

# Interdisziplinäre Physik

## Von der Diffusion in Festkörpern zu Invasionen im Zuge von Globalisierung und Klimawandel

Gero Vogl

### Diffusion und Ausbreitung

Die Natur macht es uns bei der Diffusion in kristallinen Festkörpern – und das sind die meisten – einfach: Weil das Gitter hochsymmetrisch und periodisch ist – die Atome sitzen in allen drei Dimensionen in Reih und Glied –, gibt es nur wenige voneinander verschiedene Diffusionsmöglichkeiten. Zwischen denen müssen Experiment und Theorie entscheiden. Auf diesem Gebiet haben wir jahrelang geforscht.

Anders sieht es für Ausbreitungsvorgänge von Lebewesen aus und noch viel komplexer für geistige Güter wie Informationen über Neues oder Sprachen. Hier wären einfache Rechenmodelle, wie sie für den hochsymmetrischen Festkörper ausreichen, völlig unzureichend. Zu verschiedenartig sind die Bedingungen, die das „diffundierende“ Lebewesen, die sich ausbreitende Idee nach jedem einzelnen Schritt neu erwarten. Um die beobachtete Ausbreitung zu beschreiben und Prognosen für die Zukunft zu machen, helfen nur Computer-Simulationen, in denen möglichst viele Details erfasst werden. Die moderne Entwicklung hat dafür nicht nur immer bessere Computer und vorher schon viele andere Erleichterungen für unser Leben hervorgebracht, sie bringt zugleich eine Flut von Problemen mit sich, unter anderem jene, die durch Globalisierung und menschengemachten Klimawandel entstehen. Für den Forscher sind diese Probleme hochinteressant, für die Menschheit möglicherweise bedrohlich. Daran zu forschen, war meine Idee, und ich freue mich, dass ich ein kleines interdisziplinäres Team in wechselnder Besetzung dafür begeistern konnte.

Im Folgenden bespreche ich Ausbreitungsvorgänge, die einerseits auf der zunehmenden Vernetzung der Welt, andererseits auf dem Klimawandel beruhen, und wie wir sie mit Computer-Simulationen zu beschreiben versuchen.

Im Zuge von Globalisierung und Klimawandel haben zahlreiche fremde Pflanzen- und Tierarten, sogenannte Neophyten und Neozoen, mit der Invasion begonnen und viele andere sind noch zu erwarten. In Zusammenarbeit mit den Biologen und Ökologen Stefan Dullinger und Franz Essl vom Department für Botanik und Biodiversitätsforschung, Fakultät für Lebenswissenschaften der Universität Wien bzw. vom Umweltbundesamt haben wir die Beschreibung

em. o. Univ.-Prof. Dr. Gero Vogl; Fakultät für Physik der Universität Wien.  
E-Mail: gero.vogl@univie.ac.at

der bisherigen und der künftigen Ausbreitung einer ausgesprochen unerfreulichen Pflanzenart studiert. Es ist das aus den USA stammende Ragweed, das Globalisierung und Klimawandel „schamlos ausnutzt“, eine Pflanze, unter der bisher nur in den USA zahllose Menschen gelitten haben, die aber jetzt auch bei uns vielen Menschen bereits erheblich zu schaffen macht. Denn die Pollen des Ragweed lösen bei vielen Menschen starke Allergien im Spätsommer aus, wenn die Allergien von den heimischen Pflanzenpollen schon abgeklungen sind.

### Was ist Ragweed?

Das Ragweed, wissenschaftlich *Ambrosia artemisiifolia* L. genannt, mag dem Nichtbotaniker wie unser heimischer Gemeiner Beifuß, *Artemisia vulgaris*, erscheinen, eine früher häufig verwendete Gewürzpflanze, die gern an Straßenrändern wächst. Aber zum Unterschied vom Gemeinen Beifuß, der auch Allergien hervorruft, wenn auch weniger schlimme, entwickelt Ragweed erst im Spätsommer hohe kerzenförmige Blütenstände und verbreitet seine Pollen lange, nachdem der Pollenflug heimischer Arten vorbei ist. Ragweed ist ein Einwanderer aus den wärmeren Gegenden Nordamerikas und bewirkt, dass Allergiker am Ende des Sommers noch einmal empfindlich auf diese Pollen reagieren. Solche Einwanderer sind kein neues Phänomen. Die Robinie (falsche Akazie) ist ein Beispiel für Einwanderung und Ausbreitung seit Jahrhunderten. Sie verschönt die Hecken, wenn sie blüht und duftet, drängt aber andere Arten zurück, sodass zuweilen Eindämmungsmaßnahmen notwendig sind.

Die Invasion nicht-einheimischer Pflanzenarten nimmt in den letzten Jahren stark zu, die Gründe sind die Zunahme des Austausches von Gütern und damit auch Samen in der ganzen Welt und für wärmeliebende Arten, die bisher bei uns nicht gedeihen konnten, die weltweite Erwärmung. Eine Vorhersage über die weitere Entwicklung der Invasoren ist daher höchst erwünscht, besonders in Hinblick auf die bereits deutlich wahrnehmbare Klimaveränderung in Europa, menschengemacht oder eine natürliche Schwankung wie oft seit dem Beginn der Eiszeiten vor ca. 1 Million Jahren. Jedenfalls ist nicht mehr zu bezweifeln, dass wir einen Temperaturanstieg erleben, der zahlreichen invasiven Arten zunehmenden Spielraum lässt.



Abb. 1: Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). Diese Pflanze fand ich im Spätsommer nach Rückkehr aus dem Urlaub in meinem Garten vor. Der prächtige Blütenstand, der kurze Zeit später zu kräftigem Allergien-auslösenden Pollenflug geführt hätte, ist deutlich erkennbar. Die Pflanze wurde gleich nach dieser Aufnahme vernichtet.

Das Ragweed ist eine Ruderalpflanze, das bedeutet, dass sein „Habitat“ von Menschen gestörtes Terrain wie Schuttfelder, Bahndämme und Straßenränder ist, es wächst aber auch als „Unkraut“ in Getreidefeldern und Gärten. Das Ragweed stammt aus wärmerem und trockenerem Klima, als es bisher in weiten Teilen Mitteleuropas herrschte. Es ist anzunehmen, dass der in den kommenden Jahren zu erwartende weitere Temperaturanstieg sein Habitat stark erweitern wird.

Ragweed ist einjährig und breitet sich aus, indem die Samen von Lebewesen oder Fahrzeugen transportiert werden. Seit 1960 ist ein starker Anstieg des Vorkommens zu verzeichnen, die Pflanze breitet sich offenbar bedingt durch die allgemeine Erwärmung rascher aus. Besonders ausführliche Registrierungen der Standorte von Ragweed wurden in den Jahren seit 1990 gemacht. Daraus lässt sich die jährliche Zunahme im Befall bestimmen. Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung des Ragweed in Österreich und Bayern bis zum Jahr 2005. Das Land ist in Zellen von 3 x 5 geographischen Minuten (ca. 35 km<sup>2</sup>) eingeteilt. Schwarze Zellen bedeuten, dass mindestens ein sicherer Fund der Pflanze in dieser Zelle verzeichnet wurde. Es wird angenommen, dass sich die Pflanze dort, wo sie einmal aufgetreten ist, dauerhaft angesiedelt hat.

Da die Ausbreitung des Ragweed in der stark strukturierten Landschaft stattfindet, haben wir seine Ausbreitung für verschiedene prognostizierte Klimaszenarios und damit Habitataignungen unter Zugrundelegung von Computersimulationen beschrieben. Damit lassen sich, auch wenn nur wenige sichere Funde vorliegen, die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Pflanze angeben. Das Habitat des Ragweed wird durch eine Fülle von Einzelheiten beschrieben, wir haben zehn in Erwägung gezogen, schließlich erwies sich aber eine Beschränkung auf die im Folgenden genannten vier als sinnvoll.

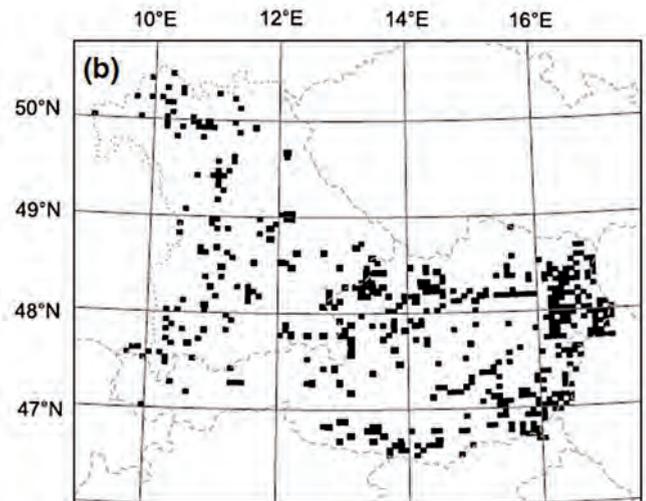


Abb. 2: Verbreitung des Ragweed in Österreich und Bayern bis 2005. Die schwarzen Zellen markieren befallene Zellen.

## Modellierung

Unsere Untersuchung beschränkte sich auf das Gebiet von Österreich und Bayern, weil dort ein besonders dichtes Netz an Beobachtungen des Ragweed-Vorkommens vorlag. Die Region ist in 4722 Zellen eingeteilt, jede Zelle kann in unserem Modell besetzt (also von Ragweed befallen) oder unbesetzt sein, eine weitere Charakterisierung gibt es nicht, das ist die Beschränkung unseres Modells. Der Zustand kann sich jährlich ändern.

Zuerst muss die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, dass eine unbesetzte Zelle befallen wird. Dafür sind Habitataignung und Samenzufluss aus anderen Zellen nötig.

Wir fanden, dass vier Umweltgrößen („Habitatparameter“) die Ausbreitung des Ragweed hinreichend bestimmen, nämlich die mittlere Jahrestemperatur, der jährliche Niederschlag, die Länge aller Straßen in der Zelle und die Landnutzung, weil letztere ein Maß für den Anteil an Ruderalflächen und Ackerflächen ist. Die Eignung des Habitats  $H(x)$ , eine Wahrscheinlichkeit, lässt sich dann durch eine logistische Funktion beschreiben, also eine Funktion, die bei dem Wert 0 beginnt und beim Wert 1 in Sättigung ist:

$$H(x) = \frac{1}{1 + e^{-h(x)}}$$

mit  $h(x)$  einer gewichteten Summe der vier Habitatpara-

meter. Bei  $H(x) = 0$  wird ein Samen niemals aufgehen, bei  $H(x) = 1$  immer.

Außer der Habitatsignung  $H(x)$  muss der Zufluss an Ragweed-Samen  $I(x, t)$  bekannt sein. Wir können ihn schreiben

$$I(x, t) = \sum_y S(|x - y|)$$

wobei  $\sigma(y, t) = 1$ , wenn die Zelle  $y$  zur Zeit  $t$  besetzt ist, und 0, wenn sie unbesetzt ist.

$S$  beschreibt den Fluss von Samen, die in Zelle  $y$  produziert werden und in Zelle  $x$  ankommen. Wir fanden beste Anpassung an die Funde von 1990 bis 2005, wenn wir nicht eine Gaußfunktion für die Ausbreitung annahmen, sondern eine Potenzfunktion

$$S(d) = \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-\gamma}$$

Dies ist eine leptokurtische, heute meist „fat tail“ genannte Funktion, da sie an den Rändern stärker ausgeprägt ist als die Gaußfunktion. Dies kommt daher, dass die Samen auch durch Fahrzeuge befördert werden, die längere Strecken zurücklegen als Tiere, die Samen transportieren.

Die Wahrscheinlichkeit  $P$ , dass eine bis zum Jahr  $t$  unbefallene Zelle im folgenden Jahr  $t+1$  befallen wird, hängt vom Produkt von Habitatsignung und Samenzufluss ab:

$$P(\sigma(x, t+1) = 1 | \sigma(x, t) = 0) = 1 - \exp(-H(x) \cdot I(x, t))$$

Dabei bedeutet  $(\sigma(x, t+1) = 1 | \sigma(x, t) = 0)$ , dass die Zelle  $x$  im folgenden Jahr befallen wird ( $\sigma(x, t+1) = 1$ ), falls sie nicht schon im laufenden Jahr befallen ist ( $\sigma(x, t) = 0$ ). Die Form  $1 - \exp(-H(x) \cdot I(x, t))$  stellt sicher, dass die Wahrscheinlichkeit  $P$  auf das Intervall 0 bis 1 beschränkt ist.

Es gehen also zahlreiche Parameter in die Modellierung ein: für das Habitat  $H(x)$  die vorher genannten vier gewichteten Habitatparameter, außerdem die Parameter der Ausbreitung  $S(d)$ , also  $d_0$  und  $\gamma$ . Diese Parameter werden durch ein Optimierungsverfahren der Fundverteilung in den Jahren von 1990 bis 2005 (also der Angaben über die in diesen Jahren befallenen Zellen) auf der Basis von maximum likelihood (maximale Wahrscheinlichkeit) bestimmt.

### Simulation bis zum Jahr 2050

Mit den optimierten Parametern wurde die weitere Ausbreitung des Ragweed in Österreich und Bayern bis ins Jahr 2050 simuliert. Um vorherzusagen, welche Zellen in einem Folgejahr befallen würden, wurde die berechnete Befallswahrscheinlichkeit noch unbefallener Zellen mit Zufallszahlen zwischen 0 und 1 verglichen und dann, wenn sie größer war als die Zufallszahl, festgesetzt, dass die Zelle  $x$  ihren Zustand von *unbefallen* auf *befallen* ändert, im gegenteiligen Fall aber *unbefallen* bleibt (Abb. 3). Diese Prozedur wurde für jedes Jahr bis zum Ende der Simulationsperiode wiederholt.

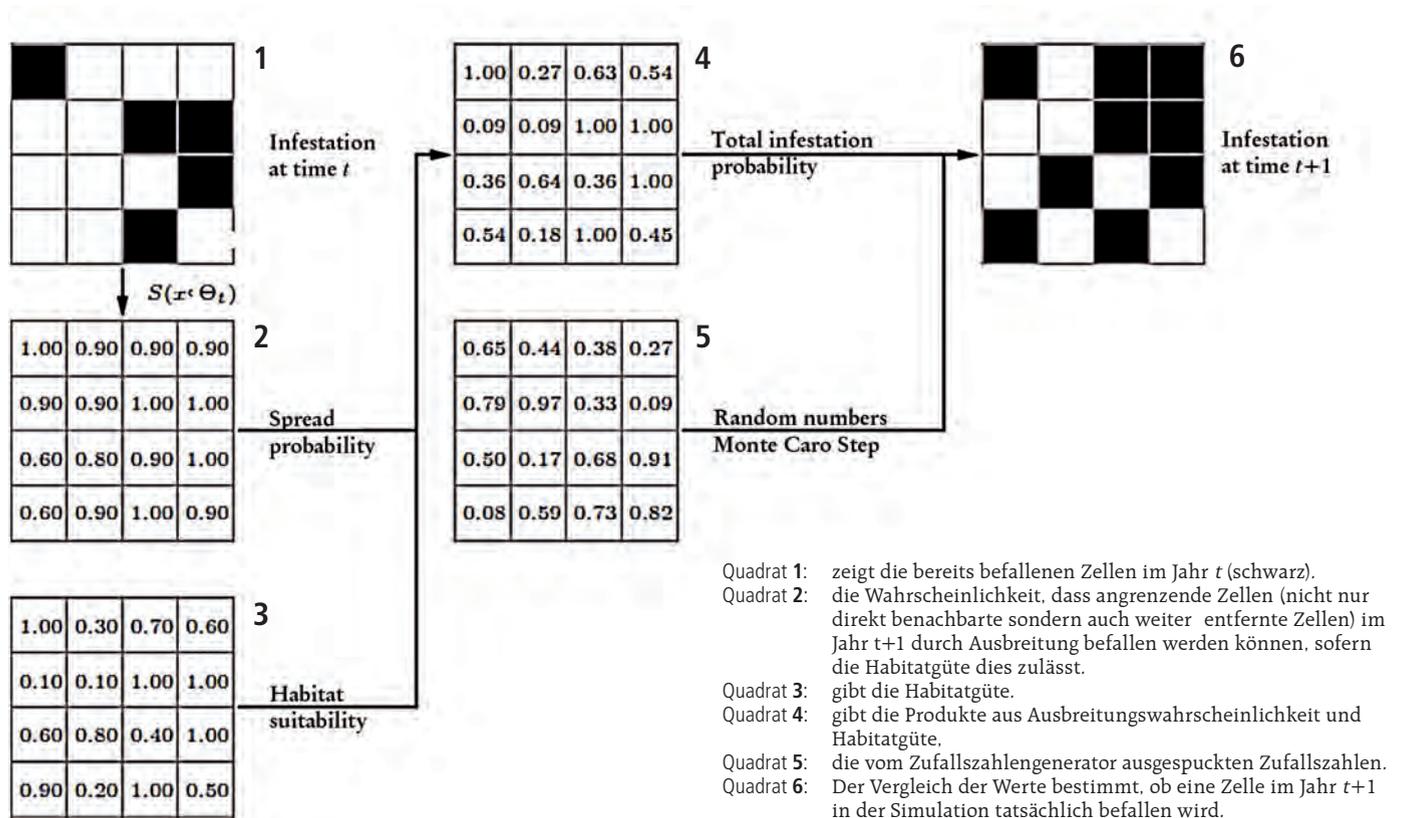


Abb. 3: Vereinfachte Darstellung des Simulationsverfahrens in die Zukunft.

Alle Klimaprognosen sagen für die nächsten Jahrzehnte einen deutlichen Temperaturanstieg voraus. In jedem der möglichen Temperatur-Szenarien muss man mit einer beschleunigten Ausbreitung von Neophyten rechnen, die wie das Ragweed aus wärmerem Umfeld stammen. Das gilt für Österreich und Süddeutschland besonders für die niedrig gelegenen wärmeren Gebiete und ganz allgemein entlang der Verkehrswege. Die folgende Abbildung zeigt die auf der Grundlage eines mäßigen bzw. eines recht drastischen aber leider nicht völlig unrealistischen künftigen Klimaszenarios (globale Erwärmung der Erde von 1990 bis 2050 um 1.5 bzw. 2.4 Grad Celsius) prognostizierte Verbreitung von Ragweed in den Jahren bis 2050 in Österreich und Bayern. Ragweed wird danach wesentlich größere Gebiete besiedeln als gegenwärtig. Die gesundheitlichen Folgen und die damit verbundenen Kosten werden erheblich sein.

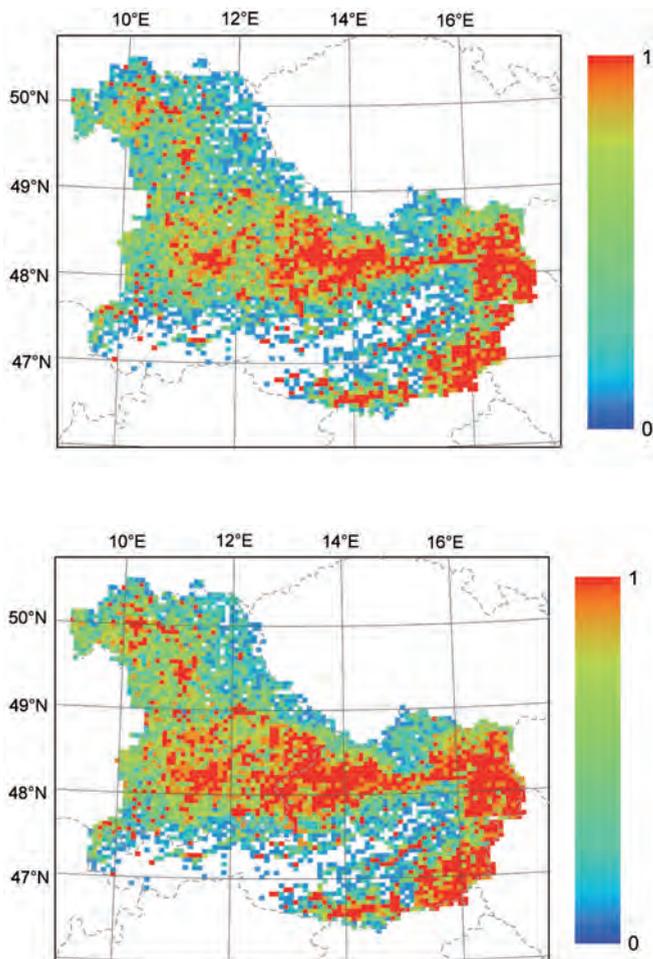


Abb. 4 und 5: Wahrscheinliche Verbreitung von Ragweed in Österreich und Bayern im Jahr 2050 bei einem Temperaturanstieg von 0.025 bzw. 0.04 Grad pro Jahr. Die Farben stehen für die Befallswahrscheinlichkeit (rot hoch, blau gering).

Wie dramatisch die Ausbreitung des Ragweed und anderer wärmeliebender Neophyten tatsächlich ablaufen wird, wird einerseits von der tatsächlich eintretenden Erwärmung abhängen, andererseits davon, ob man sich – wie in den Zwanzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts im Fall der aus Amerika eingeschleppten Bisamratten – entschließen wird, die angestammte Flora und Fauna vor den Invasoren zu schützen, ein Unterfangen, das mit Kosten für das Management verbunden ist.

## Management

Management hat zwei Aspekte: Erkundung und Vernichtung der Pflanzen, eventuell mit einer anschließenden regelmäßigen Bestandskontrolle. Wir nehmen an, dass nur Zellen, deren Habitattüte einen Schwellwert übersteigt, sinnvollerweise zu managen sind, wenn das Verfahren kostengünstig sein soll.

Wir haben zwei verschiedene Vorgangsweisen verglichen: statistische Erkundung und Erkundung in der Reihenfolge der Habitattüte, von der für Ragweed höchsten bis hinunter zum Schwellwert. Die letztere Methode erwies sich als effektiver.

Für eine Kosten-Nutzen-Überlegung mussten wir Annahmen über den finanziellen Aufwand für Erkundung und Vernichtung treffen. Für solche Unternehmen gibt es kaum Zahlen, daher trafen wir folgende vorsichtige Annahmen, basierend auf den Erfahrungen mehrtägiger Erkundungsfahrten aller Straßen mit dem Fahrrad im südwestlichen Weinviertel. Wir nahmen an, dass eine Person als Fußgänger (4 km/h) einen Geländestreifen von 10 Meter Breite überblicken kann. Daher sind für die Erkundung von 1 km<sup>2</sup> 25 Stunden und für die einer Zelle (ca. 35 km<sup>2</sup>) 100 Arbeitstage zu 8 Stunden (Stundenkosten 25 EUR inklusive Nebenkosten) erforderlich. Für die Vernichtung des gesamten Ragweed-Bestandes in der Zelle nehmen wir die zehnfachen Kosten an und erhalten die Summe von 300.000 EUR für das Management einer Zelle.

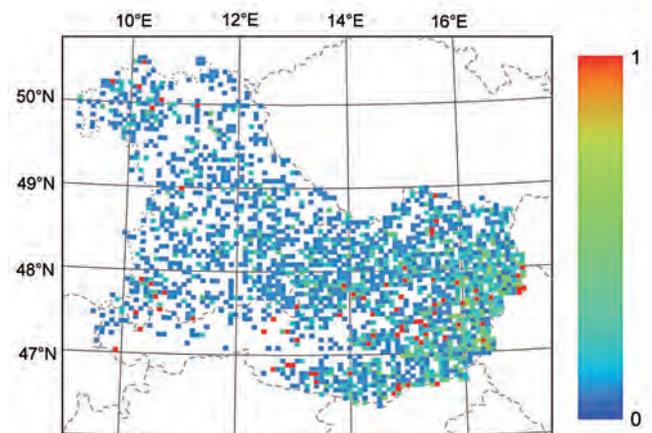


Abb. 6: Der Erfolg von Management-Maßnahmen ist in diesem Bild zu sehen. Ca. 15 Millionen EUR werden jährlich eingesetzt, um diejenigen Zellen zu reinigen, deren Habitattüchtigkeit zu den oberen 57% gehört. Die Wahrscheinlichkeit der Verbreitung des Ragweed in Österreich und Bayern im Jahr 2050 unter Annahme einer mäßigen Klima-bedingten Temperaturerhöhung von 0.025 Grad pro Jahr ist auf wesentlich niedrigere Werte beschränkt als in Abb. 4. Das Management war also hoch erfolgreich. (Die roten Zellen sind solche, die nicht gereinigt wurden, weil ihre Habitattüchtigkeit im unteren 43 %-Bereich liegt).

## Allergien und deren Kosten

Ragweed-Pollen rufen Allergien hervor. Jäger hat 2006 die Kosten für Österreich abgeschätzt, und eine europäische Studie kommt 2012 auf ähnliche Werte für die Kosten in Europa. Wir extrapolieren von der damaligen Pollenbelastung auf die in Zukunft wegen der Ausbreitung des Ragweed zu erwartende Belastung. Zur Abschätzung der räumlichen Pollenbelastung zogen wir die Daten aus acht über Österreich verteilten Pollenfallen heran, diese Abschätzung muss jedoch als sehr vage angesehen werden, da es wenig Information über das Verhältnis von weitreichendem Pollentransport und dem einfacher abzuschätzendem im Nahbereich um die Pflanzen gibt.

Bis 2050 sind für Österreich und Bayern zusammen nach solch einer groben Schätzung mittlere jährliche Kosten (Medikamente, Arbeitsausfall) in der Höhe von fast 300 Millionen EUR zu erwarten, bei Klimawandel um 15 bis 25 Prozent mehr. Schon bei Management-Kosten in der Größenordnung von 15 Millionen EUR jährlich fallen die mittleren jährlichen Allergiekosten von 300 auf weniger als 100 Millionen EUR, bei dreifachem Einsatz sogar auf ca. 25 Millionen EUR. Höherer Einsatz erzielt keine wesentliche Verbesserung. Ohne Management würden die Allergiekosten im Jahr 2050 ohne Klimawandel 400 Millionen EUR, mit Klimawandel mehr als 500 Millionen EUR betragen.

## Was müsste geschehen?

Unser Schluss ist: Es ist preiswert, Ragweed auszurotten. So drückt man z.B. mit dem Einsatz von 15 Millionen EUR die mittleren jährlichen Allergiekosten um mehr als 200 Millionen EUR. Bisher haben wir unsere Ergebnisse offenbar

nicht nachdrücklich genug den Entscheidern der Politik beigebracht, außer im Van der Bellen-Report 2013 und einigen wenigen Zeitungsmeldungen ist nichts davon in den Medien erschienen. Wahrscheinlich wäre breite Information der Öffentlichkeit nun unsere Pflicht.

## Ausblick

Wir haben gesehen: Berechnungen der Ausbreitung („Diffusion“) erhalten ein neues Betätigungsfeld. Durch die Klimaänderungen der Erde, die es immer gab, durch anthropogene Einflüsse aber heute vermutlich wesentlich schneller, erhalten sie eine besondere Bedeutung. Wir versuchen jetzt, unsere Modell- und Simulationserfahrungen auf die Ausbreitung geistiger Güter zu übertragen. Gegenwärtig modellieren wir den Rückgang von Minderheitssprachen.

Diese Arbeit erstreckte sich über mehr als fünf Jahre. Sie begann mit der Diplomarbeit von Manfred Smolik 2008/2009 und endete mit den Berechnungen von zukünftigen Allergiekosten und, was dagegen zu tun sei, in der Dissertation von Robert Richter in den Jahren 2011 bis 2013. Aus den Arbeiten ist eine Reihe von Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften hervorgegangen. Lorenz Mathias Stadler bahnte die Zusammenarbeit mit Stefan Dullinger vom Fakultätszentrum für Biodiversität der Universität Wien und Franz Essl vom Bundesumweltamt an und war anfangs aktiv dabei. Uwe E. Berger und Matthew Smith vom Department für Oto-Rhino-Laryngologie der Medizinuniversität Wien berieten uns bei der Frage der Pollenausbreitung, von Michael Leitner stammt ein Großteil der mathematischen Ideen und Programme. Ihnen allen sei herzlich für diese interdisziplinäre Zusammenarbeit gedankt.