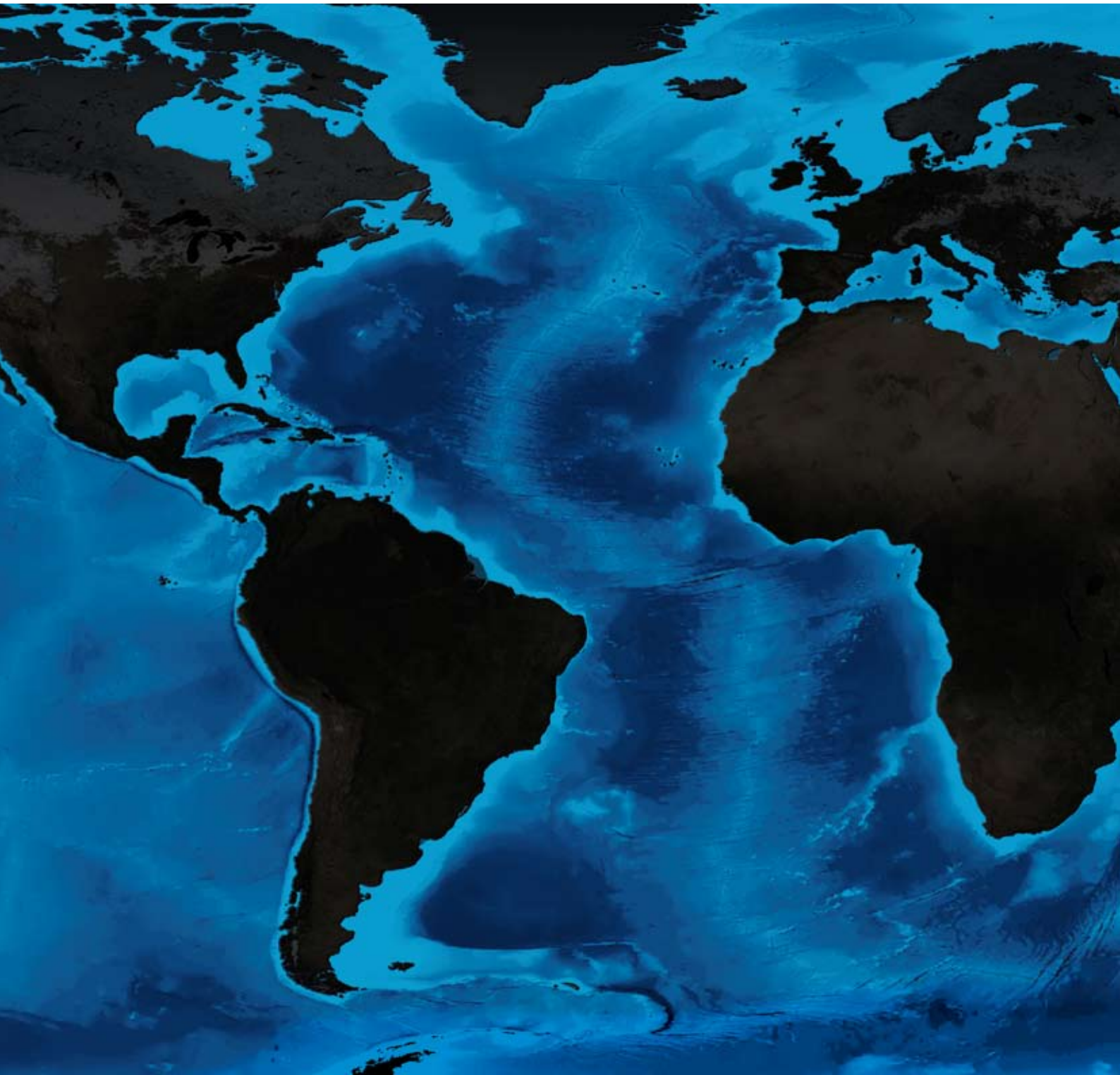




ozean der zukunft
DIE KIELER MEERESWISSENSCHAFTEN

Die Ölkatastrophe im Golf von Mexiko – was bleibt?

| Hintergrundinformationen und offene Fragen zu den Folgen der Explosion der „Deepwater Horizon“ für die Meere und ihre Küsten - von Wissenschaftlern aus dem Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“



Inhalt

Ursachen und Geschichte – Die BP-Ölkatastrophe und die größten Ölkatastrophen der Vergangenheit	03
Die Entstehung und Förderung von Erdöl und Erdgas	05
Tiefseebohrungen – warum ist es so schwierig?	07
Technik und Gefahren der Tiefseebohrungen	09
Sonderfall Küste	13
Die Ausbreitung des Öls durch die regionale und globale Ozeanzirkulation	15
Misserfolg durch Gashydratbildung beim Einsatz der Stahlkuppel	20
Der Abbau des Öls	23
Folgen des Ölnfalls im Golf von Mexiko für Fische und Fischerei	29
Folgen der Ölverschmutzung für die Bodenlebewelt im Golf von Mexiko	30
Ölaustritte – Die Schädigung der Tiefsee	32
Allgemeine Rechtslage	34
Nachlese: Die ökonomischen Kosten der Öl-Havarie	36
Weiterführende Informationen	39
Über den Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“	40

Ursachen und Geschichte – Die BP-Ölkatastrophe und die größten Ölkatastrophen der Vergangenheit

Die „Deepwater Horizon“-Katastrophe hat zur zweitgrößten vom Menschen verursachten Ölverschmutzung des Meeres und der angrenzenden Küsten geführt. US-Behördenangaben zufolge flossen 780 Millionen Liter (700.000 Tonnen) Rohöl in den Golf von Mexiko. Zum Vergleich: Im ersten Golfkrieg im Jahr 1990 wurde Schätzungen zufolge der Persische Golf mit rund 910 Millionen Litern Öl verschmutzt. Bei dem Unglück der Bohrinsel Ixtoc-1 vor der Küste von Yucatan im Golf von Mexiko im Jahr 1979 flossen 520 Millionen Liter Öl aus.

Weiterführende Links zu den Folgen der Ixtoc-1 Katastrophe, u.a.:

http://en.wikipedia.org/wiki/Ixtoc_1

Nature 290, 235 - 238 (19 March 1981) doi:10.1038/290235a0

Die größten Ölnfälle der vergangenen 50 Jahre

Jahr	ausgeströmtes Öl (Millionen Liter)	Ursache/ Havarist	Ort
1967	130	Torrey Canyon, Supertanker	Küste vor Südengland
1969	16	Union Oil A-Bohrplattform	Santa Barbara, Kalifornien
1977	13 – 20	Bravo-Bohrplattform, Ekofisk-Feld	Nordsee, vor Norwegen
1978	250	Amoco Cadiz, Supertanker	Bretagneküste, Frankreich
1979	520	Ixtoc-1 Bohrplattform der Pemex	Golf von Mexiko, vor der Küste von West-Yucatan
1989	42	Exxon Valdez, Supertanker	Küste von Alaska
1990	910	1. Golfkrieg	Persischer Golf, Kuwait
2010	780	BP-Plattform „Deepwater Horizon“, Macondo-Feld	Golf von Mexiko, vor Louisiana

Quelle: http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_spill, vergl. auch www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,710039,00.html

Die ungeheuren Größenordnungen dieser Katastrophen werfen Fragen nach der Sicherheit von Ölbohrungen im Meer auf, bei denen in immer größeren Tiefen nach neuen Quellen gesucht wird. Auch wenn neue Tiefseebohrungen vor den amerikanischen Küsten einstweilen gestoppt wurden, gehen sie andernorts weiter. Dabei muss - wie beispielsweise im Fall der neu gefundenen großen Vorkommen vor der Küste Brasiliens - in Meerestiefen von zwei Kilometern und mehr vorgestoßen werden.

Die Ölkatastrophe im Golf von Mexiko wird viele Jahre nachwirken und wirft bereits heute zahlreiche Fragen auf:

Wie groß sind die angerichteten Umweltschäden? Wer ist verantwortlich? Wer kommt für die Kosten auf? Können wir die ökologischen Kosten überhaupt beziffern? Können sich die besonders empfindlichen, einzigartigen Ökosysteme an der Küste von Louisiana, im Mississippi-Delta und an den Küsten der angrenzenden US-Bundesstaaten überhaupt erholen und in welchem Zeitraum? Wie wird Öl im Meer überhaupt abgebaut? Chemisch oder biologisch oder auf beiden

Ursachen und Geschichte – Die BP-Ölkatastrophe und die größten Ölkatastrophen der Vergangenheit

Wegen? Wie giftig sind das Öl und seine Abbauprodukte für den Menschen und für die Pflanzen- und Tierwelt? Welche Auswirkungen haben die Dispersionsmittel, die in riesigen Mengen zur „Auflösung“ des Öls versprüht wurden? Sind auch sie giftig? Welche wirtschaftlichen Schäden sind entstanden? Wer bezahlt dafür? Können und dürfen wir uns weitere Tiefsee-Ölbohrungen überhaupt leisten? Können wir sie so sicher machen, dass die Restrisiken tragbar bleiben?

Der Ölunfall im Golf von Mexiko hat große Lücken in unseren Kenntnissen über die Folgen von Ölunfällen in der Tiefsee, an der Meeresoberfläche und an den Küsten sichtbar werden lassen. Wo liegt der größte und dringendste Forschungsbedarf? Die im Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ forschenden Wissenschaftler sind diesen Fragen nachgegangen.



Abb. 1 | „Deepwater Horizon“ Fire - April 22, 2010, Photo courtesy of the US Coast Guard.
Source: www.incidentnews.gov/incident/8220

Friedrich Temps ist Professor für Physikalische Chemie an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel. Seine wissenschaftlichen Fachgebiete sind die Chemische Reaktionsdynamik, Spektroskopie und Photochemie. Er ist Träger des Gottfried-Wilhelm-Leibniz Preises 2000 der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Projektleiter im Sonderforschungsbereich 677 „Function by Switching“.

Die Entstehung und Förderung von Erdöl und Erdgas

Erdöl und Erdgas spielen in unserer Gesellschaft eine wichtige Rolle als Energieträger und als Rohstoff für die chemische und pharmazeutische Industrie. Erdöl und Erdgas, oft als Petroleum zusammengefasst, bestehen überwiegend aus chemischen Substanzen, die als Kohlenwasserstoffe bezeichnet werden. Diese bestehen ausschließlich aus Wasserstoff- und Kohlenstoffatomen. Methan gehört zu den leichten Kohlenwasserstoffen und hat einen Siedepunkt von -161°C . Andere schwerere Kohlenwasserstoffe haben höhere Siedepunkte (126°C Oktan, 174°C Aktan). In einem Petroleumreservoir herrschen typischerweise Temperaturen von $\sim 100^{\circ}\text{C}$, so dass Methan gasförmig und Oktan flüssig ist.

Die Hauptnutzung von Erdöl und Erdgas besteht in der Energiegewinnung. Wenn beispielsweise Oktan mit Sauerstoff reagiert, entsteht Wasser, Kohlendioxid und Wärme. Erdöl und Erdgas sind natürliche Rohstoffe, die sich über lange Zeit aus abgelagertem organischem Material bilden. Die Entstehung von Erdöl beginnt mit der Ablagerung von abgestorbenen Mikroorganismen wie Plankton am Meeresboden. Steht zum Zeitpunkt der Ablagerung nur wenig Sauerstoff zur Verfügung wird das an organischen Bestandteilen reiche Sediment nicht zersetzt und von neuem Sediment überlagert. Aus dem abgelagerten organischen Material bildet sich eine wachsartige Substanz, das Kerogen – der Grundstoff für die Bildung von Erdöl und Erdgas. Je tiefer das Meer und je höher die Temperatur ist, desto mehr Kerogen wird produziert. Bei Temperaturen von über 75°C wandelt sich das Kerogen in kleinere Kohlenwasserstoff-moleküle um, und es entstehen Öl und Gas. Der Temperaturbereich zwischen 75°C und 150°C wird als „Ölfenster“ bezeichnet, da sich in diesem Bereich hauptsächlich Erdöl bildet. Das „Gasfenster“ befindet sich zwischen 150°C und 230°C . Bei noch höheren Temperaturen entstehen Tonminerale und Graphit, die nicht mehr als Energieträger nutzbar sind. Erdöl und Erdgas sind leichter als Wasser und können durch Gesteinsporen aufsteigen und gegebenenfalls aus dem Boden austreten. Ein Öl- oder Gasfeld bildet sich, wenn die aufsteigenden Kohlenwasserstoffe auf eine undurchlässige (impermeable) Gesteinsschicht treffen und sich dort ansammeln. Von der Ablagerung von Plankton bis zur Entstehung eines Petroleumreservoirs vergehen viele Millionen Jahre. Auch wenn sich Petroleum kontinuierlich neu bildet, so sind aufgrund der langen Zeiträume die dafür nötig sind, Erdöl und Erdgas doch klar begrenzte, natürliche Ressourcen.

Erdöl und Erdgas bilden sich hauptsächlich in marinen beziehungsweise in ehemals marinen Gebieten mit hohen Sedimentationsraten. Die Ölexploration konzentriert sich daher beispielsweise auf die Kontinentalränder vor Norwegen, Grönland oder Brasilien sowie auf kontinentale Grabensysteme wie sie in der Nordsee vorkommen. Von großem Interesse für die Explorationsindustrie sind darüber hinaus Gebiete mit hohen Sedimentationsraten wie der Golf von Mexiko und das Nigerdelta. Nach fast 150 Jahren der Exploration an Land und über 60 Jahren der Exploration im Meer sind die großen und einfach auszubeutenden Felder aber wahrscheinlich bereits identifiziert. Neue signifikante Funde befinden sich meistens in technisch schwierigen Gebieten in großen Wassertiefen, wie beispielsweise im Golf von Mexiko und vor Brasilien (Santos- und Campos-Becken). Hier liegt der Schwerpunkt der Explorations-Industrie zurzeit auf Tiefsee-Bohrungen.

Die Größe der gefundenen Ölfelder variiert stark. Das größte zurzeit bekannte Feld ist das Ghawar-Feld in Saudi-Arabien mit ~ 75 Milliarden Barrel förderbarem Öl (http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_oil_fields). Das Gullfaks-Feld in der Nordsee ist vergleichsweise klein mit ~ 2.1 Milliarden Barrel förderbarem Öl (<http://www.npd.no/engelsk/cwi/pbl/en/field/all/43686.htm>). Einer der größten Funde der vergangenen Jahre im Golf von Mexiko ist das Tiber-Feld mit insgesamt 4 bis 6 Milliarden

Die Entstehung und Förderung von Erdöl und Erdgas

Barrel Öl (http://en.wikipedia.org/wiki/Tiber_Oil_Field). Der Macondo-Fund, an dem die havarierte „Deepwater Horizon“ gearbeitet hatte, ist wahrscheinlich kleiner, aber bisher gibt es keine belastbaren Zahlen.



Abb. 1 | Die damals weltgrößte Förderplattform PetrobrasP36 sank im März 2001 nach einer Explosion vor Brasilien in einer Wassertiefe von 1300 m.

Lars Rüpke ist Professor für Meeresbodenressourcen am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Sein wissenschaftliches Interesse gilt der Modellierung geologischer Prozesse an hydrothermalen Systemen und der Untersuchung von Sedimentbecken an passiven Kontinentalrändern.

Tiefseebohrungen – warum ist es so schwierig?

In den vergangenen zwei bis drei Jahrzehnten ist die Offshore-Exploration von Erdöl und Erdgas auf den Kontinentalhängen in immer größere Wassertiefen vorgedrungen. Häufige Gebiete sind dabei vor allem die Bereiche seewärts der Kontinentalschelfe, in denen in kurzer Zeit große Mengen Sediment abgelagert werden, also vor den großen Flussdeltas (z.B. Niger, Ganges/Brahmaputra, Mekong, Mississippi). Aber auch Ablagerungen an Kontinentalabhängen ohne große Flusssysteme (z.B. Südost-Brasilien, Angola) sind betroffen. Die Erschließung von Erdöl-Feldern in Wassertiefen über 1500 Meter ist keine Seltenheit mehr, seit neue große Lagerstätten, wie das Campos-Becken vor Brasilien, entdeckt wurden. So ist der nördliche Golf von Mexiko mit inzwischen vielen Hundert Explorations- und Produktionsbohrungen das Gebiet, in dem die Technologie für das Aufspüren von Erdöl und Erdgas wesentlich entwickelt wurde. Dafür werden Bohrschiffe eingesetzt, da die Wassertiefen für klassische Verankerungen zu groß sind. Für die anschließende Produktion wird das Öl- oder Gasfeld mit so genannten „Tension-Leg“-Plattformen entwickelt. Diese werden über Trossen und Zuganker an großen Betongewichten am Meeresboden verankert, sind aber selbst schwimmfähig.

Die Technologie für Tiefseebohrungen ist extrem aufwendig. Die Kosten für Bau- und Inbetriebnahme großer Förderplattformen können leicht eine Milliarde US-Dollar übersteigen. Die Förderraten für Öl von den größten Plattformen im nördlichen Golf von Mexiko können 1000 Tonnen pro Tag überschreiten. In dieser Größenordnung bewegt sich die zu erwartende Menge von Öl, die täglich maximal aus einem havarierten Bohrloch austreten könnte.

Wieso ist es aber so schwierig, Bohrungen in großen Wassertiefen technisch zu beherrschen?

- ▶ Die Gesteinsschichten - so auch die oberflächennahen Sedimentschichten, durch die Bohrungen vorgetrieben werden - stehen unter hohem Druck von Flüssigkeiten in Gesteinsporen. Die Flüssigkeit kann Öl, Gas oder auch Wasser sein. Durch den hohen Flüssigkeitsdruck werden die Gesteine mechanisch instabil, und die Wandungen von Bohrlöchern können einstürzen.
- ▶ In mechanisch instabilen Situationen ist es schwierig, Bohrlöcher verlässlich zu verrohren und zu zementieren. Obwohl der Unfallhergang im Fall der Plattform „Deepwater Horizon“ zurzeit noch nicht genau geklärt wurde – die Havarie ist bei Zementationsarbeiten in einem Bohrloch aufgetreten.
- ▶ Explorations- und Förderbohrungen sind nur dann sicher, wenn am Meeresboden über der Bohrung ein Blowout-Preventer (BOP) installiert ist. BOP haben Ventile, die bei einem Öl- oder Gasausbruch, einem so genannten Blowout, das Bohrloch zum Meeresboden hin automatisch verschließen. BOP haben die Größe von Einfamilienhäusern und sind am Meeresboden schon in geringen Wassertiefen schwierig zu installieren. In großen Wassertiefen vervielfachen sich die Schwierigkeiten und Kosten wie auch die Risiken von Fehlfunktionen.

Die Havarie der „Deepwater Horizon“ ist die erste Katastrophe, die durch Fehlfunktion der Technik der Plattform und in einer Wassertiefe von über 1000 Meter am Meeresboden ausgelöst wurde.

Tiefseebohrungen – warum ist es so schwierig?

Zukünftige Öl- und Gasunfälle am Meeresboden werden in den Tiefwasserbereichen auftreten, in denen der Öl- und Gasabbau durchgeführt wird. Das sind der nördliche Golf von Mexiko, das Nigerdelta und das Kongodelta in Afrika. Gründe für die Gefährdung liegen in den dort häufig vorkommenden geohydraulischen Bedingungen mit hohen Drücken durch Gas und Flüssigkeiten in den Gesteinsporen. Diese können bei Tiefseebohrungen besonders bei der Kohlenwasserstoffexploration kritische Bedingungen erzeugen.

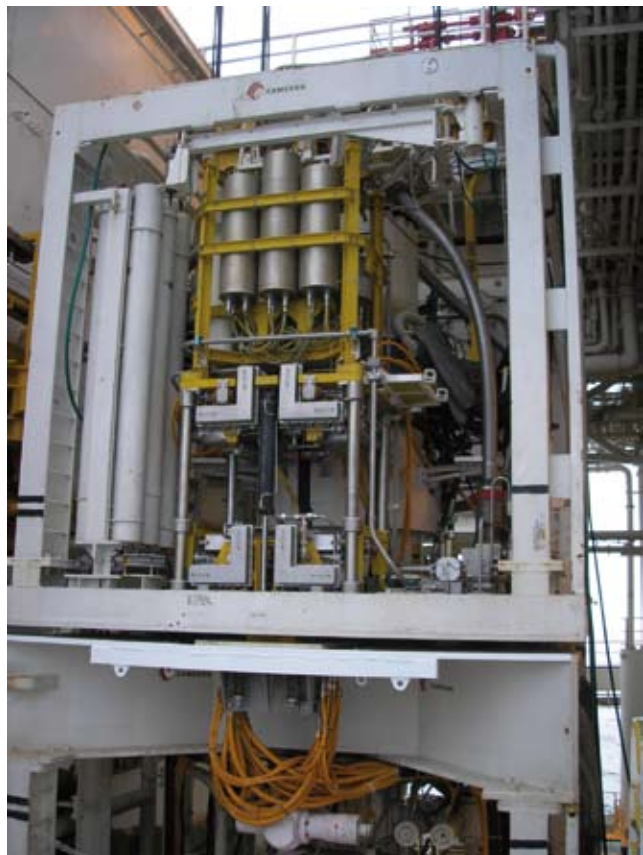


Abb. 1 | Blowout-Preventer des japanischen Tiefbohr-Forschungsschiffes CHIKYU. Er wiegt rund 380 Tonnen, ist etwa 14,5 Meter hoch und kann einem Druck von etwa 103 MPa widerstehen.
Foto: Jan Behrmann, IFM-GEOMAR

Jan Hinrich Behrmann ist Professor für Marine Geodynamik am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel und Gründungsmitglied des Exzellenzclusters Ozean der Zukunft. Im Fachbereich „Dynamik des Ozeanbodens“ beschäftigt er sich mit den Gefügen, der Festigkeit und physikalische Eigenschaften von Sedimenten.

Technik und Gefahren der Tiefseebohrungen

Erdöl- und Gasbohrungen im Wasser (offshore) sind seit dem frühesten 19. Jahrhundert bekannt. So wurden beispielsweise in Summerland, Kalifornien sehr küstennahe Ölfelder an Land ausgebeutet, die sukzessive über Steg- und Gerüstsysteme in den wasserbedeckten Bereich vorgetrieben wurden. Die erste echte offshore-Bohrung, Ship Shoal 32, die von Land aus mit bloßem Auge nicht mehr zu erkennen war, wurde im Jahr 1947 von der Firma Kerr-McGee im Golf von Mexiko, vor der Küste von Louisiana, in einer Wassertiefe von nur vier Metern und in einer Entfernung zum Land von 14 Kilometern installiert und lieferte bis zum Jahr 1984 Öl. Heute befinden sich über 4.000 Installationen im Golf von Mexiko, die der Öl- und Gas-Produktion und dem Transport oder der Verarbeitung dienen.

Der weitaus überwiegende Teil dieser Anlagen steht in flachem Wasser und ist für technische Eingriffe leicht zugänglich. Die meisten Ölfelder im Flachwasser wurden bereits gefunden. Mit spektakulären neuen Entdeckungen auf den zur Exploration freigegebenen Schelfbereichen ist daher nicht zu rechnen. Im Jahr 2008 erhielt die genehmigende Behörde US Minerals Management Service (MMS) für Bohrungen im Golf von Mexiko nur 67 Anträge für Bohrungen in einer Wassertiefe von weniger als 200 Meter, deutlich höher waren die Antragszahlen für größere Wassertiefen (> 800 Meter -169, > 1.600 Meter - 46 und > 2.000 Meter - 22).

Die schon zum Teil auf Land oder im Flachwasser bekannten geologischen Strukturen, vor allem große Sedimentbecken, setzten sich im Tiefwasser fort, so dass sich der Reiz für eine Ausdehnung der Aufsuchungs- und Förderungsaktivität erhöht. Derzeit ist der globale Anteil der offshore-Ölförderung mit 40 Prozent bereits unverzichtbar hoch. Etwa fünf Prozent der globalen Förderung erfolgt aus Tiefwassergebieten mit steigender Tendenz.

Als Tiefseebohrungen werden üblicherweise diejenigen bezeichnet, die in einer Wassertiefe von mehr als 150 Meter abgeteuft werden. In vielen Regionen stimmt diese Tiefe mit der Ausdehnung des Kontinentalschelfgebiets überein. Darüber hinaus ist dies die Maximaltiefe für den Einsatz von Tauchern für Wartungs- oder Reparaturarbeiten.

In größerer Tiefe ist nur mit bemannten Tauchbooten oder ferngesteuerten Robotern (Remote Operated Vehicle; ROV) ein Arbeiten unter Wasser möglich. Technische Eingriffe werden damit im Vergleich zu solchen an Land erheblich erschwert. Unterwasserfahrzeuge können beispielsweise keine großen Lasten tragen. Alle schweren Gegenstände wie Verschluss- oder Regulierventile (Blow-out-preventer, BOP.) sowie Rohrverbindungen, die teilweise mehrere zehn Tonnen wiegen, müssen an Seilzugsystemen oder Gestängen von der Wasseroberfläche abgelassen werden, was ein genaues Manövrieren extrem erschwert.

Da Schiffe bei Wellengang Vertikalbewegungen von mehreren Metern ausführen, sind aufwändige Teleskop- oder Kompensationssysteme notwendig, um diese Bewegungen auszugleichen. Das Bewegen schwerer Gegenstände unter Wasser durch ROVs oder das Aufbringen größerer Kräfte, um beispielsweise Verschraubungen zu lösen, wird dadurch erschwert, dass die sich frei im Wasser bewegenden ROVs einen hohen Gegenschub ausüben müssen, ohne dass sie einen festen Untergrund als Widerlager besitzen. Muss ein Gegenstand bewegt werden, kann es sein, dass sich nur das ROV dreht, da Schub und die Masse des Tauchbootes nicht ausreichen. Nicht die Verschraubung wird gelöst, sondern der ROV dreht sich um Verschraubung.

Technik und Gefahren der Tiefseebohrungen

Die technischen Schwierigkeiten für Wartungs- und Reparaturarbeiten sind somit enorm und werden noch durch den hohen Druck in großer Wassertiefe sowie die schlechten Sichtverhältnisse verstärkt.

Bohrungen in Gebieten mit wenig bekannten geologischen Verhältnissen sind immer mit einem Risiko verbunden, da der Bohrkopf stets in eine Gesteinsschicht eindringen kann, in der im Porenraum der Gesteine unter hohem Druck stehende Fluide vorhanden sind. Am Meeresboden frisch abgelagerte Sedimente haben einen Wassergehalt von 60 bis mehr als 70 Prozent. Dieser sinkt in drei bis vier Kilometern Tiefe durch Kompaktion der Sedimentpartikel auf 10 Prozent ab. In den Porenraum der Gesteine treten in dieser Tiefe Gase und Öle ein, die durch die thermische Zersetzung von partikulärem organischem Material (Kerogen), das sich in einigen Gesteinsschichten angereichert hat, freigesetzt werden. Somit wird der Druck im Porenraum der Gesteine erhöht. Solange die überlagernden Schichten noch stellenweise durchlässig sind, wird es einen Druckausgleich geben, da die Öle oder Gase vom Ort ihrer Entstehung abwandern und in vielen Fällen bis an die Oberfläche austreten. Beispiel für solche natürlichen großräumigen Ölaustritte sind die Teersandvorkommen in Westkanada oder in Venezuela. Falls im Untergrund jedoch eine impermeable (nicht durchlässige) Schicht, wie beispielsweise eine Salzlage, das Entweichen der Fluide verhindert, können hohe Drücke im Porenraum der Gesteine aufgebaut werden. Trifft eine Bohrung auf ein solches Überdruckregime, ist es von entscheidender Bedeutung, dass das im Bohrloch stehende Gewicht der Bohrspülung (Schlamm) diesem Druck entgegenwirken kann. Hierzu wird vom Bohrleiter ständig die Dichte der Bohrspülung an die jeweils herrschenden Druckverhältnisse angepasst.

Ein unkontrolliertes Austreten von Fluiden (Gemische von Gas, Öl, Wasser) kann erfolgen, wenn eine Hochdruckzone angebohrt wird und sich über Kommunikation zur Oberfläche eine spontane Druckentlastung einstellt. Hierbei ist von Bedeutung, dass Öl und Wasser bei hohem Druck große Mengen an Gas lösen können. Wird der Druck gesenkt, so entlässt sich das Gas aus dem Öl und bildet eine eigene Phase, die sich stark ausdehnt und mit hoher Geschwindigkeit im Bohrloch aufsteigt. Diese aus großer Tiefe rasant aufsteigende Gasfront kann in wenigen Minuten die Bohrplattform erreichen, wobei sie alles im Bohrloch Befindliche nach oben verdrängt. Es treten also auf der Bohrplattform Gase, Öl, Bohrspülung, aber auch technische Installationsteile wie Gestänge, Bohrkrone oder Dichtungsteile aus. Durch Funkenschlag kann sich dieses Gemisch entzünden. Es kommt zu verheerenden Explosionen wie auf der Plattform „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko.

Das aus der thermischen Abspaltung aus organisch-reichen Sedimenten - meist drei bis 10 Gewichtsprozent organisches Material, so genannten Erdölmuttergesteinen - freigesetzte Öl und Gas besteht überwiegend aus Kohlenwasserstoffen, das sind Verbindungen mit einem C-Gerüst, an dem alle nicht mit C-verbundenen Atome mit H verknüpft sind. Zu einem geringen Teil enthält das Öl Heteroverbindungen, die neben C und H weitere Elemente wie S, O oder N enthalten. Generell sind reine Kohlenwasserstoffe nur gering toxisch und schlecht bis nicht in Wasser löslich. Am gefährlichsten sind hier die aromatischen (ringförmigen) Kohlenwasserstoffe, da sie eine akute Toxizität aufweisen oder mittelfristig erbgutschädigend oder krebserregend wirken. Zudem besitzen sie eine höhere Wasserlöslichkeit als nicht-aromatische Kohlenwasserstoffe und werden somit von Organismen über biologische Prozesse leichter aufgenommen. Heterokomponenten im Öl zeigen oftmals eine hohe Toxizität und Umweltrelevanz, gekoppelt mit hoher Wasserlöslichkeit und hoher biologischer Aufnahmerate.

Das aus dem Macondo-Bohrloch im Golf von Mexiko ausgetretene Öl stammt aus großer Tiefe (>6 km) und ist bei hohen Temperaturen (>180°C) gebildet worden. Hohe Bildungstemperaturen (Reife) bedingen im Öl einen geringen Anteil an Heterokomponenten und eine Dominanz

Technik und Gefahren der Tiefseebohrungen

an niedrigmolekularen Kohlenwasserstoffen. Generell sind derartige Öle weniger umweltschädlich als bei geringeren Temperaturen gereifte Schweröle. Von dem aus dem Macondo-Bohrloch ausgetretenen Öl sind an der Wasseroberfläche etwa 40 bis 50 Prozent in die Atmosphäre verdampft. Zum Vergleich: Beim Exxon Valdez Unfall waren dies etwa 30 bis 40 Prozent. Das an der Wasseroberfläche treibende Öl verändert jedoch permanent seine Zusammensetzung, da es durch Sauerstoff oxydiert und durch Licht photodegradativ angegriffen wird, sowie sich durch das Verdampfen der leichtflüchtigen Anteile Präzipitate (Asphaltene) bilden. Das bedeutet, dass das leichtflüssige Öl zu einem zähen Ölschlick wird. Dieses Material ist durch neuformierte Abbauprodukte zum einen toxischer und tendiert zum anderen infolge seiner Zähigkeit dazu, bei Kontakt Oberflächen permanent zu benetzen. Dies ist insbesondere für Lebewesen von dramatischer Bedeutung, da diese durch den Ölfilm völlig bedeckt werden können. Bei Säugetieren oder Vögeln führt das dazu, dass die Wärmeregulierung versagt. Die Tiere sterben an Unterkühlung. Pflanzen, deren Oberflächen durch Öl bedeckt sind, können weder Photosynthese betreiben noch den Gas- und Stoffaustausch mit der Umgebung korrekt abwickeln. Sie sterben ebenso wie Tiere auch dann ab, wenn keine akute Toxizität durch das Öl gegeben ist.

Demnach ist es empfehlenswert, die Bildung dieser Ölschlicke an der Wasseroberfläche zu verhindern oder solche abzubauen. Hierzu werden Dispergenzien (Verteilerstoffe) eingesetzt, die die mit Wasser nicht mischbaren Öle in kleine Tröpfchen (Mizellen) auflösen, da sie amphiphil aufgebaut sind (zum chemischen und biologischen Abbau von Öl und der Wirkung von Tensiden siehe auch das Detailkapitel von Profs. Friedrich Temps und Tina Treude auf Seite 23 ff). Dies bedeutet, dass Moleküle vorliegen, die ein polares und wasserliebendes Ende sowie ein unpolares und damit ölliebendes Ende aufweisen. Ihre Präsenz in Öl und Wasser führt dazu, dass Mizellen gebildet werden, die aus einem Öltröpfchen bestehen, der von einer Schicht von Dispergenz-molekülen bedeckt ist. Die Außenseite dieser Dispergenzschicht ist dem Wasser chemisch sehr ähnlich, so dass eine freie Beweglichkeit in Wasser gegeben ist und das Öl somit keine separate Phase mehr bildet. Die Zersetzung der kontinuierlichen Ölphase in eine sehr große Anzahl von Mizellen ist mit einer dramatischen Zunahme der Oberfläche des Ölvolumens verbunden, die einen Faktor von mehreren hunderttausend bis zu Millionen betragen kann. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da Mikroorganismen, die zum Abbau des Öls befähigt sind, stets in der Wasserphase leben (nie im reinen Öl) und nur über die Grenzschicht Wasser-Öl die Schadstoffe aufnehmen können. Eine Zersetzung einer kontinuierlichen Ölfahne in Mizellen ist damit eine zwingende Voraussetzung für deren biologischen Abbau. Die Ermöglichung des biologischen Abbaus im Tiefenwasser ist sehr vorteilhaft, da weniger Verteilerstoffe gezielter eingesetzt werden können und diese infolge der Dichteerhöhung von Mizellen gegenüber Öl längere Zeiten im Tiefenwasser verweilen. Somit besteht länger die Möglichkeit eines biologischen Abbaus und Öl wird von der Wasseroberfläche ferngehalten. Hat das Öl erst die Wasseroberfläche erreicht, so alteriert es dort sehr schnell, was die Wirksamkeit der Verteilerstoffe erniedrigt oder den Einsatz von aggressiveren und damit selbst umweltschädigenden Dispergenzien erfordert, die zudem großflächiger und damit weniger effizient ausgebracht werden können.

Das im Golf von Mexiko verwendete Dispergenz Corexit stellt keine Reinsubstanz dar, sondern ist ein Gemisch, das in zwei Rezepturen verwendet wird. Corexit 9500 enthält Propylenglykol und leichte Petroleumdistillate (aus Rohöl), sowie als aktiven Hauptbestandteil Natrium- Diocetylsuccinat, ein anionisches Tensid. Das aggressivere Corexit 9527, das vornehmlich in der Anfangsphase der Sanierungsmaßnahmen eingesetzt wurde, enthält neben Propylenglykol auch 2-Butoxyethanol und wird von der amerikanischen Umweltbehörde (EPA) als chronischer und akuter Gefahrstoff deklariert. Beide Dispergenzien werden von der Firma Nalco hergestellt, die ursprünglich zu Exxon gehörte und diese Stoffe für die Bekämpfung des Ölunfalls der Exxon Valdez im Jahr 1989 herstellte, inzwischen aber im Besitz von BP ist. Es ist fraglich, ob diese von BP bevorzugten Dispergenzien die höchste Effektivität bei gleichzeitig geringster eigener Umweltrelevanz aufweisen.

Technik und Gefahren der Tiefseebohrungen



Abb. 1 | A U.S. Air Force chemical dispersing C-130 aircraft from the 910th Airlift Wing at Youngstown-Warren Air Reserve Station, Ohio, drops an oil dispersing chemical into the Gulf of Mexico as part of the Deepwater Horizon Response effort May 5, 2010. © US Air Force.

Nach dem Unglück bleiben daher noch offene Fragen:

Der Blow-out erfolgte nicht während des als risikoreich eingestuften Prozesses des Bohrens, bei dem jederzeit ein Überdruckregime angefahren werden kann. Stattdessen ereignete sich das Unglück Stunden, nachdem die fertig gestellte und mit Verrohrung versehene Bohrung im untersten Bereich zementiert wurde. Demnach ist zu folgern, dass der Zementationsprozess mit einer erheblichen mechanischen Beanspruchung des Sediments verbunden war, wahrscheinlich durch Volumenexpansion beim Aushärten des Zements, eventuell verbunden mit exothermen Reaktionen. Erst die Überschreitung der Scherfestigkeit des Gesteins führte zu der Entstehung von Frakturen, die den massiven Fluidzutritt in das Bohrloch und damit den Blow-out ermöglichten. Es wird vermutet, dass mehr als 50 Prozent der global erfassten Blow-outs auf Zementationsprozesse zurückgeführt werden können. Es wäre für ausführende Firmen und Regulationsbehörden maßgeblich, diese Gefahrenpotenziale detailliert wissenschaftlich zu untersuchen.

Das unberechtigte Vertrauen in die Unfehlbarkeit der in der Tiefwasser-Exploration eingesetzten Geräte und Installationen, auch bei deren erheblicher Redundanz, darf nicht zu der Politik führen, keine Technik direkt verfügbar zu haben, um vor Ort in der entsprechenden Wassertiefe eingreifen zu können. Die Entwicklung derartiger Eingriffstechnik muss bereits vor einem möglichen Unfall erfolgen. Diese Problematik ist keinesfalls auf das Unternehmen BP oder Transocean Drilling beschränkt, sondern gilt für die viel größere Anzahl von Operateuren in der Tiefwasserexploration. Der angekündigte freiwillige Aufbau einer schnellen Eingreifgruppe für derartige Notfälle, wie von vier führenden Akteuren (u.a. Shell, Exxon, Chevron, Conoco-Phillips) mit einem Finanzvolumen von rund 750 Millionen US Dollar angekündigt, sollte zwingend durch eine neutrale Organisation überwacht werden.

Lorenz Schwark ist Professor für Organische Geochemie an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel. Seine Arbeitsfeld umfasst die Erdöl-Geochemie, die Rekonstruktion von fossilen Environments, die organische Evolution und Umwelt-Kontaminationsstudien.

Sonderfall Küste

Der Mississippi hat weltweit den siebthöchsten Ausstrom (580 km³ Wasser/Jahr, 210 Millionen Tonnen Sediment/Jahr). Im Unterlauf werden die Abflussraten im Verhältnis zum Atchafalaya-River, der durch einen natürlichen Deltaverlagerungs-Prozess als neuer Mündungsarm auf Kosten des Mississippi entstand, seit den 1960er Jahren konstant gehalten. Das Vogelfuß-Delta hat sich sehr weit auf den Schelf vorgebaut und ist deshalb verstärkt Wind- und Welleneinfluss ausgesetzt. Dagegen ist der Gezeiteneinfluss im Golf von Mexiko gering. Westlich und östlich vom Mississippi-Delta erstreckt sich eine flache Küstenzone mit Marschen und Feuchtgebieten bis Texas und Florida, teilweise trennen Barriere-Inseln Lagunen oder Küstenseen vom offenen Meer ab.



Abb. 1 | GALVESTON, Texas - Eric Ruiz, a contractor working to clean the beaches in Galveston, makes his way towards a tar on East Beach Sunday, July 11, 2010. © US Coast Guard.

Durch diese Küstenkonfiguration ist zum einen der Außenrand des Deltas vom austretenden Öl der Ölkatastrophe im Golf von Mexiko betroffen. Zum anderen wird Öl östlich des Mississippi-Deltas durch Küstenlängsströmungen an die Küste getrieben und breitet sich nach Osten aus, zurzeit an den Küsten von Mississippi und Alabama. Zusätzlich entwickelt sich bei Stürmen, die sich häufig in Richtung Nordnordwest auf das Festland zubewegen - wie vor kurzem beim Hurrikan Alex - eine nach Westen gerichtete starke Küstenlängsströmung, die das Öl an die Küste von Texas transportiert. Somit wird zunehmend die gesamte Nordküste des Golfs von Mexiko vom ausströmenden Öl betroffen. Auch in der Wassersäule gebundenes Öl wurde bereits nahe der Küste von Alabama beobachtet.

Sonderfall Küste

Doch wie weit wird sich das Öl an der Küste von Texas ausbreiten?

Die Ausbreitung des Öls nach Westen wird hauptsächlich durch tropische Wirbelstürme aus der Karibik gesteuert. Wie viele und mit welcher Intensität die Stürme auf den Ölteppich treffen lässt sich bis zum Ende der Hurrikan-Saison im November nicht vorhersagen.

Welche Abschnitte der Flachküste werden am stärksten vom Öl betroffen sein? Wie weit können die Feuchtgebiete der Küstenniederungen in Mitleidenschaft gezogen werden?

Neben den der Küste vorgelagerten Sandinseln als erste morphologische Barriere besitzen die Lagunen als morphologische Senken wie auch die sich landseitig erstreckenden Marschen und Feuchtgebiete ein erhöhtes Gefährdungspotenzial. Durch Wind und in geringem Ausmaß durch Gezeitenströmungen können größere Ölmengen zunächst auf die sandigen Barriere-Inseln und über natürliche Verbindungskanäle in die Lagunen und weiter direkt an die Küste und in die Marschen und Feuchtgebiete gelangen. Die Beeinträchtigung der weit verbreiteten Feuchtgebiete hängt von den lokalen hydrographischen Verhältnissen ab, unter anderem von den Oberflächen- und Grundwasserströmen wie auch von der Ölmenge und dem Zeitraum, in dem das Öl einzelne Küstenabschnitte erreicht. Stürme werden die Ausbreitung des Öls landeinwärts weiter erhöhen. Kontaminations-Ausbreitungsmodelle an Land sind für diesen speziellen Küstentyp nicht vorhanden.

Welche Auswirkungen hat das in der Wassersäule gebundene Öl auf das Küstenvorfeld?

Durch die großen Ölmengen, die sich in der Wassersäule in Richtung Küste bewegen, werden Innerschelf und das Küstenvorfeld betroffen. Neben der Beeinträchtigung von flachmarinen Ökosystemen sind Infiltrationen in küstennahe Grundwasserreservoirs möglich. Das Verhalten von „gebundenem“ Öl an der Grenzschicht Wasser-Sedimentoberfläche sowie submarine Infiltrations- bzw. Austauschprozesse zwischen Süß-, Salzwasser und Öl sind nicht bekannt.



Abb. 2 | NASA satellite imagery from April 25, 2010, shows an area in the Gulf of Mexico impacted by „Deepwater Horizon“ incident. New Orleans can be seen in the upper right corner, barrier islands appear all along the coast.

Karl Stattegger ist Professor für Sedimentologie, Küsten- und Schelfgeologie an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel. Sein wissenschaftliches Interesse gilt der Erforschung von Meeresspiegelschwankungen der Evolution von Shelfen und Küsten, sowie sedimentologischen Source-to-Sink Modellen.

Die Ausbreitung des Öls durch die regionale und globale Ozeanzirkulation

Drei Monate lang sind durch die Havarie der Deep Water Horizon große Mengen von Rohöl in den Golf von Mexiko geströmt. Das Öl trat in einer Tiefe von rund 1.500 Meter aus. Rohöl hat eine deutlich geringere Dichte als Meerwasser und steigt deshalb zügig zur Meeresoberfläche auf. Es vermischt sich beim Aufsteigen schon partiell mit dem Meerwasser und eine Reihe von komplexen chemischen Prozessen nimmt ihren Lauf. Während der Abbau des Öls anfangs schnell geht, bleiben umgewandelte Substanzen für einige Jahre noch als sogenannte Schadstoffe im Meer und verteilen sich mit den Strömungen im Ozean.

Der Golf von Mexiko zeichnet sich durch lokal komplexe Strömungen aus, die in erheblichem Maße von den lokalen Winden beeinflusst werden. Im langjährigen Mittel strömt Oberflächenwasser aus dem südlich gelegenen Karibischen Meer in den Golf von Mexiko und verlässt den Golf nach Osten über den Floridastrom zwischen Kuba und der Südspitze von Florida. Der Floridastrom bringt Wasser aus dem Golf über das Golfstromsystem in den offenen Nordatlantik.

Im folgendem wird beschrieben, welche Wege das Öl sehr wahrscheinlich nehmen wird und wie man solche Vorhersagen über eine Ausbreitung erhält.

Regionale Ausbreitung über einen Zeitraum von Tagen

In vielen Ländern werden operationelle Modelle der oberflächennahen Strömung des Ozeans – ähnlich den täglichen Modellen für die Wettervorhersagen - betrieben, um die Verteilung von Schadstoffen über einen Zeitraum von einigen Tagen im Voraus simulieren zu können. Solche Modelle wurden auch sofort im Golf von Mexiko angewendet. Zusammen mit Beobachtungen von Flugzeugen aus sind diese Vorhersagen die Basis, um das Auffischen von Öl-Mengen, aber auch die Sperrung von Teilen des Golfs für den Fischfang von offizieller Seite zu veranlassen.

Diese Modelle benutzen alle zur Verfügung stehenden beobachteten Eigenschaften des Ozeans und machen daraus so etwas wie eine ‚Wettervorhersage‘. Die Qualität dieser Strömungsvorhersagen hängt von der räumlichen Auflösung der Modelle ab - oft besser als 1 km Auflösung - aber auch von den zur Verfügung stehenden Daten globaler und regionaler Ozeanbeobachtungssysteme. Oft werden am Computer in das von den Modellen berechnete Strömungsfeld hunderte bis tausende virtuelle ‚numerische‘ Partikel ausgesetzt, die dann z. B. die Verteilung des Öls simulieren. Nur wenige Modelle verfügen über ‚öähnliche‘ Partikel, die sich auflösen und/oder eine andere Dichte als das Wasser haben.

Längerfristige Szenarien der Ölausbreitung

Während die Anrainerstaaten des Golf von Mexiko in der Regel mit kurzfristigen Vorhersagen recht gut bedient sind, stellte sich frühzeitig die Frage ob, wann und in welche Mengen ölbelastetes Wasser auch den Atlantik und damit weit entfernte Regionen betreffen könnte.

Wenn belastetes Wasser erst einmal in den Floridastrom gelangt, wird es von dort mit hohen Stromgeschwindigkeiten aus dem Golf und in den Golfstrom gelangen. Die hohen Geschwindigkeiten von 1 Meter/Sekunde würden eine schnelle Ausbreitung von 100 Kilometern pro Tag ermöglichen. Gleichzeitig wird durch Verwirbelungen das belastete Wasser schnell weiter verdünnt und nimmt von daher rapide an ‚Gefährdungspotential‘ für die Umwelt ab.

Die Ausbreitung des Öls durch die regionale und globale Ozeanzirkulation

Gemeinsam mit Kollegen aus den USA haben wir eine Simulation der Ausbreitung von belastetem Wasser mit einem globalen Ozeanmodell mit einer Gitterpunktauflösung von 10 km x10 km für einen Zeitraum von bis zu einem Jahr berechnet. Im Gegensatz zu den Kurzfristvorhersagen kennt man den genauen Verlauf der Strömungen über die kommenden Monate nicht. Eine Hilfsmethode sind daher sehr viele Einzelrechnungen, die mögliche Strömungsfelder beinhalten. Das ist vergleichbar mit Klimavorhersagen, die auch nicht das aktuelle Wetter in der Zukunft simulieren können und daher aus eine Vielzahl von Einzelläufen bestehen.

Einer der kritischen Faktoren für diese Berechnungen sind die Details der Zirkulation im Golf von Mexiko mit dem Loop Current. Der Loop Current ist ein ringförmiges Strömungsband und zeichnet sich durch eine äußerst variable Lage und Stärke der Hauptströmung aus. Oftmals schnürt diese Strömung große Ringe ab, die dann für die kommenden Wochen in der Regel in den westlichen Golf von Mexiko verdriften. Diese Details der Strömung beeinflussen direkt die Menge von belastetem Wasser, die aus dem nördlichen Golf von Mexiko in den Floridastrom kommen kann.

Für die ersten Simulationen suchte man unterschiedliche Jahre aus einer ‚klimatologischen‘ Simulation heraus, die ähnliche Loop Current Verläufe zeigten wie zum Zeitpunkt des Unglücks. Weitere Simulationen mit anderen Loop Current Konfigurationen wurden später dazu genommen, um die Bandbreite der möglichen Entwicklungen darzustellen (Abb. 1). Keiner der Läufe hat echtes Öl simuliert. Das Wasser in dem Modell wurde über dem undichten Bohrloch numerisch mit einem ‚tracer‘ (künstlichem Spurenstoff) markiert, also auf eine bestimmte Konzentration gesetzt. Von dort verbreitete sich dann das so markierte Wasser mit der Strömung weiter, ohne chemisch aufgelöst zu werden. Damit wurden die in der Wirklichkeit stattfindenden Abbauprozesse des Öls in den Simulationen ignoriert. Zum chemischen und biologischen Abbau von Öl siehe auch das Detailkapitel.

Ergebnisse

Über die ersten sechs Monate wurde in vielen der Simulationen eine signifikante Menge von belastetem Wasser in den Floridastrom gebracht und konnte sich von dort schnell in den Atlantik ausbreiten (Abb. 2). Die Verdünnungsraten im Floridastrom waren typischerweise 1/500, das bedeutet ein Teil belastetes Wasser wurde mit 499 Teilen sauberen Wassers vermischt. Bei diesen Verdünnungsraten wäre ein optisches Erkennen von Ölrückständen schon schwierig. Im weiteren Verlauf entlang des Golfstroms nimmt die Verdünnung zu. Typische Werte sind 1/1000. Wenn der Golfstrom die Küste der USA bei Cap Hatteras (North Carolina) in Richtung Europa verlässt, nimmt seine mittlere Stromgeschwindigkeit deutlich ab und belastetes Wasser treibt mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/s, was etwa 8,6 km/Tag entspricht, nach Osten. Die Verdünnung nimmt weiter zu, und die Simulation zeigte nur selten noch Konzentrationen von mehr als 1/2.000.

Auch nach einem Jahr erreichte bei den längeren Simulationen kein deutlich belastetes Wasser die Europäischen Küstengewässer von Irland, Frankreich oder Spanien (Abb. 3). Die Konzentrationen nahmen weiter deutlich ab auf Werte unter 1/5.000.

Die Simulationen haben eindeutig gezeigt, dass selbst ohne biochemischen Abbau die zu erwartenden Konzentrationen von belastetem Wasser für die Europäischen Küsten im Vergleich zu ‚normalen‘ lokalen Verschmutzungen zu vernachlässigen sind. Die Simulationen helfen, genauere Abschätzung von biochemischen Abbauraten zu erarbeiten, da insbesondere die Effektivität der biologischen Umsetzung von der Konzentration des belasteten Wassers und den lokalen Wassertemperaturen abhängt.

Die Ausbreitung des Öls durch die regionale und globale Ozeanzirkulation

Eine weitere interessante Größe ist die Frage, wie viel des ölverschmutzten Wassers die Golfregion in den Atlantik verlassen könnte? Die Bandbreite des vorhergesagten Exports von belastetem Wasser aus dem Golf von Mexiko in den Atlantik ist in den unterschiedlichen Simulationen unerwartet groß (Abb. 4). Im Mittel über mehr als 20 Simulationen wurden nach sechs Monaten rund 50 Prozent des belasteten Wassers aus dem Golf exportiert. Es gab aber auch einzelne Simulationen wo sowohl 80 Prozent des markierten Wassers im Golf verblieben als auch 80 Prozent exportiert wurden. Man erkennt, dass der exakte zeitliche und räumliche Verlauf der Strömungen im Loop Current System von entscheidender Bedeutung für die Verbreitung des verschmutzten Wassers über größere Entfernungen ist.

Die von uns angestellten Rechnungen waren nicht Teil der offiziellen Bewertungen der Katastrophe. Die verwendeten Ozeanmodelle sind typischerweise Werkzeuge der wissenschaftlichen Meeres- und Klimaforschung und werden in der Regel nicht von operativen Stellen, wie Behörden, betrieben. Die kommenden Wochen und Monate werden zeigen, ob es gelingen wird, die Modellsimulationen zu verifizieren. Problematisch dabei sind die zu erwartenden geringen Konzentrationen des verschmutzten Wassers, die sich nicht ohne aufwendige Analysemethoden detektieren lassen.

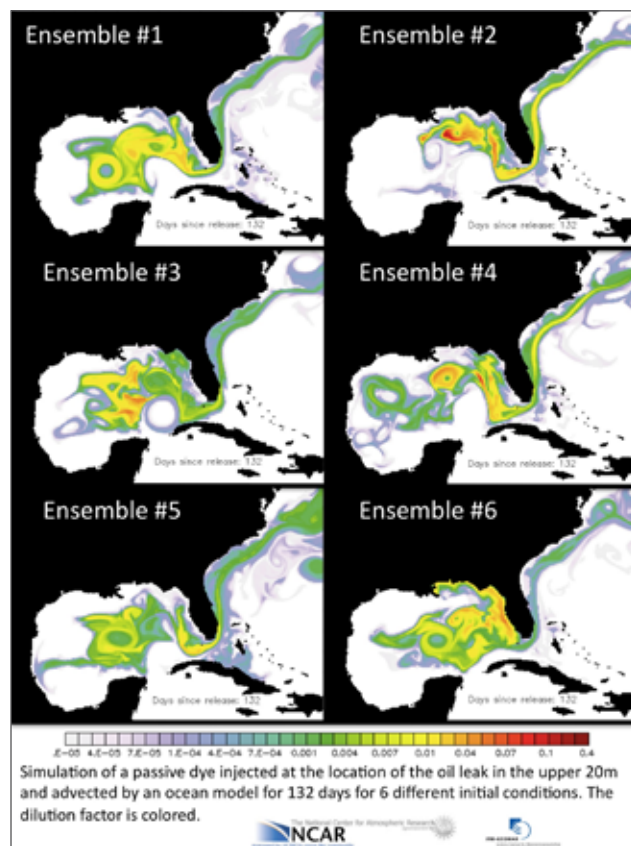


Abb. 1 | Sechs unterschiedliche Simulationen der Verdünnung nach 132 Tagen, wobei für die ersten 2 Monate das Wasser markiert wurde.

Die Ausbreitung des Öls durch die regionale und globale Ozeanzirkulation

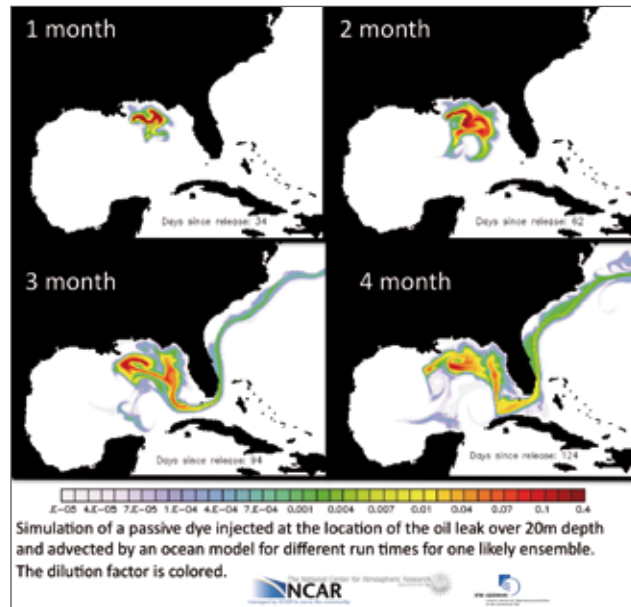


Abb. 2 | Zeitliche Entwicklung des Verdünnungsfaktors einer Simulation für einen Lauf, in dem für zwei Monate das belastete Wasser markiert wurde.

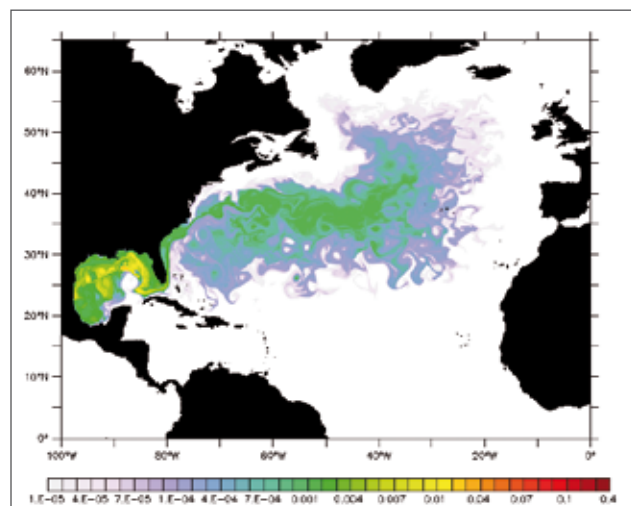


Abb. 3 | Verdünnungsrate an der Oberfläche für eine Simulation, in der für 2 Monate ein Ölaustritt simuliert wurde und das markierte Wasser nach 12 Monaten dargestellt wurde.

Die Ausbreitung des Öls durch die regionale und globale Ozeanzirkulation

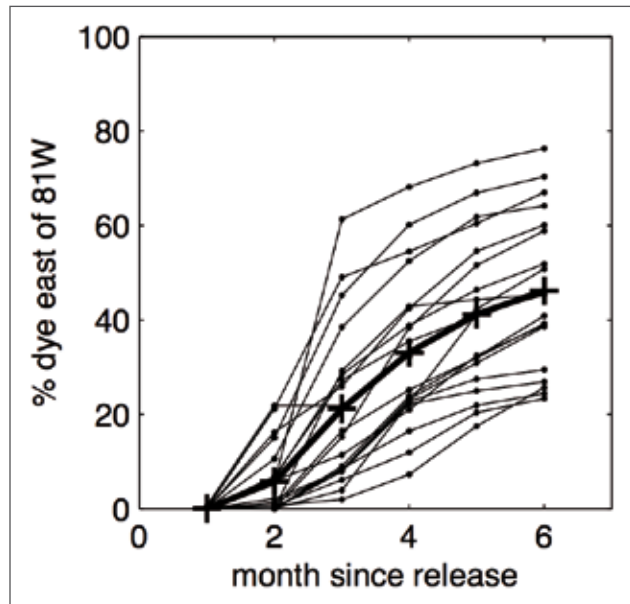


Abb. 4 | Prozent des aus dem Golf in den Atlantik exportierten belasteten Wassers für 20 unterschiedliche Simulationen als Funktion der Zeit.

Literatur:

Maltrud, M., S. Peacock and M. Visbeck, On the possible long-term fate of oil released in the „Deepwater Horizon“ incident estimated by ensembles of dye release simulations, Environmental Research Letters, under review 2010.

Martin Visbeck ist Professor für Physikalische Ozeanographie und stellvertretender Direktor am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Er ist seit 2008 Sprecher des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“.

Misserfolg durch Gashydratbildung beim Einsatz der Stahlkuppel

Eine Stellungnahme zur Berichterstattung in den Medien und des Einsatzes am Bohrloch

Die Informationen über die Ölkatastrophe im Golf von Mexiko, die in den vergangenen Monaten an die Öffentlichkeit gelangten, waren aus wissenschaftlicher Sicht nicht immer richtig. In den meisten Fällen waren sicher Übersetzungsfehler, fehlende wissenschaftliche Kenntnisse über das grundsätzliche Verhalten von Erdgas beim Kontakt mit Meerwasser unter hohem Druck oder die Notwendigkeit zu journalistischer Vereinfachung Gründe für eine falsche oder missverständliche Berichterstattung in den Medien zum Beispiel über den Einsatz der Stahlkuppel. Auch einige Aussagen von BP erhöhten die Verwirrung. Hier soll der Versuch unternommen werden, einige in den Medien kursierende Informationen richtig zu stellen und mögliche Ursachen für den Misserfolg des BP-Planes am Bohrloch darzustellen.



Abb. 1 | PORT FOURCHON, La. - Crewmen aboard the motor vessel Joe Griffin guide a cofferdam onto the deck as the ship prepares to depart Wild Well Control May 5, 2010. The chamber was designed to contain the oil discharge, that was a result of the „Deepwater Horizon“ incident, before it reaches the surface. © U.S. Coast Guard photo by Petty Officer 3rd Class Patrick Kelley.

Um den 7. Mai 2010 berichtete die deutsche Presse, zeitlich versetzt zu den US-Medien, zunächst optimistisch über den geplanten Einsatz einer Stahlkuppel zum Abfangen des Rohöl/Erdgas-Gemisches, das ungehindert aus dem Meeresboden in 1.500 Meter Tiefe ausströmte. Im Vorfeld dazu veröffentlichte BP eine Skizze über die Größenordnung der Stahlkuppel und ihre Funktionsweise samt Text. In der Skizze wird „Eis“ im Steigrohr erwähnt, welches das Abfließen des Rohöl-Gas-Gemisches verhindern könne, während im Text von Gashydraten, einer „eis-ähnlichen Substanz“, die Rede ist. Hier nahm die Medienverwirrung ihren Anfang. Denn als schon ein Tag später der Einsatz abgebrochen wurde, war allerorts zu lesen, dass in dem „eiskalten“ Tiefenwasser Eisbildung den Einsatz lahm legte. Die meisten Medien berichteten noch bis zum 12. Mai so, als handele es sich um Wassereis. In einigen Berichten kam es zu detaillierter Darstellung über „Kristalle aus Öl und Wasser“ oder einer „eis-ähnlichen Mischung“ aus Gas und Wasser, aussehend wie Schlamm, die als „nitrate“ bezeichnet werde; gemeint war aber „hydrate“.

>>

Misserfolg durch Gashydratbildung beim Einsatz der Stahlkuppel

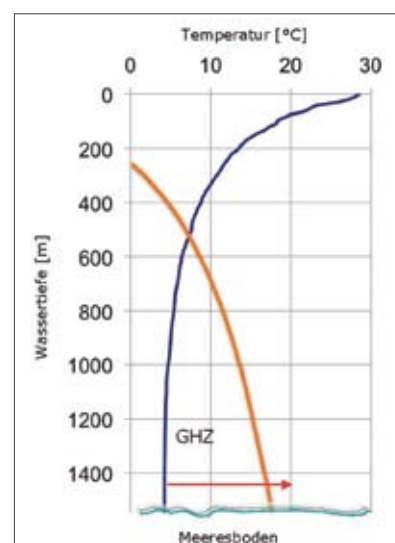
Ein einsamer Blogger gab zu bedenken, dass dichteres Wasser sich ja am Meeresboden sammeln und mit 4°C eigentlich nicht zur Eisbildung führen könne. Auch ein „Green Energy Blog“ berichtete am 8. Mai, wie auch die BP-Sprecher verlauten ließen, dass Methanhydrat die Ursache des Scheiterns sei. Keines der führenden Medien kümmerte sich näher darum. Bei den Blogs kam weiter ans Licht, dass Gashydrate nicht nur die Leitung verstopften, sondern durch Ansammeln im oberen Teil der Kuppel, aufgrund ihrer geringen Dichte für einen starken Auftrieb sorgten.

Was den wenig konsequent durchdachten Einsatz angeht, so war den BP-Ingenieuren und Technikern ohne Zweifel klar, dass Methanhydrat ein Problem sein könne. Ihre Annahme, das anwesende Rohöl verhindere eine Hydratbildung, ähnlich wie die Zugabe von Methanol oder anderen chemischen Inhibitoren, erwies sich ebenso als unrealistisch wie die Wirksamkeit der Zuleitung von heißem Wasser. Weiterhin gibt die Aussage zu denken, der Einsatz von Stahlkuppeln hätte sich im Golf von Mexiko bei geringen Wassertiefen (bis 350 ft = 115 Meter) nach „Katrina 2005“ bestens bewährt. Abgesehen von der interessanten, bisher der Öffentlichkeit nicht bekannten, Information, dass damals Rohöl- oder Gasleckagen aufgetreten sind, ist diese Aussage irrelevant, da bei so geringen Wassertiefen keine Gashydratbildung auftreten kann (s. Abb. 2), weder im Steigrohr noch in der Kuppel.

Die Wassertemperatur am Bohrloch im Golf von Mexiko beträgt 4,3° C. Der Temperaturverlauf zwischen Oberfläche und Meeresboden, wenige Seemeilen südlich des Bohrlochs und die Gashydratzone sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Begrenzung der Gashydratzone zeigt, dass unterhalb des Schnittpunktes (bei ca. 8° C und 550 m Wassertiefe) Methanhydrat und Wasser existieren und darüber freies Methangas und Wasser. Zur Verhinderung der spontanen Bildung von Methanhydrat in der Stahlkuppel hätte durch die äußere Steigleitung so stark erhitztes Wasser in die Kuppel geleitet werden müssen, dass die Temperatur von 4° auf annähernd 20° C steigen müsste (roter Pfeil). Das ist technisch sehr aufwendig und kaum zu kontrollieren.

Die Abbildung 3 zeigt den Einsatz der Stahlkuppel über dem leck geschlagenen Bohrgestänge und das Auffangen und Ableiten von ausströmendem Rohöl und Erdgas. Der untere Teil der Kuppel sollte bis an die Flansch in das Sediment eindringen und das durch den Einschnitt ragende Bohrgestänge vollständig umschließen. Der Strom sollte durch das innere Steigrohr an die Meeresoberfläche

Abb. 2 | Temperatur (blau) und Begrenzung des Gashydratfeldes (rot) mit der Wassertiefe im Golf von Mexiko bei 27,9657° N und 88,3667° S; Tiefe 1967m; Quelle: World Oceanographic Data Center; Station 3313941; horizontaler Pfeil über dem Meeresboden zeigt die erforderliche Temperaturerhöhung an, um Gashydratbildung zu verhindern.



Misserfolg durch Gashydratbildung beim Einsatz der Stahlkuppel

gelangen und in Tanker abgepumpt werden. Durch Vermischen von Erdgas - Hauptbestandteil ist Methan - und Meerwasser kommt es aber innerhalb der Stahlkuppel zur spontanen Bildung von Gashydrat, einer kristallinen eis-ähnlichen Festsubstanz bestehend aus Methan- und Wassermolekülen (vergl. E. Suess und M. Haeckel, 2010). So bildete sich ein Kristallschlamm von geringerer Dichte als das umgebende Meerwasser. Der Hydratpfropfen steigt auf und vermischt mit Rohöl verhindert das Ableiten durch die Steigleitung. Der Auftrieb durch das weniger dichte Hydrat-Ölgemisch erwies sich unter der Stahlkuppel als so stark, dass die Gefahr des Aufschwimmens bestand und deshalb der Versuch kurzfristig abgebrochen und die Stahlkuppel an eine vom Bohrloch entfernt gelegene Stelle geschleppt und abgesetzt wurde.

Bei der vorherrschenden Bodenwassertemperatur und über einen beträchtlichen Tiefenbereich im Gebiet der Deep-Horizon-Bohrung bildet Erdgas beim Kontakt mit Meerwasser grundsätzlich Hydrat. Das Rohöl-zu-Erdgas-Verhältnis war unbekannt, aber auch ein geringer Gasanteil (Methan) hätte einer detaillierteren Einbeziehung des Verhaltens von Gashydrat bei den Plänen zur Eindämmung und Ableitung des austretenden Gemisches bedurft. Rohöl ist als ungeeigneter Inhibitor aus Experimenten bekannt. Ebenso ist die erforderliche Temperaturerhöhung in der Stahlkuppel auf annähernd 20° C technisch schwer machbar und kaum zu kontrollieren. Das Aufschwimmen von hydrathaltigem Sediment wurde in der Natur beobachtet und hätte bei Kenntnis der Substanzdichten und des bekannten Blasengefüges von frisch gebildetem Methanhydrat vorhersagbar sein müssen.

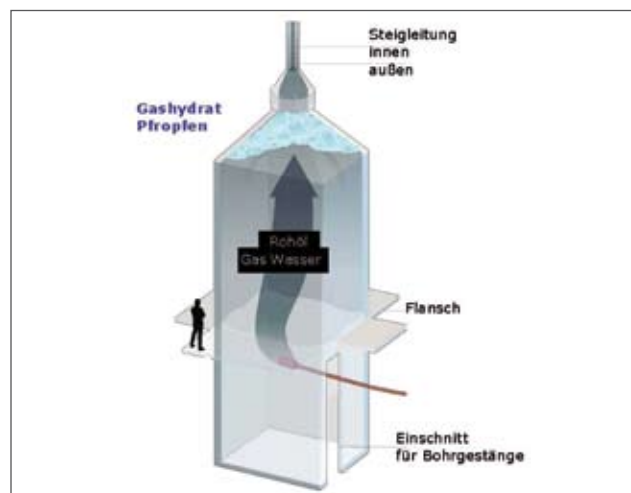


Abb. 3 | Aufbau und Funktion der Stahlkuppel zum Abfangen des Rohöl/Erdgas-Gemisches; spontane Bildung von Gashydrat verstopft das Ableitungssystem. Quelle: BP vereinfachter Ausschnitt.

Literatur

Suess, E. und M. Haeckel. Gashydrate im Meeresboden. Geographische Rundschau, Mai 2010, 22-29

Erwin Suess ist Professor emeritus für Marine Umweltgeologie am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Er forschte als Geochemiker am GEOMAR Forschungszentrum der Universität Kiel. Prof. Suess gilt als Pionier der Forschung an marinen Gashydraten in Europa. 2007 erhielt er den renommierten Elisabeth-Mann-Borgese Preis.

Der Abbau des Öls

Erdöl (Rohöl) ist von seiner chemischen Zusammensetzung her eine Mischung einer Vielzahl von organischen Verbindungen. Hauptsächlich ist es ein Gemisch vieler verschiedener Kohlenwasserstoffe, also Verbindungen, die nur die Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff enthalten. Die wichtigsten Bestandteile sind lineare und verzweigte gesättigte Kohlenwasserstoffe (Paraffine), die der Chemiker als Alkane bezeichnet, zyklische Alkane (Naphtene), und Aromaten (bestimmte ungesättigte ringförmige Kohlenwasserstoffmoleküle, z.B. Benzol, und davon abgeleitete Verbindungen mit mehreren aneinander gefügten Ringen). Abhängig von der Lagerstätte enthält Erdöl außerdem geringe Mengen an stickstoff-, sauerstoff- und schwefelhaltigen Verbindungen (0,1 – 2% N; 0,1 – 1,5% O; 0,5 – 6% S). In Erdölraffinerien wird das gewonnene Rohöl in großen Destillationskolonnen in seine unterschiedlich leicht oder schwer siedenden Fraktionen getrennt, von Verunreinigungen (besonders den schwefelhaltigen) befreit und zu Produkten verarbeitet. Die am leichtesten flüchtigen Bestandteile sind Naptha, welches zu Benzin und Grundstoffen für die chemische Industrie verarbeitet wird, und Kerosin (Flugbenzin). Schwerer flüchtig sind die Gas- und Schwerölfraktionen, die als Dieselmotoren, leichtes oder schweres Heizöl bzw. als Schmierstoffe Verwendung finden, oder durch „Cracken“ zu höherwertigen niedermolekularen Produkten veredelt werden (weitergehende Informationen unter <http://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum>). Als Rückstand verbleibt Bitumen.

Da Kohlenwasserstoffe vergleichsweise wenig reaktiv sind, ist Erdöl chemisch nur schwer abbaubar. Genau aus diesem Grund hat es sich über Jahrtausende in geeigneten geologischen Formationen tief unter der Erde angesammelt. Am schnellsten und effektivsten wird Öl bei der Verbrennung mit Luftsauerstoff abgebaut, wobei Kohlendioxid (CO₂) und Wasser entstehen. Die frei gesetzte Energie nutzen wir beispielsweise in Otto- und Dieselmotoren, Flugzeugtriebwerken, Schiffsmotoren, Kraftwerken oder ölbefeuerten Heizungsanlagen.

Das bei einem Unfall wie im Fall der BP-Bohrplattform „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko aus einem offenen Bohrloch ungehindert austretende und an die Meeresoberfläche gelangende Öl kann abgebrannt werden, wenn es das Wasser großflächig in einer wenigstens einige Millimeter dicken Schicht bedeckt und beim Aufstieg aus der Tiefe sowie durch Wind und Wellen nicht zu stark mit Wasser vermischt wurde. Die teils giftigen Verbrennungsrückstände können das marine Ökosystem beeinflussen; hier besteht großer Forschungsbedarf. Man kann aber davon ausgehen, dass die Auswirkungen lokal begrenzt bleiben. Die bei der Verbrennung entstehenden schwarzen Rußwolken sehen zwar hässlich aus, werden aber durch den Wind schnell verteilt und sind im Vergleich zu den insgesamt und dauernd aus Schiffsschornsteinen freigesetzten Rußmengen nicht bedeutend.

Chemischer Öl-Abbau

Hintergrundinformationen zu den diversen chemischen Aspekten der BP-Ölkatastrophe findet sich in der Zeitschrift Chemical & Engineering News in der Ausgabe vom 14. Juni 2010 unter der Internet-Adresse <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/88/8824cover.html>.

Der chemische Abbau großer Mengen Erdöls im Meer ist aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit der Kohlenwasserstoffe und ihrer Reaktionsträgheit sehr langsam. In den Ozeanen überwiegt daher der biologische Abbau durch Mikroorganismen wie *Alcanivorax borkumensis*, die im Öl enthaltene Alkane zur Energiegewinnung verstoffwechseln (der Beitrag von Prof. Tina Treude gibt hierzu

Der Abbau des Öls

nähere Auskunft). An der Meeresoberfläche bilden sich dabei Biofilme, die mit verschiedenen von Chemikern entwickelten modernen spektroskopischen Methoden wie der Laser-Induzierten Fluoreszenz (LIF) oder der oberflächenspezifischen Infrarot-Summenfrequenzerzeugung (IR-SFG) empfindlich nachweisbar sind.

Schwere Bestandteile des Erdöls sinken allmählich auf den Meeresboden ab. Man nimmt an, dass dies auf etwa 25 Prozent der ausgetretenen Menge zutrifft. Gut 30 Prozent, bei höheren Wassertemperaturen bis zu 40 Prozent des sich auf der Meeresoberfläche sammelnden Öls gelangt durch Verdunstung in die Atmosphäre, wo durch Winde eine schnelle Verteilung erfolgt. In der Atmosphäre werden diese leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe in radikalischen Reaktionen sehr schnell vernichtet (http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_chemistry). Die Abbauewege der wichtigsten organischen Verbindungen in der Troposphäre, der 10 bis 20 Kilometer hohen untersten Schicht der Atmosphäre, werden seit den 1970 – 1980-er Jahren intensiv erforscht. Damals wurde ihre ursächliche Rolle bei der Bildung des so genannten photochemischen Smogs (Los Angeles Smog) und des „Sommer-Ozons“ erkannt. Im ersten Schritt werden die verschiedenen Kohlenwasserstoffe durch die hochreaktiven Hydroxyl-Radikale (OH-Radikale) angegriffen, die deswegen auch als „Waschmittel der Erdatmosphäre“ bezeichnet werden. In langen und komplizierten Mechanismen mit vielen Folgereaktionen entstehen schließlich CO₂ und Wasser. Typische Werte der atmosphärischen Lebenszeiten der relevanten Kohlenwasserstoffe liegen in der Größenordnung von mehreren Stunden oder Tagen bis maximal einigen Wochen (n-Heptan: 2 Tage, Cyclohexan: 3 Stunden, Benzol: 2 Wochen). Nur Methan, Hauptbestandteil von Erdgas, hat eine atmosphärische Lebenszeit von Jahren, weshalb es als starkes Treibhausgas ein besonderes Problem darstellt.

Schwer flüchtige Kohlenwasserstoffe bleiben auf der Meeresoberfläche zurück. Hierzu gehören unter anderem große Aromaten mit mehreren verbundenen Ringen, sauerstoffhaltige Moleküle wie Chinone und stickstoffhaltige Heteroaromaten. Diese Verbindungsklassen zeichnen sich durch starke Absorptionsbanden im ultravioletten (UV) Spektrum der elektromagnetischen Strahlung aus. Die intensive Sonnenstrahlung im Golf von Mexiko führt aufgrund des Ultraviolettanteils des Lichts zu einem erheblich beschleunigten photochemischen Abbau der UV-absorbierenden Moleküle. Aromaten wirken auf Organismen toxisch oder sogar karzinogen. Das möglicherweise größere Problem könnte allerdings sein, dass die UV-Strahlung auch auf die von transparenten Organismen aus dem Öl aufgenommenen aromatischen Verbindungen wirkt. Manche der bei der Photooxidation entstehenden Produkte können mehrere tausendmal stärker toxisch als die ursprünglichen Aromaten wirken. In den Laborexperimenten, in denen die Toxizität von Erdöl untersucht wurde, ist dieser Effekt bisher kaum erforscht worden.

Auch die im Erdöl enthaltenden schwefelhaltigen Verbindungen werden bei UV-Bestrahlung schneller oxidiert. Kaum lichtempfindlich sind allerdings lange Alkane und Cycloalkane. Öl ist hydrophob („wasserabweisend“) und lipophil („fettliebend“). Die weniger hydrophoben, stärker hydrophilen („wasserliebenden“) Photooxidationsprodukte reichern sich deshalb an der Wasser/Öl-Grenzfläche an. Im Laufe der Zeit bilden sich um die zu Teer werdenden Tropfen feine, 5 bis 10 µm dünne Krusten. Die chemische Zusammensetzung dieser Partikel und ihr weiteres Schicksal wurden in Folge des Ixtoc-1 Unfalls ausführlich untersucht. Durch die mit der Zeit zunehmende Dichte sinken sie irgendwann auf den Meeresboden ab. In Form von dünnen Plättchen mit einigen Gramm Masse und von kleinen, mehrere Milligramm schweren Flöckchen können sie aber mit der Strömung bis zu 1.000 Kilometer weit von ihrer ursprünglichen Quelle transportiert werden (siehe Patton et al., 1981; <http://www.nature.com/nature/journal/v290/n5803/abs/290235a0.html>).

Der Abbau des Öls

Chemie der zur Verteilung des Öls eingesetzten Dispersionsmittel

Zur schnelleren Verteilung des Öls wurden dem am Meeresboden im Golf von Mexiko auslaufenden Rohöl von BP direkt an der Quelle große Mengen von Dispersionsmitteln zugesetzt. Die gleichen Mittel wurden mit Flugzeugen großflächig auf ölverschmutzten Meeresflächen versprüht. Damit sollte das Öl in kleine Tröpfchen dispergiert werden, die sich schnell verteilen und aufgrund ihrer großen Oberfläche schneller von Mikroorganismen abgebaut werden sollen. Der Einsatz der Dispersionsmittel in riesigem Maßstab führte zu hochkontroversen öffentlichen Diskussionen, in deren Folge die amerikanische Umweltbehörde EPA die Verwendung weniger toxischer Dispersionsmittel forderte.

Die von BP eingesetzten Dispersionsmittel Corexit 9500 und 9527 bestehen aus einer Mischung von Tensiden und Lösungsmitteln. Tenside sind oberflächenaktive Stoffe, die Öle und Fette in Form winziger Tröpfchen (Mizellen) in Wasser „lösen“. Seifen und Waschmittel sind solche Tenside, die wir im Alltag verwenden.

Das in Corexit-9500 enthaltene anionische Tensid Natriumdioctylsulfosuccinat hat die chemische Zusammensetzung $C_{20}H_{37}NaO_7S$ (http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_dioctyl_sulfosuccinate). Die oft als AOT abgekürzt bezeichnete Verbindung wird als medizinisches Abführmittel verwendet. Als nichtionisches Tensid ist außerdem Polysorbat-80 enthalten (http://de.wikipedia.org/wiki/Polysorbat_80). Diese auch Tween-80 genannte Verbindung ist ein Polyoxyethylensorbitanmonooleat (chemische Formel $C_{64}H_{124}O_{26}$), eine viskose, wasserlösliche gelbe Flüssigkeit, die sich vom Zucker Sorbitol und von Ölsäure ableitet. Polysorbat-80 ist in der EU als Lebensmittelzusatzstoff E 433 zugelassen. Verwendet wird es hauptsächlich als Emulgator und Stabilisator in Speisen, speziell in Eiskrem, außerdem als Lösungsvermittler und Emulgator für Kosmetika, Arzneimittel und Futtermittel. Chemisch und biologisch ist es relativ inert (reaktionsträge, bzw. -untätig), weshalb man die Verwendung in großen Mengen kritisch sehen kann. Mit der Doppelbindung in der Ölsäurekette enthält es allerdings eine reaktive Stelle, die an der Meeresoberfläche durch das in der Atmosphäre enthaltene Ozon sehr schnell angegriffen wird. Das ebenfalls in Corexit enthaltene Tween-85 unterscheidet sich von Tween-80 nur geringfügig in der Molekülgröße. Als Lösungsmittel werden neben leichtem Petroleum die Alkohole 1,2-Propandiol (ein Gefrierschutzmittel ähnlich Glycerin) und 1-(2-butoxy-1-methylethoxy)-2-Propanol sowie 2-Butoxyethanol (nur in Corexit-9527) zugesetzt. Sie sollen die Mischbarkeit der Tenside mit dem Öl verbessern. Corexit wurde bereits beim Ixtoc-1 Unfall 1979 in großen Mengen versprüht. Die verwendeten Komponenten gelten als nicht karzinogen. Sie sind aber giftig – wie natürlich auch die von uns im Alltag verwendeten Waschmittel giftig sind. Der zur Angabe der Toxizität von Chemikalien verwendete LC_{50} -Wert von Corexit-9500 beträgt 25,2 ppm. Bei dieser Konzentration würde nach 96 Stunden die Hälfte der Population des Versuchsfisches *Menidia beryllina* sterben. Der vergleichbare LC_{50} -Wert von Öl beträgt 10,72 ppm. Corexit selbst ist in konzentrierter Form also nur etwas weniger giftig als das Öl, es liegt aber im Meerwasser natürlich nach dem Versprühen in vieltausendfach niedrigeren Konzentrationen vor, zumal die Tenside in Wasser sehr gut löslich sind. Das Problem ist nur, dass der LC_{50} -Wert auf 2,61 ppm sinkt, wenn *Menidia beryllina* dem mit Corexit dispergiertem Öl ausgesetzt wird. Die resultierenden kleinen Öltröpfchen werden sehr viel leichter durch die Zellmembranen aufgenommen. Die meisten Experten glauben aber, dass die zehnfach höhere Toxizität der kleinen dispergierten Öltröpfchen durch die bessere Verteilung des Öls im Meer und den dadurch viel schnelleren biologischen Abbau mehr als wett gemacht wird.

Der Abbau des Öls

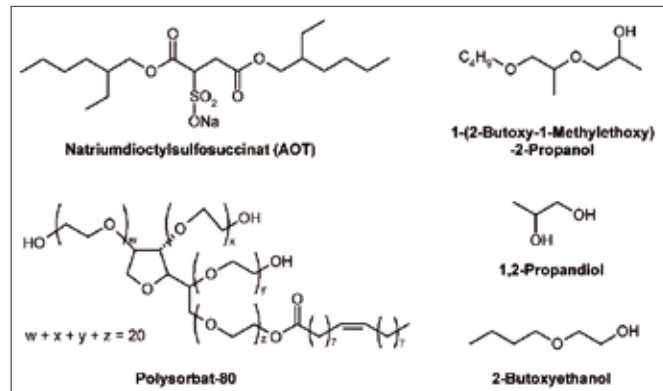


Abb. 1 | Strukturformeln der Hauptkomponenten von Corexit-9500.

Mit großer anfänglicher Verwunderung wurden Berichte über ausgedehnte, mit Wasser vermischte, scheinbar transparente Ölwolken in großen Wassertiefen aufgenommen. Öl ist leichter als Wasser und sollte deshalb an die Wasseroberfläche aufsteigen, so die Meinungen. Eine erste Erklärung findet sich jedoch darin, dass das Öl aus dem Leck in der Tiefsee unter großem Druck hochturbulent zusammen mit Erdgas geradezu heraus sprudelt und dabei mit Wasser vermischt und zerstäubt wird. Die im Internet zu sehenden TV-Aufnahmen lassen dies unschwer erkennen. Bei den extremen Drücken, die in der Tiefe herrschen, könnten Wasser/Öl-Gemische außerdem ungewöhnliche Eigenschaften haben. Die enthaltenen Schweröle sind ohnehin schwerer als Wasser. Vor allem aber werden die Dispersionsmittel von BP unmittelbar an der Quelle zugesetzt, so dass bereits in der Tiefe sehr kleine Öltröpfchen entstehen. Ein 0,5 Millimeter großes Tröpfchen braucht für den Aufstieg aus 1,5 Kilometer Tiefe bis an die Meeresoberfläche zwei Tage, ein nur halb so großes Tröpfchen würde dafür schon eine Woche benötigen. In dieser Zeit wird es von Tiefenströmungen ein gutes Stück von der Quelle weg transportiert. Wie sich die großen Ölwolken in der Tiefsee verhalten und ob sie über längere Zeiten erhalten bleiben, ist unbekannt.

Mikrobieller Ölabbau

Aus der Sicht von Mikroorganismen ist Öl eine sehr energiereiche Substanz, auch wenn es aufgrund seiner schweren Löslichkeit in Wasser, wie auch aufgrund seiner relativ geringen chemischen Reaktivität bei Umgebungstemperaturen schwer zu knacken ist. Es gibt im Allgemeinen zwei Wege wie Mikroben Öl abbauen können: (1) mit Sauerstoff (aerob) oder (2) ohne Sauerstoff (anaerob). Im Meer finden wir anaerobe Prozesse vornehmlich im Meeresboden. Die aeroben finden hauptsächlich in der Wassersäule oder in gut „belüfteten“ Boden-Wasser-Grenzschichten (z.B. an Stränden) statt.

Ölabbau im Meeresboden

Im Golf von Mexiko treten möglicherweise seit Jahrtausenden auf natürliche Weise Kohlenwasserstoffe (Öl und Methan) aus dem Meeresboden aus. Der Austritt pro Fläche ist jedoch in der Regel nur sehr gering im Vergleich zum derzeitigen fokussierten Ölaustritt am BP-Bohrloch. Der Großteil des natürlich im Meeresboden aufsteigenden Öls wird bereits nahe der Grenzschicht zum darüber liegenden Meerwasser von Mikroorganismen abgebaut. Diese Mikroorganismen benötigen keinen Sauerstoff zum Ölabbau, sondern verwenden das reichlich im Meerwasser gelöste Sulfat. Beim Ölabbau wird Sulfat zu Schwefelwasserstoff reduziert - eine Grundlage für chemosynthetische Lebensgemeinschaften. Sie gewinnen ihre Energie, indem sie den Schwefelwasserstoff mit Sauerstoff oder Nitrat zu Sulfat zurück oxidieren. Solche chemosynthetischen Gemeinschaften beinhalten

Der Abbau des Öls

freilebende schwefeloxidierende Bakterien, wie auch Symbiosen aus schwefeloxidierenden Bakterien und Wirtstieren (Muscheln, Röhrenwürmern). Die symbiontischen Schwefelbakterien werden vom Wirtstier mit Schwefelwasserstoff und Sauerstoff versorgt; das Wirtstier erhält im Gegenzug Zucker und Aminosäuren und ist damit unabhängig von externer Nahrung. Man nimmt heute an, dass die Grab- und Pumpaktivität der Wirtstiere zu einem erhöhten Sulfateintrag in den Meeresboden führt. Dadurch wird der Ölabbau weiter angekurbelt und den chemosynthetischen Gemeinschaften steht am Ende mehr Schwefelwasserstoff zur Verfügung – ein immerwährender Kreislauf, solange das Öl fließt. Bei einem Ölaustritt wie am BP-Bohrloch haben diese ölabbauenden Gemeinschaften jedoch keine Chance, die Ölemissionen zu reduzieren. Der Austritt von Öl ist einfach zu stark und zu fokussiert. Jedoch könnte man sich vorstellen, dass Ölteppiche, die sich über den Meeresboden legen, aufgrund der bereits etablierten ölabbauenden Gemeinschaften relativ schnell abgebaut werden. Dies ist jedoch kein Trost für andere am Boden etablierte Ökosysteme wie zum Beispiel Korallenriffe, die sich nicht an den Ölteppich anpassen können und darunter sehr schnell zugrunde gehen.

Ölabbau in der Wassersäule

Der mikrobielle Ölabbau in der Wassersäule und auch zum Teil an den Stränden wird von aeroben Mikroorganismen bewerkstelligt, die Sauerstoff verwenden. Es gibt hier verschiedene Spezialisten unter den Mikroben. Einige konzentrieren sich auf den Abbau gesättigter Kohlenwasserstoffe, während andere aromatische Verbindungen vorziehen. Solche Spezialisten sind sehr wichtig, denn Öl besteht aus einer komplexen Mischung verschiedener Substanzen. Beim aeroben Ölabbau werden normalerweise am schnellsten die kleinsten Moleküle und unter diesen die gesättigten Kohlenwasserstoffe abgebaut. Der Abbau großer Moleküle und aromatischer Verbindungen dauert im Verhältnis länger. Fakt aber ist, dass am Ende des Abbauprozesses einige Stoffe zurück bleiben, die auch für Mikroben unverdaulich sind. Dies sind zum einen Abbauprodukte von nur zum Teil verdaulichen Substanzen, zum anderen aber auch Substanzen, die sich der Verdauung durch Mikroben vollständig entziehen. Bei einer Ölpest werden die Mikroben normalerweise schnell aktiv, werden

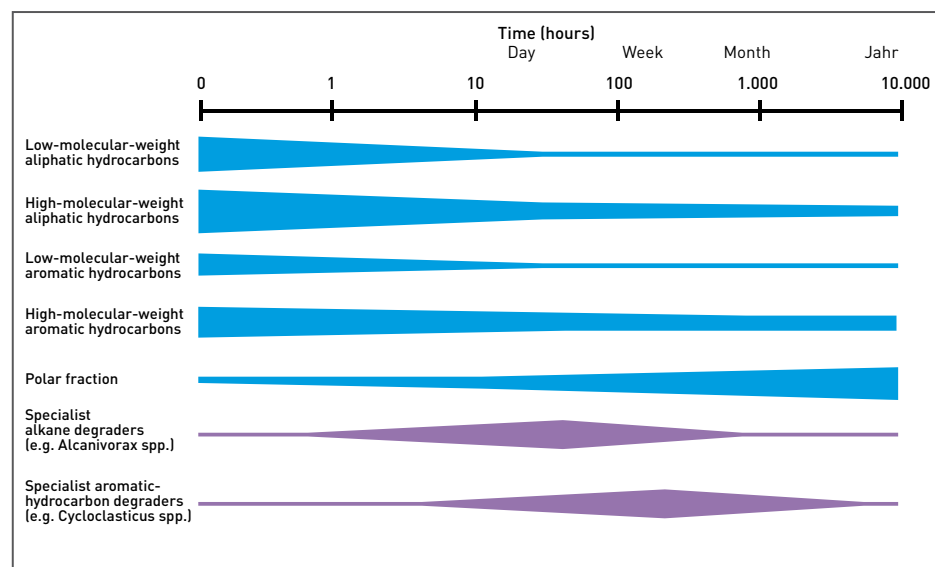
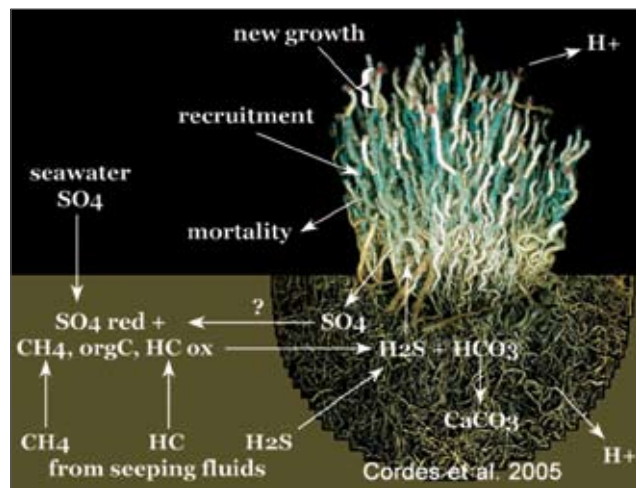


Abb. 2 | Changes in the composition of spilled oil and corresponding changes in the abundance of key organism. This schematic diagram represents general changes that have been observed in several studies. Slight variations are likely, both in the specific organism that are involved and in the extent of biodegradation of different crude oils, which have a range of physical and chemical properties that affect their fate in the environment. Figure after I.M. Head, D.M. Jones, W.F.M. Röling: Marine microorganisms make a meal of oil. *Nature Reviews Microbiology* 4, 173-182, 2006

Der Abbau des Öls

aber häufig nach kurzer Zeit durch einen Mangel an Stickstoff- und Phosphor-Verbindungen, die sie zum Wachstum benötigen, gebremst. Abhilfe kann eine Düngung schaffen, um den mikrobiellen Abbau des Öls zu beschleunigen. Allerdings führt die Düngung nicht zu einem vollständigeren Abbau - es geht einfach nur schneller. Am Ende bleiben die gleichen schwerverdaulichen Rückstände, die auch beim langsamen Abbau geblieben wären. Ein weiterer wichtiger Faktor, der die Geschwindigkeit des mikrobiellen Abbaus beeinflusst, ist die Temperatur. Je wärmer es ist, desto schneller wird das Öl durch die Mikroben abgebaut. Daher würde ein Ölunfall gleichen Ausmaßes in kälteren Breiten, wie in Alaska, länger andauern als in wärmeren Breiten. Am havarierten BP-Bohrloch besteht neben den üblichen Problematiken einer Ölpest zusätzlich die Gefahr, dass durch den aeroben mikrobiellen Abbau des aus der Tiefe aufsteigenden Öls die Sauerstoffkonzentrationen in der darüber liegenden Wassersäule stark absinken. Sinken die Konzentrationen unterhalb gewisser Schwellenwerte, könnte es eine Bedrohung für höhere marine Organismen wie Zooplankton oder Fische darstellen. Die Arbeitsgruppe um Prof. Samantha Joye von der University of Georgia, Athens hat den Wasserkörper um das BP-Bohrloch auf solche Entwicklungen hin untersucht. Ihre vorläufigen Beobachtungen kann man in ihrem Blog verfolgen: <http://gulfblog.uga.edu/>

Abb. 3 | Anaerober mikrobieller Abbau von Öl [HC = Kohlenwasserstoffe] und Methan (CH_4) im Meeresboden unter Bildung von Schwefelwasserstoff (H_2S). Rückkopplung mit chemosynthetischen Gemeinschaften (hier Röhrenwürmer mit symbiontischen Bakterien), die den freigesetzten Schwefelwasserstoff unter Energiegewinnung wieder zu Sulfat (SO_4) zurück oxidieren. Schema nach Cordes, E. E., Arthur, M. A., Shea, K., Arvidson, R. S., and Fisher, C. R.: Modeling the mutualistic interactions between tubeworms and microbial consortia, *PLoS Biology*, 3, 1-10, 2005.



Friedrich Temps ist Professor für Physikalische Chemie an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel. Seine wissenschaftlichen Fachgebiete sind die Chemische Reaktionsdynamik, Spektroskopie und Photochemie. Er ist Träger des Gottfried-Wilhelm-Leibniz Preises 2000 der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Projektleiter im Sonderforschungsbereich 677 „Function by Switching“.

Tina Treude ist Professorin für Meeresbiologie und Biogeochemie. Sie leitet die Arbeitsgruppe Marine Geobiologie im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Sie befasst sich mit den Aspekten der Meeresbodenerwärmung, insbesondere mit den biogeochemischen Prozessen in marinen Sedimenten und geomikrobiologischen Untersuchungen.

Folgen des Ölundfalls im Golf von Mexiko für Fische und Fischerei

Der Unfall geschah am 20. April 2010 unter der BP-Ölbohrplattform „Deepwater Horizon“ im nördlichen Golf von Mexiko. Seit dem strömen pro Tag etwa 5.000 bis 10.000 m³ Rohöl aus einem Bohrloch in 1500 Meter Tiefe. Zusätzlich hat BP über 3.000 m³ des Lösungsmittels Corexit versprüht oder direkt in das ausströmende Öl gepumpt. Diese Lösungsmittel zerlegt das Rohöl in kleinere Tropfen, die in der Wassersäule schweben anstatt an die Oberfläche zu kommen. Die Tropfen sollen dann von Bakterien abgebaut werden. Nach Angaben der Herstellerfirma ist Corexit leicht giftig für Meerestiere und kann in der Nahrungskette angereichert werden, unabhängige Untersuchungen stehen noch aus.

Ölschwaden an der Oberfläche haben inzwischen die Küsten von Louisiana, Mississippi, Alabama und den Nordwesten von Florida erreicht. Das Öl scheint auch die sauerstoffarmen Zonen vor Texas und Louisiana zu verstärken - durch ölabbauende Bakterien die Sauerstoff zehren - oder zumindest deren negativen Auswirkungen zu ergänzen. Dies sind bereits die größten Sauerstoffmangelzonen der Welt und sie dehnen sich jedes Jahr weiter aus. Sie sind hauptsächlich die Folge von Algenblüten, verursacht durch Überdüngung in der Landwirtschaft.

Erfahrungen von vorherigen Ölundfällen im Golf von Mexiko deuten darauf hin, dass die Fischbestände nicht dauerhaft geschädigt werden.

Der Blauflossen-Thunfisch (auch Roter Thun genannt) laicht im April und Juni im nördlichen Golf von Mexiko, einschließlich des Unfallgebiets. Die Larven schlüpfen nach ein bis zwei Tagen und leben dann etwa einen Monat als Teil des Planktons. Sie fressen kleine Planktonorganismen – alles was ins Maul passt. Dabei können sie auch die gelösten Öltropfen aufnehmen, entweder direkt oder mit der Nahrung. Die genauen Auswirkungen sind unbekannt, aber es wird sehr wahrscheinlich zu einer erhöhten Sterblichkeit der Larven kommen. Als Ergebnis wird der Fortpflanzungserfolg in diesem Jahr geringer als üblich sein. Das wäre normalerweise nicht tragisch, da der Fortpflanzungserfolg auch unter natürlichen Bedingungen stark schwankt. Die Art hat sich daran angepasst, indem erwachsene Tiere bis zu zehn Mal ablaichen. Allerdings ist der Bestand des Blauflossen-Thunfisches stark überfischt und die meisten Tiere werden gefangen bevor sie ablaichen können. Die wenigen Laichtiere sind überwiegend Erstlaicher. Ein schwacher Jahrgang kann daher den ganzen Bestand an den Rand des Zusammenbruchs bringen. Eine direkte Auswirkung des Öls auf die erwachsenen Thune ist nicht zu erwarten, da diese Wandertiere ungünstige Gebiete meiden.

Das Gebiet um den Ölundfall ist weiträumig für die Fischerei gesperrt worden. Das betrifft vor allem die Fischerei auf Shrimps, Zackenbarsche und Schnapper. Wegen der Überfischung könnte sich die Schließung der Fischerei sogar positiv auf diese Bestände auswirken. Die küstennahe Fischerei, zum Beispiel für Austern und Kamm-Muscheln, ist weiter erlaubt. Allerdings ist die Nachfrage für Fänge aus diesem Gebiet eingebrochen.

Rainer Froese forscht im Forschungsbereich der Marinen Ökologie am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der Evolutionsökologie mariner Fische.

Folgen der Ölverschmutzung für die Bodenlebewelt im Golf von Mexiko

Bei der Abschätzung der Folgen für die Bodenlebewelt im Golf von Mexiko muss man zunächst zwischen küstennahen Ökosystemen und solchen in tieferem Wasser unterscheiden. Da Öl leichter als Wasser ist, steigt es auf und bildet an der Wasseroberfläche Filme und Teppiche. Je nach Wind- und Strömungsbedingungen können diese Ansammlungen dann auf die Küste zutreiben, wo das Öl akkumuliert und unmittelbar auf die benthischen (am und im Meeresboden lebende) Systeme einwirkt. Aus früheren Studien weiß man, dass tiefer gelegene Bereiche unterhalb 20 bis 40 Metern, über die das Öl hinweg zieht, nur geringfügig betroffen sind. Hier finden sich Bestandteile des Rohöls meist nur, wenn sie aus Küstengebieten wieder ausgewaschen wurden und beispielsweise als Öl-Lehmverbindungen ihren positiven Auftrieb verlieren. Im Flachwasser jedoch, dort wo das Öl zusammentreibt, kann es Ökosysteme nachhaltig beeinflussen. Im Bereich der US-Staaten Florida, Alabama, Mississippi, Louisiana und Texas können vor allem vier wichtige marine Lebensräume vom Öl betroffen sein: Salzmarschen, Mangroven, Seegraswiesen und Korallenriffe. Die kurz- wie auch die langfristigen Effekte können sich dabei zwischen den Systemen unterscheiden. Von Korallenriffen weiß man, dass Ölkontaminationen unmittelbar zur Abnahme der Gesamtbedeckung, der Diversität und der Wachstumsraten führen können. Zudem finden sich in verschmutzten Riffen häufiger verletzte Kolonien, bei denen Verletzungen die Kalkskelettstruktur des Riffs freilegen, die dann von anderen Organismen besiedelt werden kann. Solche Effekte können durchaus fünf Jahre lang anhalten. In Seegraswiesen ließen sich bis jetzt zwar unmittelbare Effekte von Ölverunreinigungen (Nekrosis) feststellen. Negative Langzeiteffekte wurden bisher nicht beobachtet. Allerdings gibt es auch nur wenige Daten hierzu.

Salzmarschen und Mangrovenwälder liegen im Gezeitenbereich, in dem der Einfluss des Meeres von der Niedrig- zur Hochwasserlinie abnimmt. Das Öl sammelt sich im Bereich der Hochwasserlinie, wo dann Kohlenwasserstoffverbindungen und Metallionen über längere Zeit in die darunterliegenden Sedimente einsickern können. Diese sind meist sehr reich an organischer Substanz und können sich wie ein Schwamm mit Öl vollsaugen. Durch Auswaschung kehren diese Verbindungen dann immer wieder in die Wassersäule zurück und sorgen für eine Wiederverölung der Küste. Dadurch gelangt Öl auch immer wieder in die Nahrungskette und kann Aquakulturorganismen wie Austern und Shrimps für den menschlichen Verzehr unbrauchbar machen. In welchem Maße Sedimente Öl aufnehmen und wie stark und häufig Auswaschungen sind, hängt von vielen ortsspezifischen Faktoren ab, aber es wird angenommen, dass Kontaminationen über 20 Jahre und länger nachwirken können. Dies wird dadurch begünstigt, dass die natürlichen Abbauraten in den sauerstoffarmen und nicht von UV-Strahlung beeinflussten Sedimenten gering sind.

Die Lebewelt von Marschen und Mangroven ist auf zwei Weisen vom Öl betroffen. Zum einen kommt es zu Vergiftungen, wenn Kohlenwasserstoffverbindungen direkt aufgenommen werden. Zum anderen kann mechanische Verschmutzung, beispielsweise das Überziehen des Wurzelwerks der Mangroven mit einem Ölfilm, Organismen schädigen. Studien in Mangrovenwäldern haben gezeigt, dass die Sterblichkeit unter Schößlingen und Blattverlusten bei älteren Bäumen nach einer Kontamination ansteigen. Nach einem längeren Zeitraum kann dies auch zum Absterben der ausgewachsenen Bäume führen. Dadurch wiederum verändert sich dann das Gesamtökosystem, das in seiner Gänze auf dem durch die Bäume geschaffenen Lebensraum beruht. Wirbellose Tiere (Invertebraten) werden in unterschiedlichem Maße vom Öl geschädigt. Einige Gruppen, beispielsweise Flohkrebse (Amphipoden) und Muschelkrebse (Ostracoden,) reagieren sehr sensibel auf Öl und ihre Populationsdichten können nach einer Verschmutzung stark einbrechen. Andere

Folgen der Ölverschmutzung für die Bodenlebewelt im Golf von Mexiko

Arten sind resistenter und einige opportunistische Formen wie Borstenwürmer aus den Gruppen der Capitellidae und Spionidae, profitieren gar von der Verschmutzung. Mit solchen Häufigkeitsverschiebungen geht dann aber auch eine Veränderung der Lebensgemeinschaft einher. Insgesamt regenerieren sich Invertebratengemeinschaften nach Verschmutzungsereignissen aber relativ schnell und schon wenige Monate bis wenige Jahre nach dem Ereignis lassen sich keine Effekte des Öles mehr feststellen.

Die Abschätzung der Folgen von Ölverschmutzungen ist für marine Küstenökosysteme immer noch sehr schwierig. Dort wo Verschmutzungen auftraten lagen zumeist keine verlässlichen Daten über die Lage der Systeme vor dem Ereignis vor, so dass eindeutige Vorher-/Nachher-Vergleiche nicht möglich sind. Dies gilt vor allem für die Subtropen und Tropen. Bisherige Erkenntnisse über mögliche Effekte stammen vor allem aus Studien über punktuelle Verschmutzungen, die in ihrem Ausmaß nicht mit dem Ereignis im Golf von Mexiko vergleichbar sind.

Mark Lenz ist Forscher im Forschungsbereich Marine Ökologie am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Seine Forschungsschwerpunkte sind die meeresökologische Grundlagenforschung mit den Themengebieten Biodiversitätsforschung, globaler Wandel in Küstengewässern und der Ökologie von Hartbodenlebensgemeinschaften.

Ölaustritte – Die Schädigung der Tiefsee

Über mehrere Monate sind nach der Harvarie der Bohrplattform „Deepwater Horizon“ im nördlichen Golf von Mexiko täglich tausende Kubikmeter Erdöl ins Meer geflossen. Das Öl hat sich an der Wasseroberfläche ausgebreitet und bedeckt als breiter, unregelmäßiger Ölteppich bzw. dünner Ölfilm weite Teile des nordöstlichen Golfes. Der Ölteppich bedroht nicht nur die Strände und Salzwiesen in den Bundesstaaten Louisiana, Mississippi und Florida, sondern das gesamte Ökosystem von der Wasseroberfläche bis in die oberen Bodenschichten. Um den Ölteppich aufzulösen, wurden über tausend Tonnen des synthetischen Ölbekämpfungsmittels COREXIT großflächig ausgebracht. Teilweise wurde das Mittel auch direkt am Bohrloch in 1.500 Meter Wassertiefe dem austretendem Öl beigemischt. COREXIT ist ein oberflächenaktiver Stoff, der in seiner technischen Wirkung am besten mit Spülmittel-Konzentrat aus dem Haushalt verglichen werden kann. Das Bekämpfungsmittel zerlegt den Ölfilm in faustgroße Klumpen bis submikroskopisch kleine Tröpfchen, die unter der Wasseroberfläche schweben und langsam zum Meeresboden absinken. Wie lange die Öltröpfchen im Wasser schweben, ist unbekannt. Bei Untersuchungen in den ersten Monaten nach dem Unfall sind mit Unterwasser-Videokameras treibende Ölwolken beobachtet worden, die schon bis in 1.300 Meter Tiefe reichten. COREXIT ist auch in großer Verdünnung sehr aggressiv. Beim Menschen verursacht es beispielsweise Hautreizungen und Verletzungen der Schleimhäute. Bei der Verwendung muss besondere Schutzkleidung getragen werden. Laborversuche haben gezeigt, dass COREXIT für viele Meerestiere hochgiftig ist.

Natürliche Ölaustritte am Meeresboden sind im Golf von Mexiko keine Seltenheit. Sie sind von einem Hügel oder Teich aus Asphalt oder Schweröl umgeben, der die Ausdehnung von ein bis zwei Fußballfeldern haben kann. Die Austrittsraten sind gering, und speziell angepasste Bakterien sorgen für einen natürlichen Abbau des Öls. Die Bakterien sind wiederum Nahrungsquelle für eine ganze Reihe anderer Organismen wie Röhrenwürmer, Muscheln, Krabben und kleine Fische. Diese Lebensgemeinschaften sind lokal begrenzt. Sie stehen mit der Umgebung nur in eingeschränktem Austausch, weil sie hochspezialisiert sind und eine außergewöhnliche Nahrungsquelle nutzen können, die andere Organismen meiden.

Die Lebewelt hat über lange, geologische Zeiträume von Jahrmillionen gelernt, mit kleinen Ölaustritten umzugehen, ja sie gezielt zu nutzen. Selbst der alltägliche Öleintrag durch kleine Leckagen und Unachtsamkeiten bei der Förderung und dem Transport zieht noch keine schwerwiegenden Schädigungen der Lebensgemeinschaften nach sich. Unsere eigenen Studien haben gezeigt, dass der Sand am Meeresboden südlich der Florida Keys, direkt unter der Haupttankerroute aus dem Golf von Mexiko zur amerikanischen Ostküste, von ölverschmierten Partikeln durchsetzt ist, aber eine reiche Fauna von Schwämmen, Seefedern und Tiefwasser-Korallen aufweist und damit auf ein intaktes Ökosystem hinweist. Die Fauna unterscheidet sich nicht von Lebensgemeinschaften in gleicher Wassertiefe außerhalb der Tankerroute, wo der Sand am Meeresboden sauber ist.

Wie sich die Situation verändern wird, wenn sich im Wasser schwebende Ölwolken aus dem Leck der „Deepwater Horizon“ am Meeresboden absetzen, wissen wir nicht. Dafür gibt es keine Beispiele aus der jüngsten Vergangenheit. Nach Tankerunfällen im Flachwasser haben Turbulenzen der Brandung, Sonnenlicht und Sauerstoff aus der Luft den bakteriellen Abbau des Öls begünstigt. In der lichtlosen Tiefsee ist Sauerstoff knapp und Wasserbewegungen meist langsam. Es ist zu vermuten, dass die ungewöhnlich große Menge an Ölschlick in kurzer Zeit und die weiträumige Verteilung für die Lebensgemeinschaften am Meeresboden eine Bedrohung darstellt. Weiterhin kann

Ölaustritte – Die Schädigung der Tiefsee

vermutet werden, dass sich die Ökosysteme an den natürlichen Ölaustritten in ihrer Verbreitung flächig ausdehnen und einen nicht unerheblichen Beitrag zum Abbau des Ölschlucks leisten werden. Dabei ist noch nicht geklärt, ob der Eintrag an synthetischem COREXIT hierbei hinderlich oder für ölabbauende Bakterien sogar schädlich sein wird, welche Konzentration COREXIT am Meeresboden herrscht und wie Bakterien und andere Kleinstlebewesen darauf reagieren. Eine Beantwortung dieser Fragen setzt eine Bestandsaufnahme der Situation vor dem Ölunfall in dem betroffenen Gebiet voraus. Wir haben ein Jahr vor dem Unfall unkontaminierte Meeresboden-Proben nahe der untergegangenen „Deepwater Horizon“ und an anderen Stellen im östlichen Golf von Mexiko gesammelt, die gegenwärtig analysiert werden (Abbildung 1). Wir werden die gleichen Lokationen zwei Jahre nach dem Stopp des Öleintrages noch einmal beproben. Dabei wollen wir herausfinden, ob und wie viel Ölschluck sich abgesetzt hat, und ob sich der Einsatz von COREXIT am Meeresboden nachweisen lässt. Wir wollen untersuchen, wie sich die Lebensgemeinschaften am Meeresboden verändert haben, ob der bakterielle Abbau des Öls angelaufen ist und welche Organismen daran beteiligt sind.



Abb. 1 | Ausbreitung des Ölteppichs vor der Mississippi-Mündung am 24. Mai 2010. Die Probenlokationen von der Meteor-Reise M78/1 liegen direkt unter der ostwärtigen Ausbreitungsfahne des Ölteppichs.

Joachim Schönfeld ist Paläoozeanograph im Forschungsbereich Ozeanzirkulation und Klimadynamik am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Sein Interesse gilt der Mikropaläontologie benthischer Organismen.

Wolf-Christian Dullo ist Professor für Paläoozeanographie am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR in Kiel. Er arbeitet zu kurzskaligen Wechselwirkungen von Ozean und Atmosphäre, die über geochemische Proxies im Skelett von Korallen abgebildet werden. Prof. Dullo erhielt im Jahre 2002 den Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Preis.

Sascha Flögel ist Paläoozeanograph im Forschungsbereich „Ozeanzirkulation und Klimadynamik“ am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel. Seine Forschungsschwerpunkte sind globale und regionale Klimasimulationen unter Verwendung von numerischen Klimamodellen. Er untersucht die Rolle des globalen hydrologischen Kreislaufs auf Nährstoffvorkommen und ihren Weitertransport in den Ozean.

Allgemeine Rechtslage

Ölunfälle wie der im Golf von Mexiko, die im Zusammenhang mit der Ausbeutung der natürlichen Ressourcen des Festlandssockels stehen, unterliegen auf internationaler Ebene keiner umfassenden rechtlichen Regelung. Immerhin übt ein Küstenstaat über Bohrplattformen, die in seiner Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) bzw. auf dem Festlandssockel errichtet wurden, gemäß UN-Seerechtsübereinkommen von 1982 (UNCLOS) ausschließliche Hoheitsbefugnisse aus - einschließlich der in Bezug auf die Festlegung von Sicherheitsstandards und die Annahme von Gesetzen zum Schutz der Meeresumwelt (vgl. Art. 60 Abs. 2). Dies gilt auch für mobile Plattformen, die unter ausländischer Flagge in den Hoheitsgewässern des Küstenstaats operieren. Im Falle eines Unfalls ist konsequenterweise grundsätzlich der Staat für die Schadensbeseitigung und -abwicklung zuständig, innerhalb dessen Jurisdiktionsbereich der Schaden aufgetreten ist. Eine Ersatzpflicht gegenüber anderen Staaten kommt jedoch nur dann in Betracht, wenn es im Zusammenhang mit dem Unfall zu einem dem Flaggenstaat zurechenbaren Völkerrechtsverstoß gekommen ist. Ein Verstoß gegen innerstaatliche Regelungen (z.B. Aufsichtspflichten o.ä.) reicht demgegenüber nicht aus. Hinsichtlich von risikogeneigten, aber grundsätzlich erlaubten Tätigkeiten besteht nach geltendem Völkerrecht keine Ersatzpflicht. Da gemäß UN-Seerechtsübereinkommen jeder Staat berechtigt ist, auf seinem Festlandssockel Plattformen zur Ausbeutung der im Meeresgrund lagernden Ressourcen zu genehmigen, zu errichten und zu betreiben, kommt eine Schadensersatzpflicht der USA gegenüber anderen Staaten nach derzeitigem Stand nicht in Betracht.

Eine unmittelbare Haftung der privaten Schadensverursacher anerkennt das Völkerrecht nur im Falle bestimmter Umweltschäden. Einzig die Konvention des Europarates über die zivilrechtliche Haftung für Schäden aus umweltgefährdenden Tätigkeiten von 1993 (sog. Lugano Konvention) erfasst bereichsübergreifend sämtliche umweltgefährdenden Tätigkeiten. Sie wurde bislang jedoch nur von neun Staaten unterzeichnet und von keinem dieser Staaten ratifiziert; Deutschland, Dänemark und Großbritannien haben sich explizit gegen die Konvention ausgesprochen. Für den Bereich der Meeresverschmutzung statuiert das als Reaktion auf die Öltankerkatastrophe der Torrey Canyon verabschiedete Internationale Übereinkommen von 1969 bzw. von 1992 (Revision) über die zivilrechtliche Haftung für Ölverschmutzungsschäden eine Haftung des Schiffseigentümers für unfallbedingte Schäden im zum Staatsgebiet zählenden Küstenmeer sowie in der AWZ. Allerdings sind Haftungsbegrenzungen möglich, wenn der Schiffseigentümer zuvor eine Sicherheitsleistung hinterlegt hat und der Unfall nicht vorsätzlich oder grob fahrlässig verursacht wurde. Der mit dem Internationalen Übereinkommen von 1971 bzw. von 1992 (Revision) über die Errichtung eines Internationalen Fonds zur Entschädigung für Ölverschmutzungsschäden eingerichtete Fonds springt im Falle der ungenügenden Entschädigung der von einer Verschmutzung Betroffenen ein. Beiträge werden für jeden Vertragsstaat von allen Personen geleistet, die pro Jahr insgesamt mehr als 150.000 Tonnen beitragspflichtiges Öl, das auf dem Seeweg befördert worden ist, erhalten haben. Beide Übereinkommen sind allerdings ausschließlich auf Schiffsunfälle, nicht aber auf Unfälle auf Ölbohrplattformen (soweit diese nicht ausnahmsweise als Schiffe zu qualifizieren sind) anwendbar. Der einzige unmittelbar auf Offshore-Bohrplattformen anwendbare (freilich in seinem Anwendungsbereich auf die Nordsee begrenzte) völkerrechtliche Vertrag, die International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage resulting from Exploration for and Exploitation of Seabed Mineral Resources von 1976, wurde bislang lediglich von sechs Nordseeanrainerstaaten unterzeichnet und ist noch nicht in Kraft getreten. Für den Bereich der Nordsee haben sich die Betreiber von Offshore-Ölbohrplattformen im Jahre 1975 mit dem Abschluss des Offshore Pollution Liability Agreement (OPOL) auf freiwilliger Basis einem Ersatzschema für Öl- und Gasverschmutzungsschäden unter-

Allgemeine Rechtslage

worfen. Im Hinblick auf etwaige Schadensersatzansprüche erklärt das – nicht dem Bereich des Völkerrechts zurechnende – Abkommen englisches, d.h. nationales Recht für anwendbar.

Fehlt es auf internationaler Ebene hiernach an Vorgaben zur Haftung der privaten Schadensverursacher, kommt diesbezüglich auch auf Plattformen, die in der AWZ bzw. auf dem Festlandsockel errichtet wurden, das Umwelthaftungsrecht des Küstenstaats zur Anwendung. Die entsprechenden Vorgaben unterscheiden sich zum Teil erheblich; das UN-Seerechtsübereinkommen gibt dem Küstenstaat lediglich vor, dass er Gesetze zur Verhütung, Verringerung und Überwachung der Verschmutzung der Meeresumwelt durch Offshore-Bohraktivitäten erlassen und diese auch durchsetzen muss (vgl. Art. 208, 214). Während in Europa die nationalen Haftungsregelungen maßgeblich von den Vorgaben der EU-Umwelthaftungsrichtlinie geprägt sind, gelangt in den USA primär der Oil Pollution Act von 1990 (OPA) zur Anwendung, nach dem ein System der „Erfolgshaftung“ zur Anwendung gelangt. Dies bedeutet, dass der Betreiber eines Öltankschiffs oder einer Offshore-Bohrplattform grundsätzlich verschuldensunabhängig für jede Ölverschmutzung aufkommen muss. Für Offshore-Anlagen enthält das Gesetz eine pro Ölteppich zur Anwendung gelangende Haftungshöchstsumme von 75 Millionen US Dollar; derzeit wird eine rückwirkend in Kraft tretende signifikante Erhöhung dieser Summe diskutiert. Hinzu treten eine Vielzahl spezialgesetzlicher (etwa naturschutzrechtlicher Vorgaben) sowie separate Haftungsregelungen der betroffenen Bundesstaaten. Da die motorisierte „Deepwater Horizon“ nicht auf dem Meeresboden verankert war, könnte sie freilich auch als Schiff qualifiziert werden. Der Eigentümer der Plattform, Transocean Ltd, hat sich bereits auf den Limitation of Liability Act von 1851 berufen, wonach die Haftung eines Schiffsbetreibers auf den Wert des Schiffes unmittelbar vor seinem Verlust begrenzt ist. Brächte man den Wert des auf der gesunkenen „Deepwater Horizon“ verblieben Rohöls in Ansatz, führte dies zu einer Haftungshöchstgrenze von nur 26,7 Millionen US Dollar. Freilich gehen führende Experten des US-amerikanischen Haftungsrechts davon aus, dass das Gesetz auf die Ölkatastrophe im Golf von Mexiko nicht anwendbar ist. Insofern wird es voraussichtlich bei den umfassenderen Vorgaben vor allem des Oil Pollution Acts bleiben.

Literatur:

- Czybulka, D., Die Anwendung der Umwelthaftungsrichtlinie in der Ausschließlichen Wirtschaftszone und auf dem Festlandsockel, *Natur und Recht* 30 (2008), 304-311
- Wolfrum, R., Langenfeld, C., und P. Minnerop, *Environmental Liability in International Law, Towards a Coherent Conception*, Berlin 2005

Alexander Proelß ist Professor für Öffentliches Recht mit dem Schwerpunkt Seerecht an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel. Das Internationale Seerecht bildet neben anderen Fragen aus den Bereichen Völkerrecht (Umweltvölkerrecht), Europarecht und Verfassungsrecht einen seiner Forschungsschwerpunkte am Walther-Schücking-Institut für Internationales Recht an der CAU.

Nachlese: Die ökonomischen Kosten der Öl-Havarie

Der Unfall auf der Ölplattform „Deepwater Horizon“ wirft neben den direkten physischen Effekten die Frage nach den ökonomischen Kosten auf. Der BP-Konzern hatte sofort nach Bekanntwerden des Unfalls die volle Verantwortung für die Havarie übernommen und Kompensationszahlungen für Schäden, die auf den Öl-Unfall zurückzuführen sind, in Aussicht gestellt. In diesem Abschnitt soll erörtert werden, auf welche Höhe sich die gesamten volkswirtschaftlichen Schäden beziffern werden.

Wenn BP tatsächlich alle Schäden übernehmen und ausgleichen würde, könnte man deren Höhe recht gut am Rückgang des Börsenwertes ablesen. In der Tat ist der Börsenwert von BP seit dem 20. April 2010 dramatisch gefallen, seit den Erfolgsmeldungen bezüglich der Schließung des Bohrlochs aber wieder angestiegen (s. Abb.). Danach beläuft sich der gegenwärtige Gesamtwert der erwarteten Kosten für BP auf 54 Milliarden Euro. Die anderen an Plattform und Bohrungen beteiligten Unternehmen (Anadarko, Mitsui und Transocean) haben ebenfalls erhebliche Börsenwert-Verluste erlitten, wenn auch in wesentlich geringerem Umfang als BP. Kursverluste haben allerdings auch Unternehmen erlitten, die vor der amerikanischen Küste Öl fördern, aber nicht direkt an der Havarie beteiligt sind. Volkswirtschaftlich betrachtet spiegeln diese Kursverluste der anderen Konzerne jedoch keine gesellschaftlichen Verluste wider. Sie sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass in Zukunft mit strengeren Auflagen gerechnet und damit zu höheren Kosten gebohrt werden muss. Diesen Kosten stehen allerdings vermiedene zukünftige externe Kosten (geringere Schäden durch vermiedene Unfälle) gegenüber, so dass der Gesamteffekt der Kursverluste der anderen Konzerne eher positiv ausfallen dürfte. Etwa ein Viertel der Kursverluste von BP (rund 13 bis 14 Milliarden Euro) ist somit ebenfalls auf den erwarteten Anstieg künftiger Bohrkosten zurückzuführen. Bleiben von den 54 Milliarden Euro Kursverlusten rund drei Viertel, die sich auf die erwarteten Aufräumkosten, Kompensations- und Strafzahlungen zurückführen lassen, also ca. 40 Milliarden Euro. In dieser Summe enthalten sind zum einen die Reinigungsarbeiten entlang der Küsten. Rechnet man die entsprechenden Kosten der Exxon-Valdez-Havarie hoch, ist mit circa 10 Milliarden Euro zu rechnen. Weiterhin dürfte BP mit circa 13 Milliarden Euro an Strafzahlungen zu rechnen haben. Diese Strafzahlungen spiegeln allerdings keine Schäden wider und sind lediglich Transferzahlungen von BP in die amerikanische Staatskasse. Sie mindern den Börsenwert, sind aber keine volkswirtschaftlich verlorenen Werte.

Wirtschaftliche Ausfälle haben vor allem die Fischereiwirtschaft und die Tourismusindustrie zu verzeichnen. Der Fangertag der US-Amerikanischen kommerziellen Fischerei beläuft sich auf rund 700 Millionen Euro pro Jahr. Da die Fischerei auch mit hohen Kosten verbunden ist, sind die volkswirtschaftlichen Verluste aber erheblich geringer. Im Tourismusbereich werden Summen zwischen 12 und 24 Milliarden Euro an Umsatzausfällen genannt. Hierin enthalten sind Umsatzausfälle der Freizeitfischerei im Golf von Mexiko mit jährlichen Gesamtumsätzen von rund 1,4 Milliarden Euro. Geht man sehr großzügig von einer 25-prozentigen Gewinnspanne in der Tourismusindustrie aus, so ergibt dies eine Obergrenze an privatwirtschaftlichen Verlusten in den betroffenen Gebieten von rund 5 Milliarden Euro für Fischerei und Tourismus zusammen. Gegenzurechnen sind ökonomische Gewinne an anderer Stelle. Insbesondere bei Urlaubsreisen gibt es für die meisten Touristen gute Ausweichmöglichkeiten, beispielsweise an die Ostküsten von Florida, Georgia, North- und South Carolina. Diese Regionen werden wirtschaftlich von dem Öl-Unfall profitieren, wenngleich mit einer geringfügigen Verknappung an Urlaubsreiseangeboten und somit mit leicht höheren Preisen für

Nachlese: Die ökonomischen Kosten der Öl-Havarie

die Konsumenten zu rechnen ist. Diese Gewinne an anderer Stelle sind im Börsenwertverlust von BP nicht eingepreist. Von den oben genannten 5 Milliarden Euro Gewinnverlusten bleiben somit ungefähr 2 bis 3 Milliarden Euro übrig.

Worüber bislang wenig bekannt ist, sind krankheitsbedingte Kosten. Im Fall der Exxon-Valdez-Havarie beliefen sich diese auf ungefähr null, allerdings fand diese Havarie in einem nahezu unbesiedelten Gebiet statt. Laut Presseberichten haben sich am Golf von Mexiko tatsächlich bereits Bürger mit realen oder vermeintlichen Symptomen bei Ärzten gemeldet. Auch vermeintliche Symptome und Angst vor Krankheiten erzeugen Kosten. Die Höhe dieser ist jedoch bislang nicht seriös abschätzbar. Die erwarteten Kosten dürften allerdings im Börsenwert von BP eingepreist sein. Ebenfalls eingepreist ist der Verlust an Öl. Dieser beläuft sich auf bis zu 4,4 Millionen Barrel, was einem Marktwert von 260 Millionen Euro entspricht. Gegenzurechnen sind die vermiedenen Klimaschäden durch vermiedenen CO₂-Ausstoß. Bei einem vom IPCC genannten Grenzscha-den von circa 40 Euro pro Tonne CO₂ entspräche dieses vermiedenen Kosten von rund 100 Millionen Euro. Der volkswirtschaftliche Gesamtverlust durch das entgangene Öl liegt somit bei 160 Millionen Euro und macht dadurch einen nur sehr kleinen Teil an den Gesamtschäden aus.

Zwei wichtige Posten, die im Börsenwert von BP nicht eingepreist sind, fehlen noch in der Verlustrechnung. Zum einen ist dieses der verlorene Konsumentennutzen unter anderem durch Tages-touren für Strandbesuche. Diese tauchen in den Bilanzen von Hotels und anderen Tourismus-angeboten nicht auf und liegen nach Ansicht von „recreation-demand“-Forschern um ein Vielfaches höher als die Gewinneinbußen der Tourismusindustrie. Auf Basis von Studien zum Wert von Strandbesuchen in vergleichbaren Regionen lässt sich schätzen, dass der Konsumentennutzen aus Strandbesuchen im Golf von Mexiko ca. 7,5 Milliarden Euro beträgt. Geht man davon aus, dass rund 20 Prozent dieses Wertes verloren gegangen ist, kommt man auf Kosten von rund 1,5 Milliarden Euro. Weiterhin dient der Golf von Mexiko als wichtiges Brutgebiet von Fischen, die aufgrund von weitrei-chenden Wanderbewegungen an anderer Stelle gefangen werden. Insbesondere gilt dieses für den Blauflossen-Thunfisch. Der Wert der weltweiten Anlandungen an Thunfischen beträgt rund 7 bis 8 Milliarden Euro pro Jahr, wovon maximal 1 Prozent betroffen sein dürfte, so dass der Verlust deutlich unterhalb von 100 Millionen Euro liegen wird. Nach Einschätzung von Fischereibiologen (vgl. den Beitrag von Rainer Froese auf Seite 29) ist mit einer nachhaltigen Schädigung der Fischbestände im Golf von Mexiko nicht zu rechnen. Über die volkswirtschaftlichen Kosten möglicher langfristiger Auswirkungen auf das Ökosystem und Ökosystemdienstleistungen, die sich nicht direkt auf Märkten abgelesen lassen, lassen sich bislang kaum belastbare Aussagen machen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die sozialen Kosten der Havarie in etwa so hoch sind wie der Börsenverlust von BP. Dieser Verlust überschätzt die Kosten zum Teil, weil Gewinne an anderer Stelle wie im Tourismus an den Ostküsten der USA nicht dem BP-Konzern zu gute kommen und weil ein Teil des Börsenwertverlusts die Kosten volkswirtschaftlich sinnvoller Einschränkungen für zukünftige Bohrungen enthält. Andererseits sind einige Wohlfahrtsverluste wie beispielsweise durch den Wegfall des Tagestourismus im Kursverlust von BP nicht enthalten, da der Konzern hierfür mit großer Wahrscheinlichkeit nicht haftbar gemacht werden wird.

Nachlese: Die ökonomischen Kosten der Öl-Havarie

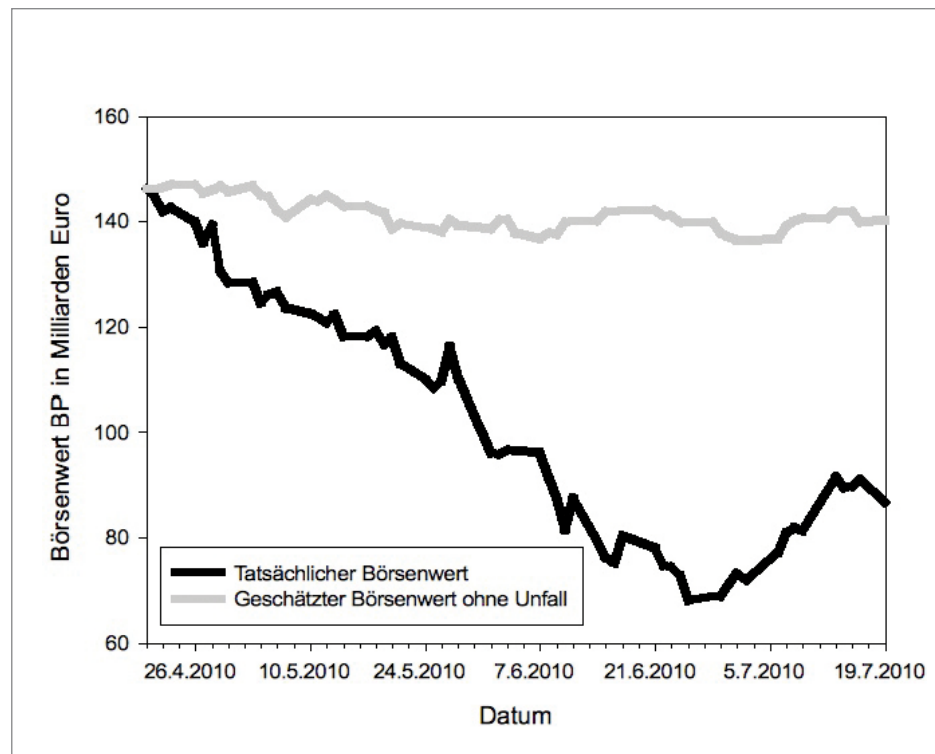


Abb. 1 | Verlauf des Börsenwertes der Firma BP zwischen dem 22.4.2010, dem Zeitpunkt des Unfalles, und dem 19.7.2010

Helmut Herwartz ist Professor für Ökonometrie und Direktor des Instituts für Statistik und Ökonometrie an der CAU zu Kiel. Seine besonderen Forschungsinteressen gelten der Stochastischen Volatilität, Stichprobenwiederholungsverfahren, Panelfehlerkorrekturmodellen und Zustandsraummodellen.

Dan Phaneuf ist Professor an der North Carolina State University für Agrarwirtschaft & Ressourcen Ökonomie. Seine Forschungsinteressen umfassen die Entwicklung von Methoden offenbarter Präferenzen für die nicht-marktbasierte Bewertung von Umweltgütern und die Effekte des „bankings“ auf Märkten für Emissionsrechte.

Martin Quaas ist Professor für Umwelt-, Ressourcen- und Ökologische Ökonomik an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und Leiter der Arbeitsgruppe „Lebende Ressourcen und Überfischung“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. Er erforscht, wie eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen erreicht werden kann.

Katrin Rehdanz ist Professorin für Umwelt- und Ressourcenökonomik und leitet die Forschungsgruppe „Ökonomische Bewertung des Ozeans“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ am Kieler Institut für Weltwirtschaft (IfW). Zu ihren besonderen Forschungsinteressen gehören die Entwicklung von ökonomischen mathematischen und statistischen Techniken zur Bewertung von Umweltproblemen.

Till Requate ist Professor für Innovations-, Wettbewerbs- und Neue Institutionenökonomik am Institut für Volkswirtschaftslehre der Christian-Albrechts Universität zu Kiel. Sein Interesse gilt unter anderem der Forschung an aktuellen Problemen der Umwelt- und Ressourcenökonomik.

Weiterführende Informationen

Mehr zum Abbau von Erdöl durch Bakterien vom MPI für marine Mikrobiologie in Bremen

<http://tinyurl.com/mpi-bremen-oil-statement>

Berichte über die Untersuchung der treibenden Ölwolken in tieferen Wasserschichten

Joye, S., 2010. Trust your senses. <http://gulfblog.uga.edu/2010/05/trust-your-senses/>.

Sicherheitsdatenblatt des Ölbindemittels

Darin werden Schutzmaßnahmen erläutert und die lethalen Konzentrationen für einzelne Meerestiere angegeben:

NALCO Company, 2010. Safety data sheet COREXIT® EC9500A. <http://www.nalco.com>.

Beschreibung von natürlichen Ölaustritten und Asphaltvulkanen im Golf von Mexiko

Brüning, M., Sahling, H., MacDonald, I., Ding, F. und Bohrmann, G., 2010. Origin, distribution, and alteration of asphalts at the Chapopote Knoll, Southern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology* 27:1093-1106.

Beschreibung des Abbaus von Kohlenwasserstoffen durch Mikroben

Orcutt, B., Joye, S.B., Kleindienst, S., Knittel, K., Ramette, A., Reitz, A., Samarkin, V., Treude, T. und Boetius, A., 2010. Impact of natural oil and higher hydrocarbons on microbial diversity, distribution and activity in Gulf of Mexico cold seep sediments. *Deep Sea Research II*, doi:10.1016/j.dsr2.2010.05.014.

Beschreibung der Ökosysteme an natürlichen Ölaustritten im Golf von Mexiko

MacDonald, I.R., Bohrmann, G., Escobar, E., Abegg, F., Blanchon, P., Blinova, V., Brückmann, W., Drews, M., Eisenhauer, A., Han, X., Heeschen, K., Meier, F., Mortera, C., Naehr, T., Orcutt, B., Bernard, B., Brooks, J. und de Farágo, M., 2004. Asphalt volcanism and chemosynthetic life in the Campeche Knolls, Gulf of Mexico. *Science* 304, 999–1002.

Erste Ergebnisse der Meteor-Reise M78/1 in den Golf von Mexiko

Schönfeld, J., 2009. Short Cruise Report METEOR Cruise No.78 Leg 1, Colon (Panama) - Port of Spain (Trinidad and Tobago), 22nd February - 28th March 2009. Leibniz Institute of Marine Sciences, IFM-GEOMAR at the University of Kiel. 14 pp, hdl:10013/epic.35284.d001.

Beschreibungen der Auswirkungen von massiver Ölverschmutzung auf Mikroorganismen am Meeresboden

Pascual, A., Rodriguez-Lazaroa, J., Martín-Rubioa, M., Jouanneau, J.-M. und Weber, O., 2008. A survey of the benthic microfauna (foraminifera, Ostracoda) on the Basque shelf, southern Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, 72: 35-63.

Morvan, J., Le Cadre, V., Jorissen, F. and Debenay, J.-P., 2004. Foraminifera as potential bio-indicators of the „Erika“ oil spill in the Bay of Bourgneuf: Field and experimental studies. *Aquatic Living Resources*, 17: 317-322.

Über den Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“

Den Ozean verstehen heißt die Zukunft gestalten

Die Zukunft unserer Gesellschaft hängt nicht zuletzt von der Entwicklung der Ozeane ab. Die Weltmeere spielen eine Schlüsselrolle für das globale Klima, bergen Gefahren für die Küsten durch den globalen Meeresspiegelanstieg, das Auftreten von Tsunamis und Hangrutschungen im Meer oder die fortschreitende Versauerung der Ozeane durch die zunehmende Aufnahme des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂). Die Ozeane bieten gleichzeitig aber auch Chancen in Form von Ressourcen, die der Mensch nutzen kann. Dazu gehört die marine Medizin ebenso wie die Fischerei oder neue Energieträger.

Der Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ erforscht Themen wie diese fächerübergreifend und in einer in Deutschland einmaligen Breite: Biologen des Leibniz-Instituts für Meeresforschung (IFM-GEOMAR) arbeiten zusammen mit Ressourcen-Ökonomen und Völkerrechtlern der Uni Kiel an wirtschaftlichen und rechtlichen Aspekten der zunehmenden Überfischung. Wirtschaftswissenschaftler des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) bewerten gemeinsam mit Ozeanographen oder Geologen den Kohlendioxidkreislauf im Ozean. Und Chemiker, Geowissenschaftler und Klimaforscher entwickeln mit Informatikern und Mathematikern Modelle, die zu einem besseren Verständnis des globalen Ozean- und Klimawandels beitragen. Und nicht nur diese Projekte sind gelebte interdisziplinäre Vernetzungen. Auch über die erste Phase der Exzellenzinitiative hinaus wird der Verbund mit seinem nachhaltigen und zukunftsorientierten Forschungsansatz ein Kernstück der Kieler Universitäts- und Forschungslandschaft nach innen und außen bilden. Dafür sorgt auch eine aktive Öffentlichkeitsarbeit, die gemeinsam mit der Kieler Muthesius Kunsthochschule den „Ozean der Zukunft“ weit über die Landesgrenzen hinaus bekannt gemacht hat. Der „Ozean der Zukunft“ wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) mit rund 35 Millionen Euro bis Oktober 2011 gefördert.

Editing

Emanuel Söding, Friederike Balzereit, Kirsten Schäfer

Layout

Sonja Dierk

Published

09.08.2010

Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Christian-Albrechts-Platz 4
24118 Kiel, Germany
Tel. ++49 - (0) 431 - 880 16 04
Fax. ++49 - (0) 431 - 880 25 39
info@ozean-der-zukunft.de

www.ozean-der-zukunft.de
www.uni-kiel.de
www.ifm-geomar.de
www.ifw-kiel.de