



# Mathematik im Grenzbereich

Normalerweise arbeiten **Peter Benner** und seine Kollegen vom **Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme** in Magdeburg an komplizierten numerischen Methoden, um die Regelung und Steuerung technischer Systeme und Anlagen zu optimieren. Doch jüngst kam ihre Forschung in einem politischen Konflikt zum Einsatz. Es ging um Drogenanbau, Pestizide und Grenzverletzungen in Südamerika.

TEXT **UTE KEHSE**

**E**s war eine ganz besondere Herausforderung, vor der Peter Benner und sein ehemaliger Doktorand Hermann Mena im Jahr 2008 standen: Sie sollten die Ausbreitung des Pestizids Glyphosat in der Grenzregion von Kolumbien und Ecuador berechnen. Denn Ecuador hatte gerade eine Klage vor dem Internationalen Gerichtshof gegen Kolumbien angestrengt. Der Vorwurf: Kolumbien habe jahrelang Kokapflanzungen in der Nähe der ecuadorianischen Grenze mit Glyphosat besprüht. Dabei sei auch Gift auf ecuadorianischen Boden gelangt.

Die Klage war der Höhepunkt eines Konflikts mit langer Vorgeschichte. Die Sprühaktionen begannen im Jahr 2000 – als Teil von „Plan Colombia“, eines 1999 initiierten und von der US-Regierung finanzierten Programms zur Bekämpfung des Drogenanbaus in ganz Kolumbien. Die Kokapflanzen, die den Rohstoff für Kokain liefern, sollten mit

dem Totalherbizid Glyphosat vernichtet werden. Bis 2005 kreisten die kolumbianischen Flugzeuge mindestens einmal pro Woche über den bewaldeten Bergen im Süden Kolumbiens und verteilten das Unkrautvernichtungsmittel über den Feldern.

## **DROGENBEKÄMPFUNG MIT NEBENWIRKUNGEN**

Doch dabei, so lautet der Vorwurf Ecuadors, verletzen die kolumbianischen Flugzeuge immer wieder die Grenze. Das Pestizid ließ nicht nur die Kokapflanzen in Kolumbien welken, sondern tötete auch Mais, Kochbananen und Yuccapflanzen in Ecuador – so zumindest berichteten es die Bewohner der Grenzregion. Sie meldeten zudem gesundheitliche Störungen wie Hautreizungen, Atemwegserkrankungen, Magen- und Darmprobleme sowie Schwindel und Kopfschmerzen. >

Chemische Keule aus der Luft: Um illegale Kokapflanzungen zu zerstören, versprühen Flugzeuge das Unkrautvernichtungsmittel Glyphosat.





Im Jahr 2005 trafen die beiden Länder eine Abmachung: Auf kolumbianischer Seite sollte ein zehn Kilometer langer Streifen entlang der Grenze frei von Glyphosat-Behandlungen bleiben. Offiziell sind die Spritzflugzeuge seit 2007 nicht mehr im Einsatz. Trotzdem wurden von ecuadorianischer Seite immer wieder Vorwürfe laut, Kolumbien halte sich nicht an die Regelung. Mit der Klage im Jahr 2008 wollte Ecuador die Übergriffe endlich stoppen.

Die Vorwürfe waren allerdings nur schwer zu belegen. Die Grenze verläuft mitten im Dschungel, der Luftraum wird nicht überwacht, und das Gly-

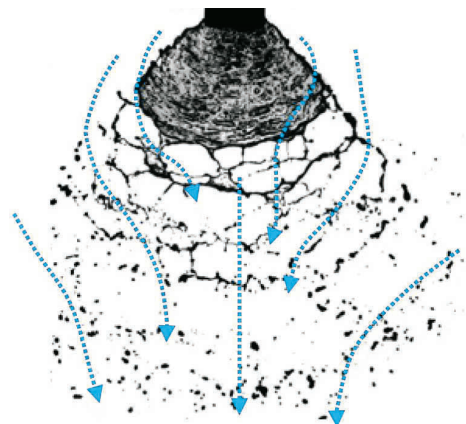
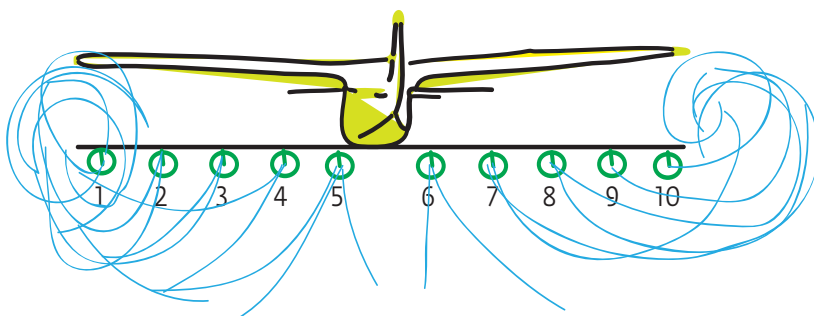
phosat zersetzt sich schnell. Schon nach drei Wochen lässt es sich in der Umwelt nicht mehr nachweisen. Aus diesem Grund war von dem Stoff nichts mehr aufzuspüren, als Mitarbeiter der zuständigen Behörden nach Beschwerden der Bewohner bis in die Grenzregion vorgedrungen waren und Proben nahmen.

### EIN JUNGER MATHEMATIKER AUS ECUADOR

Die Frage lautete also: Wie ließen sich die Grenzverletzungen beweisen? Hier kam Hermann Mena ins Spiel. Der da-

malige Associate Professor an der Escuela Politécnica Nacional in der ecuadorianischen Hauptstadt Quito erhielt den Auftrag für ein Forschungsprojekt der ecuadorianischen Science Foundation SENESCYT.

Mena und Peter Benner hatten sich 2003 kennengelernt, im Zuge eines DAAD-geförderten Programms zum Aufbau der Doktorandenausbildung in der Mathematik in Ecuador zwischen der TU Berlin und der Escuela Politécnica Nacional. In Quito hielt Benner einen Intensivkurs in angewandter Mathematik und konnte Hermann Mena als Doktoranden gewinnen. Im





linke Seite: Im dichten Dschungel sind die Kokapflanzungen am besten aus der Luft auszumachen. Das Bild zeigt eine Plantage in Guaviare, einer dünn besiedelten Region im Südosten Kolumbiens.

diese Seite: Polizisten einer Anti-Drogen-Einheit haben in der Provinz Tolima ein Kokainlabor zerstört.

Jahr 2007 war Mena der erste Mathematiker überhaupt, der in Ecuador promovierte.

**BEWEISSAMMLUNG MITTELS MATHEMATISCHER FORMELN**

Um handfeste wissenschaftliche Beweise gegen Kolumbien zusammenzutragen, rief die ecuadorianische Regierung insgesamt vier Forschungsprojekte ins Leben; zwei davon beschäftigten sich mit langfristigen Auswirkungen von Glyphosat auf Menschen und Amphibien, ein drittes untersuchte, ob das Mittel Langzeiteffekte auf das Wach-

tum von Pflanzen hat. Im vierten Projekt ging es um angewandte Mathematik: Ein Computerprogramm sollte die Ausbreitung des versprühten Unkrautvernichtungsmittels entlang der Grenze numerisch simulieren.

Für Mathematiker ist es eigentlich keine große Sache, die Vermischung von zwei Stoffen zu berechnen. Sie nutzen dafür sogenannte Konvektions-Diffusions-Modelle. Die numerischen Gleichungen solcher Modelle beschreiben, wie Teilchen zum einen durch zufällige Bewegungen, zum anderen durch großräumige Strömungen durcheinanderraten und sich ausbreiten.

„Das ist ein Klassiker. Solche Modelle werden etwa in der Meteorologie oder auch in der chemischen Verfahrenstechnik verwendet, wie an unserem Institut“, sagt Peter Benner, derzeit geschäftsführender Direktor am Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme in Magdeburg. „Im konkreten Fall ging es darum herauszufinden, ob und unter welchen Bedingungen das Glyphosat nach Ecuador gelangen kann.“ Projektleiter wurde Hermann Mena. Er zog seinen Doktorvater als Berater hinzu, da es damals in Ecuador noch keine wissenschaftlichen Einrichtungen gab, um ein derartiges Vorhaben durchzuführen. >

Foto: dpa-picture alliance; Grafik: MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme

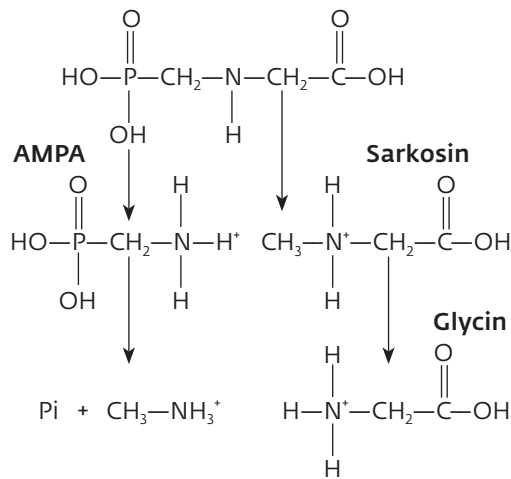


linke Seite, links: Schematische Darstellung der Wirbelschlepp hinter einem Sprühflugzeug. Die Luftwirbel entstehen infolge des Auftriebs, der an den Tragflächen erzeugt wird. Sie beeinflussen die Ausbreitung des Glyphosats.

linke Seite, rechts: Strömungsverhältnisse nahe der Sprühdüse: Im Bereich dicht hinter der Düse zerplatzen die einzelnen Tropfen und werden anschließend als feiner Nebel verteilt.

diese Seite: Momentaufnahmen eines Glyphosattröpfchens bei hoher Geschwindigkeit. Sie zeigen, wie sich der Tropfen zunächst abflacht, dann ausstülpt und schließlich in viele Tröpfchen zerplatzt.

## Glyphosat



Chemische Formel und Abbauege von Glyphosat. Hauptabbauprodukt ist Aminomethylphosphonsäure (AMPA), daneben entstehen Sarkosin und Glycin. Das Herbizid Glyphosat kam im Jahr 1974 unter dem Namen Roundup auf den Markt. Der Wirkstoff hemmt das Enzym 5-Enolpyruvylshikimat-3-phosphat-Synthase (EPSPS), das die Pflanze zur Synthese bestimmter Aminosäuren benötigt.

Die beiden Wissenschaftler standen nun also vor der Aufgabe, die Ausbreitung der versprühten Pestizidtröpfchen zu berechnen. An sich kein größeres Problem: „Die mathematische Beschreibung des Grundproblems ist Standard, dafür gibt es gute Software“, sagt Benner. Um die Software an ihre spezielle Aufgabe anzupassen, arbeiteten die Forscher mit Jens

Lang von der Technischen Universität Darmstadt zusammen.

Mehrere physikalische Prozesse beherrschen die Bewegung der Tröpfchen: zum einen Diffusion, also die zufällige Bewegung; außerdem Konvektion, der Transport durch Luftströmungen. Als Drittes spielt die Turbulenz eine Rolle, etwa in den Wirbelschleppen, die sich hinter einem Flugzeug bilden. „Die Turbulenz haben wir allerdings nicht berücksichtigt, weil die Berechnungen sonst zu viel Rechenleistung benötigt hätten“, sagt Hermann Mena.

### EINFACHE MODELLE, DAMIT DER RECHNER MITHALTEN KANN

Komplizierte mathematische Modelle zu vereinfachen, ohne dass sich das Ergebnis ändert, ist die Spezialität von Peter Benner. Er leitet die Fachgruppe Computational Methods in Systems and Control Theory am Magdeburger Max-Planck-Institut. Dort untersuchen die Forscher komplexe technische Prozesse, insbesondere aus den Bereichen der chemischen Verfahrenstechnik und der Biotechnologie. Peter Benner und seine Kollegen liefern dabei mit ihren Simulationen und Modellierungen eine wichtige Hilfe für die Verfahrenstechniker: „Um die Steuerung komplexer Sys-

teme zu optimieren, wird immer mehr auf Computersimulationen zurückgegriffen“, sagt er.

Wenn Ingenieure etwa einen chemischen Prozess entwickeln, müssen sie an vielen Schraubchen drehen. Wie schnell vermischt man die Substanzen im Reaktionskessel? Welches Mischungsverhältnis ist optimal? Welcher Katalysator geeignet? „Die Ingenieure wissen in der Regel recht gut, wie sie vorgehen müssen, aber als Mathematiker kann man das Ergebnis oft doch noch um einige Prozent verbessern“, meint Benner. Das kann in der chemischen Industrie durchaus Millionen-Euro-Beträge einsparen.

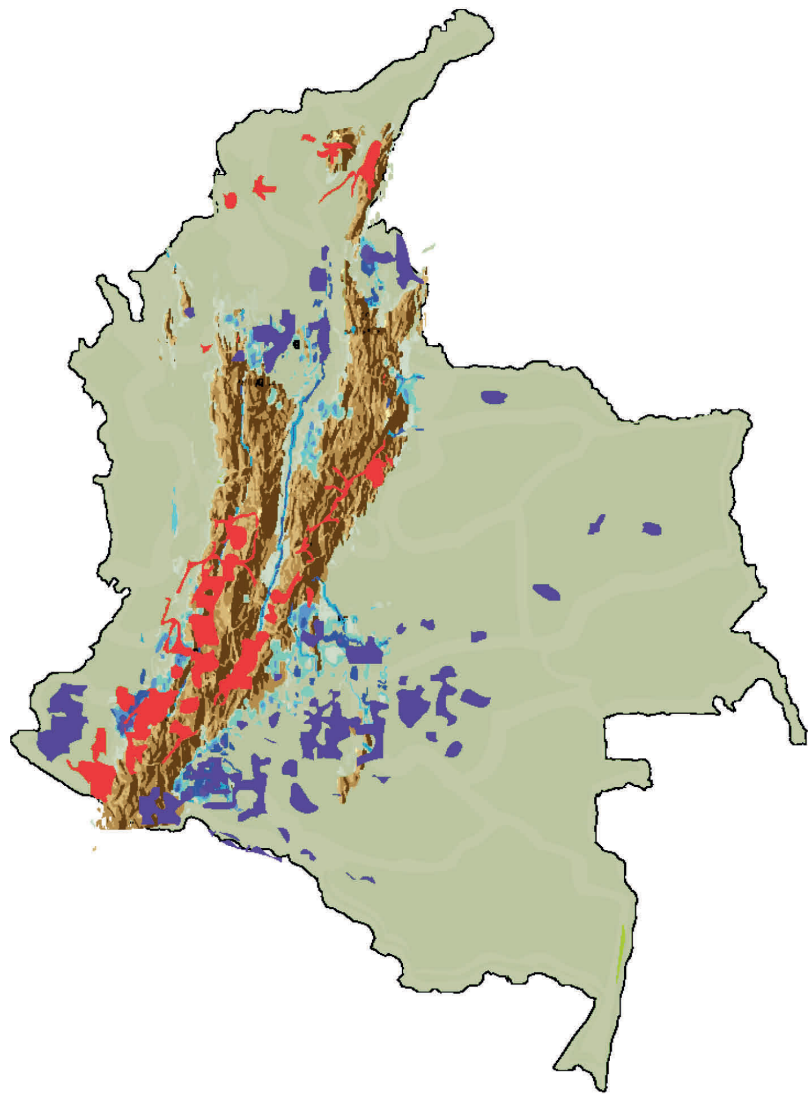
Doch um diesen Optimierungseffekt zu erreichen, müssen die Modelle mit vielen verschiedenen Parametern unzählige Male laufen. Weil das selbst mit heutigen Rechnern meist immer noch zu lange dauert, entwickeln Peter Benner und seine Kollegen sogenannte Surrogate – vereinfachte Modelle, die automatisch mit mathematischen Methoden berechnet werden, deren Genauigkeit aber ausreicht.

„Man muss sich das so ähnlich vorstellen wie bei der digitalen Fotografie“, sagt der Max-Planck-Direktor. Würde der Farbwert jedes einzelnen Bildpunkts gespeichert, wären die Speicherkarten moderner Kameras mit einer Auflösung von zehn Megapixeln und mehr schnell voll. Im jpeg-Format werden die Bilddaten aber nicht pixelweise gespeichert, sondern durch Re-



Peter Benner, geschäftsführender Direktor am Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, ist Spezialist für Modellierungen am Computer.

Drogenanbau in Kolumbien: Die Karte zeigt Pflanzungen von Koka (blau) und Schlafmohn (rot) im Jahr 2005. Die Grenze zu Ecuador verläuft im Südwesten des Landes, wo sich die Felder konzentrieren.



chenoperationen komprimiert, ohne dass dabei Informationen verloren gehen. In Peter Benners Abteilung entwickeln die Forscher sozusagen mathematische Methoden, um numerische Modelle zu komprimieren.

Bei der Berechnung der Glyphosatdrift mussten Benner und Mena freilich nur wenige Vereinfachungen einbauen, um die Modellierung handhaben zu können. Sie wählten einen 13 Kilometer langen, zehn Kilometer breiten und 200 Meter hohen Ausschnitt im Grenzgebiet aus, unterteilten das Gebiet, dem klassischen numerischen Finite-Elemente-Verfahren gemäß, in unzählige Zellen und begannen zu rechnen.

### VIELE UNBEKANNTE ERSCHWEREN DIE AUSSAGE

Die gewählten Dimensionen basierten auf den realen Maßen einer Modellregion. Zunächst kalkultierten die Wissenschaftler die Ausbreitung nur in einer Luftschicht, später in dem gesamten Quader. „Die Frage war: Kommt die gesamte Glyphosatwolke innerhalb der zehn Kilometer bis zur Grenze runter, oder breitet sie sich weiter aus?“, sagt Peter Benner.

Das Hauptproblem für die Forscher bestand darin, dass sie kaum etwas über die Flugzeuge wussten, die das Glyphosat versprühten. Welche Form hatten die Düsen, wie groß waren die Tröpfchen? In welcher Formulierung war das Glyphosat versprüht worden? Wie schnell

flogen die Flugzeuge? In welcher Höhe? Bei welchem Wetter? Da sie all diese Fragen nicht beantworten konnten, mussten Mena und Benner sich auf Abschätzungen und Literaturwerte verlassen. Ergebnis: Die ursprüngliche Frage können sie nicht eindeutig beantworten. „Die Güte des Ergebnisses steht und fällt mit der Modellierung der Randbedingungen“, betont Benner.

Theoretisch sind für das Versprühen von Glyphosat bestimmte Richtlinien gültig. So sollen die Flugzeuge starten, wenn Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Temperatur niedrig sind. Sie sollen maximal 25 Meter hoch fliegen und möglichst große Tropfen erzeugen, damit die Pestizidwolke nicht weiträumig verdriften kann. Ob diese Vorgaben an der kolumbianisch-ecuadorianischen Grenze eingehalten wurden, ist fraglich.

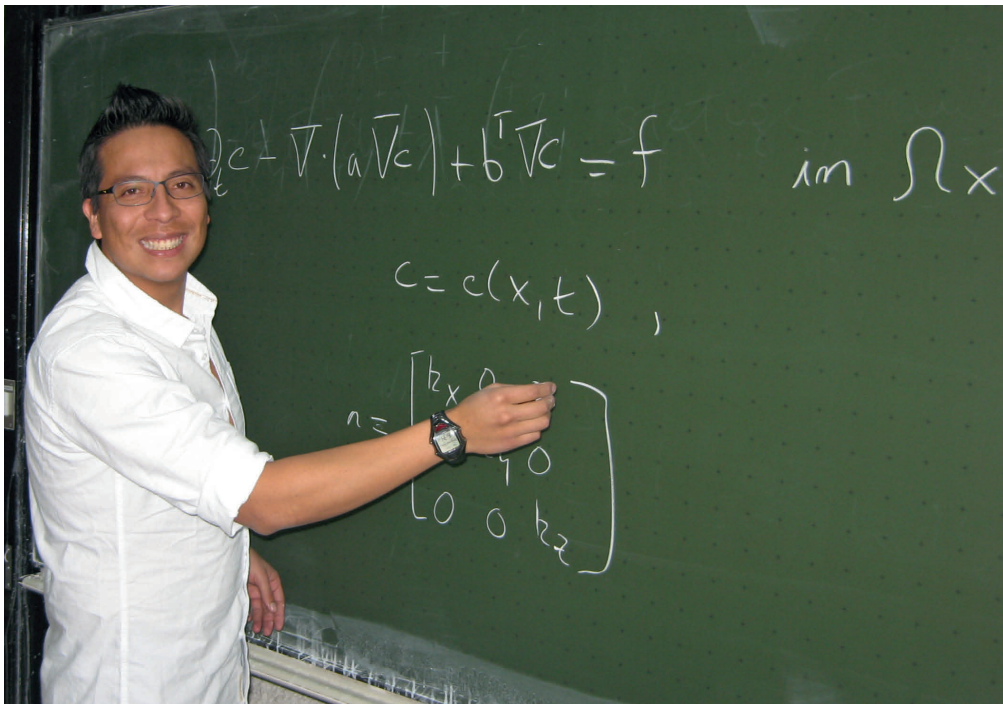
„Die Flughöhe von 25 Metern ist völlig unrealistisch“, meint Hermann Mena. Die hohen Bäume im Amazonasdschungel und die gebirgige Topografie hinderten die Piloten am Tiefflug. Laut

ecuadorianischen Berichten flogen die Maschinen in Wirklichkeit achtzig bis hundert Meter hoch. Kolumbiens Angaben zufolge lag die Flughöhe bei dreißig bis vierzig Metern.

### EINE DRIFT VON GLYPHOSAT ÜBER DIE GRENZE IST MÖGLICH

Für die Forscher bedeutete der politische Streit eine Gratwanderung. Beide Seiten versuchten, Einfluss auf die Ergebnisse zu nehmen. „Wir haben uns bemüht, möglichst objektiv zu sein“, sagt Hermann Mena. Zusammen mit Peter Benner und René Schneider von der TU Chemnitz hat er die Ergebnisse in einem vor Kurzem veröffentlichten Buch zusammengefasst. Darin ist keine Schlussfolgerung zu finden, ob nun Glyphosat über die Grenze gelangt ist oder nicht.

Die Wissenschaftler untersuchen lediglich verschiedene Szenarien und stellen fest, dass unter bestimmten Bedingungen eine Drift des Spritzmittels nach Ecuador möglich ist: wenn die



Hermann Mena erklärt an der Tafel das Modell, mit dem er und seine Kollegen die Ausbreitung von Glyphosat in der Luft untersuchen. Mena war 2007 der erste Mathematiker, der in Ecuador promovierte.

Flugzeuge zu hoch fliegen, zu große Tropfen versprühen, Temperatur und Luftfeuchtigkeit hoch sind und der Wind stark bläst. „Welche Schlussfolgerungen aus den Szenarien zu ziehen sind, soll der Leser entscheiden“, betont Mena.

Trotz dieses eher vagen Ergebnisses war die Studie für Ecuador ein wichtiger Fortschritt: Mit den Projektmitteln von 203 026,80 Dollar, welche die Regierung zur Verfügung gestellt hatte, baute Hermann Mena an der Universität von Quito ein leistungsfähiges Rechenzentrum für die Simulationen auf. „Es war das erste Grundlagenforschungsprojekt, das je in Ecuador von der Regierung finanziert wurde“, sagt er.

Auch Peter Benner sieht darin einen Erfolg: „Das Standing der Wissenschaft und insbesondere der angewandten Mathematik in Ecuador hat sich durch das Projekt wesentlich verbessert.“ Politik und Wirtschaft wüssten nun, dass sie sich mit bestimmten Problemen an die Mathematiker der eigenen Universität wenden können.

Die Klage beim Internationalen Gerichtshof hat Ecuador im September 2013 zurückgezogen, weil die Beweise nicht gerichtsfest zu machen waren. Kolumbien hat sich aber verpflichtet, 15 Millionen Dollar als Entschädigung

an Ecuador zu zahlen. Dass Kolumbien es in Zukunft erneut wagt, das Gift unbekümmert in Grenznähe zu versprühen, glaubt Hermann Mena nicht. Insofern hat sich die auch mit wissen-

schaftlichen Argumenten geführte Auseinandersetzung gelohnt: „Die Flugzeuge werden wesentlich vorsichtiger sein. Das ist ein großer Erfolg für die Menschen dort.“

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Wegen des Versprühens des Pestizids Glyphosat hat Ecuador seinen Nachbarn Kolumbien beim Internationalen Gerichtshof angeklagt.
- Mit Methoden der angewandten Mathematik sollten Wissenschaftler die Ausbreitung von Glyphosat in der Grenzregion der beiden Länder berechnen.
- Aufgrund von vieler unsicherer Parameter konnten die Forscher keine eindeutige Antwort liefern. Allerdings hat das Projekt in Ecuador indirekt wissenschaftlich Entwicklungshilfe geleistet.

### GLOSSAR

**Glyphosat:** Erfunden im Jahr 1950 von dem Schweizer Henri Martin, ist Glyphosat eine chemische Verbindung aus der Gruppe der Phosphonate. Seit mehr als 30 Jahren wird dieses Herbizid zur Unkrautbekämpfung eingesetzt. Im Vergleich mit anderen Herbiziden weist Glyphosat meist eine geringere Mobilität, Lebensdauer und eine geringere Toxizität gegenüber Tieren auf – Eigenschaften, wie sie für die landwirtschaftliche Nutzung wünschenswert sind.

**Plan Columbia:** Das Programm startete im September 1999 und wurde vom kolumbianischen Präsidenten Andrés Pastrana veröffentlicht als „Plan für den Frieden, den Wohlstand und die Erneuerung des Staates“. Darin wird die Armee zu Einsätzen für polizeiliche Zwecke befugt. Der Plan Columbia ist motiviert vom „Krieg gegen Drogen“; das Besprühen von Kokapflanzungen mit Herbiziden ist ein wichtiger Teil des Projekts. Als Folge davon kommt es allerdings zu Umweltschäden und vor allem bei den Bewohnern der betroffenen Region zu Gesundheitsschäden.

# Akademiker brauchen einen Stellenmarkt, der ihren Namen trägt.

Auf [academics.de/maxplanck](https://academics.de/maxplanck) finden Sie ein Spezial mit aktuellen Stellenangeboten von Forschungsinstituten sowie Hochschulen und forschenden Unternehmen, Gehaltsübersichten und Tipps für Ihre berufliche Weiterentwicklung in Wissenschaft und Forschung.

**Gewinnen Sie jetzt besondere und erlesene Produkte aus dem ZEIT-Shop auf [academics.de/maxplanck](https://academics.de/maxplanck).**

**academics.de,  
der führende  
Stellenmarkt  
für Akademiker**

 **academics.de/maxplanck**  
Der schlauere Stellenmarkt