 70                  | 49        | 69          | 66             | 15       | 21       | 360         | 11,0        | 6              | 1,09  | 11,92    | 68        | g             | b         | 7,14  | 3,34  | 6,4      | 90          | 20          | 110       | 8     |

Tabelle 2  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

| Standort: Scharhörn |            |             |                |             |             |                |       |       |            |
|---------------------|------------|-------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------|-------|------------|
| Lfd. Nr.            | Suspension |             |                | $\bar{R}_T$ | Wind        |                | Tide  |       | Temperatur |
|                     | $\bar{C}$  | $\bar{C}_C$ | $\bar{C}_{CT}$ |             | $\bar{V}_T$ | $\bar{V}_{TB}$ | $K_T$ | $t_T$ | $T_C$      |
| [ - ]               | [mg/l]     | [mg/l]      | [mg/l]         | [Grad]      | [m/s]       | [Bft]          | [ - ] | [h]   | [°C]       |
| Sektor: 210°-250°   |            |             |                |             |             |                |       |       |            |
| 1                   | 73         | 115         | 115            | 245         | 8,8         | 5              | 1,03  | 12,45 | 10         |
| 2                   | 63         | 100         | 97             | 225         | 8,9         | 5              | 1,02  | 12,10 | 10         |
| 3                   | 74         | 117         | 115            | 245         | 8,3         | 5              | 1,04  | 12,28 | 10         |
| 4                   | 84         | 133         | 130            | 230         | 16,6        | 7              | 1,04  | 12,22 | 10         |
| 5                   | 69         | 114         | 110            | 245         | 15,8        | 7              | 1,10  | 12,05 | 9          |
| 6                   | 88         | 146         | 142            | 245         | 13,4        | 6              | 1,05  | 12,15 | 9          |
| 7                   | 68         | 113         | 110            | 225         | 11,6        | 6              | 0,98  | 12,17 | 9          |
| 8                   | 53         | 88          | 88             | 225         | 10,3        | 5              | 1,01  | 12,47 | 9          |
| 9                   | 62         | 135         | 135            | 230         | 11,9        | 6              | 1,04  | 12,47 | 19         |
| 10                  | 46         | 103         | 102            | 240         | 7,8         | 4              | 1,05  | 12,40 | 20         |
| 11                  | 60         | 124         | 124            | 230         | 15,4        | 7              | 1,09  | 12,52 | 17         |
| 12                  | 54         | 94          | 94             | 230         | 9,3         | 5              | 1,04  | 12,48 | 12         |
| 13                  | 59         | 66          | 65             | 230         | 13,3        | 6              | 1,07  | 12,23 | 5          |
| 14                  | 59         | 114         | 112            | 245         | 11,0        | 6              | 0,99  | 12,27 | 15         |
| 15                  | 56         | 93          | 91             | 230         | 12,3        | 6              | 1,00  | 12,27 | 11         |
| 16                  | 69         | 120         | 121            | 245         | 7,7         | 4              | 1,06  | 12,57 | 12         |
| 17                  | 72         | 119         | 119            | 240         | 9,2         | 5              | 1,05  | 12,52 | 11         |
| 18                  | 105        | 174         | 175            | 245         | 11,4        | 6              | 1,10  | 12,57 | 11         |
| 19                  | 107        | 170         | 168            | 245         | 9,8         | 5              | 1,09  | 12,33 | 11         |
| 20                  | 105        | 174         | 182            | 230         | 9,8         | 5              | 1,11  | 13,07 | 11         |
| 21                  | 81         | 134         | 138            | 245         | 12,2        | 6              | 1,13  | 12,88 | 11         |
| 22                  | 57         | 90          | 89             | 245         | 10,9        | 6              | 1,00  | 12,30 | 10         |
| 23                  | 94         | 149         | 152            | 245         | 10,6        | 5              | 1,07  | 12,75 | 10         |
| 24                  | 55         | 91          | 90             | 240         | 9,6         | 5              | 0,98  | 12,38 | 11         |
| 25                  | 59         | 93          | 93             | 245         | 12,1        | 6              | 1,09  | 12,50 | 10         |
| 26                  | 75         | 119         | 96             | 245         | 16,4        | 7              | 1,04  | 10,13 | 10         |
| 27                  | 67         | 111         | 108            | 250         | 8,1         | 5              | 0,97  | 12,18 | 9          |
| 28                  | 61         | 101         | 99             | 250         | 8,9         | 5              | 1,01  | 12,28 | 9          |
| Sektor: 350°-120°   |            |             |                |             |             |                |       |       |            |
| 1                   | 14         | 31          | 30             | 90          | 6,7         | 4              | 0,94  | 12,23 | 20         |
| 2                   | 10         | 22          | 22             | 20          | 6,2         | 4              | 0,99  | 12,35 | 20         |
| 3                   | 11         | 25          | 25             | 30          | 6,5         | 4              | 0,99  | 12,37 | 20         |
| 4                   | 11         | 25          | 25             | 15          | 8,4         | 5              | 0,98  | 12,42 | 20         |
| 5                   | 16         | 36          | 36             | 5           | 8,4         | 5              | 0,99  | 12,38 | 20         |
| 6                   | 13         | 29          | 29             | 0           | 7,9         | 4              | 0,98  | 12,50 | 20         |
| 7                   | 14         | 27          | 27             | 90          | 6,8         | 4              | 0,98  | 12,45 | 15         |
| 8                   | 17         | 33          | 33             | 115         | 10,4        | 5              | 0,94  | 12,40 | 15         |
| 9                   | 18         | 35          | 35             | 115         | 11,5        | 6              | 0,90  | 12,43 | 15         |
| 10                  | 16         | 27          | 27             | 105         | 11,6        | 6              | 0,94  | 12,28 | 11         |
| 11                  | 11         | 18          | 18             | 105         | 10,9        | 6              | 0,97  | 12,45 | 11         |

Tabelle 2 (Fortsetzung)  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

| Standort: Scharhörn |            |             |                |             |             |                |       |       |                     |
|---------------------|------------|-------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------|-------|---------------------|
| Lfd. Nr.            | Suspension |             |                | $\bar{R}_T$ | Wind        |                | Tide  |       | Temperatur<br>$T_C$ |
|                     | $\bar{C}$  | $\bar{C}_C$ | $\bar{C}_{CT}$ |             | $\bar{V}_T$ | $\bar{V}_{TB}$ | $K_T$ | $t_T$ |                     |
| [-]                 | [mg/l]     | [mg/l]      | [mg/l]         | [Grad]      | [m/s]       | [Bft]          | [-]   | [h]   | [°C]                |
| 12                  | 16         | 27          | 27             | 105         | 11,9        | 6              | 0,93  | 12,38 | 11                  |
| 13                  | 19         | 28          | 27             | 60          | 8,3         | 5              | 0,92  | 12,07 | 9                   |
| 14                  | 23         | 34          | 33             | 45          | 10,4        | 5              | 0,92  | 12,27 | 9                   |
| 15                  | 21         | 32          | 32             | 65          | 10,6        | 5              | 0,90  | 12,55 | 9                   |
| 16                  | 15         | 32          | 31             | 20          | 7,7         | 4              | 0,97  | 12,12 | 18                  |
| 17                  | 13         | 27          | 27             | 40          | 5,8         | 4              | 0,97  | 12,42 | 18                  |
| 18                  | 16         | 33          | 33             | 120         | 8,0         | 5              | 0,93  | 12,38 | 17                  |
| 19                  | 13         | 28          | 29             | 60          | 4,2         | 3              | 1,00  | 12,90 | 18                  |
| 20                  | 13         | 29          | 30             | 50          | 11,1        | 6              | 1,03  | 12,97 | 20                  |
| 21                  | 16         | 35          | 35             | 100         | 7,1         | 4              | 0,96  | 12,43 | 19                  |
| 22                  | 17         | 36          | 36             | 90          | 9,6         | 5              | 0,94  | 12,33 | 18                  |
| 23                  | 17         | 35          | 34             | 100         | 9,8         | 5              | 0,93  | 12,08 | 17                  |
| 24                  | 22         | 35          | 35             | 105         | 11,2        | 6              | 0,92  | 12,37 | 10                  |
| 25                  | 17         | 27          | 27             | 75          | 9,2         | 5              | 0,93  | 12,45 | 10                  |
| Sektor: 110°-220°   |            |             |                |             |             |                |       |       |                     |
| 1                   | 31         | 46          | 46             | 110         | 2,9         | 2              | 1,02  | 12,43 | 9                   |
| 2                   | 33         | 52          | 50             | 220         | 11,6        | 6              | 1,01  | 12,05 | 10                  |
| 3                   | 88         | 98          | 95             | 140         | 14,2        | 7              | 0,87  | 12,08 | 5                   |
| 4                   | 30         | 30          | 30             | 140         | 12,5        | 6              | 0,92  | 12,50 | 4                   |
| 5                   | 41         | 41          | 41             | 220         | 9,8         | 5              | 1,06  | 12,50 | 4                   |
| 6                   | 39         | 44          | 44             | 215         | 10,5        | 5              | 1,04  | 12,45 | 5                   |
| 7                   | 20         | 20          | 21             | 220         | 9,2         | 5              | 1,10  | 12,83 | 4                   |
| 8                   | 30         | 34          | 34             | 220         | 12,0        | 6              | 1,10  | 12,58 | 5                   |
| 9                   | 41         | 46          | 43             | 215         | 8,6         | 5              | 1,00  | 11,67 | 5                   |
| 10                  | 34         | 38          | 37             | 215         | 9,8         | 5              | 1,02  | 12,12 | 5                   |
| 11                  | 27         | 30          | 30             | 220         | 9,2         | 5              | 1,05  | 12,45 | 5                   |
| 12                  | 35         | 39          | 38             | 220         | 15,2        | 7              | 1,07  | 12,25 | 5                   |
| 13                  | 30         | 34          | 33             | 220         | 11,8        | 6              | 1,05  | 12,03 | 5                   |
| 14                  | 38         | 42          | 41             | 220         | 9,2         | 5              | 1,00  | 12,08 | 5                   |
| 15                  | 32         | 39          | 39             | 210         | 10,5        | 5              | 1,06  | 12,52 | 6                   |
| 16                  | 34         | 38          | 37             | 200         | 10,0        | 5              | 1,09  | 12,23 | 5                   |
| 17                  | 27         | 33          | 32             | 220         | 6,7         | 4              | 1,08  | 12,30 | 6                   |
| 18                  | 45         | 55          | 53             | 190         | 16,8        | 7              | 0,93  | 12,10 | 6                   |
| 19                  | 30         | 37          | 38             | 220         | 10,0        | 5              | 1,13  | 12,67 | 6                   |
| 20                  | 34         | 70          | 70             | 120         | 7,5         | 4              | 0,94  | 12,57 | 17                  |
| 21                  | 35         | 70          | 69             | 130         | 12,3        | 6              | 0,92  | 12,27 | 16                  |
| 22                  | 36         | 70          | 70             | 120         | 10,6        | 5              | 0,92  | 12,40 | 15                  |
| 23                  | 30         | 50          | 49             | 140         | 9,6         | 5              | 0,97  | 12,23 | 11                  |
| 24                  | 43         | 71          | 71             | 120         | 12,4        | 6              | 0,96  | 12,42 | 11                  |
| 25                  | 38         | 57          | 57             | 210         | 11,1        | 6              | 1,02  | 12,50 | 9                   |
| 26                  | 27         | 43          | 42             | 140         | 7,9         | 4              | 0,96  | 12,13 | 10                  |
| 27                  | 37         | 56          | 55             | 220         | 8,0         | 5              | 1,02  | 12,30 | 9                   |
| 28                  | 37         | 41          | 41             | 220         | 12,2        | 6              | 1,10  | 12,58 | 5                   |
| 29                  | 36         | 40          | 40             | 220         | 11,2        | 6              | 1,07  | 12,48 | 5                   |
| 30                  | 26         | 47          | 46             | 180         | 11,2        | 6              | 0,96  | 12,28 | 13                  |
| 31                  | 53         | 88          | 85             | 120         | 8,6         | 5              | 0,94  | 12,05 | 11                  |
| 32                  | 24         | 38          | 38             | 220         | 8,6         | 5              | 1,02  | 12,40 | 10                  |
| 33                  | 34         | 70          | 70             | 220         | 9,1         | 5              | 1,07  | 12,57 | 17                  |
| 34                  | 30         | 58          | 58             | 110         | 13,0        | 6              | 0,94  | 12,40 | 15                  |
| 35                  | 33         | 70          | 70             | 220         | 16,9        | 7              | 1,00  | 12,45 | 18                  |

Tabelle 3  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

| Standort: Scharhörnbälje |            |             |                |                 |                  |             |             |                |                |                |           |               |          |                |          |                 |             |                           |             |           |  |        |  |      |  |
|--------------------------|------------|-------------|----------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------|---------------|----------|----------------|----------|-----------------|-------------|---------------------------|-------------|-----------|--|--------|--|------|--|
| Lfd. Nr.                 | Suspension |             |                |                 |                  | Wind        |             |                | Tide           |                | Welle     |               | Wassert. |                | Strömung |                 |             | Temp. T <sub>C</sub> [°C] |             |           |  |        |  |      |  |
|                          | $\bar{C}$  | $\bar{C}_C$ | $\bar{C}_{CT}$ | C <sub>HW</sub> | C <sub>HWC</sub> | $\bar{R}_T$ | $\bar{V}_T$ | $\bar{V}_{TB}$ | K <sub>T</sub> | t <sub>T</sub> | $\bar{H}$ | Grund-berühr. | Brangung | d <sub>p</sub> | d        | S <sub>VT</sub> | $\bar{u}_H$ |                           | $\bar{u}_v$ | $\bar{u}$ |  |        |  |      |  |
| [mg/l]                   |            |             |                |                 | [Grad]           |             |             | [m/s]          |                | [Bft]          |           | [-]           |          | [h]            |          | [cm]            |             | [m]                       |             | [Km/T]    |  | [cm/s] |  | [°C] |  |
| Sektor: 240°-360°        |            |             |                |                 |                  |             |             |                |                |                |           |               |          |                |          |                 |             |                           |             |           |  |        |  |      |  |
| 1                        | 44         | 73          | 71             | 6               | 10               | 220         | 10,0        | 5              | 0,99           | 12,15          | 23        | g             | -        | 6,32           | 2,52     | 6,6             | 35          | 25                        | 60          | 11        |  |        |  |      |  |
| 2                        | 59         | 102         | 101            | 12              | 21               | 220         | 15,0        | 7              | 1,03           | 12,38          | 35        | g             | -        | 6,34           | 2,54     | 8,5             | 55          | 25                        | 80          | 12        |  |        |  |      |  |
| 3                        | 71         | 123         | 121            | 0               | 0                | 220         | 6,7         | 4              | 0,99           | 12,30          | 10        | -             | -        | 6,36           | 2,56     | 7,2             | 0           | 25                        | 25          | 12        |  |        |  |      |  |
| 4                        | 64         | 111         | 109            | 6               | 10               | 220         | 7,2         | 4              | 1,00           | 12,27          | 11        | -             | -        | 6,44           | 2,64     | 6,0             | 0           | 20                        | 20          | 12        |  |        |  |      |  |
| 5                        | 46         | 61          | 62             | 0               | 0                | 220         | 8,2         | 5              | 1,08           | 12,68          | 15        | -             | -        | 6,62           | 2,82     | 6,3             | 5           | 20                        | 25          | 7         |  |        |  |      |  |
| 6                        | 172        | 212         | 213            | 74              | 91               | 225         | 16,0        | 7              | 1,11           | 12,58          | 38        | g             | -        | 6,85           | 3,05     | 10,7            | 55          | 25                        | 80          | 6         |  |        |  |      |  |
| 7                        | 63         | 134         | 131            | 6               | 13               | 230         | 6,2         | 4              | 1,00           | 12,25          | 8         | -             | -        | 6,51           | 2,71     | 7,1             | 0           | 25                        | 25          | 18        |  |        |  |      |  |
| 8                        | 32         | 68          | 66             | 6               | 13               | 230         | 5,6         | 4              | 1,01           | 12,22          | 5         | -             | -        | 6,52           | 2,72     | 5,5             | 0           | 20                        | 20          | 18        |  |        |  |      |  |
| 9                        | 50         | 87          | 85             | 6               | 10               | 230         | 12,3        | 6              | 1,00           | 12,27          | 30        | g             | -        | 6,35           | 2,55     | 7,1             | 50          | 20                        | 70          | 12        |  |        |  |      |  |
| 10                       | 67         | 116         | 114            | 6               | 10               | 230         | 7,4         | 4              | 1,06           | 12,28          | 21        | -             | -        | 6,80           | 3,00     | 6,1             | 20          | 20                        | 40          | 12        |  |        |  |      |  |
| 11                       | 34         | 54          | 54             | 3               | 5                | 230         | 13,5        | 6              | 1,01           | 12,47          | 24        | g             | -        | 6,06           | 2,26     | 7,4             | 45          | 20                        | 65          | 10        |  |        |  |      |  |
| 12                       | 84         | 139         | 140            | 70              | 116              | 235         | 11,2        | 6              | 1,10           | 12,57          | 30        | g             | -        | 6,76           | 2,96     | 7,0             | 45          | 20                        | 65          | 10        |  |        |  |      |  |
| 13                       | 91         | 193         | 202            | 0               | 0                | 240         | 13,7        | 6              | 1,08           | 13,10          | 37        | g             | -        | 6,21           | 2,41     | 7,1             | 60          | 15                        | 75          | 18        |  |        |  |      |  |
| 14                       | 38         | 66          | 66             | 3               | 5                | 240         | 12,0        | 6              | 1,08           | 12,48          | 28        | g             | -        | 6,56           | 2,76     | 6,8             | 45          | 15                        | 60          | 12        |  |        |  |      |  |
| 15                       | 42         | 73          | 69             | 9               | 16               | 240         | 7,2         | 4              | 0,98           | 12,92          | 11        | -             | -        | 6,20           | 2,40     | 5,0             | 5           | 15                        | 20          | 12        |  |        |  |      |  |
| 16                       | 75         | 125         | 125            | 12              | 20               | 240         | 9,4         | 5              | 1,05           | 12,52          | 21        | -             | -        | 6,61           | 2,81     | 6,5             | 20          | 20                        | 40          | 11        |  |        |  |      |  |
| 17                       | 84         | 139         | 135            | 27              | 45               | 240         | 6,9         | 4              | 1,00           | 12,12          | 10        | -             | -        | 6,54           | 2,74     | 5,9             | 20          | 20                        | 20          | 11        |  |        |  |      |  |
| 18                       | 50         | 79          | 83             | 34              | 54               | 240         | 13,4        | 6              | 1,16           | 13,02          | 30        | g             | -        | 6,84           | 3,04     | 8,2             | 45          | 20                        | 65          | 10        |  |        |  |      |  |
| 19                       | 76         | 120         | 117            | 6               | 10               | 240         | 10,2        | 5              | 0,98           | 12,22          | 23        | g             | -        | 6,30           | 2,50     | 6,7             | 35          | 25                        | 60          | 10        |  |        |  |      |  |
| 20                       | 149        | 224         | 224            | 40              | 63               | 240         | 12,1        | 6              | 1,09           | 12,50          | 32        | g             | -        | 6,98           | 3,18     | 7,8             | 50          | 25                        | 75          | 9         |  |        |  |      |  |
| 21                       | 280        | 492         | 355            | 15              | 24               | 240         | 17,2        | 8              | 1,14           | 10,13          | 49        | g             | -        | 6,88           | 3,08     | 12,1            | 70          | 45                        | 115         | 10        |  |        |  |      |  |
| 22                       | 30         | 64          | 62             | 0               | 0                | 245         | 9,4         | 5              | 1,02           | 12,20          | 22        | g             | -        | 6,39           | 2,59     | 7,1             | 35          | 25                        | 60          | 18        |  |        |  |      |  |
| 23                       | 36         | 74          | 73             | 6               | 12               | 250         | 2,0         | 3              | 0,97           | 12,33          | 2         | -             | -        | 6,14           | 2,34     | 5,8             | 0           | 20                        | 20          | 17        |  |        |  |      |  |
| 24                       | 178        | 308         | 306            | 27              | 47               | 250         | 16,3        | 7              | 1,11           | 12,45          | 42        | g             | -        | 6,84           | 3,04     | 9,5             | 65          | 25                        | 90          | 12        |  |        |  |      |  |
| 25                       | 205        | 354         | 345            | 160             | 277              | 250         | 16,8        | 7              | 1,13           | 12,17          | 52        | g             | -        | 7,15           | 3,35     | 10,5            | 75          | 30                        | 105         | 12        |  |        |  |      |  |
| 26                       | 84         | 145         | 146            | 21              | 36               | 250         | 7,6         | 4              | 1,06           | 12,57          | 18        | -             | -        | 6,64           | 2,84     | 8,6             | 15          | 25                        | 40          | 12        |  |        |  |      |  |
| 27                       | 62         | 103         | 102            | 6               | 10               | 250         | 9,8         | 5              | 1,07           | 12,33          | 25        | g             | -        | 6,68           | 2,88     | 6,6             | 40          | 20                        | 60          | 11        |  |        |  |      |  |
| 28                       | 65         | 103         | 103            | 9               | 14               | 250         | 12,2        | 6              | 1,10           | 12,53          | 33        | g             | -        | 6,59           | 2,79     | 7,4             | 55          | 15                        | 70          | 10        |  |        |  |      |  |
| 29                       | 73         | 110         | 106            | 58              | 87               | 250         | 15,2        | 7              | 1,08           | 12,07          | 36        | g             | -        | 6,85           | 3,05     | 8,5             | 55          | 20                        | 75          | 9         |  |        |  |      |  |
| 30                       | 175        | 247         | 252            | 136             | 192              | 250         | 18,0        | 8              | 1,11           | 12,78          | 50        | g             | -        | 6,66           | 2,86     | 12,0            | 75          | 30                        | 105         | 8         |  |        |  |      |  |
| 31                       | 89         | 183         | 180            | 15              | 31               | 255         | 11,7        | 6              | 1,02           | 12,25          | 31        | g             | -        | 6,39           | 2,59     | 7,2             | 55          | 30                        | 85          | 17        |  |        |  |      |  |
| 32                       | 113        | 127         | 125            | 12              | 13               | 255         | 8,0         | 5              | 1,00           | 12,37          | 15        | -             | -        | 6,48           | 2,68     | 6,3             | 15          | 25                        | 40          | 5         |  |        |  |      |  |
| 33                       | 56         | 101         | 96             | 18              | 32               | 260         | 10,7        | 5              | 0,99           | 11,95          | 29        | g             | -        | 6,44           | 2,64     | 7,4             | 50          | 25                        | 75          | 13        |  |        |  |      |  |
| 34                       | 138        | 248         | 251            | 18              | 32               | 260         | 13,4        | 6              | 1,17           | 12,62          | 36        | g             | -        | 7,20           | 3,40     | 9,8             | 55          | 30                        | 85          | 13        |  |        |  |      |  |
| 35                       | 90         | 153         | 154            | 82              | 136              | 260         | 14,1        | 7              | 1,16           | 12,55          | 44        | g             | -        | 6,95           | 3,15     | 8,7             | 65          | 20                        | 85          | 11        |  |        |  |      |  |
| 36                       | 90         | 142         | 141            | 6               | 10               | 260         | 9,4         | 5              | 1,04           | 12,38          | 20        | -             | -        | 6,59           | 2,79     | 6,5             | 20          | 20                        | 40          | 10        |  |        |  |      |  |
| 37                       | 97         | 161         | 154            | 100             | 158              | 260         | 15,9        | 7              | 1,09           | 11,98          | 42        | g             | -        | 6,70           | 2,90     | 10,0            | 65          | 25                        | 90          | 11        |  |        |  |      |  |
| 38                       | 93         | 142         | 147            | 50              | 79               | 265         | 13,3        | 6              | 1,11           | 12,50          | 34        | g             | -        | 6,78           | 2,98     | 8,1             | 50          | 25                        | 75          | 10        |  |        |  |      |  |
| 39                       | 85         | 105         | 102            | 10              | 12               | 265         | 9,0         | 5              | 1,03           | 12,17          | 27        | g             | -        | 6,73           | 2,93     | 6,4             | 40          | 20                        | 60          | 6         |  |        |  |      |  |
| 40                       | 35         | 61          | 61             | 3               | 5                | 270         | 6,7         | 4              | 1,04           | 12,63          | 10        | -             | -        | 6,41           | 2,61     | 6,1             | 0           | 20                        | 20          | 12        |  |        |  |      |  |
| 41                       | 185        | 292         | 346            | 280             | 440              | 270         | 19,5        | 8              | 1,30           | 14,77          | 62        | g             | -        | 7,88           | 4,08     | 14,0            | 80          | 20                        | 100         | 10        |  |        |  |      |  |
| 42                       | 82         | 130         | 126            | 6               | 10               | 275         | 9,2         | 5              | 1,05           | 12,12          | 19        | -             | -        | 6,72           | 2,92     | 6,5             | 20          | 20                        | 60          | 10        |  |        |  |      |  |
| 43                       | 281        | 422         | 428            | 171             | 257              | 275         | 17,4        | 8              | 1,23           | 12,68          | 56        | g             | -        | 7,58           | 3,78     | 12,6            | 80          | 30                        | 110         | 9         |  |        |  |      |  |
| 44                       | 94         | 133         | 123            | 8               | 11               | 275         | 11,3        | 6              | 1,08           | 11,59          | 25        | -             | -        | 7,24           | 3,44     | 7,1             | 25          | 30                        | 55          | 8         |  |        |  |      |  |
| 45                       | 70         | 78          | 76             | 3               | 4                | 280         | 6,5         | 4              | 0,96           | 12,12          | 10        | -             | -        | 6,30           | 2,50     | 5,9             | 20          | 25                        | 25          | 5         |  |        |  |      |  |
| 46                       | 167        | 264         | 262            | 145             | 229              | 285         | 17,4        | 8              | 1,30           | 12,42          | 56        | g             | -        | 8,04           | 4,24     | 12,5            | 70          | 25                        | 95          | 10        |  |        |  |      |  |
| 47                       | 247        | 370         | 375            | 280             | 420              | 285         | 18,6        | 8              | 1,36           | 12,68          | 60        | g             | -        | 8,30           | 4,50     | 14,5            | 75          | 35                        | 105         | 9         |  |        |  |      |  |
| 48                       | 144        | 264         | 274            | 113             | 203              | 290         | 17,4        | 8              | 1,30           | 12,98          | 56        | g             | -        | 7,80           | 4,00     | 11,2            | 70          | 25                        | 95          | 13        |  |        |  |      |  |
| 49                       | 156        | 234         | 236            | 113             | 170              | 290         | 16,9        | 7              | 1,29           | 12,60          | 52        | g             | -        | 7,99           | 4,19     | 10,7            | 65          | 25                        | 90          | 9         |  |        |  |      |  |
| 50                       | 91         | 187         | 184            | 6               | 12               | 300         | 9,9         | 5              | 1,02           | 12,30          | 22        | -             | -        | 6,61           | 2,81     | 7,2             | 30          | 30                        | 60          | 17        |  |        |  |      |  |
| 51                       | 70         | 126         | 122            | 27              | 49               | 300         | 13,2        | 6              | 1,16           | 12,10          | 35        | g             | -        | 7,37           | 3,57     | 8,8             | 50          | 20                        | 70          | 13        |  |        |  |      |  |
| 52                       | 59         | 102         | 101            | 15              | 26               | 300         | 5,9         | 4              | 1,03           | 12,35          | 6         | -             | -        | 6,46           | 2,66     | 5,7             | 0           | 20                        | 20          | 12        |  |        |  |      |  |
| 53                       | 158        | 223         | 229            | 70              | 99               | 300         | 14,9        | 7              | 1,16           | 12,83          | 49        | g             | -        | 7,14           | 3,34     | 9,4             | 70          | 25                        | 95          | 8         |  |        |  |      |  |
| 54                       | 130        | 205         | 196            | 150             | 237              | 305         | 16,5        | 7              | 1,23           | 11,88          | 50        | g             | -        | 7,93           | 4,13     | 10,6            | 65          | 25                        | 90          | 10        |  |        |  |      |  |
| 55                       | 107        | 151         | 152            | 3               | 4                | 305         | 10,1        | 5              | 1,10           | 12,60          | 23        | -             | -        | 6,87           | 3,07     | 6,7             | 20          | 20                        | 45          | 8         |  |        |  |      |  |
| 56                       | 49         | 83          | 82             | 9               | 16               | 310         | 10,4        | 5              | 1,03           | 12,32          | 24        | g             | -        | 6,56           | 2,76     | 7,0             | 40          | 25                        | 65          | 12        |  |        |  |      |  |
| 57                       | 116        | 164         | 163            | 6               | 9                | 310         | 8,2         | 5              | 1,06           | 12,47          | 15        | -             | -        | 6,82           | 3,02     | 7,2             | 25          | 30                        | 35          | 8         |  |        |  |      |  |
| 58                       | 17         | 35          | 34             | 6               | 12               | 315         | 6,7         | 4              | 0,97           | 12,13          | 10        | -             | -        | 5,94           | 2,14     | 5,7             | 25          | 20                        | 25          | 17        |  |        |  |      |  |
| 59                       | 51         | 92          | 88             | 12              | 22               | 315         | 10,8        | 6              | 1,06           | 11,98          | 25        | -             | -        | 6,80           | 3,00     | 6,3             | 35          | 20                        | 55          | 13        |  |        |  |      |  |
| 60                       | 63         | 134         | 134            | 6               | 13               | 320         | 7,2         | 4              | 1,06           | 12,50          | 11        | -             | -        | 6,68           | 2,88     | 7,2             | 20          | 30                        | 30          | 18        |  |        |  |      |  |
| 61                       | 26         | 55          | 54             | 6               | 13               | 320         | 5,4         | 3              | 0,97           | 12,17          | 7         | -             | -        | 6,26           | 2,46     | 5,4             | 10          | 20                        | 20          | 18        |  |        |  |      |  |
| 62                       | 52         | 107         | 106            | 14              | 30               | 320         | 8,7         | 5              | 1,02           | 12,32          | 17        | -             | -        | 6,10           | 2,30     | 5,9             | 20          | 15                        | 35          | 17        |  |        |  |      |  |
| 63                       | 87         | 169         | 166            | 38              | 74               | 320         | 14,9        | 7              | 1,08           | 12,28          | 46        | g             | -        | 6,99           | 3,19     | 8,2             | 65          | 25                        | 90          | 15        |  |        |  |      |  |
| 64                       | 34         | 70          | 68             | 3               | 6                | 330         | 5,4         | 3              | 0,94           | 12,15          | 6         | -             | -        | 6,20           | 2,40     | 6,3             | 10          | 30                        | 30          | 17        |  |        |  |      |  |
| 65                       | 65         | 117         | 114            | 30              | 54               | 330         | 10,0        | 5              | 1,06           | 12,20          | 23        | -             | -        | 6,78           | 2,98     | 7,5             | 35          | 20                        | 55          | 13        |  |        |  |      |  |
| 66                       | 49         | 65          | 66             | 38              | 50               | 330         | 10,2        | 5              | 1,11           | 12,78          | 27        | g             | -        | 6,71           | 2,91     | 6,7             | 40          | 20                        | 60          | 7         |  |        |  |      |  |
| 67                       | 112        | 230         | 230            | 30              | 61               | 340         | 12,1        | 6              | 1,05           | 12,53          | 33        | g             | -        | 6,63           | 2,83     | 7,5             | 50          | 25                        | 75          | 17        |  |        |  |      |  |
| 68                       | 123        | 239         | 237            | 38              | 74               | 340         | 15,2        | 7              | 1,08           | 12,40          | 45        | g             | -        | 6,92           | 3,12     | 9,0             | 65          | 25                        | 90          | 15        |  |        |  |      |  |
| 69                       | 59         | 110         | 108            | 6               | 11               | 340         | 4,8         | 3              | 0,96           | 12,23          | 3         | -             | -        | 6,20           | 2,40     | 5,8             | 0           | 25                        | 25          | 14        |  |        |  |      |  |
| 70                       | 75         | 154         | 155            | 6               | 12               | 345         | 6,9         | 4              | 1,03           | 12,63          | 13        | -             | -        | 6,56           | 2,76     | 6,9             | 5           | 25                        | 30          | 17        |  |        |  |      |  |
| 71                       | 119        | 226         | 222            | 122             | 230              | 345         | 11,6        | 6              | 1,05           | 12,33          | 47        | g             | -        | 6,90           | 3,10     | 8,6             | 70          | 25                        | 95          | 15        |  |        |  |      |  |
| 72                       | 56         | 74          | 76             | 10              | 14               | 345         | 9,2         | 5              | 1,05           | 12,10          | 19        | -             | -        | 6,34           | 2,54     | 6,5             | 20          | 25                        | 45          | 8         |  |        |  |      |  |
| 73                       | 250        | 450         | 420            | 143             | 257              | 270         | 18,1        | 8              | 1,24           | 11,72          |           |               |          |                |          |                 |             |                           |             |           |  |        |  |      |  |

Tabelle 4  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

| Standort: Scharhörnbalje |                  |                       |                          |                       |                      |                         |              |                 |               |
|--------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|--------------|-----------------|---------------|
| Lfd. Nr.                 | Suspension       |                       |                          | Wind                  |                      |                         | Tide         |                 | Temperatur    |
|                          | $\bar{C}$<br>[-] | $\bar{C}_C$<br>[mg/l] | $\bar{C}_{CT}$<br>[mg/l] | $\bar{R}_T$<br>[Grad] | $\bar{V}_T$<br>[m/s] | $\bar{V}_{TB}$<br>[Bft] | $K_T$<br>[-] | $\tau_T$<br>[h] | $T_C$<br>[°C] |
| Sektor: 350°-70°         |                  |                       |                          |                       |                      |                         |              |                 |               |
| 1                        | 89               | 192                   | 166                      | 30                    | 8,6                  | 5                       | 0,96         | 12,03           | 15            |
| 2                        | 94               | 170                   | 168                      | 25                    | 9,0                  | 5                       | 0,99         | 12,33           | 14            |
| 3                        | 74               | 98                    | 98                       | 10                    | 9,4                  | 5                       | 1,09         | 12,52           | 7             |
| 4                        | 98               | 120                   | 119                      | 20                    | 11,3                 | 6                       | 1,02         | 12,37           | 6             |
| 5                        | 102              | 125                   | 121                      | 20                    | 11,4                 | 6                       | 0,96         | 12,10           | 6             |
| 6                        | 122              | 149                   | 147                      | 20                    | 12,6                 | 6                       | 0,98         | 12,32           | 6             |
| 7                        | 78               | 96                    | 94                       | 25                    | 10,6                 | 5                       | 0,95         | 12,28           | 6             |
| 8                        | 74               | 92                    | 91                       | 35                    | 8,9                  | 5                       | 0,96         | 12,33           | 6             |
| 9                        | 111              | 176                   | 173                      | 70                    | 12,5                 | 6                       | 0,91         | 12,27           | 10            |
| Sektor: 60°-120°         |                  |                       |                          |                       |                      |                         |              |                 |               |
| 1                        | 54               | 85                    | 83                       | 80                    | 10,0                 | 5                       | 0,92         | 12,15           | 10            |
| 2                        | 42               | 66                    | 66                       | 90                    | 10,6                 | 5                       | 0,94         | 12,40           | 10            |
| 3                        | 111              | 176                   | 173                      | 70                    | 12,5                 | 6                       | 0,91         | 12,27           | 10            |
| 4                        | 45               | 71                    | 70                       | 70                    | 13,7                 | 6                       | 0,91         | 12,28           | 10            |
| 5                        | 53               | 112                   | 111                      | 95                    | 9,7                  | 5                       | 0,94         | 12,33           | 18            |
| 6                        | 32               | 68                    | 67                       | 90                    | 11,2                 | 6                       | 0,92         | 12,22           | 18            |
| 7                        | 64               | 136                   | 135                      | 100                   | 12,6                 | 6                       | 0,93         | 12,37           | 18            |
| 8                        | 45               | 93                    | 92                       | 100                   | 11,5                 | 6                       | 0,96         | 12,38           | 17            |
| 9                        | 18               | 37                    | 37                       | 75                    | 8,4                  | 5                       | 0,98         | 12,50           | 17            |
| 10                       | 15               | 31                    | 31                       | 70                    | 4,2                  | 3                       | 0,99         | 12,60           | 17            |
| 11                       | 29               | 38                    | 36                       | 110                   | 6,9                  | 4                       | 0,93         | 11,78           | 7             |
| 12                       | 32               | 51                    | 50                       | 70                    | 4,9                  | 3                       | 0,93         | 12,33           | 10            |
| Sektor: 110°-220°        |                  |                       |                          |                       |                      |                         |              |                 |               |
| 1                        | 18               | 34                    | 35                       | 130                   | 9,5                  | 5                       | 0,97         | 12,73           | 14            |
| 2                        | 23               | 43                    | 42                       | 130                   | 11,6                 | 6                       | 0,87         | 12,18           | 14            |
| 3                        | 25               | 47                    | 48                       | 130                   | 12,4                 | 6                       | 0,92         | 12,68           | 14            |
| 4                        | 23               | 43                    | 43                       | 135                   | 12,0                 | 6                       | 0,88         | 12,45           | 14            |
| 5                        | 25               | 45                    | 45                       | 130                   | 10,5                 | 5                       | 0,96         | 12,53           | 13            |
| 6                        | 13               | 23                    | 23                       | 135                   | 10,7                 | 5                       | 0,93         | 12,37           | 13            |
| 7                        | 22               | 40                    | 40                       | 140                   | 9,2                  | 5                       | 0,95         | 12,42           | 13            |
| 8                        | 23               | 42                    | 41                       | 150                   | 8,8                  | 5                       | 0,92         | 12,23           | 13            |
| 9                        | 19               | 33                    | 33                       | 130                   | 5,1                  | 3                       | 0,99         | 12,53           | 12            |
| 10                       | 16               | 28                    | 28                       | 205                   | 6,7                  | 4                       | 1,01         | 12,45           | 12            |
| 11                       | 19               | 33                    | 33                       | 210                   | 6,1                  | 4                       | 1,03         | 12,50           | 12            |
| 12                       | 23               | 38                    | 38                       | 205                   | 8,2                  | 5                       | 0,99         | 12,50           | 11            |
| 13                       | 29               | 38                    | 36                       | 110                   | 6,9                  | 4                       | 0,93         | 11,78           | 7             |
| 14                       | 23               | 23                    | 23                       | 130                   | 11,6                 | 6                       | 0,91         | 12,50           | 4             |
| 15                       | 44               | 44                    | 44                       | 130                   | 12,5                 | 6                       | 0,85         | 12,40           | 4             |
| 16                       | 43               | 43                    | 41                       | 130                   | 13,1                 | 6                       | 0,82         | 11,95           | 4             |
| 17                       | 42               | 42                    | 43                       | 140                   | 14,8                 | 7                       | 0,88         | 12,87           | 4             |

## 8. Verzeichnis der Symbole

|                         | Dimension         |   |
|-------------------------|-------------------|---|
| a                       | m                 | Mit $C_a$ korrespondierende Wassertiefe   |
| a                       | -                 | Konstante   |
| b                       | -                 | Konstante nach DILLO (1960)   |
| b                       | -                 | Konstante   |
| C                       | mg/l              | Suspensionskonzentration (35 cm über Sohle)   |
| $C_a$                   | mg/l              | C in einer Wassertiefe $y = a$  |
| $C_C$                   | mg/l              | C bezogen auf 4 °C nach DILLO (1960)  |
| $C_{HW}$                | mg/l              | C um Hochwasser   |
| $C_{HWC}$               | mg/l              | $C_{HW}$ bezogen auf 4 °C Wassertemperatur nach DILLO (1960)  |
| $\bar{C}$               | mg/l              | Mittelwert der Suspensionskonzentration einer Tide (35 cm über Sohle)   |
| $\bar{C}_o$             | mg/l              | $\bar{C}$ bei Windstille  |
| $\bar{C}_C$             | mg/l              | $\bar{C}$ bezogen auf 4 °C nach DILLO (1960)  |
| $\bar{C}_{CT}$          | mg/l              | $\bar{C}_C$ bezogen auf mittlere Tidedauer (12,5 h)   |
| $\bar{C}_{CT}$          | mg/l              | Aus $\bar{C}_{CT}$ gebildeter, auf $\bar{u}$ bezogener Mittelwert der Suspensionskonzentration  |
| $\bar{C}_{CT*}$         | mg/l              | Aus $\bar{C}_{CT}$ gebildeter Mittelwert der Suspensionskonzentration bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten ( $\bar{V}_T = 11,5 \text{ m/s} = \bar{V}_*$ )                  |
| $\bar{C}_{\bar{V}_T}$   | mg/l              | Mittelwert der Suspensionskonzentration für ein Tideereignis mit mittlerer Windgeschwindigkeit $\bar{V}_T$ , bezogen auf 4 °C und mittlere Tideverhältnisse (12,5 h), 35 cm über Sohle            |
| $\bar{C}_{CT\bar{V}_T}$ |                   |   |
| $\bar{C}_{CH}$          | mg/l              | Auf 4 °C bezogener Mittelwert der Suspensionskonzentration zum Tidezeitpunkt, bezogen auf $\bar{H}$ um Hochwasser (35 cm über Sohle)  |
| $\bar{C}_{CH}$          | mg/l              | Aus $\bar{C}_{CH}$ für Tidephasen (vor, um und nach Thw) gebildeter Mittelwert der Suspensionskonzentration, bezogen auf $\bar{H}$ um Hochwasser  |
| $C_m$                   | mg/l              | Mittelwert der Suspensionskonzentration in der Vertikalen   |
| $C_w$                   | mg/l              | Von außerhalb des Untersuchungsgebietes herangeführte Suspensionskonzentration („wash-load“)  |
| $\bar{c}$               | cm/s              | Mittlere Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  |
| D                       | -                 | Relativer Anstiegswert der Suspensionskonzentration, bezogen auf $\bar{u}_*$ (einsetzende Brandung auf den Rand- und Brandungswatten: $D = 1,0$ )   |
| $D_H$                   | N                 | Wellenerzeugte Turbulenzkräfte  |
| d                       | m                 | Absolute Wassertiefe  |
| $d_p$                   | m PN              | Wassertiefe auf PN bezogen  |
| d                       | mm                | Korndurchmesser   |
| $d_{50}$                | mm                | Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang  |
| F                       | -                 | Relativer Anstiegswert der Suspensionskonzentration, bezogen auf $\bar{V}_T$ (einsetzende Brandung auf den Rand- und Brandungswatten bei $\bar{V}_T = \bar{V}_* = 11,5 \text{ m/s}$ , $F = 1,0$ ) |
| $F_{us+uH}$             | N                 | Strömungserzeugte Schubkräfte   |
| g                       | cm/s <sup>2</sup> | Erdbeschleunigung   |
| H                       | cm                | Wellenhöhe  |

|                      |                    |   |
|----------------------|--------------------|---|
| $H_{1/3}$            | cm                 | Kennzeichnende Wellenhöhe   |
| $\bar{H}$            | cm                 | Mittlere Wellenhöhe   |
| $\bar{H}_{gmin}$     | cm                 | Minimalwert $\bar{H}$ für grundberührenden Seegang  |
| $\bar{H}_{bmin}$     | cm                 | Minimalwert $\bar{H}$ für brechenden Seegang  |
| $K_T$                | -                  | Wert der Abweichung gegenüber einer Mittel tide<br>(Mittel tide: $K_T = 1,0$ )                                    |
| $K$                  | -                  | v. KARMAN-Konstante (0,4)   |
| $L$                  | m                  | Wellenlänge   |
| $\bar{R}_T$          | °                  | Mittlere Windrichtung während des Meßzeitraumes und im Zeitraum 3 Stunden davor                                   |
| $S_V$                | km                 | Ideeller Stromweg   |
| $S_{VT}$             | km/Tide            | Stromweg einer Tide, bezogen auf mittlere Tidedauer (12,5 h)  |
| $T$                  | s                  | Wellenperiode   |
| $T_C$                | °C                 | Wassertemperatur der Probe  |
| $t$                  | h                  | Tidezeitpunkt   |
| $t_E$                | h                  | Ebbdauer  |
| $t_F$                | h                  | Flutdauer   |
| $t_M$                | h                  | Dauer einer mittleren Tide von $T_{nw}$ bis $T_{nw}$  |
| $t_T$                | h                  | Tidedauer von $T_{nw}$ bis $T_{nw}$   |
| $u$                  | cm/s               | Strömungsgeschwindigkeit  |
| $u_H$                | cm/s               | Horizontale Orbitalgeschwindigkeit  |
| $u_S$                | cm/s               | $u$ aus Tide- und Triftströmung   |
| $\bar{u}_H$          | cm/s               | Max. Mittelwert $u_H$ für $\bar{H}$ um Hochwasser   |
| $\bar{u}_S$          | cm/s               | Mittelwert $u_S$ während einer Tide   |
| $\bar{u}$            | cm/s               | Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit aus Überlagerung von $\bar{u}_H$ und $\bar{u}_S$                          |
| $\bar{u}_e$          | cm/s               | Mittelwert der überlagerten Strömungsgeschwindigkeit bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten  |
| $u_c$                | cm/s               | Kritische Schergeschwindigkeit  |
| $\bar{V}_T$          | m/s                | { Mittelwert der Windgeschwindigkeit während des Meßzeitraumes<br>(Wasserführung) und im Zeitraum 3 Stunden davor |
| $\bar{V}_{TB}$       | Bft                |   |
| $v$                  | cm/s               | Vertikalgeschwindigkeit eines Sedimentkorns   |
| $v_{ss}$             | cm/s               | Absinkgeschwindigkeit eines Sedimentkorns   |
| $y$                  | m                  | Bezugswassertiefe   |
| $z$                  | -                  | Exponent der Suspensionsverteilung nach ROUSE (1937)  |
| $z$                  | m                  | Wassertiefe bei KERRSENS (1979)   |
| $\epsilon$           | cm <sup>2</sup> /s | Diffusionskoeffizient für Flüssigkeitsteilchen  |
| $\epsilon_s$         | cm <sup>2</sup> /s | Diffusionskoeffizient für suspendierte Feststoffteilchen  |
| $\epsilon_{Z2L/Z2E}$ | cm <sup>2</sup> /s | Sediment Diffusionskoeffizient  |
| $\chi_{1-3}$         | -                  | Diffusionsparameter   |
| $\gamma$             | g/cm <sup>3</sup>  | Spezifisches Gewicht  |

## 9. Schriftenverzeichnis

- ANTFANG, H.: Wind- und Nebelverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 9, 1969.
- BECHTLER, W.: Stochastische Modelle des Transportes suspendierter Feststoffe. Wasserwirtschaft, H. 5, 1980.

- BIJKER, E. W. u. VELLINGA, F.: Sand Transport by Waves and Currents. Proc. of 15th Conf. on Coast. Eng., Honolulu, 1976.
- BROWN, C. B.: Sediment Transportation. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1950.
- BÜSCHING, F.: Über Orbitalgeschwindigkeiten irregulärer Brandungswellen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 42, 1974.
- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarien am Beispiel der Elbemündung bei Neuwerk. Hamb. Küstenf., H. 28, 1974.
- COLEMANN, N. L.: Flume Studies of the Sediment Transfer Coefficient. Water Resources Research, vol. 6, no. 3, June 1970.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- DETTE, H. H.: Ein Vorschlag zur Analyse eines Wellenklimas. Die Küste, H. 31, 1977.
- DILLO, H. G.: Sandwanderungen in Tideflüssen. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 17, 1960.
- EINSTEIN, H. A. and CHIEN, N.: Second Approximation to the Solution of the Suspended-Load Theory. Univ. Calif. Inst. Eng. Res., no. 3, 1954.
- EINSTEIN, H. A. and CHIEN, N.: Effects of Heavy Sediment Concentration Near the Bed on Velocity and Sediment Distribution. Univ. Calif. Inst. Eng. Res., no. 8, 1955.
- ENGELUND, F. and HANSEN, E.: A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 1967.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Bedeutung des Lufteinschlags für die Energieumwandlung in Brandungszonen. Die Küste, H. 21, 1971.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1979.
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. MANZENRIEDER, H.: In-situ-Untersuchungen der Erosionsstabilität und der Durchlässigkeit von Wattböden. Ber. Nr. 506 des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1981.
- GÖHREN, H.: Ein neues Dauerstrommeßgerät für den Einsatz im Flachwasserbereich. Wasserwirtschaft, H. 8, 1964.
- GÖHREN, H.: Ein neues Schöpfergerät für Schwebstoffuntersuchungen im Watt. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- GÖHREN, H.: Beobachtungen über Schwebstoffkonzentrationen im Watt. Dt. Gewässerkundl. Mitt., Jg. 11, H. 1, 1967.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Strömungsverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- GÖHREN, H.: Entwicklung eines integrierenden Wellenmeßgerätes. Hamb. Küstenf., H. 13, 1970.
- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbemündungsgebietes. Hamb. Küstenf., H. 14, 1970.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegungen im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 19, 1971.
- GÖHREN, H. u. LAUCHT, H.: Entwicklung eines Gerätes zur Dauermessung suspendierter Feststoffe. Dt. Gewässerkundl. Mitt., H. 3, 1972.
- GÖHREN, H.: Hydrodynamische und küstenmorphologische Probleme bei der Planung des Tiefwasserhafens Neuwerk/Scharhorn. Jahrb. der HTG, Bd. 33, 1972/73.
- GÖHREN, H. u. LAUCHT, H.: Geräteentwicklung und Naturmessungen zur Erforschung des Materialtransportes im Wattenmeer. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1979.
- GRAF, W. H.: Hydraulics of Sediment Transport. Verl. Mc-Graw-Hill, New York, 1971.
- GRY, H.: Das Wattenmeer bei Skallingen. No. 1: Quantitative Untersuchungen über den Sinkstofftransport durch Gezeitenströmungen. Folia Geographica Danica. Tom II, Kopenhagen, 1942.
- HALLIWELL, A. R. u. O'CONNOR, B. A.: Suspended Sediment in a Tidal Estuary. 10th Conf. on Coast. Eng., Tokyo, Proc., Vol. 1, 1966.
- HOM-MA, M., HORIKAWA, K. u. KOMORI, S.: Response Characteristics of an Under-Water Wave Gauge. 10th Conf. on Coast. Eng., Tokyo, Proc., Vol. 1, 1976.

- HORIKAWA, K.: Present State of Coastal Sediment Studies. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 56, 1977.
- HUNDT, C., KÖNIG, D. u. REINECK, H.-E.: Die voraussichtlichen sedimentologischen Veränderungen im Neuwerker Watt infolge der geplanten Dammbauten für das Hafenprojekt Scharhörn. Die Küste, H. 30, 1977.
- HYDROWERKSTÄTTEN GmbH, Kiel: Baubeschreibung und Bedienungsanweisung des Schwebstoffmeßgerätes Nr. 419/A. Unterlagen Strom- und Hafengebäude, Hamburg, 1974.
- HYULSTRÖM, F.: Studies of the Morphological Activity of Rivers as illustrated by the River Fyris. Bull. of the Geol. Institution of the Univ. of Upsala, 1935.
- INTERAGENCY COMMITTEE: Some Fundamentals of Particle Size Analysis. A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams. Rep. No. 12, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, 1957.
- JACKSON, W. H.: An Investigation into Silt in Suspension in the River Humber. The Dock and Harbour Authority, 1964.
- JAKUSCHOFF, P.: Schwebstoffbewegung in Flüssen in Theorie und Praxis. Wasserwirtschaft, Jg. 25, 1932.
- KERSENS, P. J. M., PRINS, A. u. RIJN, L. C. VAN: Model of Suspended Sediment Transport. Waterloopkundig Lab. Pub., No. 221, 1979.
- KÜHL, H.: Wassertemperatur, Salzgehalt u. a. chemische Faktoren an der Alten Liebe in Cuxhaven im Jahr 1972. Veröffentl. des Inst. für Küsten- und Binnenfischerei, 1973.
- LANE, E. W., CARLSON, E. J. u. MANSON, O. S.: Low Temperature increases sediment Transportation in Colorado River. Civil Eng., Sept. 1949.
- LAUCHT, H.: Neuwerk/Scharhörn, Industriehafen am tiefen Wasser. Schriftenr. der Behörde für Wirtschaft, Verkehr u. Landwirtschaft der Freien u. Hansestadt Hamburg, 1970.
- LAUCHT, H.: Entwicklung eines automatischen Schwebstoffmeßgerätes für den Brandungsbeereich. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1971.
- LEIGHLY, J. B.: Toward a Theory of the Morphology Significance of Turbulence in the Flow of Water in Streams. Univ. Calif., Pub. Geogr., Vol. 6, No. 1, 1932.
- LINKE, G.: Über die geologischen Verhältnisse im Gebiet Neuwerk/Scharhörn. Hamb. Küstenf., H. 17, 1970.
- LUCHT, F.: Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone der Elbe. Dt. Hydrogr. Zeitung, Bd. 6, 1953.
- LUCHT, F.: Hydrographie des Elbe-Ästuas. Arch. für Hydrobiologie, Supl. Bd. XXIX, 1964.
- MADSON, O. S. u. GRANT, W. D.: Sediment Transport in the Coastal Environment. Parsons Lab. Wat. Res. and Hydrodyn. MIT., Cambridge/Mass., Rep. No. 209, 1976.
- McNOWN, J. S. and LIN, P. N.: Sediment Concentration and Fall Velocity. Proc. 2nd Midwestern Conf. on Fluid Mech., Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 1952.
- NELSON, M. E. u. BENEDICT, P. C.: Measurement and Analysis of Suspended Sediment Loads in Streams. Proc. A.S.C.E., Vol. 76, 1931.
- NIEBUHR, W.: Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems. Die Küste, Jg. 4, 1955.
- O'CONNOR, B. A.: Mathematical Model of Sediment Distribution. Proc. 14th Congr. of the IAHR, Vol. 4, 1971.
- PLATH, M.: Ein im Gezeitenbereich des Wattenmeeres selbsttätig arbeitendes Sinkstoff-Schöpfgerät und die Bedeutung der Wattfauna für die Bildung von Sinkstoffen. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- POSTMA, H.: Transport and Accumulation of Suspended Matter in the Dutch Wadden Sea. Netherlands Journ. of Sea Res., Vol. 1, 1961.
- RAUDKIVI, A. J.: Loose Boundry Hydraulics. Verl. Pergamon Press, 2. Aufl., London, 1976.
- RAUDKIVI, A. J.: On Sediment Transport in Coastal Region. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 56, 1977.
- REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Watt. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- ROUSE, H.: Modern Conception of the Mechanics of Fluid Turbulence. Trans. A.S.C.E., Vol. 102, 1937.
- ROY, S. C.: Hydraulische Untersuchungen im Hooghly-Ästuar. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 32, 1969.
- SCHMIDT, W.: Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Probl. der Kosmischen Physik, Bd. 7, 1925.

- SCHRADER, J. P.: Kennzeichnende Seegangsrößen für drei Meßpunkte in der Elbemündung. Hamb. Küstenf., H. 8, 1968.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- SIEFERT, W.: Seegangsbestimmungen mit Radar und nach Luftbildern. Hamb. Küstenf., H. 7, 1969.
- SIEFERT, W.: Salzgehaltsverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 15, 1970.
- SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 18, 1971.
- SIEFERT, W.: Windmessungen auf Scharhörn 1966-1970. Hamb. Küstenf., H. 24, 1972.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1973.
- SIEFERT, W.: Über die Seegangsintensität im Bereich der geplanten Dämme zwischen der Küste und Neuwerk (unveröff.). Forsch.- u. Vorarb.-St. Neuwerk, Planungsstudie Nr. 27, 1974.
- SIEFERT, W.: Anwendungsanleitung Sturmflutvorhersage für Hamburg. Unterlagen Strom- und Hafenaufbau, Hamburg, 1979.
- SÜNDERMANN, J.: Mathematische Modellierung des Sedimenttransportes. Vortragsveranstaltung des KFKI, SFB 79, 1978.
- VANONI, V. A. et al.: Resistance Properties of Sediment - Loaden Streams. Trans. A.S.C.E., Vol. 125/I, 1960.
- VANONI, V. A.: Sedimentation Engineering. A.S.C.E.-Manuals and Rep. of Eng., Pract.-No. 54, 1977.
- VICK, F.: Über die Erfassung des Sinkstofftransports in Tideflüssen. Wasserwirtschaft, Jg. 43, 1952.
- VOLLBRECHT, K. u. WÜNSCHE, B.: Dynamik der Sandbewegung vor Sylt - Suspensionstransport in der Brandungszone. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1979.
- WIEGEL, R. L.: Oceanographical Engineering. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964.
- WOHLENBERG, E.: Der horizontale Wasserschöpfer. Dt. Hydrogr. Zt. III, H. 5/6, 1950.
- WOHLENBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste, Jg. 2, H. 2, 1953.
- WÜNSCHE, B.: Suspensionstransport in der Brandungszone. VDI-Zt., R. 4, Nr. 26, 1976.
- ZANKE, U.: Neuer Ansatz zur Berechnung des Transportbeginns von Sedimenten unter Strömungseinfluß. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 46, 1977.
- ZENKOVICH, V. P.: Processes of Coastal Development. Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1967.