

DIE GLOBALISIERUNG MARINER ÖKOSYSTEME

THE GLOBALISATION OF MARINE ECOSYSTEMS

HANNO SEEBENS, BERND BLASIUS

Die stetige Intensivierung des globalen Schiffsverkehrs führt ungewollt zur weltweiten Ausbreitung bestimmter Arten und ist damit eine der größten Gefahren für die Ökosysteme. Die Arbeitsgruppe Mathematische Modellierung der Universität Oldenburg hat das komplexe Netzwerk des internationalen Schiffsverkehrs analysiert, um die weltweite Ausbreitung von Organismen „berechenbar“ zu machen.

The incessant growth of worldwide shipping has inadvertently led to certain species spreading far beyond their natural habitats, posing one of the greatest risks to ecosystems. The working group Mathematical Modelling at Oldenburg University has carried out an analysis of international shipping in an attempt to make the global spread of organisms “calculable”.



Einmal eingewandert lassen sich invasive Arten nur schwer kontrollieren: Die Pazifische Auster.

Having once arrived, invasive species are extremely difficult to control: The Pacific oyster.

Das Wattenmeer der südlichen Nordsee ist eine einzigartige Landschaft, ein weitgehend naturbelassener Lebensraum, dessen grenzenlose Weite jeden Betrachter in den Bann zieht. Aber das Bild hat sich in den letzten Jahren in mancher Hinsicht drastisch geändert: Austern haben sich im Watt breit gemacht, die hier früher nicht vorkamen. Diese Auster ist größer als die heimische Europäische Auster und die Miesmuschel und dabei so scharfkantig, dass barfußige Wattwanderungen nicht länger ratsam sind. Es handelt sich um die Pazifische Auster (*Crassostrea gigas*), die sich hier so rapide vermehrt hat. Ihre Fähigkeit, Schlick flächendeckend zu besiedeln, hat weit reichende Konsequenzen. Denn damit bietet sie anderen Organismen ein Substrat, ohne das sie hier nicht überleben könnten. Ein „ecosystem engineer“ wie die Pazifische Auster ist in der Lage, ein ganzes Ökosystem zu verändern, was nachhaltige Folgen auch für den Menschen haben kann. Die Miesmuschel beispielsweise kann mit ihrem neuen Konkurrenten nicht mithalten, so dass der Miesmuschelertrag in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen ist.

The tidal flats of the Wadden Sea in the southern region of the North Sea make up a unique landscape, a largely unspoiled natural habitat whose unbounded expanse fascinates the beholder. But in recent years this picture has undergone a drastic change: Oysters have invaded the region. This type of oyster, though, is much bigger than the indigenous European species of oyster and mussel. Its shell also has such sharp edges that it is no longer advisable to walk barefoot on the mud flats. The species which has multiplied here so rapidly is the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*). Its ability to colonise such a large area has far-reaching consequences. This is because it offers other organisms a substrate without which they could not survive here. An “ecosystem engineer” like the Pacific oyster is capable of changing a whole ecosystem, with lasting consequences for humans. The indigenous mussel, for instance, cannot keep up with its new competitor, with the result that the numbers of mussels harvested have shown a sharp decline over the past few years.

Die Invasion ortsfremder Arten

Die Pazifische Auster gelangte aus Aquakulturen in die heimischen Gewässer. Das ist die Ausnahme. Allein in der Nordsee gibt es über 200 bekannte eingeschleppte Arten. Wie sind sie hierher gelangt? Die Antwort scheint einfach und ist doch hochkomplex: Es ist die Globalisierung der modernen Welt, die die Invasion ortsfremder Arten möglich macht. Ein Großteil des Welthandels läuft über den internationalen Schiffsverkehr. Frachtschiffe transportieren Güter aller Art quer über den Globus und verbinden Länder und Städte über riesige Distanzen. Dieser intensive Handelsverkehr hat zur Folge, dass nicht nur Waren, sondern auch Pflanzen und Tiere als blinde Passagiere an Bord gelangen und über die Welt verbreitet werden. An Schiffsrümpfen und im Ballast-Wasser großer Schiffe findet man eine Vielzahl von Arten, die den langen Transport überleben und in kurzer Zeit zum Beispiel von Singapur nach Hamburg verfrachtet werden. Der internationale Schiffsverkehr ist der Transportvektor Nummer eins für fremde marine Arten.

Ein Großteil der einwandernden Organismen kann in der neuen Umgebung nicht überleben, da ihnen die klimatischen Verhältnisse, der veränderte Salzgehalt, Konkurrenten oder Räuber das Leben schwer machen. Aber in manchen Fällen finden die Invasoren optimale Bedingungen vor und können sich explosionsartig vermehren und ganze Ökosysteme nachhaltig beeinflussen, wie das Beispiel der Pazifischen Auster in der Nordsee zeigt. Statistisch gesehen ist eine solche „Bioinvasion“ mit einem einzelnen Schiff recht unwahrscheinlich. Aber die Intensivierung des internationalen Handels hat das Risiko von Invasionsereignissen deutlich erhöht, was sich an der exponentiellen Zunahme eingeschleppter Arten in Europa ablesen lässt. Innerhalb weniger Jahre hat diese Entwicklung zu einer schleichenden Umwälzung der marinen Fauna in unseren Küstengewässern geführt – mit Auswirkungen, die heute noch nicht einmal ansatzweise abzusehen sind.

Dabei ist die Bioinvasion nicht auf marine Organismen, Schiffe oder bestimmte Regionen beschränkt. Sie ist ein weltweites Problem, das jedes Land betrifft und langfristig zu einer globalen Homogenisierung unserer Ökosysteme führen wird. Die Folge sind enorme ökonomische Kosten. Die Zebrauschel zum Beispiel, die aus der Region des Kaspischen Meeres eingeschleppt wurde, verursacht in den Großen Seen Nordamerikas Jahr für Jahr Kosten in Millionenhöhe. Nach Schätzungen belaufen sich die Schäden durch Bioinvasion allein in den USA auf jährlich über 100 Milliarden US \$.

Einmal eingewandert lassen sich invasive Arten nur schwer kontrollieren. Eine vollständige Ausrottung war nur in seltenen Fällen erfolgreich. Die effektivste Strategie liegt in der Prävention. Einige Staaten wie Neuseeland oder Australien haben strikte Einreiseregungen getroffen, die das Risiko einer Einschleppung reduzieren sollen. Allerdings können niemals alle Schiffe kontrolliert werden. Eine effektive Prävention sollte daher gezielt auf Hochrisiko-Schiffe oder -Häfen zielen. Bislang aber scheiterten alle derartigen Versuche an fehlenden Kenntnissen über die globale Ausbreitungsdynamik der potenziell invasiven Arten.

Das globale Schiffsnetzwerk

Die Wissenschaftler der Arbeitsgruppe Mathematische Modellierung unter der Leitung von Prof. Dr. Bernd Blasius wollen genau diese Kenntnislücke schließen. Mit Hilfe mathematischer Modelle versuchen sie, die globale Ausbreitungsdynamik invasiver Arten durch den modernen Schiffstransport zu quantifizieren.

The invasion of alien species

Escaping from aquacultures the Pacific oyster made its way into our home waters as escaped aquacultures. This is the exception: More than 200 alien species have been introduced into the North Sea by other means. How did they get here? Although the answer may seem a simple one, it is in reality highly complex: It is the globalisation of the modern world which made the invasion of alien species possible. The greater part of world trade is carried by international shipping. Cargo ships transport all types of goods all around the globe, connecting up seaports and hinterlands across vast expanses of ocean. This intensive traffic in goods means that not only the intended cargo, but also that plants and animals find their way on board as stowaways. They are subsequently able to spread around the world. A large variety of species manage to survive the long journey adhering to the hulls of ships or in the ballast water of ocean-going vessels. They can be transported in a relatively short time from, for instance, Singapore to Hamburg. International shipping is the transport vector number one for alien marine species.

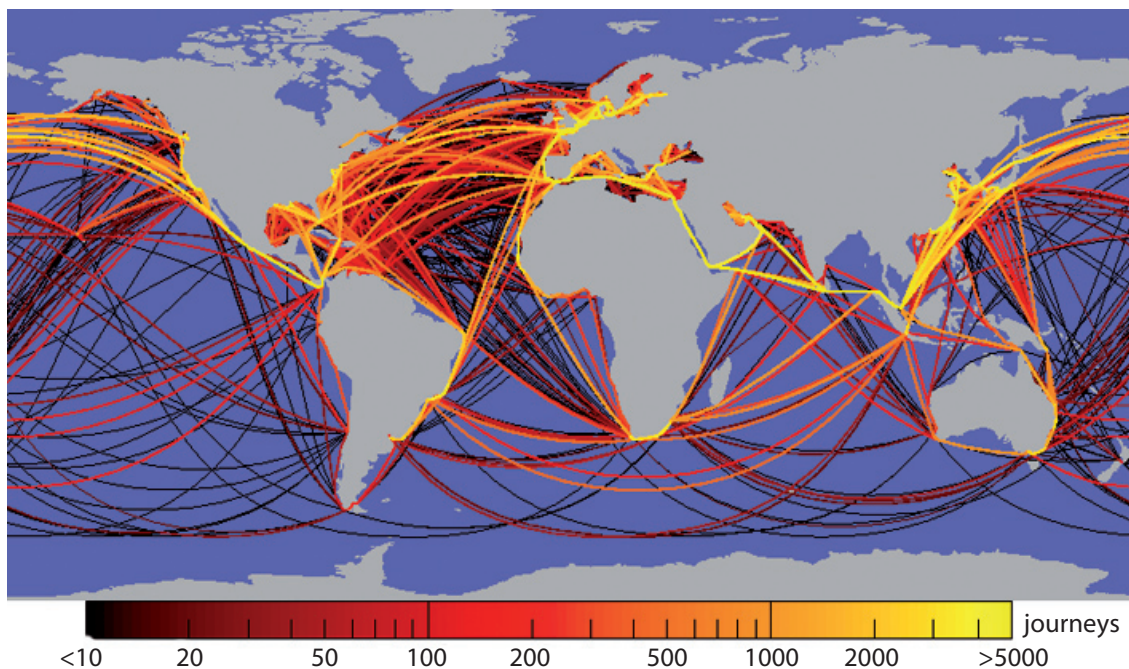
A large number of these immigrants are unable to survive in their new environment, due to climatic conditions, levels of salinity, or competitors and predators. In some cases, though, the invaders come across optimal conditions. Then they are able to multiply without constraint – and with lasting consequences for the ecosystems where they “settle down”, as shown by the example of the Pacific oyster in the North Sea. Statistically, the chance of such a “bioinvasion” resulting from just one “shipment” is most unlikely. However, the massive growth of international sea-borne trade has significantly raised the risk of invasions occurring, which is confirmed by the exponential increase in the presence of alien species in Europe. Within just a few years this development has led to a creeping transformation of the marine fauna that inhabits our coastal waters – with ramifications for the future which we cannot come even close to comprehending now.

Bioinvasions are by no means restricted to marine organisms, ships, or any particular region. They constitute a worldwide problem that can affect any country and will in the long term lead to the global homogenisation of our ecosystems. The associated economic costs are enormous. The zebra mussel, for instance, which was brought into the North American Great Lakes and is normally at home in the Caspian Sea, causes damage amounting to many millions each year. It is estimated that in the USA alone the damage caused by bioinvasion adds up to an incredible US \$ 100 billion every year.

Once they are able to gain a foothold, invasive species are extremely difficult to control. Their complete eradication has only been achieved in very few cases. The most effective strategy lies in prevention. Some countries, like New Zealand and Australia, have introduced strict entry regulations for shipping which are aimed at reducing the risk of alien species being brought into their waters. However, it is impossible to control every single vessel. Therefore, the authorities can only concentrate their efforts on high-risk vessels and entry ports. So far, though, all attempts at prevention have floundered due to insufficient understanding of the global spread-dynamics of potentially invasive species.

The global shipping network

Closing this gap in our knowledge of the processes involved is the task addressed by the working group “Mathematical Modelling” led by Prof. Dr. Bernd Blasius. By the use of mathematical models, they are attempting to quantify the global dispersal dynamics of invasive species carried by modern shipping.



Schiffnetzwerk:
Typisches Beispiel eines komplexen Netzwerkes: Die gelben Strecken zeigen die frequentiertesten Schiffsrouten auf. Sie bilden den Haupttreiseweg für invasive Arten.
Typical example for a complex network: The yellow lines show the most frequented shipping routes. These are the main travel routes for invasive species.

Bisher war die Entwicklung solcher Modelle nicht möglich, da ein einheitlicher Datensatz über weltweite Schiffsbewegungen nicht verfügbar war. 2003 hat sich dies geändert, seit alle größeren Schiffe sukzessive mit Transpondern ausgerüstet werden, die automatisch Daten zu Schiffsidentität, Standort, Datum etc. an fest installierte Stationen übermitteln. Dieses „Automatic Identification System“ (AIS) liefert umfangreiche Informationen zum globalen Schiffsverkehr in bislang nicht bekannter Qualität. Auf Basis dieser Daten bildeten die Oldenburger Wissenschaftler ein Netzwerk der globalen Schiffsbewegungen für das Jahr 2007 nach.

Insgesamt beinhaltet der Datensatz etwa 1.000 Häfen, 16.000 Schiffe und 500.000 Schiffsbewegungen. Da Schiffe nicht nur benachbarte Häfen ansteuern, ergibt sich in der Gesamtheit ein komplexes Knäuel von Verbindungen (siehe Abb.). Die daraus resultierende Verbindungstopologie ist ein typisches Beispiel für ein komplexes Netzwerk. Es basiert auf einer Menge von „Knoten“ – in diesem Fall: Häfen. Sie sind durch eine Vielzahl von „Kanten“ verbunden – Schiffsbewegungen zwischen den Häfen. Um das Problem der Ausbreitung der invasiven Arten durch den internationalen Schiffshandel darzustellen, wandten die Wissenschaftler Analysemethoden an, die in den letzten Jahren in der Komplexitätsforschung zur Charakterisierung komplexer Netzwerke entwickelt wurden. Die Ausbreitungsmuster auf einem solchen Netzwerk sind in der Regel äußerst kompliziert und lassen sich ohne Computersimulation kaum vorhersagen.

Das Schiffnetzwerk liefert die nötigen Hintergrunddaten. So kann zum Beispiel aus der Fahrzeit eines Schiffs auf die Überlebenswahrscheinlichkeit einer invasiven Art im Ballasttank geschlossen werden. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass insgesamt nur drei solcher Wahrscheinlichkeiten notwendig sind, um das Risiko einer Invasion adäquat vorhersagen zu können. Neben der genannten Überlebenswahrscheinlichkeit beim Transport gehen noch weitere Variablen in das Modell ein: die Wahrscheinlichkeit, günstige Umweltbedingungen vorzufinden, und die biogeographische Dissimilarität, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass eine invasive Art in dem Zielgebiet noch nicht

The development of such models was previously not possible because no standard set of data on worldwide shipping movements was available. This changed in 2003: From this time on, all large ocean-going vessels have to be successively equipped with transponders that automatically transmit data to on-shore stations regarding a ship's identity, as well as its precise location at any given time. This system, known as "Automatic Identification System" (AIS), delivers comprehensive information on global shipping traffic in unprecedented quality, on the basis of which the Oldenburg researchers were able to construct a network of global shipping movements for the year 2007.

All in all, the data set encompasses some 1,000 ports, 16,000 vessels and 500,000 shipping movements. As ships not only head for neighbouring ports of call, the whole picture represents a complex web of connections (see illustration). The resulting connection topology is a typical example of a complex network. It reveals a large number of "nodes" – in this case: Ports. These are connected by a multitude of links – the individual shipping movements between the ports. In order to depict the spread of invasive species carried by international shipping, the researchers apply modern methods of analysis developed by complexity research on the characterisation of complex networks. Projected onto such a network, the pattern of dispersal is usually highly complicated and can only be interpreted by computer simulation.

The shipping network provides the necessary background data. By means of this, for instance, it is possible to calculate the survival chances of an invasive organism in the ballast tank of a ship from the time needed to complete its voyage. Simulated calculations have revealed that just three such probabilities are needed to arrive at an adequate prediction of the risk of an invasion. Beside the aforementioned survival probability during transport, other variables are included in the model: The probability of finding favourable environmental conditions at the place of destination, and the biogeographical dissimilarity, i.e. the probability that an invasive organism is not yet represented in

heimisch ist. Zusätzlich spielt die Intensität des Schiffsverkehrs eine entscheidende Rolle, denn mit jedem weiteren Schiff erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer Bioinvasion.

Mit diesem Grundgerüst an Daten und mathematischen Formeln lassen sich die „Autobahnen“ der invasiven Arten von den „Landstraßen“ unterscheiden, auf denen nicht so viele blinde Passagiere unterwegs sind. Ebenso kann jedem Schiff, jedem Hafen oder jeder Region wie zum Beispiel der Nordsee ein bestimmtes Invasionsrisiko zugeordnet werden. Der Vergleich mit bereits erfolgten Invasionsprozessen auf der ganzen Welt zeigt eine weitgehende Übereinstimmung der Modellvorhersagen mit beobachteten Dynamiken. Einen besonderen Risikoschwerpunkt stellt dabei der südost- und ostasiatische Raum dar mit Singapur, Busan (Korea) und einigen weiteren chinesischen und japanischen Häfen. Diese „hot spots“ zeichnen sich durch ein sehr hohes Schiffsaufkommen und ähnliche klimatische Bedingungen aus. Auch die Nordsee ist durch intensiven Schiffsverkehr gekennzeichnet. Allerdings herrschen hier im Vergleich zu vielen anderen im Schiffsnetzwerk relevanten Regionen niedrige Temperaturen, die den ortsfremden Arten das Überleben erschweren. Das Risiko einer Bioinvasion ist also in der Nordsee vergleichsweise gering. Die Modelle der Oldenburger Forscher zeigen allerdings für die Nordsee eine Hauptreiseroute der Bioinvasion auf: Arten, die ursprünglich von der Nordost-Küste der USA stammen, müssten den Berechnungen zufolge, vermehrt in der Nordsee vorkommen. Und tatsächlich stammen die meisten eingeschleppten Arten von dort.

Ausblick

Aufbauend auf den vorhandenen Erkenntnissen werden in der Arbeitsgruppe nun weitere Modelle entwickelt, die mehr spezifische Aussagen zulassen. Eine wichtige Fragestellung zielt darauf ab, was mit den eingeschleppten Arten geschieht nachdem sie das Schiff verlassen haben. Mit dem Fokus auf die Nordsee wird hierzu das Schiffsnetzwerk mit Strömungsmodellen gekoppelt, um die weitere Ausbreitung auf regionaler Ebene verfolgen zu können. In Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen der Biologie und dem Senckenberg Institut soll die Interaktion von eingeschleppten Arten mit einheimischen Organismen untersucht werden. Schließlich könnte das marine Schiffsnetzwerk mit anderen Transportnetzwerken wie Flugverbindungen oder Binnenschiffahrt verbunden werden, mit dem Ziel einer vollständigen Charakterisierung der Warenflüsse im globalen Welthandel.

the target area. Moreover, the intensity of shipping plays a crucial role – for each additional shipping movement raises the probability of a bioinvasion.

By means of this basic framework of data and mathematical formulas it is possible to distinguish the “superhighways” used by invasive species from the “byways”, on which fewer blind passengers are found. In the same way it is possible to assign a specific invasion risk-factor to every ship, every port, or every region, like the North Sea, for instance.

A comparison of already established invasion processes around the world reveals a broad agreement of the model predictions with observed dynamics. An especially high risk is posed by ships coming from South-East and East Asia and the ports of Singapore, Busan (Corea) and several Chinese and Japanese ports. These “hot spots” are high-density shipping areas which share similar climatic conditions. The North Sea, too, is a region of intensive shipping traffic. However, compared with other relevant regions within the international shipping network, temperatures here are lower, making it more difficult for alien species to survive. Hence, the risk of a bioinvasion in the North Sea is comparatively low. Notwithstanding, the models produced by the Oldenburg research team show that the North Sea constitutes a main traffic route and as such must be

susceptible to bioinvasions: Calculations indicate that species indigenous to the North-East coast of the United States should increasingly occur in the North Sea: And, indeed, most of the alien species actually do originate from there.

Outlook

Based on existing findings, the research team is now working on further models which will allow more specific predictions. An important issue to be addressed is what happens to the alien species once they leave the ships that brought them here? Focussing on the North Sea, the shipping network will be coupled with models of ocean currents in order to trace further dispersal on a regional level. Working together with other biologists and the Senckenberg Institute, the Oldenburg team will also carry out research on the interaction of alien species with indigenous organisms. Eventually it is intended to link up the marine shipping network with other transport networks like air traffic and inland navigation with the aim of obtaining a complete characterisation of flows of materials and goods in global trade.

Die Autoren The authors



Dr. Hanno Seebens, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, absolvierte das Studium der Ökologie in Essen und promovierte in Biologie an der Universität Konstanz. Seit 2008 arbeitet er in dem VW-Verbundprojekt „Komplexe Netzwerke - Seuchenausbreitung und Bioinvasion“ in der AG Mathematische Modellierung am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM).

Research assistant, Dr. Hanno Seebens, studied ecology in Essen and obtained his doctorate from the University of Constance. Since 2008 he has been a member of the joint project funded by the Volkswagen Foundation entitled „Epidemic spread and bioinvasion in complex transportation networks“ in the working group Mathematical Modelling at the Institute for Chemistry and Biology of the Marine Environment.



Prof. Dr. Bernd Blasius, Hochschullehrer für Mathematische Modellierung, forscht und lehrt seit 2007 am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM). Er studierte Physik an der Technischen Universität Darmstadt. Nach seiner Promotion 1997 in Darmstadt, arbeitete Blasius für drei Jahre an der Tel Aviv University, bevor er 2001 als Leiter einer Nachwuchsgruppe der Volkswagen Stiftung nach Deutschland an die Universität Potsdam zurückkehrte. Dort wurde er 2004 zum Junior-Professor am Institut für Physik ernannt. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Modellierung komplexer natürlicher Systeme an der Schnittstelle von Physik, Biologie und theoretischer Ökologie.

Prof. Dr. Bernd Blasius, professor for mathematical modelling, has been teaching and researching at the Institute for Chemistry and Biology of the Marine Environment since 2007. He studied physics at Darmstadt Technical University, where he was awarded his doctorate in 1997. Following this, he worked for three years at Tel Aviv University before returning to Germany in 2001 as a junior group leader funded by the Volkswagen Foundation at the University of Potsdam, where in 2004 he took up an appointment as junior professor at the Institute for Physics. His research focus is on the modelling of complex natural systems at the interface between physics, biology and theoretical ecology.