

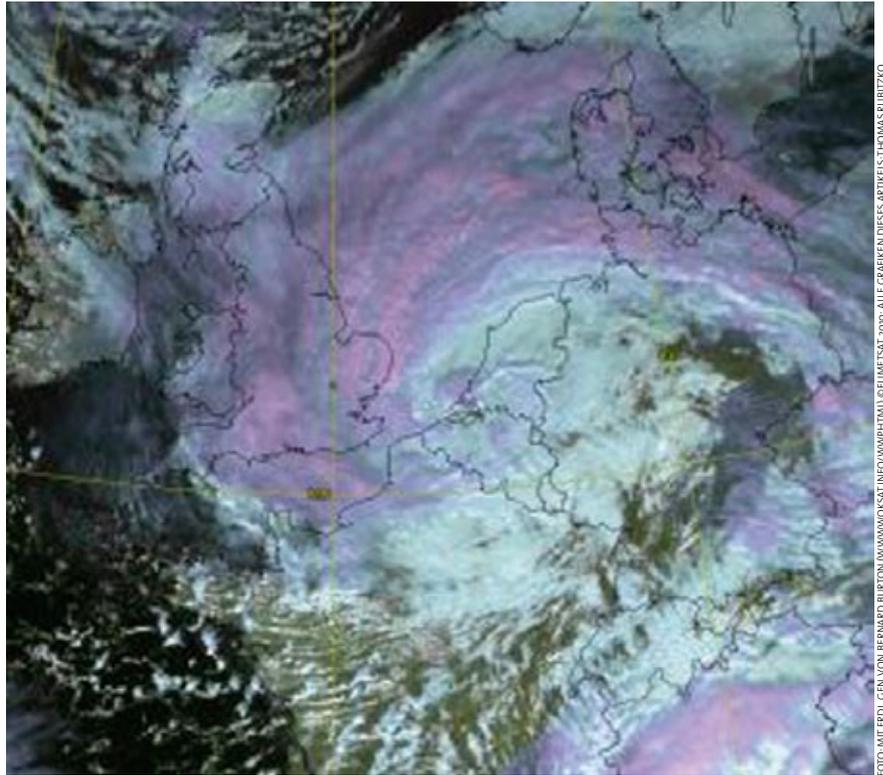
Wie Tief Xynthia Luft holte

Warum strömt die Luft in einer linksdrehenden Spirale in ein Tiefdruckgebiet hinein?
Weil sie durch die Corioliskraft nach rechts abgelenkt wird.

VON THOMAS RUBITZKO

»Das Orkantief Xynthia liegt mit seinem Kern über dem Ärmelkanal und verlagert sich rasch nordostwärts. Infolgedessen ist in fast ganz Deutschland mit Orkanböen von Südost auf Südwest bis West drehend zu rechnen«, verkündet der Nachrichtensprecher. Das dazugehörige Fernsbild (rechts) oder – noch eindrucksvoller – der Zeitrafferfilm aus Satellitenaufnahmen zeigt uns, dass die Luft in einer linksdrehenden Spirale auf einen Punkt zustürzt, als säße dort der Abfluss einer Badewanne. Jedes Luftteilchen vollführt eine lange, immer enger werdende Linkskurve, wie man an den mitgerissenen Wolkenfetzen erkennt. Würde das »Loch«, das in Wirklichkeit ein Punkt minimalen Luftdrucks ist, nicht seinerseits wandern, hätten wir an jedem Ort einigermaßen konstante Windverhältnisse, solange das Tiefdruckgebiet besteht.

Aber wie kommt überhaupt eine Spirale zu Stande? Warum sieht es so aus, als würde die Luft in ihr beständig und zunehmend stärker nach links abgelenkt? Paradoxe Antwort: Weil sie nach rechts abgelenkt wird, und zwar durch die Erdrotation. Für einen auf der Erde stehenden Beobachter erscheint die Neigung jedes Luftteilchens, seiner



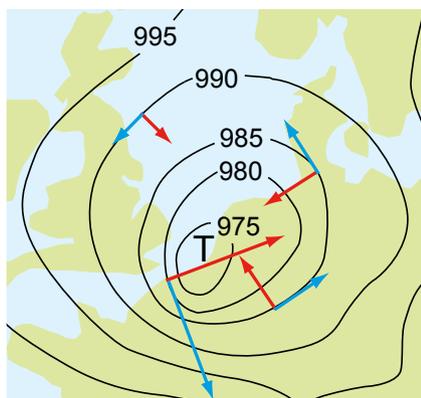
Das Orkantief Xynthia am 28. Februar 2010 um 12 Uhr mit seinem Kern über der Küste der Niederlande im Satellitenbild.

Trägheit zu folgen, wie die Wirkung einer Kraft, die es senkrecht zu seiner Flugrichtung ablenkt, und zwar – auf der Nordhalbkugel – nach rechts. Nach dem französischen Physiker Gaspard Gustave de Coriolis (1792–1843) nennt man sie die Corioliskraft.

Die Karte zeigt zur oben abgebildeten Wetterlage den Luftdruck am Boden mit Isobaren in Millibar. Die Gradientkraft (rot) ist stets senkrecht zur Isobaren und zum niedrigeren Druck hin gerichtet. Ihr würde die Windströmung folgen; aber die Corioliskraft lenkt sie nach rechts ab, bis sie parallel zur Isobaren verläuft (blau).

Aber der Reihe nach. Ursache aller Luftbewegungen sind Unterschiede im Luftdruck. Meteorologen tragen den von Ort zu Ort variierenden Luftdruck (in einer bestimmten Höhe über dem Erdboden) in eine Karte ein und verbinden Punkte gleichen Drucks durch Linien, die Isobaren (Bild links). Diese geben ein ähnliches Bild ab wie die Höhenlinien auf topografischen Karten und sind auch vergleichbar zu interpretieren.

Je näher die Höhenlinien auf einer gewöhnlichen Landkarte beieinander liegen, desto steiler geht es an dieser Stelle bergauf oder bergab. Ein armer Wanderer, der den Halt verliert, wird rechtwinklig zu der Höhenlinie, auf der



er sich befindet, abwärts beschleunigt, und zwar umso stärker, je dichter dort die Höhenlinien liegen. Entsprechend erfährt jedes Luftteilchen eine Kraft, die senkrecht zu seiner Isobare in Richtung auf den niedrigeren Luftdruck gerichtet und umso stärker ist, je dichter dort die Isobaren liegen, je steiler also das Druckgefälle ist (rote Pfeile im Bild S. 60 links unten). Kräfte dieser Art heißen Gradientkräfte.

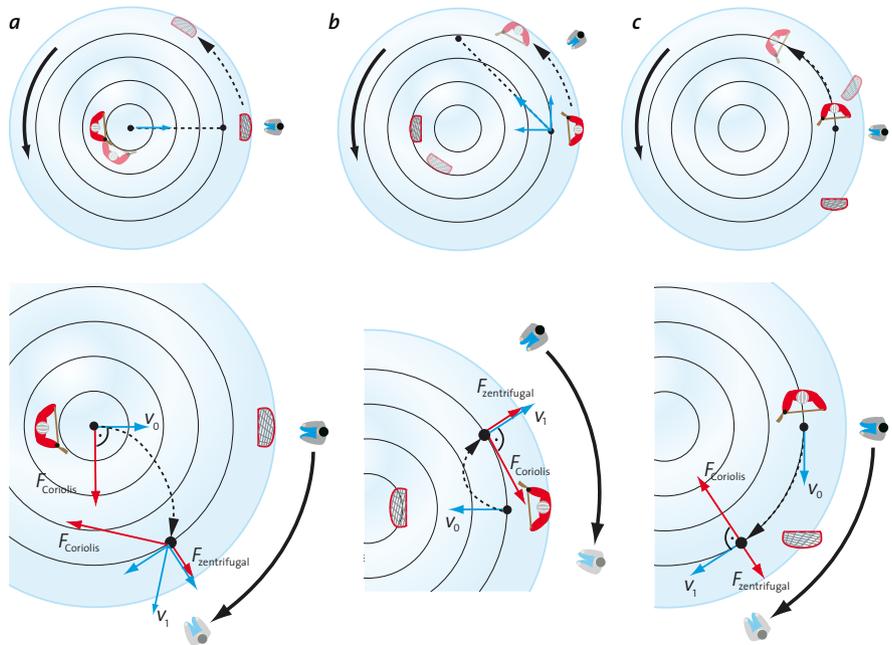
Höhe im Gelände und Druck in der Luft haben noch eine weitere Gemeinsamkeit: Sie sind proportional zu einer potenziellen Energie. In beiden Fällen beschleunigen Gradientkräfte Bewegliches so, dass es sich seiner potenziellen Energie so rasch wie überhaupt möglich entledigt.

Wäre die Druckverteilung zeitlich konstant und die zugehörige Gradientkraft die einzige Kraft, dann würden sich alle Luftteilchen beschleunigt geradewegs zum Kern eines Tiefdruckgebietes bewegen. Dies gilt tatsächlich auch für sehr kleinräumige Druckgebiete, nicht aber, wenn Prozesse großräumig und damit in längeren Zeitintervallen ablaufen.

Spielball der Kräfte

Die Erde dreht sich von Norden aus betrachtet entgegen dem Uhrzeigersinn um ihre Achse. Die Lufthülle ist in Ruhe gegenüber der Erdoberfläche, vollführt jedoch, von außen gesehen, wie die Erde als Ganzes eine Rotationsbewegung, was insbesondere eine zum Zentrum hin beschleunigte Bewegung ist. Diese Beschleunigung wird durch eine Kraft verursacht, und zwar die Gravitationskraft, genauer: deren Komponente senkrecht zur Erdachse. Würde die Gravitation urplötzlich abgeschaltet, so würde die Luft, ihrem gegenwärtigen Impuls folgend, einfach tangential ins All davonschweben.

Bewegte Luft hat zunächst ebenfalls keine natürliche Neigung, der Erdrotation zu folgen. Vielmehr weht sie so, wie ihre Trägheit und – zum Beispiel – Druckkräfte es ihr befehlen, derweil die Erde sich unter ihr wegdreht. Für den erdfesten Beobachter sieht das aber möglicherweise ganz anders aus.



Schuss aufs Tor auf dem rotierenden Eishockeyplatz, aus der Perspektive des außen stehenden (obere Bilder) und des mitrotierenden Beobachters (untere Bilder). Der Spieler zielt vom Zentrum auf das Tor an der Peripherie der Scheibe (a); von der Peripherie aufs Tor im Zentrum (b); in tangentialer Gegenrichtung zur Bewegung der Scheibe (c). Kräfte und Geschwindigkeiten in den unteren Bildern sind im rotierenden Bezugssystem angegeben. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 hat in allen Fällen denselben Wert.

Um das besser zu verstehen, ersetzen wir die Erde in Gedanken durch ein kreisförmiges, im Gegenuhrzeigersinn rotierendes Eishockeyspielfeld (Bild oben). Wenn der Mittelpunkt der Scheibe der Nordpol ist, rotiert sie wie die echte Erde um die Erdachse. Damit die Effekte deutlicher werden, soll die Scheibe allerdings weit schneller rotieren als die Erde. Die Zuschauer dagegen sitzen außerhalb der Scheibe und rotieren überhaupt nicht.

Auf der Scheibe soll nun Eishockey mit einem reibungsfreien Puck gespielt werden. Das Tor steht am Rand und der Spieler im Zentrum der Scheibe (Bild oben, a). Der Spieler gibt dem Puck einen Kraftstoß Richtung Tor, und der gleitet in gerader Linie in der richtigen Richtung. Was soll er auch sonst tun? Auf ihn wirken nach dem Abschlag keine Kräfte mehr – jedenfalls nicht in der Scheibenebene. Nur hat sich während der Laufzeit das Tor ein ganzes Stück weitergedreht, so dass der Puck sein Ziel weit verfehlt.

Der Spieler erlebt dies anders. Er wundert sich zwar über die um ihn he-

rumrotierenden Zuschauer, wähnt sich aber in Ruhe auf der Scheibe. Nach dem Schlag beobachtet er eine merkwürdige Rechtsablenkung des Pucks, der dadurch auf einer gekrümmten Bahn läuft und weit vom Tor entfernt die Scheibe verlässt. Um die newtonschen Gesetze weiterverwenden zu können, interpretiert der Spieler die Rechtsablenkung als Folge einer Kraft, die senkrecht zur Bewegungsrichtung nach rechts wirkt. Diese Scheinkraft ist die Corioliskraft (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 46).

Physiker fassen ein rotierendes Bezugssystem, wenn überhaupt, dann nur mit spitzen Fingern an. Denn wer sich auf so etwas einlässt, also zum Beispiel den Standpunkt des Eishockeyspielers einnimmt, muss mit Scheinkräften leben. Während der externe Zuschauer die Bewegung des Pucks als geradlinig und gleichförmig beobachtet und nicht weiter darüber nachzudenken braucht – sie steht ja im Einklang mit den newtonschen Gesetzen –, muss der Spieler auf der rotierenden Scheibe die merkwürdigsten Kräfte

te postulieren, nur um die Illusion aufrechtzuerhalten, die newtonschen Gesetze gälten in seiner scheinbaren Ruhe. Das beschränkt sich nicht auf die Corioliskraft; es kommt auch noch die Fliehkraft (»Zentrifugalkraft«) hinzu. Wenn der Spieler den Puck einfach auf den Eisboden legt, ohne ihm Bewegung mitzugeben, gleitet das Ding nach außen weg – so beobachtet es der Spieler. Der Zuschauer von außen dagegen sieht den Puck nur seiner Trägheit folgend geradlinig tangential wegfliegen.

Wenn der Physiker allerdings auf der rotierenden Erde sitzt, bleibt ihm kaum etwas anderes übrig, als sich für ruhend zu halten. Deswegen ist es für ihn sogar überaus sinnvoll, Scheinkräfte zu postulieren. Mit ihrer Hilfe kann er nämlich alle beobachtbaren Bewegungen voraussagen. Er stellt fest, dass die Corioliskraft umso größer ist, je schneller sich der Zu-

schauer um ihn dreht (der Zuschauer würde sagen, je schneller sich die Scheibe dreht). Außerdem kann er feststellen, dass die Kraft der Geschwindigkeit des bewegten Objekts – in seinem Bezugssystem – proportional ist.

Wenn der Spieler nicht von innen nach außen, sondern vom Rand der Scheibe auf ein Tor in der Mitte zielt, trifft er wieder gewaltig daneben (Bild S. 61, b). Außer dem auf das Tor gerichteten Impuls hat der Puck noch einen tangential gerichteten, den er von der Scheibe geerbt hat; er war ja vor dem Abschlag bezüglich der Scheibe in Ruhe. Die Vektoren addieren sich, und der Puck fliegt auf einer geraden Bahn kräftefrei über die Scheibe – aber nicht durch deren Zentrum. Die Scheibe dreht sich unter ihm hindurch.

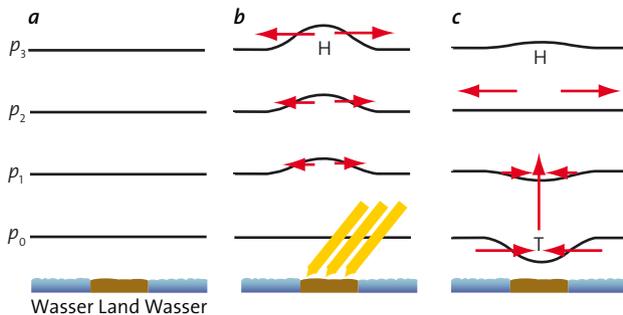
Der Spieler erlebt den Puck wieder nach rechts abgelenkt auf einer krum-

men Bahn laufend. Auch hier bleibt ihm nichts anderes übrig, als diesen Bewegungsablauf der rechtsablenkenden Corioliskraft zuzuschreiben. Diesmal macht sich – in seinem Bezugssystem – die Fliehkraft sogar noch auffälliger bemerkbar, während sie beim Stoß vom Zentrum nach außen dem Puck nur einen zusätzlichen Schubs gibt.

Nun schießt der Spieler in tangentialer Richtung entgegen der Drehbewegung. Der Beobachter von außen sieht wieder eine geradlinige, der mitrotierende eine gebogene Bahn. Wenn es dem Schützen gelingt, dem Puck dieselbe Geschwindigkeit zu geben wie die Bahngeschwindigkeit der Scheibe, nur mit umgekehrtem Vorzeichen, dann bleibt von außen gesehen das Geschoss in Ruhe; für den Spieler dagegen vollführt es eine Kreisbahn um den Scheibenmittelpunkt – und schlägt ihm von

Tiefdruckgebiete

Abhängig von ihrer Entstehung unterscheidet man zwei Typen von Tiefdruckgebieten:



Thermisch bedingte Tiefdruckgebiete: Druckunterschiede am Boden können eine Folge unterschiedlicher Temperaturen sein. Wird von mehreren benachbarten Flächen (a) die mittlere (Land) stärker erwärmt als die beiden anderen (Wasser) und mit ihr die Luft darüber, so dehnt sich diese nach oben aus. Die Isobarenflächen wölben sich dort nach oben (b). Dabei ändert sich der Druck am Boden zunächst nicht, weil nach wie vor die gleiche Menge Luft auf beiden Flächen lastet.

Das heißt: Über der warmen Fläche nimmt der Luftdruck mit der Höhe nicht so rasch ab wie über der kühlen. Folglich ist in einer bestimmten Höhe der Druck dort größer als nebenan. Dadurch strömt Luft auf diesem Niveau von der erwärmten zu den kalten Seiten, bis das Druckgefälle ausgeglichen ist.

Als Konsequenz lastet nun am Boden über der warmen Fläche eine geringere Luftmasse als über den kühlen (c). Dort nimmt der Druck am Boden ab: Ein Tiefdruckgebiet entsteht.

Dynamische Tiefdruckgebiete sind nicht an einen warmen Kern gebunden, sondern Folge von Unregelmäßigkeiten in der Höhenströmung. Diese Starkwindbänder (»Jetstreams«) umspannen den Globus in mittleren Breiten in einer Höhe von etwa 10 000 Meter.

Angetrieben werden die Jetstreams durch den thermisch verursachten Druckgradienten. Die heiße Umgebung des Äquators und die kalte eines Pols spielen dieselbe Rolle wie zuvor Land und Wasser. In der Höhe herrscht am Äquator ein hoher, am Pol ein niedriger Druck. Zum Ausgleich müsste auf der Nordhalbkugel ein Südwind wehen; aber den lenkt die Corioliskraft nach rechts zu einem isobarenparallelen Westwind ab.

Da die Corioliskraft so den Druckausgleich verhindert, baut sich ein großes Druckgefälle auf, und die Strömungsgeschwindigkeit nimmt zu. Dadurch wird die Höhenströmung instabil und bildet Mäander aus. Dazu trägt auch die unregelmäßige Verteilung von Land und Wasser bei. Durch Trägheitseffekte (Luft strömt mit hoher Geschwindigkeit in ein Gebiet mit geringen Druckunterschieden) überwiegt an gewissen Stellen die Corioliskraft die Gradientkraft so stark, dass die Luft »bergauf« (vom niedrigen zum hohen Druck) strömt. So entsteht ein Tiefdruckgebiet mit niedrigem Druck am Boden wie in der Höhe.

Die so nördlich der Höhenströmung entstandenen Tiefdruckgebiete haben einen kalten Kern und driften verhältnismäßig langsam mit etwa 1000 Kilometern pro Tag nach Osten. Xynthia stellte solch ein dynamisches Tief dar, war aber außerordentlich weit im Süden entstanden und nahm eine ungewöhnliche Zugbahn.

hinten gegen die Füße (Bild S. 61, c)! Genaues Nachrechnen ergibt, dass in diesem Fall die Corioliskraft der Fliehkraft genau entgegengesetzt, aber doppelt so stark ist. Die Differenz wirkt wie eine Zentripetalkraft, die den Puck auf seiner Kreisbahn hält.

Zurück zur Realität! Aus dem Eishockeypuck werden wieder Luftteilchen und aus der rotierenden Scheibe die echte Erdkugel. Allerdings wirkt die Corioliskraft immer nur in einer Ebene, die auf der Erdachse senkrecht steht. Ihre rechtsablenkende Wirkung parallel zur Erdoberfläche ist deshalb bei Bewegungen am Pol am größten und nimmt bis zum Äquator auf null ab. Auf der Südhalbkugel verkehrt sich ihre Wirkung in eine Linksablenkung, denn von Süden aus gesehen dreht sich die Erde im Uhrzeigersinn, und alle Bewegungen, auf der Hockeyscheibe wie auf der Erdoberfläche, laufen spiegelbildlich ab.

Der Betrag der Corioliskraft ist allerdings so klein, dass sie erst bei länger anhaltenden, großräumigen Bewegungen zum Tragen kommt.

Schön entlang der Isobaren

Was passiert nun, wenn ein Druckfeld (eine räumliche Druckverteilung) auf der rotierenden Erde auf ein Luftteilchen wirkt? Nehmen wir zunächst an, dass die Isobaren geradlinig und parallel verlaufen. Das Teilchen ist anfangs in Ruhe und wird senkrecht zu den Isobaren beschleunigt. Wieder vernachlässigen wir die Reibung, was in der oberen freien Atmosphäre der Realität recht nahekommt. Die Bewegungsenergie des Teilchens ist gleich der potenziellen Energie, die es aus dem Druckfeld aufgenommen hat, also proportional der Anzahl an Isobaren, die es auf seinem Weg geschnitten hat. Nach der Formel $E_{\text{kin}} = mv^2/2$ wächst die Geschwindigkeit mit der Wurzel aus dieser Energie.

Vom ersten Moment der Bewegung lenkt die Corioliskraft das Luftteilchen nach rechts ab, und zwar umso stärker, je schneller es ist. Da es nun nicht mehr den steilsten Weg »bergab« nimmt, nimmt seine Geschwindigkeit nicht so stark zu, wie wenn es die Corioliskraft nicht gäbe; aber sie nimmt zu, bis die

Corioliskraft der Gradientkraft entgegengesetzt gleich ist. Genau dann fliegt das Luftteilchen entlang einer Isobaren, den niedrigeren Druck zur Linken und den höheren zur Rechten. Da es auf seinem Weg keine Isobaren mehr kreuzt, wächst der Betrag seiner Geschwindigkeit nicht mehr. Weicht das Teilchen von dem Weg genau auf der Isobaren nach links ab, wird es schneller, daraufhin nimmt die Corioliskraft zu und treibt es auf den »richtigen« Weg zurück. Driftet es dagegen nach rechts ab, muss es im Druckfeld »ansteigen« und wird dadurch langsamer, worauf die Corioliskraft nachlässt, bis beide Kräfte wieder im Gleichgewicht sind.

Dieser Rückkopplungsmechanismus hält das Luftteilchen auch dann noch »in der Spur«, das heißt auf einer Isobaren, wenn diese selbst sich in Fahrtrichtung nach links krümmt, wie dies nahe dem Kern eines Tiefdruckgebiets der Fall ist (Bild S. 60 unten). Um das Luftteilchen in die Linkskurve zu zwingen, muss allerdings die Gradientkraft etwas größer sein als die Corioliskraft.

Bei der Reise um ein Hochdruckgebiet liegt der Hochdruckkern stets rechts der Fahrtrichtung, und die Luft folgt in einer Rechtskurve den Isobaren. Dazu muss die Corioliskraft die Gradientkraft ein bisschen überwiegen. Das kann sie nur durch eine höhere Bahngeschwindigkeit erreichen.

Daraus folgt: Bei gleichem Druckgefälle strömt die Luft schneller aus einem Hochdruckgebiet heraus, als sie in ein Tiefdruckgebiet hineinfließt. Das hat den paradoxen Effekt, dass ein Hochdruckgebiet bereits zerfließt, während es entsteht; dagegen kann ein Tiefdruckgebiet ein stärkeres Druckgefälle aufbauen und damit am Ende doch höhere und sehr unangenehme Strömungsgeschwindigkeiten verursachen.

In den oberen reibungsfreien Luftschichten kann also im Prinzip die Luft im Gegenuhrzeigersinn um das Tief herumwehen, ohne einen Druckausgleich zu erreichen. Am Boden wirken dagegen zusätzlich noch Reibungskräfte, die aus der Wechselwirkung mit der Erdoberfläche resultieren und die Luft-

strömung bremsen. Dadurch lässt die Corioliskraft nach, und die Gradientkraft gewinnt dann die Oberhand. Also schneidet das Luftteilchen nun auf seinem Weg verschiedene Isobaren, aber die so gewonnene Energie wird alsbald von der Reibung wieder aufgezehrt, und die Geschwindigkeit bleibt annähernd konstant.

Insgesamt fließt die Luft also in Bodennähe nicht um das Tief herum, sondern in einer Spiralbewegung im Gegenuhrzeigersinn in den Kern des Tiefs hinein. Steigt man an einem Ort am Rand des Tiefs nach oben, so dreht sich deshalb der Wind in höheren Lagen wegen der dort geringeren Reibung nach rechts.

Die oben angesprochenen Wechselwirkungen mit der Erdoberfläche sind übrigens das, was von einem Tiefdruckgebiet nachhaltig im Gedächtnis bleibt. Durch das Orkantief Xynthia kamen mehrere Menschen ums Leben; die Versicherungswirtschaft verzeichnete allein in Deutschland Schäden von einer halben Milliarde Euro. Schätzungsweise 500 000 Gebäude und 40 000 Autos wurden beschädigt, ganz zu schweigen von den unzähligen umgestürzten Bäumen. Xynthia zählt damit zu den ganz Großen unter den Orkantiefs, übertroffen nur von dem legendären »Lothar« zu Weihnachten 1999. ~

DER AUTOR



Thomas Rubitzko lehrt Physik und Physikdidaktik an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg. Er hat von 1995 bis 2006 das Preisrätsel für »Spektrum der Wissenschaft« bearbeitet.

QUELLEN

Egger, J.: Vom Tornado zum Ozonloch. Oldenbourg, München 1999

Weischet, W., Endlicher, W. (Hg.): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Borntraeger, Stuttgart 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1157702