

2. Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit von Pymetrozine im Vergleich mit dem Referenzprodukt Sukmeron

2.1. Humantoxikologische Abschätzungen

Als Einstieg in den Vergleich des Pflanzenschutzmittels Pymetrozine mit dessen Vorgängersubstanz Sukmeron bietet sich zur Abschätzung chronischen Aufnahme der beiden Stoffe die Berechnung der jeweiligen theoretischen maximalen Aufnahmemengen pro Tag (Theoretical Maximum Daily Intake: TMDI) an. Diese Schätzung basiert Schätzwerten für die maximalen absoluten Stoffkonzentrationen der zwei Substanzen, die aufgrund von gemessenen Rückständen in vielen breit angelegten Abbaustudien erarbeitet wurden (Szczepanski) und dem absoluten täglichen Verzehr derjenigen Nahrungsmittel, in denen diese Substanzen auftreten:

$$TMDI = V_{abs} * C_{max}$$

Nahrungsmittel	Verzehr absolut [kg d ⁻¹ p ⁻¹]	maximale absolute Konzentrationen		TMDI	
		Sukmeron [mg kg ⁻¹]	Pymetrozine [mg kg ⁻¹]	Sukmeron [mg d ⁻¹ p ⁻¹]	Pymetrozine [mg d ⁻¹ p ⁻¹]
Tomaten	0.0556	0.10	0.50	0.0056	0.0278
Bohnen	0.0396	0.10	0.20	0.0040	0.0079
Kartoffeln	0.1053	0.05	0.20	0.0053	0.0211
Weizen	0.2010	0.05	0.20	0.0101	0.0402
Äpfel	0.0541	0.50	0.20	0.0271	0.0108
Zitrus-Früchte	0.0739	0.05	0.20	0.0037	0.0148
sonst. Gemüse	0.0552	0.01	0.20	0.0006	0.0110
sonst. Früchte	0.0082	0.50	0.20	0.0041	0.0016
sonst. Getreide	0.0337	0.05	0.20	0.0017	0.0067
Milch	0.5550	0.02	0.02	0.0111	0.0111
Fleisch	0.4780	0.05	0.05	0.0239	0.0239
Total	1.6596			0.0969	0.1770

Tab. 1: Schätz-Werte des TMDI für Pymetrozine und Sukmeron beim Menschen

Aus diesen groben Abschätzungen geht hervor, dass die tägliche maximale Aufnahme von Pymetrozine um etwa einen Faktor 2 höher zu erwarten ist als jene von Sukmeron. Was dies für Auswirkungen auf die chronische toxische Einwirkung der beiden Stoffe auf den menschlichen Körper hat, kann nur im Zusammenhang der jeweiligen toxischen Wirkung beurteilt werden. Zu diesem Zweck bieten sich die Toxizitätswerte bei Hunden an, die man mit einem Sicherheitsfaktor SF = 500 für die Abschätzung der akzeptablen täglichen Stoffaufnahme ADI (Acceptable Daily Intake) und der maximalen erlaubten Einahme MPI (Maximum Permissible Intake) verwenden kann. Mit diesen Sicherheitsmargen kann dann das Schädigungspotential Q auf den Menschen erörtert werden.

Dabei ist zu beachten, dass der NOEL-Wert einer Toxe bei Hunden erwartungsgemäss höher liegt als jener bei Menschen, und dass aufgrund dieser Überlegung und der Annahme einer direkt proportionalen Toxizitätszunahme von Hund zum Menschen ein Sicherheitsfaktor von 500 einberechnet wird. Die Schätzung ist also nicht sonderlich aussagekräftig, folglich auch nicht überzuinterprieren, gibt jedoch einen guten Eindruck für die chronische Toxizitätswirkung der beiden Substanzen beim Menschen.

Parameter	Sukmeron	Pymetrozine	Berechnung
Aufnahme-Konzentrationen beim Mensch			
TMDI Mensch [mg a. i. kg ⁻¹ p ⁻¹]	0.097	0.177	s. Tab. 1
Toxizität bei Fauna			
NOEL Hund oral (3m) [mg kg ⁻¹ Körpergew.]	2	3	
Risikoschranken			
ADI Mensch [mg kg ⁻¹ Körpergew. d ⁻¹]	0.004	0.006	NOEL _{Hund} /SF
MPI Mensch [mg p ⁻¹ d ⁻¹]	0.24	0.36	ADI*60kg
Schädigungspotential			
Q Mensch (<50% geringe Gefährdung) [%]	40.4	49.2	TMDI/MPI*100

Tab. 2: Abschätzung der Toxizitätswirkung von Pymetrozine und Sukmeron beim Menschen.

Nach diesen Schätzungen lässt sich nun primär die Aussage machen, dass sich das chronisch toxische Einwirkungspotential der beiden Substanzen trotz unterschiedlicher Aufnahmedosen aufgrund ihrer unterschiedlichen Toxizität in der gleichen Größenordnung liegt. Weiter lässt sich mit der nötigen Vorsicht im Umgang mit solch groben Schätzwerten auch sagen, dass das Schädigungspotential für den Menschen durch die tägliche Aufnahme der Substanzen über die Nahrung in beiden Fällen nicht all zu hoch liegt. In Anbetracht dessen, dass die äquivalenten NOEL-Werte (chronische Wirkung über 3 Monate Versuchszeit) bei der Ratte etwa um einen Faktor 10 höher liegt als beim Hund, muss angenommen werden, dass die echten NOEL-Werte beim Menschen erheblich tiefer liegen als in dieser Schätzung angenommen und somit das Schädigungspotential mit einem Sicherheitsfaktor durchaus über 100% zu liegen kommen könnte, was für beide Substanzen eine beachtenswerte Schädigungswirkung bedeuten würde.

2.2. Ökotoxikologische Abschätzungen

Zur Erörterung der ökotoxikologischen Wirkung der beiden Substanzen empfiehlt sich eine grobe Abschätzmethode mit Hilfe derer in einem ersten Schritt die zu erwartenden maximalen Konzentrationen in den verschiedenen Umweltkompartimenten PEC (Predicted Environmental Concentration) bzw. EEC_{max} (Maximal Estimated Environmental Concentration) berechnet werden kann. In einem weiteren Schritt kann die zu erwartende maximale Aufnahme-Konzentration EMDI (Estimated Maximum Daily Intake) für verschiedene umweltrelevante Lebewesen (Zeigerorganismen) berechnet werden, so dass dann das akute bzw. chronische Schädigungspotential Q der beiden Substanzen bei chronischer Einwirkung abgeschätzt werden kann. Die Methode wird von K.-U. Hollih als allgemeine grobe Risikoanalyse bei Umwelttoxinen vorgeschlagen (Gesunde Pflanzen, 43. Jahrgang, Heft 7, 1991, S. 221-230):

Parameter	Sukmeron	Pymetrozine	Berechnung
max. Austragmenge [g a. i. ha ⁻¹]	300	300	
Verbreitung im System			
PEC Wasser 1m Drift (Getreide) [mg a. i. l ⁻¹]	0.012	0.012	4% * A _{max} * t _w ⁻¹
PEC Wasser 10m Drift (Getreide) [mg a. i. l ⁻¹]	0.0009	0.0009	0.3% * A _{max} * t _w ⁻¹
PEC Wasser 3m Drift (Obst) [mg a. i. l ⁻¹]	0.0465	0.0465	15.5% * A _{max} * t _w ⁻¹
PEC Wasser 10m Drift (Obst) [mg a. i. l ⁻¹]	0.012	0.012	4% * A _{max} * t _w ⁻¹
PEC nackter Boden < 5cm [mg a. i. kg ⁻¹]	0.4	0.4	A _{max} * t _B ⁻¹ * d _B ⁻¹
PEC nackter Boden < 10cm [mg a. i. kg ⁻¹]	0.2	0.2	A _{max} * t _B ⁻¹ * d _B ⁻¹
PEC bewachsener Boden < 5cm [mg a. i. kg ⁻¹]	0.04	0.04	A _{max} * t _B ⁻¹ * 10% * d _B ⁻¹
PEC bewachsener Boden < 10cm [mg a. i. kg ⁻¹]	0.02	0.02	A _{max} * t _B ⁻¹ * 10% * d _B ⁻¹
PEC Gräser [mg a. i. kg ⁻¹]	30.9	30.9	103 ha/1000kg * A _{max}
PEC Blätter [mg a. i. kg ⁻¹]	9.3	9.3	31 ha/1000kg * A _{max}
PEC Körner [mg a. i. kg ⁻¹]	0.81	0.81	2.7 ha/1000kg * A _{max}
Aufnahme-Konzentrationen bei Fauna			
EMDI kleine Insekten [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	8.7	8.7	29.5 ha/1000kg * A _{max}
EMDI grosse Insekten [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	0.9	0.9	3.0 ha/1000kg * A _{max}
EMDI Vögel < 10g (Gras) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	9.27	9.27	30% * PEC Gräser
EMDI Vögel > 100g (Gras) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	3.09	3.09	10% * PEC Gräser
EMDI Vögel < 10g (Körner) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	0.243	0.243	30% * PEC Körner
EMDI Vögel > 100g (Körner) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	0.081	0.081	10% * PEC Körner
EMDI Säuger < 10g (Gras) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	9.27	9.27	30% * PEC Gräser
EMDI Säuger > 100g (Gras) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	3.09	3.09	10% * PEC Gräser
EMDI Säuger > 100g (Kleinsäuger) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	0.927	0.927	10% * EMDI Kleinsäuger
Toxizität bei Fauna			
EC ₅₀ Daphnien (24h) [mg l ⁻¹]	0.02	100	
LC ₅₀ Regenwurm (14d) [mg kg ⁻¹ Boden]	720	1098	
LC ₅₀ Forelle (96h) [mg l ⁻¹]	29	100	
LD ₅₀ Biene Kontakt (3h) [mg Biene ⁻¹]	0.036	0.2	
LC ₅₀ Vögel (8d) [mg kg ⁻¹ Futter]	740	5200	
NOEL Ratte oral (3m) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	30	33	
NOEL Hund oral (3m) [mg a. i. kg ⁻¹ BW]	2	3	
Schädigungspotential			
Q _{akut} Daphnien (>15 geringe Gefährdung)	0.4	2150.5	EC ₅₀ /PEC Wasser _{max}
Q _{akut} Regenwurm (>20 geringe Gefährdung)	1800.0	2745.0	LC ₅₀ /PEC Boden _{max}
Q _{akut} Forelle (>10 geringe Gefährdung)	623.7	2150.5	LC ₅₀ /PEC Wasser _{max}
Q _{akut} Biene (<50 geringe, >2500 hohe Gefährdung)	257.5	46.4	A _{max} /LD ₅₀
Q _{akut} Vögel kl. (>10 geringe Gefährdung)	79.8	560.9	LC ₅₀ /EMDI _{Gras}
Q _{akut} Vögel gr. (>10 geringe Gefährdung)	3045.3	21399.2	LC ₅₀ /EMDI _{Körner}
Q _{chron.} Ratte (>10 geringe Gefährdung)	9.7	10.7	NOEL/EMDI _{Gras}
Q _{chron.} Hund (>10 geringe Gefährdung)	2.2	3.2	NOEL/EMDI _{Kleinsäuger}

Tab. 4: Abschätzung der Toxizität für Pymetrozine und Sukmeron bei Indikatororganismen.

Die Werte des Schädigungspotentials fallen bei den verschiedenen Organismen aufgrund der unterschiedlich hohen Toxizitäts-Werte sehr verschieden aus. Auf den ersten Blick lässt sich aus diesen groben Abschätzungen jedoch festhalten, dass die beiden Substanzen meist ähnliche Auswirkungen aufweisen. Darüber hinaus ist auch zu erkennen, dass die beiden Substanzen mit zunehmendem Entwicklungsniveau der Organismen ein erhöhtes, teils sogar bedenkliches Schädigungspotential aufweisen.

Die Analyseverfahren gibt sicherlich einen gewissen Eindruck über das Auftreten von Umwelttoxinen in den verschiedenen Kompartimenten, im allgemeinen scheint sie jedoch für genauere Untersuchungen des Verhaltens der Primärsubstanzen in der Umwelt eher ungeeignet, da die verschiedenen umwelt-relevanten chemischen und physikalischen Eigenschaften wie P_{OW} , C_W , K_{OM} , K_{OC} , RMF , K_H und $t_{1/2}$ in die Betrachtung nicht einbezogen werden. Um ökologisch relevante Fragestellungen wie die Auswaschung in Oberflächengewässer oder Grundwasser, die Verflüchtigung in Atmosphäre und die Akkumulation in Boden, tiefergehend zu behandeln, müssten die Charakteren der einzelnen Substanzen in solche Berechnungen einfließen. Vor allem in Bezug auf die Bioakkumulation in den verschiedenen Organismen der Nahrungskette ist die Fettsorption und die Halbwertszeit in den verschiedenen Organismen von grossem Interesse, in Bezug auf die Biodegradation der Substanzen in den verschiedenen Kompartimenten die chemische und biologische Persistenz. Bei all diesen Überlegungen sollte im Auge behalten werden, dass die Langzeitwirkung von Umwelttoxinen in trägen Systemen wie der Natur mit zunehmender Stabilität der Stoffe eine abnehmende Kontrollierbarkeit der verschiedenen Einflüsse zur Folge hat. Einen tieferen Einblick in diese Thematik werden uns die Berechnungen mit Hilfe des Mackay-Modells im Kapitel 4 dieser Fallstudie geben.

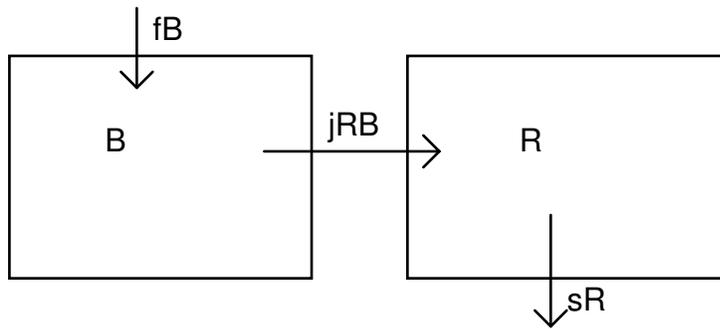
2.3. Umwelteinflüsse von Insektiziden

Zwei weitere Punkte, die nur indirekt in Zusammenhang stehen mit der Ökotoxizität, werden nun zum Schluss eher aus einem allgemeinen, stark vereinfachenden, jedoch systembezogenen Blickwinkel betrachtet. Beim ersten Punkt handelt es sich um die Selektivität, d.h. die schonende Wirkung eines Insektizids auf die Räuber (Nützlinge) eines bestimmten Schädling, beim zweiten um die Kreuzresistenz bzw. Mutationsresistenz eines Pflanzenschutzmittels. Dabei ist klar, dass die unmittelbare Giftwirkung eines Stoffes auf ein Organismus nicht von diesen beiden Parametern abhängt, dass jedoch die nachhaltige Wirkung einer Substanz auf die Natur sehr direkt mit diesen zwei Stoff-Eigenschaften in Verbindung gebracht werden sollten, da sie schliesslich die Destabilisierung eines Ökosystems ganz entscheidend beeinflussen,

Bei Pymetrozine wird in den verschiedenen Produktunterlagen immer wieder darauf hingewiesen, dass das Mittel eine enorm artspezifische Wirkungsweise zeigt, dass also die systeminterne Kontrolle der Schädlinge durch deren Räuber nicht negativ beeinflusst wird, was den Einsatz dieses Pflanzenschutzmittels in Betrieben mit integrierter Produktion (IP) rechtfertigt. In diesem Zusammenhang ist es jedoch wichtig, das komplexe Zusammenwirken von verschiedenen Arten in der Natur im Auge zu behalten. So sollte bei der ganzen Diskussion um die unterschiedlichen Toxizitätswirkungen eines Insektizids auf verschiedene Spezies nicht vergessen werden, dass in der Natur nicht die Räuber die Beute kontrollieren, wie durch diese zwei Begriffe suggeriert wird, sondern dass die Beutepopulation immer jene des Räubers beeinflusst. Dass dem so ist, realisiert man, wenn man sich der ökologische Bedeutung der auf Seite 20 der "Technical Product Information" von Pymetrozine beschriebenen Beobachtungen von Freilandversuchen in Ägypten bewusst wird:

"The control of aphids was excellent and so was the survival of the predators, as long as they did not suffer from shortage of food. Trials led [...] to a reduction of ladybird beetle, but Pymetrozine had caused a complete disappearance of aphids as their food.

Um ein solches einfaches dynamisches Gleichgewicht zwischen Räuber (ladybird beetle) und Beute (aphids) mathematisch zu modellieren, eignet sich die Methode von Lotka-Volterra:



B:= Beute ("Schädling")
R:= Räuber ("Nützling")

f:= Fertilitätsrate = 0,098
j:= Jagderfolg = 0,0018
s:= Sterberate = 0,18

Fig. 1: Systemmodellierung einer einfachen Räuber-Beute-Beziehung.

Dieses System kann durch zwei gekoppelte nicht-lineare Gleichungssysteme dargestellt werden, die über die Euler-Transformation approximiert werden können:

$$\frac{dB}{dt} = f * B - j * B * R \qquad \frac{dR}{dt} = j * B * R - s * R$$

$$B_{t+1} = B_t + f * B_t - j * B_t * R_t \qquad R_{t+1} = R_t + j * B_t * R_t - s * R_t$$

Diese Gleichungssysteme können derart gelöst werden, dass die beiden Populationen B(t) und R(t) mit konstanter Amplitude um einen stabilen Mittelwert oszillieren. Diese Lösung macht deshalb einen Sinn, weil in der Natur jene Spezies, die in Interaktion mit ihrer Umwelt dieses stabile Gleichgewicht nicht finden konnten, im Verlaufe der Evolution ausstarben. Die zeitliche Entwicklung dieser beiden Populationen kann dann in einer Grafik gut verständlich dargestellt werden, wobei die y-Achse die Anzahl Individuen und die x-Achse die Generation einer Population angibt:

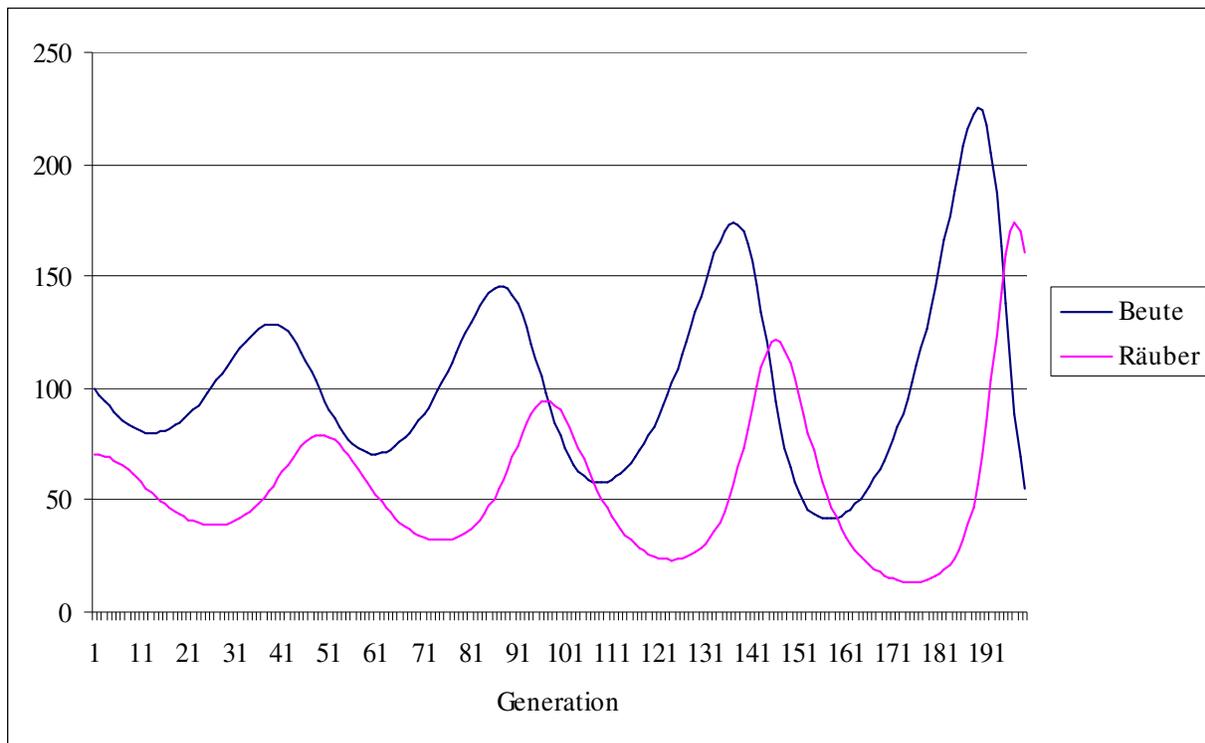
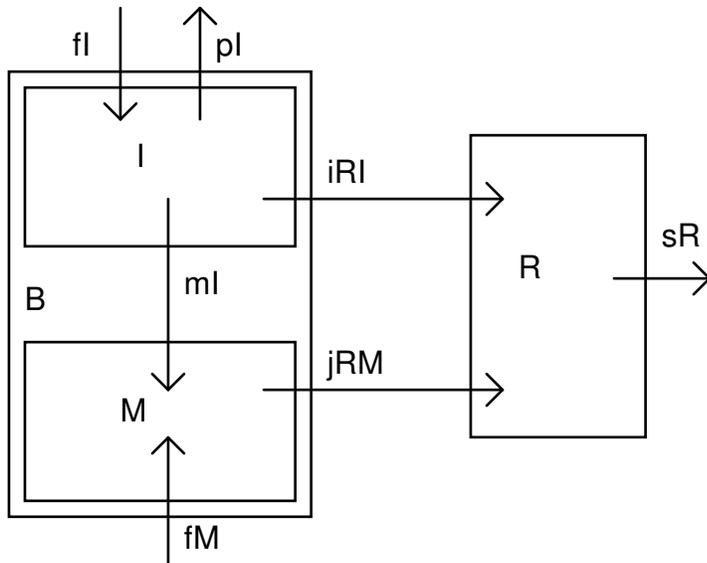


Fig. 1: Dynamisches Gleichgewicht zwischen Räuber- und Beutepopulationen mit wachsender Amplitude.

Aus dieser Grafik lässt sich leicht erkennen, dass die Räuberpopulationen in dem Moment, in dem die Beutepopulation zusammenbrechen, innerhalb ihrer Schwankungen relativ tief liegt. Umgekehrt erreichen die Räuber dann ihr Maximum, wenn die Beutepopulation schon stark dezimiert ist. Der Räuber reagiert also nur auf das grössere Nahrungsangebot, hat jedoch in keiner Weise die Kapazität die Grösse der Beutepopulation zu beeinflussen. Dieses Faktum hängt damit zusammen, dass die zu hohe Beutedichte das Versiegen ihrer eigenen Nahrung provoziert, was in den Differenzialgleichungen in den Term $j*B(t)*R(t)$ einfließt. Die Frequenz und die Amplitude dieser Oszillationen hängen also vorwiegend mit dem Nahrungsangebot der Beute und der daraus resultierenden Fertilität des Schädlings zusammen, d.h. je dichter und homogener im Raum und je konstanter in der Zeit sich das Nahrungsangebot den Schädlingen darbietet, desto schneller und intensiver erfolgen die Seuchen. Dieses Phänomen ist beispielsweise bei grossen Monokulturen zu beobachten, die sich ja vornehmlich für den Einsatz von Insektiziden anbieten.

Nun kann dieses komplexe Abhängigkeitsgefüge auch für die Situation darstellt werden, wo die Beutepopulation zusätzlich durch den Einsatz eines selektiven Insektizids, d.h. einer Substanz, die keinerlei toxische Wirkung gegenüber dem Räuber aufweist, dezimiert wird, sobald die Beutepopulation die Schwelle von 150 Individuen aufweist. Das Modell wird so ein bisschen komplizierter, die Grundidee bleibt jedoch dieselbe: der Räuber ernährt sich von der Beute, die Beute vermehrt sich relativ unabhängig vom Räuber gemäss dem Nahrungsangebot, das sie vorfindet, und wird gemäss der Effizienz des Insektizids kontrolliert:



I:= Iresistente Beute
M:= Mutante Beute

p:= Toxizität des Pflanzenschutzmittels = 0,95
m:= Mutationsrate = 0,005
i:= Jagderfolg auf iredesistente Beute = $j + 0.2*j = 0,00216$

Fig. 3: Systemmodellierung einer einfachen Räuber-Beute-Beziehung unter Einfluss eines Insektizids.

Die Differentialgleichungen, die dieses System beschreiben, und die entsprechenden Approximationen, sehen folgendermassen aus:

$$\frac{dI}{dt} = f * I - i * I * R - m * I - p * I$$

$$\frac{dM}{dt} = f * M - j * M * R + m * I$$

$$\frac{dR}{dt} = i * I * R + j * M * R - s * R$$

$$I_{t+1} = I_t + f * I_t - i * I_t * R_t - m * I_t - p * I_t$$

$$M_{t+1} = f * M_t - j * M_t * R_t + m * I_t$$

$$R_{t+1} = i * I_t * R_t + j * M_t * R_t - s * R_t$$

Mit Hilfe dieses Gleichungssystems können auch für dieses Ökosystem die entsprechenden Populationen $I(t)$, $M(t)$ und $R(t)$ berechnet werden und auf einer Grafik gegen die Zeit aufgetragen werden:

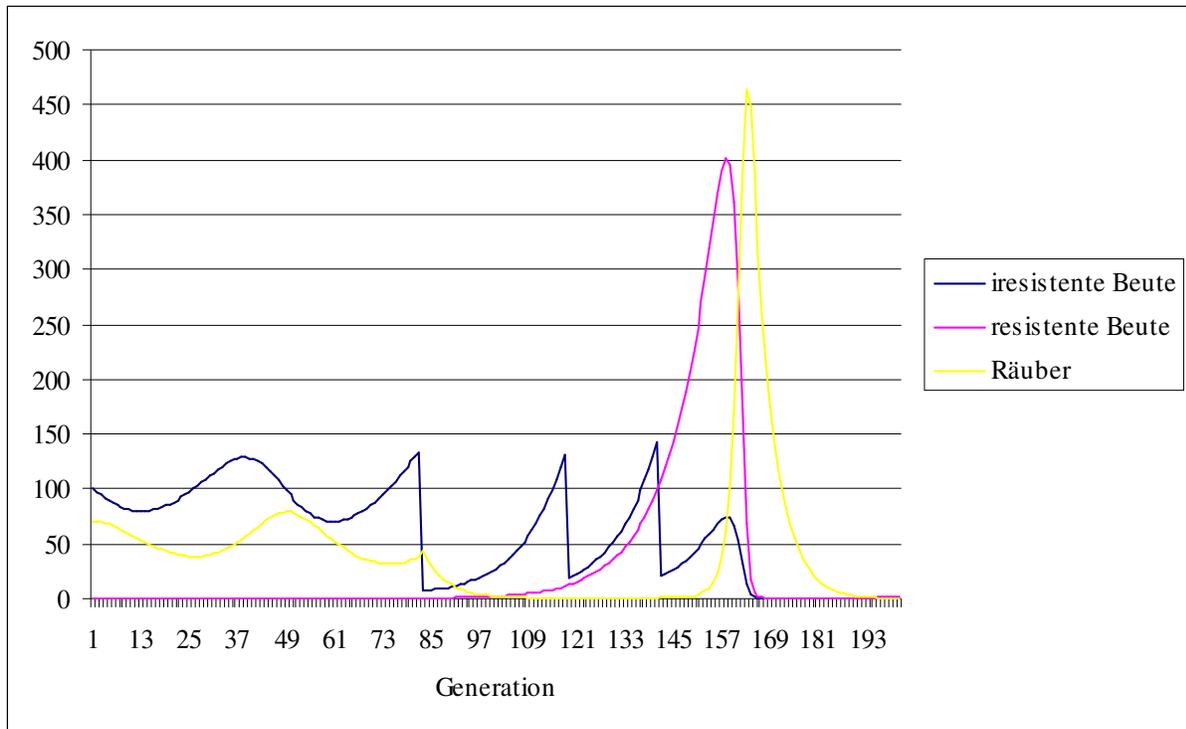


Fig. 4: Gestörtes Gleichgewicht zwischen Räuber- und Beutepopulationen aufgrund eines Insektizids.

Was aus diesen Berechnungen hervorgeht und sich mit den Beobachtungen in den Freilandversuchen deckt ist in erster Linie, dass die Räuberpopulation, die die Schädlingspopulation zusätzlich zum Insektizid kontrollieren sollte, schon nach dem ersten Insektizideinsatz praktisch auf Null dezimiert ist, obwohl das Insektizid auf sie ja keine toxische Wirkung besitzt. Folglich ist dann auch zu beobachten, dass sich eine resistente Schädlingspopulation in dem Moment, wo sich die Mutante im Ökosystem etabliert hat, praktisch ungehindert vermehren kann und den Mittelwert der natürlichen Schädlingspopulation um Faktoren übersteigt. Dass diese Variante enorme ökologische und soziale Auswirkungen hat ist unschwer vorzustellen.

Zum Schluss möchte ich nun noch den zweiten Punkt, die Resistenzbildung gegen Insektizide durch natürliche Mutation, besprechen, eine ebenso wichtige Eigenschaft eines Pflanzenschutzmittels wie die Selektivität. Auch hier soll es darum gehen, die bekannte Forderung nach möglichst geringer Kreuzresistenz aus einem andern Blickwinkel zu beleuchten. Zu diesem Zweck bietet sich die genau gleiche Rechnung mit einer einzigen neuen Variablen an. Wir setzen also $m = 0,001$, also nur fünf mal kleiner als im ersten Modell des Insektizideinsatzes:

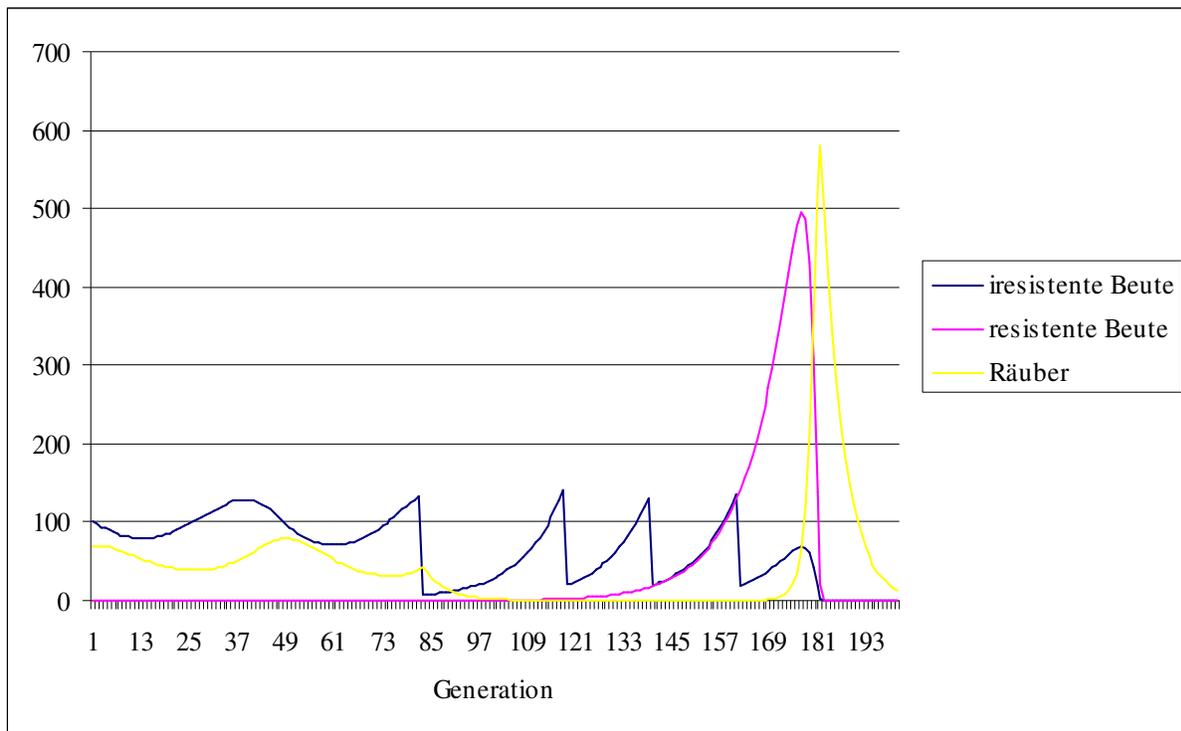


Fig. 5: Gestörtes Gleichgewicht zwischen Räuber- und Beutepopulationen aufgrund eines “besseren“ Insektizids

Es ist in dieser neuen Situation zu erkennen, dass das bessere Insektizid nur einmal mehr eingesetzt werden kann, dass die Mutante jedoch nur etwa 20 Generationen später eine etwa 20% grössere Seuche verursacht als im ersten Fall. Wenn man bedenkt, dass sich gewisse Insekten in tropischen und gemässigten Zonen über das ganze Jahr mit relativ kurzen Generationszeiten vermehren, wird der technische Vorteil eines solchen weniger mutationsanfälligen Insektizids und die damit gewonnene ökonomische Nachhaltigkeit in Anbetracht des ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitsverlusts eher fragwürdig.

Es ist völlig klar, dass diese Modelle stark vereinfacht sind und der Komplexität der Natur nur annähernd gerecht werden. Dennoch zeigen sie Phänomene auf, die wir in sehr ähnlicher Form aus der Realität kennen und geben uns darüber hinaus die Möglichkeit, Risikoabschätzungen und Nachhaltigkeitsprüfungen aus einem andern Blickwinkel durchzuführen, nämlich mit dem meist zu leicht vernachlässigten Faktor Zeit. In dem Sinn soll dies also nur ein Gedankenanstoss sein und vielleicht auch eine Einladung dazu, mit Hilfe eines solchen Modelles rein approximativ ein gekoppeltes dynamisches und stabiles Gleichgewicht zu suchen, so wie dies in der Natur in wesentlich unüberschaubareren Systemen in den letzten Jahrmillionen geschehen ist.