

Transportmechanismus in Tideriffeln

Von Horst Nasner

Summary

Prototype investigations with luminaries in a tidal dune reach of the lower Weser River have shown that the sand transport is effected essentially by local redistribution of the bed material. The resultant sand transport in ebb current direction corresponds to the migration velocity of the tidal dunes. It emerges from the result, that the regeneration of the sand waves after dredging and the minimum depths resulting therefrom, are likewise caused by short distance transport. Separate investigations, on the regeneration of tidal dunes after dredging, have shown that the troughs are very stable and that the sedimentation takes place mainly in the crest area. As undesirable water depths are also repeatedly encountered in sand wave reaches of several kilometers length and the sand transport proceeds only very slowly, the bed material required for the growth of the banks must enter the navigation channel in transverse transport from the embankments and shores. If the continued feeding of bed material from the sides by shore and bank revetments could be prevented, it should then be possible to lengthen the regeneration time of the tidal dunes considerably.

Inhalt

1. Vorbemerkung	90
2. Einleitung	91
3. Durchführung der Untersuchungen	91
3.1 Der Untersuchungsbereich	91
3.2 Das Meßprogramm	91
4. Untersuchungsergebnisse	94
4.1 Tide- und Oberwasserverhältnisse	94
4.2 Kernentnahmen	95
4.2.1 Luminophoren	95
4.2.2 Das Sohlenmaterial	98
5. Schlußbemerkungen	99
6. Schriftenverzeichnis	100

1. Vorbemerkung

Vom September bis zum November 1974 wurden in der Unterweser gemeinsam vom Wasser- und Schiffsamt Brake, der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Fachgruppe Geologie, Kiel, und dem Franzius-Institut Luminophorenmessungen durchgeführt, mit dem Ziel, Aussagen über den Sandtransport in einem Riffelfeld und vertiefte Kenntnisse über die Ursachen der Regeneration dieser Großformen nach Baggerungen zu erhalten. Über die Ergebnisse der Untersuchungen ist vom Verfasser auf der 15th International Conference on Coastal Engineering 1976 in Honolulu, USA, berichtet worden. Im folgenden Beitrag sind wesentliche Teile des Vortrags mit einigen Ergänzungen zusammengefaßt.

2. Einleitung

Im Rahmen des weiteren Ausbaus der Elbe und Weser interessiert die Frage, ob sich nach den Fahrwasservertiefungen Riffel bilden werden und damit der Erfolg der Ausbaumaßnahmen teilweise oder ganz zunichte gemacht werden kann. Um die Entstehung und Regeneration dieser Großformen nach Baggerungen besser beurteilen zu können, ist eine vertiefte Kenntnis der Sandbewegung in einem Riffelfeld erforderlich. Eine Möglichkeit, den Sohlenlängstransport in einem Tidefluß mit ausgeprägten Tideriffeln in der Natur zu untersuchen, ist durch Messungen mit Leitstoffen gegeben. Die Untersuchungen in der Natur haben den Vorteil, daß alle laboratoriumsbedingten Maßstabeffekte ausgeschaltet werden. Die schwierigere meßtechnische Erfassung und der große Aufwand müssen durch gezielt geplante Untersuchungsprogramme gelöst werden. Die von der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Fachgruppe Geologie, Kiel, bei früheren Einsätzen mit Luminophoren gewonnenen Erfahrungen (RUCK, 1967 und 1972) waren bei den im folgenden beschriebenen Einsätzen in der Weser von großem Wert.

3. Durchführung der Untersuchungen

3.1 Der Untersuchungsbereich

Für die Luminophorenmessungen wurde die Riffelstrecke in dem geraden Stromabschnitt der Unterweser zwischen km 27,5 und km 28,0 festgelegt (Abb. 1). Wie frühere Untersuchungen gezeigt haben, sind die Großformen in diesem Bereich annähernd zweidimensional. Ihre Käme und Täler verlaufen in der Schifffahrtsrinne etwa senkrecht zur Strömungsrichtung (NASNER, 1974). Das Längsprofil war durch die Feuerlinie vorgegeben. Um bei den für die Wasserstraßensicherung erforderlichen Längspeilungen die Ortsbestimmung vornehmen zu können, sind vom Wasser- und Schifffahrtsamt Brake an beiden Ufern der Weser im Abstand von etwa 500 m Doppelmarken errichtet worden. Das Profil der Wesersohle in Fahrwassermitteln im Untersuchungsbereich ist in Abb. 2 nach verschiedenen Peilungen des Jahres 1974 dargestellt. Um bei den Messungen das Auffinden der Riffel zu erleichtern, wurde die Lage von fünf Riffelkämmen und sechs Riffeltälern zusätzlich durch Doppelmarken am rechten Weserufer am 29. 8. 1974 festgelegt. Da sich die Großformen im Tidestromrhythmus nur geringfügig ändern und langfristig sehr langsam in Ebbestromrichtung in Abhängigkeit vom Oberwasser Q_0 der Weser fortbewegen – je größer Q_0 , um so größer ist die Wandergeschwindigkeit u –, waren die zusätzlichen Festpunkte eine wertvolle Hilfe bei den durchzuführenden Sondierungen.

3.2 Das Meßprogramm

Am 29. 8. 1974 wurde etwa 1 m^3 Sand im Kammerbereich des Riffels c (Abb. 2) entnommen und anschließend in Kiel für die Untersuchungen vorbereitet. Eine Kornverteilungskurve des angefärbten Sandes ist in Abb. 3 dargestellt. Es handelt sich um einen sehr gleichförmigen Sand ($d_{50} = 0,65 \text{ mm}$, $d_{90}/d_{10} = 2,44$). Das Versuchsmaterial wurde mit zwei verschiedenen Farben (gelb und orange) gekennzeichnet und in Säcken aus wasserlöslichem Material verpackt.

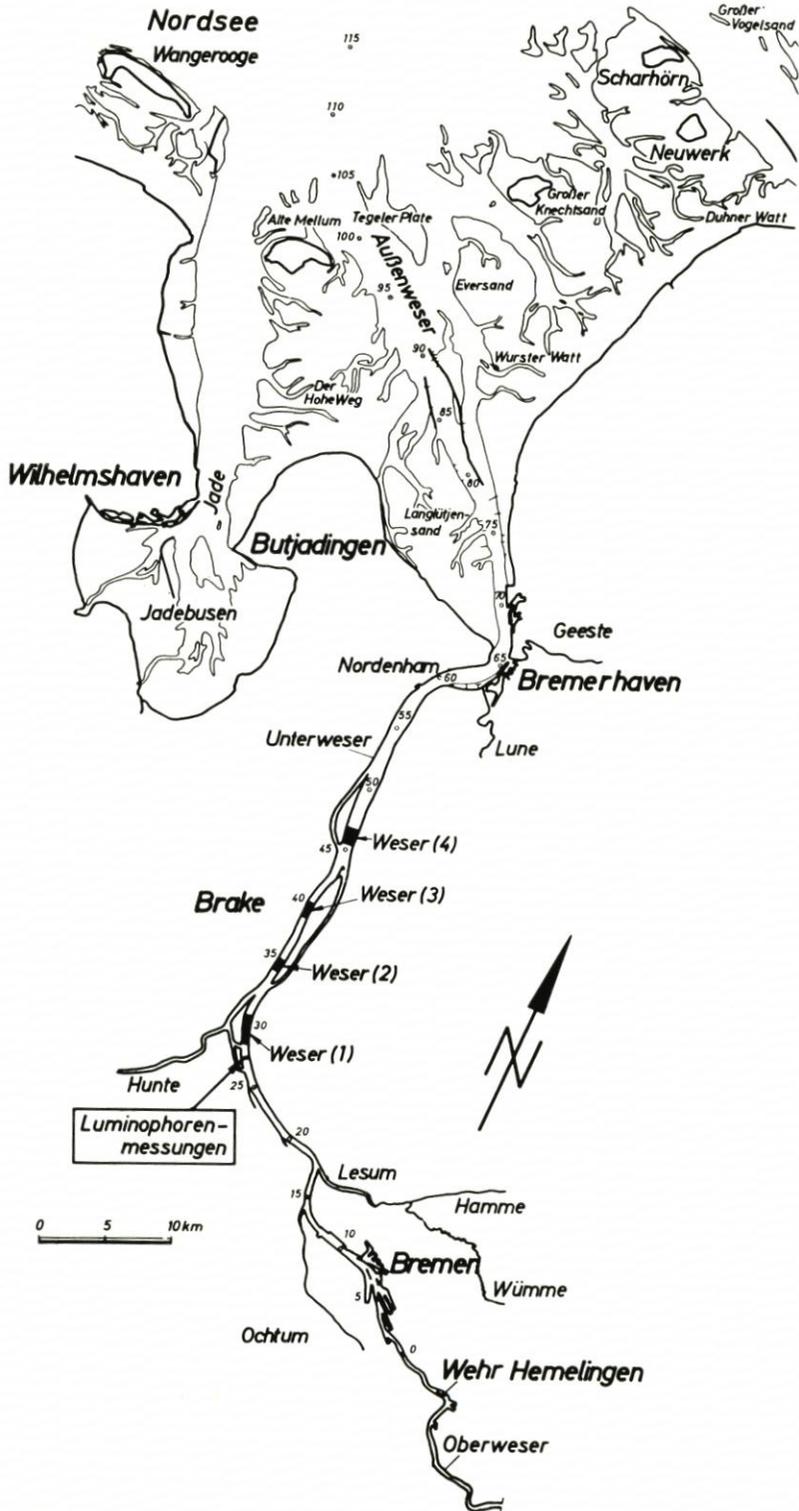


Abb. 1. Lageplan

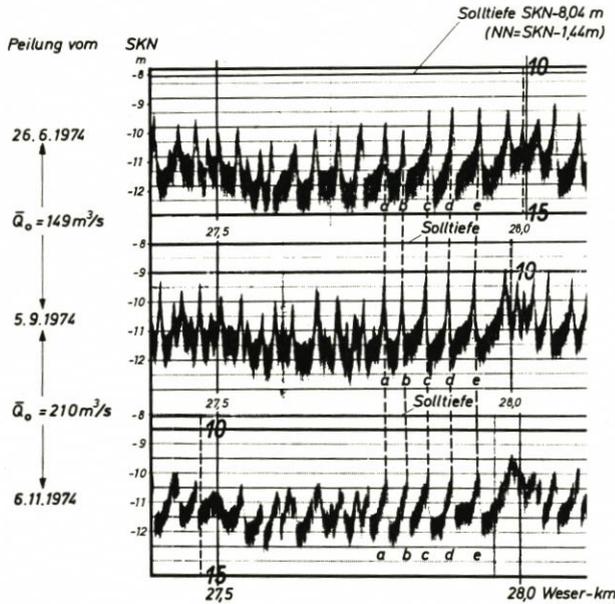


Abb. 2. Echoschriebe von der Wesersohle

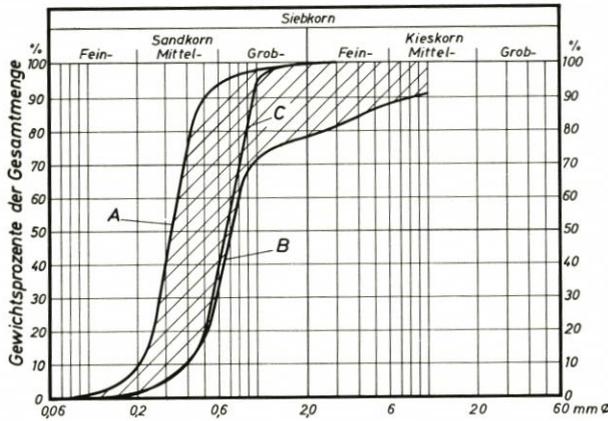


Abb. 3. Kornverteilungskurven

Alle im folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden um die Zeit der Ebbestromkenterung durchgeführt.

Am 18. 9. 1974 wurde der angefärbte Sand auf einem verankerten Schiff in einen Greifer gelegt und rasch in Fahrwassermittte auf die Luvhänge der Riffel b (orange) und etwa 40 m unterhalb bei c (gelb) in den Kammereichen abgesetzt (Abb. 4).

Durch die Verpackung war gewährleistet, daß kein Material vor Erreichen der Flußsohle in Suspension geriet. An den folgenden Tagen, am 19. 9. und 20. 9. 1974, d. h. zwei bzw. vier Tiden später, wurden die ersten 9 Kerne (KE) mit einer SENKOWITSCH-Sonde von einem festverankerten Schiff aus entnommen. Der Kerndurchmesser betrug 7 cm.

Um die Sohle im Bereich der Einbringstellen (bei b und c) durch die Sondierungen möglichst wenig zu stören, wurden die Kerne an den Riffeln d und e entnommen (Abb. 4).

Der Riffelkamm d war etwa 40 m von dem Ort, wo das gelb angefärbte Material eingebracht worden war, und rd. 90 m vom Riffelkamm b (orange) entfernt. Der Kamm des Riffels e lag weitere 50 Meter unterhalb von d.

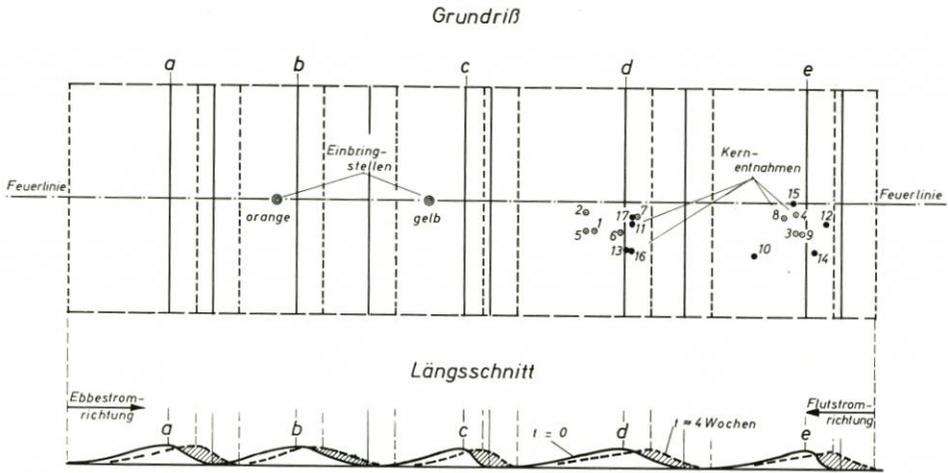


Abb. 4. Einbringstellen der gefärbten Sande und Lage der Kernentnahmen

Die Sondierungen bei d und e wurden am 19. und 20. 9. 1974 bis zu 8 m außerhalb der Feuerlinie durchgeführt, um den Schiffverkehr möglichst wenig zu stören. Am 22./23. 10. 1974 sind weitere 8 Kerne an den Riffeln e und d bis zu etwa 15 m östlich der Feuerlinie entnommen worden. Das Kernmaterial wurde nach Kiel transportiert und dort abschnittsweise (5 cm und 10 cm) auf Kornzusammensetzung und vorhandene Lumino-phoren untersucht.

Am 4. 11. 1974 wurden in einem weiteren Einsatz mit einem Bodengreifer im engen Untersuchungsbereich, oberhalb bis Weser-km 25,5 und unterhalb bis Weser-km 30,0, Proben in der Feuerlinie von der Oberfläche der Wesersohle entnommen. Anschließend wurde festgestellt, ob und wieviel Lumino-phoren in den Bodenproben vorhanden waren.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1 Tide- und Oberwasserverhältnisse

In der Zeit vom 29. 8. (Entnahme des Versuchsmaterials) bis zum 4. 11. 1974 (Bodenprobenentnahme von der Wesersohle) traten keine außergewöhnlichen Tiden auf. Das mittlere Oberwasser \bar{Q}_0 zwischen den Messungen ist im folgenden zusammengestellt:

29. 8. 1974	Entnahme des Versuchsmaterials
18. 9. 1974	Beginn der Untersuchungen
19./20. 9. 1974	Kernentnahmen (KE 1 bis KE 9)
	29. 8. bis 18. 9. 1974: $\bar{Q}_0 = 131 \text{ m}^3/\text{s}$
22./23. 10. 1974	Kernentnahmen (KE 10 bis KE 17)
	19. 9. bis 21. 10. 1974: $\bar{Q}_0 = 144 \text{ m}^3/\text{s}$
4. 11. 1974	Entnahme von Bodenproben
	22. 10. bis 3. 11. 1974: $\bar{Q}_0 = 429 \text{ m}^3/\text{s}$

Nach früheren Untersuchungen bewegen sich die Riffel bei einem so geringen Oberwasser, wie es bis Ende Oktober der Fall war, nur sehr langsam (bis zu etwa 20 cm/Tag) in Ebbestromrichtung fort (NASNER, 1974). Für $\bar{Q}_0 = 429 \text{ m}^3/\text{s}$ vom 22. 10. bis zum 3. 11. 1974 ist die mittlere Fortschrittsgeschwindigkeit der Großformen in dem Untersuchungsbereich etwa 50 bis 70 cm/Tag.

Zwischen dem 29. 8. und dem 4. 11. 1974 wurde im Testfeld nicht gebaggert.

4.2 Kernentnahmen

4.2.1 Luminophoren

In den bis zu rd. zwei Meter langen Kernen (KE 1 bis KE 9, Abb. 4) vom 19. und 20. 9. 1974 wurden insgesamt 63 Luminophoren gefunden, davon waren 36 (57 %) gelb und 27 (43 %) orange. Dieses Ergebnis überrascht nicht, da die Einbringstelle des gelben Materials um eine Riffellänge näher an den Entnahmestellen lag. Nach den Auswertungen der Proben vom 19. und 20. 9. 1974 wurden am Riffel d bis zu einer Tiefe von 0,30 m und 50 m unterhalb am Riffel e bis zu einer Tiefe von 0,10 m Luminophoren vorgefunden.

Peilungen der Wesersohle am 25. 9. 1972 über eine volle Flutstromzeit und bei einem Springtidehub von 405 cm am Pegel Elsfluth haben für den Weserbereich von km 28,4 bis km 30,9 eine Verschiebung der Riffelkämme um durchschnittlich 2,0 m in Flutstromrichtung ergeben. Die durchschnittliche Riffelhöhe war zur Zeit der Flutstromkenterung K_f im Mittel um 11 cm größer als bei K_e (NASNER, 1974). Im Gegensatz zum Laborversuch (DILLO, 1960) bleibt die Geometrie der Großformen in der Natur bei den wechselnden Tidedeströmungen weitgehend erhalten (VOLLMERS u. WOLF, 1969). Die Erhöhung der Riffel in der Weser ergibt sich dadurch, daß durch die Flutströmung der steilere Leehang abgeflacht und das erodierte Material auf dem Luvhang abgelagert wird. Durch die örtliche Umlagerung der Riffel während der Tidebewegung ist erklärt, weshalb ein und zwei Tage nach Einbringen der Luminophoren die Leitstoffe in den Bohrkernen bis zu 0,3 m unter der Riffeloberfläche gefunden worden sind.

Über die langfristige resultierende Umlagerung des Geschiebes in Ebbestromrichtung sollten die Kernentnahmen vom 22. und 23. 10. 1974 Aufschluß geben. In den acht Bohrkernen (KE 10 bis KE 17, Abb. 4) wurden insgesamt 138 Luminophoren gefunden, davon waren 80 (58 %) gelb und 58 (42 %) orange. Die Anzahl der gefundenen Luminophoren in den Proben von nur 7 cm Durchmesser ist von untergeordneter Bedeutung gegenüber der Tatsache, daß in sechs von acht Bohrkernen das Untersuchungsmaterial in größerer Bohrtiefe vorgefunden wurde. Im Kern KE 12 waren bis zu 1,80 m unter der Riffeloberfläche Luminophoren. Das kann nur damit erklärt werden, daß sich der gefärbte Sand bei der resultierenden Wanderung der Riffel in Ebbestromrichtung auf der Leeseite abgelagert hat. Zu einem ähnlichen Ergebnis führten theoretische Überlegungen für richtungskonstante Strömung (EXNER, 1925, 1931; FÜHRBÖTER, 1967), nach denen sich der Sandtransport in einem Riffelfeld durch Erosion der Luvhänge und Alluvion an den Leeseiten im Nahtransport vollzieht. In Abb. 5 ist die Verteilung der in 10-cm-Abständen gefundenen Luminophoren der Kernentnahme KE 12 vom Kamm des Riffels e aufgetragen. Die Luminophoren verteilen sich über die gesamte Kernlänge, wie es auch bei anderen Proben der Fall war. Die Anzahl der Luminophoren in den 10 cm langen Zylinderstücken schwankt zwischen 2 und 8. Wegen der geringen Menge können Schlüsse nur mit Vor-

behalt und ohne Anspruch auf Allgemeingültigkeit gezogen werden. So ist zum Beispiel denkbar, daß die abschnittsweise wechselnde Menge an Luminophoren auf unterschiedliche Tide- und Strömungsverhältnisse in der Zeit vom 18. 9. 1974 (Einbringen des Materials) bis zum 22. 10. 1974 (Entnahme KE 12) zurückzuführen ist. Eine verstärkte Ebbeströmung an einigen Tagen könnte zu einer größeren Alluvion im Leebereich des

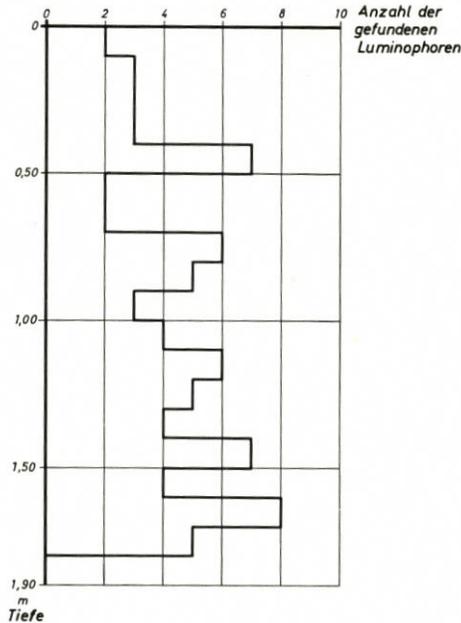


Abb. 5. Verteilung der im Entnahmekern 12 gefundenen Luminophoren

Riffels und damit zu einer höheren Konzentration an Luminophoren in bestimmten Entnahmetiefen geführt haben. Das Vorhandensein der Leitstoffe von der Oberfläche bis zu 1,80 m Bohrtiefe kann damit erklärt werden, daß das Material, welches sich während der Ebbe im Leebereich ablagert, in der folgenden Flutphase zum Teil wieder nach Oberstrom transportiert wird.

Durch die Luminophoren in größerer Tiefe unter der Riffoberfläche ist nachgewiesen, daß sich der Sohlenlängstransport bei Tideriffeln im wesentlichen durch örtliche Umlagerung des Geschiebes vollzieht.

Wie sich die Luminophoren etwa sechs Wochen nach Versuchsbeginn an der Oberfläche im Untersuchungsbereich ausgebreitet hatten, wurde durch die Entnahme von Bodenproben in Fahrwassermitteln zwischen Weser-km 25,5 und Weser-km 30,0 alle 250 m und in den Kamm- und Talbereichen der Riffel a bis e oberhalb von km 28,0 ermittelt. Stromauf von km 27,5 und stromab von km 28,0 wurden keine Luminophoren festgestellt. Die im engeren Untersuchungsbereich gefundenen Leitstoffe sind in Abb. 6 aufgetragen. Bis auf die Probe im Profil 9 mit einem Gesamtgewicht von etwa 220 g hatten alle anderen Bodenproben ein Gesamtgewicht von etwa 1000 g und waren somit in sich gut vergleichbar.

Das in Abb. 6 aufgetragene Ergebnis zeigt eindeutig, daß das Untersuchungsmaterial auch sechs Wochen nach Beginn des Naturversuchs nur geringfügig in Ebbestromrichtung transportiert worden ist.

Im Vergleich zum resultierenden Strömungsweg in der Teststrecke ist der ebbestromorientierte Sandtransport in dem Riffelfeld um Zehnerpotenzen kleiner, wie die folgende Überlegung zeigt. Nach einer Rechnung der Wasser- und Schiffsfahrtsdirektion Bremen (1972) mit mittlerer Tide wurden für verschiedene Stromstrecken querschnittsbezogene Flut- und Ebbewege „s_f“ und „s_e“ in der Schiffahrtsrinne ermittelt (NASNER, 1974). Die

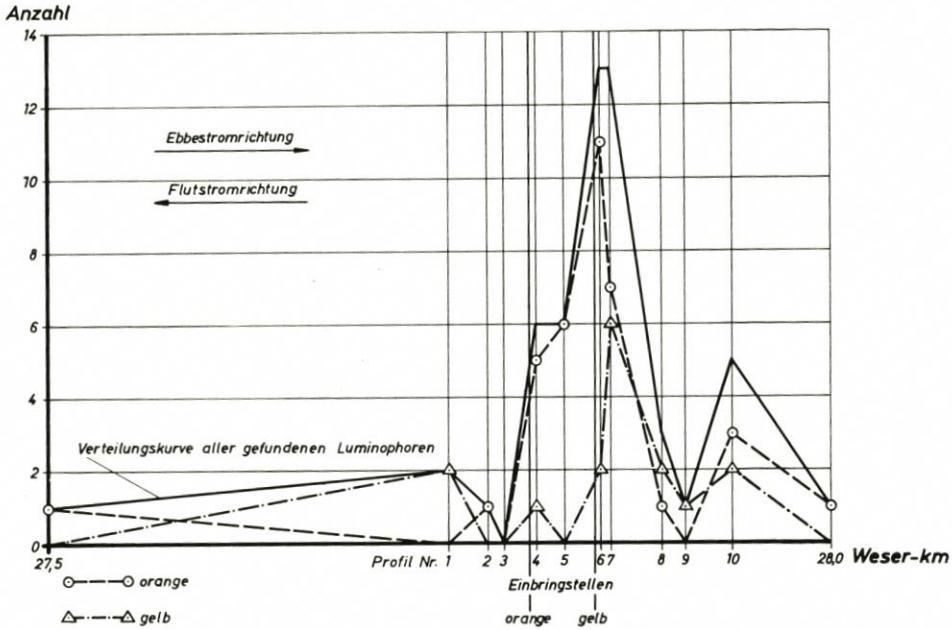


Abb. 6. Anzahl der zwischen Weser-km 27,5 und 28,0 gefundenen Luminophoren

mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (v_{fm} ; v_{em}) im Durchflußquerschnitt ergeben sich aus dem Integral der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den Kenterpunkten K, dividiert durch die Strömungsdauer D_f (D_e).

$$v_{fm} = \frac{\int_{K_e}^{K_f} v_f(t) dt}{D_f} ; \quad v_{em} = \frac{\int_{K_f}^{K_e} v_e(t) dt}{D_e}$$

Die querschnittsbezogenen Flut- und Ebbewege werden mit:

$$"s_f" = \int_{K_e}^{K_f} v_f(t) dt ; \quad "s_e" = \int_{K_f}^{K_e} v_e(t) dt$$

bestimmt.

Der Reststrom ergibt sich aus $s_r = "s_e" - "s_f"$. Für die Flußstrecke unterhalb des hier interessierenden Untersuchungsbereichs ergeben sich folgende Werte für s_r :

Weser	Q_0 m ³ /s	s_r km/Tide
km 28,4 bis 30,9	100	3,9
Weser 1 (s. Abb. 1.)	282	7,1
	600	12,3

Schon bei einem Oberwasser von nur 100 m³/s beträgt der Reststrom rd. 4 km/Tide in Ebbestromrichtung. Vom Beginn der Untersuchungen (18. 9. 1974) bis zum Tag der Bodenprobenentnahmen (4. 11. 1974) war das Oberwasser im Mittel $Q_0 = 224$ m³/s. Der geringe Wanderweg des Sohlenmaterials an der Oberfläche zeigt, wie stabil die mit Riffeln bedeckte Flußsohle ist. Die Untersuchungen mit Luminophoren haben insgesamt ergeben, daß sich das Sohlenmaterial in einem Riffelfeld etwa mit der resultierenden Fortschrittsgeschwindigkeit der Großformen durch örtliche Umlagerung fortbewegt.

4.2.2 Das Sohlenmaterial

Die von der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Fachgruppe Geologie in Kiel abschnittsweise durchgeführten Siebanalysen der Bohrkerne haben ergeben, daß das Sohlenmaterial im Innern der Riffel nicht einheitlich ist. In Abb. 3 sind die Einhüllenden der Kornverteilungskurven der Analysen des Bohrkerns KE 12 aufgetragen. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Feststellung, daß alle früher ermittelten Kornverteilungen von Riffelstrecken in der Weser und Elbe (NASNER, 1974) zwischen den Einhüllenden A und B liegen. Das Sohlenmaterial, aus dem sich in unseren Tideflüssen ausgeprägte Riffel bilden, ist danach durch die Kurven A und B weitgehend eingegrenzt. Zum Vergleich wurde in Abb. 3 die Kornverteilungskurve des angefärbten Sandes zusätzlich eingetragen (Kurve C). In der Tendenz sind die Kornverteilungskurven der anderen Kernentnahmen ähnlich der in Abb. 3 angegebenen.

Die Auswertung des Sohlenmaterials in den Bohrkernen ergab mit zunehmender Bohrtiefe eine Abnahme der feineren Bestandteile gegenüber dem gröberen Material, wie auch das Beispiel der Kernentnahme KE 12 zeigt (Abb. 7). Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen an Strombänken und Riffeln, nach denen in den Talbereichen gröberes Material ansteht (HENSEN, 1943; VOLLMERS und WOLF, 1969; NASNER, 1974).

Die unstetige Verteilung im Bohrkern zeigt, wie der Transport von feinerem und größerem Sohlenmaterial in Abhängigkeit von der Zeit über den Luvhang eines Riffels zum benachbarten Leehang vor sich geht, wodurch die aus Abb. 7 erkennbare Schichtung entsteht. Dieser zeitabhängige Transport unterschiedlichen Sohlenmaterials wird ebenfalls der Grund dafür sein, daß die Anzahl der gefundenen Luminophoren in den Bohrkernabschnitten schwankt. Um darüber weitere Erkenntnisse zu erhalten, müßten bei künftigen Messungen auch die Korndurchmesser der Luminophoren bestimmt werden. Darüber hinaus wäre es interessant, den Sohlenlängstransport bei verändertem Oberwasser mit feinerem und größerem Versuchsmaterial zu bestimmen, um zu allgemeingültigen Ergebnissen zu gelangen.

Es sei an dieser Stelle noch vermerkt, daß Modellversuche im Franzius-Institut mit einem vom Riffel c entnommenen Sohlenmaterial trotz der veränderten geometrischen und hydraulischen Bedingungen im Labor bei stationärer Strömung die wechselnde Schich-

tung von größerem und feinerem Geschiebe im Inneren der Riffel bestätigt haben (ZANKE, 1976).

Bei den Kernentnahmen an den Riffeln d und e hat sich herausgestellt, daß ab Bohrtiefen, die der Höhenkote der Täler entsprechen, eine feste Kleischicht ansteht. Demnach wandern die Sandbänke in den hier betrachteten Bereich über einen nicht erodierbaren Boden hinweg, aus dem sich keine Riffel bilden. Dieses Ergebnis zeigt, von welcher Wichtigkeit gezielt angesetzte Sondierungen vor der Vertiefung einer Flußsohle sind. Nur

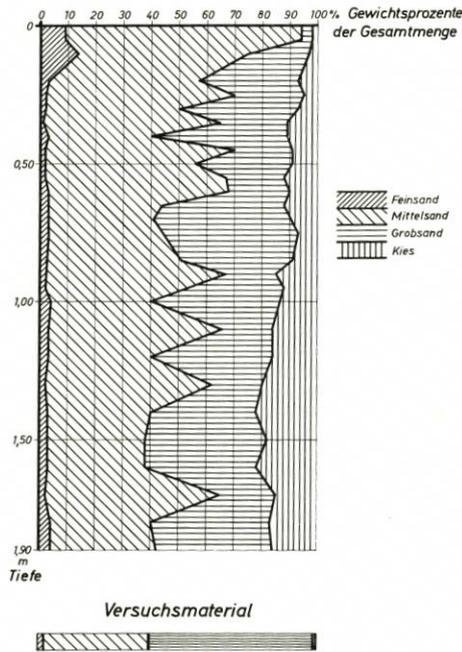


Abb. 7. Sohlenmaterial in der Kernentnahme 12

wenn bekannt ist, welches Sohlenmaterial bei einer Vertiefungsbaggerung freigelegt wird, kann gesagt werden, ob nach dem Ausbau mit einer Riffelbildung zu rechnen ist. Wenn zum Beispiel im Talniveau einer Riffelstrecke eine Kleischicht ansteht und bei einer Vertiefung ein Planum durch Abtrag der Riffel geschaffen wird, könnten sich nach der Ausbaumaßnahme nur Riffel bilden, wenn sandiges Material von außen in die vertiefte Stromstrecke gelangen kann.

5. Schlußbemerkungen

Die Untersuchungen mit Luminophoren in einer Riffelstrecke der Unterweser haben in guter Übereinstimmung mit theoretischen Überlegungen (EXNER, 1925, 1931; FÜHRBÖTER, 1967) gezeigt, daß sich der Sohlenlängstransport im wesentlichen durch örtliche Umlagerung des Geschiebes vollzieht. Der resultierende Sandtransport in Ebbestromrichtung entspricht etwa der Wandergeschwindigkeit der Tideriffel. Aus dem Ergebnis folgt, daß die Regeneration der Sandbänke nach Baggerungen und die sich dadurch er-

gebenden Mindertiefen ebenfalls durch Nahtransport verursacht werden. Da auch in Riffelstrecken von mehreren Kilometern Länge immer wieder unerwünschte Wassertiefen entstehen, muß das zum Wachstum der Riffel erforderliche Geschiebe im Quertransport von den Böschungen und Ufern her in die Fahrrinne gelangen. Dies kann durch vergleichende Querpeilungen oder mit Leitstoffen nachgewiesen werden.

Gesonderte Untersuchungen über die Regeneration von Tideriffeln nach Baggerungen haben gezeigt, daß die Tallagen selbst nach Vorratsbaggerungen sehr stabil sind und die Sedimentation vornehmlich in den Kammgebieten stattfindet (NASNER, 1975, 1976).

Nach den vorstehend beschriebenen Ergebnissen kann der Erfolg von Baggerungen in Stromstrecken mit Tideriffeln bezüglich der Regenerationszeit dieser Großformen vergrößert werden, wenn:

1. durch Ufer- und Böschungssicherungen der Materialnachschub in die Fahrrinne von den Seiten her verhindert wird und
2. die Tideriffel von den Kämmen aus abgetragen werden. Dabei wird der Gleichgewichtszustand einer unebenen Sohle um so mehr gestört, je stärker das Flußbett durch die Unterhaltungsmaßnahmen eingeebnet wird.

Die Teilnahme an der 15th International Conference on Coastal Engineering in Honolulu und an der Seventh World Dredging Conference in San Francisco wurde dem Verfasser durch die Unterstützung von der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. aus den Mitteln der 2. Spende GOEDHART und durch eine Beihilfe vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen ermöglicht. Allen an diesen Unterstützungen Beteiligten sei an dieser Stelle besonders gedankt. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß die Untersuchungen nur durch eine gute Zusammenarbeit von vielen Mitarbeitern verschiedener Stellen möglich waren. Der Dank des Verfassers gilt deshalb insbesondere auch allen an der Planung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungen beteiligten Herren.

6. Schriftenverzeichnis

- DILLO, H. G.: Sandwanderung in Tideflüssen. Mitt. Franzius-Inst. der Techn. Hochschule Hannover, H. 17, 1960.
- EXNER, F. M.: Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abt. IIa, Band 134, 1925.
- EXNER, F. M.: Zur Dynamik der Bewegungsformen auf der Erdoberfläche. Erg. der Kosm. Physik, 1. Bd., 1931.
- FÜHRBÖTER, A.: Zur Mechanik der Strömungsriffel. Mitt. Franzius-Inst. Techn. Univ. Hannover, H. 29, 1967.
- HENSEN, W.: Verlauf der Sandwanderung in der Elbe von km 582 bis km 590. Die Bau-technik, H. 10/12, 1943.
- NASNER, H.: Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. Mitt. Franzius-Inst. Techn. Univ. Hannover, H. 40, 1974.
- NASNER, H.: Zur Frage der Baggerung von Riffeln in Tideflüssen. Naßbaggerberichte, Forschung und Technik, H. 4, 1975, Hamburg.
- NASNER, H.: Regeneration of Tidal Dunes after Dredging. Proc. of the World Dredging Conf. WODCON VII, 1976.
- RUCK, K. W.: Erfahrungen mit Sandwanderungsuntersuchungen mittels Luminophoren. Die Wasserwirtschaft, H. 10, 1967.
- RUCK, K. W.: Erfahrungen beim Präparieren von Sand für Leitstoffuntersuchungen. Mitt. d. Bundesanstalt für Wasserbau 20 (1972) Nr. 33.

- VOLLMERS, H. und WOLF, G.: Untersuchung von Sohlenumbildungen im Bereich der Unterelbe. Die Wasserwirtschaft, H. 10, 1969.
- WASSER- UND SCHIFFAHRSDIREKTION BREMEN: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in der Unterweser für die Oberwassermengen $Q_0 = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, $282 \text{ m}^3/\text{s}$ und $600 \text{ m}^3/\text{s}$ bei mittlerer Tide. Unveröffentlicht, 1972.
- ZANKE, U.: Über den Einfluß von Kornmaterial, Strömungen und Wasserständen auf die Kenngrößen von Transportkörpern in offenen Gerinnen. Mitt. Franzius-Inst. Techn. Univ. Hannover, H. 44, 1976.