

# Szenarien der

Der Klimawandel wird auch die Niederschläge in Deutschland verändern. Wo drohen Dürren, wo Hochwasser? Wasserforscher versuchen das mit komplexen Systemmodellen herauszufinden.



VON UTE KEHSE

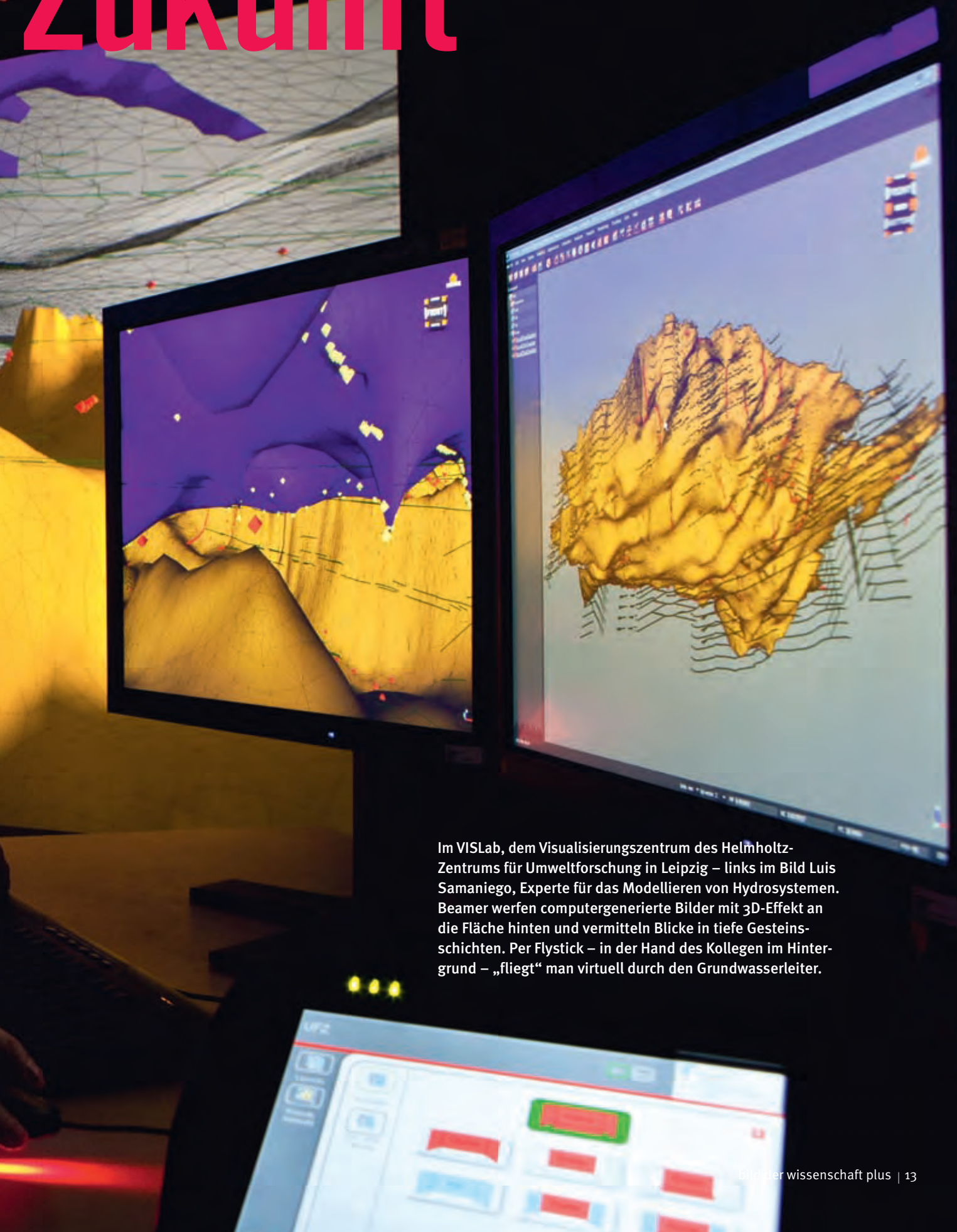
**EIN NACKTER UFERSTREIFEN**, etwa fünf Meter breit, umgibt den Redernswalder See im Nordosten Brandenburgs. Wo heute Grashalme zwischen den Sandkörnern sprießen, war noch vor einigen Jahren alles mit Wasser bedeckt. Auf Satellitenbildern ist das deutlich zu sehen. Der Wasserspiegel ist seit 1980 um drei Meter gesunken, das Wasservolumen hat sich halbiert. Auch viele andere Seen hier im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin schrumpfen seit Jahren. Stege enden auf dem Tro-

ckenen, neue Inseln tauchen aus dem Wasser auf, aus flachen Buchten werden Hochmoore. All das sind Hinweise: Das Grundwasser, das diese Seen speist, ist deutlich zurückgegangen.

Eine Folge des Klimawandels, könnte man meinen. Denn Messdaten zeigen, dass die Temperaturen in Brandenburg in den letzten Jahrzehnten gestiegen sind. Zudem gehen die Niederschläge im Sommer leicht zurück. Beide Faktoren mindern die Grundwasser-Neubildung. Doch so einfach ist die Sache

nicht: Eine Studie von Forschern um Gunnar Lischeid vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) im brandenburgischen Müncheberg hat 2010 überraschend gezeigt, dass auch der Wald den Boden aussaugt. „In Nordost-Brandenburg gibt es viele Kiefern-Monokulturen, die nach Ende des Zweiten Weltkrieges angepflanzt wurden“, berichtet der Leiter des Instituts für Landschaftswasserhaushalt. Nadelwälder sind durstig – Kiefern verbrauchen umso mehr Wasser, je älter

# Zukunft



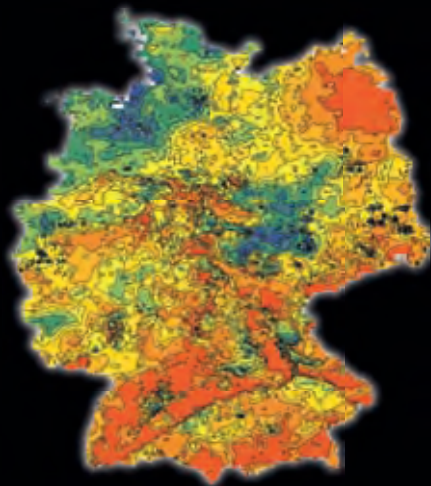
Im VISLab, dem Visualisierungszentrum des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig – links im Bild Luis Samaniego, Experte für das Modellieren von Hydrosystemen. Beamer werfen computergenerierte Bilder mit 3D-Effekt an die Fläche hinten und vermitteln Blicke in tiefe Gesteinsschichten. Per Flystick – in der Hand des Kollegen im Hintergrund – „fliegt“ man virtuell durch den Grundwasserleiter.



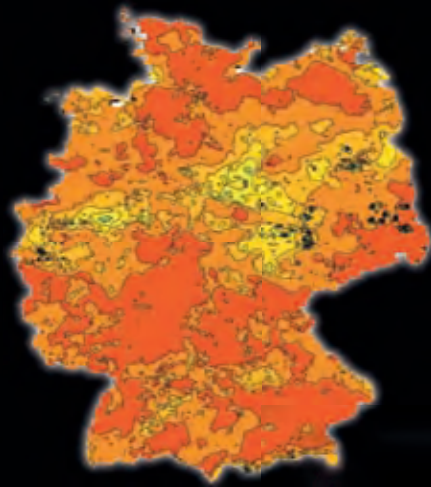
# Szenarien der Zukunft



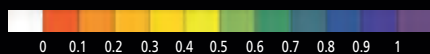
Februar 2003



Juni 2003



Dezember 2003



sie werden. Zudem trinken sie mehr als Laubbäume, weil ihre Nadeln das ganze Jahr über Wasser an die Atmosphäre abgeben.

Dem unerwarteten Effekt kamen Lischeid und seine Kollegen mit Hilfe von Modellrechnungen auf die Spur. In der Hydrologie ist es bislang meist üblich, jeden Prozess im Wasserhaushalt in einem eigenen Modell abzubilden. Doch die Forscher um Lischeid verknüpften für ihre Untersuchung zwei Modelle: Ein so genanntes Wasserhaushaltsmodell, das die Grundwasser-Neubildung berechnet und dabei auch das Verhalten der Vegetation einbezieht, und ein Grundwassermodell, mit dessen Hilfe sich anschließend die Seewasserstände ermitteln lassen. Die Ergebnisse dieses gekoppelten Modellansatzes belegten, dass Vegetation und Klima jeweils ungefähr zur Hälfte für die sinkenden Seespiegel verantwortlich sind.

### DOPPELTES PLUS FÜR LAUBWÄLDER

Die Wissenschaftler untersuchten anschließend, ob sich der Trend aufhalten lässt, wenn die Kiefern durch Laubbäume wie Eichen oder Buchen ersetzt werden. Dabei kamen sie einem weiteren unerwarteten Effekt auf die Spur. „Der Waldumbau ist noch effektiver, als wir zunächst dachten“, erklärt Lischeid. Denn die Berechnungen zeigten, dass in Laubwäldern weniger Gras am Boden wächst als in lichten Kiefernwäldern. Das senkt den Wasserverbrauch zusätzlich. Ersetzt man die Nadelwälder durch Laubwälder, schließen die Forscher, könnten die Auswirkungen des Klimawandels zumindest teilweise kompensiert werden.

Lischeid und seine Gruppe folgen einem neuen Trend in der Wasserforschung: Zunehmend entwickeln die Hydrologen ganzheitliche Modelle, die

**Modelliert: Die Bodenfeuchte in Deutschland 2003. Fällt der Bodenfeuchte-Index (SMI, Messbalken unten) auf 0,2 oder darunter, herrscht extreme Trockenheit. Das Ziel der Forscher: zuverlässige Dürreprognosen.**

mehrere Teilbereiche des Wasserkreislaufs einbeziehen. Wer beispielsweise die Ausbreitung von Schadstoffen untersuchen will, muss nicht nur wissen, wie schnell die Substanzen im Boden versickern. Er muss auch berücksichtigen, wann es regnet und wie stark, welche Kulturen auf einem Feld wachsen, wie stark der Boden verdichtet ist und wie viel Wasser oberflächlich abfließt. Solche Prozessmodelle sind notwendig, weil Wasserforscher ähnlich wie die Klimatologen Vorhersagen für die nächsten Jahrzehnte treffen wollen.

„Modelle sind die einzige Möglichkeit, um in die Zukunft zu schauen“, sagt Olaf Kolditz, Leiter des Departments Umweltinformatik am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) und Professor für Angewandte Umweltsystemanalyse an der TU Dresden. Komplexe Modelle machen Schluss mit bisher verwendeten Vereinfachungen. Viele Prozesse auf der Landoberfläche und in der Bodenzone fließen bislang nur rudimentär in Klimamodellen mit ein. Grundwassermodelle wiederum scheren sich nicht wirklich um die Atmosphäre. „In Wirklichkeit gibt es natürlich eine Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Kompartimenten des Wasserkreislaufs“, sagt Kolditz. „Mit gekoppelten Hydrosystem-Modellen können wir die Systeme besser verstehen, weil wir ihre Komplexität auflösen können.“

Modelle sind einfache Computerprogramme, die mit Hilfe mathematischer Gleichungen an vielen Punkten im Raum und in kleinen Zeitschritten ausrechnen, wie sich bestimmte Größen verändern. Um den Wasserhaushalt auf diese Weise berechenbar zu machen, müssen die Forscher zunächst festlegen, an welchen Punkten ihres Modellgebiets sie physikalische Größen wie zum Beispiel Bodenfeuchte, Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten in Oberflächengewässern oder Grundwasser, Schadstoffkonzentrationen oder Temperaturen bestimmen wollen. Dafür legen sie ein sogenanntes Gitter fest, ein Muster aus vielen Punkten auf einer zweidimensionalen Fläche oder in einem dreidimensionalen Raum, an denen die Werte ermittelt werden.

Bei der Berechnung gibt es zwei unterschiedliche Herangehensweisen. Die Forscher benutzen entweder physikalische Formeln, oder sie greifen auf Erfahrungswerte zurück. „Den einen Ansatz nennt man prozessbasiert, den anderen konzeptionell“, erläutert Olaf Kolditz. Beide Methoden haben Vor- und Nachteile: Konzeptionelle Modelle können viele Verhaltensweisen eines komplexen Systems gut abbilden und sind einfacher zu handhaben. Allerdings ist die Genauigkeit ihrer Vorhersagekraft begrenzt, da sie auf Beobachtungen beruhen und daher in der Regel nur Muster wiedergeben können, die auf Erfahrungen in der Vergangenheit beruhen.

Häufig werden hydrologische Prozesse durch eine einzige Zahl, einen sogenannten Parameter, erfasst. „Die Herausforderung besteht darin, für jeden Prozess den besten Parameter zu finden“, sagt Luis Samaniego vom UFZ. Prozessbasierte Modelle sind dagegen genauer, aber auch aufwendiger, weil sie wesentlich mehr gemessene Daten

als Input benötigen, die oft gar nicht zur Verfügung stehen. In der Hydrologie wird der Oberflächen-Abfluss meist konzeptionell modelliert, während Boden und Grundwasser durch prozessbasierte Modelle abgebildet werden. Luis Samaniego und sein Kollege Rohini Kumar haben in den letzten zwei Jahren ein hydrologisches Modell für ganz Deutschland entwickelt, mit dem sie in Zukunft Dürren oder auch drohende Überschwemmungen vorhersagen wollen.

#### ENTSCHEIDEND: DIE BODENFEUCHTE

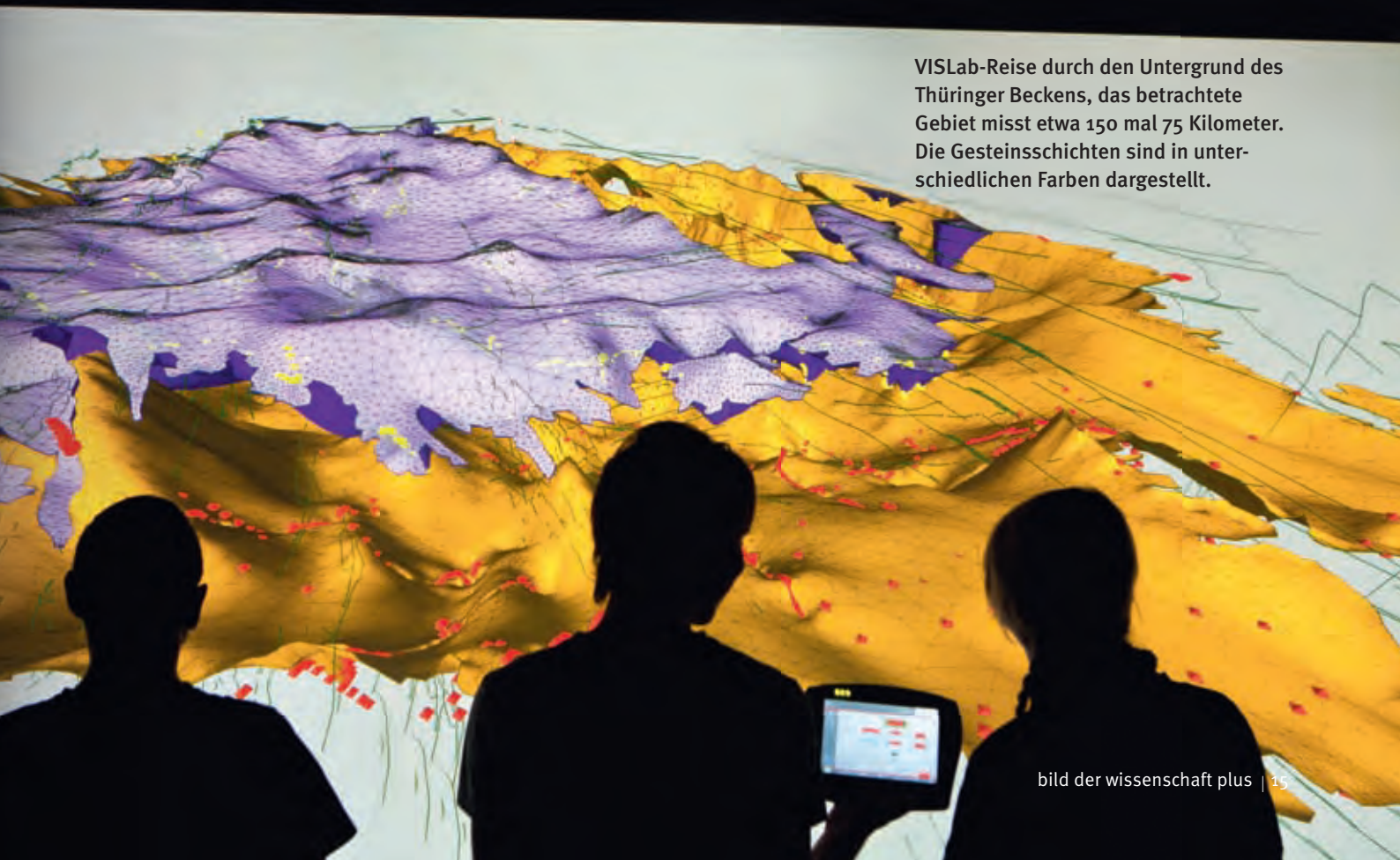
Im Zentrum dieses Modells steht die Bodenfeuchte. Das ist für Landwirte eine entscheidende Größe. Steht den Pflanzen im Wurzelbereich nicht genug Wasser zur Verfügung, können sie nicht wachsen. Bislang gab es allerdings kein Modell, das voraussagen konnte, wo im Bundesgebiet in den nächsten Monaten Trockenheit droht. Zum einen gibt es keine flächendeckenden Messungen. Zum anderen hängt die Bodenfeuchte von zahlreichen Faktoren ab. Neben dem Wetter spielen die Bodenbeschaffenheit,

die Topographie und die Vegetation eine Rolle dabei, ob Niederschläge in den Boden einsickern und wie groß die Verdunstung ist. „Wenn es im Sommer stark regnet und der Boden einen hohen Tonanteil hat, fließt das Wasser größtenteils oberflächlich ab und verstärkt auch noch die Erosion. Regnet es dagegen sanfter, kann das Wasser in den Untergrund eindringen“, erläutert Samaniego.

Das Modell von Samaniego und Kumar verbindet die Prozesse in der Atmosphäre, der Biosphäre und der sogenannten Pedosphäre – der wenige Meter dicken, obersten Haut der Erde, die vor allem die Bodenkrume umfasst. Auch die Wachstumsphase der Pflanzen fließt in die Berechnungen ein. Als Ergebnis liefert das Modell einen sogenannten Bodenfeuchte-Index, der anzeigt, ob an einem Ort gerade Dürre herrscht oder ob nicht.

Um das Modell zu testen, ließen die Forscher es für den Zeitraum von 1950 bis 2010 laufen. Sie stellten fest, dass die errechneten Trockenperioden recht

VISLab-Reise durch den Untergrund des Thüringer Beckens, das betrachtete Gebiet misst etwa 150 mal 75 Kilometer. Die Gesteinsschichten sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.







**So trocken wie beim Knochensee sind heute viele Uferzonen der Seen in Brandenburg. Das Klima ist aber nur zur Hälfte schuld – siehe Bild rechts unten.**

gut mit den tatsächlichen Dürren übereinstimmten. Die intensivste Trockenheit herrschte im Sommer 2003 und im Winter 1952/53. Am längsten dauerte eine Trockenperiode Anfang der 1970er-Jahre: Sie reichte von August 1971 bis Juli 1974 und betraf praktisch ganz Deutschland. Demnächst wollen Kumar und Samaniego ihr Modell mit aktuellen Klimadaten füttern und anschließend Dürreprognosen für die nächsten Monate wagen.

Das Bodenfeuchte-Modell soll demnächst mit dem Programm OpenGeoSys der Gruppe von Olaf Kolditz gekoppelt werden, das thermische, hydrologische, chemische und mechanische Prozesse in Boden und Grundwasser simuliert. Solche Verknüpfungen verschiedener Modelle bieten große Herausforderungen. Die geringste ist, dass die Modelle womöglich in unterschiedlichen Programmiersprachen geschrieben sind. Komplizierter ist es, Daten zwischen den Modellen verlustfrei auszutauschen. Es gibt Modelle, die den Wasserfluss in einem winzigen Volumen von wenigen Kubikmillimetern berechnen, während andere den Wasserhaushalt ganzer Kontinente simulieren. Auch

unterschiedliche Zeitskalen von Sekunden bis zu Jahrhunderten müssen überbrückt werden.

Zudem wollen die Forscher in Zukunft gerne mehr Satellitendaten in ihre Modelle einbinden – etwa zur Vegetation oder, in Zukunft, zur Bodenfeuchte (siehe Kasten „Wasserwächter im Orbit“ auf Seite 41). „Durch den kosmischen Datensegen werden unsere Modelle derart aufwendig, dass wir sehr viel Rechenkapazität brauchen. Dafür können unsere Modellprognosen in erheblichem Maß an Aussagekraft gewinnen“, hofft Kolditz.

## „PARALLEL“ HEISST DIE PAROLE

Um die Möglichkeiten moderner Supercomputer nutzen zu können, müssen die Wasserforscher zusätzlich umdenken. Die besten heutigen Rechner, zum Beispiel der Supercomputer „Jugene“ im Forschungszentrum Jülich, haben mehrere 100 000 parallel geschaltete Prozessoren. Dementsprechend müssen die Programme der Wasserforschungsmodelle so aufgebaut sein, dass viele Rechenschritte parallel ablaufen können – und nicht nacheinander wie bei einem normalen Rechner.

„Die derzeitigen Programme sind noch nicht in der Lage, effizient auf solchen Rechnern zu laufen“, bedauert Kolditz. Eine aktuelle Initiative der Helmholtz-Gemeinschaft zielt darauf ab, die Entwicklung wissenschaftlicher Software zu verbessern. Am UFZ liegt die Entwicklung der weltweit von mehreren Forschergruppen verwendeten Software OpenGeoSys in den professionellen Händen des Informatikers Lars Bilke.

Oft können die Forscher erst dank neuer komplexer Modelle einige der bislang unverständlichen Entwicklungen erklären – wie das Seenschrumpfen in Brandenburg. Wissenschaftler sprechen hier von „nichtlinearen Zusammenhängen“. Das heißt: Geringfügige Veränderungen können unter Umständen eine ganze Kette von Folgen nach sich ziehen, die einander wiederum beeinflussen. „Man darf eben nicht erwarten, dass alles andere gleich bleibt, wenn man an einem Schraubchen dreht“, sagt Gunnar Lischeid.

Damit die Wasserforscher demnächst genauere Prognosen für die Zukunft liefern können, sind sie besonders auf die Zusammenarbeit mit den Klimaforschern angewiesen. Denn deren Modelle produzieren die Wetterdaten, die als Input für die Wassermodelle nötig sind. Indes: „Klimamodelle sind gut, um Temperaturen vorherzusagen, aber weniger gut, wenn es um die Niederschläge geht“, sagt Lischeid. „Für Flächen von wenigen 100 Quadratkilometern, wie wir Wasserforscher sie brauchen, liefern Klimamodelle bislang wenig brauchbare Prognosen.“

Clemens Simmer von der Universität Bonn arbeitet daran, dieses Manko zu beheben. „Unser Ziel besteht darin, voll gekoppelte Modellsysteme zu erarbeiten. Sie sollen den Wasserkreislauf physikalisch vom Grundwasser bis zur Atmosphäre und zurück abbilden – und zwar zunächst auf der regionalen Skala von einigen 100 Kilometern“, sagt der Meteorologe. Das Modellsystem des Transregionalen Sonderforschungsbereichs TR32 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, den Simmer leitet, koppelt das regionale Wettervorhersage- und Klimamodell COSMO mit dem Landoberflächenmodell CLM und dem hydrologischen Modell ParFlow. Ein zweites, extrem detailliertes Modell berechnet die Wege des Wassers auf Flächen von 10 bis 20 Kilometern, mit Gitterpunkten im Abstand von Metern.

Simmer und seinen Kollegen geht es darum, die Beschreibung komplizierter physikalischer Prozesse durch Erfahrungswerte möglichst weit zurückzudrängen. Das ist notwendig, um viele Beobachtungen überhaupt für Vorhersagen nutzen zu können. „Nur Modelle, die den Wasserfluss realistisch wiedergeben, kann ich zum Beispiel mit beobachteten Bodenfeuchten starten“, erklärt Simmer.

## DER BODEN ALS WETTERMACHER

Vor allem die Wechselwirkung zwischen Land und Atmosphäre will der Bonner Wissenschaftler genauer modellieren, um auch den Niederschlag besser darstellen zu können. Der Boden als äußere Haut der Erdoberfläche hat zwar oft keinen Einfluss auf das aktuelle Wetter,

## WASSERMODELLE IN 3D

Die neue Generation gekoppelter Wassermodelle liefert jede Menge Daten – nicht nur Kurven und einfache Grafiken, sondern dreidimensionale Datensätze, die sich noch dazu zeitlich verändern. Die vielschichtigen Ergebnisse können im Visualisierungszentrum des UFZ in Leipzig (VISLab) anschaulich dargestellt werden (siehe Fotos auf Seite 12/13 und 15). 13 Beamer projizieren dafür die grafisch aufbereiteten Daten von hinten auf eine große gläserne „Leinwand“. Dabei wechseln sich die Bilder für das rechte und das linke Auge in kurzen Abständen ab, tricksen so unsere trägen Augen aus und gaukeln dem Gehirn ein räumliches Bild vor. Ein mit einer Spezialbrille ausgestatteter Betrachter taucht so in eine virtuelle Realität ab: Vor dem Auge erscheinen dreidimensionale Bilder von Gesteinsschichten, Wasserflüssen oder Windparks, deren Perspektive sich ändert, wenn der Betrachter sich bewegt. „Die 3D-Visualisierung macht komplexe Daten und Prozesse sichtbar und besser verständlich. Man kann große und vielschichtige Datenmengen leichter aufnehmen und vor allem mit anderen Wissenschaftlern gemeinsam diskutieren“, erläutert Lars Bilke vom UFZ, der das VISLab leitet.

zum Beispiel, wenn jeden Tag ein neues Tief von Westen über Deutschland hinwegzieht. „Dann spürt die Atmosphäre die Beschaffenheit und Kleinräumigkeit der Erdoberfläche nicht“, sagt Simmer. Ganz anders sieht die Sache bei lokalen Sommergewittern aus – sie speisen sich häufig aus der Bodenfeuchtigkeit vor Ort. „Da kann der Einfluss des Bodens recht groß sein. Sogar die Grundwassertiefe kann dann eine Rolle spielen“, erläutert der Meteorologe.

Um diese Effekte abbilden zu können, brauchen die Forscher zunächst möglichst gute Daten, zum Beispiel zum Niederschlag. Erstaunlicherweise wird der bislang nicht flächendeckend

genau registriert. Konventionelle Radarmessungen können zwar feststellen, wo es regnet, aber kaum, wie viel Niederschlag zu Boden fällt und ob er als Nieselregen, Platzregen, Hagel oder Schnee auftritt. „Bei den Mengen liegen die Fehlerquoten teils bei 100 Prozent“, sagt Simmer. Die Wetterstationen sind wiederum zu spärlich verteilt, um so genau zu messen, wie es die Wasserforscher gerne hätten.

Simmer arbeitet daher zusammen mit der Helmholtz-Initiative TERENO (Terrestrial Environmental Observatories, siehe Seite 25) und dem Deutschen Wetterdienst im Rahmen des Hans-Ertel-Zentrums für Wetterforschung an

neuen Methoden, um Niederschläge genauer zu messen. Zum Beispiel könnten Regenradare mit polarisierten Signalen Informationen über die Größe der Tropfen und die Art des Niederschlags liefern. Die Modelle der Bonner Forscher sind gerade in der Testphase. „Wir erhoffen uns bessere Klimaprognosen, aber auch eine Verbesserung der Wettervorhersage“, sagt der Meteorologe.

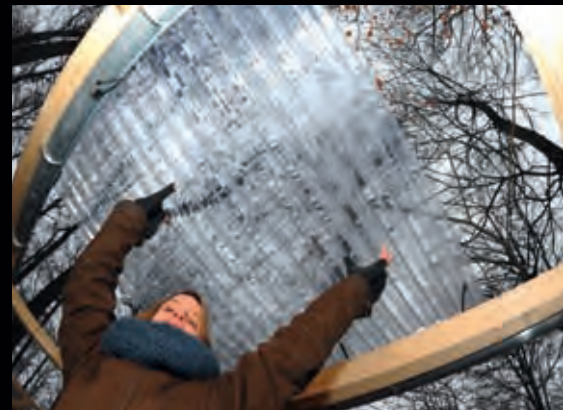
Erste grobe Niederschlagsprognosen für Brandenburg, das trockenste deutsche Bundesland, gibt es bereits. „Was wir in den letzten 20 bis 30 Jahren erlebt haben, wird voraussichtlich so weitergehen“, sagt Gunnar Lischeid. Im Sommer werden die Niederschläge weiter abnehmen, im Winter dagegen zunehmen. Es wird häufiger Starkregen geben, aber auch längere Trockenperioden als gegenwärtig. „Für die Landwirtschaft wird es nicht so dramatisch, weil gleichzeitig der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft steigt, wodurch die Pflanzen besser wachsen“, tröstet er.

Auf genaue Werte zum künftigen Niederschlag will sich Lischeid nicht festnageln lassen. „Ob es nun 50 Millimeter mehr oder weniger werden, ist schwer zu sagen – das wäre Kaffeesatzleserei“, sagt der Forscher. Eine weitere Lehre hat er aus den bisherigen Studien gezogen: „Auf lokaler Skala spielt der Klimawandel zwar eine Rolle, aber andere Effekte können hier wichtiger sein.“

Caro/Teschner; ddp images/dapd/T. Heilmann



Die typischen Kiefernwälder Brandenburgs – und das Gras am Boden – entpuppten sich in einer Modellrechnung als wahre Wasserfresser. Sie tragen erheblich zum Verlanden der Seen bei.



Wie wird der Boden auf den Klimawandel reagieren? Wasserforscher decken im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin ein Test-Areal mit Platten ab.