

## **Können kleinmaßstäbliche Versuche mit bewegter Sohle zum Verständnis hydromechanischer Transportprozesse beitragen?**

### **Kurzfassung**

Im Rahmen einer Grundlagenstudie zur Wirkung einer getauchten, horizontalen Platte als Wellenbrecher sollten auch Aussagen über den möglichen Einfluß des geänderten Strömungsregimes auf die Sedimenttransportkapazität getroffen werden. Die hydrodynamische Wirkungsweise der getauchten Platte wurde zuvor in einer kleinen, institutseigenen Wellenrinne ( $B=0,30$  m,  $d=0,30$  m,  $L=24,0$  m) ausführlich untersucht. Der Einsatz eines derartigen Wellenbrechers/-filters in der Natur erfordert zusätzliche Untersuchungen hinsichtlich der Beeinflussung der morphodynamischen Prozesse im Strömungsumfeld der Platte und in dem eigentlich vor Wellenangriff zu schützenden Küstenbereich. Demzufolge war zunächst zu klären, ob Versuche mit einer bewegten Sohle überhaupt sinnvolle Ergebnisse liefern können. Die Wirkungsweise eines Plattenwellenbrechers weist folgende veränderte hydrodynamische Randbedingungen auf: signifikante Änderung der Wellenspektren vor und hinter der Platte, ein kräftiger, nach unten gerichteter Strahl tritt an der Hinterkante der Platte auf und unterhalb der Platte stellt sich eine pulsierende Strömung ein. Das für diese Untersuchungen gewählte synthetische Sohlenmaterial soll auf diese Mechanismen in einer angemessenen kurzen Versuchszeit reagieren, eine gute Verzahnung des Schüttkörpers gewährleisten, um einen ausreichenden Widerstand gegenüber brechenden Wellen zu erzielen und zum anderen eine annehmbare Sinkgeschwindigkeit aufweisen, um eine suspensionsbedingte Verdriftung im Strömungsumfeld der Platte zu verhindern.

### **Abstract**

#### **Are small-scale modelling tests with a movable bed able to contribute to the understanding of the hydro- and morphodynamic processes?**

In the context of the basic studies for the effects of a submerged, horizontal plate as a breakwater fundamental analysis about the possible influence of the modified flow regime on the sediment transport capacity are also made. The attempts for the determination of the hydrodynamic effect of the plate have already been executed in a small wave flume ( $B=0,30$  m,  $d=0,25$  m,  $L=24$  m). Therefore, first experiments had to clarify whether tests with a movable bed can deliver useful results at all. For a model-technical figure of such transport

processes one has to consider apart from the usual demand after *Froude's* similarity still another record of grain refer, dimensionless parameter.

First the hydrodynamic behaviour of the changed flow field was examined by dyeing, laser light sheets and velocity measurements. The following mechanisms, which could cause a modification, were identified: a strong, downward plunging jet steps at the rear edge of the plate and underneath the plate a strong pulsating current can be produced. These modifications in the local environment of the plate produce mainly shear stresses at the bed. Further, the wave spectra differ before and behind the plate significantly. These effects show up mainly in the far field, i.e. in the direct beach zone, where impulse, lift and friction interactions take place. The bed material should indicate therefore the following characteristics: it shall produce a sufficient compaction of the material body in order to create a resistance in relation to breaking waves, to achieve small grain density for faster response times and reaction to smaller shear stresses as well. A sufficient rate of falling speed of the grain shall prevent drifting in suspension.

## 1 Einleitung

Das Ziel dieser Modelluntersuchung war es, mögliche Effekte auf den Strandumlagerungsprozeß, die durch eine getauchte Platte als Wellenbrecher vor dem Strand verursacht werden könnten, zu studieren. Die Experimente sollen zudem das Verständnis für die hydrodynamischen Vorgänge und die auftretenden Kräfte verbessern. Die Simulation einer Strandprofilentwicklung in einem kleinmaßstäblichen, physikalischen Modell mit beweglicher Sohle wird durch eine Reihe von Einschränkungen stark erschwert. Das eingesetzte Sohlmaterial muß so gewählt werden, daß es auf die im Modell auftretenden hydrodynamischen Kräfte reagieren kann. Die dabei hinzunehmenden „Scaling-Effekte“ sind für Transportprozesse bei weitem nicht so gut untersucht wie für Modelle mit fester Geometrie. Neben der Reproduzierbarkeit stellt die Überprüfung der Konsistenz der Versuchsreihe ein wesentliches Hilfsmittel zur Bewertung der Ergebnisse dar. Typische Beispiele von zweidimensionalen Küstenmodellen mit beweglicher Sohle umfassen Studien der Strandprofilentwicklung, des Verhaltens von geschütteten Wellenbrechern sowie der Verdriftung durch gerichtete Strömungen. Die meisten dieser Studien sind in großen Wellenrinnen oder in Behältern mit oszillierender Strömung durchgeführt worden. Untersuchungen in kleinen Wellenrinnen liegen kaum vor.

Im Gegensatz zu Naturnachbildungen können für grundlegende Untersuchungen genutzte physikalische Modelle derart vereinfacht werden, daß die Antworten des Systems für eine Vielzahl von unterschiedlichen hydrodynamischen Bedingungen teilweise getrennt abgeleitet werden können. Diese Daten können dann dazu verwendet werden, um theoretische oder empirische Vorhersagen für die

Abhängigkeit zwischen den Strömungseigenschaften und der jeweiligen Systemantwort zu entwickeln oder zu überprüfen. Ziel dieser Experimente sind vornehmlich die kurzzeitlichen Umlagerungsprozesse, die durch eine horizontale, getauchte Platte verursacht werden. Folglich stand die Ermittlung der möglichen Gleichgewichtsprofile im Mittelpunkt der Untersuchung.

## **2 Die getauchte horizontale Platte als Wellenschutzbauwerk**

Eine starre, horizontale Platte als Wellenbrecher hat gegenüber herkömmlichen Konstruktionen einige Vorteile. Die Durchlässigkeit der Konstruktion gewährleistet den ökologisch erforderlichen Austausch der Wassermassen und kann bei ruhiger See von kleinen Booten frei passiert werden. Die Wirkungsweise der Konstruktion bezüglich der Wellen-Transmission und Reflexion unterscheidet sich von den herkömmlichen Strukturen und wird als „Wellenfilter“ bezeichnet. Dieser Effekt wurde von mehreren Wissenschaftlern experimentell oder numerisch untersucht (Dick, 1968; Dattari et al., 1977; Guevel et al., 1985; Kojima et al., 1990;). Am IGAW hat Graw (1993) über die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeiten berichtet und darauf aufmerksam gemacht, daß sich die in der Literatur angegebenen Transmissionskoeffizienten erheblich voneinander unterscheiden. Er macht dafür das bisher unvollkommene Verständnis über die Strömungsverhältnisse in unmittelbarer Umgebung der Platte verantwortlich. Der Energietransport, das Auftreten einer pulsartigen Strömung unterhalb der Platte sowie die Erzeugung von Wirbeln und Turbulenzen an den Kanten ist bisher nur wenig untersucht worden. Experimentelle Untersuchungen über eine mögliche Veränderung der Sedimenttransportkapazität sind gänzlich unbekannt.

## **3 Modellaufbau und Versuchsablauf**

Die Versuche zur Bestimmung der Veränderung des Strömungsregimes und der Sedimenttransportkapazität im Nachlauf der getauchten Platte wurde mit monochromatischen Wellen im Labor des Instituts für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen (IGAW) der Universität Wuppertal durchgeführt. Die Wellenrinne ist 24 m lang, 0,3 m breit und 0,5 m hoch. Die Wassertiefe wurde zu  $d=0,25$  m eingestellt. Für die hier dargestellten Experimente wurde die folgende Konfiguration gewählt: Plattenlänge  $l=0,40$  m, Tauchtiefe  $t=0,045$  m, Wellenhöhe  $H_1=0,03$  m, Wellenfrequenz  $f=1,0$  Hz (siehe Bild 1). Die Strömungssichtbarmachung im Bereich der Plattenhinterkante sowie die Strandprofilaufnahmen wurden mit einer Digitalkamera aufgenommen und anschließend über eine Bildverarbeitungskarte via PC weiterverarbeitet.

Eine mögliche Skalierung auf den Naturmaßstab sollte die folgenden Überlegungen beinhalten: Die für die Fragestellung wesentlichen Größen sind die

Trägheitskraft sowie die bei Flüssigkeitsbewegungen mit freier Oberfläche immer maßgebende Schwerkraft. Weiterhin treten Reibungskräfte in unterschiedlicher Form in Erscheinung, wobei der Einfluß der viskosen Reibung in der Regel als gering angenommen wird. Eine ausführliche Diskussion über dynamische Ähnlichkeiten findet man zum Beispiel bei Kaldenhoff (1992) oder Kobus (1980). Aus einer Analyse der Kraftverhältnisse, aus denen sich zum Beispiel die *Froude-* oder *Reynolds-Zahl* ergeben, erkennt man leicht, daß eine vollständige Ähnlichkeit nur für Prototypen möglich ist. Für ein spezielles Problem kann aber oftmals ein überwiegender Einfluß eines Verhältnisses bestimmt werden, der dann den Modellmaßstab vorgibt. Bei Wellenbewegungen ist die maßgebende Kennzahl die *Froude-Zahl*. Ihre Wahl bedeutet daher eine Verletzung der viskosen Reibung. Neben der hydrodynamischen Ähnlichkeit der Strömung müssen auch Ähnlichkeitsbedingungen für die Verhältnisse des Sedimentkornes berücksichtigt werden. Dies führt in analoger Weise auf eine kornbezogene *Reynolds-Zahl*, eine densimetrische *Froude-Zahl* sowie auf die Kennzahlen der relativen Dichte und einer charakteristischen Länge, die entweder mit der Wassertiefe oder der signifikanten Wellenhöhe gebildet werden kann. Vergleichbare Sätze von Kennzahlen finden sich bei Kamphuis (1985) oder Dalrymple (1989), der die sogenannte *Dean-number* einführte. Bei Problemen in der Strandzone mit Wellenbrechen sollte die Skalierung als Bezugsgeschwindigkeit statt der Schubspannungsgeschwindigkeit besser die Wellengeschwindigkeit berücksichtigen (Kamphuis (1991)).

Für die hier vorgestellten Versuche sollte die Transformation der Wellen besonders untersucht werden. Die Einflüsse aus der Strahlbildung und den Wirbeln an den Plattenkanten sowie der pulsierenden Strömung sollen einer anderen Versuchsreihe vorbehalten bleiben. Aus diesem Grund wurde die Platte relativ weit von dem Strandbereich entfernt installiert.

Da die generelle Klärung der hydrodynamischen Prozesse und nicht die Umlagerungsrate selbst im Vordergrund stand, sollten zu Gunsten einer kürzeren Versuchszeit schnellere Reaktionszeiten zugelassen werden. Das verwendete Kornmaterial sollte daher so leicht wie möglich sein, aber im Bereich der Brecherzone eine ausreichende Stabilität aufweisen. Aus Vorversuchen ergab sich, in Übereinstimmung mit Noda (1972), eine Mindestdichte des Materials von  $\rho=1,4 \text{ g/cm}^3$ . Der Korndurchmesser wurde mit  $D=2 \text{ mm}$  relativ groß gewählt, um eine ausreichende Fallgeschwindigkeit zu erreichen, die sicherstellt, daß das Material nicht in Suspension verdriftet. Die Fallgeschwindigkeit des Einzelkornes beträgt  $\omega=0,1 \text{ m/s}$ , was bedeutet, daß ein aufgewirbeltes Korn in der Regel den Boden wieder erreicht, bevor die nächste Welle auf den Strand auftrifft.

Durch die Wahl dieses grobkörnigen Materials bedingt, kann nicht erwartet werden, daß detaillierte Strukturen wie Bermen, Rippel oder Barren bei der Strandbildung nachgebildet werden. Diese Strukturen werden bei oszillierender Strömung in kleinmaßstäblichen Modellen typischerweise leicht „weggewaschen“. Weiterhin können Prozesse wie ein Strandzuwachs oder eine durch Perkolation hervorgerufene Auflockerungen oder Setzungen nicht nachgebildet werden. Schließlich sollte noch erwähnt werden, daß erodierte Partikel unter Umständen durch die Oberflächenspannung am Zurücksinken gehindert werden und verdriften können.

#### 4 Exemplarische Ergebnisse

In den Bildern 3 und 4 wird das Auflaufen einer typischen Welle auf den Strand im Laborgerinne gezeigt. Bild 3 zeigt die Verhältnisse einer ungeschützten Böschung, während in Bild 4 die gleiche Welle nach Passieren der Platte in transformierter Form zu sehen ist. Die ungeschützte Böschung wird durch die Welle mit ihrer ursprünglichen Höhe erheblich belastet, insbesondere zeigt das Bild 3b in Suspension befindliches Material beim Vorgang des Wellenbrechens. Das durch die Platte geschützte Strandprofil wird wesentlich weniger belastet. Auf Bild 4 ist zu erkennen, daß in diesem speziellen Fall sowohl die Wellenhöhe stark reduziert ist, als daß sich auch die Wellenperiode verändert hat. Graw (1995) vermerkt, daß die Wellentransformation der generierten Welle durch die Platte nicht nur die Wellenhöhe, sondern auch die Energieverteilung merklich beeinflusst. In Bild 2 werden experimentell bestimmte Transmissionskoeffizienten  $c_i$  in ihren Fourierkomponenten für zwei Plattenkonfigurationen und verschiedene Wellenfrequenzen dargestellt. Die minimale Energietransmission tritt offensichtlich gekoppelt mit einer Dekomposition der Initialwelle auf.

Wie auch van Gent (1993) beschreibt, ist die Art und Weise, wie die Welle auf den Strand aufläuft und wie dabei die Geschwindigkeitsverteilung unterhalb der Welle ist, ausschlaggebend für den Transportprozeß im Strandbereich. Die Bilder 5 und 6 zeigen die zeitliche Strandentwicklung ausgehend von einer geraden Böschung (mit einer Neigung von 1:2) für einen ungeschützten bzw. durch eine Platte geschützten Strand. Die Unterschiede im Strandprofil sind nach einer intermittierenden Belastung mit einer Gesamtdauer von  $\Delta t=300$  s bzw.  $\Delta t=450$  s deutlich zu erkennen. Nach dieser Zeit ist in beiden Fällen ein dynamisch stabiles Gleichgewichtsprofil entstanden. Während der Abtrag im oberen Bereich der Böschung in beiden Fällen eine ähnliche Größenordnung erreicht, ist die Verfrachtung des sedimentierten Materials in den unteren Teil der Böschung recht unterschiedlich. Dies ist hauptsächlich durch den unterschiedlichen Tiefgang der Wellen und die unterschiedlichen Orte des Wellenbrechens bedingt. Prinzipiell kann der Umlagerungsvorgang so beschrieben

werden, daß das Material solange verfrachtet wird, bis sich an allen Stellen ein Minimum der Belastung einstellt. Das erodierte Material kommt erst an einer Stelle zur Ruhe, an der die angreifenden Kräfte nicht mehr in der Lage sind das Korn aus seinem Verbund zu lösen. Das Profil erreicht einen Gleichgewichtszustand. Der Bereich in dem Wellen brechen, weist ein ausgesprochen flaches Profil auf, während die Böschung vor der Brecherzone nur durch die oszillierende Bewegung beansprucht wird. Je kleiner die Orbitalbahnen am Boden ausfallen, desto steiler kann sich die Böschung ausbilden, die eine parabolische Form annimmt. Die Ausbildung eines S-förmigen Profils ist typisch für die Umlagerungsprozesse von grobkörnigem Material. Das generelle Verhalten des eingesetzten Materials ähnelt somit durchaus einigen in der Natur anzutreffenden Formationen, insbesondere aber dem Verhalten von geschütteten, grobkörnigen Wellenbrechern mit Bermen (vgl. van Gent (1993)).

Die Transformation der Wellen in höherfrequente und kleinere Wellen führt dazu, daß diese viel weiter in den Strandbereich einlaufen können und wesentlich später brechen. Somit ist zu erklären, warum zwar der unmittelbare Strandbereich in beiden Fällen einer Erosionstätigkeit ausgesetzt, das erodierte Material aber unterschiedlich weit in den „Offshore-Bereich“ abtransportiert wird. Die steil abfallende Böschung unterhalb der Brecherzone wird kaum noch durch Wellen belastet und bleibt recht stabil. Daraus kann geschlossen werden, daß das Korngerüst insgesamt weniger aufgelockert wird und eine geringere Sedimenttransportkapazität vorliegt. Demzufolge sollte der Einsatz einer getauchten, horizontalen Platte als Wellenbrecher vor erosionsgefährdeten Strandabschnitten weiter verfolgt werden. Für eine Quantifizierung der Wirkung werden weitere, vorzugsweise großmaßstäbliche Versuche empfohlen.

## **5 Zusammenfassung**

Für kleinmaßstäbliche Modellversuche mit beweglicher Sohle wurden die hydrodynamischen Vorgänge und die Sedimenttransportkapazität im Einflußbereich einer getauchten horizontalen Platte als Wellenbrecher vor einem Strandprofil untersucht. Das gewählte Kornmaterial reagiert sehr schnell und ist sensibel auch gegenüber geringer Schubspannung. Auf der anderen Seite reicht das Gewicht und die Größe des Korns aus, um eine genügend große Verzahnung und Kompaktheit der Böschung zu erzeugen. Weiterhin stellt sich mit dem Material unabhängig von der Ausgangslage in Abhängigkeit von dem Wellenangriff immer das gleiche Gleichgewichtsprofil ein, welches typisch für grobkörniges Material ist. Diese Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse und die sehr kurze Versuchsdauer machen das gewählte Material für Grundlagenstudien und Untersuchungen von Systemvarianten äußerst attraktiv. Die Ergebnisse vermitteln einen sehr guten Einblick in die hydrodynamischen Vorgänge und

können somit als zusätzliche Hilfe - vergleichbar mit der Technik der Strömungssichtbarmachung - eingestuft werden.

Die getauchte horizontale Platte als Wellenbrecher weist eine gute Wellendämpfung auf und erreicht bei bestimmten Frequenzen Transmissionsraten von kleiner als 30%. Die Dekomposition der Wellen in kleinere und höherfrequente Anteile verändert das Wellenklima, so daß die Brecherzone näher an den Strand heran rückt. Die Desintegration des Korngerüsts im Brandungsbereich wird deutlich reduziert, und der Böschungskörper weist eine stabilere Lagerung auf. Insgesamt darf erwartet werden, daß der Einsatz einer getauchten, horizontalen Platte positive Effekte für den Küstenschutz bringen könnte.

Es darf allerdings nicht übersehen werden, daß die unvermeidbaren Skalierungseffekte eine quantitative Analyse erschweren und eine Aussage über den Zeitmaßstab nicht zulassen. Die Einordnung des gewählten Modellaufbaus bezüglich seiner Aussagekraft liegt daher zwischen denen einer reinen Messung der hydrodynamischen Größen an einem Modell mit Festbett und einem großmaßstäblichen Modell zur Bestimmung der Sedimenttransportrate.

## 6 Literatur

- [1] Dalrymple, R. A. 1989. „Physical Modelling of Littoral Processes“, in: Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling, R. Martins, (Ed.), Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp 567-588.
- [2] Dattari, J., Jothi Shankar, J., and Raman, H. 1977. „Laboratory investigation of submerged platform breakwaters“, *Proceedings XVII IAHR Congress*, Karlsruhe, Germany, pp 89-96.
- [3] Dick, T. M. 1968. „On solid and permeable submerged breakwaters“, *PhD Thesis*, Queens University, Kingston, UK.
- [4] Gent, van M.R.A. 1993. „Berm Breakwaters -Hydrodynamics, Forces, and Profile Development-“, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 93-11. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands.
- [5] Graw, K.-U. 1993. „The submerged plate as a primary wavebreaker“, *Proceedings XXV IAHR Congress*, Tokyo, Japan, Vol. C, pp 38-45.
- [6] Graw, K.-U. 1995. „Estimation of  $C_r$ -Coefficient for the submerged horizontal plate“, *Proceedings XXVI IAHR Congress*, London, UK, Vol. 3, pp 245-250.
- [7] Guevel, P., Landel, E., Bouchet, R., and Manzone, J.M. 1985. „Le phénomène d'un mur oscillant et son application pour protéger un site côtier soumis à l'action de la houle“, *Bulletin de l'Ass. Technique Maritime et Aeronautique*, Vol. 85, pp 229-245.
- [8] Hughes, S. A. 1993. „Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering“ in: Advanced Series on Ocean Engineering - Vol. 7, Liu, P. L.-F. (Ed.), World Scientific Publishing, Singapore.
- [9] Kaldenhoff, H. 1992. „Physical Modelling - Theory and Application“, Short Course at OEC, IIT Madras, India.

- [10] Kamphuis, J. W. 1985. „On Understanding Scale Effects in Coastal Mobile Bed Models“, in: Physical Modelling in Coastal Engineering, R. A. Dalrymple, (Ed.) Balkema, The Netherlands, pp 141-162.
- [11] Kamphuis, J. W. 1991. „Physical Modelling“ in: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, J. B. Herbich, (Ed.) Vol. 2, Gulf Publishing Company, Houston, USA.
- [12] Kobus, H. (Ed.) 1980. „Hydraulic Modelling“, German Association for Water Resources and Land Improvement, Bulletin 7, Paul Parey, Hamburg, Germany.
- [13] Kojima, H., Ijima, T. and Yoshida, A. 1990. “Decomposition and interception of long waves by a submerged horizontal plate“, *Proceedings 22nd ICCE*, Delft, The Netherlands, pp 1228-1241.
- [14] Noda, E. K. 1972. „Equilibrium Beach Profiles Scale-Model Relationship“, Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Division, ASCE, Vol. WW4, pp 511-528.

Dr.-Ing. A. U. Schlenkhoff und Dipl.-Ing. T. Schlurmann  
 Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Universität-GH Wuppertal  
 Pauluskirchstraße 7, 42285 Wuppertal, igaw@uni-wuppertal.de

## 7 Abbildungen

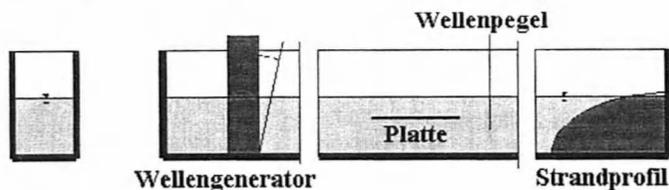


Bild 1: Längsschnitt der Wellenrinne mit Modellaufbau

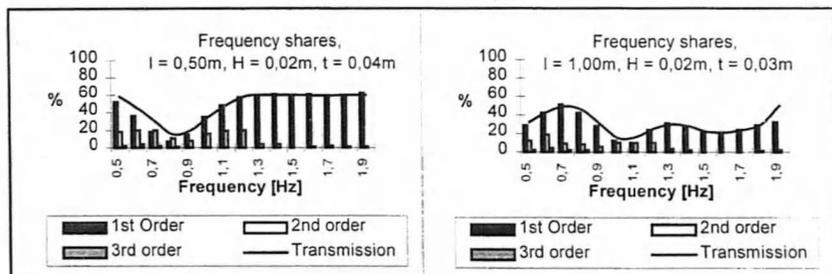


Bild 2: Transmissionskoeffizient  $c$ , [%] und Fourieranteile der dekomponierten Welle in Abhängigkeit der Frequenz; entnommen aus: (Graw, 1995);  
 $l$  = Plattenlänge,  $H$  = Wellenhöhe,  $t$  = Tauchtiefe

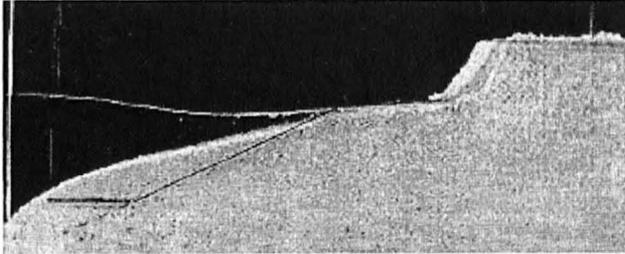


Bild 3a: Welle auf ungeschütztes Strandprofil auflaufend

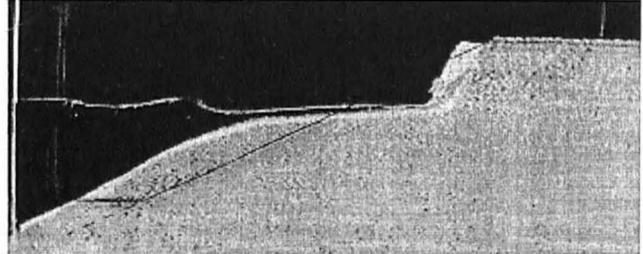


Bild 4a: Durch die Platte dekomponierte und höhenreduzierte Welle

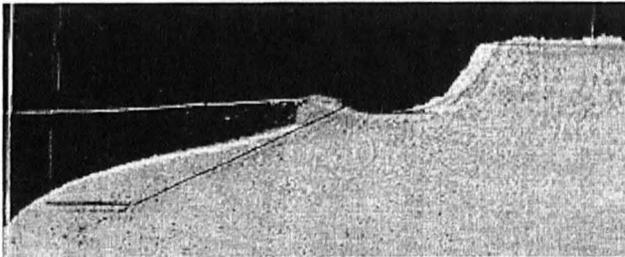


Bild 3b: Welle beim Brechen mit Sediment in Suspension

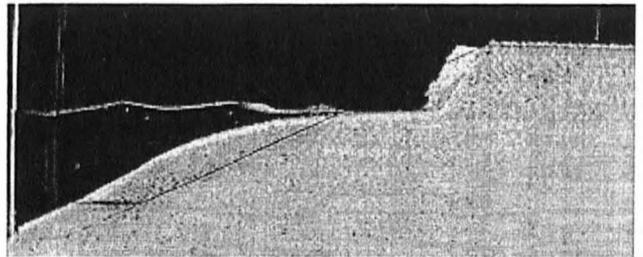


Bild 4b: Dekomponierte Welle auf geschütztes Strandprofil auflaufend

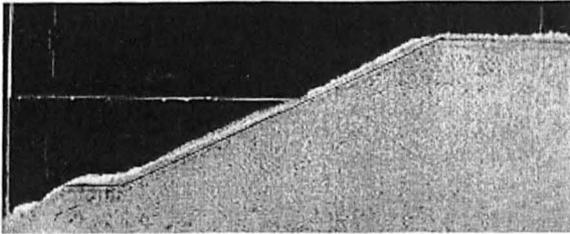


Bild 5a: Ausgangsprofil (ungeschützter Strand),  $\Delta t = 0$  s

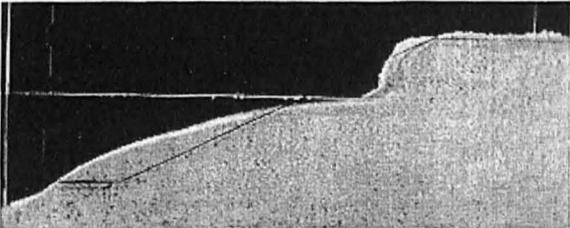


Bild 5b: Strandprofil nach einer Belastungsdauer von  $\Delta t = 300$  s

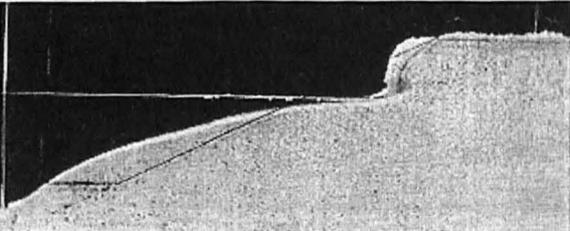


Bild 5c: Strandprofil nach einer Belastungsdauer von  $\Delta t = 450$  s

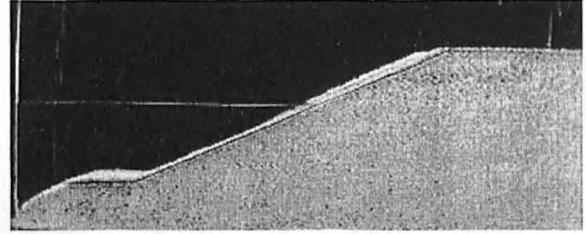


Bild 6a: Ausgangsprofil (geschützter Strand),  $\Delta t = 0$  s

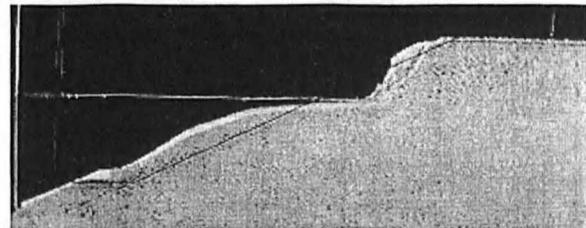


Bild 6b: Strandprofil nach einer Belastungsdauer von  $\Delta t = 300$  s

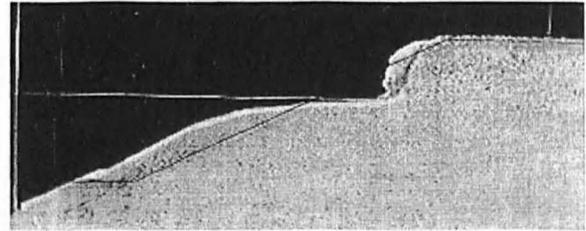


Bild 6c: Strandprofil nach einer Belastungsdauer von  $\Delta t = 450$  s