

Erdöl unter der Tiefsee

Die Ablagerung enormer Sedimentmassen am Boden des Südatlantiks seit seiner Öffnung vor rund 140 Millionen Jahren hat reiche Lagerstätten an fossilen Brennstoffen geschaffen. Geologen versuchen derzeit abzuschätzen, bis in welche Meerestiefen sich die Öl- und Gasvorkommen erstrecken.

Von Alain-Yves Huc

Bis 2020 wird sich die Weltbevölkerung gegenüber 1980 von 4 auf 8 Milliarden Menschen verdoppelt haben. Als Folge davon dürfte der weltweite Energiebedarf um rund fünfzig Prozent zunehmen. Werden die Energievorräte ausreichen, ihn zu decken? Generell lautet die Antwort »ja«. Es gibt vielerlei Methoden der Energiegewinnung, und für ein bis zwei Generationen dürften auch noch genügend fossile Brennstoffe vorhanden sein. Legt man den aktuellen Verbrauch zu Grunde, so sind die bekannten Kohlereserven erst in 250 Jahren, die Vorräte an Erdöl und Erdgas frühestens in einigen Jahrzehnten erschöpft.

Allerdings verteilt sich der Bedarf geografisch sehr ungleichmäßig, wobei viele Länder der Dritten Welt gegenüber den Industrienationen inzwischen kräftig aufholen. Ähnlich ungleichmäßig sind die bekannten Lagerstätten verteilt: Ungefähr siebzig Prozent der weltweiten Vorräte an Erdöl und vierzig Prozent der Erdgasreserven konzentrieren sich in den Ländern des Mittleren Ostens.

Da immer weniger leicht zugängliche Erdölvorkommen entdeckt werden, zwingt der steigende Bedarf die Mineralölkonzerne dazu, auch Lagerstätten zu erschließen, die zuvor als nicht nutzbar galten. Dazu zählen etwa solche in gro-

ßen Wassertiefen in den ausgedehnten submarinen Sedimentbecken. Damit ihre Ausbeutung wirtschaftlich ist, müssen sie allerdings mehrere hundert Millionen Fass (Barrels, ein Barrel entspricht 159 Litern) enthalten und mindestens 10 000 Fass pro Tag liefern können.

Viele solche Erdölfelder befinden sich im tiefen Südatlantik; dort lagern etwa sieben Prozent der Weltreserven an fossilen Kohlenwasserstoffen. Deshalb hat die französisch-belgische Mineralölfirma TotalFinaElf (inzwischen in Total umbenannt) Ende 2001 vor der Küste Angolas die größte schwimmende Erdölplattform der Welt in Betrieb genommen. Die Anlage erschließt ein Feld namens Girassol (portugiesisch für Sonnenblume) in 1400 Meter Wassertiefe. Bis zu 200 000 Fass qualitativ hochwertigen Rohöls werden hier tagtäglich heraufgepumpt und gespeichert.

Extreme Förderbedingungen

Wegen der extremen Verhältnisse in solchen Tiefen stellt diese Unternehmung beispiellose Anforderungen. Während das Wasser am Meeresgrund etwa vier Grad Celsius kalt ist, beträgt die Temperatur der Kohlenwasserstoffe im Inneren des Speichergesteins rund 65 Grad. Beim Austritt ist das Erdöl noch 58 Grad heiß, und auf dem Weg nach oben darf es auf keinen Fall unter vierzig Grad abkühlen, weil sich sonst Paraffinklumpen bilden.



ALLE GRAFIKEN: DELPHINE BAILLY

Außerdem wird, wenn das sandige Speichergestein sehr locker ist, auch dieses teilweise ungewollt mit dem Rohöl zusammen heraufgepumpt und droht die Förderanlage zu verstopfen. Die durchströmende Mischung aus Öl, Wasser und Sand stellt die Rohrleitungen und die Anlage insgesamt auf eine harte Probe.

Aber nicht erst die Förderung des Erdöls aus großen Wassertiefen, sondern auch die Suche danach ist bereits sehr schwierig. Im Südatlantik konnten die Prospektoren davon profitieren, dass es den Geologen in den vergangenen Jahrzehnten gelungen ist, immer genauer herauszufinden, wie sich fossile Kohlenwasserstoffe bilden. Einerseits haben sie leistungsfähigere Methoden entwickelt, geologische Strukturen im Untergrund sichtbar zu machen. Andererseits konn-



ten sie die Definition eines »Erdölsystems« präzisieren.

Der Begriff bezeichnet jenen Teil eines Sedimentbeckens, der alle geologischen Voraussetzungen für die Bildung und Speicherung von Kohlenwasserstoffen erfüllt und in dem zugleich irgendwann die physikalischen und chemischen Bedingungen herrschten, bei denen das Öl oder Gas reifen konnte. Die vier geologischen Voraussetzungen sind ein »Muttergestein«, ein »Speichergestein« als Teil eines Drainagesystems, ein »Deckgestein« und eine »Fangstruktur«. Zudem muss das Muttergestein so tief absinken, dass es den hohen Temperaturen ausgesetzt wird, unter denen die chemische Reifung stattfindet.

Sedimentbecken sind gleichsam Delen in der Erdkruste, entstanden durch

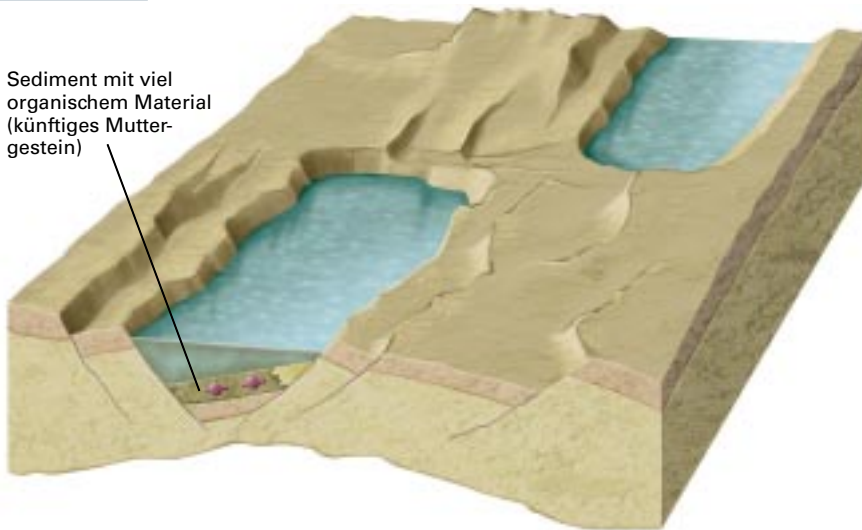
geodynamische Vorgänge infolge der Wanderung der großen, starren Lithosphärenplatten, aus denen die feste Erdschale besteht. Zunächst meist von einem Meer bedeckt, füllen sie sich im Verlauf einiger zehn Millionen Jahre mit Ablagerungen: Tonen, Sanden, Kalken und Salzen, die sich schließlich zu Gesteinen verfestigen.

Unter dem Gewicht der Sedimentdecke, die im Durchschnitt um einige Millimeter pro Jahr wächst, vertieft sich die eingedellte Erdkruste zusätzlich. Diese Absenkung unter dem doppelten Einfluss von Tektonik und Sedimentlast – Geologen sprechen von Subsidenz – kann im Extremfall zwanzig Kilometer betragen, was zu entsprechend mächtigen Ablagerungen führt. Das Pariser Becken ist ein Beispiel. In seinem tiefsten

▲ Ölvorkommen haben sich am Rand, aber auch in tieferen Regionen des Südatlantiks gebildet. Heute werden bereits Lagerstätten am Boden der Tiefsee ausgebeutet, was vor kurzem noch technisch unmöglich schien. Aufgabe der Geologen ist, mit Sondierungen, Simulationen und theoretischen Überlegungen die Lage der schwer zugänglichen Vorkommen zu ermitteln.

Teil erreicht die Füllung eine Mächtigkeit von 3000 Metern.

Zum Muttergestein für Erdöl werden Sedimente, wenn sie mindestens ein bis zwei Gewichtsprozent organisches Material enthalten: Gewebsreste von Organismen, welche in der Nähe gelebt ha- ▷



Bei der Öffnung des Südatlantiks entstand zunächst eine tausende Kilometer lange Rinne, in der sich große, mit Süßwasser gefüllte Einsturzgräben aneinander reihten. Darin wurden mächtige Sedimentschichten abgelagert, die viel organisches Material vom so genannten Typ I enthielten. Sie wechselten mit sandigen und kalkigen Sedimenten ab, die sich als Speichergestein eigneten.

▷ ben – vorwiegend planktonische Algen, höhere Pflanzen und Bakterien. Solche organikreichen Sedimente sind selten, da sie ein Ökosystem mit extrem hoher biologischer Produktivität erfordern. Außerdem müssen sich die abgestorbenen Lebewesen auf schnellstem Weg an einem Ort ablagern, der frei von Sauerstoff ist. Andernfalls würden aerobe Bakterien und benthische (am Meeresboden lebende) Organismen auf der angesammelten Biomasse üppig gedeihen und sie rasch verzehren. Meist bestehen die Gesteine mit hohem Organikgehalt aus Ton oder Mergel (Gemisch aus Ton und Kalk). Sie sind deshalb feinkörnig und wenig porös, also ziemlich undurchlässig.

Je nach Art des enthaltenen organischen Materials ordnet man die Muttergesteine drei großen Kategorien zu. Der wenig verbreitete Typ I besteht vorwiegend aus Resten von Bakterienmembranen und einzelligen Algen, die in Süßwasserseen leben. Seine Qualität ist sehr gut; denn siebzig bis achtzig Gewichtsprozent der eingebetteten Biomasse können sich unter günstigen Bedingungen in Kohlenwasserstoffe umwandeln. Muttergesteine dieses Typs kommen zum Beispiel in den Sedimenten von Seen am Westrand Afrikas und Ostrand Südamerikas vor. Sie haben sich dort zu Beginn der Kreidezeit vor 140 Millionen Jahren abgelagert. Ferner gibt es sie in weniger als halb so alten Becken in Südostasien oder auf dem chinesischen Festland.

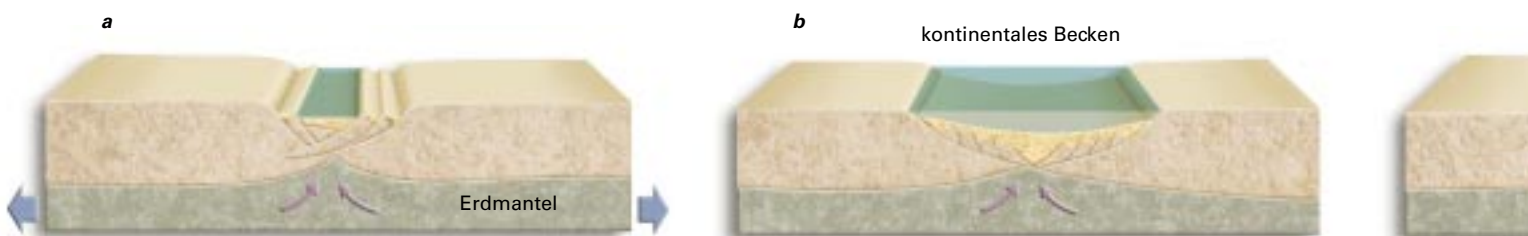
Der häufigere Typ II enthält Reste planktonischer Meeresalgen. Zu ihm gehören die Muttergesteine der Nordsee, Venezuelas und Saudi-Arabiens. Maximal dreißig bis sechzig Gewichtsprozent ihres Organikgehalts wandeln sich unter optimalen Bedingungen in Kohlenwasserstoffe um. Typ III schließlich (aus

dem auch die Kohle entsteht) stammt von Überresten einer höher entwickelten Vegetation auf dem Festland – typischerweise in Flussdeltas. Zwar können sich hier nur zehn bis dreißig Gewichtsprozent des Organikgehalts in Kohlenwasserstoffe umwandeln, doch ist die produzierte Erdölmenge erheblich, da sich die betreffenden Sedimentpakete oft mehrere hundert Meter hoch auftürmen.

Fallen auf dem Weg nach oben

Die gebildeten Kohlenwasserstoffe erzeugen im Muttergestein einen Überdruck und werden dadurch in weniger kompressible benachbarte Schichten gedrückt. Sind das poröse, durchlässige Gesteine mit Rissen und Verwerfungen, die zu fünf bis dreißig Prozent aus Hohlräumen bestehen, dann eignen sie sich als Speicher- und Drainagekomplex. Die Kohlenwasserstoffe können darin zu-

Die Geburt eines Meeresbeckens



Einst gehörte Südamerika zu dem riesigen Superkontinent Pangäa. Doch dann dünnte magmatisches Material, das entlang des künftigen Mittelatlantischen Rückens aufstieg, die kontinentale Kruste aus, sodass sie stellenweise einbrach (a). Allmählich verbreiterte sich die anfängliche Rinne zu einem großen Sedimen-

tationsbecken, dessen Boden zunächst noch aus granitischer kontinentaler Kruste bestand (b). Dann begann an der Spaltstelle jedoch Magma aus dem Erdmantel auszutreten und einen mittelozeanischen Rücken zu bilden, an dem eine basaltische ozeanische Kruste entstand (c). Deren älteste Teile, die sich an



nächst einmal weiterwandern. Da sie spezifisch leichter sind als das Wasser, von dem die Sedimentgesteine durchdrungen sind, steigen sie unter dem Einfluss von Auftriebskräften mehr oder weniger senkrecht empor, bis sie auf ein unpassierbares Deckgestein – in der Regel aus Ton oder Evaporit (verfestigtem Salz) – stoßen, das sie in der porösen Schicht zurückhält. Fehlt eine solche Sperre, dringen sie schließlich bis zur Oberfläche vor, wo sie durch natürliche chemische oder biologische Prozesse zerstört werden. Auf dieser Weise gelangen schätzungsweise genauso viele Kohlenwasserstoffe in die Umwelt wie durch menschliche Aktivitäten.

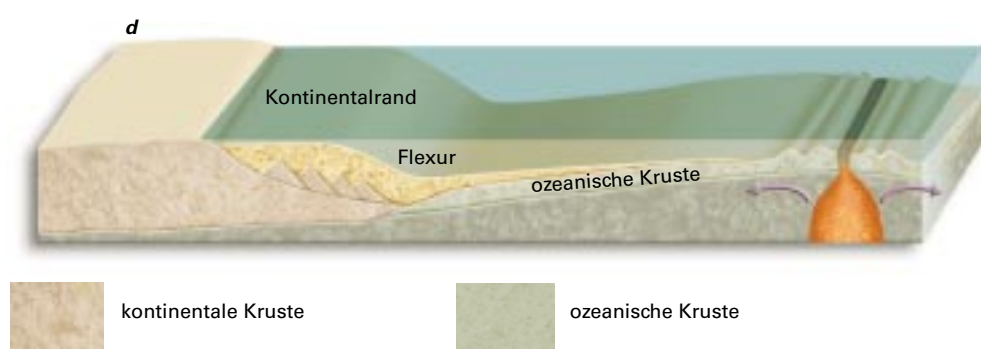
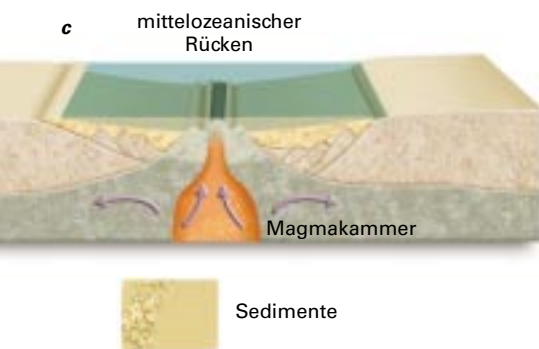
Das Deckgestein genügt aber noch nicht; es muss eine Fangstruktur hinzu-

kommen, in der sich die im Drainagesystem migrierenden Kohlenwasserstoffe ansammeln. Es gibt zwei Arten davon. Strukturfallen entstehen auf Grund geometrischer Besonderheiten. So sammelt sich Erdöl unter nach oben gewölbten (antiklinalen) Falten des Deckgesteins oder an Stellen, wo zwei unpassierbare Schichten schräg aufeinander stoßen. Bei stratigrafischen Fallen verringert sich dagegen plötzlich die Porosität des Speicherkomplexes – etwa am Übergang zu einem undurchlässigen Gestein. Die Poren können aber auch durch mineralische Verkittung verstopft sein.

Selbst wenn all diese geologischen Voraussetzungen in einem Sedimentbecken erfüllt sind, müssen geeignete thermische Bedingungen hinzukommen, da-

▲ Die größte schwimmende Förderplattform der Welt gewinnt aus dem Erdölfeld Girassol in 1400 Meter Wassertiefe vor der Küste Angolas täglich bis zu 200 000 Fass Rohöl.

mit auch wirklich Erdöl entsteht. Das ist der Fall, wenn sich das Sedimentbecken weiter füllt und das Muttergestein fortschreitend verschüttet wird. Dadurch gerät es immer tiefer unter die Oberfläche und erwärmt sich zunehmend, weil die Temperatur um etwa dreißig Grad Celsius pro Tiefenkilometer zunimmt. Die Hitze spaltet (crackt) schließlich das fossilisierte organische Material im Inneren des Gesteins, sodass es sich in chemische ►



den Kontinentalrändern befanden, kühlten sich zunehmend ab. Da ihre Dichte dabei zunahm, sanken sie auf Grund ihres Gewichtes ab und erzeugten eine so genannte Flexur (d). In den

resultierenden Vertiefungen sammelten sich die vom Land abgetragenen Sedimente. Damit waren die Bedingungen für die Bildung von Gas- und Erdölvorkommen erfüllt.

Sedimentation im sich öffnenden Südatlantik



Während der Bildung des Südatlantiks gab es mehrfach günstige Bedingungen für die Sedimentation von Erdöl-Muttergestein. Gleich nach dem Aufbrechen des Kontinents lagerten sich in wassergefüllten Gräben Muttergesteine vom Typ I ab (a). Als die Trennfuge bis zu 500 Kilometer breit geworden war, bildete sich ein lang gezogenes ozeanisches Becken. Es wurde mehrfach vom Weltmeer abgeschnitten und dunstete ein, wo-

bei sich bedeutende Mengen an Salz und Sedimenten mit viel Biomaterial vom Typ II absetzten (b).

Auch als sich das Becken noch mehr erweitert hatte, blieb der Kontakt mit dem Weltmeer eingeschränkt, was die Zirkulation des Wassers und seine Anreicherung mit Sauerstoff behinderte. So herrschten günstige Bedingungen für die Sedimentation von organischem Material und die Bildung von

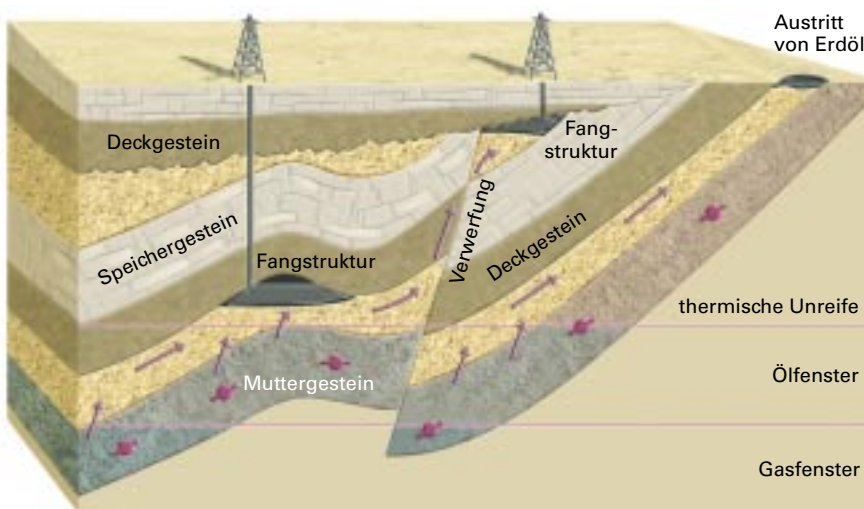
► Verbindungen mit immer geringerem Molekulargewicht umwandelt. Erdöl ist ein Gemisch aus solchen Verbindungen. Es wird zum Erdgas, wenn sich bei weiter steigender Temperatur der Crack-Prozess fortsetzt. Je nachdem, welches Produkt unter den jeweiligen Bedingungen entsteht, spricht man von Öl- oder Gasfenster.

Die Spaltung ist ein »kinetisches« Phänomen, was bedeutet, dass die Zeit eine wesentliche Rolle spielt: Eine längere Dauer des Crack-Vorgangs kann eine

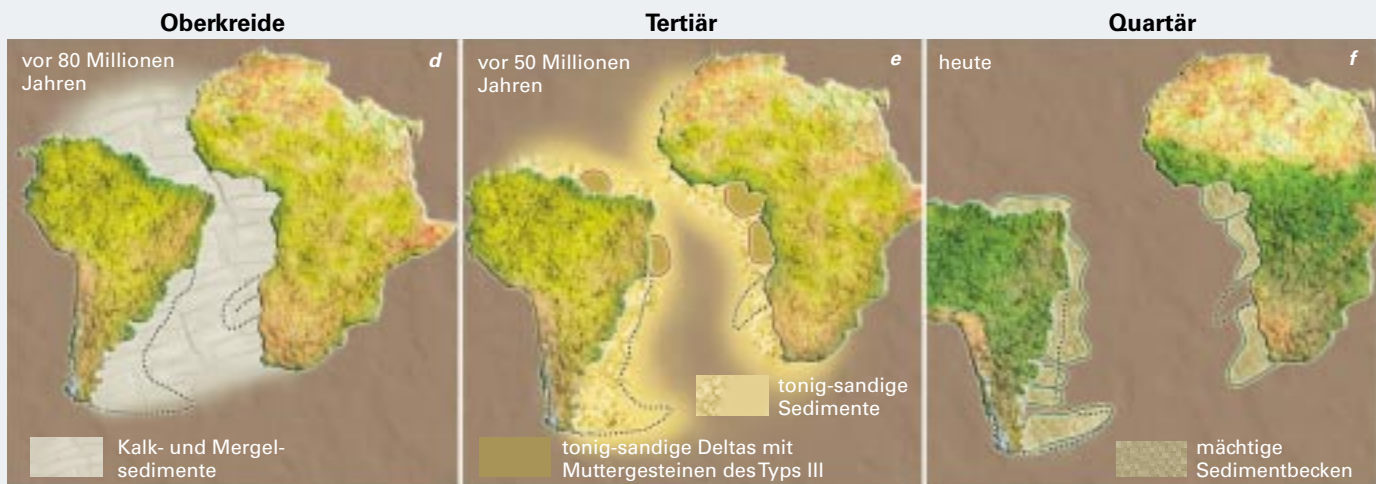
geringere Temperatur kompensieren. So erreichte das tertiäre Muttergestein, in dem sich das kalifornische Erdöl gebildet hat, sein Ölfenster bei 135 Grad Celsius schon nach 20 Millionen Jahren. Dagegen benötigte das Muttergestein des Pariser Beckens 100 Millionen Jahre, bis sich bei hundert Grad sein spezifisches Ölfenster auftat.

Wie lassen sich diese allgemeinen Vorstellungen nun auf die Erdölprovinzen im Südatlantik anwenden? Dieser begann sich in der frühen Kreidezeit vor

140 Millionen Jahren zu öffnen. Damals spaltete sich die gewaltige Landmasse Pangäa in zwei Kontinente, aus denen Amerika und Afrika hervorgingen. Zunächst dünnte an der späteren Trennlinie durch den Aufstieg teilweise geschmolzener magmatischer Gesteine die kontinentale Kruste aus. Dann zerbrach sie. In dieser Riftphase bestand der spätere Südatlantik aus einer Serie von annähernd parallel angeordneten Gräben, in denen sich große Seen bildeten. Darin setzten sich mächtige Sedimentschichten



Ein Erdölsystem besteht aus Mutter-, Speicher- und Deckgesteinen sowie Fangstrukturen. Außerdem müssen chemisch-geologische Prozesse stattfinden, in deren Verlauf sich Kohlenwasserstoffe bilden und sammeln. In den tiefen Schichten entsteht vor allem Gas, darüber Erdöl. In den oberen Lagen haben Temperatur und Reifezeit für die Umwandlung des biologischen Ausgangsmaterials in Kohlenwasserstoffe (noch) nicht ausgereicht.



Muttergesteinen des Typs II (c). Erst in der Oberkreide hatte sich der Südatlantik so weit geöffnet, dass er ausreichend mit Sauerstoff versorgt wurde. Damit konnten sich keine Muttergesteine mehr bilden. Jetzt wurden hauptsächlich Mergel deponiert (d).

Doch ab dem Ende der Kreidezeit begannen Sedimente, die von den Kontinenten abgetragen worden waren, den Platz zu

füllen, den die Verbiegung der Kontinentalränder durch die sich absenkende ozeanische Kruste geschaffen hatte (e). Der Nachschub an Gesteinsschutt vom Kontinent zu den Flexuren und damit die Mächtigkeit der abgelagerten Sedimente war an der afrikanischen Küste größer, weil dort intensivere Erosion stattfand; denn Afrika wurde teilweise angehoben, weil es mit Europa kollidierte.

mit viel organischem Material vom Typ I ab – im Wechsel mit sandigen und kalkigen Lagen, welche die Anforderungen an ein Speichergestein erfüllten.

Während die Kontinente auseinander rückten, erweiterte und vertiefte sich die Trennfuge zu einem ausgedehnten Sedimentbecken. Dabei blieben an den Rändern Afrikas und Amerikas die Reste der nichtmarinen Gräben erhalten. Aus ihnen entstanden die an Erdöl reichsten Muttergesteine des Südatlantiks, von denen ein großer Teil der Vorkommen in Angola, dem Kongo, Gabun und Brasilien stammt.

In dieser Öffnungsphase ergoss sich mehrfach Meerwasser aus benachbarten Ozeanen in das sich bildende Becken und die Gräben an seinem Rand. Es verdunstete während der Zwischenzeiten, in denen der junge Südatlantik wieder von den Weltmeeren abgeschnitten war. Dabei schieden sich mächtige Salzschichten ab, die ungefähr 120 Millionen Jahre alt sind. Sie bedeckten die nichtmarinen Becken und stellen heute die salzhaltigen Schichten im Untergrund des Südatlantiks dar.

Während sich das neue Sedimentbecken weiter öffnete, bildete sich in seinem Zentrum schließlich ein mitteloze-

anischer Rücken, an dem basaltisches Vulkangestein erstarnte und ozeanische Kruste erzeugte. So etablierte sich allmählich ein marines Regime. Statt der Salzschichten lagerten sich nun Kalk und Mergel, aber auch Sand ab, wodurch ausgezeichnete Speichergesteine entstanden. Allerdings verlor auch das neue Meer gelegentlich noch den Kontakt zu den benachbarten Ozeanen. Bei der Sauerstoffarmut, die sich in dem stagnierenden Wasser entwickelte, lagerten sich vorübergehend neue Muttergesteine vom Typ II ab.

Schuttrinnen am Kontinentalhang

Dieser Vorgang endete vor etwa 80 Millionen Jahren. Das Ozeanbecken war inzwischen zu groß geworden und hatte zu gute Verbindungen zu anderen Meeren, um die anoxischen Bedingungen zu bewahren. Im Rahmen weiträumiger Zirkulationsprozesse drang sauerstoffreiches Wasser aus benachbarten Ozeanen ein. Damit verschwanden die Voraussetzungen für die Bildung von Muttergesteinen.

Das änderte sich erst allmählich wieder gegen Ende der Kreidezeit und insbesondere im frühen Tertiär (vor etwa 50 Millionen Jahren). Nun lieferte die Akkumulation von Sedimenten, die von

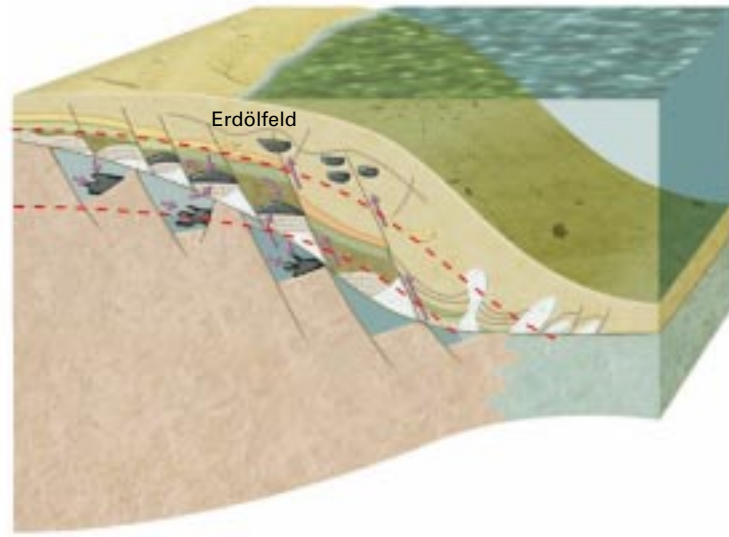
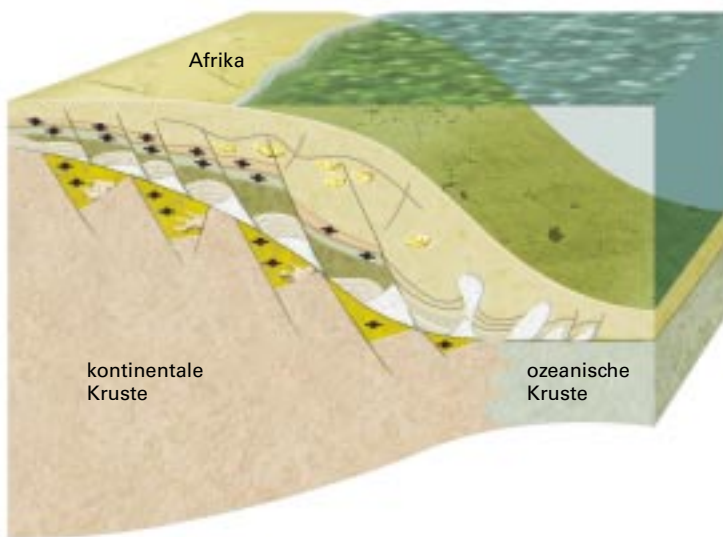
den Kontinenten – vor allem vor Flussdeltas – in die Zuflussrinnen steil abfallender Becken herabgeschwemmt wurden, erneut günstige Bedingungen für die Entstehung von Erdölsystemen.

Die zunehmende Abkühlung der ältesten ozeanischen Kruste, die sich jeweils vor den Kontinentalrändern befindet, begünstigte dieses Ablagerungsregime. Beim Erkalten wurde das Gestein nämlich dichter und damit schwerer. Folglich sank die ozeanische Kruste am Kontinentalrand ab und erzeugte einen Knick, den die Geologen Flexur nennen. Er schuf einen Raum, der sich für die rasche Akkumulation großer Mengen kontinentaler Schuttmassen eignete.

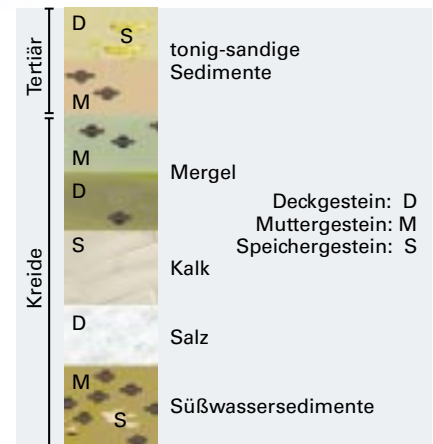
So lagerten sich zum Beispiel im Nigerdelta mächtige Serien tonig-sandiger Sedimente ab. Darin findet man stellenweise Schichten mit organischem Material des Typs III, also Überresten einer kontinentalen Vegetation. Die Kohlenwasserstoffe haben sich in sandigen Rinnen angesammelt – Resten submariner Transportwege, auf denen die Sedimente in große Tiefen gelangten. Diese Reservoir sind in Tonen eingebettet, welche die Rolle des Deckgesteins spielen.

Dieser abwechslungsreichen geologischen Entwicklung verdanken der Süd- ▷

Erdölbildung vor Afrika



In schematischen Schnitten des Kontinentalrands vor der Küste von Gabun, dem Kongo und Angola sind der geologische Aufbau der Erdkruste (links) und die Entstehung der dortigen Erdöllagerstätten (rechts) dargestellt. Senken in der Basis der kontinentalen Kruste enthalten nichtmarine Sedimente mit Muttergesteinen des Typs I. Darauf ruhen Salzlagerstätten und darüber Kalkgesteine, die oft sehr gute Speicher bilden. Dann folgen Mergel, einige davon Muttergesteine vom Typ II. Darüber schließlich enthalten tonig-sandige Schichten Muttergesteine vom Typ III und Speicher, die sich in den sandigen Rinnen und Fächern befinden. Unter geeigneten Temperaturbedingungen haben sich in den verschiedenen Muttergesteinen Kohlenwasserstoffe gebildet. Sie sind in die porösen, zerklüfteten Speicherschichten übergetreten und darin gewandert (Pfeile), bis sie in Fallen unterhalb des undurchlässigen Deckgesteins gefangen blieben. Zwischen den gestrichelten roten Linien entstand Erdöl, darunter Erdgas.



▷ atlantik und die angrenzenden Regionen ihre reichen Erdölvorkommen. Dabei haben sich gleich mehrere Familien von Muttergesteinen verschiedenen geologischen Alters in weitgehend symmetrischer Anordnung beiderseits des Atlantiks gebildet.

So gibt es sowohl im Campos-Becken vor der Küste Brasiliens als auch im unteren Kongo-Becken nichtmarine Muttergesteine vom Typ I, die zu Beginn der Öffnung des Atlantiks abgelagert wurden, sowie jüngere marine Muttergesteine vom Typ II, die aus der mittleren Kreidezeit stammen, also etwa 100 Millionen Jahre alt sind. Während sich jedoch im Kongo aus beiden Arten von Muttergesteinen Kohlenwasserstoffe gebildet haben, erreichten vor der brasilianischen Küste nur die nichtmarinen Gesteine des Typs I das Ölfenster.

Woher kommt dieser Unterschied? Die Hauptursache ist die Kollision der

Afrikanischen mit der Europäischen Platte. Sie bewirkte eine Anhebung großer Teile des Schwarzen Kontinents, was die Erosion verstärkte. Während des gesamten Tertiärs (vor 65 bis 2 Millionen Jahren) beförderten die Flüsse dadurch erhebliche Mengen von Schwemmmaterial in die Deltas und lagerten es dort ab. Stellenweise – etwa an der Mündung des Niger – erreichte dieser Erosionsschutt eine Mächtigkeit von elf Kilometern. Er begrub auch noch viele afrikanische Muttergesteine des Typs II, die nach den Salzschieben abgelagert wurden, so tief, dass Kohlenwasserstoffe entstanden. An der brasilianischen Küste wurden dagegen nur die nichtmarinen Muttergesteine des Typs I unter den Salzdecken so stark verschüttet, dass sie das Ölfenster erreichten.

Außer mächtigen Sedimentdecken gibt es an den Rändern des Südatlantiks aber auch zahlreiche Verwerfungen. Sie

fungieren gleichsam als Drainagerohre, die den Kohlenwasserstoffen den Aufstieg von den Mutter- zu den höher gelegenen Speichergesteinen ermöglichen. Teils stammen sie noch aus der Öffnungsphase, teils entstanden sie aber auch über Salzschieben, auf deren glatter Oberfläche die geeigneten Sedimentpakete innerhalb der Flexur leicht abrutschen konnten.

Überdies enthalten die Ablagerungen an den Rändern des Südatlantiks ausgezeichnete Speichergesteine – sowohl in den Schichten unter den Salzen als auch in den Kalken darüber. Hinzu kommen sandige Rinnen und Fächer aus dem Tertiär, die beim massenhaften Transport von Erosionsschutt am Kontinentalhang abgelagert wurden. Über deren Verteilung, Aufbau und innere Struktur war bis vor wenigen Jahren noch gar nichts bekannt. Manchmal sind diese Reservoirs kaum verschüttet ▷

▷ und wenig verfestigt. Das führt zu technischen Schwierigkeiten bei der Ausbeutung eines solchen Erdölfeldes, weil zum Beispiel Absenkungen drohen. Außerdem sind die Sedimentschichten über den tertiären Speichergesteinen am Kontinentalhang vielfach noch ziemlich locker und lassen die Kohlenwasserstoffe entweichen.

Der Untergrund des Atlantiks enthält aber auch gute Deckgesteine aus Ton oder Salz. Mit zunehmender Entfernung von der Küste werden die Salzschichten immer zerstückelter und zerfallen weit draußen im Atlantik in voneinander isolierte »Flöße«. Dazwischen konnte das Erdöl aus kreidezeitlichen Muttergesteinen teilweise in höher gelegene Speicher aufsteigen. So hat die komplexe Geometrie der Sedimente an den Rändern des Südatlantiks eine Vielzahl von Fangstrukturen geschaffen: Salzflöße, antiklinale Kalkfalten der Kreidezeit und große Wellen innerhalb der tertiären Sedimente, die Rinnen inmitten undurchlässiger Tone enthalten.

In ihnen sammelte sich das Öl und Gas aus den Muttergesteinen an. Einige Reservoirs befinden sich an Stellen, wo der Ozean mehr als 2000 Meter tief ist. Diese Vorkommen blieben lange unerreichbar, weil die technischen Voraussetzungen für die Förderung in mehr als 500 Meter Wassertiefe fehlten. Doch in den letzten zehn Jahren ist es vielen großen Mineralölkonzernen gelungen, bis zu mehrere tausend Meter unterhalb der Ozeanoberfläche zu arbeiten.

Raffinierte Erkundungsmethoden

Parallel dazu haben die Geologen Konzepte und Methoden entwickelt, um Vorkommen im Boden der Tiefsee aufzuspüren. Sie kennen heute nicht nur die Bildungsbedingungen eines Erdölsystems viel genauer, sondern können auch seine Struktur und seinen Inhalt sichtbar machen. Dazu verwenden sie eine Art Schallortung: die so genannte Reflexionsseismik. Dabei erzeugen sie beispielsweise mit Luftpulsern akustische Wellen im Wasser und erschließen aus deren Reflexion an den verschiedenen geologischen Strukturen im Meeresboden den Aufbau und die Beschaffenheit der Sedimentschichten.

Das Ergebnis sind zwei- oder immer öfter auch dreidimensionale Bilder des Untergrunds ähnlich denen, die heute schon zur Erkundung der Offshore-Be-

reiche dienen. Um die reflexionsseismischen Daten richtig zu interpretieren, müssen die Geologen alle verfügbaren Informationen über die betreffende Zone einbeziehen – vor allem solche aus schon durchgeführten Bohrungen.

Etliche Forscher greifen zudem auf numerische Simulationen von Erdölsystemen zurück, um insbesondere den Ablauf der Verfüllung eines Beckens innerhalb geologischer Zeiträume zu rekonstruieren. Oft vollziehen sie außerdem die thermische Entwicklung des Muttergesteins nach und modellieren nicht nur die Bildung der Kohlenwasserstoffe, sondern auch deren Aufstieg und Sammlung in den Fangstrukturen. Im günstigsten Fall liefern die Simulationen sogar Aussagen über die Art der Kohlenwasserstoffe in den Vorkommen, lassen also beispielsweise erkennen, ob es sich um Öl oder Gas handelt. Wenngleich die Bilder und die Ergebnisse der Simulationen noch mit einigen Unsicherheiten behaftet sind, vermindern sie das Risiko, dass eine Bohrung fehlschlägt, doch erheblich.

Wie weit reicht die Zone mit Mutter- und potenziellen Speichergesteinen im Südatlantik? Im Moment lässt sich das noch nicht genau sagen. Ein Grund dafür ist der unbekannte Verlauf der Sedimentmächtigkeit. Sie erhöht sich bis zum unteren Kontinentalhang, nimmt dann aber mit der Entfernung von der Küste unweigerlich wieder ab. Nun sind weniger verschüttete Muttergesteine bei gleichem Alter auch weniger gereift. Darum befinden sich die ältesten, nichtmarinen Muttergesteine, die in der »normalen« Tiefsee das Gasfenster erreicht haben, in den größten Wassertiefen, sofern es sie dort überhaupt gibt, höchstwahrscheinlich noch im Ölfenster. Desgleichen sind marine Muttergesteine aus der jüngeren Kreidezeit, die es in moderaten Tiefen bis ins Ölfenster geschafft haben, in den allertiefsten Regionen vielleicht noch nicht genügend gereift.

Die Abnahme der Verschüttung ist umso gravierender, als sich auch der Wärmefluss, von dem die Sedimente profitieren, zur Tiefsee hin verringert. An die Stelle der kontinentalen Kruste mit ihrem relativ hohen Gehalt an Wärme liefernden radioaktiven Isotopen tritt zunehmend ozeanische Kruste, die arm an solchen strahlenden Elementen ist. Zusammen mit der Ausdünnung der Sedimentschicht definiert dieser Effekt eine äußerste Grenze, jenseits derer kein

Erdölsystem mehr Kohlenwasserstoffe produzieren kann. Die Computersimulationen sollten uns dieses Limit angeben, sobald wir genügend Daten aus den ultratiefen Bereichen gesammelt und ge-eicht haben.

Durcheinander gewürfelte Schichten

Die am tiefsten gelegenen Regionen eines marinen Sedimentbeckens sind oft geologisch sehr komplex, was die Interpretation der seismischen Bilder erschwert. So treten hier schwerkraftbedingte Stauchungsprozesse auf, bei denen sich die geneigten Sedimentschollen übereinander schieben und durcheinander gewürfelte Stapel erzeugen. Schließlich kann bei den wenig verschütteten Erdölsystemen in sehr großen Wassertiefen die Temperatur so niedrig sein, dass bakterielles Leben möglich ist – es verschwindet erst oberhalb von neunzig Grad Celsius. In diesem Fall kommt es zu biologischen Abbauprozessen des organischen Materials, bei denen Schweröl entsteht: eine dichte, zähe Flüssigkeit, die noch wenig erforscht und schwer zu gewinnen ist.

Diese Schwierigkeiten und Risiken sind beträchtlich. Aber in den 1970er Jahren schienen die technischen und wissenschaftlichen Hindernisse bei der Nutzung von Vorkommen unterhalb von 500 Meter Wassertiefe auch unüberwindlich. Dennoch wurden einige ehrgeizige Projekte gestartet, und die Fördermenge ist heute schon bedeutend. Befinden wir uns jetzt gegenüber den tiefsten Meeresregionen in derselben Situation wie vor drei Jahrzehnten gegenüber der »normalen« Tiefsee? In einigen Jahren werden wir es wissen. ◁



Alain-Yves Huc leitet das Forschungszentrum der Schule für Erdöl und Motoren des Französischen Erdölinstituts in Reuil-Malmaison bei Paris.

Erdöl. Von M. Bürgi und B. Gehr. Orell Füssli, Zürich 1997

Petroleum systems of south Atlantic margins. Von M. Mello und B. J. Katz (Hg.). American Association of Petroleum Geologists, Memoir 73, 2000

20 ans dans l'amont pétrolier. Von G. Subielles in: Pétrole et Techniques, Bd. 429, S. 35 (2000)

Le Pétrole, une épopée. Von X. Bois de la Tour. Collection Explora, Press Pocket, 1993

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.