



Abschlussbericht zum 10. GAME-Projekt:

Erhöhen ungünstige Umweltbedingungen während des Transportes die Stresstoleranz mariner Invertebraten?

Einleitung

Das hier dargestellte Projekt ist im Bereich der Invasionsökologie angesiedelt und beleuchtet, ob der Transport durch anthropogene Vektoren das invasive Potential eingeschleppter Arten erhöhen kann. Ökologen vermuten, dass die Toleranz gegenüber Umweltstress eine der Schlüsseleigenschaften ist, die das Invasionspotenzial von Arten bestimmen. Dies wurde überzeugend durch die Ergebnisse des 7. GAME-Projektes bestätigt, in dem wir zeigen konnten, dass invasive Wirbellose im Allgemeinen resistenter gegenüber Umweltstress sind als taxonomisch verwandte und ökologisch ähnliche nicht-invasive Arten. Als Stressoren wurden in dieser Studie Aussüßung, Erwärmung und Sauerstoffmangel eingesetzt. Das daran anschließende 8. GAME-Projekt konnte weiterhin zeigen, dass invasive Populationen kosmopolitisch auftretender mariner Tiere und Pflanzen stresstoleranter sind als Populationen in deren jeweiligen Herkunftsgebieten. Zwei Modelle können diese zweite Beobachtung erklären: A) Während des Transports und in der frühen Etablierungsphase wird die Anzahl stresstoleranter Genotypen in den Gründerpopulationen durch die Selektion robuster Individuen erhöht;

B) Multiple Einschleppungen, wie sie unter anderem für die Strandkrabbe *Carcinus maenas* an der Ostküste der USA dokumentiert wurden (Roman 2006), erhöhen stetig die genetische Diversität invasiver Populationen und damit die Häufigkeit stressresistenter Genotypen. Während ein Test des zweiten Modells die Möglichkeiten von GAME übersteigt, kann das erste jedoch durch Experimente, die denen der genannten früheren GAME-Projekte ähneln, untersucht werden. Dieses Vorhaben wurde im 10. GAME-Projekt umgesetzt. An insgesamt 5 Standorten weltweit wurden zweiphasige Stressexperimente mit marinen Wirbellosen durchgeführt. Die erste Stressphase diente jeweils dazu, stresstolerante Individuen innerhalb einer zufällig ausgewählten Gruppe von Tieren zu selektieren, um dann in einer zweiten Stressphase zu prüfen, ob diese Selektion die mittlere Toleranz der Gruppe gegenüber dem gleichen Stressor - im Vergleich zu einer nicht vorbehandelten Gruppe - erhöht hat. Sollte sich ein solcher Unterschied einstellen wäre dies ein Beleg dafür, dass ungünstige Bedingungen während des Transportes, beispielsweise im Ballastwassertank eines Containerschiffes, die Stressresistenz mariner Wirbelloser erhöhen können. Dies wäre eine für unser Verständnis von Invasionsprozessen relevante Erkenntnis.

Materialien & Methoden

Standorte

Für das 10. GAME-Projekt konnten insgesamt 5 wissenschaftliche Partner gewonnen werden und die teilnehmenden Studenten arbeiteten daher an Meeresforschungsinstituten in Chile (Universidad Católica del Norte, Coquimbo), Brasilien (Universidade Federal Fluminense, Niterói), Portugal (Universidade de Lisboa, Lissabon), Finnland (Åbo Akademi University, Tvaerminne) und Indonesien (Bogor Agricultural University, Bogor) (Abbildung 1). An fast allen Standorten konnten Zweierteams aus je einem einheimischen und einem deutschen

Studenten gebildet werden. Lediglich in Finnland arbeitete ein deutscher Teilnehmer alleine an dem Projekt.



Abbildung 1: Standorte des 10. GAME-Projektes.

Versuchsorganismen

Es war unser Ziel an allen Standorten Arten aus der gleichen taxonomischen Großgruppe (Ordnung oder Familie) zu untersuchen, um die Vergleichbarkeit zu erhöhen. Darüber hinaus war eine Reihe von weiteren Kriterien für die Wahl ausschlaggebend:

1. Die Art sollte im Untersuchungsgebiet nicht gefährdet oder selten sein.
2. Die Art sollte im Untersuchungsgebiet heimisch sein, so dass man ausschließen kann, dass die untersuchte Population bereits einen Invasionsprozess durchlaufen hat.
3. Die Art sollte leicht zu sammeln, und unter Laborbedingungen gut zu halten sein.
4. Die Art - oder zumindest die taxonomische Gruppe zu der sie gehört - sollte für ihr invasives Potential bekannt sein.
5. Es sollte Belege dafür geben, dass die Art - oder ähnliche Arten aus der gleichen taxonomischen Gruppe - in Ballastwassertanks oder an Schiffsrümpfen angeheftet transportiert wird.

Zwei Gruppen von marinen Wirbellosen erfüllten diese Kriterien an allen Standorten: Muscheln aus der Familie der Mytilidae (Miesmuscheln) und Krebstiere aus den Ordnungen der Decapoda (Zehnfußkrebse) und der Isopoda (Asseln). Daher wurden an allen Standorten je eine Muschel- und eine Krebsart für die Versuche ausgewählt, im Feld gesammelt und im Labor gehältert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Das 10. GAME-Projekt in der Übersicht: Standorte (alphabetisch nach Ländernamen), Versuchsorganismen und gewählte Stressoren. Der erste lateinische Name pro Standort bezeichnet jeweils die Muschel- und der zweite die untersuchte Krebsart.

Standort	Art	Stressor
Nitéroi (Brasilien)	<i>Perna perna</i>	Temperaturerhöhung
	<i>Pachygrapsus transversus</i>	
Coquimbo (Chile)	<i>Semimytilus algosus</i>	Temperaturerhöhung
	<i>Romaleon polyodon</i>	
Tvaerminne (Finnland)	<i>Mytilus trossulus</i>	Temperaturerhöhung
	<i>Idotea baltica</i>	
Bogor (Indonesien)	<i>Perna viridis</i>	Temperaturerhöhung
	<i>Penaeus vannamei</i>	
Cascais (Portugal)	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Temperaturerhöhung Aussüßung Luftexposition Temperaturerhöhung
	<i>Carcinus maenas</i>	

Stressexperimente

Ziel der Stressexperimente war es, den Transport in einem Ballastwassertank bzw. die Bedingungen an einem Schiffsrumpf während einer Passage durch mehrere Klimazonen zu simulieren. Hierbei mussten wir uns auf einen der einwirkenden Stressoren beschränken, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern. Unter realen Transportbedingungen kann natürlich eine Vielzahl von Stressoren gleichzeitig oder nacheinander auf die Tiere einwirken. Dies sind beispielsweise: 1. Wärmestress, 2. Sauerstoffmangel, 3. Aussüßung, 4.

mechanischer Stress, 5. toxische Substanzen wie Öle und Schwermetalle, 6. Sedimentation und 7. Trockenfallen.

Um die Versuchsbedingungen an den verschiedenen Standorten zu standardisieren, haben wir uns im Vorfeld der Experimente auf ein Modellszenario verständigt. Dies war eine Schiffspassage von Sydney, Australien, nach Hamburg, Deutschland. Bei einer solchen Reise durchquert ein Schiff mehrere Klimazonen und die Temperatur des umgebenden Wassers steigt zunächst langsam an, erreicht dann in der Nähe des Äquators ein Maximum, und fällt dann wieder ab. Temperaturanomalien wie sie in Äquatornähe durch den Auftrieb von Tiefenwasser entstehen können, haben wir hierbei außer Acht gelassen. Aufgrund der Allgemeingültigkeit dieses Stressors und auch aufgrund der Tatsache, dass er sich leicht im Labor simulieren lässt, haben wir Erwärmung als den zentralen abiotischen Umweltstress für unsere Versuche gewählt. Lediglich in Portugal wurden noch zwei weitere Stressoren verwirklicht. Auch die zeitliche Länge der Stressphasen (bis zu 3 Wochen) und die absolute Temperaturveränderung (anstieg bis maximal 32° C/Indonesien bis 37°C) während des Versuchs wurden jeweils einer transozeanischen Schiffspassage, die den Äquator kreuzt, nachempfunden. Die thermischen Ausgangsbedingungen waren dabei durch den Standort vorgegeben, so dass die Simulation entweder in der kalttemperierten Zone (Finnland), in der warmtemperierten Zone (Portugal) oder in den Subtropen (Chile, Brasilien) begann. Lediglich in Indonesien musste der Versuchsansatz leicht abgewandelt werden, da die Tiere dort ja bereits an tropische Wassertemperaturen angepasst sind. Trotz aller notwendigen Kompromisse mit Blick auf die Natürlichkeit der Versuchsbedingungen, ist unsere Studie daher durchaus realistisch und ihre Ergebnisse sind auf reale Prozesse während des Transports von Arten über das Meer übertragbar.

Wahl der Stresstärke

Da sich die Toleranzen der einzelnen Arten gegenüber einer Erwärmung des Umgebungswassers unterscheiden, wurden diese in Vorversuchen ermittelt. Ziel war es dabei eine Stresstärke zu finden, bei der innerhalb von 2-3 Wochen eine Mortalität von maximal 80 Prozent in der Versuchsgruppe auftritt. Dies war an allen Standorten (außer Indonesien) in einem Temperaturbereich von 27 - 32° C der Fall.

Zusätzliche Stressoren

Neben dem oben beschriebenen Hauptexperiment wurden an einigen Standorten Zusatzexperimente mit anderen Stressregimen durchgeführt. In Portugal wurde die Miesmuschel *Mytilus galloprovincialis*, neben dem thermischen Stress, zusätzlich auch Brackwasserbedingungen, wie sie in Häfen oder in Flussmündungen herrschen, und, in einem weiteren unabhängigen Experiment, einer Phase des Trockenfallens ausgesetzt. Der letztgenannte Stress kann auch während einer Schiffspassage auftreten, beispielsweise wenn Ladung gelöscht wird und das Schiff seinen Tiefgang ändert. Schiffsbewuchs der vorher unter das Wasserlinie lag, ist dann der Luft ausgesetzt. Zudem tritt ein solcher Stress beim Transport von Muscheln über Land auf, wenn diese beispielsweise für Aquakulturzwecke versandt werden. Ein ähnliches Szenario wurde auch in Indonesien realisiert. Hier wurde die Garnele *Penaeus vannamei* für kurze Zeit einer sehr hohen Temperatur (41° C) ausgesetzt, wie sie Tiere erfahren können die, wiederum für Aquakulturzwecke, über Land transportiert werden.

Versuchsdesign

Die Studie umfasste an allen Standorten zwei experimentelle Gruppen. Der sprachlichen Einfachheit halber werden diese im Folgenden als Behandlungsgruppe und Kontrolle bezeichnet. Die erste Gruppe von Tieren (Behandlungsgruppe) wurde dabei, nach einer Akklimatisierung an die Laborbedingungen, einer ersten Stressphase ausgesetzt. Während dieser wurde die Umgebungstemperatur schrittweise (2 - 4° C pro 24 h) erhöht, bis die in den

Vorversuchen ermittelte Maximaltemperatur erreicht war. Dies wurde dann gehalten bis sich die anvisierte Mortalität nahezu eingestellt hatte und danach wurde sie schrittweise wieder heruntergefahren. Dann wurden die überlebenden Individuen für maximal 3 Wochen unter Normalbedingungen gehalten, damit sie sich von der Stresseinwirkung erholen konnten. Danach wurden sie der gleichen Behandlung erneut ausgesetzt. Gleichzeitig hierzu wurde aber auch eine weitere Gruppe gestresst, die vorher keiner Stressbehandlung erfahren hatte (Kontrolle). Der Stichprobenumfang für beide Gruppen lag in allen Experimenten zwischen 15 und 20 Tieren. In beiden Gruppen wurde die Mortalitätsrate während der 2. Stressbehandlung als Antwortvariable erhoben. Ein statistischer Vergleich der beiden Raten gab dann Aufschluss, ob es zu einer Veränderung der Stresstoleranz in Folge der ersten Stressbehandlung kam. Das experimentelle Design ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

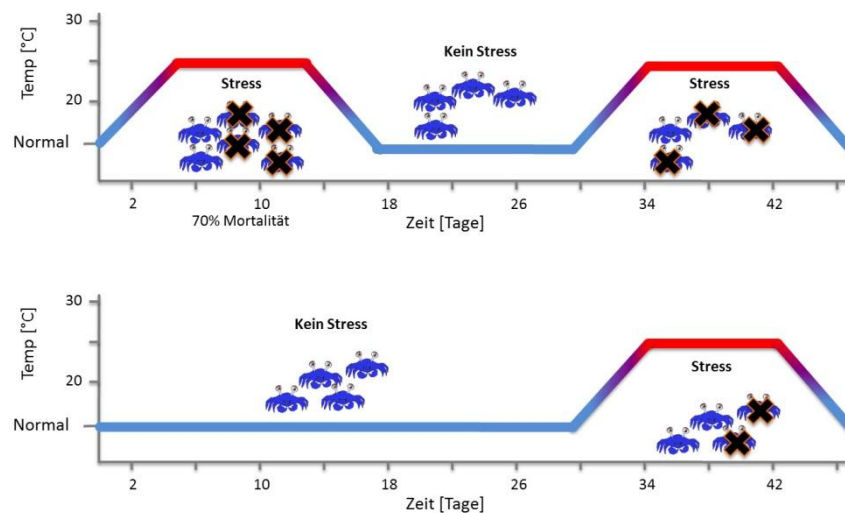


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns und des Versuchsablaufs.

Eine weitere Gruppe von Tieren diente dazu die natürliche Mortalität unter Laborbedingungen (Hintergrundmortalität) zu erfassen. Diese wurde in den statistischen Auswertungen jedoch nicht berücksichtigt.

Versuchsaufbau

An allen Stationen wurden die Experimente entweder in Laborräumen (Brasilien, Portugal, Finnland, Indonesien) oder in Versuchsbecken unter freiem Himmel (Chile) durchgeführt. Die

funktionalen Einheiten des Experiments, die später auch für die Statistik relevanten Replikate, waren Plastikbehälter mit einem Volumen von 1 - 5 l. In diesen befand sich jeweils ein Versuchstier. Durch diese Anordnung konnte ausgeschlossen werden, dass die Tiere miteinander interagieren, wodurch die Unabhängigkeit der Replikate gewährleistet wurde. Dies ist für die statistische Auswertung von Überlebensdaten von zentraler Bedeutung. Um die erwähnten Versuchseinheiten auf die angestrebte Umgebungstemperatur zu erwärmen, wurden sie in Wasserbäder gestellt, die mittels regelbarer Aquarienheizstäbe erwärmt wurden. Über Messfühler können solche Geräte angestrebte Temperaturregime mit einer Genauigkeit von ca. 1°C einregeln. Umwälzpumpen in den Wasserbädern verhinderten die Ausbildung von Temperaturgradienten. Um die Ansammlung von Stoffwechselendprodukten zu vermeiden, wurde das Wasser in den Versuchsbehältern alle ein bis zwei Tage ausgetauscht. An den meisten Standorten wurde zu dem noch eine Belüftung mit Druckluft eingerichtet, so dass die Sauerstoffkonzentration in den Behältern konstant nahe an der Sättigungsgrenze gehalten wurde. An allen Standorten wurden zudem der Sauerstoffgehalt und auch die Konzentration von Ammonium regelmäßig kontrolliert, um das Überschreiten kritischer Werte zu verhindern.

Statistische Auswertung

Die Daten zu den Überlebensraten wurden mit gängigen Methoden der Überlebensanalyse (Survival Analysis) ausgewertet. Hierzu wurden in der Hauptsache einfache Gruppenvergleiche zwischen zwei oder mehr als zwei Gruppen (Log-Rang Testverfahren) oder aber komplexere Modelle mit weiteren Kovariaten (z.B. die Körpergröße der Tiere) verwandt. Letztere waren Cox-Regressionsmodelle zur Modellierung von Überlebensdaten mit kategorialen und kontinuierlichen Prädiktoren. Die graphische Darstellung erfolgt mit Hilfe sogenannter Kaplan-Meier Kurven, die den relativen Anteil der überlebenden Tiere als Funktion der Zeit angeben.

Ergebnisse

Die in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse waren nicht einheitlich, trotzdem zeigt der Vergleich über alle Standorte hinweg ein klares Bild.

Einfluss der Transportsimulation auf die Stresstoleranz von Miesmuscheln

Im Hauptexperiment, in dem Erwärmung als Stressor eingesetzt wurde, fand sich nur an einem Standort ein signifikanter Unterschied zwischen den unterschiedlich vorbehandelten Gruppen. Im Falle der in Chile untersuchten Art *Semimytilus algosus* waren die Muscheln, die bereits einmal einem Stressregime ausgesetzt waren, signifikant robuster als Tiere, die keiner solchen Vorbehandlung ausgesetzt wurden. Der Unterschied macht sich vor allem in der medianen Lebensdauer bemerkbar. In der Kontrollgruppe waren bereits nach 9 Tagen 50% der Tiere gestorben, während dies in der Behandlungsgruppe erst nach 12 Tagen der Fall war (Abbildung 3). Nach 18 Tagen waren in beiden Gruppen nur noch 10% der Tiere am Leben.

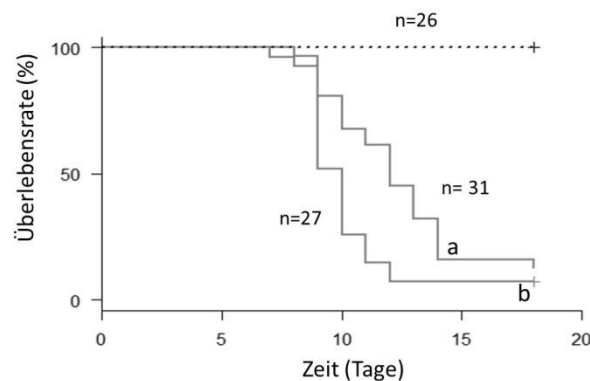


Abbildung 3: Einfluss der Transportsimulation (Wärmestress) auf die Toleranz gegenüber einem zweiten Stressereignis bei *Semimytilus algosus* (Chile). Die Buchstaben geben die Versuchsgruppen an: a = Behandlungsgruppe, b = Kontrolle. n bezeichnet die Anzahl der Replikate pro Gruppe. Die

gepunktete Linie zeigt die Mortalität einer Referenzgruppe, die zu keinem Zeitpunkt einem Stress ausgesetzt war. Die Gruppen a und b unterscheiden sich signifikant (Log-Rang Test: $p \leq 0.01$).

Zusätzlich hierzu wurden in Portugal in den Versuchen mit anderen Stressoren (Aussüßung, Trockenfallen) zwei weitere signifikante Ergebnisse gefunden, bei denen ebenfalls die Tiere der Behandlungsgruppe signifikant robuster waren als Artgenossen in der Kontrollgruppe (Abbildung 4 und 5). Im Falle der Aussüßung war die Effektstärke noch etwas größer als bei den Versuchen in Chile: hier waren 50% Mortalität in der Kontrollgruppe bereits nach 6 Tagen erreicht, während dies bei den Tieren der Behandlungsgruppe erst nach 10 Tagen der Fall war (Abbildung 4). Bei der Luftexposition wurden im gesamten Experiment keine 50% Mortalität erreicht, jedoch zeigte die Kontrollgruppe nach 4 Tagen 40% Mortalität, während in der Behandlungsgruppe zu diesem Zeitpunkt noch kein Tier gestorben war (Abbildung 5).

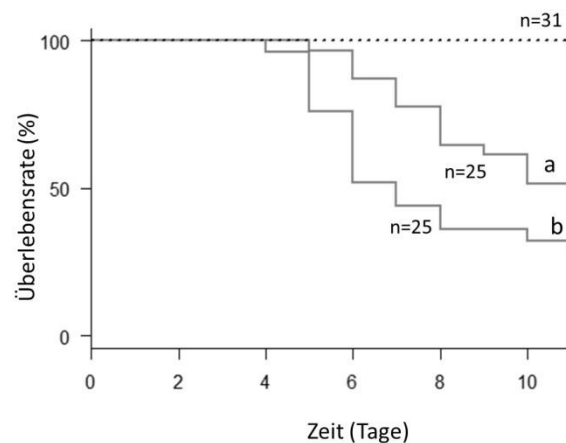


Abbildung 4: Einfluss der Transportsimulation (Aussüßung) auf die Toleranz gegenüber einem zweiten Stressereignis bei *Mytilus galloprovincialis* (Portugal). Die Buchstaben geben die Versuchsgruppen an: a = Behandlungsgruppe, b = Kontrolle. n bezeichnet die Anzahl der Replikate pro Gruppe. Die gepunktete Linie zeigt die Mortalität innerhalb einer Referenzgruppe, die zu keinem Zeitpunkt einem Stress ausgesetzt war. Die Gruppen a und b unterscheiden sich signifikant (Log-Rang Test: $p \leq 0.05$).

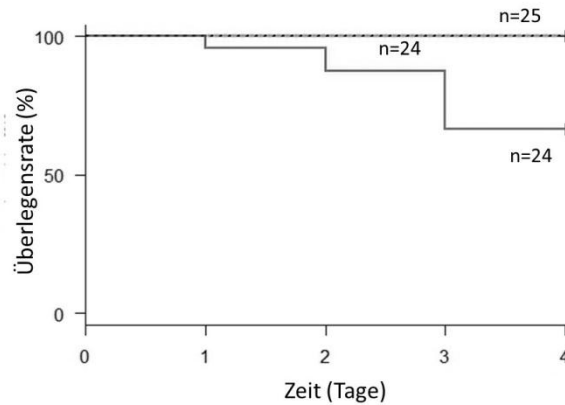


Abbildung 5: Einfluss der Transportsimulation (Trockenfallen) auf die Toleranz gegenüber einem zweiten Stressereignis bei *Mytilus galloprovincialis* (Portugal). n bezeichnet die Anzahl der Replikate pro Gruppe. Die gepunktete Linie zeigt die Mortalität innerhalb einer Referenzgruppe, die zu keinem Zeitpunkt einem Stress ausgesetzt war. Genau darüber liegt die Linie für die Behandlungsgruppe, die ebenfalls keine Mortalität zeigte. Die Gruppen a und b unterscheiden sich signifikant (Log-Rang Test: $p \leq 0.001$).

In allen weiteren Experimenten ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Die Ergebnisse sind hier nicht dargestellt.

Einfluss der Transportsimulation auf die Stresstoleranz von Krebstieren

Im Falle der Krebse, die einheitlich nur einer Wärmebehandlung ausgesetzt wurden, fanden sich nach der Vorbehandlung nur an einem Standort signifikante Unterschiede in der Stresstoleranz. Dies jedoch in zwei unabhängigen Experimenten: In Indonesien wurde die Garnele *Penaeus vannamei*, die ein wichtiger Aquakulturorganismus ist, einem Langzeit- sowie einem Kurzzeitstress ausgesetzt. Im Falle des ersten Experimentes war die applizierte Temperaturerhöhung moderat (Maximaltemperatur 37° C), während sie im zweiten Experiment stark war (Maximaltemperatur 41°C). In beiden Fällen waren die Tiere der Behandlungsgruppe toleranter gegenüber dem Stress als Individuen der Kontrollgruppe (Abbildung 6 und 7). Im ersten Versuch wurden in der Kontrollgruppe nach 10 Tagen 50% Mortalität erreicht, während dies in der Behandlungsgruppe auch nach 13 Tagen, als der Versuch beendet wurde, noch nicht der Fall war. Es ist aber anzunehmen, dass, wenn der

Versuch weiter geführt worden wäre, diese nach 14 oder 15 Tagen erreicht gewesen wäre (Abbildung 6). Im zweiten Versuch waren in der Kontrollgruppe nach 22 Stunden alle Individuen gestorben, während in der Behandlungsgruppe auch nach 50 Stunden, als der Versuch beendet wurde, noch keine 50% Mortalität erreicht waren. In allen anderen Versuchen ergab sich kein Unterschied zwischen den Behandlungsgruppen. Diese Ergebnisse sind hier nicht dargestellt.

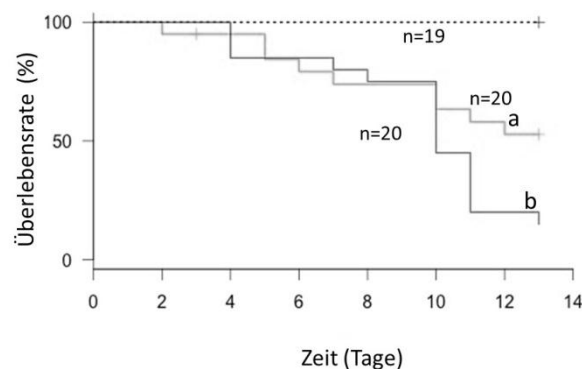


Abbildung 6: Einfluss der Transportsimulation (Wärmestress) auf die Toleranz gegenüber einem zweiten Stressereignis bei *Penaeus vannamei* (Indonesien). Die Buchstaben geben die Versuchsgruppen an: a = Behandlungsgruppe, b = Kontrolle. n bezeichnet die Anzahl der Replikate pro Gruppe. Die gepunktete Linie zeigt die Mortalität innerhalb einer Referenzgruppe, die zu keinem Zeitpunkt einem Stress ausgesetzt war. Die Gruppen a und b unterscheiden sich signifikant (Log-Rang Test: $p \leq 0.05$).

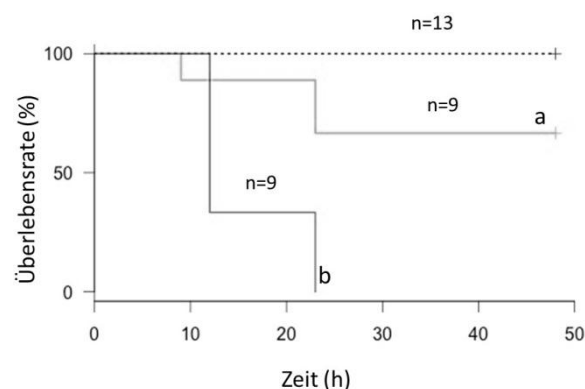


Abbildung 7: Einfluss der Transportsimulation (Wärmestress) auf die Toleranz gegenüber einem zweiten Stressereignis bei *Penaeus vannamei* (Indonesien). Die Buchstaben geben die Versuchsgruppen an: a = Behandlungsgruppe, b = Kontrolle. n bezeichnet die Anzahl der Replikate pro Gruppe. Die gepunktete Linie zeigt die Mortalität innerhalb einer Referenzgruppe, die zu keinem

Zeitpunkt einem Stress ausgesetzt war. Die Gruppen a und b unterscheiden sich signifikant (Log-Rang Test: $p \leq 0.05$).

Diskussion

In insgesamt 5 von 13 Versuchen (~40%) fand sich ein Effekt der Transportsimulation auf die Stresstoleranz der untersuchten Tiere. Dabei hatte dieser immer die gleiche Richtung: die vorgestressten Individuen waren robuster als vorher nicht behandelte Artgenossen. In keinem Falle fand sich der umgekehrte Effekt. Daher kann die Nullhypothese, dass Transportbedingungen bzw. transportähnliche Bedingungen keinen Einfluss auf die Stresstoleranz mariner Wirbelloser haben, deutlich abgelehnt werden. Die Effektstärken waren zwischen den Versuchen unterschiedlich. In den meisten Fällen lag der Unterschied in der medianen Überlebenszeit jedoch bei 3-4 Tagen. Dies erscheint zunächst gering, kann aber bei Invasionsprozessen eine relevante Rolle spielen. Auf ihrem Weg in ein neues Habitat müssen marine Arten mehrere physiologische und ökologische Hürden überwinden. Nach dem Transport, der in der Regel mit ungünstigen Bedingungen einhergeht, ist die Ankunft im neuen Habitat ein weiterer kritischer Moment, in dem ein Invasionsprozess zum Stoppen kommen kann. Auch in dieser Phase ist ein eingeschleppter Organismus oft mit ungünstigen Lebensbedingungen konfrontiert, die ähnlicher oder anderer Natur sein können als während des Transports. Beispielsweise weisen Hafenhabitate, die in der Regel die Orte sind an denen die transportierten Organismen in eine neue Umwelt entlassen werden, oft eine geringe Salinität auf (durch Süßwassereintrag oder weil sie in Flussmündungen liegen), sind stark mit Umweltgiften belastet und haben hohe Sedimentationsraten. Hinzu kommt noch der Konkurrenz- oder Frassdruck durch heimische Arten. Damit eine Invasion in ihre nächste Phase gehen kann (die Etablierung im neuen Lebensraum), muss dieser Moment der Ankunft überlebt werden. Eine während des Transportes erworbene Stresstoleranz kann hier einen entscheidenden Vorteil darstellen und Invasionen stark begünstigen. Dabei spielt auch eine

Rolle, dass es bei der Ausbildung von Toleranzen zu sogenannten Kreuztoleranzen kommen kann. Das bedeutet, dass eine erworbene Toleranz nicht nur die Resistenz gegenüber dem Stress erhöht, der sie induziert hat, sondern auch gegenüber anderen Stressoren. So kann eine durch Wärmestress erworbene Toleranz auch eine Resistenz gegenüber Salzgehaltsschwankungen vermitteln. Dies hängt größtenteils damit zusammen, dass die zelluläre Antwort auf Umweltstress in vielen Fällen über die Synthese von Proteinen läuft, deren Funktionsweise sehr allgemein ist und den Einfluss vieler verschiedener Stressoren kompensieren kann. Ein bekanntes Beispiel sind hier die Hitzeschockproteine, deren Aufgabe es ist, denaturierte Proteine zu ‚reparieren‘. Dieser Mechanismus wirkt bei vielen verschiedenen Stressoren in gleicher Weise.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass dieses GAME-Projekt deutliche Belege dafür gefunden hat, dass der Transport durch anthropogene Vektoren das invasive Potential von marinen Wirbellosen erhöhen kann. Dies bedeutet, dass wir die Ausbreitung mariner Arten nicht nur dadurch begünstigen, dass wir sie transportieren, sondern auch dadurch, dass wir ihre Leistungsfähigkeit erhöhen. Nimmt man noch die Veränderung der genetischen Ausstattung von Populationen hinzu, die durch multiple Einschleppungen entstehen kann, wird deutlich, dass der Transport von Arten über das Meer nicht nur ihre Verbreitungsgrenzen verschiebt, sondern auch ihre Konkurrenzfähigkeit verändert. Es stellt sich die Frage, ob über diese Mechanismen nicht ‚Superpopulationen‘ entstehen können, deren invasives Potential um ein vielfaches größer ist als das von Populationen der gleichen oder anderer Arten, die - aus welchen Gründen auch immer - nicht vom Menschen transportiert werden.

Die Frage, welcher Mechanismus hinter der erworbenen Stresstoleranz steckt, muss im Rahmen dieses Projektes ungeklärt bleiben. Dies ist den begrenzten logistischen Möglichkeiten eines GAME-Projektes geschuldet. Zwei Mechanismen kommen dabei in Frage: 1. Die Selektion stresstoleranter Genotypen während der ersten Versuchsphase. Dies

wäre ein Effekt dessen Resultat dauerhaft in einer Population verankert wäre und der auch nicht reversibel ist. 2. Die sogenannte Stressabhärtung. Hierbei passt sich ein Individuum physiologisch an herrschende Stressbedingungen an. Dies geschieht beispielsweise über die vermehrte Synthese von Hitzeschockproteinen. Dieser Effekt ist reversibel, jedoch wirkt er auch nach Abklingen des Stresses noch eine gewisse Zeit nach. Auch eine transitive Stresstoleranz kann einen Vorteil im Invasionsprozess darstellen, wenn sie beispielsweise mit dem Moment Ankunft im neuen Habitat zusammenfällt. Die Zeitspanne bis ein solcher erworbener Abhärtungseffekt abklingt liegt normalerweise im Bereich weniger Tage bis weniger Wochen. Wir haben dem in unserem experimentellen Design Rechnung getragen, in dem wir zwischen die Stressphasen eine Erholungsperiode von mehreren Wochen geschaltet haben. Dadurch sind Abhärtungseffekte als Erklärung für den beobachteten Effekt weitestgehend auszuschließen. Allerdings haben wir keine empirischen Daten, die belegen, dass dies auch tatsächlich der Fall war. Dies wäre nur möglich gewesen, wenn wir den Titer an Hitzeschockproteinen in den Tieren in regelmäßigen Abständen gemessen hätten. Dies war jedoch technisch nicht möglich.

Auch der direkte Nachweis einer Selektion robuster Genotypen hätte den zeitlichen Rahmen eines GAME-Projektes gesprengt. Hierzu wären Experimente mit der F1 oder F2 Generation nötig gewesen und diese sind mit Makroinvertebraten, die saisonale Reproduktionszyklen haben, nicht innerhalb weniger Monate zu realisieren. Daher bleibt die Klärung der unserer Beobachtung zugrundeliegenden Mechanismen zukünftigen Studien vorbehalten. Dennoch denken wir, dass dieses Projekt außerordentlich erfolgreich war und unser Verständnis von Invasionsprozessen im Meer entscheidend vorangebracht hat. Die Ergebnisse werden zurzeit für die Publikation in einer internationalen Fachzeitschrift vorbereitet. Wir danken der Lighthouse Foundation für die großzügige Unterstützung, die dieses internationale Projekt erst möglich gemacht hat.



Die Teilnehmer des 10. GAME Projektes: Marie Garcia (hinten), Lisa Oberschelp, Armin Fabritzek, Miguel Penna, Filipa Paiva, Yasser Ahmed, Daniel Wohlgemuth (mitte), Sandra Eichhorn, Felipe Ribeiro (vorne).