

Werk

Jahr: 1970

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 Z NAT 2148:36

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0036

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0036

LOG Id: LOG_0044

LOG Titel: Schlierenoptische Untersuchungen an seismischen Gelmodellen mit photometrischer Auswertung des Wellenfeldes

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Schlierenoptische Untersuchungen an seismischen Gelmodellen mit photometrischer Auswertung des Wellenfeldes

Von J. KOZÁK und L. WANIEK, Prag¹⁾

Eingegangen am 17. November 1969

Zusammenfassung: Es wird versucht, die schlierenoptische Methode zur Untersuchung der dynamischen Parameter elastischer Wellen in einfachen seismischen Modellen anzuwenden. Die entwickelte Schlierenapparatur ermöglicht Beobachtungen im parallelen Lichtbündel (Durchmesser 230 mm). Als Wellenquelle dient ein explodierender Draht, die Registrierung des Wellenfeldes erfolgt mit Hilfe einer Zeitlupe ($2 \cdot 10^6$ Bilder/s). Die Modellherstellung beruht auf der Anwendung dreikomponentiger Gele des Systems Wasser-Glycerin-Gelatine, die eine Geschwindigkeitsänderung der longitudinalen Wellen bis zu 25% ermöglichen.

Zur Auswertung der dynamischen Parameter der beobachteten Wellen wurde die mikro-photometrische Abmessung der Schlierenbilder angewendet. Auf Grund zahlreicher methodischer Messungen konnte eine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Schwärzung der photographischen Emulsion im Schlierenbild und der Amplitude der beobachteten Wellen bestimmt werden. Zur Zeit können einfache geschichtete Modelle hergestellt und untersucht werden. Es werden Ergebnisse über die Ausbreitung elastischer Wellen im homogenen Halbraum, im Zweischichtenmodell mit $v_2 > v_1$ und im Dreischichtenmodell mit $v_1 = v_3 > v_2$ vorgelegt.

Summary: An attempt was made to apply the schlieren method for dynamic studies of elastic waves in simple seismic models. The schlieren apparatus used made it possible to observe the elastic wave field in parallel beam of light (diameter 230 mm). The elastic waves generated by an exploding wire were recorded by a high-speed camera ($2 \cdot 10^6$ frames/s). The models were realized by three-component gels of the system water-glycerol-gelatine; this model medium enables a change of 25% in the velocity of longitudinal waves.

The dynamic interpretation of schlieren pictures is based on microphotometric analysis of the observed waves. Numerous methodic measurements made it possible to establish the relation between the optical density of schlieren pictures and the amplitudes of propagating waves. At present simple layered models can be fabricated and investigated. The results of model studies on wave propagation in a homogeneous half-space, in a two-layer model with $v_2 > v_1$ and a three-layer model with $v_1 = v_3 > v_2$ are presented.

1. Einleitung

Die bisher mit Schlierenapparaturen durchgeführten Untersuchungen über die Ausbreitung elastischer Wellen in Flüssigkeits- resp. Festkörper-Modellen führten zu guten Ergebnissen hinsichtlich Richtung der Deutung, bzw. des Beweises verschiedener Wellentypen [z. B. SCHMIDT 1939]. Die Schlierenbilder sind ein vorzügliches Hilfsmittel zur Untersuchung der Form des Wellenfeldes und können kinematisch

¹⁾ Dipl. Phys. JAN KOZÁK, Dr. LUDVÍK WANIEK, Geophysikalisches Institut der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Praha 4-Spořilov.

einfach ausgewertet werden. Die existierenden Amplitudenverhältnisse sowie der Energietransport konnten jedoch aus den Schlierenbildern bisher nur grob abgeschätzt werden.

Im Laufe der letzten Jahre wurden allerdings in anderen wissenschaftlichen Gebieten die schlierenoptischen Methoden technisch außerordentlich vervollkommenet. Eine beträchtliche Erweiterung des Beobachtungsfeldes, Erhöhung der Empfindlichkeit, Einführung neuer Erregungsquellen und leistungsfähiger Photoregistriergeräte führten zu neuen Anwendungsmöglichkeiten der Schlierenmethode in der Modellseismik.

Es konnte daher versucht werden, die schon klassische Methode von TOEPLER [1886] zur Untersuchung seismischer Modelle mit vorgeschriebener Geschwindigkeitsverteilung anzuwenden, wobei gleichzeitig besonderer Wert auf eine mögliche Auswertung auch der dynamischen Parameter der beobachteten seismischen Wellen angestrebt wurde. Diese Auswertung beruht auf der eindeutigen und linearen Beziehung zwischen dem Ablenkungswinkel und der durch die Schliere hervorgerufenen Schwärzung der photographischen Emulsion. Diese Beziehung konnte mittels methodischer Messungen für die vorgelegten modellseismischen Untersuchungen ermittelt werden, so daß die mikrophotometrische Abmessung der Schlierenaufnahmen ein Bild über die relativen Amplitudenverhältnisse im beobachteten Wellenfeld gibt.

Es ist das Ziel dieser Arbeit, die wichtigsten Merkmale der Schlierenapparatur zur Bestimmung der dynamischen Parameter des elastischen Wellenfeldes zu beschreiben. Die Ergebnisse erster Versuchsmessungen, die an Gelmodellen vorgenommen wurden, weisen zusätzlich auf Möglichkeiten und Problematik der entwickelten Modelltechnik hin.

2. Modellseismische Apparatur

Bei der Entwicklung der angewendeten Apparatur wurden folgende Aspekte beachtet. Die Apparatur sollte modellseismische Untersuchungen an Modellen mit seismologisch sinnvollen Geschwindigkeitsverteilungen ermöglichen, wobei die Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell in bezug auf Wellenlänge, Frequenz und Geschwindigkeit der untersuchten Wellen eingehalten wird. Aus dieser Forderung ergeben sich Ansprüche an Wellenquelle und Modellmedium. So muß z. B. bei einer Frequenz von 10^5 Hz das Modellmedium eine möglichst kleine Geschwindigkeit der elastischen Wellen haben, um die Dimensionen der Modelle laborfähig zu halten. In Hinsicht auf die beabsichtigte dynamische Auswertung sollte die angewendete Apparatur die Untersuchung im parallelen Strahlengang mit möglichst großem Beobachtungsfeld gestatten.

Eine weitere Forderung an die Eigenschaften der entwickelten Apparatur bestand darin, auch Nahfelduntersuchungen bei starken Modellquellen durchführen zu können. Hieraus ergibt sich die grundlegende Bedingung für die Art der Registrierung, denn solche Untersuchungen können nur mit Hilfe einer geeigneten Zeitlupe durchgeführt werden. Im folgenden sollen die Eigenschaften der entwickelten Schlierenapparatur kurz beschrieben werden.

2.1 Blockschaltbild

Das Blockschaltbild der modellseismischen Schlierenapparatur zeigt Abb. 1. Das seismische Modell 4 befindet sich im Versuchsraum zwischen dem Kollimator 1 und Fokussator 2. Das untersuchte Schlierenfeld wird in die Ebene der Schlierenblende 5, welche die durch die Schlieren abgelenkten Lichtstrahlen abschneidet, fokussiert. Die Vorsatzobjektive 6 formen das erhaltene Bild in die geeignete Größe um und konzentrieren es in die Brennebene der Zeitlupe 7, welche die zeitliche Auflösung des untersuchten Schlierenfeldes ermöglicht. Die Einstellung der Synchronisierungsparameter und des Arbeitsprogrammes der Zeitlupe erfolgt auf dem Lenkungspult 11.

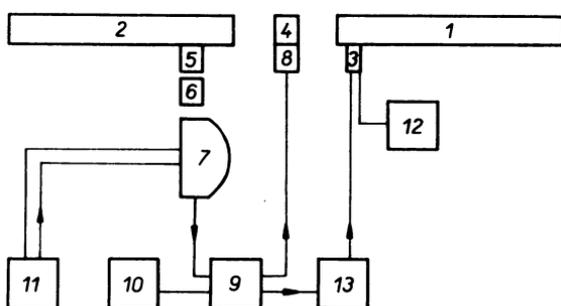


Abb. 1: Blockschaltbild der schlierenoptischen Apparatur. 1 Kollimator, 2 Fokussator, 3 Lichtquelle, 4 seismisches Modell, 5 Schlierenblende, 6 Vorsatzobjektive, 7 Zeitlupe, 8 Wellenquelle, 9 Hochspannungsgenerator, 10 Hochspannungskondensator, 11 Lenkungspult der Zeitlupe, 12 Stromversorgung der Lichtquelle, 13 Verzögerungsschaltung.

Block diagram of the schlieren device for seismic modelling. 1 collimating system, 2 focusing system, 3 light source, 4 seismic model, 5 knife edge, 6 supplementary lenses, 7 high-speed camera, 8 wave source, 9 HV-generator, 10 HV-capacitor, 11 high-speed camera control panel, 12 light source power supply, 13 delay circuit.

Die Lichtquelle 3 ist eine Impulslampe mit selbständiger Stromversorgung 12. Der Erregungsimpuls für die Lichtquelle wird vom Entladungsimpuls am Hochspannungskondensator 9 abgeleitet und wird über die Verzögerungsschaltung 13 zur Impulslampe geführt. Als Wellenquelle 8 wird die Detonation eines zwischen zwei Elektroden eingespannten Drahtes angewendet. Der zur Explosion nötige Hochspannungsimpuls entsteht durch Entladung des Hochspannungskondensators 9, der vom Hochspannungsgenerator 10 gespeist wird. Im Lenkungspult der Zeitlupe 11 sind die zur Synchronisierung nötigen Schaltungen eingebaut. Einen Gesamtblick auf die Schlierenapparatur zeigt Abb. 2.

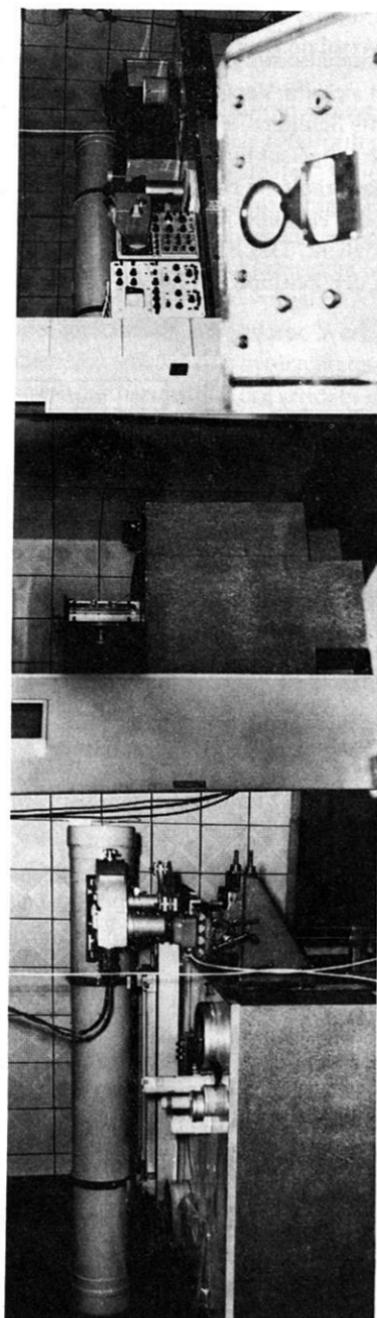


Abb. 2: Schlierenoptische Apparatur mit Versuchsraum. — Schlieren device with the cabin for model experiments.

2.2 Schlierengerät

Das Schlierengerät IAB-451¹⁾ besteht aus zwei MAKSTOV-Teleobjektiven (Durchmesser 230 mm) mit sphärischen Hohlspiegeln (Brennweite 1917 mm). Zusammen mit dem Versuchsraum (2 m Länge) beträgt die Länge der ganzen Anlage 7830 mm. Abb. 3. zeigt den Strahlengang in der Schlierenapparatur. Die von der Lichtquelle *A* ausgehenden Lichtstrahlen werden durch den Kondensator *B* in die Ebene der Blende *S*₁ konzentriert. Diese Ebene liegt im Brennpunkt des optischen Systems *L*₁ (Kollimator), welches parallele Lichtstrahlen im Versuchsraum erzeugt. Das untersuchte Schlierelement wird mit Δn bezeichnet. Das zu *L*₁ symmetrische optische System *L*₂ (Fokussator) hat den Brennpunkt in der Ebene der Schlierenblende *S*₂. Mit Hilfe des Projektionsobjektives *G* wird das Blickfeld in die Bildebene *P* abgebildet. Der durch die Schliere abgelenkte Lichtstrahl wird durch die Schlierenblende *S*₂ abgeschnitten.

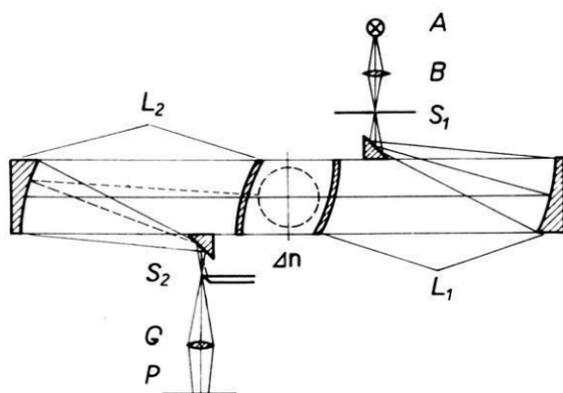


Abb. 3: Strahlengang im Schlierengerät. *A* Lichtquelle, *B* Kondensatorlinse, *S*₁ Lichtquellenblende, *L*₁ Kollimator, *L*₂ Fokussator, *S*₂ Schlierenblende, *G* Projektionsobjektiv, *P* Bildebene, Δn Schlierelement.

Ray trajectory in the schlieren device. *A* light source, *B* condenser lens, *S*₁ aperture stop, *L*₁ collimating system, *L*₂ focusing system, *S*₂ knife edge, *G* projection lens, *P* image plane, Δn schlieren element.

Als Lichtquelle *A* dient für die Einstellung der Apparatur und zur Untersuchung stationärer Schlierenbilder zunächst eine Glühbirne. Bei modellseismischen Untersuchungen wird diese durch eine Impulslampe ersetzt.

Die Blende *S*₁ ist eine veränderliche Spaltblende. Die Spaltbreite kann durch eine Mikrometerschraube von 0–3 mm mit einer Genauigkeit von 0,01 mm geändert werden. Die Spaltlänge ist stufenweise durch Vorsatzblenden im Bereich von 0,2–12 mm regelbar. Der Neigungswinkel dieser Spaltblende ist mit einer Genauigkeit von 6 Bogensekunden einstellbar. Die Schlierenblende *S*₂ (Messer) wird wiederum durch eine regulierbare Spaltblende dargestellt. Die Kantenlage senkrecht zur optischen Achse ist mit einer Genauigkeit von 0,01 mm im Bereich 0–25 mm einstellbar, die Kantenneigung von 0–360°.

¹⁾ Das Schlierengerät IAB-451 sowie die Zeitlupe SFR-2 wurden im Institut für die Physik des Erdkörpers der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in Moskau entwickelt.

2.3 Zeitlupe

Für eine visuelle Beobachtung der durch elastische Wellen erzeugten Schlierenfelder wurde eine Zeitlupe gewählt. Dieses Verfahren der zeitlichen Auflösung hat gegenüber den stroboskopischen Methoden den Vorteil, daß auch das Nahfeld starker Modellquellen (Mikroladungen brisanter Sprengstoffe, explodierender Draht) untersucht werden kann. Im Hinblick auf zukünftige Arbeiten in dieser Richtung wurden die beschriebenen modellseismischen Untersuchungen mit der Zeitlupe SFR-2 durchgeführt. Sie besteht aus der eigentlichen Kamera (mit Eingangsblenden, Eingangsobjektiven, elektromagnetischer Verschlussblende, rotierendem Spiegel, Linsenraster und photographischem Film) und dem Lenkungspult (mit Einstellung und oszillographischer Kontrolle der Drehzahl des rotierenden Spiegels, Einstellung der Verschlussdauer und Schaltungen zur Synchronisierung der Lichtquelle und Kamera). Die Zeitlupe ist mit zwei austauschbaren Systemen von Linsenrastern mit 60 und 240 Linsen ausgestattet. In Tab. 1 sind die wesentlichen Parameter der benützten Zeitlupe für das angewendete Raster mit 240 Linsen übersichtlich zusammengefaßt worden. Hier bedeutet N die Umdrehungszahl des rotierenden Spiegels pro Minute, n die Bildzahl pro Sekunde, t_{exp} die Expositionszeit eines Bildes und Δt das registrierte Zeitintervall auf 40 cm Kinofilm der Breite 35 mm.

Tabelle 1.

N Umdr./Min	n Bild/s	t_{exp} μs	Δt $\mu\text{s}/40 \text{ cm}$
$30 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^6$	1,00	240
$45 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$	0,75	180
$60 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^6$	0,50	120
$75 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^6$	0,40	96

Für die hier beschriebenen modellseismischen Untersuchungen erwies sich die Umdrehungszahl $N = 60 \cdot 10^3$ als optimal. Für eine bessere Auswertung der Schlierenbilder wurde die vorhandene Zeitlupe dahingehend verändert, daß der Zeitabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern $4 \mu\text{s}$ beträgt. Für jeden Versuch stehen damit bei einer Filmlänge von 40 cm 30 Schlierenbilder zur Verfügung. Der Bilddurchmesser beträgt 8 mm. Ein Ausschnitt aus der so erhaltenen Zeitlupenregistrierung ist in Abb. 6 wiedergegeben.

2.4 Wellenquelle, Beleuchtung und Synchronisierung

Als modellseismische Wellenquelle wurde die elektrische Explosion eines dünnen Drahtes durch Entladung eines Hochspannungskondensators angewendet. Die Vorteile dieser Quelle bestehen darin, daß die erregten Wellen im Frequenzbereich 10^5 — 10^6 Hz genügend intensiv sind, daß eine gute Reproduzierbarkeit des zeitlichen Druckverlaufs vorhanden ist und daß eine Regelung der physikalischen Parameter solcher Wellen im breiten Bereich ohne Schwierigkeiten möglich ist.

Die beschriebene Einrichtung besteht im wesentlichen in der Konstruktion einer Entladungsschaltung. Der Auslösungsimpuls wird von der Zeitlupe zu einer geregelten Funkenstrecke, deren Elektroden sich knapp unter der spontanen Entladungsspannung befinden, geleitet. Durch den Durchschlag dieser Funkenstrecke wird der Hochspannungskondensator 10 (Abb. 1) mit 10 kV und $1 \mu\text{F}$ kurzgeschlossen. Dies gibt einen energetischen Hochspannungsimpuls für die Wellenquelle 8, welche aus zwei, mit einem dünnen Draht verbundenen

Elektroden besteht. Der explodierende Draht (Eisen, Durchmesser 0,1 mm, Länge 5–10 mm) ist unmittelbar am seismischen Modell angebracht und liefert eine breitbandige Modellquelle, die energetisch einer Sprengstoffladung der Ordnung 10^{-1} g gleichwertig ist [NYKL 1966]¹⁾. Die Anordnung der Wellenquelle ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. Die Energie der Detonation kann entweder durch Änderung der Entladungsspannung, resp. Kapazität des Kondensators geändert werden. Bei konstanten elektrischen Parametern erwies es sich am einfachsten, die Energie durch die Eintauchtiefe des explodierenden Drahtes im Modell zu regulieren.

Die gasgefüllte Impulsampe IFK-2 erzeugt Lichtimpulse von etwa $300 \mu\text{s}$ Zeitdauer im blauen Teil des sichtbaren Spektrums. Die Intensität des Impulses erreicht etwa nach $8 \mu\text{s}$ den Maximalwert und fällt dann sehr schwach ab. Die Lampe wird selbständig vom Netz aus durch den Block 12 gespeist, der Erregungsimpuls wird von der geregelten Funkenstrecke am Hochspannungskondensator 10 abgeleitet und wird über die elektronische Verzögerungsschaltung 13 mit stetig veränderlicher Verspätung von 0–600 μs an das Gitter der Impulsampe geführt.

Die Synchronisierung aller Vorgänge geschieht vollautomatisch vom Lenkungspult der Zeitlupe. Nach Einstellung der gewählten Drehzahl des rotierenden Spiegels wird der ganze Versuch gestartet. Zunächst öffnet sich die elektromagnetische Verschlussblende der Zeitlupe, danach folgt der Entladungsprozeß des Hochspannungskondensators mit der Explosion des Drahtes am Modell und erst danach folgt die Zündung der Impulsampe.

2.5 Modellküvette

Bei der Konstruktion der Modellküvette mußten folgende Bedingungen respektiert werden. Es sollten seismische Flüssigkeits- resp. Gelmodelle bei einem kreisförmigen Beobachtungsfeld von 230 mm Durchmesser hergestellt werden. Weiterhin sollten Diskontinuitäten bei möglichst großem Bereich des Einfallswinkels untersucht werden können und schließlich sollte die Küvette eine störungsfreie Ausbreitung der elastischen Wellen im Modell ermöglichen.

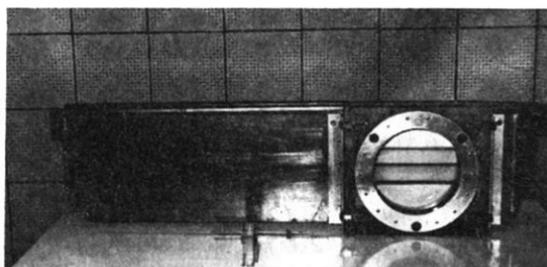


Abb. 4: Modellküvette mit Dreischicht-Gelmodell. — Model vessel with a three-layer model.

Nach mehreren Vorversuchen ergab sich am vorteilhaftesten eine Modellküvette, deren Konstruktion in der Abb. 4 gut ersichtlich ist. Sie besteht aus drei Teilen, die einfach durch Spannklemmen voneinander getrennt werden können. Die eigentliche Küvette ist der mittlere

¹⁾ Der Entwurf und die Entwicklung der Wellenquelle wurden von Herrn. Ing. F. NYKL aus dem Forschungsinstitut für industrielle Chemie in Pardubice-Semtin durchgeführt.

Teil mit kreisförmigen und schlierenfreien Glasfenstern (Dicke 20 mm, Ebenheit auf drei Newtonringe, Planparallelität auf zwei Interferenzstreifen). Der gegenseitige Abstand der Gläser wird durch drei Johannsen-Parallelendmasse (250 mm) am Gläserand definiert. Beide Gläser sind in Plexiglasplatten (Dicke 30 mm) eingefäßt und hermetisch verklebt. Im Blickfeld sind gleichzeitig zwei Distanzdrähte (100 mm) zur Entfernungsbestimmung in den Schlierenbildern angebracht.

An den beschriebenen Mittelteil können von beiden Seiten Blechküvetten verschiedener Länge angelegt werden. Zur Herstellung dieser Seitenteile wurde Messingblech (Dicke 1 mm) verwendet. Die gesamte Küvettenlänge beträgt 1200 mm bei nützlicher Modellhöhe von 320 mm.

An dieser Stelle sei betont, daß eine geringere Dicke des Modelles den Anforderungen der zweidimensionalen Modelltechnik besser entsprechen würde, nur wäre die Untersuchung der elastischen Wellen in großen Entfernungen wegen zu kleiner Energie unmöglich. Trotzdem nähert sich die angewendete Anordnung mehr dem zweidimensionalen Fall, da sich bei der gewählten Modelldicke die Reflexionen von den Küvettenwänden noch nicht störend auswirken.

3. Modellherstellung und Meßverfahren

3.1 Modellstoff

Die Herstellung schlierenoptischer seismischer Modelle mit vorgeschriebener Geschwindigkeitsverteilung bringt außerordentliche Anforderungen an die Eigenschaften des Modellstoffes. Er muß außer Durchsichtigkeit und Homogenität auch eine relativ einfache Geschwindigkeitsänderung gewährleisten. Weiterhin kommt die Bedingung, daß an der Oberfläche mit Hinsicht auf die Detonation des explodierenden Drahtes ein nicht brennbarer Stoff verwendet werden muß.

Die in der Fachliteratur beschriebenen Modelle, welche auf einer Kombination zweier Flüssigkeiten, resp. Kombination Flüssigkeit-Festkörper beruhen, stellen immer bestimmte Sonderfälle seismischer Diskontinuitäten dar [EVANS 1954, VOSAHO 1958, RAHMANN 1965]. Deshalb erwies es sich als vorteilhaft, die Methode der Herstellung seismischer Modelle, die in der Anwendung dreikomponenter Gele beruht, anzuwenden [WANIEK 1966]. Das System Wasser, organische Gelatine und Glycerin ermöglicht eine stetige Geschwindigkeitsänderung für Kompressionswellen zwischen 1480—1950 m/s, welche hauptsächlich durch das gegenseitige Verhältnis von Wasser und Glycerin bestimmt wird. Dieses Modellmedium eignet sich besonders zu Untersuchungen longitudinaler elastischer Wellen. Die Geschwindigkeit dieser Wellen ist im breiten Bereich von 0,1—2,0 MHz frequenzunabhängig. Als Nachteil kann die beschränkte zeitliche Stabilität der Gele (etwa eine Woche) angesehen werden. Schlierenoptische Untersuchungen zeigten, daß im Konzentrationsbereich 0—90% Glycerin und 3—10% Gelatine diese Gele völlig klar und durchsichtig sind und daß auch bei extremer Einstellung der Schlierenblende diese Gele schlierenlos sind. Mit wachsender Konzentration der Gelatine tritt eine stark ansteigende Tendenz zur Luftblasenbildung ein; es werden auch mehr und mehr Schlierenzen beobachtet. Aus rein meßtechnischen Gründen wurde die Bezeichnung der Gele so eingehalten, wie sie schon früher eingeführt worden ist [WANIEK 1966]. Mit A_j ist das Gel ein-

deutig gekennzeichnet, wobei der Buchstabe die Gelatinesorte, i die Konzentration des Glycerins im Wasser-Glycerin-Gemisch und j die Gelatinekonzentration bedeutet.

3.2 Modellherstellung

Die Herstellung von Gelmodellen in der Schlierenküvette ist im Prinzip dieselbe wie die Herstellung dreidimensionaler Modelle zu ultraakustischen Untersuchungen [WANIEK 1966]. Alle Modelle wurden mit konstanter Gelatinekonzentration $j = 3\%$ hergestellt. Das Gießen von Schichten ist jedoch in diesem Fall mit einer grundlegenden technologischen Schwierigkeit verbunden. Kurz nach der vollendeten Gelifizierung beobachtet man in der Nähe der Oberfläche eine stark ansteigende Verdunkelung des Beobachtungsfeldes in der Schlierenapparatur. Diese Erscheinung wird noch stärker, falls zwei Schichten mit verschiedener Geschwindigkeit hergestellt werden. Es handelt sich hier wahrscheinlich um die Auswirkung der Austrocknung resp. Diffusion an der Grenzschicht. Es wurde versucht, beide Effekte durch strenge Hermetisierung der Oberfläche zu verringern. Die besten Resultate ergaben sich mit zwei dünn aufgegossenen Nitrolackschichten, obzwar auch bei dieser Bearbeitung der Oberfläche eine 5–7 mm breite, in der Schlierenapparatur undurchsichtige Übergangszone, entsteht. Zur Zeit können deshalb nur mehrschichtige Modelle mit seismischen Diskontinuitäten I. Ordnung hergestellt werden. An der Verwirklichung schlierendurchsichtiger Modelle mit Geschwindigkeitsgradienten wird gearbeitet. Auf Grund vorläufiger Frequenzanalysen der unter denselben Versuchsbedingungen durchgeführten piezoelektrischen Messungen stellt der explodierende Draht eine breitbandige Wellenquelle mit ausgeprägtem spektralen Maximum zwischen 0,28 bis 0,33 MHz dar. Dem entspricht in Gelen eine Wellenlänge im Bereich von etwa 5–7 mm. Bei der Berechnung des Modellkoeffizienten für die Wellenlänge, bzw. der Periode wurde die Frequenz 0,3 MHz vorausgesetzt.

3.3 Meßverfahren

Nach der Herstellung des Modelles in der Modellküvette wurden modellseismische Untersuchungen bei standardisierten Parametern der Apparatur durchgeführt. In Abb. 5 ist die Anordnung bei schlierenoptischen Untersuchungen schematisch dargestellt. Hieraus ist auch die eingeführte Bezeichnung der einzelnen Parameter ersichtlich. Im Blickfeld der Modellküvette A (mit Distanzfäden 100 mm) befindet sich in der Tiefe h ein von der Wellenquelle C erregtes Schlierelement Δn . Der Einfachheit wegen sei ein Zweischichtmodell vorausgesetzt, h_1 und h_2 sind die Schichtmächtigkeiten.

Bei fester Lage der Küvette können Profilmessungen mit veränderlicher Entfernung x durchgeführt werden. Mit r wird die räumliche Entfernung des Schlierelementes von der Wellenquelle bezeichnet, x_0 ist die Bezugsentfernung zur genauen Lagebestimmung in den Schlierenbildern. Die verwendete Funkenstrecke C ermöglicht Messungen mit der Quelle an der Oberfläche, als auch direkt im Medium. Falls eine dynamische

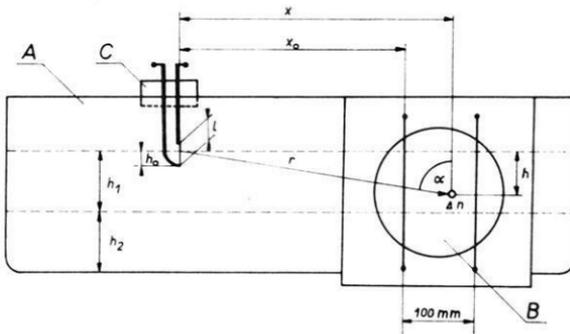


Abb. 5: Anordnung der schlierenoptischen Modellmessungen. *A* Modellküvette, *B* Blickfeld mit Distanzfäden, *C* Wellenquelle mit explodierendem Draht, Δn Schlierenelement, x Entfernung an der Modelloberfläche, x_0 Bezugsentfernung zur Bestimmung von x , r räumliche Entfernung, α Einfallswinkel, h Tiefe des untersuchten Schlierenelementes, h_1, h_2 Schichtmächtigkeit, h_0 Eintauchtiefe und l Länge des explodierenden Drahtes.

Arrangement of the schlieren device for seismic modelling. *A* model vessel, *B* field of vision with distance markers, *C* exploding wire seismic source, Δn schlieren element, x epicentral distance, x_0 reference distance, r spatial distance, α angle of incidence, h depth of the schlieren element, h_1, h_2 thickness of the layers, h_0 depth to which the exploding wire of the length l is submerged.

Auswertung der Schlierenbilder beabsichtigt wird, muß die Energie der Wellenquelle so geregelt werden, daß die Lichtablenkung an der Schlierenblende im Meßbereich der Apparatur liegt. Dies kann einfach durch verschiedene Einstellung der Tiefe h_0 des explodierenden Drahtes geschehen.

Der Abstand zwischen den Schußpunkten betrug gewöhnlich 50 mm. So konnten Untersuchungen bei veränderlichem Einfallswinkel von 9° bis 80° durchgeführt werden. Jede Messung wurde dreimal wiederholt, wobei die Messungen in der Regel von großen Entfernungen zu kleinen mit darauffolgender Wiederholung durchgeführt wurden. Die Entfernungen sowie die Angaben über Modelldimensionen haben eine Genauigkeit von $\pm 0,3$ mm. Falls eine photometrische Auswertung beabsichtigt wurde, wurde stets eine Aufnahme des Modells ohne eingeschaltete Wellenquelle durchgeführt (siehe Abschn. 4.2 und 4.3).

4. Photometrische Auswertung der Schlierenaufnahmen

Zur Auswertung der dynamischen Parameter der elastischen Wellen in den Schlierenbildern führt als einer der wenigen möglichen Wege die mikrophotometrische Auswertung. Bei sorgsamer Beachtung aller im Meßprozeß vorhandenen variablen Parameter, welche die optische Schwärzung der Schlierenbilder direkt oder indirekt beeinflussen, kann in gewissen Grenzen die grundlegende Beziehung zwischen der

Schwärzung und der Amplitude der beobachteten elastischen Welle festgelegt werden. Man muß dabei besonders beachten, daß das Schlierenbild eine elastische Welle in ihrer zeitlichen Ableitung darstellt. Im weiteren soll der Einfluß der einzelnen veränderlichen Parameter besprochen werden.

4.1 Photographische Bearbeitung

Als erster Parameter, von welchem die Schwärzung der Schlierenbilder abhängt, kann die photographische Emulsion selbst betrachtet werden. Die Auswahl des photographischen Materials wird durch die extrem kurzen Expositionszeiten sehr beschränkt. Bei Untersuchungen an Gelmodellen beträgt die Wellenlänge etwa 5 mm, so daß die Bildzahl pro Sekunde so gewählt werden muß, daß das Schlierenbild während einer Exposition höchstens um $\frac{1}{10}$ der Wellenlänge verschoben wird. In der vorliegenden Meßanordnung entspricht dieser Bedingung eine Expositionszeit von $0,5 \mu\text{s}$ (bei $n = 2,0 \cdot 10^6$ Bild/s). Es ergibt sich, daß nur höchst empfindliche Emulsionen angewendet werden können, wobei ein möglichst kleiner Schleier gefordert wird.

Es wurde die Anwendungsmöglichkeit folgender Emulsionen geprüft: ORWO NP 27, Ilford HP 3, Ilford HPS, Fomapan 30. Die besten Ergebnisse ergaben sich mit der Emulsion Fomapan 30 bei der Entwicklung im speziellen Kleinkornentwickler Fomadon. Der Schleier bei dieser Bearbeitung liegt im Bereich von 0,2–0,3 D. Bei einer Filmlänge von 1,80 m können 3 Zeitlupenaufnahmen in normalen Entwicklungsdosen bearbeitet werden. Es zeigt sich, daß bei einer sorgfältigen Standardisierung der Entwicklungszeit und Temperatur eine befriedigend reproduzierbare Schwärzung der Schlierenbilder erreicht werden kann.

4.2 Einfluß veränderlicher Apparaturparameter

Einen wesentlichen Einfluß auf die Schwärzung des Filmes haben Form und Lage der Schlierenblende. Bei der Standardisierung dieser veränderlichen Parameter handelt es sich um eine Optimalisierung gegeneinanderlaufender Abhängigkeiten. Das Bestreben nach einer maximalen Lichtintensität auf der einen Seite führt auf der anderen Seite zur Verringerung der Empfindlichkeit bei gleichzeitiger Änderung des Meßbereiches. Im Hinblick darauf, daß die Krümmung der Wellenfronten der elastischen Wellen in den untersuchten Entfernungen vernachlässigt werden kann, wurden sowohl bei der Lichtquellenblende als auch bei der Schlierenblende lineare Spaltelemente verwendet. Die von der Impulslampe abgegebenen Lichtstrahlen werden in die Ebene der Lichtquellenblende kondensiert. Bei der Einstellung auf eine Spaltblende von 1 mm (Spaltlänge 12 mm) ergab sich der maximale Meßbereich der Apparatur bei befriedigender Schwärzung der untersuchten Schlierenbilder.

Im Einklang mit den schon erwähnten Voraussetzungen wurde als Schlierenblende eine gerade Kante angewendet. Diese, das sog. Schlierenmesser, wurde in die Brennpunktebene des Fokussators angebracht, und bei eingeschobener Modellküvette die Messerkante parallel zur Lichtquellenblende eingestellt. Zur richtigen quantitativen Auswertung dynamischer Parameter der untersuchten Wellen wurde bei allen Modelluntersuchungen die Messerkante

so eingestellt, daß die Schlierenblende genau 50% der abgebildeten Lichtquellenblende abschneidet. Die genaue Einstellung der Messerkante mußte vor jeder Messung durch ein einfaches spezielles optisches Verfahren durchgeführt werden. Nur so oszilliert die Schlierenschwärzung symmetrisch um den Wert der Schwärzung des durch Schlieren ungestörten Beobachtungsfeldes. Es ist ersichtlich, daß bei optimaler Exposition diese Schwärzung etwa in der Hälfte des linearen Teiles der charakteristischen Kurve der angewendeten Emulsion liegen sollte (siehe weiter Absch. 4.3).

4.3 Mikrophotometrische Auswertung

Die mikrophotometrische Auswertung der Schlierenbilder wurde mit dem automatisch registrierenden Mikrodensitometer Mark III CS der englischen Firma Joyce und Löbl mit linearer Schwärzungsskala durchgeführt. Die Schlierenbilder der elastischen Wellen wurden entlang von Profilen senkrecht zur Messerkante photometriert; in diesem Falle ist keine Korrektur nötig. Die Breite des photometrierten Feldes wurde so gewählt, daß sie nicht mehr als $\frac{1}{3}$ des Schlierenbildes der ersten einfallenden Wellengruppe beträgt. Die Länge des photometrierten Feldes kann bei solchen Messungen beliebig eingestellt werden, wobei die einzige Beschränkung darin besteht, daß die Krümmung der Wellenfront keinen wesentlichen Einfluß haben darf. In der Regel wurde ein Rechteck mit Seitenverhältnis von 1:3 bei 10facher Vergrößerung photometriert.

Die erhaltenen Densitogramme wurden aus meßtechnischen Gründen als Entfernungsabhängigkeit der Schwärzungsdifferenz ΔD zwischen der Schwärzung¹⁾ in der Schliere und der Schwärzung des ungestörten Beobachtungsfeldes D_n aufgetragen (siehe Abb. 7). In dieser Darstellung ist die Schlierenamplitude, d. h. unter der Voraussetzung einer, von der Entfernung unabhängigen Wellenlänge, auch die Wellenamplitude dem Wert ΔD proportional. Im linearen Bereich der charakteristischen Kurve der angewendeten Emulsion ist der Wert ΔD von der Größe D_n in einem ziemlich großen Bereich unabhängig. Weiterhin bedarf diese Darstellung keiner Berichtigung auch im Falle, daß der Wert D_n im gemessenen Profil nicht genau konstant bleibt. Es sei bemerkt, daß die beobachteten Schwärzungsdifferenzen auch mit einem einfachen Mikrophotometer mit nicht linearer Schwärzungsskala bestimmt werden können, denn der Fehler einer linearen Interpolation des ΔD Intervalls liegt meistens im Bereich der Meßgenauigkeit.

Zur Zeit können die Ergebnisse der photometrischen Auswertung nur zu relativen Amplitudenuntersuchungen angewendet werden. Eine absolute Eichung der Schlierenaufnahmen besteht in der Zuordnung der gemessenen Schwärzung zu der elastischen Spannung im Modell; Untersuchungen in dieser Richtung sind im Gange und werden den Inhalt einer weiteren Veröffentlichung bilden.

¹⁾ Die Schwärzung D der photographischen Emulsion ist durch die Beziehung $D = \log I_1/I_2$ definiert, wo I_1 die Intensität des einfallenden Lichtes und I_2 des durchgelassenen Lichtes bedeutet.

4.4 Reproduzierbarkeit der Messungen

Die Reproduzierbarkeit schlierenoptischer Untersuchungen ergibt sich als Summe der Reproduzierbarkeit einzelner Parameter der Beleuchtung, der Wellenquelle, der Registrierung und der photographischen Bearbeitung (inklusive photographischer Emulsion). Die meisten der in Betracht kommenden Parameter können bei sorgfältiger Manipulation konstant gehalten werden. Relativ am schwierigsten bleibt in der angewendeten Versuchsanordnung die Einhaltung der Parameter der Exposition durch die Blitzlampe und der Synchronisierungsschaltungen.

Bei einzelnen Modellmessungen wurde stets eine Reihe identischer Versuche vorgenommen, um die resultierende Reproduzierbarkeit der schlierenoptischen Modellmessungen gleichwie der mikrophotometrischen Messungen festzustellen. Aus diesen Messungen ergab sich, daß die Reproduzierbarkeit der kinematischen Parameter im Bereich der Ablesefehler liegen, die Reproduzierbarkeit der dynamischen Parameter des elastischen Wellenfeldes kann auf Grund der bisherigen Erfahrungen auf etwa 8% abgeschätzt werden.

5. Modellseismische Untersuchungen

Die entwickelte Modelltechnik erlaubt es, vom Nahfeld aus bis in das Fernfeld einen Überblick über die Ausbreitung longitudinaler elastischer Wellen in einfachen seismischen Modellen zu gewinnen. Mit Rücksicht darauf, daß S-Wellen mit der Schlierenmethode prinzipiell nicht direkt untersucht werden können, sind die elastischen Eigenschaften der angewendeten Gele als besonders geeignet anzusehen. Das System der P-Wellen kann also in geschichteten Gelmodellen völlig ungestört verfolgt werden.

Zur Bezeichnung der einzelnen P-Wellengruppen wurde folgende Symbolik eingeführt. Die Indizes beim ersten Buchstaben *P* deuten den Wellenweg durch die verschiedenen Schichten an. So ist P_1 die direkte Welle, P_{12} , P_{123} usw. die gebrochene Welle in der 2., 3., resp. weiteren Schicht und P_{121} die Kopfwellen. Nach jeder Reflexion dieser Wellen wird ein neuer Buchstabe *P* hinzugefügt, wobei der Index bei diesem Buchstaben wieder die Schicht angibt, in der die Reflexion stattfand. Eventuell kann durch mehrere Indizes die Brechung der reflektierten Welle ausgedrückt werden. So können alle in den Schlierenbildern beobachteten Wellengruppen eindeutig gekennzeichnet werden, und zwar auch diejenigen, die an der Oberfläche nicht zu registrieren sind.

5.1 Homogener Halbraum

Insgesamt wurden 6 Einschichtmodelle zur Untersuchung der Ausbreitung elastischer Wellen im homogenen Halbraum hergestellt. Diese Modelle wurden gleichzeitig auch zu methodischen Messungen ausgenützt. Es konnten so die Reproduzierbarkeit, die Wellenform und Intensität sowie die Optimalisierung der Apparaturparameter am einfachsten bestimmt werden.

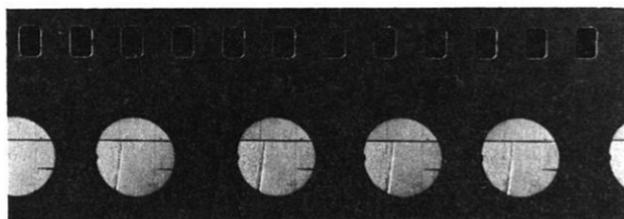


Abb. 6: Ausbreitung der longitudinalen elastischen Welle im Halbraum. Ausschnitt aus der Zeitlupenregistrierung. Zeitabstand der Aufnahmen $4 \mu\text{s}$.

P-wave propagation in a half-space. Section of the high-speed camera record. Time interval $4 \mu\text{s}$.

Als Modellmedium wurden Wasser und die Gele $0M_3$, $25M_3$, $50M_3$, $75M_3$ angewendet. Die aus Schlierenbildern ermittelten Laufzeitkurven ergaben eine gute Übereinstimmung der Geschwindigkeit mit den früher durchgeführten Ultraschallmessungen [WANIEK 1966]. Als Beispiel des bei allen diesen Messungen beobachteten Wellenfeldes dient in Abb. 6 ein Ausschnitt aus der Zeitlupenregistrierung. Die Messerkante ist dabei senkrecht zur Modelloberfläche eingestellt. Es zeigt sich, daß im ganzen Geschwindigkeitsbereich der Gele (1500–1900 m/s) das Wellenbild den gleichen Charakter hat und daß die Wellenfront im ganzen untersuchten Entfernungsbereich fast ideal zylinderförmig ist.

Die Ausbreitung der P-Welle kann durch mikrophotometrische Profilmessungen senkrecht zur Wellenfront dargestellt werden [Abb. 7]. In dieser Abbildung sind drei Schlierenbilder der direkten P-Welle im Gel $25M_3$ mit einem Zeitabstand von $12 \mu\text{s}$

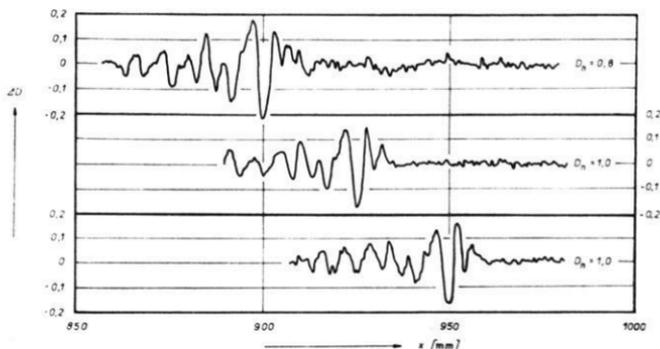


Abb. 7: Mikrophotometrische Aufzeichnung der Ausbreitung longitudinaler elastischer Wellen im Halbraum. x Entfernung, ΔD Schwärzungsdifferenz, D_n Schwärzung des ungestörten Blickfeldes.

Microphotometric record of the P-wave propagation in a half-space. x distance, ΔD difference of optical density, D_n optical density of the undisturbed field.

parallel zur Modelloberfläche in der Tiefe $h = 100$ mm dargestellt worden. Die photometrische Abbildung der fortschreitenden Welle zeigt eine gut symmetrische Oszillation um die Grundschwärzung D_n . Eine eingehende Deutung des ganzen Wellenzuges kann erst auf Grund einer Integration der Aufzeichnungen folgen (siehe Kap. 4).

In gleicher Weise kann der ganze Ausbreitungsprozeß untersucht werden. Es ist zu erwarten, daß auf diese Weise ein unabhängiger Weg zur Untersuchung der Absorption ausgearbeitet werden kann. Versuche in dieser Richtung sind im Gange.

5.2 Schicht mit erhöhter Geschwindigkeit

Seismische Gelmodelle erlauben allgemein eine eingehende Untersuchung der Vorgänge an glatten Diskontinuitäten I. Ordnung. Es können Diskontinuitäten mit dem Brechungsindex $n = v_1/v_2$ im Bereich von 0,75—1,25 hergestellt werden. Zunächst wurden 10 Modelle mit Übergang zur höheren Geschwindigkeit untersucht, wobei die Mächtigkeit der Deckschicht 3—25 Wellenlängen (15—125 mm) betrug. Die untere Schicht war minimal 20 Wellenlängen mächtig.

Als typisches Beispiel solcher Untersuchungen zeigt Abb. 8 die Ausbreitung der P-Wellen in einem Zweischichtenmodell mit $n = 0,8$, $h_1 = 40$ mm, $h_2 = 200$ mm, $v_1 = 1480$ m/s, $v_2 = 1880$ m/s. Es handelt sich um eine Zusammensetzung aus 4 Versuchen mit verschiedener Schußpunktentfernung. Im Bild a ist bei $x_0 = -34$ mm die Wellenquelle noch im Blickfeld, b entspricht bei $x_0 = -39$ mm der Situation kurz hinter dem kritischen Punkt, in c beginnt die Abtrennung der Kopfwelle ($x_0 = 100$ mm) und d zeigt die Kopfwelle schon völlig abgetrennt ($x_0 = 780$ mm). Abb. 9 gibt die mikrophotometrische Aufzeichnung des Wellenfeldes aus Abb. 8d. Um das Bild übersichtlich zu gestalten, ist das Koordinatensystem (D, x) nicht mit-eingezeichnet worden. Die zwei mikrophotometrischen Profilmessungen demonstrieren hier nur die Möglichkeit einer eingehenden dynamischen Auswertung des beobachteten Wellenfeldes, denn es kann jedes Schlierenbild in einem gewählten Linienraster mikrophotometrisch analysiert werden. Aus dem Vergleich mit dem Schlierenbild können die einzelnen Wellengruppen ohne Schwierigkeiten gedeutet werden.

Untersuchungen über die Bildung des Wellenfeldes bei verschiedener Mächtigkeit der Deckschicht sowie Untersuchungen der Amplitudenverhältnisse bei veränderlichem Brechungsindex sind im Gange und werden später veröffentlicht. Es ist weiter ersichtlich, daß die entwickelte Modelltechnik auch das Studium physikalischer Prozesse in der Nähe von seismischen Grenzflächen mit spezieller Prägung ermöglicht.

5.3 Kanal niedrigerer Geschwindigkeit

Die entwickelte Modelltechnik gibt eine außerordentlich günstige Möglichkeit, die Wellenausbreitung in Kanälen mit niedrigerer Geschwindigkeit eingehend zu untersuchen. Es konnten bisher fünf solche Modelle hergestellt werden, wobei die Mächtigkeit der Schicht mit niedrigerer Geschwindigkeit zwischen 5—12 Wellen-

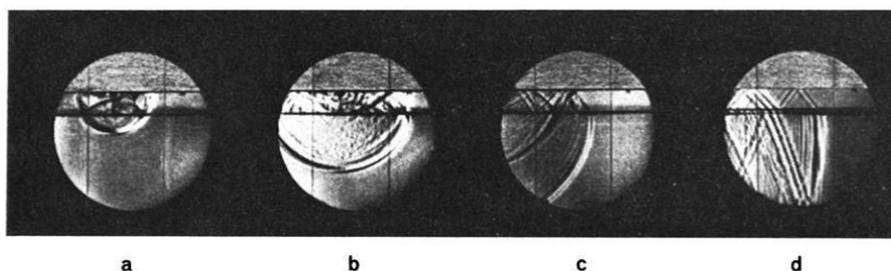


Abb. 8: Ausbreitung longitudinaler elastischer Wellen im Zweischichtenmodell mit $v_1 < v_2$.
 a) $x_0 = -34$ mm, b) $x_0 = -39$ mm, c) $x_0 = 160$ mm, d) $x_0 = 780$ mm.

Propagation of longitudinal elastic waves in a two-layer model with $v_1 < v_2$.
 a) $x_0 = -34$ mm, b) $x_0 = -39$ mm, c) $x_0 = 160$ mm, d) $x_0 = 780$ mm.

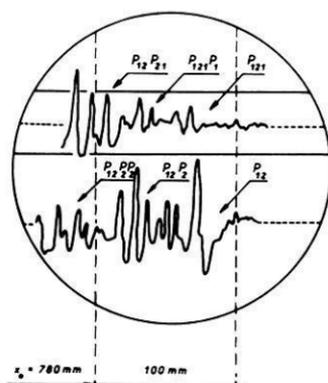


Abb. 9: Mikrophotometrische Aufzeichnung des Wellenfeldes aus Abb. 8d.

Mikrophotometric record of the wave field from Abb. 8d.

längen variiert wurde. Als Beispiel dieser Untersuchungen soll die Ausbreitung elastischer Wellen im Modell mit folgenden Parametern dienen: $v_1 = v_3 = 1860$ m/s, $v_2 = 1530$ m/s, $h_1 = h_2 = 6$ cm $\cong 10 \lambda$, $h_3 = 10$ cm $\cong 17 \lambda$, $n_1 = 1,2$, $n_2 = 0,8$.

Abb. 10 zeigt das beobachtete Wellenfeld in verschiedenen Entfernungen (x_0 zwischen 100 und 550 mm). Es handelt sich wiederum um eine Montage aus 4 Zeitlupenregistrierungen. Es ist ersichtlich, daß im Falle eines symmetrischen schwachen Kanals keine Änderungen des Wellenbildes mit wachsender Entfernung eintreten. Die Deutung der beobachteten Wellengruppen ist in Abb. 11 wiedergegeben. Die mikrophoto-

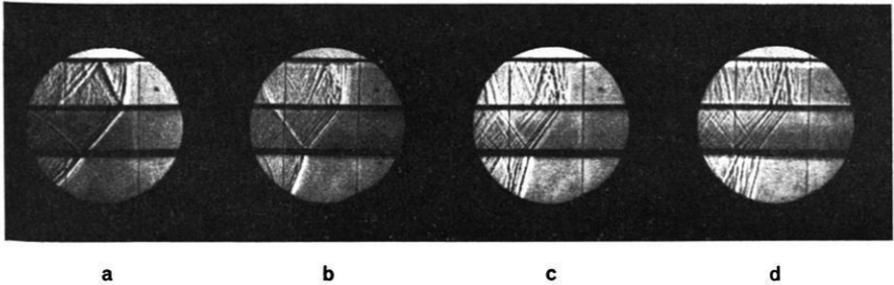


Abb. 10: Ausbreitung longitudinaler elastischer Wellen im Kanal niedrigerer Geschwindigkeit mit $v_1 = v_3 > v_2$.

a) $x_0 = 100$ mm, b) $x_0 = 250$ mm, c) $x_0 = 400$ mm, d) $x_0 = 550$ mm.

Propagation of longitudinal elastic waves in a low-velocity channel with $v_1 = v_3 > v_2$.

a) $x_0 = 100$ mm, b) $x_0 = 250$ mm, c) $x_0 = 400$ mm, d) $x_0 = 550$ mm.

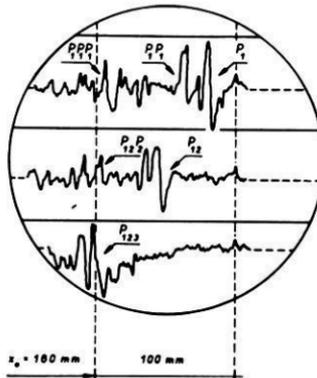


Abb. 11: Mikrophotometrische Aufzeichnung des Wellenfeldes aus Abb. 10a.

Microphotometric record of the wave field from Abb. 10a.

metrischen Profilmessungen sollen auch hier nur den Einblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen der dynamischen Parameter der beobachteten Wellen geben.

Schlierenoptische Untersuchungen der Wellenausbreitung im Kanal niedrigerer Geschwindigkeit sollen zukünftig zur Diskussion über die Dynamik elastischer Wellen unmittelbar im Medium beitragen. Abschließend soll betont werden, daß die vorgelegten Ergebnisse mehr auf die Möglichkeiten der entwickelten Modelltechnik hinweisen sollen. Eingehende Untersuchungen einzelner Parameter der beobachteten Wellen liegen außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Eine Erweiterung der modellier-

baren Geschwindigkeitsverteilungen bietet die Kombination Gel-Festkörper, eventuell Gel-Flüssigkeit. Es ist zu hoffen, daß zukünftig einfache Erdkrustenmodelle, resp. Erdmantelmodelle mit Auswertung der kinematischen und dynamischen Parameter an einem beliebigen Punkt im Medium schlierenoptisch untersucht werden können.

6. Danksagung

Für instrumentelle Ausrüstung des Labors soll an dieser Stelle den Herren Prof. Dr. M. A. SADOVSKIJ und Prof. Dr. A. S. DUBOVIK aus dem Institut für die Physik des Erdkörpers der Akademie der UdSSR in Moskau unser Dank ausgesprochen werden. Weiter möchten wir den Herren Dr.-Ing. J. MOSLER und Dr.-Ing. L. PŘÍLESKÝ aus der Technischen Hochschule in Brünn für ihre außerordentliche Hilfe bei dem Aufbau der Apparatur und für die gute Zusammenarbeit danken.

Besonderer Dank gilt unseren Mitarbeitern aus dem Geophysikalischen Institut der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften in Prag, Frau N. PICKOVÁ und Herrn J. SVÁTEK für die Hilfe bei der Ausführung und Bearbeitung der Versuche, den Herren J. KÜBELBECK, M. MALÝ und J. SÝKORA aus der Werkstatt für die gute Ausführung der erforderlichen technischen Geräte. Abschließend wollen wir für wertvolle Anregungen und Diskussionen unsere Dankbarkeit den Herren Dr. V. KÁRNÍK und Dr. J. VANĚK ausdrücken.

Literatur

- EVANS, J. F., C. F. HADLEY, J. D. EISLER und D. SILVERMAN: A three-dimensional seismic wave model with both electrical and visual observation of waves. *Geophysics*, 19, S. 220—236, 1954
- NYKL, F.: Forschungsbericht Nr. 236, Forschungsinstitut für industrielle Chemie, Pardubice-Semtín, 1966
- RAHMAN ur AZIZ: A new type of wave discovered in the schlieren photographs. *Zeitschrift für Geophysik*, 31, S. 146—158, 1965
- SCHMIDT, O. v.: Über Kopfwellen in der Seismik. *Zeitschrift für Geophysik*, 15, S. 141—159, 1939
- TOEPLER, A.: Über die Methode der Schlierenbeobachtung als mikroskopisches Hilfsmittel nebst Bemerkungen zur Theorie der schiefen Beleuchtung. *Ann. d. Phys. u. Chem.*, 127, S. 556—580, 1866
- VOSAHL, F.: Fortschritte beim Impuls-Schlieren-Verfahren, einem Hilfsmittel geophysikalischer Forschung und Praxis. *Freiberger Forschungshefte*, C 45, S. 62—67, 1958
- WANIEK, L.: The system water-glycerol-gelatine as a medium for three-dimensional seismic models. *Studia geoph. et geod.*, 10, S. 273—280, 1966
- WANIEK, L.: Fabrication and properties of three-dimensional seismic models of the upper mantle. *Studia geoph. et geod.*, 10, S. 290—299, 1966