DAS »VIBROSEIS«-SYSTEM ALS OPTIMALES LAUFZEIT-VERFAHREN

von

H. W. Maass

übereicht durch

PRAKLA und SEISMOS

Sonderdruck aus »Erdöl und Kohle · Erdgas · Petrochemie«
17. Jahrgang, Nr. 11 (1964), Seite 699 – 707

Sonderdruck aus »Erdöl und Kohle · Erdgas · Petrochemie«, 17. Jahrgang [1964], Seite 699—707

Industrieverlag von Hernhaussen KG. 2 Hamburg 11, Rödingsmarkt 24

Das „Vibroseis"-System als optimales Laufzeit-Verfahren

Von Hans-Wilhelm Maass

Das „Vibroseis"-System als optimales Laufzeit-Verfahren

Von Hans-Wilhelm Maass)*

Vortrag, gehalten auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Mineralölwissenschaft und Kohlechemie in Köln am 9. Oktober 1964

Zusammenfassung: Das „Vibroseis"-System ist der Prototyp von Laufzeit-Verfahren, bei denen die Erkenntnisse der Informationstheorie optimal ausgenutzt werden. Für die Verbesserung des Nutz/Stör-Verhältnisses erweist sich neben Filtern und Summieren die bisher vernachlässigte Korrelation als besonders wirksam. Es wird die Bildung der Korrelationsfunktion und die Bedeutung des von den Vibratoren an der Erdoberfläche erzeugten elastischen Wellenzuges — des „Sweeps" — erläutert. Das „Vibroseis"-Verfahren wirkt wie ein Super-Filter, das aus den im Vergleich mit Sprengungen energieschwachen Vibrationen eine reflexionsseismische Aufzeichnung guter Qualität formt, die in der üblichen Weise weiterverarbeitet und ausgewertet wird. Die Prinzipien des ferngesteuerten hydraulischen Vibrators, der Aufnahme-Apparatur und des Magnetband-Korrelators werden kurz erläutert. Ferner werden Fotos und Meßergebnisse von einem in Norddeutschland arbeitenden „Vibroseis"-Trupp gezeigt.

The „Vibroseis"-system as an optimum travel-time method: The „Vibroseis"-system is the prototype of the travel-time methods where the knowledge of the information theory is utilized to the optimum. For an improvement of the signal to noise ratio, the correlation neglected up to now proves to be the most effective method besides filtering and summation. The forming of the correlation function as well as the importance and the effect of the „sweep" is explained. The sweep is a train of elastic waves generated by the vibrators on the surface of the earth. The „Vibroseis"-method operates like a super-filter that forms a reflection seismogram of good quality from vibrations considerably weaker than those generated by a shot. Subsequently, the records are processed and interpreted in the conventional manner. The principles of the remote-controlled hydraulic vibrator, the recording equipment, and the magnetic tape correlator are briefly described. In addition fotos and survey results are shown from a „Vibroseis"-party working in North Germany.

*) Anschrift: Dr. H. W. Maass, Prakla Gesellschaft für praktische Lagerstättenforschung GmbH, Hannover, Haarstraße 5.

Während der vergangenen zehn Jahre wurde ein neues seismisches Meßverfahren entwickelt, das in den letzten Jahren eine ständig zunehmende Verbreitung gefunden hat[1]). Es handelt sich um das „Vibroseis"-Verfahren[2,3]), das sich die Continental Oil Co. patentieren ließ. Nach dieser Methode arbeiten zur Zeit auf der Erde rd. 30 Meßtrupps. Die Nachfrage übersteigt das Angebot immer noch erheblich. Die Aufstellung weiterer Trupps wird verzögert durch die hohen Investitionskosten, die eine „Vibroseis"-Ausrüstung erfordert, und durch den Zeitbedarf für die Spezialausbildung der zum Betrieb benötigten Techniker.

In der Literatur findet man nur wenige knappe Veröffentlichungen über das „Vibroseis"-Verfahren[4,5,6]). Das liegt wohl daran, daß die an der Einführung dieser so interessanten Methode Beteiligten mit einem solchen Eifer bei der Sache sind, daß sie bisher kaum Zeit fanden, ihre Gedanken zu Papier

[1]) *M. R. Lee* u. *J. M. Crawford*, Vibroseis application becoming worldwide. Wld. Petroleum **34**, Nr. 3, 40/41 [1963].

[2]) *W. E. N. Doty* u. *J. M. Crawford*, Method and apparatus for determining travel time of signals. Am. P. 2 688 124 vom 27. 2. 1953, ausg. 31. 8. 1954.

[3]) *J. M. Crawford* u. *W. E. N. Doty*, Improvements in or relating to method of and apparatus for determining travel time of signals. Brit. P. 768 845 vom 17. 7. 1954, ausg. 20. 2. 1957.

[4]) *J. M. Crawford*, *W. E. N. Doty* u. *M. R. Lee*, Continuous signal seismograph. Geophysics **25**, 95/105 [1960].

[5]) *R. S. Finn* u. *W. O. Heap*, How vibratory seismic systems are performing. Wld. Oil **154**, Nr. 5, 108/11 [1962].

[6]) *N. A. Anstey*, Vibroseis' gentle massage obtains structural data safely, economically. Oil Gas J. **61**, Nr. 11, 110/18 [1963].

zu bringen. Außerdem durfte die weltweite patentliche Absicherung nicht durch vorzeitige Veröffentlichungen gestört werden.

Nachdem in einigen Ländern bereits Patente erteilt und veröffentlicht worden sind, läßt sich nun eine einigermaßen abgerundete Beschreibung geben. Der Mechanismus der Methode ist so kompliziert, daß er unter Verzicht auf die Sprache der Wissenschaft nicht im einzelnen beschrieben werden kann.

Glücklicherweise ist jedoch die technische Lösung schon so ausgereift, daß auch die Vorstellung eines schwarzen Kastens mit der Bezeichnung „Super-Filter", in dem die ganze Operation der Herstellung des Seismogrammes beim „Vibroseis"-Verfahren erfolgt, weiterhilft, zumal das Endprodukt mit den üblichen Methoden der konventionellen Reflexionsseismik weiterverarbeitet und ausgewertet wird. Man kann also getrost den Abschnitt Theorie überfliegen oder überspringen, ohne daß

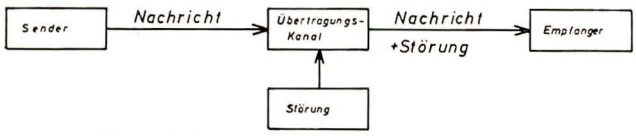


Abb. 1. Schema einer Nachrichtenübertragung

dadurch das Verständnis für das darauffolgende, die Anwendung des Verfahrens beschreibende Kapitel verlorengeht.

Theorie

Beim „Vibroseis"-Verfahren werden die Erkenntnisse eines jungen Wissensgebietes der Nachrichtentechnik, nämlich der Informationstheorie, konsequent ausgenutzt. Diese lehrt, daß es für eine Nachrichtenübertragungskette — vereinfachtes Schema vgl. *Abb. 1* — drei Möglichkeiten gibt, um das Verhältnis zwischen den Amplituden von Nachricht und Störung, das Nutz/Stör-Verhältnis, zu verbessern:

1. Filterung,
2. Summation,
3. Korrelation.

Die Nachrichtentechniker, die normalerweise eine unbekannte Nachricht aus einer unbekannten Störung heraussuchen müssen, haben es schwer, diese drei Möglichkeiten voll auszunutzen. Für eine wirksame Filterung muß der Frequenzbereich

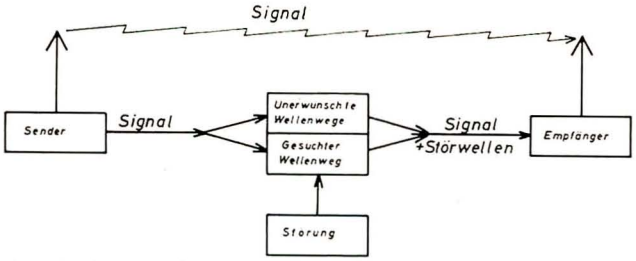


Abb. 2. Schema eines Laufzeitverfahrens, z. B. der Reflexionsseismik

der Nachricht bekannt sein, und für die Summation müssen sehr aufwendige Mehrfachsender und Mehrfachempfänger aufgestellt werden. Bei Anwendung der unter Punkt 3 erwähnten Korrelation kann nur die Autokorrelation ausgenutzt werden. Bei dieser Korrelation des Empfangssignals mit sich selbst nach Ablauf einer gewissen Verzögerung kann man jedoch nur harmonische und nicht statistische Anteile der Nachricht gegenüber einer statistisch aufgebauten Störung bevorzugen.

Bei aktiven Laufzeitverfahren, zu denen auch die seismischen Methoden der angewandten Geophysik gehören, wird ein künstlich erzeugtes Wellensignal ausgesendet. Das Signal spielt hierbei nicht die Rolle der unbekannten Nachricht, sondern es ist nur das Mittel zum Zweck. Gesucht ist der unbekannte Wellenweg, den dieses Signal durchlaufen hat, oder zunächst sogar nur die Laufzeit längs dieses Weges.

Im Gegensatz zur Nachrichtenübertragung haben die Laufzeitverfahren den großen Vorteil, daß das ausgesendete Signal am Empfangsort exakt bekannt sein kann. Da die Möglichkeiten der Korrelation bisher nur wenig geläufig waren, hat man sich um die exakte Reproduzierbarkeit des Signals nicht viel gekümmert. Die Bedingungen, die ein gut korrelierbares Signal erfüllen muß, werden später noch erläutert.

Bei den Laufzeitverfahren können demnach alle drei aus der Informationstheorie bekannten Methoden zur Verbesserung des Nutz/Stör-Verhältnisses voll ausgenutzt werden. Wie beim Schema des Laufzeitverfahrens (*Abb. 2*) angedeutet ist, kann das ausgesendete Signal per Draht, drahtlos oder auf einem Magnetband gespeichert zwischen Sender und Empfänger ausgetauscht werden.

Während die Ausnutzung der Filterung bei allen Verfahren — meistens in Form eines Bandfilters — selbstverständlich ist, wird die Summation besonders in der Reflexionsseismik mit großer Vollkommenheit angewendet: Mehrfachsender und Mehrfachempfänger mit einer bis zu vierstelligen Multiplizität, Eingangsmischung, Ausgangsmischung und Magnetband-Stapelung. Den größten Beitrag zur Verbesserung des Nutz/Stör-Verhältnisses verspricht jedoch die bisher vernachlässigte Korrelation zu liefern. Schon jetzt wird ein Verbesserungsfaktor von über 15 erreicht, d. h., das Nutzsignal kann aus einem 15mal größeren Störpegel herausgearbeitet werden.

In der Mathematik wird der Korrelationskoeffizient K — bis auf einen Normierungsfaktor — definiert als

$$K = \frac{1}{T}\int_0^T S(t)\cdot E(t)\cdot \mathrm{d}t.$$

Sind die Funktionen S und E kovariant, d. h. einander „ähnlich", so ergibt sich ein großer Wert für K; sind sie kontravariant, so wird K sehr klein. Wird K für zwei Funktionen errechnet, zwischen denen keinerlei Zusammenhang besteht, so ist das Ergebnis $K = 0$.

Zur Erläuterung der Berechnung des Korrelationskoeffizienten wurden in *Abb. 3* zwei einzelne Sinusperioden gewählt:

$$S(t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right) \text{ und } E_1(t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right)$$

Zur Berechnung von K_1 sind die zu gleichen t gehörigen Funktionswerte von S und E_1 im Bereich zwischen 0 und T miteinander zu

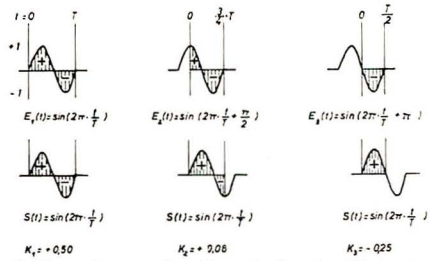


Abb. 3. Berechnung des Korrelationskoeffizienten

multiplizieren und die Produkte zu summieren. Die Integration ergibt

$$K_1 = \frac{1}{T}\int_0^T \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right)\cdot \mathrm{dt} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \sin^2 x\cdot \mathrm{d}x = \frac{1}{2}$$

Bei einer Verschiebung von E gegenüber S braucht die Integration nur innerhalb des Bereiches durchgeführt zu werden, in dem keine der beiden Funktionen gleich Null ist. So ergibt sich mit

$$S(t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right) \text{ und } E_2(t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$K_2 = \frac{1}{T}\int_0^{3/4\cdot T} \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right)\cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t + \frac{\pi}{2}\right)\cdot \mathrm{d}t = \frac{1}{8\pi}\int_0^{3\pi} \sin x\cdot \mathrm{d}x = \frac{1}{4\pi}$$

Die Verschiebung um eine halbe Periode ergibt einen negativen Wert von K. Für

$$S(t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right) \text{ und } E_3(t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t + \pi\right) \text{ wird}$$

$$K_3 = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t\right)\cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot t + \pi\right)\cdot \mathrm{d}t = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \sin^2 x\cdot \mathrm{d}x = -\frac{1}{4}$$

Wird der Korrelationskoeffizient K für variable Verschiebungsbeträge τ errechnet und als Funktion von τ betrachtet, so erhält man die Korrelationsfunktion

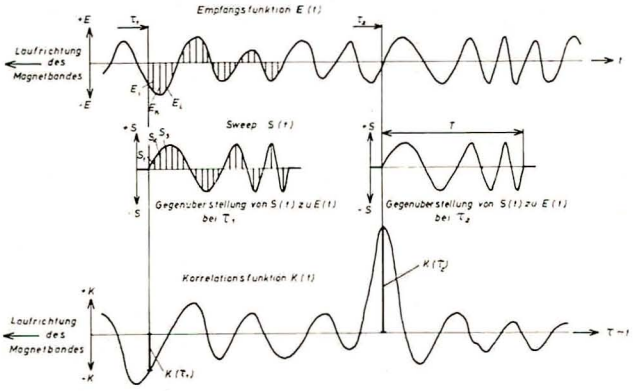
$$K(\tau) = \frac{1}{T}\int_0^{T} S(t)\cdot E(t+)\cdot \mathrm{d}t.$$

Beim „Vibroseis"-Verfahren ist $S(t)$ das Sendesignal, für das sich die Bezeichnung „Sweep" eingebürgert hat, während $E(t+\tau)$ die Empfangsfunktion und T die Zeitdauer des Sweeps darstellen. $K(\tau)$ wird auch Kovarianzfunktion genannt, da der Begriff Korrelationskoeffizient in der Informationstheorie bereits als normierter dimensionsloser Wert zwischen -1 und $+1$ definiert ist.

Dank der Magnetbandtechnik läßt sich jede Zeitfunktion speichern. Man kann sie dann in aller Ruhe betrachten, kann die Zeitachsen von Funktionen gegeneinander verschieben, kann negative Zeiten einführen.

In *Abb. 4* wird die Bildung der Korrelationsfunktion $K(\tau)$ skizziert. Relativ zu der auf einem Magnetband aufgezeichneten Empfangsfunktion $E(t)$ wird der entsprechend gespeicherte Sweep vorbeigezogen.

Wenn man sich die Zeitfunktionen $E(t)$ und $S(t)$ in konstanten Zeitabständen Δt — dieses Zeitquantum müßte für die Seismik etwa 2 Millisekunden sein — in Einzelwerte E_i, E_k, ... und S_1, S_2, ... zerlegt denkt, so ergibt sich der Einzelwert $K(\tau_1)$ der Korrelationsfunktion aus der Summe aller Produkte $E_i \cdot S_1 + E_k \cdot S_2 + \ldots$. Bei einem 6 Sekunden langen Sweep müßte man 6/0,002 gleich 3000 Einzelprodukte summieren, um einen einzigen Einzelwert K zu erhalten. Die Zeitfunktion $K(\tau)$ muß nun aber



$$K(\tau_1)\ \frac{1}{T}\cdot \sum (S_1\cdot E_i + S_2\cdot E_k + S_3\cdot E_l + \ldots)$$

Abb. 4. Korrelationsfunktion $K(\tau) = \frac{1}{T}\int_0^T S(t)\cdot E(t+\tau)\cdot \mathrm{d}t$

auch wieder in Zeitquanten von etwa 2 Millisekunden jeweils neu ausgerechnet werden. Die Durchführung dieser Operation für eine einzige seismische Spur würde bereits eine sehr große Zahl von Rechenschritten erfordern. Die digitale Momentan-Lösung dieser Aufgabe — dabei müßte auch noch jeder Amplitudenwert gequantelt werden — würde beim heutigen Stand der Technik einen erheblichen Aufwand erfordern.

Nachdem es gelungen ist, einen echten „Real-Time"-Korrelator zu entwickeln, der die sehr umfangreiche Rechenoperation nach einem Analog-Prinzip ohne Zwischenspeicherung beim Vorbeiführen der Empfangsfunktion am Sweep augenblicklich durchführt, ergibt sich eine kontinuierliche Korrelationsfunktion mit der gleichen Zeitachse wie $E(t)$, man kann also die laufende Zeitkoordinate τ wieder durch t, d. h. $K(\tau)$ durch $K(t)$, ersetzen.

In der Empfangsfunktion der *Abb. 4* ist bei τ_2 ein wieder empfangener Sweep angedeutet, der in der Korrelationsfunktion einen Maximalwert $K(\tau_2)$ ergibt. Ein eingetroffener Wellenzug — eine Reflexion bei der Seismik — ergibt also einen großen Ausschlag der Korrelationsfunktion.

Wenn man sich mit Wellenvorgängen beschäftigt, so ist man so sehr mit dem Bild der Superposition von Wellen, also der Addition, vertraut, daß das Multiplikationsverfahren der Korrelation zunächst Verständnisschwierigkeiten bereitet. Man muß sich tatsächlich die primitivsten Rechenregeln aus der Schule (Minus mal Plus sowie Plus mal Minus ergeben Minus, Minus mal Minus sowie Plus mal Plus ergeben Plus) vor Augen halten, damit man keine Denkfehler macht. So ergibt die Superposition eines Sweeps mit seinem Spiegelbild den Wert Null, während die Korrelation zu einem Maximalwert, allerdings mit negativem Vorzeichen, führt, wie es bei einer Reflexion von der Grenzfläche zwischen einem schallharten und einem schallweichen Material der Fall ist, wenn das Signal von der Seite des schallharten Materials her kommt (negativer Reflexionskoeffizient).

Der Einfluß der Zeitdauer eines Sweeps wird in *Abb. 5* mit Hilfe von Sinusperioden verdeutlicht. Ein aus drei Sinusperioden bestehender Sweep ergibt einen dreimal so großen Maximalwert der Korrelationsfunktion wie ein Sweep von einer Periode. Theoretisch ergibt ein unendlich langer Sweep einen unendlich großen Korrelationsimpuls.

Die aus dem Dreiperioden-Sweep entstandene Korrelationsfunktion zeigt Nebenmaxima, die dadurch verursacht werden, daß der Sweep aus drei identischen Kurvenstücken besteht. Ein längerer Sweep konstanter Frequenz ist also vieldeutig und damit unbrauchbar. Der dritte Sweep der *Abb. 5*, der aus Halbperioden unterschiedlicher Länge besteht, ergibt einen besser komprimierten Korrelationsimpuls.

Da bei allen Laufzeitmessungen eine scharfe und eindeutige Einsatzmarkierung erwünscht ist, muß der Sweep also möglichst lang und ein wiederholungsfreies (nonrepetitives) Signal sein, d. h., es dürfen in dem Sweep keine identischen Teilschwingungen zweimal vorkommen. Die Schärfe des Korrelationsimpulses ist proportional zur Zeitdauer und zur Frequenz-Bandbreite des Sweeps.

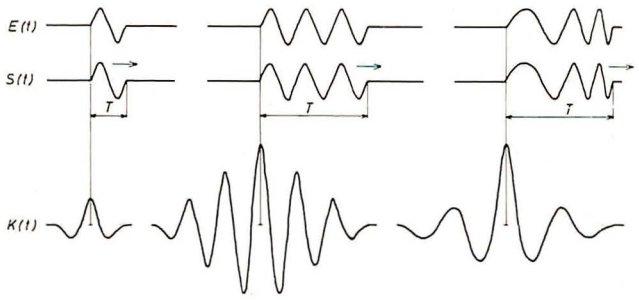


Abb. 5. Einfluß der Länge und der Bandbreite des Sweeps

Die einfachste Lösung ist ein längerer Sweep mit einer sich kontinuierlich ändernden Frequenz. Das ergibt je nach der Art der Frequenzänderung einen Auf- oder Ab-Sweep, wie er bei dem „Vibroseis"-Verfahren vorzugsweise Anwendung findet. In *Abb. 6* ist ein solcher Sweep mit konstanter Zunahme der Frequenz und konstanter Amplitude aufgezeichnet. Für die Seismik hat sich ein Sweep mit einer Dauer von etwa 7 sec bei etwa 600 Halbperioden als zweckmäßig erwiesen. Ein solcher Sweep hat also 20mal so viel Perioden wie der in *Abb. 6* skizzierte Wellenzug.

Der Frequenz- bzw. Wellenbereich hängt ab von der Aufgabenstellung, dem gewünschten Auflösungsvermögen und der Reichweite. Die „Vibroseis"-Sweeps überstreichen den seismischen Bereich von 15 bis 100 Hz, wobei ein einzelner Sweep etwa zwei Oktaven (z. B. 20 bis 80 Hz) überdeckt. Neben der unteren Sweep-Frequenz, der Bandbreite und dem Verlauf

der Frequenzänderung — z. B. läßt sich auch ein unterbrochener Sweep mit einer gewünschten Frequenzlücke aussenden — kann außerdem der Amplitudenverlauf des Sweeps der Aufgabe optimal angepaßt werden[7]).

Aus dem Vorhergehenden läßt sich ersehen, daß ein kurzer Sendeimpuls von nur einigen Halbperioden für die Anwendung von Korrelationsverfahren wenig geeignet ist. Das gilt auch für alle Impulsverfahren der Seismik: Sprengung, Fallgewicht, Bolzenschlag, Gasexplosion, Knallfunken, Hammerschlag. In der Korrelationstechnik gilt die scheinbar paradoxe Regel, daß eine Laufzeit um so genauer bestimmt wird, je länger der Wellenzug ist. Eine ähnliche Beziehung gibt es bei der *Fourier*-Transformation: Eine Impulsamplitude ist um so schärfer, je

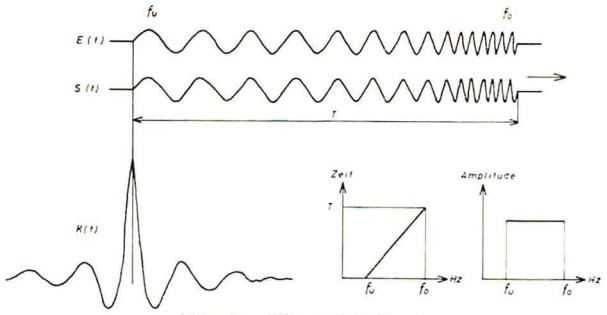


Abb. 6. „Vibroseis"-Sweep

breiter das erzeugende Frequenzband ist. Tatsächlich besteht eine enge mathematische Verwandtschaft zwischen Korrelation und *Fourier*-Transformation. Die *Fourier*-Transformierte der Autokorrelationsfunktion eines Sweeps stellt das Energie-Spektrum des Sweeps dar. Im Gegensatz zu den ins Unendliche ausgedehnten Integrationsgrenzen der *Fourier*-Integrale haben der Sweep und die Korrelationsfunktion allerdings die endliche Dauer T bzw. $2\,T$.

In der Sprengseismik hat man mit keinem überzeugenden Erfolg versucht, als wiederholbaren Kern der „Nachricht" ein *Ricker*-Wavelet zur Korrelation zu verwenden. Die unerwünschten Störungen haben nämlich z. T. ähnliche Impulsformen; sie werden dann mitkorreliert.

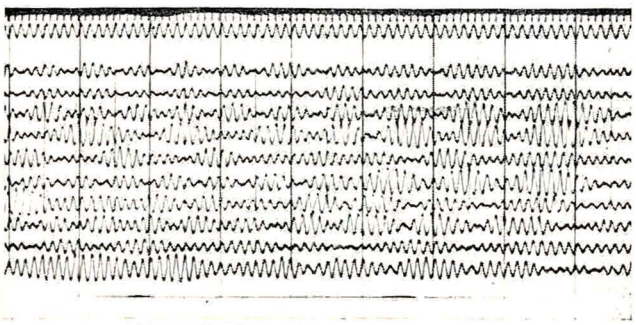


Abb. 7. Feldaufnahmen von Vibrationen

Wiederholte kurze Impulsanregungen der so vielschichtigen Erdkruste ergeben nichtkohärente Wellenzüge. Daher ließe sich nur mit dem in Sendernähe für einen einzelnen Impuls aufgenommenen Wellenzug individuell für jeden Impuls eine wirksame Korrelation durchführen, was einen großen technischen Aufwand erfordern würde. Die Verwendung einer wiederholbaren Folge von gleichen Impulsen mit stetig sich änderndem zeitlichen Abstand, also ein aus einzelnen Impulsen aufgebauter Sweep, hat in der Seismik bisher nicht zum Ziel geführt. Die fehlende Kohärenz der Impulse ist wohl die Ursache dafür.

[7]) *P. L. Goupillaud* u. *M. R. Lee*, Some theoretical aspects of the Vibroseis-system and their practical implications. Vortrag, gehalten im Oktober 1963 auf einer Tagung der Society of Exploration Geophysicists in New Orleans.

Jedes Laufzeitverfahren muß eine Zeitmarke mit einer Nullzeit haben. Auf dem zur Aufzeichnung von Vibrationen bestimmten Magnetband wird sozusagen als Erkennungsmarke der zu benutzende Sweep in einer besonderen Spur festgehalten. Bei dem Korrelationsprozeß wird dieser Sweep mit dem identisch gleichen, im Korrelator gespeicherten Sweep korreliert, was einen scharfen Auto-Korrelationsimpuls ergibt (vgl. *Abb. 6*). Die Spitze dieses Impulses markiert die Nullzeit.

Die direkte Aufnahme von Vibrationen (*Abb. 7*) hat keine Ähnlichkeit mehr mit einem Seismogramm. Man sieht nur einen Wirrwarr von Schwingungen, die durch Schwebungserscheinungen gemustert sind. Jeder Neuling ist zunächst überrascht, daß daraus nach dem Korrelationsprozeß ein Korrelogramm entsteht, das einem Seismogramm so verblüffend ähnlich ist (*Abb. 8*).

Nach der Informationstheorie muß es jedoch so sein, da die „Informationen", nämlich die Laufzeiten der vielen verschiedenen Wellenwege, ja herausgearbeitet werden. Man muß sich vielmehr wundern, daß die bisherigen seismischen Verfahren diese Information schon so relativ gut zeigen. Das Bild von der Superposition unendlich vieler seismischer Wellen, die in der vielschichtigen Erdkruste so sehr viele Wege vorfinden, ist eben richtig. Nur an einer idealen Grenzfläche zwischen zwei homogenen Medien könnte der Reflexionsimpuls in der Korrelationsfunktion gleich dem Auto-Korrelationsimpuls des Sweeps sein.

Leider werden auch die vielen in *Abb. 2* angedeuteten unerwünschten Wellenwege vom Wellen-Sweep durchlaufen. Diese vom Sender erzeugten Störungen müssen also genau so wie bei der konventionellen Seismik durch entsprechende Meßanordnungen vermindert werden.

Bei der Entwicklung des „Vibroseis"-Verfahrens wurden natürlich, wie bei zahlreichen anderen Neuentwicklungen, zunächst Umwege gemacht. So wurde anfangs mit einem kostspieligen und umständlichen optischen Korrelationsverfahren gearbeitet, bei dem ein Zwischenfilm benötigt wurde. Die Erfinder haben am Anfang wohl mehr geahnt als gewußt, welche Konsequenzen ihre Ideen haben können. Übrigens haben viele Wissenschaftler, die aus anderen Gebieten der Physik und Technik zur angewandten Seismik gekommen sind, das Gefühl gehabt, daß aus einem Seismogramm mehr Informationen herauszuarbeiten sein müßten, wenn man nur erst das richtige Prinzip anwenden würde.

Wenn das „Vibroseis"-Verfahren eine optimale Lösung von Laufzeit-Meßproblemen erlaubt, so kann man sich mit Recht fragen, ob dieses Prinzip nicht schon verwirklicht ist bei Laufzeit verfahren, wie Radar und Sonar, die im Brennpunkt wirtschaftlicher und militärischer Interessen stehen.

In der Tat ist man schon seit einiger Zeit dabei, das Nutz/Stör-Verhältnis bei Radar durch Aussenden eines „Chirp"[8]) — ebenfalls ein Wellenzug mit sich stetig ändernder Frequenz — zu erhöhen. Da die sehr hohen Frequenzen bei der Durchführung der Korrelation große Schwierigkeiten bereiten, wird stattdessen auf der Empfangsseite mit einem aufwendigen Filter gearbeitet, das den empfangenen Chirp auf einen kurzen Impuls zusammenzieht.

Wenn man für jeden Frequenzanteil eines Sweeps ein spezielles Laufzeitfilter baut und die vielen unterschiedlichen Laufzeiten so abstimmt, daß in einer bestimmten Zeitlinie die Scheitelwerte aller Sweep-Frequenzen koinzidieren, dann erhält man einen kurzen symmetrischen Impuls, der dem Korrelationsimpuls des Sweeps entspricht. Man kann den Korrelationsprozeß also auch als eine Filterung auffassen.

Bei der Sonar-Technik bereitet die stetige Frequenzänderung des Wasserschall-Senders Schwierigkeiten. Daher wird der „Ping" beim Sonar durch Modulation korrelierbar gemacht und eine entsprechend abgewandelte Korrelationstechnik verwendet[9]).

[8]) *J. R. Klauder*, *A. C. Price*, *S. Darlington* u. *W. J. Albersheim*, The theory and design of Chirp Radars. Bell System Techn. J. **39**, 745/808 [1960].

[9]) *W. B. Allen* u. *E. C. Westerfield*, Digital compressed-time correlators and matched filters for active Sonar. J. Acoust. Soc. Amer. **36**, 121/39 [1964].

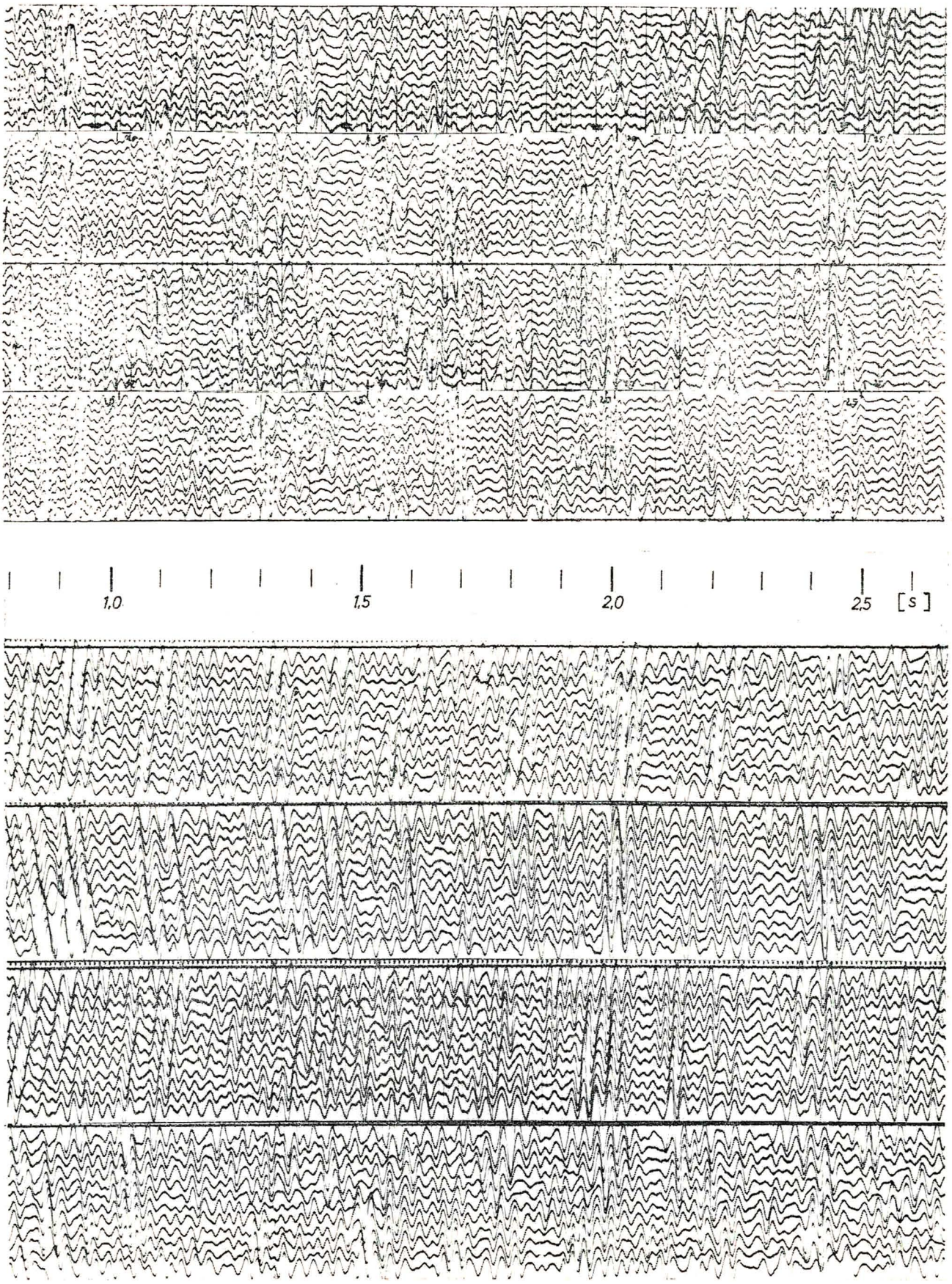


Abb. 8. Vergleich Spreng-Seismogramm (oben) und „Vibroseis"-Seismogramm aus Norddeutschland

Wohl bei keinem anderen Wellenverfahren wird selbst der Linienzug einer einzelnen Halbperiode so intensiv beobachtet wie in der Seismik. Der Seismiker ist darin geübt, die Wellenvorgänge mit großer Akribie zu untersuchen. Da der Korrelationsvorgang sehr empfindlich gegen kleinste Kurvenänderungen ist, hat die Seismik dank der niedrigen seismischen Frequenzen die Chance, bei dem Streben nach einem optimalen Laufzeitverfahren in Front zu liegen.

Es ist erfreulich, wenn auseinanderstrebende Gebiete der Technik gelegentlich wieder in engeren Kontakt kommen. Das

geschieht häufig dann, wenn man bis zum physikalisch-mathematischen Kern eines Verfahrens vorgedrungen ist. Optimisten glauben, daß von der Sippe der Sweeps, Chirps und Pings in Zukunft noch viel zu erwarten sei, besonders, wenn sie sich gegenseitig ergänzen.

Anwendung

Vergleich mit anderen Verfahren

Bei der Anwendung des „Vibroseis"-Verfahrens interessiert zunächst der Vergleich mit den bisher verwendeten Methoden. Die Sprengseismik setzt in wenigen Millisekunden eine Energie um, welche die einer Vibration um Größenordnungen übersteigt. Dabei sendet die seismische Sprengung ein unnötig breites Frequenzspektrum aus und verbraucht viel Energie durch Gesteinszertrümmerung und Wärmeerzeugung.

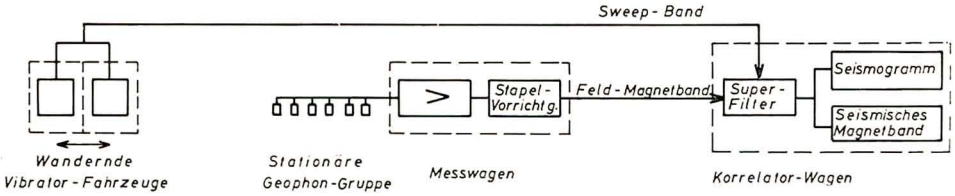


Abb. 9. Vereinfachte Darstellung des „Vibroseis"-Systems

Das „Vibroseis"-Verfahren vermeidet diese Verluste, da die Energie während einer längeren Zeitspanne in kleinen Teilen gesendet wird. Jede einzelne Halbperiode liefert mit der richtigen Schwingungsphase einen Energiebeitrag; die Summe aller Energie-Beiträge wird über den Stapel- und Korrelationsprozeß zu einem einzigen Impuls komprimiert.

Es sei erlaubt, diese Energiebetrachtung für eine einfache Veranschaulichung des „Vibroseis"-Prozesses abzuwandeln: Man stelle sich die 600 Halbperioden eines Sweeps als eine Radrennmannschaft vor, welche die ganze Strecke hintereinander fährt, aber vor dem Zielband so lange wartet, bis der Letzte gerade angekommen ist, um dann geschlossen in einer Linie als geballte Mannschaft die Ziellinie zu überqueren.

Die Vorteile eines sprengstofflosen Verfahrens in Gegenden mit schwierigen Bohrverhältnissen, bei großem Sprengstoffverbrauch und kostspieligem Nachschub sind bereits bekannt. Gegenüber der Fallgewicht-Methode hat das „Vibroseis"-Verfahren aber noch den Vorteil, daß im Gegensatz zu dem einen Fallgewicht beliebig viele Vibratoren simultan und mit den bestgeeigneten Frequenzen arbeiten können. Die normalerweise bei der Fallgewicht-Methode gegebene Beschränkung auf einen engen Bereich tiefer Frequenzen entfällt. Außerdem können praktisch keine Schäden auftreten, so daß entlang von Straßen, ja sogar durch Städte hindurch und in anderen Gebieten, in denen Sprengseismik nicht erlaubt ist und sich ggf. auch die Verwendung eines Fallgewichts von mehreren Tonnen verbietet, gearbeitet werden kann.

Allgemeines

Das „Vibroseis"-System ermöglicht eine flexible, flüssig ablaufende Vermessung, die nicht durch unterschiedliche Bohrverhältnisse, Sprengstoff-Nachschubschwierigkeiten und Flurschadensverhandlungen beeinträchtigt wird. Die Multiplizität der Schallstrahlen, das Produkt aus Geophonzahl und Zahl der Vibratorpositionen, kann beliebig erhöht werden. So werden bei den durchaus üblichen 40 Sweeps mit zwei Vibratoren bei 20 Geophonen pro Kanal bereits $2 \times 40 \times 20 = 1600$ Reflexionsstrahlen für jede Spur ausgenutzt. Die Zahl der verwendeten Strahlen pro Profilmeter stellt ein Maß dar für den Aufwand und die Qualität der „Vibroseis"-Messung. Zusätzlich können Spezialmethoden, wie Mehrfach-Überdeckungs- und Weitwinkel-Verfahren, durchgeführt werden. Dabei wird die beim „Vibroseis"-Verfahren übliche Lücke zwischen Vibrator- und Geophon-Aufstellungen zur Vermeidung des Nahbereiches, in dem die stark gedämpften Oberflächenwellen auftreten, sowieso benötigt. Das „Vibroseis"-Verfahren gestattet also alles in allem ein optimales Verhältnis zwischen Geräte-Einsatz und Meßfortschritt.

Abb. 9 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Systems, wobei der ganze Korrelationsprozeß als eine Filterung aufgefaßt ist. Das „Super-Filter" ist optimal auf die ausgesandten Signale eingestellt.

Um beim Bild der Rennmannschaft zu bleiben: Das Super-Filter zwingt jedem Radfahrer eine individuell abgestufte Wartezeit auf, damit die Koinzidenz aller im Ziel gewährleistet ist. Fremde Fahrer (= Störungen) bekommen prinzipiell falsche Wartezeiten.

Im übrigen gelten die von der Meßanordnung abhängigen geometrischen Zusammenhänge und die Regeln der Auswertung wie bei der konventionellen Reflexionsseismik.

Der Auftraggeber von seismischen Messungen, der in erster Linie an den Resultaten der Auswertung interessiert ist, braucht die Theorie nicht zu beherrschen. Das „Vibroseis"-System liefert auf Photomaterial und auf Magnetband aufgezeichnete Seismogramme, die auch in der üblichen Weise zeitlich korrigiert und in beliebiger Schriftart zu Seismogramm-Profilen umgeschrieben werden können.

Das „Vibroseis"-Seismogramm könnte durch die Anwendung der neuen Filtertechniken zur Unterdrückung von Vielfachreflexionen noch weiter verbessert werden. Ghost-Reflexionen

Abb. 10. Drei Vibrator-Fahrzeuge in Arbeitsstellung

von der Erdoberfläche entstehen glücklicherweise gar nicht. Sogar die neuerdings für die Sprengseismik entwickelten Korrelationsverfahren zum „Schärfen" der Reflexionsimpulse und zur objektiven Bewertung der Reflexionsqualität könnten ebenfalls noch ausgenutzt werden.

Abgesehen von den Vibratoren und dem Korrelator werden die üblichen Geräte (Geophone, seismische Verstärker, Magnetband-Trommeln, Oszillograph, Kabel, Radio, Stromversorgung usw.) verwendet.

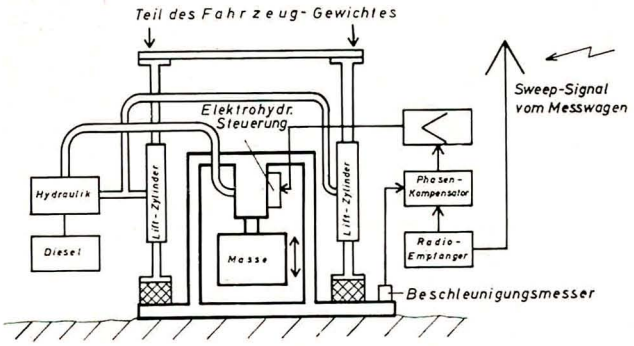


Abb. 11. Vibrator-Prinzip

Vibrator

Ein Vibrator-Fahrzeug (*Abb. 10*) hat ein Gesamtgewicht von etwa 12 t, das sich auf 10 Reifen verteilt, so daß der Flächendruck und damit die Gefahr von Schäden sehr gering sind. Die Grundplatte des Vibrators mit einer Fläche von etwa 1 m² wird durch den angehobenen hinteren Teil des Fahrzeuges mit rd. 8 t an den Boden gedrückt. Von dieser relativ geringen Flächenbelastung bleibt auch nach der Vibration sehr häufig nicht die geringste Spur am Boden übrig.

Den optimalen Arbeitsrhythmus bestimmt die Aufnahme-Trommel im Meßwagen, die in 13 sec eine Umdrehung macht. Ein Vibrationszyklus besteht aus 7 sec Vibrieren sowie weiteren 6 sec für das Absenken des Fahrgestells, Anfahren, Abstoppen nach etwa 3 m und erneutem Liften des Fahrgestells. Es wird noch registriert, wenn die Vibrator-Fahrzeuge schon wieder fahren. Das Fahrgeräusch stört nicht, da es sich um ein nichtkohärentes Geräusch handelt, das nicht korreliert; es wird vom „Super-Filter" nicht durchgelassen. Zwei oder mehr Vibratoren können in 7 min je 30 Sweeps aussenden. Das schaffen die Fahrer nur, weil ihnen ein automatisches Fahrzeuggetriebe und andere technische Hilfen zur Verfügung stehen.

Der Vibrator arbeitet nach dem umgekehrten Geophon-Prinzip (*Abb. 11*). Eine Reaktionsmasse von 1 t Gewicht wird durch einen hydraulisch betätigten Kolben relativ zu einem Gestell bewegt, das mittels einer Grundplatte fest auf den Erdboden gedrückt wird. Der Andruck wird dadurch erreicht, daß der hintere Teil des Fahrzeuges durch ein hydraulisches Liftsystem angehoben wird und sich dabei über elastische Zwischenglieder auf die Grundplatte abstützt. Die von einem 60-PS-Dieselmotor angetriebenen ölhydraulischen Pumpen erzeugen einen Druck bis 200 atü und liefern eine Kraftamplitude der Schwingung von maximal 5 t.

Die Vibration erfolgt genau entsprechend dem vom Meßwagen drahtlos übertragenen Sweep-Signal. Die Umwandlung des schwachen elektrischen Signals in eine starke ölhydraulische Wechselströmung geschieht durch ein elektrohydraulisches System, das in *Abb. 12* skizziert ist. Es entstammt Entwicklungen für die amerikanischen Flugzeug- und Raketen-Steuerungen und besteht im wesentlichen aus einem elektro-

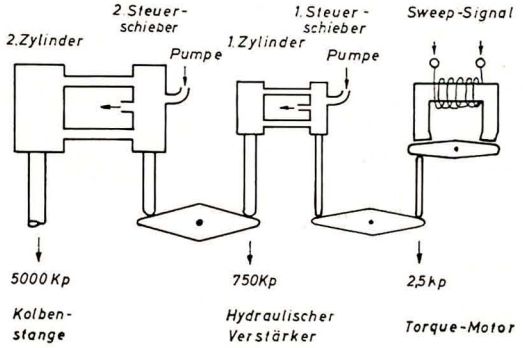


Abb. 12. Prinzip der elektrohydraulischen Steuerung

mechanischen Wandler, einem hydraulischen Verstärker und dem Arbeitszylinder mit seinem Steuerschieber.

Da die geologischen Verhältnisse an der Erdoberfläche verschieden sind, setzt diese den ihr aufgeprägten Schwingungen unterschiedliche Reaktionskräfte entgegen, wodurch Phasenunterschiede zwischen den Soll- und Ist-Schwingungen des Sweeps auftreten. Weil die Qualität der Korrelation und der Synchronisierung mehrerer Vibratoren um so besser ist, je kleiner die Phasendifferenzen sind, wird die Ist-Schwingung der Bodenplatte durch einen Beschleunigungsmesser gemessen und zur automatischen Nachsteuerung eines Phasen-Kompensators verwendet.

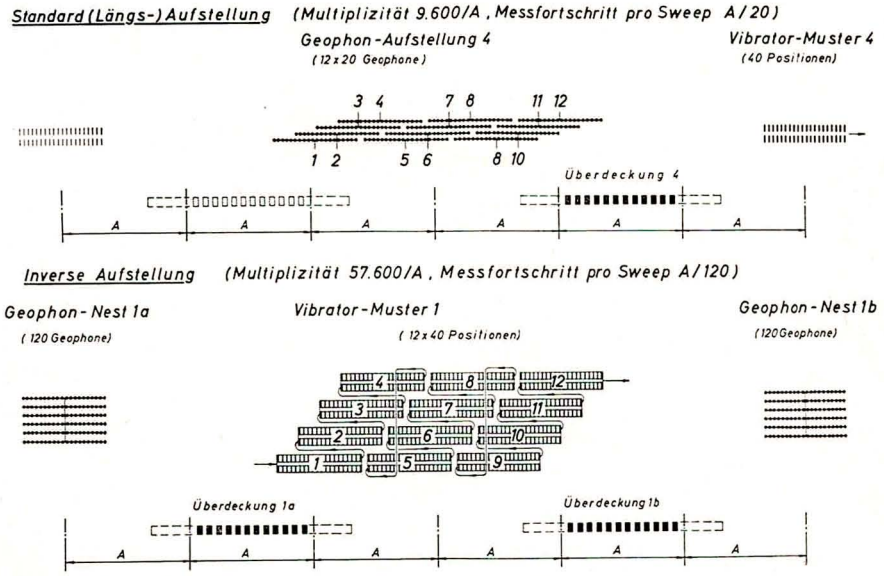


Abb. 13. Beispiel zweier „Vibroseis"-Aufstellungen, deren Multiplizitäten sich wie 1 : 6 verhalten

Meßanordnung

Für die Geophon-Anordnung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es sind 12 Kanäle vorhanden, an die 12 Geophongruppen in Zentralaufstellung mit einer Lücke in der Mitte oder in Längsaufstellung mit Offset in Profilrichtung angeschlossen werden können. Wenn in seismisch schwierigen Gebieten eine sehr große Multiplizität gewünscht wird, so werden die Geophone in zwei großen Nestern ausgelegt, während die

Vibratoren, ähnlich wie bei der Fallgewichtstechnik, ein bestimmtes Flächen- oder Linienmuster bearbeiten. Die Erhöhung der Multiplizität geht allerdings auf Kosten des Meßfortschrittes.

In dem Beispiel *Abb. 13* wird eine Möglichkeit gezeigt, wie die Qualität der Messung bei gleicher Ausrüstung (gleiche Vibrator- und gleiche Geophonzahl) etwa um das $\sqrt{6}$-fache durch 6fache Multiplizität bei Reduzierung des Meßfortschrittes auf $^1/_6$ verbessert werden kann. Bei der inversen Aufstellung werden Sender und Empfänger vertauscht, was nach dem Umkehrprinzip der Seismik zum gleichen Ergebnis führt. Die Überdeckung der Untergrund-Grenzflächen ist durch die Markierung der jeweiligen Re-

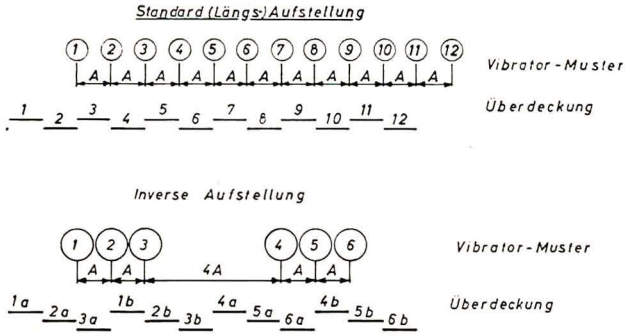


Abb. 14. Vibrier-Schema bei Einfach-Überdeckung mit den Beispielen der Abb. 13

flexionsmitten angedeutet. Die nebeneinander gezeichneten Vibrator-Positionen liegen auf Wegen meistens übereinander, so daß sich die Fahrzeuge durch ständiges Vor- und Zurückfahren langsam durch das Muster hindurcharbeiten.

Während bei der Standard-Längsaufstellung die vor der Geophonaufstellung arbeitenden Vibratoren regelmäßig verteilte kleine Muster bedecken (*Abb. 14*), entstehen bei der inversen Aufstellung Strecken mit starker Verdichtung von Vibrator-Positionen.

Aufnahme-Apparatur

In der Aufnahme-Apparatur wird zunächst der Sweep von einem Master-Sweepband auf das noch unbespielte Feldband übertragen (*Abb. 15*). Bei jedem Trommelumlauf wird dieser Sweep wieder abgespielt und über einen Radio-Sender phasenrein zu den Vibratoren übertragen. Während der Sweep noch

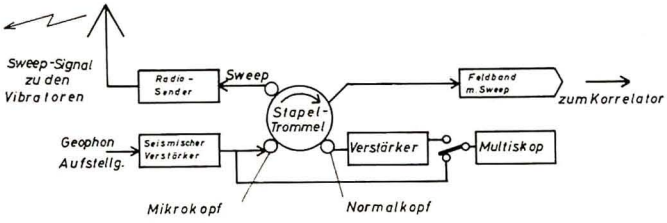


Abb. 15. Schema der „Vibroseis"-Aufnahme

gesendet wird, werden die ersten seismischen Signale bereits empfangen und auf dem gleichen Magnetband über Mikroköpfe aufgezeichnet. Bis zu 20 Mikrospuren können in einer normalen Magnetbandspur untergebracht und gestapelt werden. Es ist interessant, daß diese u. a. auch beim Fallgewichtsverfahren verwendete Stapeltechnik im Zusammenhang mit der „Vibroseis"-Entwicklung erfunden wurde[10]).

Im Meßwagen (*Abb. 16*) ist normalerweise kein Oszillograph vorhanden, photographische Arbeiten im Feld entfallen also. Für die Verstärkereinstellung und zur laufenden Kontrolle genügt die Sichtbarmachung der Eingangssignale bzw. der gestapelten Spuren mittels eines Drehspiegel-Multiskops, da Reflexionen sowieso nicht zu erkennen sind. Die zur Aufnahme und Wiedergabe benötigten Verstärker können einfacher sein als normale seismische Verstärker, da weniger Filterstellungen und keine automatische Regelung benötigt werden. Außerhalb der verwendeten Sweep-Frequenzen kann scharf gefiltert werden. Eine Schaltanlage sorgt für den richtigen Ablauf des Auf- bzw. Umspielvorganges entsprechend der gewählten Multiplizität. Das fertig gestapelte Feldband (Techno-Norm) wird zur Korrelator-Apparatur (*Abb. 17*) weitergeleitet.

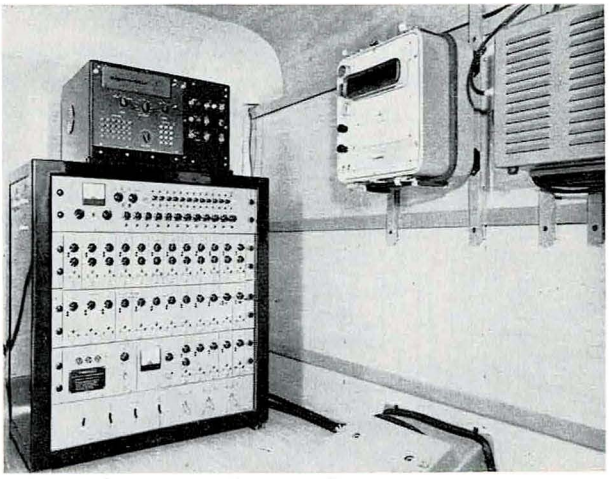


Abb. 16. „Vibroseis"-Aufnahme-Apparatur

Korrelator

Die Korrelator-Apparatur enthält neben dem in *Abb. 17* gezeigten Korrelator noch eine seismische Apparatur mit 12 Kanälen und einen Oszillographen. Diese Anlage ist zusammen mit einer Dunkelkammer in einem Kabinen-Anhänger installiert, der in der Nähe des Trupp-Büros aufgestellt wird. Die Arbeitsweise ist aus dem Schema *Abb. 18* zu ersehen. Das auf der Abspieltrommel aufgespannte Feldband wird Spur für Spur mit einer Geschwindigkeit von 13 sec pro Umdrehung

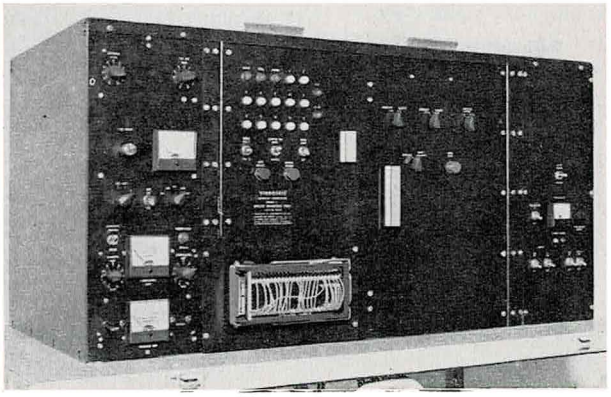


Abb. 17. Magnetband-Korrelator

abgespielt. Die Signale werden jeweils auf das als Schleife ausgebildete einspurige Magnetband des Korrelators[11]) übertragen. Das Band wird unter gleichmäßigem Andruck an der auf einem Bett aufgespannten „Sweep-Schlange" vorbeigeführt und dann kurz vor dem Aufsprechkopf wieder gelöscht. Aus einem bespielten Magnetband treten magnetische Kraftlinien aus, die ein Abbild der gespeicherten Funktion darstellen. Die Sweep-Schlange besteht aus einem bandförmigen Isolator, auf dem der Sweep als Wellenlinie aus leitendem Material mittels Photo-Ätzung aufgebracht wurde. Durch die Relativ-Bewegung zwischen den magnetischen Kraftlinien des Korrelator-Magnetbandes und den leitenden Elementen der Sweep-Schlange wird in deren ganzer Länge eine Wechselspannung induziert, die der Korrelationsfunktion zwischen Sweep und Empfangssignal entspricht. Diese Wechselspannung

[10]) Continental Oil Co., Compositing sequentially produced signals. Am. P. 3 065 453 vom 5. 1. 1959, ausg. 20. 11. 1962.

[11]) Continental Oil Co./Seismograph Service Ltd., Transcorrelateur pour exploration sismique. Franz. P. 896 865 vom 8. 5. 1962, ausg. 6. 5. 1963.

wird auf dem Magnetband der auf gleicher Achse mit der Abspieltrommel rotierenden Endtrommel aufgezeichnet.

Wenn das auf der Endtrommel aufgespannte Ergebnis-Band mit 12 Spuren beschrieben ist, wird es über die seismische Apparatur abgespielt. Das Band kann zur weiteren Datenverarbeitung an ein Abspielzentrum geleitet werden.

Auch die auf dem Feldband befindliche Sweep-Spur wird der beschriebenen Prozedur unterzogen. Die Korrelation mit dem

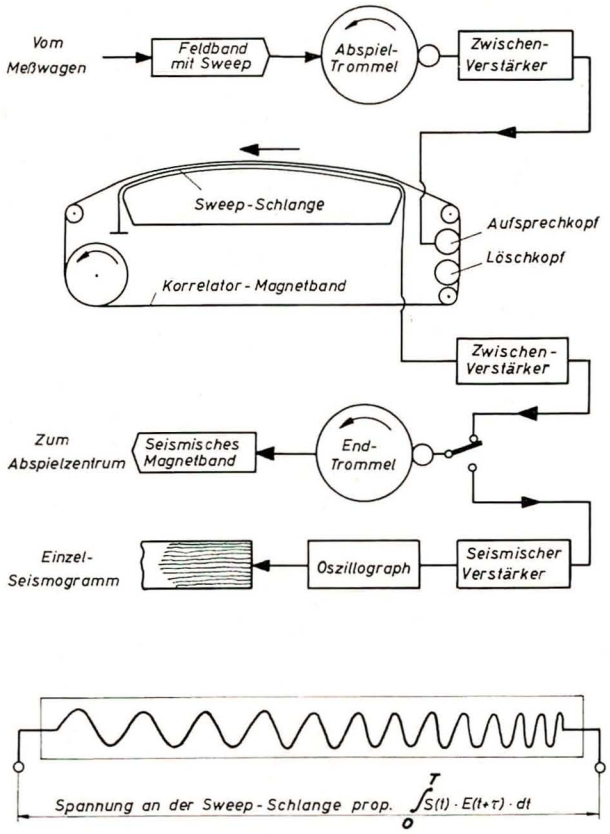


Abb. 18. Schema der Korrelator-Apparatur

in der Sweep-Schlange konservierten Ebenbild ergibt den als Abriß fungierenden Auto-Korrelationsimpuls.

Auswertung

Bei der Korrelation wird die Überall-Kohärenz des in der Empfangsfunktion enthaltenen Nutzsignals mit dem Sweep zur Wirkung gebracht. Der Korrelationsprozeß verwandelt die Nutzsignale in Impulse (Reflexionen) mit korrekter Laufzeit und richtigem Amplitudenverhältnis.

Das Anreißen der Reflexionszeiten ist bei einem „Vibroseis"-Seismogramm einfacher als beim konventionellen Seismogramm, weil die Amplitudenspitzen („Tüten") der Reflexionsimpulse die exakten Laufzeiten markieren. Die Suche nach den manchmal recht undeutlichen „Reflexions-Einsätzen" der Sprengseismik entfällt. Eine weitere Klarstellung bringt das „Vibroseis"-Verfahren in bezug auf die oft diskutierte „Charakteristik" von Reflexionen. Im „Vibroseis"-Seismogramm wird tatsächlich das echte Erscheinungsbild der Reflexionen aufgezeichnet, so wie es durch die Zufälligkeiten der Elastizitäts-Werte in der Übergangszone zwischen zwei geologischen Erdschichten und durch die Details der Schichtung gegeben ist.

Bei der konventionellen Seismik ist die Amplitudenänderung so groß, daß normalerweise nur mit Hilfe einer sehr leistungsfähigen automatischen Amplituden-Regelung ein lesbares

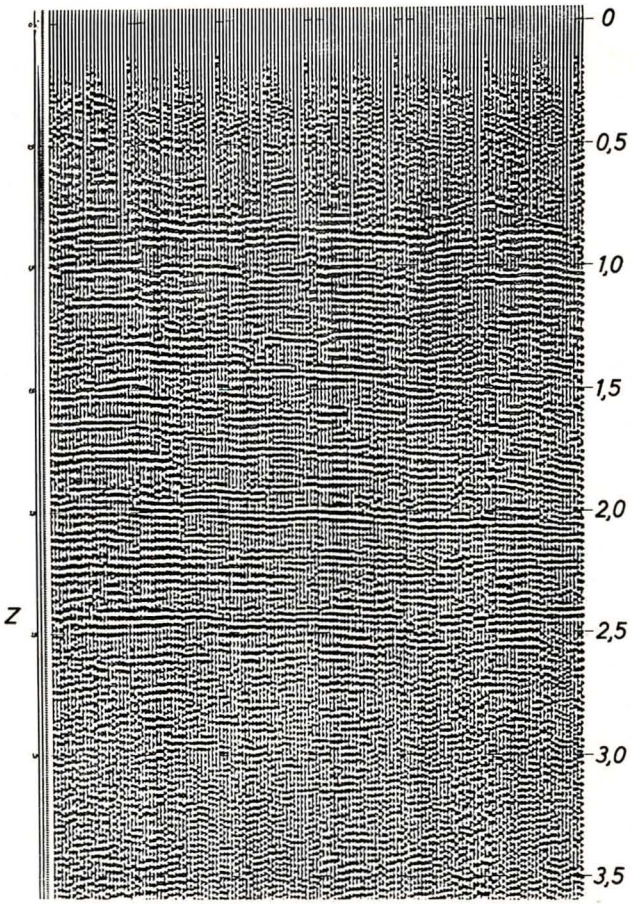


Abb. 19. „Vibroseis"-Profil in Flächenschrift aus Norddeutschland

Reflexions-Seismogramm entstehen kann. Diese automatische Regelung ist unumgänglich mit Zeitkonstanten behaftet, die das echte Erscheinungsbild der Reflexionen verfälschen. Besonders stark wird das Bild zweier oder mehrerer kurz aufeinanderfolgender Reflexionsimpulse durch den Einfluß der Regelzeitkonstanten verzerrt. Die „Vibroseis"-Registrierung benötigt keine automatische Regelung, so daß derartige Verzerrungen vermieden werden.

Dagegen sind die ersten Einsätze auf „Vibroseis"-Filmen wegen der großen Multiplizität der Meßanordnung nur recht unsicher zu erkennen, so daß zu empfehlen ist, bei Gebieten mit stark wechselnden Lockerschichten noch eines der üblichen Meßverfahren zur Bestimmung der statischen Zeitkorrekturen mit heranzuziehen.

Abb. 19 zeigt zum Abschluß einen Ausschnitt aus einem von „Vibroseis"-Magnetbändern abgespielten und korrigierten Seismogramm-Profil aus Norddeutschland in Flächenschrift. Bei Z ist die Reflexion von der Zechstein-Oberfläche zu erkennen.