

Originalarbeiten

LIMPACT: Ein Expertensystem zur Abschätzung der Pflanzenschutzmittel-Belastung kleiner Fließgewässer mittels der Makroinvertebraten-Fauna

Michael Neumann¹, Joachim Baumeister², Matthias Liess³ und Ralf Schulz¹¹ AG Limnologie des Zoologischen Institutes der TU Braunschweig, Fasanenstr. 3, D-38092 Braunschweig² Lehrstuhl für Informatik VI, Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg³ UFZ, Centre For Environmental Research, Permoserstraße 15, D-04318 LeipzigKorrespondenzautor: Michael Neumann; e-mail: m.neumann@tu-bs.deDOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2002.05.031>

Zusammenfassung. Die Entwicklung, der Aufbau und die Evaluierung eines biologischen Indikatorsystems für die Pflanzenschutzmittel-Belastung in kleinen Fließgewässern wird vorgestellt. In Fließgewässern mit landwirtschaftlichem Einzugsgebiet stuft das Expertensystem LIMPACT die Belastung in vier Klassen 'unbelastet/nicht nachgewiesen', 'gering', 'mittel' und 'hoch' belastet ein. Eingangsdaten sind dabei die Abundanzdaten der benthischen Makroinvertebraten-Fauna zu vier Terminen im Jahresverlauf (März/April; Mai/Juni; Juli/August; September/Oktober) und neun physikalisch-chemische bzw. morphologische Fließgewässerparameter. Die Wissensbasis wurde mit dem Shellbaukasten D3 aufgebaut und enthält 921 Regeln zum etablieren oder de-etablieren einer Bewertungsklasse. Es wurden 39 Arten und Taxa analysiert und dabei 13 positive und 24 negative Indikatorspezies definiert. Positive Indikatorarten zeigen eine hohe Belastung durch hohe Abundanzen an, während negative Indikatorarten durch eine hohe Abundanz eine Belastung ausschließen und unbelastete Bäche anzeigen. Die Datenbasis enthielt 157 jährliche Untersuchungen und wurde auch zur Evaluierung eingesetzt. Die korrekte Klassifikationsrate liegt bei 66,7–85,5% der Fälle. Die meisten verbleibenden Fällen werden nicht falsch eingestuft, sondern infolge der konservativen Bewertung bei geringer Datengrundlage nicht klassifiziert.

Schlagwörter: Biologische Indikatoren; diffuse Einträge; Evaluierung; Fließgewässer, Pflanzenschutzmittelbelastung; Fungizide; Herbizide; Insektizide; Landwirtschaft; LIMPACT (Limnology Impact); Oberflächen-Runoff; Pestizide; wissensbasierte Systeme

Abstract. LIMPACT: An Expert System Using Macroinvertebrate Fauna for Evaluation the Contamination of Small Bodies of Flowing Water with Pesticides

The development and the evaluation of a biological indicator system for pesticide pollution in streams are presented. For small headwater streams with an agricultural catchment area, the expert system LIMPACT estimates the pesticide contamination according to the four classes of Not Detected, Low, Moderate and High contamination without any specification of the chemical agents. The input parameters are the abundance data of benthic macroinvertebrate taxa within four time frames in a year (March/April; May/June; July/August; September/October) and 9 basic water-quality and morphological parameters. The heuristic knowledge base was developed with the shell-kit D3 and contains diagnostic rules with scores to either establish or de-establish a contamination class. We differentiate between positive indicator taxa, which indicate contamination by high abundance values and positive abundance dynamics, and negative indicator taxa, a high abundance of which rules out contamination and indicates an uncontaminated site. We analysed 39 taxa and found 13 positive and 24 negative indicators. The database is comprised of 157 investigations per stream and year. For the evaluation of LIMPACT, we used the same cases. The correct diagnosis for the 157 investigations per stream and year is established by LIMPACT in 66.7 to 85.5% of the cases, with better results for uncontaminated sites. In most of the remaining cases no diagnosis is established instead of an incorrect one.

Keywords: Agriculture; biological indicator; fungizides; herbizides; heuristic knowledge base; insectizides; LIMPACT (Limnology Impact); non-point sources; pesticides; runoff; streams, pesticide contamination

Einleitung

Kleine Fließgewässer mit landwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet bilden wichtige Habitate und werden durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst. Nach starken Niederschlägen werden durch Oberflächen-Runoff Schwebstoffe, Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel eingetragen und der Abfluss stark erhöht (Cooper 1993, Neumann et al. 2001, Neumann und Dudgeon, in press). Es wurde gezeigt dass dabei die kurzzeitig hohe Pflanzenschutzmittel-Belastung einen wichtigen Stressor für die aquatische Lebensgemeinschaft darstellt (Liess und Schulz 1999, Schulz und Liess, 1999). Der chemische Nachweis dieser diffusen Stoffeinträge gelingt nur durch ereignis-

gesteuerte Probennehmer und ist deshalb aufwendig und teuer (Liess und Schulz 2000, Liess et al. 1999). Ein biologisches Indikatorsystem könnte über einen längeren Zeitraum kostengünstig den Umfang einer Belastung erfassen und damit gleichzeitig den Effekt der Belastung bewerten.

In Deutschland findet eine routinemäßige Überwachung kleiner Fließgewässer vor allem hinsichtlich der biologisch abbaubaren organischen Belastung mit Hilfe des Saprobienindex (Friedrich 1990) und hinsichtlich der Strukturgüte statt. Braukmann und Pinter (1997) kommen am Ende eines umfangreichen Reviews verschiedener Bewertungssysteme zu der Empfehlung, ein Expertensystem zur Überwachung ein-

zusetzen. Böhmer und Kappus (1997) nennen eine Reihe von Bewertungssystemen, aber keines zur Überwachung der Pflanzenschutzmittel-Belastung. Ein spezielles System zur Abschätzung der Insektizidbelastung kleiner Fließgewässer wurde inzwischen vorgestellt (Neumann und Liess 1999). Der Einsatz eines Expertensystems ermöglicht dabei auch unsicheres Wissen zu verarbeiten und gibt dem Anwender volle Kontrolle über den Frage-Antwort-Dialog. Ziel dieser Arbeit war es, ein erweitertes biologisches Indikatorsystem in Form eines Expertensystems zu entwickeln, welches die Pflanzenschutzmittel-Belastung in kleinen Fließgewässern mit landwirtschaftlichem Einzugsgebiet abschätzen kann.

1 Material und Methoden

1.1 Datenbasis und Untersuchungsgewässer

Die Datenbasis dieser Arbeit entstammt Untersuchungen des Zoologischen Institutes der Technischen Universität Braunschweig aus den Jahren 1992 bis 2000. Die 104 Untersuchungsgewässer lagen in den Flachlandregionen um Braunschweig, Hamburg, Hannover, Kassel, Mannheim und Mönchengladbach. Alle Bäche besaßen ein landwirtschaftlich genutztes Einzugsgebiet ohne Einfluss von Städten oder Industrieanlagen. Sieben Bäche lagen unterhalb kleinerer Kläranlagen. Alle Probestellen waren unbeschattet, von geringem Gefälle (max. 3°) und von Sand, Lehm und Schluff geprägt. Die Fließgeschwindigkeit lag unter $0,9 \text{ m s}^{-1}$, die Tiefe zwischen 5 und 70 cm und die Breite zwischen 25 und 400 cm.

Die Pflanzenschutzmittel-Belastung wurde an allen Probestellen durch Schwebstoffsammler (Liess et al. 1996) und/oder durch ereignisgesteuerte Wasserprobenehmer (Liess et al. 1999) erfasst und am Institut für Ökologische Chemie der Technischen Universität Braunschweig analysiert (Methode siehe Liess et al. 1999). Insgesamt lagen Analysen von 555 Proben vor. Die Nachweisgrenzen für die Wirkstoffe lagen zwischen $0,02$ und $1 \mu\text{g L}^{-1}$ für Wasser und zwischen 1 und $5 \mu\text{g kg}^{-1}$ für Schwebstoffe. Je nach untersuchtem Stoffspektrum lagen Informationen zu 30 verschiedenen Wirkstoffen aus dem Bereich der Insektizide, Fungizide und Herbizide vor. Um das ökotoxikologische Potenzial der Belastung zu beschreiben und einen Vergleich verschiedener Untersuchungen zu ermöglichen, wurde für jede Untersuchung eine jährliche Belastungssumme berechnet. Hierzu wurde an der jeweiligen Probestelle alle Proben die in Folge eines Niederschlagsereignisses genommen worden waren, betrachtet. Die Konzentrationen der einzelnen Wirkstoffe wurde über die Toxizität auf die Beispielart *Daphnia magna* gewichtet und zur jährlichen Belastungssumme aufsummiert. Da das chemische Monitoring mit Einzelproben kein vollständiges Bild der Pflanzenschutzmittel-Belastung geben kann und zur Reduzierung der Probenahme. Die Untersuchungen wurden daraufhin in die vier Belastungsklassen 'nicht nachgewiesen' (NN), 'gering' (G), 'mittel' (M), 'hoch' (H) belastet eingeteilt.

Zusätzlich zur Pflanzenschutzmittel-Belastung lagen neun physikalisch-chemische bzw. morphologische Parameter vor:

1. Organische Belastung nach Saprobienindex (Jahresmittelwert)
2. Morphologische Strukturen durch submerse und emerse Pflanzen, Gestöcksel und Baumwurzeln, die den Gewässergrund bedecken (Prozentwert als Jahresmaximum)

3. Gewässergrund, der aus Sand besteht (Prozentwert als Jahresmaximum)
4. Fließgeschwindigkeit (Jahresmaximum)
5. Gewässerquerschnitt: Breite in cm multipliziert mit Tiefe in cm (Jahresmaximum)
6. Austrocknung (Anzahl der Monate)
7. Leitfähigkeit des Wassers (Jahresmittelwert)
8. pH-Wert (Jahresmittelwert)
9. Carbonathärte (Jahresmittelwert)

Mit diesen Parametern wurde dem Expertensystem LIMPACT zusätzliche Informationen über weitere mögliche Einflussfaktoren auf die aquatische Makroinvertebraten-Fauna.

Die biologischen Abundanzen der benthischen Makroinvertebraten-Fauna (Indiv. pro qm) beruhen auf 660 Populationsaufnahmen jeweils durch vier bis sechs Wiederholungen mit dem Surbersampler ($0,125 \text{ m}^2$ Fläche). Die Artbestimmung lag, wenn möglich, auf Artniveau vor, musste aber im Rahmen dieser Arbeit teilweise wieder auf höherem taxonomischen Niveau zusammengefasst werden.

1.2 Die Wissensrepräsentation

Expertensysteme sollen das Fachwissen und die möglichen Schlussfolgerungen von qualifizierten Experten widerspiegeln. Zum Aufbau eines wissensbasierten Systems muss eine Menge von Diagnosen (Lösungen) und eine Menge von Beobachtungen (Symptome) vorliegen und das Wissen, wie diese beiden verknüpft werden (z.B. durch Regeln). Zur Programmierung wurde hier der Shellbaukasten D3 (<http://www.d3web.de>) verwendet und auf heuristische Diagnose Scores (Puppe 2000) zurückgegriffen. Bei dieser Wissensrepräsentation bewertet der Experte die möglichen Diagnosen aufgrund der Beobachtungen in Form von Regeln (Puppe 1998). Alle Regeln haben die folgende Form: 'Wenn Beobachtung X dann erhält Diagnose Y die Bewertung Z'. Beispiele finden sich in Tabelle 1.

1.3 Die Bewertung

Die Beobachtungen X waren klar als die Abundanzen der Makroinvertebraten definiert (Abb. 1), während die Diagnose Y durch die vierstufige Pflanzenschutzmittel-Belastung repräsentiert wurde. Für die Bewertung Z stellt der Shellbaukasten D3 sieben positive von P1 (+5%) bis P7 (+100%) und sieben negative von N1 (-5%) bis N7 (-100%) Bewertungen zur Verfügung. Trifft die Regel zu, wird die Bewertung der Diagnose zuaddiert oder abgezogen. Die Summe von zwei gleichen Bewertungskategorien ergibt die nächst höhere Bewertungskategorie. Beispielsweise ergeben zwei aktivierte Regeln mit der Bewertung P3 in Ihrer Summe die Bewertung P4. Eine Diagnose gilt als bestätigt, wenn die Summe aller Bewertungen die Kategorie P5 überschreitet.

1.4 Die Diagnosen

Die Datenbasis enthielt für alle Untersuchungen eine chemische Analyse der Pflanzenschutzmittel-Belastung. Diese Belastung wurde jeweils einer der vier Klassen 'nicht nachgewiesen' (NN), 'gering' (G), 'mittel' (M) und 'hoch' (H) belastet zugeteilt. Diese vier Klassen bilden damit auch die

möglichen Diagnosen des Expertensystems LIMPACT. Zusätzlich wurde eine Diagnose 'ungeeignetes Fließgewässer' erstellt. Diese Diagnose wird bestätigt, wenn die physikalisch-chemischen bzw. morphologischen Parameter außerhalb bestimmter Bereiche sind. Es werden keine Bäche mit industriellen Einträgen, extremen Salzgehalten oder pH-Werten sowie Bäche des Hügel- und Berglandes oder große Fließgewässer berücksichtigt. In einem solchen Fall würden keine weiteren Regeln aktiviert werden und somit auch keine Diagnose zur Belastung bestätigt.

1.5 Die Beobachtungen

Die Abundanzen der benthischen Makroinvertebraten stellen die entscheidenden Eingangsparameter für das Expertensystem dar. Es wurden vier Zeiträume T1: März/April, T2: Mai/Juni, T3: Juli/August und T4: September/Oktober im Jahresverlauf definiert, zu denen eine Messung der Abundanzen vorliegen sollte. Für jedes Taxa bietet LIMPACT eine Eingabemaske für die Abundanzen zu diesen Terminen. Zusätzlich berechnet LIMPACT die Abundanzänderungen zwischen zwei Zeiträumen, um diese ebenfalls auswerten zu können. Neben administrativen Informationen wie Fließgewässername oder Lage des Fließgewässers berücksichtigt LIMPACT auch physikalisch-chemische bzw. morphologische Parameter als Beobachtungen.

1.6 Die Fälle

Teilweise wurden die Probestellen mehrfach in verschiedenen Jahren untersucht, so dass insgesamt 157 Datensätze mit einer chemischen Analyse der Pflanzenschutzmittel, einer Aufnahme der physikalisch-chemischen bzw. morphologischen Parameter und einer biologischen Erfassung der Makroinvertebraten Lebensgemeinschaft, vorlagen. Diese Datensätze werden im weiteren Verlauf mit dem Begriff 'Bachjahre' beschrieben.

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Die benthische Makroinvertebraten-Fauna als Indikatoren

Die benthische Makroinvertebraten-Fauna wurde durch Trichoptera, Diptera, Oligochaeta, und Amphipoda (vor allem *Gammarus pulex*) dominiert. Insgesamt wurden 386 Taxa nachgewiesen. Da der Nachweis seltener Arten in Einzelproben stark von Probenahmefehlern beeinflusst wird, wurden zum Aufbau der Wissensbasis nur die 39 häufigsten Taxa analysiert. Diese bilden 90,4% der gesamten Abundanz aller Taxa.

Durch die empirische Auswertung wurde jedes Taxa entweder als negativer – oder als positiver Indikator (Murtaugh 1996) für die Pflanzenschutzmittel-Belastung eingesetzt. Ein negativer Indikator ist eine Art, deren Abundanz umgekehrt proportional mit der Belastung korreliert ist. Die Abundanz einer positiven Indikatorart ist direkt proportional mit der Belastung korreliert. Hohe Abundanzen einer negativen Indikatorart zeigen also geringe Belastungen an, während hohe Abundanzen einer positiven Indikatorart auf eine hohe Belastung hinweisen.

2.2 Das Implementieren der Regeln

Beim Programmieren der Wissensbasis von LIMPACT wurden zwei Arten von Regeln aufgestellt. Zuerst wurden 30 Regeln aufgestellt, um die Diagnose 'ungeeignetes Fließgewässer' zu etablieren oder zu de-etablieren. Innerhalb eines Bereiches der physikalisch-chemischen bzw. morphologischen Parameter, in dem kein Einfluss dieser Faktoren auf die aquatische Lebensgemeinschaft zu erwarten war, wurde die Diagnose nicht bewertet. Außerhalb dieses Bereiches wurde für jeden Parameter entweder die Bewertung P3 oder bei extremen Parameterwerten die Bewertung P7 vergeben. Dies führt dazu, dass bei Parametern mit geringem Effekt auf die Lebensgemeinschaft die Diagnose 'ungeeignetes Fließgewässer' von LIMPACT nur verdächtigt wird, bei einem starken Einfluss aber sicher etabliert wird. Im letzteren Fall wird als Konsequenz keine Diagnose zur Pflanzenschutzmittel-Belastung ausgegeben.

Im zweiten, entscheidende Teil beim Aufbau von LIMPACT, wurden Regeln zur Bewertung der vier Diagnosen zur Pflanzenschutzmittel-Belastung aufgestellt. Hierzu wurden in einer Datenbank die 157 Bachjahre den vier Belastungsklassen zugeordnet und die Abundanz sowie die Abundanzdynamik von 39 Taxa analysiert und jeweils als positiver oder negativer Indikator bewertet. Bei der Analyse musste berücksichtigt werden, dass neben der Belastung auch anderen Faktoren das Vorkommen beeinflussen können. Während eine hohe Abundanz eines negativen Indikators eindeutig eine geringe Belastung belegen kann, zählt eine geringe Abundanz nicht automatisch für eine hohe Belastung. Ähnliches gilt für positive Indikatoren: eine hohe Abundanz spricht für eine hohe Belastung, kann aber unter bestimmten Umständen auch in unbelasteten Fließgewässern auftreten. Als Konsequenz wurden die physikalisch-chemischen bzw. morphologischen Parameter sowie die Abundanzdynamik analysiert und in den Regeln berücksichtigt.

Mit dem heuristischen Diagnose-Score Muster (Puppe 2000) war es möglich, unsicheres Wissen in der Regelbasis abzubilden. Die Regeln schließen sich gegenseitig nicht aus, sondern können gleichzeitig mit unterschiedlichen, teilweise sich widersprechenden Bewertungen aktiviert werden. So war es möglich, bei einer Beobachtung mehrere Diagnosen zu bewerten. Da keine Bewertung höher als P3 war, wurde eine konservative Vorgehensweise erreicht, bei der mindestens fünf Regeln mit P3 feuern müssen, um eine Diagnose mit >P5 zu etablieren. Zur Zeit enthält die Wissensbasis von LIMPACT zur Bewertung der Belastung 921 Regeln.

Das Taxon Chironomidae 'rot' ist ein Beispiel für einen negativen Indikator. Zum Zeitraum T3 wurden hohe Abundanzen nur in unbelasteten oder gering belasteten Fließgewässern gefunden (**Abb. 1a**) und folglich die Regeln 1 und 2 aus **Tabelle 1** aufgestellt. Gleichzeitig spricht die hohe Abundanz gegen eine höhere Belastung, welches sich in den Regeln 3 und 4 mit der Bewertung N4 niederschlägt. Für dieses Taxa wurden keine Regeln mit positiver Bewertung für höhere Belastungen aufgestellt.

Tabelle 1: Schematische Darstellung einiger Beispielregeln aufgrund der beispielhaften Analyse der Abb. 1

Regel Nr.	Wenn	dann gibt	die Bewertung
1	Chironomidae 'rot' zu T3 >370	Diagnose NN	P2
2	Chironomidae 'rot' zu T3 >370	Diagnose G	P2
3	Chironomidae 'rot' zu T3 >370	Diagnose M	N4
4	Chironomidae 'rot' zu T3 >280	Diagnose H	N4
5	Glossiphonia heteroclita zu T1 >8	Diagnose M	P2
6	Glossiphonia heteroclita zu T1 >8	Diagnose H	P2
7	Glossiphonia heteroclita zu T1 >8	Diagnose NN	N4
8	Glossiphonia heteroclita zu T1 >8	Diagnose G	N4
9	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 10 bis 75	Diagnose NN	P2
10	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 10 bis 75	Diagnose G	P2
11	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 >75	Diagnose NN	P3
12	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 >75	Diagnose G	N4
13	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 >10	Diagnose M	N4
14	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 >10	Diagnose H	N4
15	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 -10 bis 10	Diagnose M	P2
16	Chaetopteryx villosa T2 zu T3 -10 bis 10	Diagnose H	P2

Die Art *Glossiphonia heteroclita* ist ein Beispiel für einen positiven Indikator (Abb. 1b). Eine hohe Abundanz signalisiert eine mittlere oder hohe Belastung (Regeln 5 und 6) und spricht mit negativer Bewertung gegen geringe Belastungen (Regeln 7 und 8). *Chaetopteryx villosa* als negativer Indikator zeigt mit zunehmender Abundanz von T2 zu T3 (Abb. 1c) keine oder geringe Belastungen an (Regeln 9 und 10) und zählt dabei gegen höhere Belastungen (Regeln 13 und 14). Trichoptera sind als sensitive gegenüber Pflanzenschutzmitteln bekannt (Schulz und Liess 1995) und ein starker Zuwachs deutet eindeutig auf ein unbelastetes Fließgewässer (Regel 11) und gegen eine höhere Belastung (Regel 12) hin. Geringe Abundanzänderungen werden durch eine Bewertung der höheren Belastungen mit P2 berücksichtigt (Regeln 15 und 16). Obwohl Abb. 1c suggeriert, dass eine starke Abundanzabnahme für geringe Belastungen spricht, wurde dies nicht in Regeln übernommen, da dies nicht durch die Autökologie dieser Art bestätigt werden kann. Der Grund für dieses Phänomen sind die sehr geringen Abundanzen in belasteten Fließgewässern bereits zu T2. Um dies zu berücksichtigen, wurde hier eine komplexe Regel aufgestellt, die Abundanzen und Abundanzdynamiken miteinander kombiniert. 83% der Regeln in der Wissensbasis kombinieren zwei Beobachtungen und sind somit komplexe Regeln von mittlerer Komplexität.

Ceratopogonidae zeigt von T1 zu T2 eine Abundanzdynamik eines positiven Indikators (Abb. 1d). Eine Zunahme wurde nur in belasteten Fließgewässern gefunden. Die Abundanz von Dytiscidae zu T2 (Abb. 1e) ist typisch für eine tolerantes Taxon, welches bei geringer und mittlerer Belastung höhere Abundanzen als in unbelasteten und hoch belasteten Fließgewässern besitzt. *Limnephilus lunatus* (Abb. 1f) als negativer Indikator zeigt nur in Fließgewässern mit hohem morphologischen Strukturanteil (>80%, weiße Kreise) auch bei höheren Belastungen eine hohe Abundanz. Hier mußten komplexe Regeln die Abundanzen mit den physikalisch-chemischen bzw. morphologischen Parametern kombinieren.

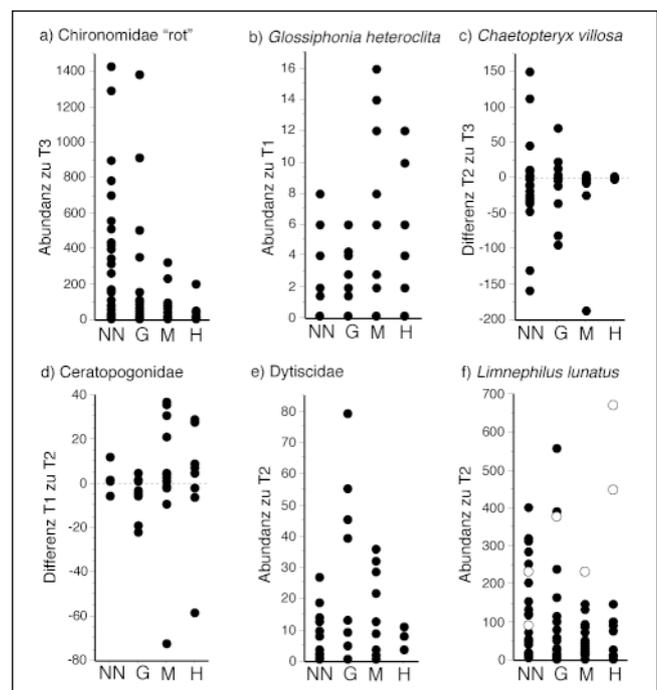


Abb. 1: Abundanzen (Indiv. pro qm) und Abundanzdynamiken einiger Indikatoren in der jeweiligen jährlichen Belastungskategorie zur Verdeutlichung des Analyseprozesses und der Erstellung der Regeln. Angegeben ist der jeweilige Zeitpunkt oder die beiden Zeitpunkte (bei Differenzen) sowie die betrachteten Indikatoren. In f) signalisieren die weißen Kreise Bäche mit einem hohen Anteil an morphologischen Strukturen (>80%)

Insgesamt wurden 622 Regeln mit positiver und 299 Regeln mit negativer Bewertung aufgestellt. Dabei sind die Regeln über die vier Diagnosen gleichmäßig verteilt. Auffällig ist, dass von den 251 Regeln zu der Diagnose 'nicht nachgewiesen (NN)' 83% und von den 226 Regeln zu der Diagnose 'hohe Belastung (H)' nur 48% eine positive Bewertungen haben. Dies zeigt, dass es einfacher ist, ein unbelastetes Fließgewässer anhand faunistischer Merkmale zu erkennen.

2.3 Evaluierung von LIMPACT

Das Expertensystem wurde mit den 157 Fällen evaluiert, mit denen das System aufgebaut wurde. Das Ergebnis zeigt **Tabelle 2**. Das Klassifikationsergebnis ist gut, wurde aber nicht durch eine unabhängige Evaluierung erreicht. Die korrekte Klassifikation wurde in 66,7–85,5% der Fälle erreicht. Die stärksten Fehler treten bei der Unterscheidung zwischen unbelasteten und gering belasteten Gewässern sowie zwischen mittlerer und hoher Belastung auf. Der relativ hohe Anteil an Fließgewässern, die gar nicht klassifiziert werden, begründet sich durch unseren konservativen Ansatz, wodurch eine Falschklassifikation vermieden wird. Ohne die nicht klassifizierten Fälle ergibt sich für mittel-belastete Gewässer eine Klassifikationsrate von 82,4%, für unbelastete von 97,9% und für hoch belastete sogar eine korrekte Klassifikationsrate von 100%. Insgesamt demonstriert das Ergebnis die grundsätzliche Fähigkeit von LIMPACT, die Pflanzenschutzmittel-Belastung durch Abundanzdaten der Makroinvertebraten-Fauna abschätzen zu können.

Tabelle 2: Ergebnis der Klassifikation von 157 Bachjahren durch LIMPACT. Angegeben ist die tatsächliche Belastung und der Anteil der klassifizierten Bäche jeweils für die vier Belastungsklassen als Prozentwert und in Klammern als absoluter Wert

tatsächliche Belastung	Klassifikationsergebnis (%)				
	nicht nachgewiesen	Gering	Mittel	Hoch	nicht klassifiziert
Nicht Nachgewiesen (55)	85,5 (47)	0 (-)	1.8 (1)	0 (-)	12.7 (7)
Gering (34)	17.6 (6)	76,5 (26)	0 (-)	0 (-)	5.9 (2)
Mittel (42)	2.4 (1)	0 (-)	66,7 (28)	11.9 (5)	19.0 (8)
Hoch (26)	0 (-)	0 (-)	0 (-)	80,8 (21)	19.2 (5)

Eine Evaluierung von LIMPACT durch einen unabhängigen Datensatz wird durchgeführt sobald neue Bachjahre vorliegen. Dies wird zu einer Überarbeitung und Verbesserung der Wissensbasis führen. Da die Wissensbasis im Gegensatz zu anderen Expertensystemen ausschließlich durch statistische Datenauswertung aufgebaut und dabei durch Expertenwissen überprüft wurde, kann aber bereits jetzt von einer hohen Qualität ausgegangen werden. Dies wird durch die geringe Fehlerrate bestätigt.

Gründe für Klassifikationsfehler und nicht klassifizierte Fälle liegen in der Anzahl der vorkommenden Arten und der Anzahl der durchgeführten Populationsaufnahmen. Je mehr Daten der Anwender bereitstellt, desto mehr Regeln werden aktiviert. Von den hier untersuchten 157 Bachjahren hatten 98% Daten zu den Terminen T1 und T2, 78% zu T3 und nur 72% zu T4. Dies begründet auch zum Teil die nicht klassifizierten Fälle.

Um die Wasserqualität zu bewerten, werden von biologischen Indikatorsystemen verschiedene Parameter betrachtet. RIVPACS aus England sagt die potentielle Makroinvertebraten-Fauna an der betrachteten Probestelle ohne Stressfaktoren voraus (Wright et al. 1998) und erlaubt somit die tatsächlich gefundene Fauna zu bewerten. In den Niederlanden wird mit STOWA (Peeters et al. 1994) ein ähnlicher Ansatz verfolgt. In Schottland wurde das integrierte Bewertungssystem SERCON (Boon 2000) und in den USA die Rapid Bioassessment Protocols (Resh et al. 1995) entwickelt. In Deutschland ist der Saprobienindex (Friedrich 1990) etabliert, um biologisch abbaubare organische Belastungen zu erfassen und Systeme zur Überwachung der Schwermetallbelastung (Wachs 1991) und der Versauerung (Brakke et al. 1994) sind bekannt. Auch Böhmer und Kappus (1997) erwähnen in ihrer Übersicht über Ansätze zur Bewertung der Wasserqualität in Fließgewässern kein biologisches Indikatorsystem zur Erfassung der Pflanzenschutzmittel-Belastung.

Grundsätzlich ist der Einsatz biologischer Indikatorsysteme auf Probestellen beschränkt, an denen die betrachteten Indikatororganismen auch vorkommen. Dies gilt auch für LIMPACT und die 39 Arten und Taxa, die es berücksichtigt. Bäche, in denen keine dieser Taxa vorkommen, können nicht klassifiziert werden. Eine Weiterentwicklung von LIMPACT sollte deshalb die Anzahl der betrachteten Arten erhöhen und zusätzlich höhere taxonomische Ebenen berücksichtigen. Der Einsatz von LIMPACT würde durch eine Reduzierung der notwendigen Zeitpunkte, zu denen Abundanzdaten vorliegen sollten, deutlich vereinfacht werden. Zur Zeit werden vier Termine gefordert. Eine Reduktion auf zwei oder einen Termin würde die Möglichkeit eines routinemäßigen Einsatzes im Flächenmaßstab eröffnen. Ein jährliche Überwachung der kleinen Fließgewässer im landwirtschaftlichem Raum könnte chemische Pflanzenschutzmittelanalysen nur noch im konkreten Verdachtsfall notwendig machen. Dies wäre entweder durch im gleichen Jahr ereignisgesteuert-genommene und aufbewahrte Wasserproben oder im folgenden Jahr möglich. Durch das biologische Indikatorsystem könnten auch eintragsreduzierende Maßnahmen im Einzugsgebiet überwacht und bewertet werden.

Danksagung. Diese Forschungsarbeit wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, An der Bornau 2 in 49090 Osnabrück, Deutschland durch ein Promotionsstipendium gefördert. Die Datenerhebung der Pflanzenschutzmittelbelastung und der aquatischen Lebensgemeinschaft erfolgte in verschiedenen Projekten, die größtenteils durch das Umweltbundesamt (UBA: FKZ 296 24 511), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BmBF: FKZ 0339804) und den Niersverband, Viersen gefördert wurden. Jörn Wogram, Jakob Drees und Norbert Berenzen leisteten dabei einen erheblichen Anteil der Datenerhebung.

Literatur

Böhmer J, Kappus B (1997): Ökologische Bewertung von Fließgewässern in der Europäischen Union und anderen Ländern – Literaturstudie. Literaturstudie im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Stuttgart. Reihe Handbuch

- Wasser 2 Bibliothek der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
- Boon P-J (2000): The development of integrated methods for assessing river conservation value. *Hydrobiologia* **422/423**, 413–428
- Braukmann U, Pinter I (1997): Concept for an integrated ecological evaluation of running waters. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* **25**, 113–127
- Cooper CM (1993): Biological effects of agriculturally derived surface-water pollutants on aquatic systems – A review. *J. Environ. Qual.* **22**, 402–408
- Friedrich G (1990): Eine Revision des Saprobien-systems. *Z. Wasser. Abwasser. Forsch.* **23**, 141–152
- Liess M, Schulz R (1999): Linking insecticide contamination and population response in an agricultural stream. *Environ. Toxicol. Chem.* **18**, 1948–1955
- Liess M, Schulz R (2000): Sampling methods in surface waters. In: Nollet LML (ed): *Handbook of water analysis*. Marcel Dekker, New York, pp 1–24
- Liess M, Schulz R, Liess M H-D, Rother B, Kreuzig R (1999): Determination of insecticide contamination in agricultural headwater streams. *Water Res.* **33**, 239–247
- Liess M, Schulz R, Neumann M (1996): A method for monitoring pesticides bound to suspended particles in small streams. *Chemosphere* **32**, 1963–1969
- Murtaugh PA (1996): The statistical Evaluation of ecological indicators. *Ecol. Appl.* **6**, 132–139
- Neumann M, Dudgeon D (2002): The impact of agricultural runoff on stream benthos in Hong Kong, China. *Wat. Res.*, in press
- Neumann M, Liess M (1999): Abschätzung und Bewertung der Insektizidbelastung kleiner Fließgewässer durch ein regelbasiertes Expertensystem. In: Oehlmann J, Markert B (Hrsg): *Ökosysteme* Ansätze in der Ökotoxikologie. ecomed Verlag, Landsberg/Lech, S 516–520
- Neumann M, Schulz R, Schäfer K, Müller W, Mannheller W, Liess M (2001): The significance of entry routes as point and non-point sources of pesticides in small streams. *Water Res.*, in press.
- Peeters ETMH, Gardeniers JJP, Tolkamp HH (1994): New methods to assess the ecological status of surface waters in the Netherlands. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **25**, 1914–1916
- Puppe F (1998): Knowledge Reuse among Diagnostic Problem Solving Methods in the Shell-Kit D3. *International Journal of Human-Computer Studies* **49**, 627–649
- Puppe F (2000): Knowledge formalization patterns. *Proc. of PKAW in Sydney, Australia*
- Resh VH, Norris RN, Barbour MT (1995): Design and implementation of rapid assessment approaches for water resource monitoring using benthic macroinvertebrates. *Australian Journal of Ecology* **20**, 108–121
- Schulz R, Liess M (1995): Chronic effects of low insecticide concentrations on freshwater caddisfly larvae. *Hydrobiologia* **299**, 103–113
- Schulz R, Liess M (1999): A field study of the effects of agriculturally derived insecticide input on stream macroinvertebrate dynamics. *Aquat. Toxicol.* **46**, 155–176
- Wachs B (1991): Ökobilanz der Schwermetallbelastung von Fließgewässern. *Münchener Beitrag Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie* **45**, 295–335
- Wright JF, Furse MT, Moss D (1998): River classification using invertebrates: RIVPACS applications. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater* **8**, 617–631

Eingegangen: 21. 11. 2001

Akzeptiert: 29. 04. 2002

OnlineFirst: 31.05. 2002