

Gegenstände mit Hilfe von Wellen nur mit einer Genauigkeit lokalisieren, die in der Größenordnung einer Wellenlänge liegt.

12. Bewegen sich eine Schallquelle (Geschwindigkeit u_Q) und ein Empfänger (Geschwindigkeit u_E) aufeinander zu, so erhöht sich die beobachtete Frequenz der Quelle. Entfernen sie sich voneinander, so sinkt die beobachtete Frequenz. Dieses Phänomen heißt Doppler-Effekt. Die beobachtete Frequenz ν' hängt mit der eigentlichen Frequenz der Quelle ν_0 über

$$\nu' = \frac{1 \pm u_E/v}{1 \pm u_Q/v} \nu_0$$

zusammen. Ist die Relativgeschwindigkeit u von Quelle oder Empfänger sehr viel kleiner als die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen v , so ist die Frequenzverschiebung durch eine bewegte Quelle nahezu gleich groß wie durch einen bewegten Empfänger:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx \pm \frac{u}{v}$$

Essay: Seismische Wellen

Jack L. Flinner
Mankato State University

Eine Fledermaus stürzt sich im Dunkel der Nacht auf einen Falter. Ein Minenräumboot sucht nach verborgenen Minen. Ein Arzt untersucht sorgfältig ein „gescanntes“ Bild eines Fötus im Bauch der Mutter. In allen diesen Fällen werden Schallwellen ausgesendet, reflektiert, analysiert und interpretiert. Das Vorgehen ähnelt in gewisser Weise der Methode, die Entfernung einer auf der anderen Seite eines Tales liegenden Klippe zu schätzen, indem man für ein lautes „Hallo-o-o-o“ die Zeit bis zum Auftreten des Echos bestimmt. Die Entfernung ergibt sich dann als Produkt aus der Schallgeschwindigkeit und der halben Zeit, die vom Ausruf bis zur Ankunft des Echos vergeht. Die Reflexion von Schallwellen an Hindernissen liefert informationsträchtige Muster. Neben der Entfernung kann auch die Form oder die Geschwindigkeit eines sich relativ zum Beobachter bewegenden Gegenstandes dem reflektierten Muster durch sorgfältige Analyse entnommen werden. Eine zutreffende Interpretation der so erhaltenen Information ist sowohl für die Fledermaus als auch für die Minenräumer lebenswichtig.

Der Mittelpunkt der Erde befindet sich ungefähr 6370 km unterhalb des Platzes, auf dem Sie gerade sitzen. Das tiefste je gebohrte Loch kam diesem Ziel lediglich 15 km näher. Unser Wissen über den Aufbau und die Zusammensetzung der Erde auf den restlichen 6355 km stammt hauptsächlich aus Untersuchungen mit seismischen Wellen. Seismische Wellen (oder Erdbebenwellen) sind sehr niederfrequente Wellen, die die Erde durchdringen. Beispielsweise können plötzliche Verschiebungen von Teilen der Erdkruste an Verwerfungsspalten seismische Wellen verursachen, die dann häufig allerdings solche Ausmaße annehmen, daß die Folgen für Menschen und Bauwerke katastrophal sind. Seismische Wellen können in der obersten Erdkruste auch durch Explosionen und andere künstliche Vorrichtungen erzeugt werden. Sie ermöglichen Geologen und Geophysikern, Erkenntnisse über das Erdinnere zu gewinnen, und sie helfen bei der Suche nach noch unbekanntem Lagerstätten fossiler Bodenschätze.

Die Hunderttausende von Erdbeben, die jedes Jahr stattfinden (glücklicherweise sind die meisten zu schwach, um von uns wahrgenommen zu werden – siehe Tabelle 1), bieten reichlich Gelegenheit, seismische Wellen zu untersuchen. Das Gerät, mit dem seismische Wellen aufgezeichnet werden, ist als Seismograph bekannt. Wie Sie sich leicht vorstellen können, sind die Rechnungen, die man durchführen muß, um aus den

Tabelle 1 Stärken und Frequenzen von Erdbeben der gesamten Erde und die Folgeschäden (nach Skinner und Porter, *Physical Geology*, Wiley & Sons, Chichester, New York 1987)

Wert auf der Richterskala	Häufigkeit pro Jahr	Typische Auswirkungen der Erschütterungen in bewohnten Gebieten
< 3,4	800 000	nur mit Seismographen registrierbar
3,5 – 4,2	30 000	von wenigen Menschen wahrnehmbar
4,3 – 4,8	4 800	von vielen Menschen wahrnehmbar
4,9 – 5,4	1 400	jeder nimmt es wahr
5,5 – 6,1	500	kleine Gebäudeschäden
6,2 – 6,9	100	viele Gebäudeschäden
7,0 – 7,3	15	ernste Gebäudeschäden, verbogene Brücken, gebrochene Wände
7,4 – 7,9	4	schwere Gebäudeschäden, Gebäudeeinstürze
> 8,0	alle 5–10 Jahre einmal	Totalschaden, Bodenwellen sind sichtbar, Gegenstände werden in die Luft geschleudert

aufgezeichneten Daten die gewünschten Informationen zu extrahieren, nicht so leicht wie diejenigen beim Ruf über ein Tal hinweg. Wie bei allen Wellen hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen vom Medium ab, in dem sie sich ausbreiten – insbesondere von dessen Festigkeit (beispielsweise dem Elastizitätsmodul) und dessen Dichte. Zusätzlich werden seismische Wellen an Grenzschichten zwischen zwei Medien unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit teils reflektiert und teils gebrochen. Weitere Komplikationen sind durch den Umstand bedingt, daß die Medien, durch die sich seismische Wellen ausbreiten, fest, flüssig oder gasförmig sein können. Die physikalischen Eigenschaften der Medien haben weitreichende Auswirkungen auf die Übertragungswege seismischer Wellen. Die Festigkeit und die Dichte der Materialien, aus denen die Erde aufgebaut ist, hängen von der Tiefe ab; sie sind von besonderer Bedeutung für die Genauigkeit der Untersuchungen. Weiterhin kann die Intensität der reflektierten (oder abgelenkten) Wellen außerordentlich klein sein, weshalb die Empfindlichkeit der Aufzeichnungsgeräte entsprechend hoch sein muß.

Es gibt vier Arten seismischer Wellen, die sich in zwei Kategorien einordnen lassen: Raumwellen (P steht für Primärwellen und S für Sekundärwellen) und Oberflächenwellen (Love- und Rayleigh-Wellen). Alle diese Wellenarten entstehen bei Erdbeben. Raumwellen haben ihren Ausgangspunkt im Zentrum des Erdbebens und durchqueren von dort aus die Erde (Abbildung 1).

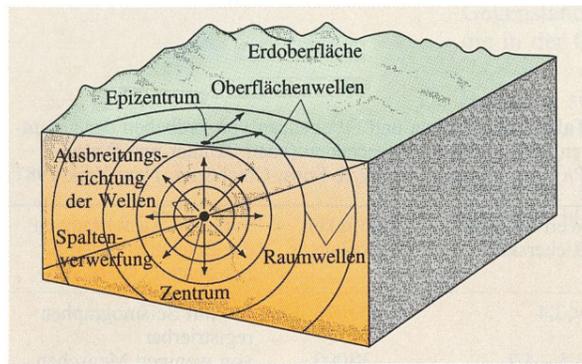


Abbildung 1 Raumwellen breiten sich radial vom unterirdischen Zentrum des Erdbebens aus. Das Epizentrum, das sich direkt über dem Erdbebenzentrum in der Erdkruste befindet, liegt im Mittelpunkt der von dort ausgehenden Oberflächenwellen.

P-Wellen sind wie Schallwellen Longitudinalwellen (vgl. Abbildung 13.5 im Haupttext). Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt bis zu 14 km/s, und sie durchdringen Festkörper, Flüssigkeiten und Gase. Da sie sich schneller ausbreiten als S-Wellen, kommen sie als erste bei einem Erdbebedetektor an (deshalb heißen sie Primärwellen). S-Wellen sind transversale Scherwellen, die sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 3,5 km/s fortpflanzen (siehe Abbildung 13.5 im Haupttext). Sie können nur Festkörper durchdringen, da Flüssigkeiten und Gase keine Scherspannungen übertragen können. Love- und Rayleigh-Wellen sind an die Erdoberfläche gebunden. Love-Wellen sind Torsionswellen, die kurzfristige Spannungen auf der Erdoberfläche erzeugen. Dieses Phänomen kann man anschaulich mit einem kugelförmigen Luftballon nachvollziehen, indem man ihn an den Polen hält und diese kurzzeitig gegeneinander verdreht. Rayleigh-Wellen ähneln Meereswellen. Bei unserem Luftballonmodell lassen sich derartige Wellen

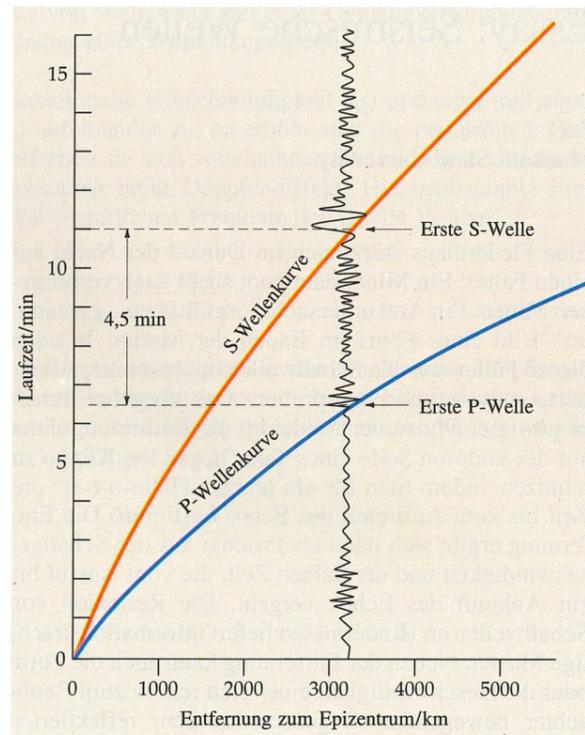


Abbildung 2 Aus einem Laufzeitdiagramm kann die Entfernung der Erdbebenstation zum Epizentrum eines Erdbebens abgelesen werden.

erzeugen, indem man die Pole kurz gegeneinanderdrückt oder auseinanderzieht.

P- und S-Wellen pflanzen sich mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort. Aus den unterschiedlichen Zeiten, zu denen sie deshalb an den seismographischen Stationen eintreffen, kann das Epizentrum eines Erdbebens lokalisiert werden. Laufzeitdiagramme

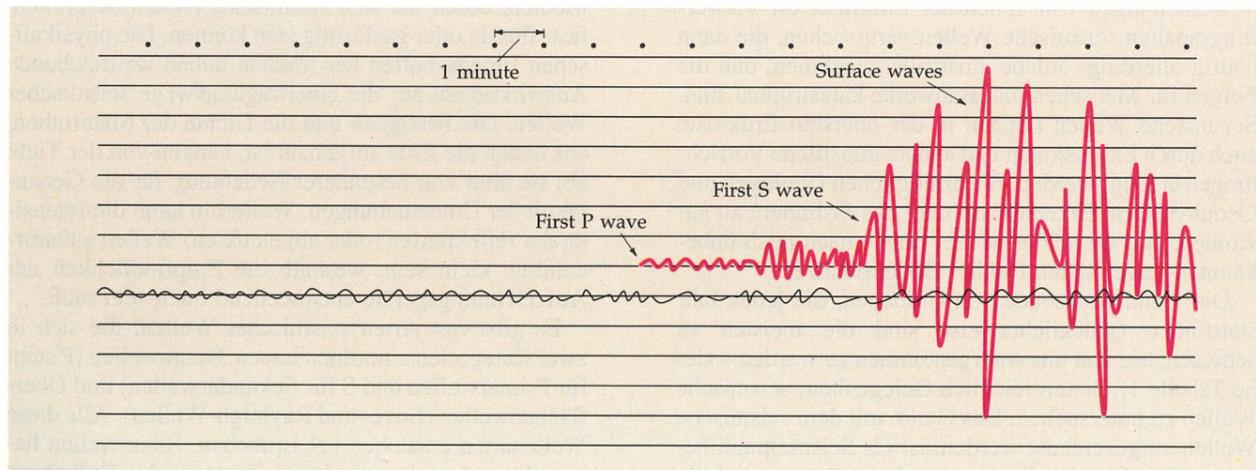


Abbildung 3 Typisches Seismogramm.

von P- und S-Wellen wurden zuerst mit Hilfe von Erdbeben erstellt, bei denen die Lagen der Epizentren durch physikalische Überlegungen relativ genau ermittelt werden konnten (Abbildung 2), und später mit Hilfe von Kernexplosionen, bei denen Zeitpunkt und Ort der Explosion genau bekannt waren. Den Seismogrammen von P- und S-Wellen läßt sich deren Laufzeitdifferenz leicht entnehmen (Abbildung 3). Diesen Zeitunterschied kann man einfach in ein Laufzeitdiagramm eintragen, aus dem sich dann die Entfernung der seismischen Station zum Epizentrum direkt ablesen läßt. Der genaue Ort des Epizentrums wird üblicherweise als Schnittpunkt der Entfernungen zu drei oder mehr Stationen bestimmt. Die Zusammenstellung von Seismographen zu ganzen Feldern und der Einsatz von Hochleistungsrechnern erlaubt es, Kernexplosionen und natürliche Erdbeben voneinander zu unterscheiden und die Orte von Epizentren mit sehr hoher Präzision zu ermitteln.

Die mittlere Dichte der Erde beträgt $5,5 \text{ g/cm}^3$. In der Erdkruste ist die Gesteinsdichte 3 g/cm^3 , folglich müssen einige Teile der Erde wesentlich höhere Dichten aufweisen. Seismographische Aufzeichnungen aus der ganzen Welt haben es den Geologen ermöglicht, ein Modell vom Aufbau unserer Erde aufzustellen. Es zeigt nicht nur, daß die dichtesten Gesteinsarten im Mittelpunkt und die leichtesten Gesteinsarten auf der Oberfläche liegen, sondern auch, daß das Erdinnere in zwei Bereiche eingeteilt werden kann (Abbildung 4).

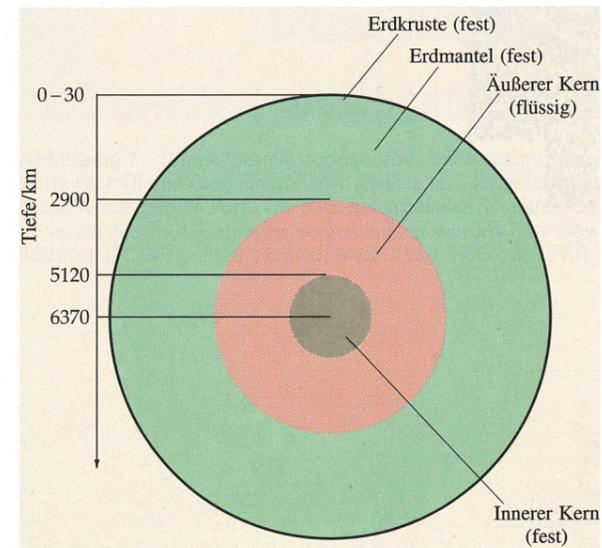


Abbildung 4 Dieses Modell vom Erdinneren haben Geologen aufgrund der Brechung und Transmission von seismischen Raumwellen (S und P) entworfen. Da die S-Wellen den äußeren Kern nicht durchdringen können, muß dieser flüssig sein. Transmissionsmuster, die von am äußeren Kern nicht zu stark gebrochenen P-Wellen stammen, weisen darauf hin, daß der innere Kern fest ist.

Seismische Wellen werden auch gezielt dazu eingesetzt, Karten der unterirdischen Gesteinsformationen geologischer Lagerstätten anzulegen, in der Absicht, mögliche Erdöl- oder Erdgasvorkommen zu finden. Dieser Einsatz seismischer Wellen (und die richtige Interpretation der Seismogramme) spielt eine bedeutende Rolle für die Energiewirtschaft unserer industriellen Gesellschaft. Seismische Wellen bieten häufig die einzige kostendeckende Möglichkeit zur Suche nach in der Erdkruste verborgenen Öl- und Erdgaslagern.

Den Einsatz künstlich erzeugter seismischer Wellen bei der Suche nach Ölvorkommen nennt man Reflexionsseismographie oder seismische Erderkundung, dieses Verfahren wird seit 1923 in den USA angewendet. Einfach ausgedrückt, werden bei der seismischen Erderkundung kleine künstliche Erdbeben erzeugt, bei denen seismische Wellen entstehen, deren Reflexions- und Beugungsmuster ausgewertet werden können.

Die Art, wie man Wellen erzeugt, hängt davon ab, ob die Untersuchung an Land oder unter Wasser stattfindet. Die Möglichkeiten umfassen Dynamitsprengungen in oberflächennahen Bohrlöchern, den Einsatz von großen hydraulischen Vibratoren/Schwingungserregern niedriger Intensität (besonders gut einsetzbar in bevölkerten und ökologisch empfindlichen Gebieten), das Fallenlassen von schweren Gewichten, den Boden mit einem Lufthammer zu erschüttern oder die Verwendung einer Anordnung von Luftgewehren. Jede dieser Methoden

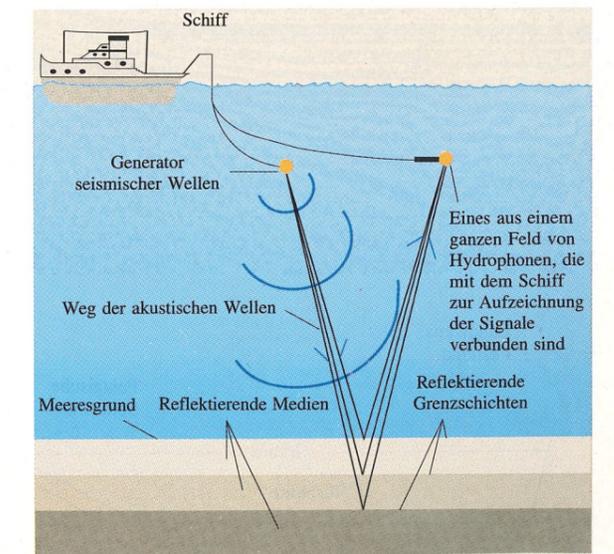
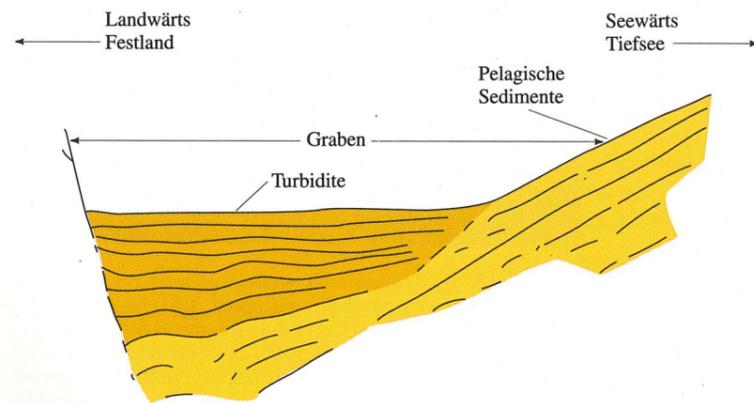
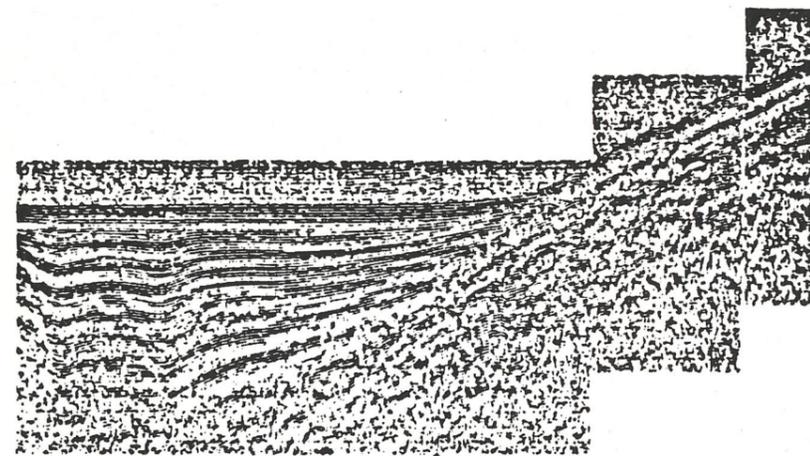


Abbildung 5 Für seismische Reflexionsuntersuchungen auf See werden Forschungsschiffe eingesetzt, die Generatoren für seismische Wellen und bis zu 5 km lange, mit Hydrophonen bestückte Kabel im Schlepptau hinter sich herziehen. Die Hydrophone dienen zur Aufnahme der seismischen Wellen, die von der Erdkruste reflektiert wurden.

erzeugt Wellen, die in die Erdkruste eindringen und an den Grenzschichten unterschiedlicher Gesteinsarten reflektiert werden. Die Ankunftszeiten der seismischen Wellen auf der Erdoberfläche werden mit Detektoren, sogenannten Geophonen, aufgenommen und die Laufzeiten, Amplituden und Frequenzen auf Rechnern gespeichert (Abbildung 5).

Die sehr schnellen und mit viel Speicherplatz ausgestatteten Rechner, über die man seit einigen Jahren verfügen kann, erlauben es, seismische Reflexionsprofile (Abbildung 6) zu speichern und daraus zweidimensionale Schnitte durch die Erdkruste zu erstellen. Darüber hinaus ermöglichen sie es, den Ort der Quelle der seismischen Wellen auf dem Rechner zu wählen, d.h. also, im Rechner Erdbeben zu simulieren und so eine ganze Reihe von Schnitten durch die Erdkruste zu betrachten, deren Ergebnis eine dreidimensionale Darstellung des Erdinneren ist. Die zweidimensionalen Profile weisen auf Diskontinuitäten der Dichte und der Festigkeit verschiedener Schichten der Erdkruste hin. Durch ihre Auswertung kann man sich bereits ein ziemlich gutes Bild von den geologischen Formationen machen und auf diese Weise auf das Vorhandensein möglicher Erdöl- oder Erdgasvorkommen schließen



(Abbildung 7). Eine dreidimensionale Darstellung zeigt die verschiedenen Gesteinsschichten noch deutlicher und erlaubt es, ein interessantes Gebiet der Erdkruste sorgfältiger zu untersuchen. Ist beispielsweise erst einmal eine Gaslagerstätte gefunden, so kann man die Größe des Vorkommens ermitteln, indem man es im Rechner dreht und aus unterschiedlichen Richtungen betrachtet. Die von Geologen verwendeten Rechner und Programme sind heute so ausgereift, daß solche gedrehten Darstellungen schnell berechnet werden können. Mittels digitaler Signalverarbeitung ist es darüber hinaus möglich, den Effekt der Streuung von seismischen Wellen an den zu untersuchenden Strukturen rechnerisch zu vermindern. Dieses Verfahren wird Migration genannt und entspricht dem Scharfstellen einer Kamera- oder Mikroskoplinsse. Durch diese Fokussierung lassen sich detailreichere geologische Formationen untersuchen. Die Methode gewinnt in dem Maße an Bedeutung, wie große Erdölfelder versiegen und die Erschließung kleinerer Lagerstätten immer wichtiger wird.

Rechner speichern auch Daten über die lokale Geologie, wie die Durchlässigkeit eines Gesteins für Wasser und Öl. Dies ist beispielsweise wichtig, wenn man den

Abbildung 6 Ein seismisches Reflexionsprofil zusammen mit dem zugehörigen Modell der Gesteinsschichten, das sich aus der Auswertung des Profils ergab.

technischen Aufwand der Erdölförderung und die wahrscheinlichen Erschließungskosten neuer Fundstätten abschätzen will. Dank der Computer sind die Geologen in der Lage, riesige Datenmengen schnell und effektiv

zu verarbeiten und gezielt nach Gesteinsformationen zu suchen, die die Merkmale von Lagerstätten aufweisen, noch bevor irgendwelche Mittel für teure Erderkundungsbohrungen ausgegeben werden.

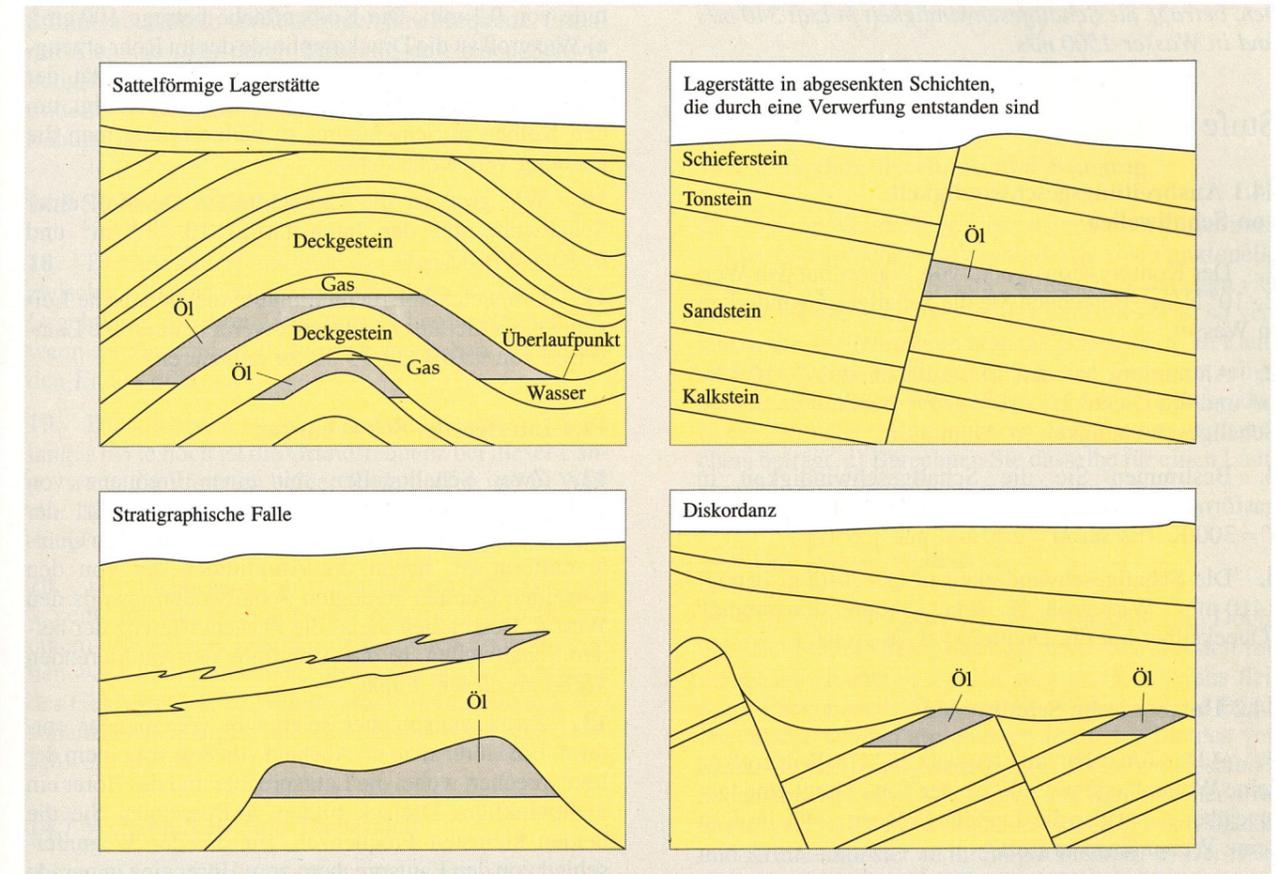


Abbildung 7 Einige Gesteinsformationen, die Kohlenwasserstoffe (wie Öl und Gas) einschließen können und deren schematische Wiedergabe in Form von zweidimensionalen Schnitten, die in verschiedenen Richtungen vorgenommen wurden (aus New Scientist/IPC Magazines Limited/World Press Network 1990).