

## Prädatoren, Parasiten und Geduld: Neue Erkenntnisse zur Wirkung von Pestiziden auf Amphibien

BENEDIKT R. SCHMIDT<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Zoologisches Institut, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich, Schweiz, bschmidt@zool.unizh.ch; <sup>2</sup>KARCH, Passage Maximilien-de-Meuron 6, CH-2000 Neuchâtel, Schweiz

### Predators, parasites and patience: New results on the effects of pesticides on amphibians

Recent research shows that pesticides are far more dangerous to amphibians than standard toxicity tests suggest. Experiments done under ecologically more realistic conditions show that pesticides can lead to high mortality even at relatively low concentrations when combined with other stressors. Interactions with predators and parasites are especially likely to increase negative effects of pesticides on amphibians. Other studies find a variety of direct, indirect and delayed effects of pesticides. Under some ecological conditions, even positive effects of pesticides may occur (for example, when pesticides kill predatory insects). Nevertheless, the accumulated evidence clearly suggests that pesticides contribute to the global decline of amphibians.

**Key words:** Amphibians, pesticide, parasite, mortality, sublethal effects, interactive effects, agriculture.

### Zusammenfassung

Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass Pestizide wesentlich gefährlicher für Amphibien sind als dies die standardisierten Toxizitätstests suggerieren. Experimente unter ökologisch realistischeren Bedingungen zeigen, dass Pestizide in Kombination mit anderen Stressfaktoren schon bei geringen Konzentrationen zu hoher Mortalität führen können. Vor allem Interaktionen mit Prädatoren und Parasiten können die Toxizität von Pestiziden erhöhen. Es sind aber auch zahlreiche indirekte und zeitlich verzögerte Effekte beobachtet worden. Je nach ökologischer Situation sind auch positive Effekte für Amphibien denkbar, etwa wenn die Pestizide räuberische Insekten töten. Trotzdem lassen die neueren Studien in ihrer Gesamtheit wenig Zweifel offen, dass Pestizide am globalen Rückgang der Amphibien mitbeteiligt sind.

**Schlüsselbegriffe:** Amphibien, Pestizide, Parasiten, Mortalität, sublethale Effekte, interaktive Effekte, indirekte Wirkung, Landwirtschaft.

### Einleitung

Pestizide, Herbizide, Insektizide und ähnliche Substanzen sollen unerwünschte Lebewesen abtöten. Diese Aufgabe erfüllen sie in der Regel effizient, aber spätestens seit RACHEL CARSONS (1962) »Silent Spring« ist klar, dass auch viele Tiere und Pflanzen von Pestiziden betroffen sind, die nicht die Zielorganismen sind. Ein Grund dafür ist, dass Pestizide oft auch fernab der Orte auftreten, an denen sie angewendet wurden.

Das Ziel dieser kurzen und nicht umfassenden Übersichtsarbeit ist es, neuere Forschungsergebnisse zum Spannungsfeld Amphibien und Pestizide vorzustellen. Diese neuen Ergebnisse zeigen unter anderem, dass Pestizide für Amphibien potenziell wesentlich toxischer sind, als dies die klassischen standardisierten Toxizitäts-Tests suggerieren (SIH et al. 2004). Zwar sind toxische Effekte von Pestiziden auf Amphibien schon lange bekannt (etwa SANDERS 1970, COOKE 1971), aber in den letzten Jahren wurde das Thema vermehrt untersucht, insbesondere auch die vielfältigen direkten und indirekten Wirkungen von Pestiziden (BLAUSTEIN et al. 2003, BOONE & BRIDGES 2003). Der wesentliche Fortschritt bestand darin, das »Öko« in der Ökotoxikologie stärker zu gewichten, also toxikologische Studien vermehrt unter ökologisch realistischeren Bedingungen durchzuführen (RELYEA & HOVERMAN 2006, ROHR et al. 2006a). In diesem Artikel verwende ich den Begriff »Pestizide« und meine damit entweder spezifische Produkte (nachzulesen in den jeweiligen Originalarbeiten) oder sonst Herbizide, Insektizide, Fungizide, etc. generell.

### **Prädatoren und die Wirkung von Pestiziden auf Amphibien**

Traditionellerweise wird die Toxizität einer Substanz, beispielsweise ein neues Pestizid, in standardisierten Tests im Labor geprüft. Das hat Vorteile, denn ein solches experimentelles Design erlaubt es, die Toxizität des Pestizids präzise zu quantifizieren. Der Ansatz hat aber auch den großen Nachteil, dass er Interaktionen zwischen Stressfaktoren nicht aufdeckt. Gerade die Forschung zum »global amphibian decline« zeigt mehr als deutlich, dass Interaktionen zwischen Stressfaktoren die Regel und nicht die Ausnahme sind (BLAUSTEIN & KIESECKER 2002).

Verschiedene Autoren konnten zeigen, dass die Toxizität eines Pestizids von Interaktionen mit anderen Stressfaktoren abhängt. RICK A. RELYEA und Mitarbeitern gelang dieser Nachweis besonders klar. RELYEA (2003) zog in Experimenten Kaulquappen verschiedener Anurenarten im Labor auf und untersuchte dabei die Wirkung verschiedener Pestizidkonzentrationen. Eine Hälfte der Kaulquappen wurde dabei gleichzeitig einem simulierten Prädationsrisiko ausgesetzt (der Prädator konnte die Kaulquappen nicht fressen) während die andere Hälfte ohne Bedrohung durch einen Fressfeind aufwuchs. Das Resultat zeigte eindeutig, dass das simulierte Prädationsrisiko (in der Natur ein allgegenwärtiges Risiko: siehe z. B. VAN BUSKIRK & SCHMIDT 2000) die Toxizität massiv erhöhte (Abb. 1): Bei mittlerer Pestizidkonzentration überlebten ohne Prädator nahezu alle Kaulquappen, mit Prädator starben fast alle.

Pestizide haben aber nicht nur die Wirkung, dass sie auf Kaulquappen tödlich wirken können. Auch sublethale Effekte werden oft beobachtet (z. B. TÉPLITSKY et al. 2005, JOHANSSON et al. 2006). In vielen Fällen reduzieren Pestizide – alleine oder in Kombination mit weiteren Stressfaktoren – »nur« das Wachstum der Amphibien oder verändern das Verhalten, etwa die Fressrate (RELYEA & HOVERMAN 2006, ROHR et al. 2006a). Eine Reduktion der Wachstumsrate kann zu einer geringeren Metamorphosegröße führen, was die Überlebenschance als Jungtier an Land reduziert (SMITH 1987, ALTWEGG & REYER 2003). Damit sind potenziell negative Effekte eines Pestizids nur aufgeschoben aber nicht aufgehoben.

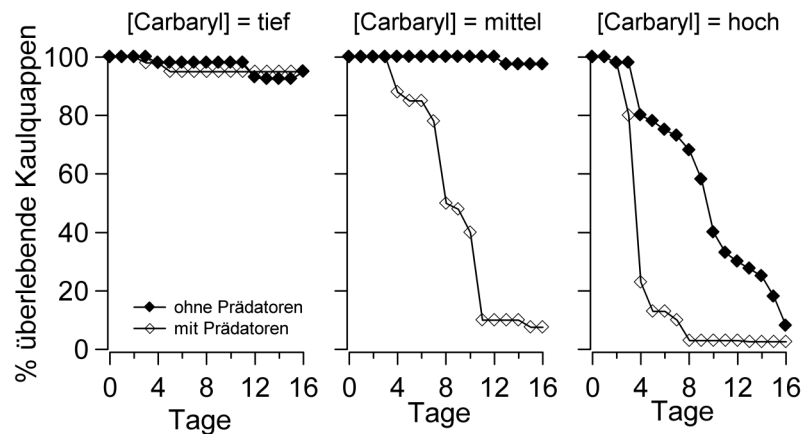


Abb. 1: Interaktiver Effekt der Konzentration des Pestizids Carbaryl (tief: 0,03 mg/l, mittel: 1,6 mg/l, hoch: 3,2 mg/l) und der An- bzw. Abwesenheit von Prädatoren (adulte *Notophthalmus viridescens*, weiße bzw. schwarze Symbole) auf das Überleben von Kaulquappen (*Rana catesbeiana*) im Experiment von RELYEA (2003; die Abbildung zeigt nur einen Teil der Resultate). Die Abbildung zeigt Mittelwerte. Bei tiefen Konzentrationen überleben nahezu alle Kaulquappen während bei hoher Konzentration fast alle Kaulquappen sterben. Bei mittlerer Konzentration sterben nur die Kaulquappen, die zusätzlich chemischen Signalen von Prädatoren ausgesetzt sind. Die Originaldaten aus dem Experiment wurden von RICK A. RELYEA (Universität Pittsburgh) zur Verfügung gestellt.

Interactive effect of the concentration of the pesticide Carbaryl (low: 0.03 mg/l, intermediate: 1.6 mg/l and high: 3.2 mg/l) and predator presence (adult *Notophthalmus viridescens*, open symbols) or absence (filled symbols) on tadpole (*Rana catesbeiana*) survival in the experiment of RELYEA (2003; the figure shows only a subset of the results). The figure shows mean values. At low concentration, nearly all tadpoles survive whereas at high concentration nearly all tadpoles die. At intermediate concentration, tadpoles die only when they are also exposed to cues from predators. Original data were provided by RICK A. RELYEA (University of Pittsburgh).

Durch Pestizide verursachte Änderungen im Verhalten können eine Fülle von Konsequenzen haben. Beispielsweise können dadurch Konkurrenzverhältnisse zwischen Arten verändert werden. Dies kann zur Folge haben, dass eine Art durch interspezifische Konkurrenz aus einem Lebensraum vertrieben wird. Wie RELYEA & HOVERMAN (2006) und ROHR et al. (2006a) beschreiben, sind etliche weitere indirekte Effekte von Pestiziden denkbar. Manche Pestizide können sich – wenigstens im Experiment – sogar positiv auf Amphibien auswirken, etwa wenn sie räuberische Insekten abtöten (RELYEA et al. 2005).

### Parasiten und die Wirkung von Pestiziden auf Amphibien

In den Landwirtschaftsgebieten der USA wurden in den letzten Jahren vermehrt deformierte Amphibien beobachtet (JOHNSON et al. 2003, JOHNSON & CHASE 2004). Dafür dürfte ein Zusammenspiel von Parasiten und Pestiziden verantwortlich sein. Wird eine Kaulquappe vom parasitischen Plattwurm *Ribeiroia ondatrae* befallen, so führt dies in der Regel zu schweren Deformationen der Beine. Parasitenbefall und pathologische Effekte sind natürliche Phänomene und gehören in natürliche Ökosysteme (HUDSON et al. 2006), aber der massive Anstieg der Anzahl deformierter Frösche wird von KIESECKER (2002) durch eine Belastung der Gewässer mit Pestiziden erklärt.

Gemäß KIESECKER (2002) können sich Kaulquappen unter Pestizideinwirkung nicht erfolgreich gegen Parasiten wehren, weil die Pestizide das Immunsystem schwächen. Deshalb weisen Kaulquappen in Gewässern, in welche Pestizide aus der Landwirtschaft gelangen, besonders oft Deformationen auf. Nebenbei sei hier erwähnt, dass JOHNSON & CHASE (2004) darauf hinweisen, dass Nährstoffe aus der Landwirtschaft zu einer Eutrophierung der Gewässer führen können. In eutrophierten Gewässern gedeihen wiederum die Schnecken besonders gut, welche *Ribeiroia ondatrae* als Zwischenwirt dienen. KOPRIVNIKAR et al. (2006) kamen zu dem Schluss, dass nur die Nähe zu Landwirtschaftsgebieten die Parasitenbelastung bei Kaulquappen des Laubfrosches *Hyla versicolor* plausibel erklären konnte. Andere potenzielle Faktoren wurden auch geprüft, hatten aber weit weniger Erklärungskraft.

Derartige interaktive Effekte zwischen Pestiziden und Krankheitserregern könnten weiter verbreitet sein als bisher gedacht, aber auch positive Effekte sind denkbar. So beobachteten FORSON & STORFER (2006) in ihren Experimenten, dass bei geringen Pestizidkonzentrationen Salamander der Art *Ambystoma macrodactylum* weniger mit Viren befallen waren und weniger an den Viren starben als in Kontrollbehandlungen ohne Pestizide. Wann Parasiten und Pestizide positiv und wann negativ interagieren, ist bisher noch nicht klar (RELYEA & HOVERMAN 2006).

### **Geduld und die Wirkung von Pestiziden auf Amphibien**

Pestizide können sich auch mit zeitlicher Verzögerung auf Amphibien auswirken. ROHR & PALMER (2005) zogen Larven des Salamanders *Ambystoma barbouri* auf und exponierten sie während der Larvalphase verschiedenen Pestizidkonzentrationen. Nach durchschnittlich 133 und 238 Tagen nach der Metamorphose (und damit auch dem letzten Zeitpunkt, dass die Salamander einem Pestizid ausgesetzt waren), wurde getestet, wie die Salamander auf einen Umweltstress reagieren. Im Experiment von ROHR & PALMER (2005) war dieser Stress Trockenheit (wie sie etwa im Sommer nach der Metamorphose im Landlebensraum der Salamander auftreten kann). Bei der simulierten Trockenheit verloren die Salamander umso mehr Masse, je höher die Pestizidkonzentration im Larvenstadium gewesen war (Abb. 2). Schon im Larvenstadium hatte das Pestizid die Salamander geschwächt (u. a. durch eine kleinere Körpergröße bei der Metamorphose: ROHR et al. 2004). Wäre das Experiment bei der Metamorphose abgebrochen worden, so hätte man den Pestizideffekt unterschätzt. Eine Folgestudie zeigte weitere Langzeiteffekte auf die Salamander, u. a. reduzierte Überlebenswahrscheinlichkeiten (ROHR et al. 2006b).

### **Feldstudien zur Wirkung von Pestiziden auf Amphibien**

Alle bisher diskutierten Studien sind Laborstudien oder Experimente, die in Mesokosmen (kleine künstliche, sich weitgehend selbst erhaltende »Ökosysteme« für experimentelle Zwecke) unter mehr oder weniger natürlichen Bedingungen gemacht wurden. Es ist daher unklar, ob und wie weit die Resultate auf die Situation in der freien Natur übertragbar sind. JOHANSSON et al. (2006) konnten in Laborexperimenten zwar

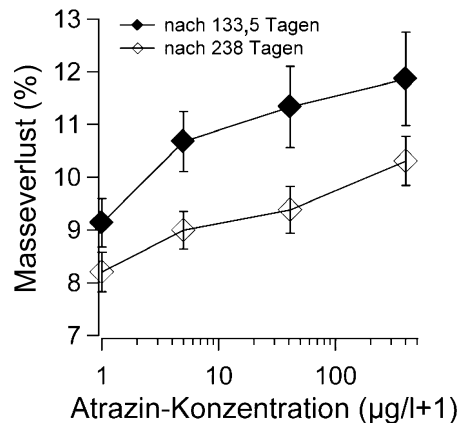


Abb. 2: Masseverlust von juvenilen Salamandern wegen Austrocknung in Abhängigkeit von der Pestizid-Exposition in der Larvenphase im Experiment von ROHR & PALMER (2005). Je höher die Pestizid-Konzentration während der Larvenphase, desto stärker der Masseverlust der juvenilen Salamander. Der Effekt schwächte sich mit zunehmendem Alter (133 Tage vs. 238 Tage nach der Metamorphose) ab. Die Abbildung zeigt Mittelwerte und Standardfehler. Die Originaldaten aus dem Experiment wurden von JASON R. ROHR (Penn State Universität) zur Verfügung gestellt.

Mass loss of juvenile salamanders (due to water loss) in relation to the exposure to pesticide at various concentrations during the larval phase in the experiment of ROHR & PALMER (2005). Salamanders that were exposed to higher pesticide concentrations during the larval phase lost more mass under experimental conditions in the juvenile stage. The effect was smaller when salamanders were older (133 vs. 238 days post metamorphosis). The figure shows means and standard errors. Original data were provided by JASON R. ROHR (Penn State University).

zeigen, dass Pestizide negative Effekte auf Kaulquappen des Grasfrosches haben können, aber nicht bei den Konzentrationen, wie sie in schwedischen Weihern gemessen wurden. RELYEA & HOVERMAN (2006) sind der Ansicht, dass Messungen der Pestizid-Konzentration in der Natur wenig aussagekräftig sind, weil z. B. nicht die Durchschnittswerte relevant sind, sondern eher Spitzenkonzentrationen – und diese werden kaum gemessen. Eine Extrapolation von Laborexperimenten auf die Wirkung in der Natur sollte auf jeden Fall mit Vorsicht erfolgen.

Untersuchungen in Kalifornien von CARLOS DAVIDSON (DAVIDSON 2004, DAVIDSON et al. 2001, 2002) haben gezeigt, dass Pestizide die plausibelste Erklärung für das Erlöschen zahlreicher Frosch-Populationen sind. Vor allem diejenigen Populationen sind verschwunden, die im Einflussbereich von Landwirtschaftsgebieten lagen (Details siehe SCHMIDT 2006). Aber auch die Resultate von DAVIDSON sind nicht verallgemeinerbar: JOHANSSON et al. (2005) fanden negative Effekte der Intensität landwirtschaftlicher Aktivität auf Abundanz, Verbreitung und genetische Diversität des Grasfrosches in Südschweden, aber positive Effekte intensiver Landwirtschaft in Nordschweden. In Südschweden dominieren Monokulturen in der intensiven Landwirtschaft während in Nordschweden intensive Landwirtschaft eher dazu führt, die »Monokultur borealer Wald« zu diversifizieren.

Es ist nahezu unmöglich wissenschaftlich unwiderlegbar zu beweisen, dass Pestizide kausal das Erlöschen von Amphibien-Populationen bewirken. Für diesen Nachweis braucht es zwingend Experimente an natürlichen Populationen. Ein Langzeitexperiment im Feld wäre notwendig, bei dem einige Amphibien-Populationen Pestiziden

ausgesetzt wären, andere aber nicht. Ein solches Experiment wäre ethisch fragwürdig. Daher wird man sich mit einer plausiblen Beweisführung begnügen müssen.

### **Nebenwirkungen von Pestizidforschung**

Wer die Nebenwirkungen von Pestiziden auf Amphibien untersucht, macht sich bei der Industrie nicht immer beliebt. Das haben verschiedene Forscher erfahren, die Wirkungen von Pestiziden auf Amphibien untersucht haben. So kritisiert etwa die Herstellerfirma Monsanto die Arbeiten von RELYEA auf ihrer Homepage. RELYEA (2006) musste seine Forschungsarbeiten auch gegen die Kritik von THOMPSON et al. (2006) verteidigen. THOMPSON et al. (2006) kritisierten mehrere Arbeiten von RELYEA heftig. Insbesondere sind sie der Ansicht, RELYEA würde die schädliche Wirkung von »Roundup« (ein Herbizid) auf Amphibien massiv übertreiben. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die selben Autoren (THOMPSON et al. 2004) zum Schluss kamen: »Overall, results of this tiered research program confirm that amphibian larvae are particularly sensitive to Vision [i.e., Roundup] herbicide and that these effects may be exacerbated by high pH or concomitant exposure with other environmental stressors.« (THOMPSON et al. 2004). Wieso sie in nur zwei Jahren ihre Einschätzung der Wirkung von »Roundup« auf Amphibienlarven völlig geändert haben, erklären THOMPSON et al. (2006) allerdings nicht.

HAYES (2004) beschreibt in seinem lesenswerten Artikel mit dem treffenden Titel »There is no denying this«, wie die Industrie auf seine Forschungsergebnisse reagiert hat. HAYES (2004) schreibt, dass die Studien von Seiten der Industrie zur Frage, ob »Atrazin« bei Fröschen eine Geschlechtsumwandlung auslöst, auf eine Art und Weise durchgeführt worden seien, dass sie letztlich keine Aussagekraft hätten. Außerdem würden sich Aussagen in Pressemitteilungen und in den zugehörigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen oft widersprechen. Weiter schreibt HAYES (2004), dass ein Zusammenhang bestünde zwischen der Herkunft der Forschungsgelder (von Seiten der Industrie oder unabhängige Quellen) und dem Resultat des Forschungsprojekts (ob eine Wirkung von »Atrazin« festgestellt wird oder nicht). Wenn HAYES (2004) mit seinen Aussagen recht hat, so muss man Forschungsergebnissen der Industrie zu Nebenwirkungen von Pestiziden grundsätzlich misstrauen.

### **Fazit**

Pestizide können sich direkt oder indirekt, sofort oder verzögert negativ auf Amphibien auswirken. Je nach ökologischer Situation sind auch positive Auswirkungen auf Amphibien denkbar. Welche Bedeutung haben Pestizide für Amphibien-Populationen? Die Zerstörung und Fragmentierung von Lebensräumen ist wohl die Hauptursache für den Rückgang der Amphibien, wenigstens in Europa. Auch wenn eine Vielzahl von direkten und indirekten positiven und negativen Effekten möglich ist, so lassen die neueren Forschungsergebnisse zur Wirkung von Pestiziden auf Amphibien in ihrer Gesamtheit wenig Zweifel offen, dass Pestizide beim Rückgang von Amphibien mitverantwortlich sind. Dies darf als gesichertes Erkenntnis gelten, selbst wenn der letzte wissenschaftliche Beweis noch aussteht.

## Dank

Dank geht an die »Fondation MAVA« und die Universität Zürich, insbesondere Prof. ULI REYER, für die Unterstützung meiner Arbeit, an BURKHARD THIESMEIER für die Durchsicht des Manuskripts und an JOSH VAN BUSKIRK für die Korrektur der englischen Zusammenfassung und der Abbildungslegenden. Besonderer Dank geht an JASON R. ROHR und RICK A. RELYEA dafür, dass sie mir ihre Rohdaten für die Abbildungen zur Verfügung gestellt haben.

## Literatur

- ALTWEGG, R. & H.-U. REYER (2003): Patterns of natural selection on size at metamorphosis in water frogs. – *Evolution* 57: 872–882.
- BLAUSTEIN, A. R. & J. M. KIESECKER (2002): Complexity in conservation: lessons from the global decline of amphibian populations. – *Ecology Letters* 5: 597–608.
- BLAUSTEIN, A. R., J. M. ROMANSIC, J. M. KIESECKER & A. C. HATCH (2003): Ultraviolet radiation, toxic chemicals and amphibian population declines. – *Diversity and Distributions* 9: 123–140.
- BOONE, M. D. & C. M. BRIDGES (2003): Effects of pesticides on amphibian populations. In: SEMLITSCH, R. D. (ed.): *Amphibian Conservation*: 152–167. – Washington (Smithsonian Institution Press).
- CARSON, R. (1962): *Silent Spring*. – Cambridge (Riverside Press).
- COOKE, A. S. (1971): Selective predation by newts on frog tadpoles treated with DDT. – *Nature* 229: 275–276.
- DAVIDSON, C. (2004): Declining downwind: amphibian population declines in California and historical pesticide use. – *Ecological Applications* 14: 1892–1902.
- DAVIDSON, C., H. B. SHAFFER & M. R. JENNINGS (2001): Declines of the California red-legged frog: climate, UV-B, habitat, and pesticide hypotheses. – *Ecological Applications* 11: 464–479.
- DAVIDSON, C., H. B. SHAFFER & M. R. JENNINGS (2002): Spatial tests of the pesticide drift, habitat destruction, UV-B, and climate-change hypotheses for California amphibian declines. – *Conservation Biology* 16: 1588–1601.
- FORSON, D. & A. STORFER (2006): Effects of atrazine and iridovirus infection on survival and life-history traits of the long-toed salamander (*Ambystoma macrodactylum*). – *Environmental Toxicology and Chemistry* 25: 168–173.
- HAYES, T. B. (2004): There is no denying this: defusing the confusion about atrazine. – *BioScience* 54: 1138–1149.
- HUDSON, P. J., A. P. DOBSON & K. D. LAFFERTY (2006): Is a healthy ecosystem one that is rich in parasites? – *Trends in Ecology & Evolution* 21: 381–385.
- JOHANSSON, M., H. PIHA, H. KYLIN & J. MERILÄ (2006): Toxicity of six pesticides to common frog (*Rana temporaria*) tadpoles. – *Environmental Toxicology and Chemistry* 25: 3164–3170.
- JOHANSSON, M., C. R. PRIMMER, J. SAHLSTEN & J. MERILÄ (2005): The influence of landscape structure on occurrence, abundance and genetic diversity of the common frog, *Rana temporaria*. – *Global Change Biology* 11: 1664–1679.
- JOHNSON, P. T. J. & J. M. CHASE (2004): Parasites in the food web: linking amphibian malformations and aquatic eutrophication. – *Ecology Letters* 7: 521–526.
- JOHNSON, P. T. J., K. B. LUNDE, D. A. ZELMER & J. K. WERNER (2003): Limb deformities as an emerging parasitic disease in amphibians: Evidence from museum specimens and resurvey data. – *Conservation Biology* 17: 1724–1737.
- KIESECKER, J. M. (2002): Synergism between trematode infection and pesticide exposure: A link to amphibian malformations in nature? – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S. A.* 99: 9900–9904.
- KOPRIVNIKAR, J., R. L. BAKER & M. R. FORBES (2006): Environmental factors influencing trematode prevalence in grey tree frog (*Hyla versicolor*) tadpoles in southern Ontario. – *Journal of Parasitology* 92: 997–1001.

- RELYEA, R. A. (2003): Predator cues and pesticides: A double dose of danger for amphibians. – *Ecological Applications* 13: 1515–1521.
- RELYEA, R. A. (2006): The impact of insecticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities – Response. – *Ecological Applications* 16: 2027–2034.
- RELYEA, R. & J. HOVERMAN (2006): Assessing the ecology in ecotoxicology: a review and synthesis in freshwater systems. – *Ecology Letters* 9: 11575–1171.
- RELYEA, R. A., N. M. SCHOEPPNER, & J. T. HOVERMAN (2005): Pesticides and amphibians: The importance of community context. – *Ecological Applications* 15: 1125–1134.
- ROHR, J. R., A. A. ELSKUS, B. S. SHEPHERD, P. H. CROWLEY, T. M. MCCARTHY, J. H. NIEDZWIECKI, T. SAGER, A. SIH & B. D. PALMER (2004): Multiple stressors and salamanders: Effects of an herbicide, food limitation, and hydroperiod. – *Ecological Applications* 14: 1028–1040.
- ROHR, J. R. & B. D. PALMER (2005): Aquatic herbicide exposure increases salamander desiccation risk eight months later in a terrestrial environment. – *Environmental Toxicology and Chemistry* 24: 1253–1258.
- ROHR, J. R., J. L. KERBY & A. SIH (2006a): Community ecology as a framework for predicting contaminant effects. – *Trends in Ecology & Evolution* 21: 606–613.
- ROHR, J. R., T. SAGER, T. M. SESTERHENN & B. D. PALMER (2006b): Exposure, postexposure, and density-mediated effects of atrazine on amphibians: Breaking down net effects into their parts. – *Environmental Health Perspectives* 114: 46–50.
- SANDERS, H. O. (1970): Pesticide toxicity to tadpoles of the western chorus frog *Pseudacris triseriata* and Fowler's toad *Bufo woodhousii fowleri*. – *Copeia* 1970: 246–251.
- SCHMIDT, B. R. (2006): Der globale Rückgang der Amphibien: Welche Rolle spielt UV-B? – *Zeitschrift für Feldherpetologie* 13: 13–22.
- SIH, A., A. M. BELL, & J. L. KERBY (2004): Two stressors are far deadlier than one. – *Trends in Ecology & Evolution* 19: 274–276.
- SMITH, D. C. (1987): Adult recruitment in chorus frogs: effects of size and date at metamorphosis. – *Ecology* 68: 344–350.
- TÉPLITSKY, C., H. PIHA, A. LAURILA & J. MERILÄ (2005): Common pesticide increases costs of antipredator defense in *Rana temporaria* tadpoles. – *Environmental Science & Technology* 39: 6079–6085.
- THOMPSON, D. G., K. R. SOLOMON, B. F. WOJTASZEK, A. N. EDGINTON & G. R. STEPHENSON (2006): The impact of pesticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities. – *Ecological Applications* 16: 2022–2027.
- THOMPSON, D. G., B. F. WOJTASZEK, B. STAZNIK, D. T. CHARTRAND & G. R. STEPHENSON (2004): Chemical and biomonitoring to assess potential acute effects of Vision® herbicide on native amphibian larvae in forest wetlands. – *Environmental Toxicology and Chemistry* 23: 843–849.
- VAN BUSKIRK, J. & B. R. SCHMIDT (2000): Predator-induced phenotypic plasticity in larval newts: Trade-offs, selection, and variation in nature. – *Ecology* 81: 3009–3028.

Eingangsdatum: 5.1.2007