

# Naturuntersuchungen an Brandungsströmungen

Von Hans Henning Dette und Alfred Führböter

## Summary

*About physical processes in surf zones only few quantitative investigations are known. By means of high time-limit release (approx. 0.1 sec) of the used current meters it was possible in comparison to earlier field measurements, where only mean velocities could be investigated, to discover macro-turbulent processes within the longshore currents. It is shown (further details see DETTE and FÜHRBÖTER, 1974) that the longshore currents cannot be regarded any longer as a steady or quasisteady flow; fluctuations of the velocities in the range of  $\pm 100$  per cent occurred with up to 9 periods within one wave period. By definition of a periodical fluctuation parameter  $\gamma$  a nearly linear relationship with the breaker parameter  $\beta$  was found.*

## 1. Vorbemerkung

Die hier mitgeteilten Untersuchungen wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft durch das Forschungsvorhaben: „Energieumwandlung in Brandungszonen“ im Schwerpunktprogramm: „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ gefördert; sie konnten durch die gemeinsamen Untersuchungen zur Sandvorspülung vor Sylt im Jahre 1972 (FÜHRBÖTER et al. 1972) des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Husum und des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig ergänzt werden.

## 2. Einleitung

Bei der Untersuchung von physikalischen Vorgängen in Brandungszonen fällt es auf, daß im Gegensatz zu einer Fülle von theoretischen und experimentellen Arbeiten nur wenige Untersuchungen in der Natur bekannt sind. Dieser Mangel kann nicht auf fehlendes Interesse zurückgeführt werden, sondern liegt darin begründet, daß es bislang noch keine geeigneten Meßverfahren zum Einsatz unter erschwerten Seegangsbedingungen gab. Durch die Verwendung von elektronischen Meßgeräten wurden Naturmessungen erst in jüngster Zeit ermöglicht; damit allein ist es jedoch in Brandungszonen bei fehlenden Festpunkten (Meßbrücken, Pfählen, Plattformen) nicht getan, denn die Auslegung der Geräte und Kabel auf einem Strand, der täglichen Veränderungen in der Höhenlage bis zu 1 m unterliegt (LAMPRECHT, 1955), stellt neben der Beherrschung der Meßtechnik ein weiteres Problem dar. Es erübrigt sich zu erwähnen, daß Untersuchungen in der Natur wesentlich kostenaufwendiger sind und wesentlich mehr Zeit beanspruchen als ähnliche Untersuchungen im Laboratorium. Brandungsuntersuchungen in stark verkleinerten Modellen müssen jedoch (vgl. z. B. FÜHRBÖTER, 1971) notwendigerweise falsche Ergebnisse liefern, weil durch den Einfluß der Oberflächenspannung die Luftaufnahme beim Brechen verhindert wird und dadurch ein wichtiger Dissipationsfaktor nicht berücksichtigt wird.

### 3. Bemerkungen zu dem Auftreten von Brandungsströmungen

Brandungsströmungen treten als küstenparallele Strömungen dann auf, wenn Wellen schräg auf einem Strand auftreffen. Dadurch wird ein Küstenlängstransport von Sedimenten bewirkt, der durch einen Anteil aus der Orbitalströmung und durch die küstenparallele Brandungsströmung aufrechterhalten wird. Die Orbitalströmungen verhalten sich entsprechend den Wellenbewegungen und können als alternierende Strömungen angesehen werden; die Brandungsströmung dagegen stellt eine kontinuierliche Strömung dar und kann als eine Ausgleichsströmung betrachtet werden, die nach HENSEN (1957) an jeder Stelle des Strandes immer wieder durch neue Impulse aus der Brecherzone angefacht und aufrechterhalten wird. Allgemein müssen die Brandungsströmungen als komplexe Strömungen angesehen werden, die sich aus der Überlagerung von Orbitalströmungen sowie zweidimensionalen Unterströmungen und unregelmäßig über die Strandlänge auftretenden Rippströmungen, die als konzentrierte Rückströme in die offene See bekannt sind, zusammensetzen.

Über die Entstehung und über die Größenordnung von Brandungsströmungen gibt es seit Beginn der 40er Jahre eine Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen. Der erste Anstoß dazu ist auf mißglückte Landungsunternehmen mit Amphibienfahrzeugen während des letzten Krieges zurückzuführen, als ausgeprägte Brecherzonen ohne Schwierigkeiten durchquert werden konnten, ein Anlanden wegen zu starker Brandungsströmungen in der Ausbrandungszone aber häufig nicht glückte (PUTNAM et al., 1949). Mittlerweile sind schon mehr als 20 verschiedene Formeln zur Voraussage der Brandungsstromgeschwindigkeiten bekannt, die zum Teil experimentell im Labor, analytisch oder empirisch auf Grund von Natur- und Laboruntersuchungen hergeleitet wurden. Dabei wurden die Brandungsströmungen praktisch als stationäre oder quasi-stationäre Strömungen angesehen, die vorwiegend durch Mittelwerte beschrieben werden können. Bei den wenigen bisher bekannten Naturmessungen konnten durch die Verwendung von Treibkörpern, Ballons und Farblösungen ebenfalls nur mittlere Angaben über die Größenordnung der Brandungsströmung gewonnen werden; über die Streuung der Geschwindigkeiten konnte nichts ausgesagt werden.

Bei den Brandungsstrommessungen vor Sylt wurden elektromagnetische Zweikomponenten-Strömungsmeßgeräte mit hoher Zeitauflösung (etwa 0,1 s) eingesetzt; es handelt sich um Geräte, die auf einem induktiven Meßverfahren nach dem FARADAY-Prinzip beruhen. Es wurden umfangreiche Messungen bei vielfältigen Seegangsbedingungen gewonnen, so daß u. a. allgemeine Gesetzmäßigkeiten über die zeitliche Veränderlichkeit der Brandungsströmung abgeleitet werden konnten. Es wurden Variationskoeffizienten von 400 % bei geringen Brandungsstromgeschwindigkeiten festgestellt, die bei den höchsten mittleren Geschwindigkeiten von  $\bar{v}_L = 1,5$  m/s bis auf 20 % abfielen. Innerhalb einer Wellenperiode wurden bei einer Sturmflut bis zu 9 periodische Schwankungen der Brandungsströmung ermittelt. Auch war es nicht ungewöhnlich, daß eine mittlere Brandungsstromgeschwindigkeit von z. B.  $\bar{v}_L = 1,0$  m/s innerhalb kürzester Zeit von einer momentanen Geschwindigkeit von  $v_L = \pm 0$  m/s auf  $v_L = 2,0$  m/s anstieg. Auf die starken Fluktuationen ist vermutlich das hohe Transportvermögen der Brandungsströmung zurückzuführen (DETTE, 1974b). Diese vorangestellten Erkenntnisse aus den Untersuchungen vor Sylt sollen bereits vorab klarstellen, daß die Brandungsströmungen nicht länger als stationäre oder quasi-stationäre Strömungen angesehen werden dürfen, was durch die nachfolgend aufgeführten Untersuchungsergebnisse weiter belegt werden soll.

#### 4. Größenordnung der mittleren Brandungsstromgeschwindigkeiten vor Sylt und ihre zeitlichen Veränderlichkeiten

Innerhalb des genannten mehrjährigen Forschungsprogrammes war der Schwerpunkt auf die Energiedissipation in der Brandungszone, d.h. auf die Messung der Wellen-(Brecher-)höhen in kurzen Abständen sowie auf die Ermittlung der sohnahen küstennormalen und küstenparallelen Strömungen ausgerichtet (FÜHRBÖTER [1974], BÜSCHING [1974] und DETTE [1974 a + b]). Abbildung 1 zeigt die Lage des Meßprofils vor Sylt, in dem die Wellen bis zu einer Entfernung von rd. 1300 m (Station  $W_4$ ) gemessen wurden. Im folgenden wird die Größenordnung der mittleren Brandungsstromgeschwindigkeit mitgeteilt, und es werden Eigenschaften der sohnahen Brandungsströmung untersucht. Dazu konnten mehr als 150 Einzelmessungen mit Registrierzeitintervallen von jeweils 10 Minuten, ein Großteil davon während der ungewöhnlichen Sturmflutserie im November und Dezember 1973, herangezogen werden. Die analog aufgezeichneten Brandungsstromgeschwindigkeiten wurden anschließend in äquidistanten Zeitabständen von je 0,2 s digitalisiert, so daß die einzelnen Auswertungen über die Elektronische Datenverarbeitung (EDV) der Technischen Universität Braunschweig (ICL 1906 S) jeweils auf 3000 momentane Geschwindigkeiten gestützt werden konnten.

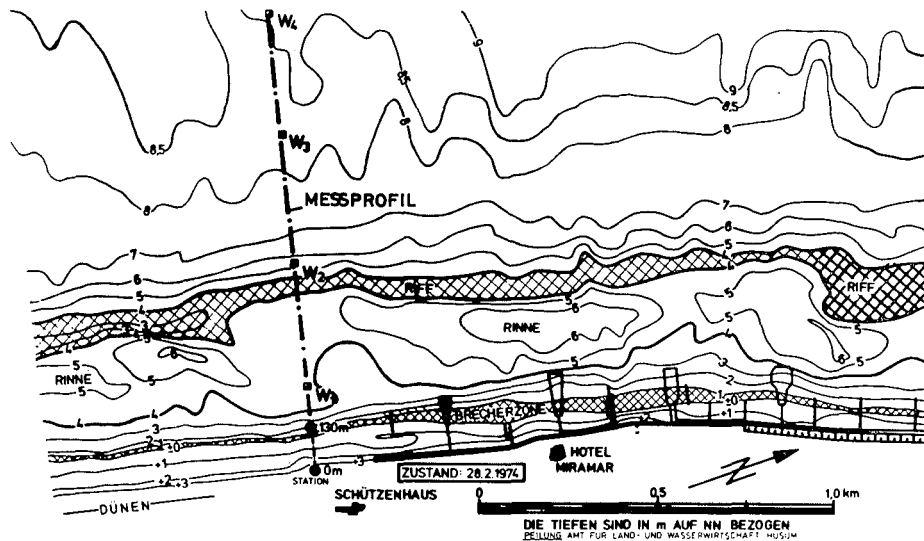


Abb. 1. Lage des Meßprofils vor Westerland/Sylt

Die Messungen ergaben, daß die höchsten Brandungsstromgeschwindigkeiten bei zwei verschiedenen Wetter- und Seegangsverhältnissen auftreten:

1. Schwere Sturmfluten mit höchsten Brecherhöhen ( $H_B > 3$  m) und kleineren Brecherkammwinkeln ( $\theta_B < 25^\circ$ ).
2. Küstenparallele Windrichtungen, bei denen größere Brecherkammwinkel ( $\theta_B > 25^\circ$ ) auftreten, die Brecherhöhen jedoch unter  $H_B = 1$  m liegen.

In beiden Fällen wurden mittlere Brandungsstromgeschwindigkeiten bis zu  $\bar{v}_L = 1,5$  m/s an der Sohle gemessen. Damit konnte die „Hypothese“ von ZAUSIG (1939, bei GUTSCHE, 1961), daß das Abbruchmaterial des Strandes und des Kliffs vor Sylt nach Nor-

den und Süden verfrachtet wird, durch den Nachweis „hinreichend starker und andauernder Küstenlängsströmungen“ bestätigt werden.

Der Schwankungsbereich der Brandungsstromgeschwindigkeiten wird auf Abbildung 2 und 3 veranschaulicht, auf denen die maximalen Geschwindigkeiten in mittlerer Strömungsrichtung sowie die minimalen Geschwindigkeiten überwiegend in entgegengesetzter Richtung in Abhängigkeit von den mittleren Brandungsstromgeschwindigkeiten dargestellt sind.

Die eingezeichneten Regressionsgeraden zeigen, daß ein nahezu linearer Zusammenhang vermutet werden kann. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von  $\bar{v}_L = \pm 0$  m/s schwanken die momentanen Geschwindigkeiten bis  $\pm 1,5$  m/s um den Mittelwert, erst bei  $\bar{v}_L = 1,5$  m/s treten keine momentanen Geschwindigkeiten mehr in entgegengesetzter Richtung auf (DETTE, 1974b).

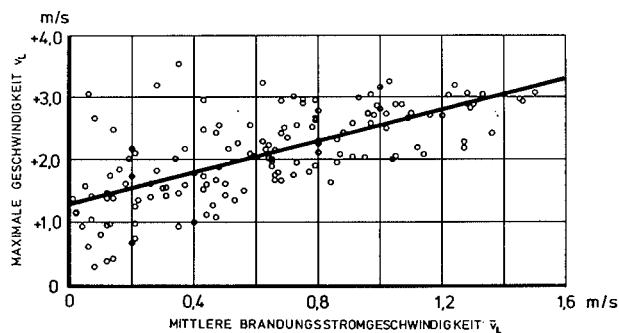


Abb. 2. Maximum der Brandungsstromgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Mittelwert (DETTE, 1974b)

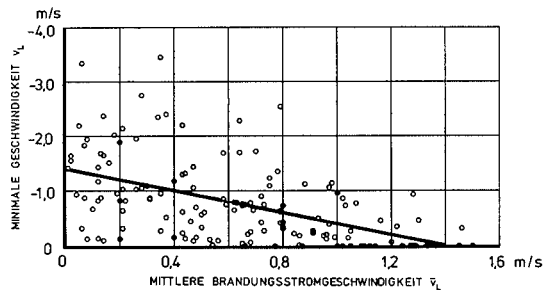


Abb. 3. Minimum der Brandungsstromgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Mittelwert (DETTE, 1974b)

Die zeitliche Veränderlichkeit wurde über die statistischen Methoden der Standardabweichung

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n=3000} (v_L - \bar{v}_L)^2}$$

und des dimensionslosen Variationskoeffizienten  $C_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}_L}$  untersucht (Abb. 4).

Eine Regressionsrechnung für die Standardabweichung zeigt, daß diese nur unwesent-

lich mit zunehmender mittlerer Brandungsstromgeschwindigkeit von 0,33 m/s auf 0,42 m/s bei  $\bar{v}_L = 1,5$  m/s ansteigt.

Die Ausgleichskurve für die Variationskoeffizienten  $C_v$  veranschaulicht die bereits erwähnte Streuung zwischen 400 % bei  $\bar{v}_L = 0,1$  m/s und 20 % bei  $\bar{v}_L = 1,5$  m/s. Im Vergleich dazu werden auf Abb. 4 die Ergebnisse von Untersuchungen von SONU (1967) an einem Strand in Japan dargestellt, bei denen eine höchste Streuung mit 30 % ermittelt wurde.

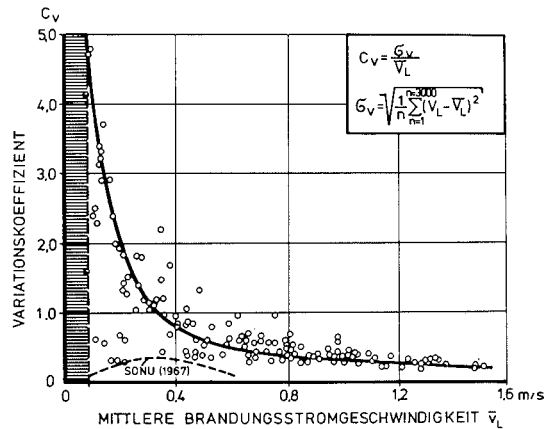


Abb. 4: Variationskoeffizient der Brandungsströmung in Abhängigkeit vom Mittelwert (DETTE, 1974b)

### 5. Makroturbulenz der Brandungsströmung

VELIKANOV (1949, bei KAZANSKIJ, 1972) befaßte sich mit Strömungsturbulenzen; er unterteilte das Geschwindigkeitsfeld in drei Kategorien:

1. Zeitlicher Mittelwert
2. Makroturbulenz (strukturelle Abweichung)
3. Mikroturbulenz (zufällige Abweichung).

Unter makroturbulenten Schwankungen sind strukturelle Formationen zu verstehen, die sich gegenüber den zufälligen Abweichungen (breites Spektrum) durch eine größere

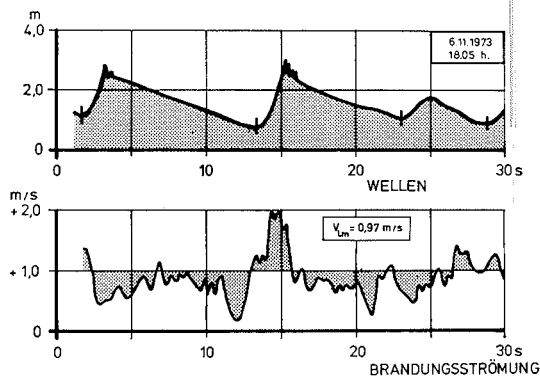


Abb. 5. Makro- und mikroturbulente Formationen in der Brandungsströmung (DETTE, 1974b)

Regelmäßigkeit (schmales Spektrum) auszeichnen. Abbildung 5 zeigt stellvertretend für die Brandungsstromregistrierungen, daß die oben genannten Formationen bei allen Messungen unterschieden werden konnten und daß die Periode der Makroturbulenz wesentlich kleiner als die Wellenperiode ist. Bei den Auswertungen der periodischen Schwankungen konnte nicht zwischen makro- und mikroturbulenten Erscheinungen unterschieden werden, es wird daher vorerst empfohlen, die mittlere periodische Schwankung angenähert als die Hauptperiode der Makroturbulenz in der Brandungsströmung zu betrachten; sie liegt im Mittel ungefähr bei  $T_v = 2$  s (vgl. Abb. 5) in der Brandungszone vor Sylt.

#### 6. Zusammenhänge zwischen der Energiedissipation und der Periodenkennzahl der Brandungsströmung

Es wurde bereits erwähnt, daß bei den schweren Sturmfluten im November und Dezember 1973 bis zu neun periodische Schwankungen der Brandungsströmung innerhalb einer Wellenperiode festgestellt wurden. Diese Erscheinung ist auf ein Phänomen zurückzuführen, auf das u. a. GALVIN (1972) hinweist, daß in Flachwassergebieten steile Wellen in zwei oder mehr Wellen („solitons“) mit unterschiedlichen Höhen und Perioden zerfallen.

Es wurde eine Periodenkennzahl

$$\gamma = \frac{T_B}{T_v}$$

$T_B$  = Mittlere Wellenperiode in der Brecherzone

$T_v$  = Mittlere periodische Schwankung der Brandungsströmung

definiert. Am Beispiel von Meßwerten während der Sturmflut vom 6./7. 11. 1973 wurde ein nahezu linearer Zusammenhang entdeckt (Abb. 6); die Periodenkennzahl  $\gamma$  steigt mit

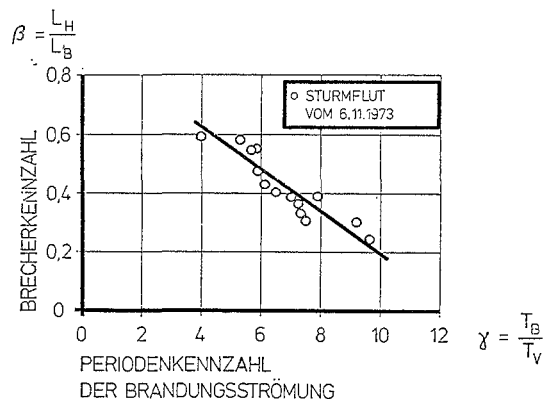


Abb. 6. Brecherkennzahl in Abhängigkeit von der Periodenkennzahl der Brandungsströmung

abnehmender Brecherkennzahl  $\beta$ , einer von FÜHRBÖTER (1974) vorgeschlagenen quantitativen Brecherklassifikation, die angibt, auf welcher horizontalen Strecke die Brandungsenergie zu 75 % umgewandelt wird. Je schmaler die Zone der Energieumwandlung wird, desto kleiner wird auch die mittlere periodische Schwankung der Brandungsströmung.

## 7. Zusammenfassung

Durch den Einsatz von elektronischen Meßgeräten mit einer hohen Zeitauflösung konnten makroturbulente Formationen im Verlauf der Brandungsstromgeschwindigkeiten aufgedeckt werden. Bei den Untersuchungen in der Brandungszone vor Sylt wurde eine beachtliche zeitliche Veränderlichkeit der Brandungsströmung mit Variationskoeffizienten zwischen  $C_v = 400\%$  bei den kleinsten und  $20\%$  bei den höchsten mittleren Geschwindigkeiten von  $\bar{v}_L = 1,5$  m/s sowie ein Auftreten von bis zu 9 periodischen Schwankungen innerhalb einer Wellenperiode festgestellt. Entgegen bisherigen experimentellen und theoretischen Untersuchungen können die Brandungsströmungen nicht länger als stationäre oder quasi-stationäre Strömungen, die vorwiegend durch Mittelwerte beschrieben werden können, angesehen werden.

## 9. Schriftenverzeichnis

- BÜSCHING, F.: Über Orbitalströmungen irregulärer Brandungswellen. Mitt. des Leichtweiss-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, Heft 42, 1974.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsbeobachtungen vor Westerland/Sylt. Mitt. des Leichtweiss-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, Heft 40, 1974a.
- DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS-Zahlen. Mitt. des Leichtweiss-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, Heft 41, 1974b.
- DETTE, H. H., FÜHRBÖTER, A.: Field Investigations in Surf Zones Proceedings 14th Coastal Eng. Conference Copenhagen, Dänemark, Vol. I, 1975.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Bedeutung des Lufteinschlages für die Energieumwandlung in Brandungszonen. a) Mitt. des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover, Heft 36, 1971, b) Die Küste, Heft 21, 1971.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. des Leichtweiss-Instituts der Technischen Universität Braunschweig, Heft 40, 1974.
- FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., KRAMER, J., SCHWITTERS, J., SINDERN, J.: Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung. Die Küste, Heft 23, 1972.
- GALVIN, C. J.: Wave Breaking in Shallow Water in "Waves on Beaches" edited by R. E. Meyer, Academic Press. Inc. New York and London, 1972.
- GUTSCHE, H.: Über den Einfluß von Strandbuhnen auf die Sandwanderung an Flachküsten. Mitt. des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover, Heft 20, 1961.
- HENSEN, W.: Modellversuche über den Strandabbruch an den Enden von befestigten Küstenstrecken - Lee-Erosion. Mitt. des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover, Heft 10, 1957.
- KAZANSKIJ, J.: Zur Turbulenzstruktur von Feststoff-Wasser-Strömungen in Rohrleitungen. Mitt. des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover, Heft 37, 1972.
- LAMPRECHT, H. O.: Brandung und Uferveränderungen an der Westküste von Sylt. Mitt. des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover, Heft 8, 1955.
- PUTNAM, J. A., MUNK, W. H., TRAYLOR, M. A.: The Prediction of Longshore Currents. Trans. Americ. Geophys. Union, Vol. 31, 1949.
- SONU, C. J., MC. CLOY, W. H., TRAYLOR, M. A.: Longshore Currents and Nearshore Topographics. Proceedings 10th Coastal Eng. Conference, Vol. I, 1967.
- VELIKANOV, M. A.: Dinamika ruslovogo (Die Dynamik der Strömungen in Flüssen). Leningrad, UdSSR, 1949.
- ZAUSIG, F.: Veränderungen der Küsten, Sände, Tiefs und Watten der Gewässer um Sylt nach alten Seekarten, Seehandbüchern und Landkarten seit 1585. Geologie der Meere und Binnengewässer, 3. Band, Berlin, 1939.