

Anpassungszeit von Großriffeln bei instationären Strömungen

Von Horst Nasner

Zusammenfassung

In den folgenden Ausführungen wird das zeitabhängige Verhalten der Sohlformen von den gegebenen hydraulischen Verhältnissen beschrieben. Die Ergebnisse können wie folgt kurz zusammengefaßt werden:

- Es zeigt sich, daß die Anwendung von Ergebnissen aus Laboruntersuchungen auf natürliche Flüsse problematisch ist. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Abmessungen der Sohlformen und den Fließbedingungen kann sich bei stationären Verhältnissen einstellen. In der Natur passen sich die Sohlformen mit einer zeitlichen Verzögerung an die wechselnden Abflüsse an. Dieser Vorgang vollzieht sich jedoch auch bei den Großformen kurzfristig.
- Die aus Laboruntersuchungen gewonnene Erkenntnis, daß sich bei kleinen FROUDESchen Zahlen mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit höhere Sohlformen ausbilden, gilt offenbar nur für geringe Wassertiefen. Bei Flüssen mit größerer Wassertiefe ist die Strömungsgeschwindigkeit maßgebend, durch die – abhängig vom Sohlenmaterial – die Grenzhöhe der Sohlformen bestimmt wird. Die Flußsohle kann sich trotz kleiner FROUDESchen Zahlen im Übergangsbereich befinden, so daß sich bei höheren Abflüssen und Strömungsgeschwindigkeiten durch Erosion kleinere Riffelhöhen einstellen. Bei fallenden Wasserständen und geringeren Strömungsgeschwindigkeiten können die Sohlformen durch Sedimentation wieder größer werden.
- Die Untersuchungen haben ergeben, daß die Sohle sehr empfindlich auf veränderte Abfluß- bzw. Strömungsbedingungen reagiert. Die Änderungen der Riffelhöhen sind deutlich stärker als die Schwankungen des mittleren Wasserstandes. Die Großformen bewirken grundsätzlich eine Stabilisierung der Flußsohle im Sinne einer Verzögerung des Ausräumprozesses. Die Geschiebefracht wird gegenüber einer glatten Sohle durch die nur örtliche Umlagerung des Sohlenmaterials erheblich verringert. Die Riffelhöhe ist dabei von untergeordneter Bedeutung, da sie sich ebenso wie die Fortschrittsgeschwindigkeit der Sohlformen an die gegebenen Strömungsgeschwindigkeiten anpaßt und nicht umgekehrt.

Summary

The paper seeks to describe the magnitude of the time lag in bed formation under unsteady flow conditions. It has proved difficult to apply the results of model experiments to natural rivers as although a clear relationship between bed shape and flow conditions can be established for steady flow, such steady flow does not occur in nature and the bed of the river adjusts to the changing hydraulic conditions after a time lag. However this is a short term process even for large bed formations in deep rivers.

The results of laboratory experiments which show that for low Froude numbers increasing velocities will produce higher bed formations appear to apply only to limited water depths. The significant parameter for rivers of greater depths is the flow velocity. This, combined with the sediment characteristics, determines the limiting height of the bank. Despite low Froude numbers the river bed may be in a transition zone so that higher discharges and flow velocities cause erosion and reduce the height of banks. When water levels are falling and current velocities are lower the banks can build up again as a result of sedimentation.

The investigation showed that the river bed reacts very sensitively to changes in discharge and flow conditions. The variations in the height of banks is clearly of a greater order of magnitude than the fluctuations in mean water levels. In principle these large bed formations have a stabilizing effect and reduce the removal of sediments. The sand transport in the purely local redistribution of

bed material is much less than would occur on a flat bed. In this respect the height of the bank is of minor significance, as the height and the migration velocity of the bed formation is governed by the mean velocity of the flow and not vice versa.

Inhalt

1. Einleitung	11
2. Sohlformen und Strömungsbedingungen	12
3. Änderung der Sohlformen bei Tideeinfluß	12
3.1 Verlagerung während der Tide	12
3.2 Oberwasser und Riffelhöhe	13
4. Phasendiagramme	13
4.1 Vorbemerkung	13
4.2 Riffelhöhe – Abflußdiagramm für die Weser	14
5. Zeitliche Entwicklung von Riffelhöhe und Abfluß	17
6. Mittlerer Wasserstand und Riffelhöhe	18
7. Schriftenverzeichnis	20

1. Einleitung

In vielen Veröffentlichungen, die auf theoretischen Überlegungen oder Versuchen im Modell beruhen, wird die Forderung erhoben, daß zwischen hydraulischen Bedingungen und Sohlformparametern eindeutige Beziehungen bestehen, die allgemeine Gültigkeit besitzen. Diese für stationäre Verhältnisse und begrenzte Wassertiefen ermittelten Gesetze können jedoch nicht ohne Vorbehalt auf natürliche Flüsse übertragen werden. Die Sohlformen passen sich nicht unmittelbar an die veränderlichen Strömungsverhältnisse an. Bei wechselnden

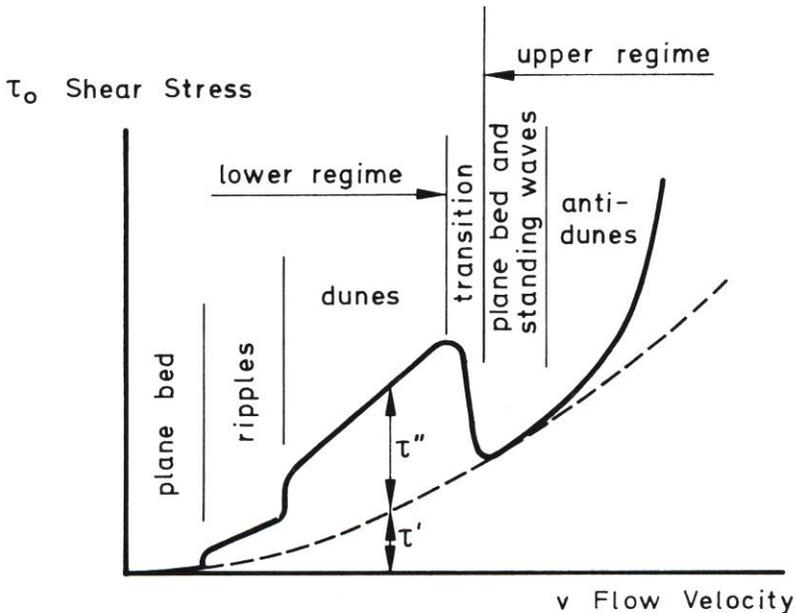


Abb. 1. Schubspannung, Fließgeschwindigkeit und Sohlformen (nach ENGELUND und HANSEN, 1967)

Abflüssen benötigt die Sohle eine bestimmte Zeit, um sich neu zu gestalten. Diese Zeitverschiebungen sind in der Vergangenheit an einer Vielzahl von Flüssen beobachtet worden. Eine Zusammenstellung dieser Untersuchungen wurde von ALLEN (1976, b) durchgeführt.

In dem folgenden Beitrag wird der Versuch unternommen, die Anpassungszeit der Sohlformen bei instationären Strömungsverhältnissen in ihrer Größenordnung zu erfassen.

2. Sohlformen und Strömungsbedingungen

Die Bildung und Bewegung der verschiedenen Sohlformen ist in zahlreichen grundlegenden theoretischen Arbeiten und Modellversuchen für stationäre Verhältnisse und geringe Wassertiefe untersucht worden. Zur Erläuterung der Begriffe soll hier die Darstellung in Abb. 1 dienen. Sie zeigt für die Beziehung zwischen der Schubspannung an der Sohle und der Abflußgeschwindigkeit, welche Sohlformen auftreten, wenn die Fließgeschwindigkeit des Wassers zunimmt.

Im unteren Regime, bei strömendem Abfluß, bilden sich je nach Fließgeschwindigkeit Kleinriffel oder Dünen aus. Wenn die Abflußgeschwindigkeit auf ein bestimmtes Maß gesteigert wird, werden die Dünen ausgeräumt. Bei weiterer Steigerung der Abflußgeschwindigkeit können im oberen Regime stehende Sohlenwellen und Antidünen auftreten, die entgegen der Strömungsrichtung wandern. Das obere Regime tritt nur für FROUDESche Zahlen $Fr > 1$ im Bereich des Schießens auf.

Flüsse mit großer Wassertiefe und Tideströme sind durch kleine FROUDESche Zahlen gekennzeichnet. Nach dem vorstehend genannten Beispiel wären größere Dünen bzw. Riffel bei höheren Abflußgeschwindigkeiten zu erwarten. Für instationäre Bedingungen müßten sich die maximalen Dünenabmessungen mit einer zeitlichen Verzögerung nach dem Höchstabfluß einstellen.

3. Änderung der Sohlformen bei Tideeinfluß

3.1 Verlagerung während der Tide

Aus Modellversuchen mit Tideströmungen ist bekannt, daß sich die Strömungsriffel nach kurzer Zeit in die jeweils herrschende Flut- oder Ebbstromrichtung umkehren (DILLO, 1960).

Bis zu welcher Höhe sich die Riffel in Tideflüssen den wechselnden Strömungsrichtungen anpassen, untersuchte TERWINDT (1970) an 923 Riffelfeldern in holländischen Tideflüssen. Danach ergibt sich folgendes Ergebnis: „Die Asymmetrie von Riffeln ($H = 30$ bis 100 cm) kann sich mit dem Wechsel der Tideströmungen ändern; dies ist jedoch nicht immer der Fall. Die Asymmetrie von Riffeln ($H = 100$ bis 200 cm) wechselt in den meisten Fällen nicht mit der Tideströmung.“ Das bedeutet, daß die Anpassungszeit der kleineren Formen weniger als eine Flut- oder Ebbstromdauer beträgt. Bei den an der Nordseeküste auftretenden halbtägigen Gezeiten sind dies weniger als sechs Stunden. Die Form der größeren Riffel ($H > 1$ m) bleibt trotz der Tidebewegung erhalten, d. h., die Anpassungszeit beträgt mehr als sechs Stunden. Es finden lediglich Umlagerungen im Kammbereich statt (NASNER, 1974a).

3.2 Oberwasser und Riffelhöhe

Im oberen Teil eines Tideflusses werden die Strömungsgeschwindigkeiten zunehmend durch das Oberwasser beeinflusst. Durch langjährige Untersuchungen von vier ausgeprägten Riffelfeldern in der Schifffahrtsrinne der Unterweser zwischen Bremen und Bremerhaven (Abb. 2) wurde nachgewiesen, daß die Höhe und Bewegung der Sandwellen maßgeblich von der langfristigen Änderung der Ebbestromgeschwindigkeiten als Folge des veränderlichen Oberwasserabflusses bestimmt wird (NASNER, 1974a, 1974b). Die Charakteristik der Sohlformen wird durch die Tideströmungen nicht beeinflusst. Die mittleren Riffellängen liegen in der Größenordnung von 50 m, die mittleren Höhen können Werte von mehr als 2,5 m erreichen. Die halbtägigen Gezeiten sind sehr regelmäßig, der mittlere Tidehub beträgt etwa 3,5 m.

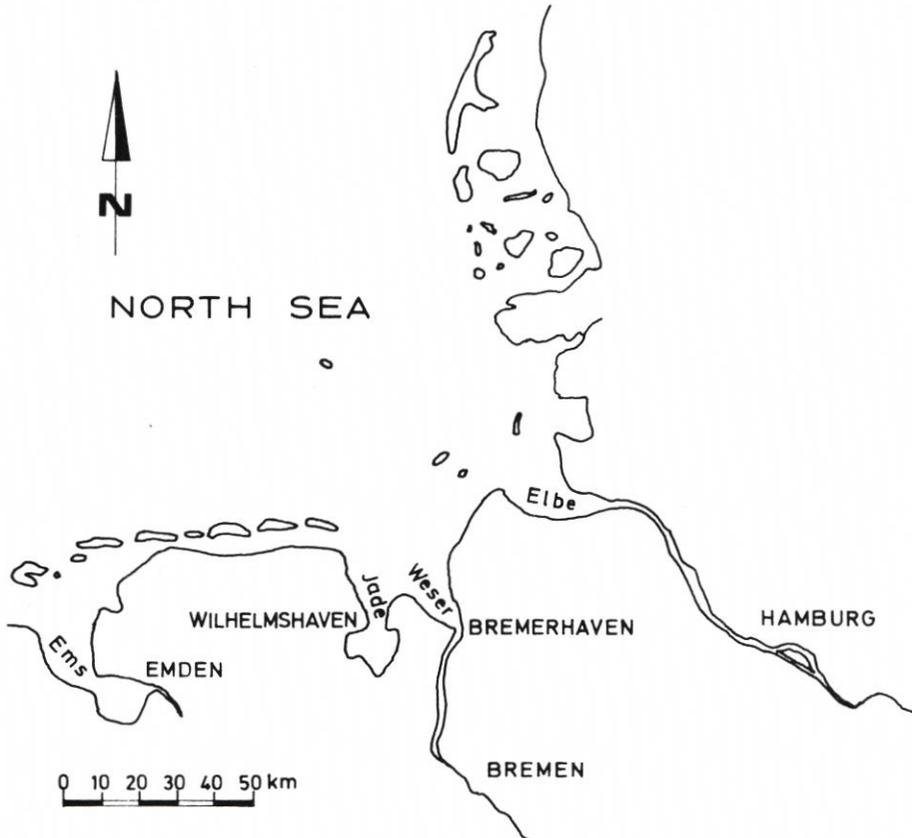


Abb. 2. Die deutsche Nordseeküste

4. Phasendiagramme

4.1 Vorbemerkung

Eine Möglichkeit, die Zeitverschiebungen zwischen der Änderung der Strömungskenngrößen und der Anpassung der Dünencharakteristiken zu bestimmen, ist durch Phasendia-

gramme gegeben (ALLEN 1973, 1976a, 1976b; JACKSON II, 1976). Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß man die Riffelhöhe abhängig vom Abfluß aufträgt, wobei beide Parameter eine Funktion der Zeit sind. Es ergeben sich Kurven, die im Idealfall geschlossen sind, wobei die Zeit im oder gegen den Uhrzeigersinn laufen kann.

4.2 Riffelhöhe - Abflußdiagramm für die Weser

Wenn man die mittlere Riffelhöhe \bar{H} von etwa 40 Riffeln als Funktion vom Oberwasser Q_0 in einem Phasendiagramm aufträgt, ergibt sich für die Weser beispielhaft das in Abb. 3 dargestellte Diagramm für die Zeit vom September 1966 bis zum Oktober 1967.

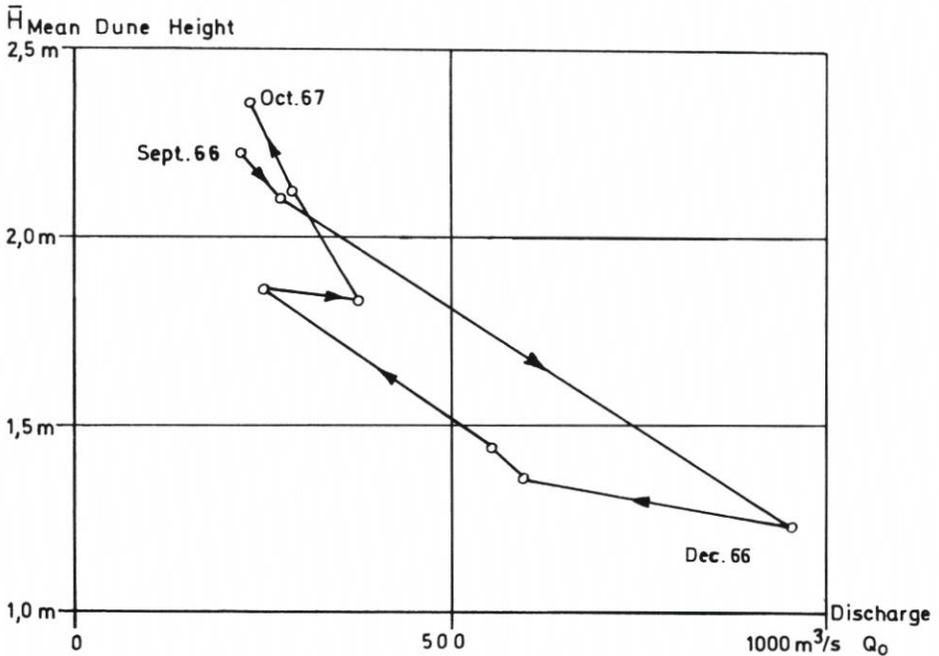


Abb. 3. Mittlere Riffelhöhe \bar{H} und Oberwasser Q_0 .

Für die Weser ergeben sich extrem große Zeitunterschiede zwischen maximalem Abfluß und maximaler Riffelhöhe, die etwa sieben bis neun Monate betragen können (ALLEN, 1976b). Dieses Ergebnis gibt jedoch nicht das wirkliche Verhalten zwischen Sohlformcharakteristik und Abfluß wieder, wie die folgenden Ausführungen zeigen.

Nach den eingangs gegebenen Beschreibungen möglicher Sohlformen ist die Wesersohle zwar weit vom Übergangsbereich entfernt, da die FROUDESche Zahl etwa bei $Fr = 0,1$ liegt. Bei den großen Wassertiefen von rd. 10 m ist die FROUDESche Zahl jedoch nicht mehr maßgebend.

Die Riffelhöhe H wird durch die Strömungsgeschwindigkeiten über dem Kamm bestimmt. Ein Gleichgewichtszustand stellt sich ein, wenn die Geschwindigkeit über dem Kamm einen vom Sohlenmaterial abhängigen Grenzwert erreicht, der in der Weser in der Größenordnung von 1,0 m/sec liegt (NASNER, 1974a, 1974b).

Schematisch ergibt sich das in Abb. 4 dargestellte Phasendiagramm.

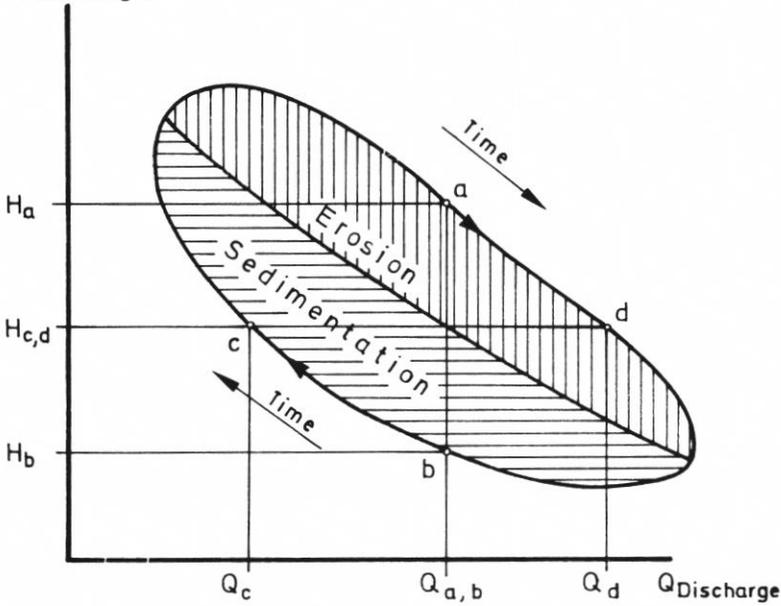


Abb. 4. Phasendiagramm für Riffelhöhe H und Abfluß Q (schematisch)

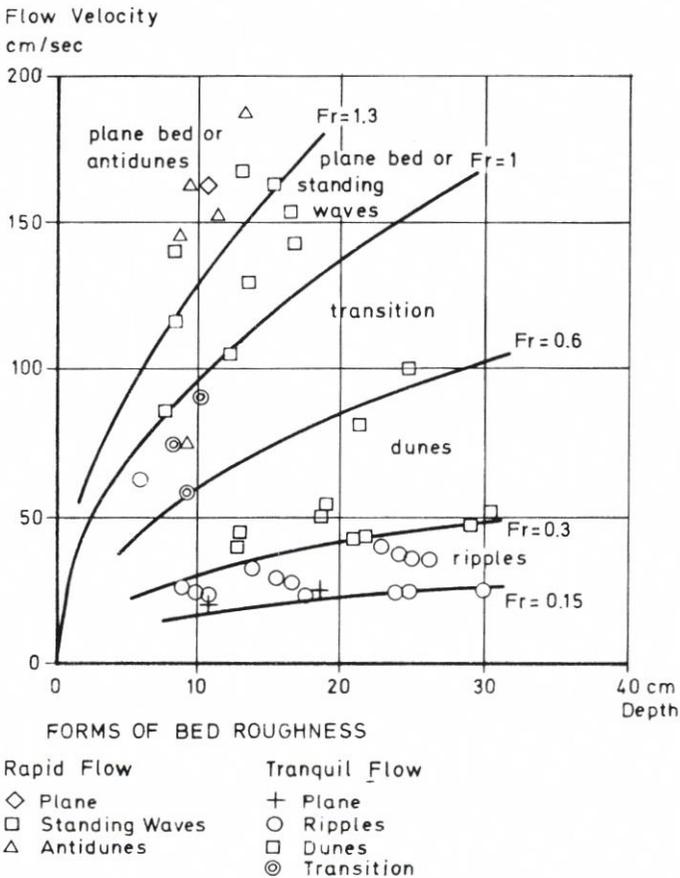


Abb. 5. Strömungsgeschwindigkeit, Wassertiefe und Sohlformen (SIMONS and RICHARDSON, 1960)

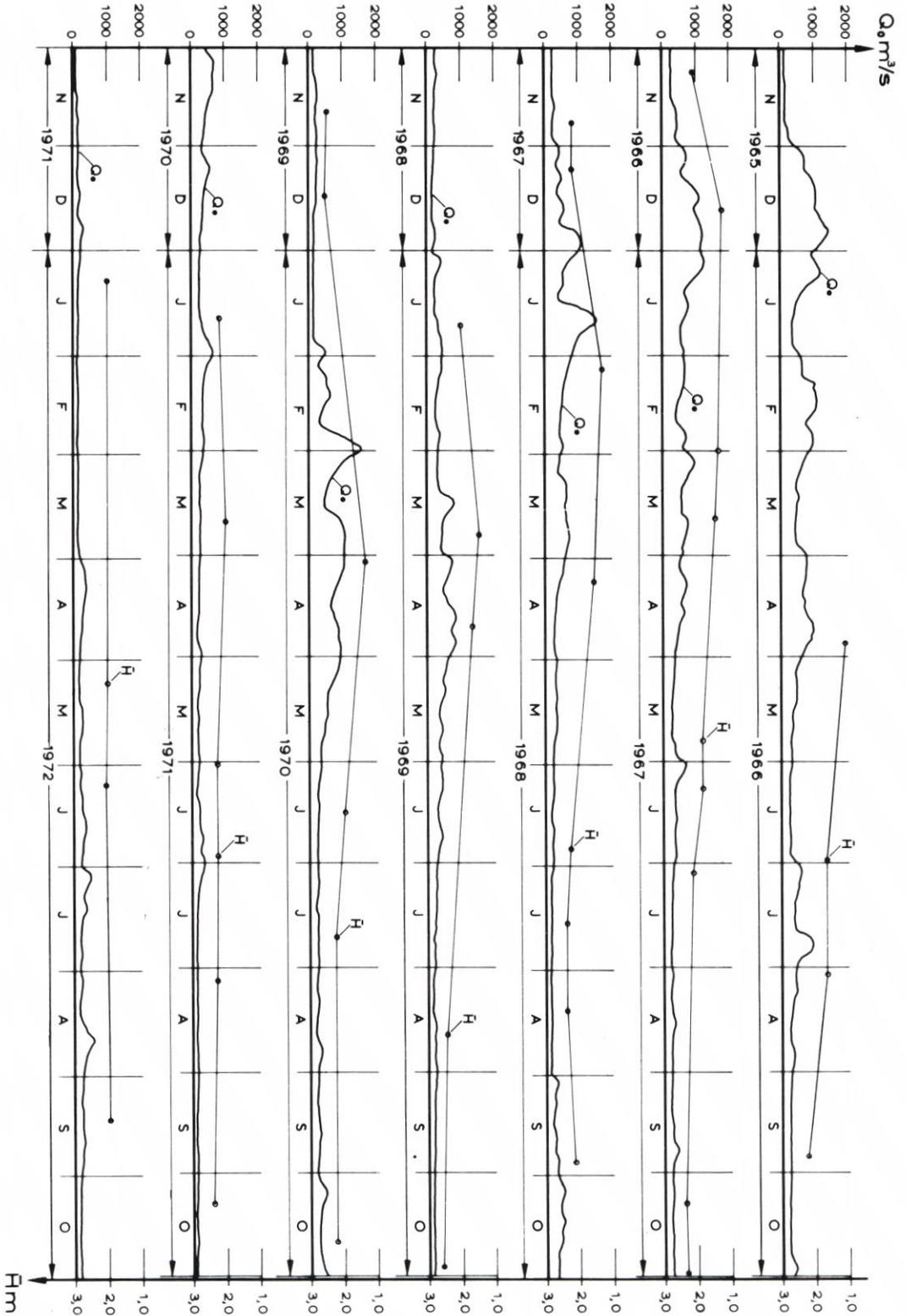


Abb. 6. Anpassung der Riffelhöhen \bar{H} an das Oberwasser Q_0 der Weser (hydrologische Jahre 1966 bis 1972)

Bedingt durch die instationären Verhältnisse gibt es keine eindeutige Zuordnung von Riffelhöhe und Oberwasser (Abb. 4). Bei gleichem Oberwasser (Q_a, b) können verschiedene Riffelhöhen auftreten (H_a ; H_b). An anderer Stelle wurde in erster Näherung davon ausgegangen, daß ein Gleichgewichtszustand in der Weser erreicht ist, wenn der Oberwasserabfluß etwa 30 Tage annähernd konstant ist (NASNER, 1974a, 1974b). Mit zunehmendem Oberwasser wird der Gleichgewichtszustand gestört und Erosion der Riffelkämme verursacht; die Riffel sind größer als sie sein sollten (verzögerte Erosion). Bei abnehmendem Oberwasser sind die Riffel kleiner als sie sein sollten (verzögerte Sedimentation). Grundsätzlich sind die kleineren Riffel dem höheren Oberwasser zuzuordnen, was nach Abb. 1 dem Übergangsbereich entspricht.

Interessant sind in diesem Zusammenhang die Laboratoriumsversuche von SIMONS und RICHARDSON (1960). In Abb. 5 sind Strömungsgeschwindigkeit, Wassertiefe und die verschiedenen Sohlformen in Abhängigkeit von der FROUDESchen Zahl angegeben. Selbst bei Wassertiefen von nur 0,30 m beginnt der Übergangsbereich bei einer Fließgeschwindigkeit von etwa 1,0 m/sec. Dieser vom Sohlenmaterial abhängige Grenzwert wurde durch systematische Modellversuche mit Wassertiefen bis zu 1,00 m mit Wesersand in einem Kreisgerinne bestätigt (ZANKE, 1976). Für verschiedene Sande stellte sich die größte Höhe der Sohlformen bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zwischen etwa 1,0 m/sec bis 1,20 m/sec ein. Die vorstehenden Ausführungen für die Weser haben gezeigt, daß dieser Wert auch für größere Wassertiefen gilt.

5. Zeitliche Entwicklung von Riffelhöhe und Abfluß

Wie sich die Riffelhöhen den wechselnden Abflüssen anpassen, geht anschaulich aus Abb. 6 hervor. Für die hydrologischen Jahre 1966 bis 1972 werden die täglichen Oberwasserabflüsse Q_0 der Weser mit den mittleren Riffelhöhen \bar{H} verglichen. Das Beispiel zeigt den dauernden Auf- und Abbauprozess, dem die Sohlformen unterworfen sind.

Die für die Weser gewonnenen Ergebnisse können verallgemeinert werden und lassen sich auch auf andere Flüsse übertragen (NASNER, 1974a), wo sich bei steigenden Wasserständen

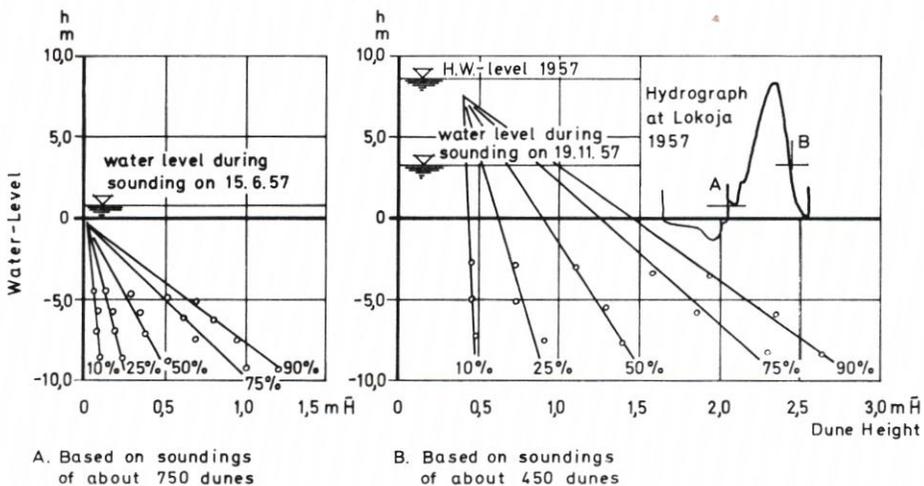


Abb. 7. Riffelhöhen \bar{H} im Niger bei verschiedenen Wasserständen h (NEDECO, 1959)

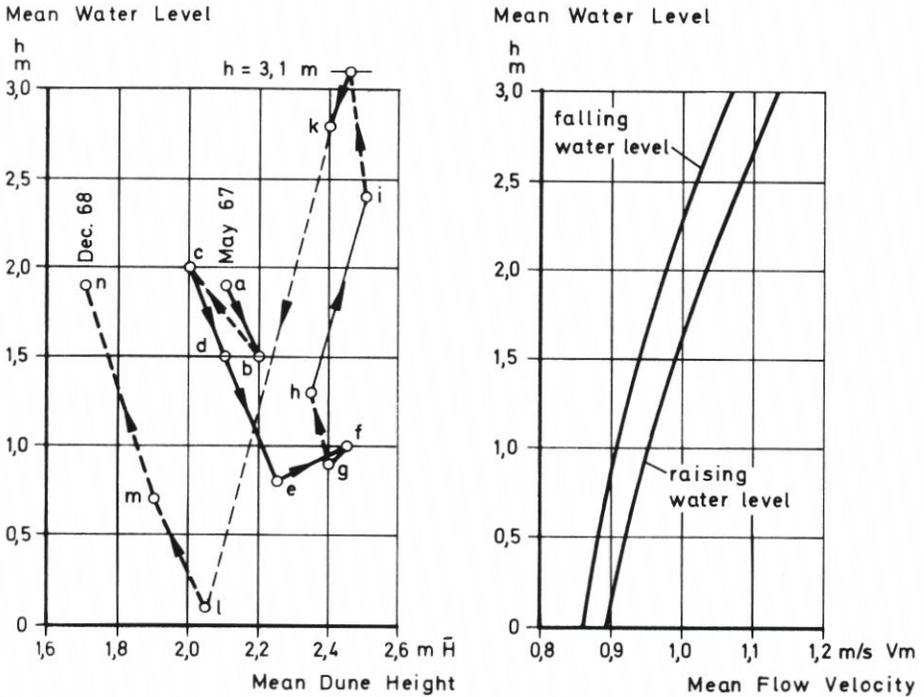


Abb. 8. Mittlere Riffelhöhen \bar{H} , Strömungsgeschwindigkeiten v und Wasserstände h im Rio Paraná (STÜCKRATH, 1969)

den infolge der beschleunigten Strömungsgeschwindigkeiten kleinere Riffeln ausbilden (Erosionsphase) als bei fallenden Wasserständen (Sedimentationsphase). Als Beispiele seien hier die Untersuchungen der NEDECO (1959) im Niger und die von STÜCKRATH (1969) im Rio Paraná genannt (Abb. 7 und 8).

6. Mittlerer Wasserstand und Riffelhöhe

In Abb. 9 sind vom September 1966 bis zum Dezember 1967 außer der Oberwasserganglinie und den mittleren Riffelhöhen zusätzlich die monatlichen Tidehalbwasserstände aufgetragen worden. Es zeigt sich hier ebenfalls, wie sich die Höhen rasch an die veränderten Abflüsse angleichen und daß die Zeitverschiebung zwischen Abflußänderung und Angleichung der Sohlformen ein kurzfristiger Vorgang ist.

Ein bemerkenswertes Ergebnis ist die Tatsache, daß die Schwankungen des Tidehalbwasserstandes deutlich geringer sind als die Änderungen der Riffelhöhe. Die „feste Grenzschicht“ reagiert empfindlicher auf Abflußänderungen als die „freie Oberfläche“. Die Höhenänderung vollzieht sich bei annähernd konstanter Tallage vor allem durch Erosion und Sedimentation im Kammerbereich der Dünen (NASNER, 1976a). Die wesentliche Einflußgröße ist die Strömungsgeschwindigkeit, an die sich die Sohle anpaßt. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß in Geschiebegleichungen die Sohlformen durch einen zusätzlichen Rauigkeitsfaktor berücksichtigt werden. Die Stabilisierung der Sohle gegen Ausräumung ist durch die Mechanik der Großformen bedingt, durch die die Geschiebefracht gegenüber einer glatten

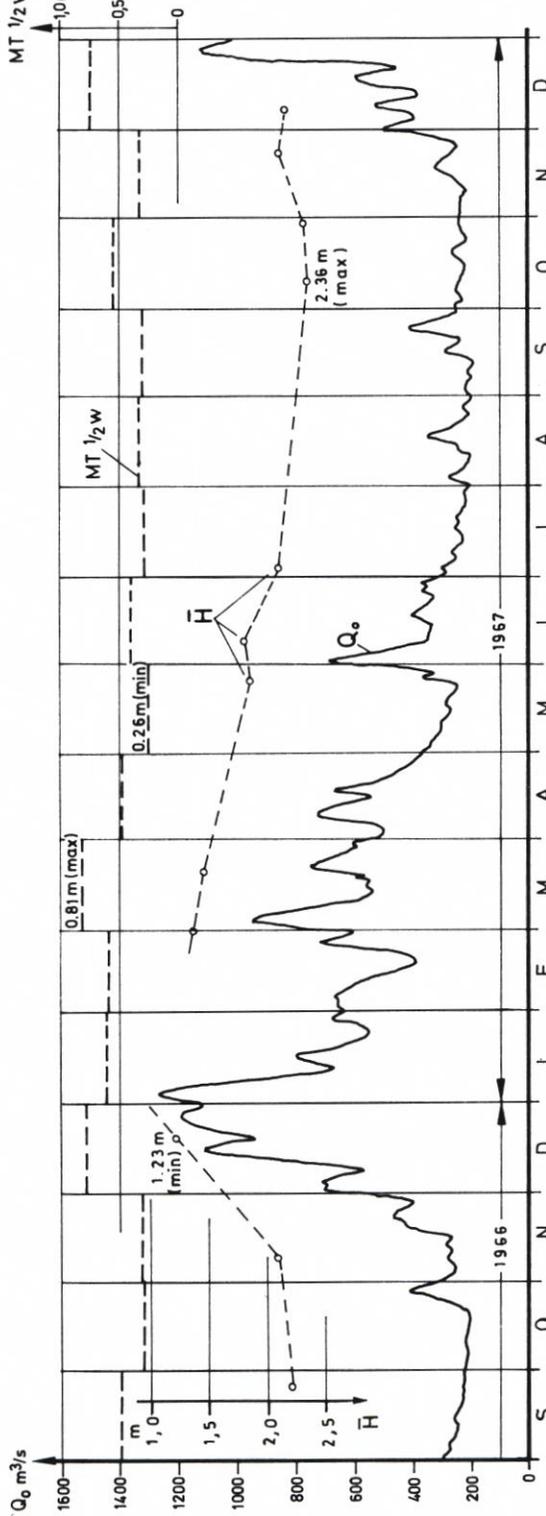


Abb. 9. Oberwasser Q_0 , mittlere Riffelhöhe H und mittlere Tidehalbwasserstände $MT \frac{1}{2}w$ in der Weser

Sohle erheblich verringert wird (FÜHRBÖTER, 1967). Inzwischen ist auch im Naturversuch nachgewiesen worden, daß sich der Sohlenlängstransport bei einer mit Dünen bedeckten Sohle im wesentlichen durch örtliche Umlagerung des Geschiebes entsprechend der Wandergeschwindigkeit vollzieht (NASNER, 1976b).

7. Schriftenverzeichnis

- ALLEN, J. R. L.: Computational models for dune time-lag: general ideas, difficulties and early results. *Sediment. Geol.*, 15, 1976 (a).
- ALLEN, J. R. L.: Time-lag of dunes in unsteady flows: An analysis of Nasner's data from the river Weser, Germany. *Sediment. Geol.*, 15, 1976 (b).
- ALLEN, J. R. L.: Phase differences between bed configuration and flow in natural environments, and their geological relevance. *Sedimentology* 20, 1973.
- DILLO, H. G.: Sandwanderung in Tideflüssen. *Mitt. des Franzius-Inst. der Techn. Hochschule Hannover*, Heft 17, 1960.
- ENGELUND F. and HANSEN, E.: A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Copenhagen, 1967.
- FÜHRBÖTER, A.: Zur Mechanik der Strömungsriffel. *Mitt. des Franzius-Inst. der Techn. Hochschule Hannover*, Heft 29, 1967.
- JACKSON II, R. G.: Largescale ripples of the lower Wabash River. *Sedimentology* 23, 1976.
- NASNER, H.: Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet. *Mitt. des Franzius-Inst. der Techn. Universität Hannover*. H. 40, 1974 (a).
- NASNER, H.: Prediction of the Height of Tidal Dunes in Estuaries. *Proc. 14th Intern. Conf. on Coastal Eng., Copenhagen*, 1974 (b).
- NASNER, H.: Regeneration of Tidal Dunes after Dredging. *World Dredging Conf., Wodcon VII, San Francisco, Proc. Wodcon VII*, 1976 (a).
- NASNER, H.: Transport Mechanism in Tidal Dunes. *Proc. 15th Intern. Conf. on Coastal Eng., Honolulu*, 1976 (b).
- NEDECO: River Studies and Recommendations on Improvement of Niger and Benue. Amsterdam, 1959.
- STÜCKRATH, T.: Die Bewegung von Großriffeln an der Sohle des Rio Paraná. *Mitt. des Franzius-Inst. der Techn. Hochschule Hannover*, H. 32, 1969.
- SIMONS, D. B. and RICHARDSON, F. V.: Resistance to Flow in Alluvial Channels. *Proc. ASCE*, Vol. 86, NY 5, 1960.
- ZANKE, U.: Über den Einfluß von Kornmaterial, Strömungen und Wasserständen auf die Kenngrößen von Transportkörpern in offenen Gerinnen. *Mitt. des Franzius-Inst. der Techn. Universität Hannover*, H. 44, 1976.