

Zeitdiskrete Modelle der Populationsdynamik des Rübenzystennematoden *Heterodera schachtii* (Schmidt) in Abhängigkeit von der Fruchtfolge und des Temperaturmusters

Teil 3: Entscheidungsmaßnahmen und Bekämpfung Nemaplot, Kai Schmidt, 1992

Zusammenfassung

Ein Differenzenmodell zur Modellierung der Populationsdynamik des Zuckerrübenne-matoden *Heterodera schachtii* innerhalb von verschiedenen Fruchtfolgen ist um die empirischen Erkenntnisse der Praxis bezüglich der biologischen Nematodenbe-kämpfung mit verschiedenen Zwischenfruchtverfahren erweitert worden. Der Modell-an-satz beschreibt mit zufriedenstellender Genauigkeit die Dynamik aus entsprechenden Feldversuchen. Anhand dieser Relationen ließen sich aufgrund von Simulationsstudien diese biologischen Bekämpfungsverfahren wesentlich differenzierter und kritischer betrachten. Die Ergebnisse zeigen nicht nur einen unteren Grenzbereich auf, bei dem Zwischenfruchtverfahren die Nematodenpopulation erhöhen können, bzw. ökonomisch nicht sinnvoll erscheinen. Bei hohen Dichten ergibt sich eine Optimierung des Reduzie-rungspotentials über die Stellung der Zwischenfrucht innerhalb der Fruchtfolge. Wie bei jeder biologischen Bekämpfung, so ist auch der Einsatz von Zwischenfrüchten genauso komplex wie jede andere Pflanzenschutzmassnahme.

1 Einleitung

Auf der Basis einer Differenzengleichung sollen einige Bekämpfungsstrategien gegen *H. schachtii* abgeleitet und analysiert werden. Die chemische Bodenentseuchung mit Nematiziden wird ausgelassen, da momentan keine Zulassungen von solchen Pflan-zenschutzmaßnahmen mehr bestehen.

Die Modelle sollen nicht nur den immensen Untersuchungsaufwand verringern, sondern auch als Basis und Hilfsmittel für den wirtschaftlichen Entscheidungsfindungsprozess dienen. Die Problematik in der Bekämpfung des Schaderregers wird durch Abb. 1 verdeutlicht. Im Gegensatz zu den meisten entomologischen oder mykologischen Schadorganismen muss jegliche Bekämpfungsstrategie aus nematologischer Sicht vor dem eigentlichen Kulturenanbau erfolgen. Eine Ausnahme bestand eventuell in der Ver-wendung von Aldicarb (Temik). Dieses Nematizid diente nur der Ertragssicherung, ver-ringerte aber nicht die Population (STEUDEL et al., 1981), und verschiebt lediglich das Problem um eine Rotation.

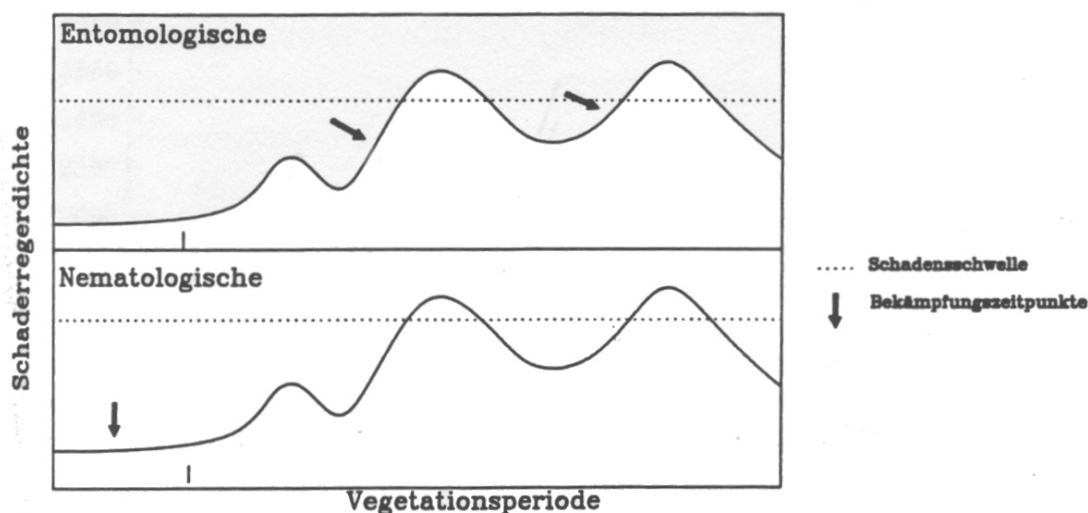


Abb. 1: Vergleich der Bekämpfungsstrategien zwischen entomologischen und nematologischen Schaderregern (nach McSORLEY et al., 1982)

2 Entscheidungsstrategien

2.1 Wahl der Fruchtfolge als Bekämpfungsmaßnahme

H. schachtii als typischer Fruchtfolgeschädling lässt sich durch die Wahl der geeigneten Fruchtfolge unter der Schadensschwelle von 500 E.u.L./100 g Boden halten. Die Wahl der Fruchtfolge erfolgt hauptsächlich nach betriebsspezifischen, ökonomischen und phytomedizinischen Gesichtspunkten. Mit Hilfe der Differenzengleichung können die Auswahlkriterien für die Wahl der Rotation um diesen nematologischen Aspekt erweitert werden. Anhand des in Abb. 2 verdeutlichten Beispiels bei einer gegebenen Endverseuchung nach Zuckerrüben lässt sich ermitteln, in welcher Rotationsdauer die Schadensschwelle unterschritten wird. Auf die Anwendung der Zwischenfrucht wird im Folgenden noch genauer eingegangen. Inwieweit man bereit ist, das Risiko eventuell höherer Verseuchungsdichten zur Saat Zuckerrübe zu tolerieren, hängt von den zu erwartenden Ertragsverlusten ab. Die Entscheidung für eine Bekämpfungsmaßnahme, unter Ausschluss der chemischen Entseuchung, erfolgt also nicht erst im Jahr vor dem erneuten Anbau der Zuckerrübe (SEINHORST, 1967; McSORLEY et al., 1982), sondern schon am Ende der Zuckerrübenkampagne des 1. Jahres.

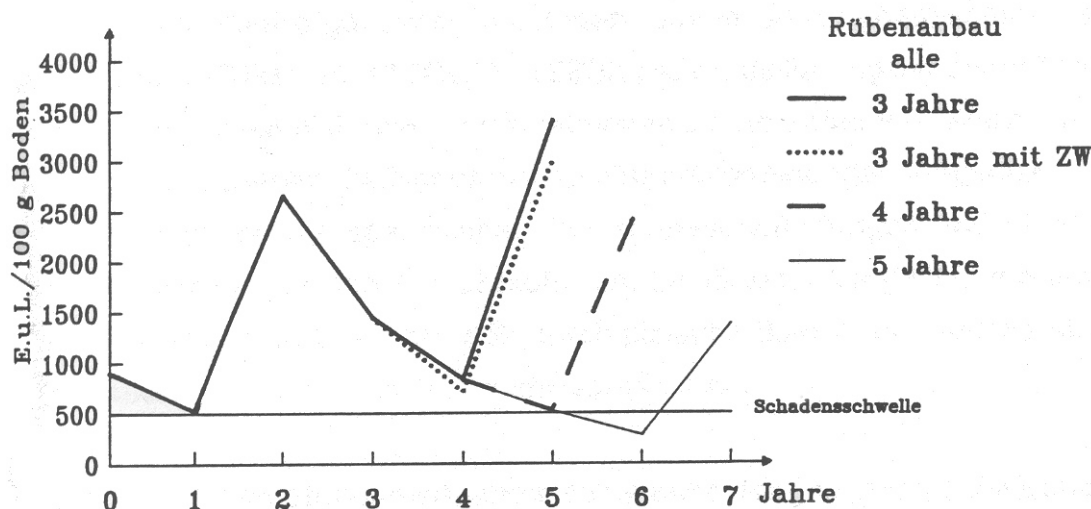


Abb. 2: Wahl der Fruchtfolge als Bekämpfungsmaßnahme zur Kontrolle von *H. schachtii*; Simulationen anhand der Differenzengleichung

2.2 Der Einsatz von Zwischenfrüchten als Bekämpfungsmaßnahme

Auf der Suche nach biologischen Bekämpfungsmaßnahmen wird der Zwischenfruchtanbau verstärkt propagiert, wobei resistente oder nicht-resistente Kruzifern als Feind- oder Fangpflanzen eingesetzt werden können. Inzwischen ist der Einsatz von Zwischenfrüchten als prophylaktische Nematodenbekämpfungsmaßnahme z.T. integrierter Bestandteil von Fruchtfolgen geworden (SCHLANG, 1987). Der Effekt der einzelnen Zwischenfruchtverfahren richtet sich nach der verwendeten Kultur. Der spät gesäte, aber hochanfällige Raps regt den Nematoden zum Schlupf an und bietet ihm prinzipiell die Möglichkeit, den Lebenszyklus zu vollenden und sich stark zu vermehren. Der vorzeitige Umbruch vor Vollendung der ersten Generation führt zu einer Reduzierung der Population. Der Einsatz von resistentem Senf oder Ölrettich regt den Nematoden zum Schlupf an, verhindert aber aufgrund der Resistenz die Entwicklung neuer adulter Weibchen. Inzwischen werden noch weitere Zwischenfruchtarten auf ihre Bekämpfungsmöglichkeit hin untersucht (SCHLANG, 1991). Der resultierende, gemessene Einfluss der Zwischenfrüchte auf die Populationsdynamik von *H. schachtii* ist das Ergebnis eines komplexen Wirkungsgefüge von Umweltfaktoren, agrikulturellen Maßnahmen, organischer Substanz und antagonistischen Mikroorganismen im Boden, sowie dem dynamischen Verhalten dieser einzelnen Faktoren (NICOLAY, 1989). Die Modellierung der Zwischenfrüchte bedeutet aber, diese diskutierten Interaktionen zu vereinfachen. Wenn im Folgenden die verschiedenen Zwischenfruchtkulturen mit-

einander verglichen werden, handelt es sich um die spezifischen Verfahrensanwendungen und nicht um die sorten- oder artentypische Besonderheiten einzelner Zwischenfruchtkulturen. Ein direkter Vergleich von anfälligem Raps und resistentem Ölrettich, z.B. durch gleichen Saattermin, wie es SCHLANG (1991) durchgeführt hat, ist hier nicht vorgesehen.

Wie bei jeder Bekämpfungsmaßnahme sollte auch der Einsatz von Zwischenfrüchten, u.a. auch aus Kostengründen, bedarfsgerecht orientiert sein, wobei allein schon der Bedarf aufgrund der multiplen Nutzung von Zwischenfrüchten schwierig zu definieren ist. Hier wird der Einsatz von Zwischenfrüchten monokausal auf die Nematoden reduzierende Wirkung hin untersucht. Erosionsschutz, die Zufuhr organischer Substanz, pflanzenbauliche Vorfruchtwirkung, Unkrautunterdrückung und ähnliche Wirkungen der Zwischenfrüchte sind nicht Bestandteil dieser Analyse. Nach dieser Einschränkung ist die Entscheidungsmaßnahme des Landwirts anhand der zur Saat Zuckerrübe zu erwartenden Nematodenpopulation zu treffen. Das bestehende Prognosemodell auf der Basis der Differenzengleichung wird um verschiedene Zwischenfruchtvarianten erweitert werden. Anhand von Simulationen wird der Einsatz und Nutzen von Zwischenfrüchten beurteilt.

2.2.1 Modellaufbau und -Entwicklung von Zwischenfruchtverfahren

In der Differenzengleichung sind die verschiedenen Kulturen einer Fruchtfolge im Verhältnis zur Wirtseignung der Zuckerrübe parametrisiert worden. Das Resultat sind verschiedene, fruchtfolgespezifische Populationsverläufe. Diese wirtsspezifischen Gleichgewichtsdichten sind auch bei Zwischenfrüchten zu beobachten und gehen als Sorteneigenschaften in die beschreibende Sortenliste ein. SCHLANG (1985, 1987a) schätzt die wirtsspezifische Verseuchungsdichte der resistenten Ölrettichsorte "NEMEX" auf 280 E.u.L./100 ml Boden. Für die Simulation des Einsatzes von Zwischenfrüchten reicht die bisherige Parametrisierung der angebauten Kultur nicht aus. Es besteht ein dichteabhängiger Zusammenhang in der Effizienz der Zwischenfrüchte. Insbesondere bei geringen Ausgangsverseuchungen kann es zu einer unerwünschten Vermehrung durch den Zwischenfruchteinsatz kommen. Diese Relation lässt sich über eine log-lineare Regression beschreiben (SCHLANG, 1987a).

Die Differenzengleichung muß also um einen weiteren dynamischen Prozess während der Vegetationsperiode erweitert werden. Um die Modellentwicklung zu vereinfachen, werden die empirisch ermittelten Relationen in die Differenzengleichung integriert, auch

wenn die log-linearen Funktionen nur ein schwaches Bestimmtheitsmaß besitzen (SCHLANG, 1987a). Dazu muss der Einfluss des Wirtsparameters θ auf die einzelnen Stadien differenziert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die in der Praxis verwendeten Zwischenfruchtverfahren wie spätgesäter Raps als Fangpflanze, resistenter Senf oder Ölrettich *H. schachtii* verstärkt zum Schlupf anregen. D.h. der Parameter θ_h wird in einer Größenordnung vermutet, die nahe an dem Wert für den Wirt Zuckerrübe liegt, wird aber im Lauf der Vegetationsperiode wieder verkleinert. Nach diesen biologischen Überlegungen lässt sich der Einsatz von Zwischenfrüchten wie folgt modellieren:

Es existiert ein zwischenfruchtspezifischer Schlupfreiz θ_h , und es gilt für die übrigen Stadien folgende Gleichung der wirtsspezifischen Verseuchungsdichte:

$$\theta_{p,d,F} = \theta_z \cdot 10^a \cdot x^b \quad \text{Gl. 1}$$

x ist die Anzahl von E.u.L./100 g Boden, θ_z ist der Einfluss der Zwischenfrucht auf die übrigen Stadienübergangswahrscheinlichkeiten. Die verwendeten Kulturen und deren Parameter sind in Tab. 1 dargestellt. Zum Vergleich sind die Parameter für Zuckerrübe und Winterweizen angegeben.

Tab. 1: Parameterliste der Zwischenfrüchte

Kultur	a	b	θ_h	θ_z	Datenbasis
ZR	-	-	-	1	
WW	-	-	-	0.475	
Raps	1.55	-0.58	0.016	0.919	
Senf	1.47	-0.57	0.044	0.828	
Ölrettich	1.36	-0.56	0.048	0.869	Schlang, 1985

Der effektive Nutzen von Zwischenfrüchten ist sowohl von den klimatischen Verhältnissen im Herbst (SCHLANG, 1985), als auch vom Saatzeitpunkt und der Standdauer der Zwischenfrucht abhängig (HEINEN-DEBRUS, 1985). Diese Effekte werden über den Parameter θ_h im Modell vereinfacht berücksichtigt. Die Wahl des Parameters θ_z führt modellintern zu einer Erhöhung der Population. Die enge Relation zum Wirt Zuckerrübe verdeutlicht, dass die Zwischenfrüchte potentiell als geeignete Wirte modelliert werden. Die dichteabhängige Ergänzungsfunktion (Gl. 1) beschreibt die tatsächliche Populationsänderung. Für die Regressionsparameter der Varianten Raps und Senf sind keine entsprechenden Daten vorhanden. HAMBÜCHEN (1990) hatte bezüglich des

reduzierenden Potentials zwischen den einzelnen Zwischenfruchtverfahren keine nennenswerten Unterschiede feststellen können. Darum werden eng beieinander liegende Parameterwerte angenommen (Tab. 1).

2.2.2 Modellvalidierung

Die Implementation der verschiedenen Zwischenfrüchte ermöglicht die Simulation verschiedener Fruchtfolgeszenarien. In Abb. 3 und Abb. 4 ist das Simulationsergebnis unter Einsatz von Raps als Fangpflanze den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt, in Abb. 5 der Einsatz von resistentem Senf und Ölrettich, jeweils an verschiedenen regionalen Standorten. Auch wenn einige, allerdings noch innerhalb der Streubreite der Daten liegende Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen im Frühjahr nach Zuckerrüben auftreten, so zeigen die Simulationen in allen Fällen sehr genaue Prognosen für den Ausgangsbesatz zur Saat Zuckerrüben. Die veränderlichen Parameter sind wiederum die Generationen/Vegetationsperiode. Die als Zwischenfrucht angebaute Kultur Phacelia (PH) ist nicht in das Modell integriert. Ungeachtet der Modellqualität, die langfristigen Daten zeigen weiterhin, dass langfristig der Einsatz von Zwischenfrüchten im Vergleich zur Kontrolle die Populationsdichten nur marginal reduziert.

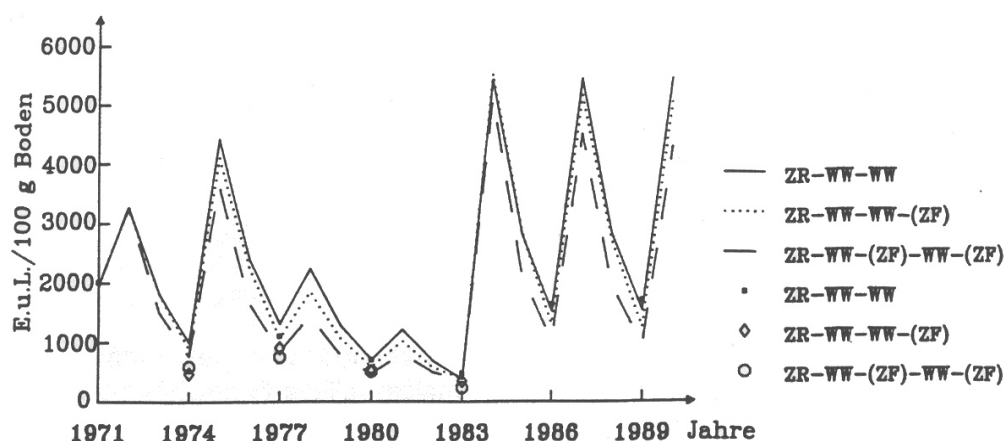


Abb. 3: Simulation der Populationsdynamik von *H. schachtii* bei Zwischenfruchtverfahren Raps, 1971-1989 (Daten, Dikopshof, Rheinland, HAMBÜCHEN, 1990)

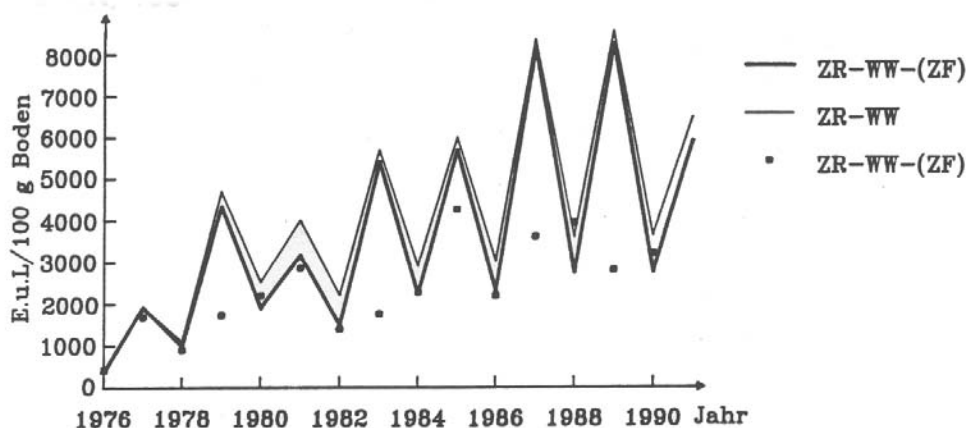


Abb. 4: Simulation der Populationsdynamik von *H. schachtii* bei dem Zwischenfruchtverfahren Raps, 1976-1990; Zum Vergleich die Dynamik ohne Zwischenfrucht (Daten Oberspiesheim, Bayern, BLBP)

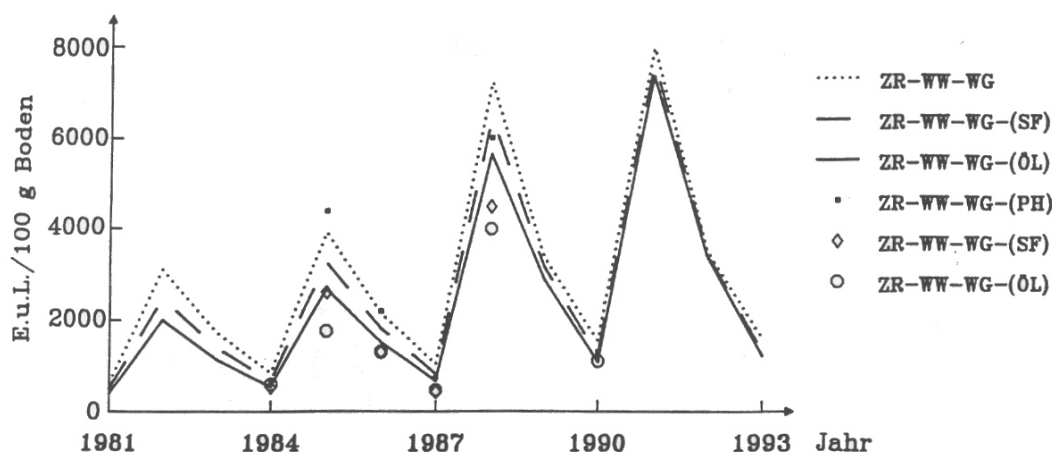


Abb. 5: Simulation der Populationsdynamik von *H. schachtii* bei den Zwischenfruchtverfahren Phacelia, resistenter Senf und Ölrettich (Daten Rheinland, SCHLANG, 1990, 1991)

3 Simulationsszenarien

Nachdem im letzten Abschnitt eine relative Genauigkeit der gewählten Parameter bestätigt wurde, lässt sich nun anhand verschiedener Simulationsstudien der tatsächliche Nutzen einer Zwischenfrucht differenzierter untersuchen. Zwischenfrüchte dürfen nicht für sich alleine betrachtet werden, sondern müssen im Kontext der ganzen Fruchtfolge

untersucht werden. Simulationen anhand eines Modells erlauben wesentlich intensivere Studien, da hier konstante Voraussetzungen geschaffen werden, die im praktischen Feldversuchswesen nicht eingestellt werden können. Für einen direkten Vergleich verschiedener Verfahren sind gleiche Ausgangsbedingungen dringend erforderlich. In Feldversuchen sind diese Voraussetzungen selten erfüllt.

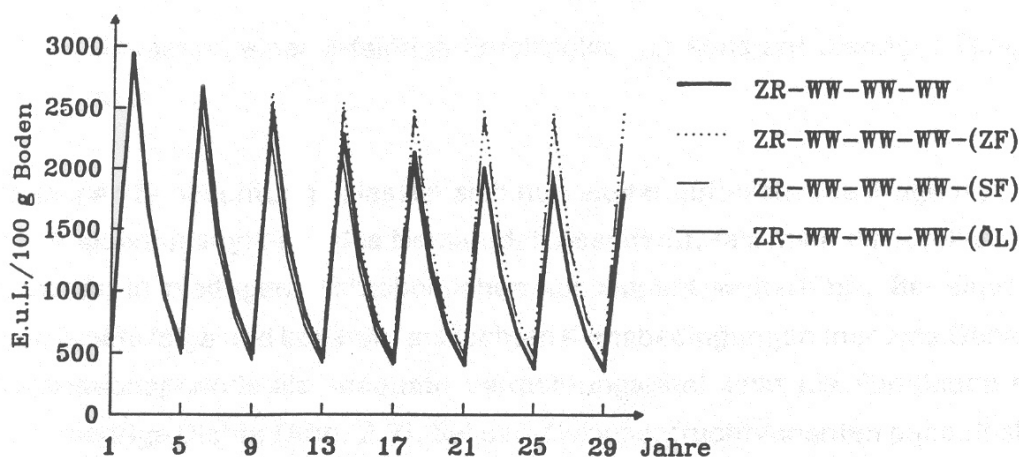


Abb. 6: Simulation der Populationsdynamik von *H. schachtii* bei einer 4-feldrigen Fruchtfolge, konstanter Temperatur, hoher Ausgangsverseuchung und verschiedenen Zwischenfruchtverfahren

3.1 Simulation einer 4-feldrigen Fruchtfolge mit konstant hoher Temperatur

Eine Fruchtfolge mit nur 25% Zuckerrübenanteil ist im Grenzbereich der Gesundheitsfruchtfolgen anzusehen. Unter den klimatischen Verhältnissen, die durchschnittlich zu 2-3 Generationen/Vegetationsperiode führen, nimmt die Population bei einer gegebenen Anfangsverseuchung kontinuierlich ab (Abb. 6). In den ersten Jahren ist zwischen den einzelnen Zwischenfruchtvarianten kein Unterschied zu erkennen. Ab dem Jahr 9 zeigt sich eine Umkehrung der Verhältnisse. Die Populationsdichte zur Saat Zuckerrübe ist bei den Verfahren Raps und Senf höher als wenn keine Zwischenfrucht eingesetzt worden wäre. Ab dem Jahr 25 ist die Brache dem Ölrettich gleichwertig, während gegen Ende der Simulation nach 30 Jahren die Variante ohne Zwischenfrucht in ihrer Nematoden reduzierenden Wirkung allen anderen überlegen ist. Diese Beobachtungen waren anhand der verwendeten Dichteabhängigkeiten, berücksichtigt in den gewählten Regressionsfunktionen, auch zu erwarten.

3.2 Simulation einer 3-feldrigen Fruchtfolge mit konstant niedriger Temperatur

Die bisherigen Beobachtungen lassen sich nun weiter aufteilen. Die Frage ist, wie wird die Populationsdynamik des Nematoden beeinflusst, falls man die log-linearen Korrelationen in niedrigen Dichtebereichen konsequent weiterführt. Bei einer 3-feldrigen Fruchtfolge und konstant schlechten Klimabedingungen (nur eine Generation/Vegetationsperiode als adäquate Vermehrungsrate) sinkt die Population auf eine sehr niedrige Dichte (Abb. 7). Bei den Zwischenfruchtvarianten pendelt sich die Population auf die spezifischen Gleichgewichtsdichten ein, die alle unterhalb der Schadensschwelle von 500 E.u.L./100 g Boden liegen. Sie sind jedoch weit über der spezifischen Verseuchungsdichte der Variante ohne Zwischenfrucht. Es muß nochmals hinzugefügt werden, daß nur für die resistente Ölrettichsorte "Nemex" diese spezifische Wirtsdichte von SCHLANG (1985) statistisch abgesichert ist, während die Funktionen von Raps und Senf Annahmen bleiben. Andererseits hat MÜLLER (1987) in einem Grünbracheversuch mit der Ölrettichsorte "Nemex" eine spezifische Verseuchungsdichte von 50 E.u.L./100 g Boden ermittelt, und den Unterschied mit den verschiedenen klimatischen Bedingungen in Verbindung gebracht.

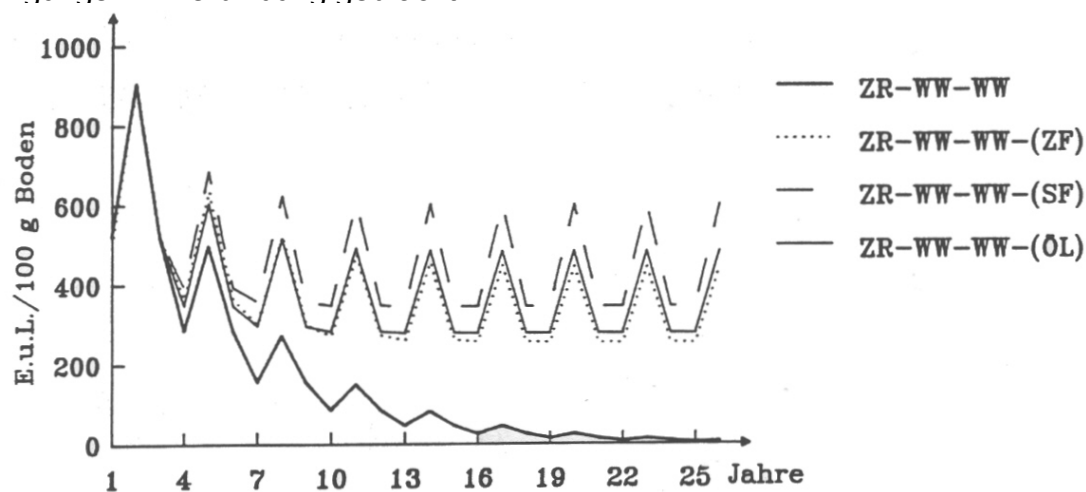


Abb. 7: Simulation der Populationsdynamik von *H. schachtii* bei einer 3-feldrigen Fruchtfolge, konstanter Temperatur, niedriger Ausgangsverseuchung und verschiedenen Zwischenfruchtverfahren

Die beiden vorgestellten Szenarien sind rein theoretisch und kommen so in ihrer Kontinuität nicht vor. Hiermit soll das allgemeine Systemverhalten der Differenzengleichung in Verbindung mit den empirischen Potenzfunktionen aufgezeigt werden. Der direkte Vergleich mit den verschiedenen Messdaten hat die Anwendbarkeit des Ansatzes schon ausreichend demonstriert. Diese Simulationen sind ein Indiz dafür, inwieweit sich der positive Effekt ins Negative auswirken kann, falls die wirtsspezifischen Verseuchungsdichten unterschritten werden.

3.3 Zwischenfruchtanbau in Gesundungsfruchtfolgen

Der in den Simulationen beobachtete Umkehreffekt lässt sich konkret anhand der Daten des Pflanzenschutzamtes Rheinland-Pfalz demonstrieren. In der 5-feldrigen Fruchtfolge wurde ein sehr niedriges Verseuchungsniveau über die gesamte Versuchsdauer aufrecht erhalten. Mit dem Modell lässt sich diese niedrige Abundanzdynamik sehr gut prognostizieren (Abb. 8). In den Simulationen lässt sich die bestehende Fruchtfolge um eine der modellierten Zwischenfrüchte erweitern. Die Übertragung der Zwischenfruchtergebnisse auf ein Gebiet außerhalb des Versuchsgebiets kann angezweifelt werden. Es soll nur anhand eines konkreten Beispiels bei einer niedrigen Populationsdynamik demonstriert werden, welche Auswirkungen der Zwischenfruchteinsatz haben kann. Erwartungsgemäß pendelt sich die Population zur Saat Zuckerrüben auf die in Abbildung 2.8 dargestellten Gleichgewichtsdichten ein. Wie man aber weiterhin ersehen kann, werden höhere Enddichten nach Zuckerrüben erreicht, wobei für alle Varianten der gleiche Vermehrungsfaktor vorliegt. Nach SCHLANG (1987 b) sind diese höheren Endverseuchungen tolerierbar, da erstens die Schadensschwelle nicht überschritten wird und zweitens aufgrund eines vermuteten antagonistischen Potentials ein gebremster Populationsanstieg in den folgenden Zuckerrüben zu beobachten ist. Zu ganz anderen Ergebnissen kommen HEYLAND et al. (1988). Sie beobachten vereinzelt aufgrund der positiven Vorfruchtwirkung ein verstärktes Zuckerrübenwachstum und damit verbunden, einen stärkeren Populationsanstieg.

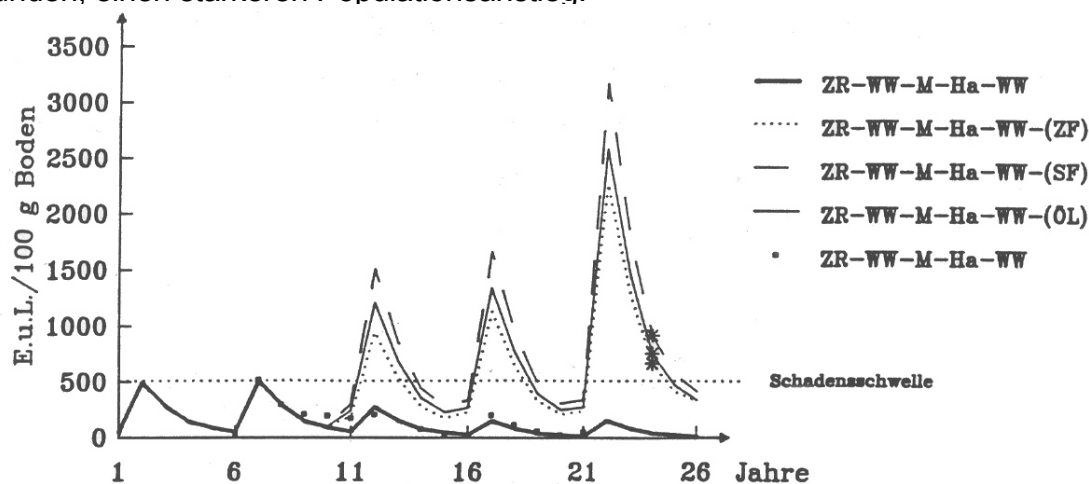


Abb. 8: Simulation der Zwischenfruchtverfahren in einer Gesundungsfruchtfolge am Beispiel der Rotation ZR-WW-Mais-Ha-WW, 1969-1984, (*) kennzeichnet die Populationsdichte von *H. schachtii* im 3. Jahr (Daten Pflanzenschutzamt Mainz)

Unter Beibehaltung der aktuellen Fruchtfolgen führen die höheren Verseuchungsdichten zu keinerlei Nachteilen (Abb. 8). Die Schadensschwelle wird trotz gün-

stiger klimatischer Bedingungen unter Zuckerrüben am Ende der Rotation wieder unterschritten. Problematisch wird es erst, falls man aus ökonomischen Erwägungen den Wirtsanteil in der Fruchtfolge erhöhen will und z.B. nach dem 3. Jahr erneut Zuckerrüben anbauen will. In diesem Fall ist die Verseuchung erst auf ein Niveau abgeklungen (je nach Variante 700-950 E.u.L./100 g Boden), welches über der Schadensschwelle liegt. In Abb. 8 sind diese Dichten durch (*) gekennzeichnet. In der Folge kann es zu Ertragsverlusten bei den Zuckerrüben kommen. Des weiteren ist die Ausgangspopulation für eine eventuell wesentlich höhere Gleichgewichtsdichte gebildet worden. Damit wird deutlich gezeigt, dass die wirtspezifischen Grenzdichten unter gewissen Umständen nicht tolerierbar sind. Des weiteren wird nochmals auf die Bedeutung der Ausgangsverseuchungen für die nichtlineare Vermehrungsrate des Nematoden hingewiesen. Um plötzliche Gradationen zu vermeiden, sollte man bemüht sein, die Nematodenpopulation auf ein Minimum zu reduzieren.

3.4 Bestimmung des Grenznutzens von Zwischenfrüchten

Die beobachteten Zusammenhänge anhand der Simulationen lassen sich weiter untersuchen. Die Frage ist, ab welcher Ausgangsdichte der Einsatz von Zwischenfrüchten aus nematologischer Sicht unrentabel wird.

Dabei wird nicht der Einfluss der einzelnen Zwischenfrüchte auf die Populationsdynamik untersucht, sondern die Zwischenfrüchte in Verbindung mit der Vorfrucht. Als Beispiel wird das Produktionsverfahren "Winterweizen" verwendet. Die Prognosegenauigkeit des Parameter für Winterweizen ist anhand der zahlreichen Datensätze demonstriert worden. Der Simulationszeitraum läuft von Frühjahr unter Winterweizen bis zur Saat Zuckerrüben. Das Modell erlaubt es, für alle vier Varianten gleiche Ausgangsdichten unter Winterweizen einzustellen und die drei Zwischenfruchtvarianten der Nullvariante gegenüberzustellen. Schon diese Möglichkeit ist in einem praktischen Experiment kaum möglich. Die Ausgangsdichten sind in den Simulationen sukzessive erhöht worden. In dem angegebenen Dichtebereich von bis zu 4500 E.u.L./100 g Boden reduziert alleine der Winterweizen die Population um 42-47% (Abb. 9). Zusätzlich reduziert der Einsatz von Zwischenfrüchten je nach Verfahren die Population um bis zu 20% zur Saat Zuckerrübe bei einer Ausgangsverseuchung von 4500 E.u.L./100 g Boden unter Winterweizen. Diese 20% bei extrem hohen Verseuchungsdichten liegen weit unter den Beobachtungen von STEUDEL et al. (1985, 1989), die für verschiedene, resistente Senf- und Ölrettichsorten alleine für den Zeitraum von der Saat bis zum Umbruch der Zwischenfrüchte Reduzierungsraten von 50-60% beobachteten. Bei diesen Ergebnis-

sen sind die weiteren Abbauraten des kommenden Winters noch nicht berücksichtigt. Diese große Diskrepanz lässt natürlich die Simulationsergebnisse anzweifeln. Andererseits stimmen die durch das Modell geschätzten Ausgangsverseuchungen zur Saat Zuckerrübe mit den Beobachtungswerten nahezu überein (siehe Abb. 3-6). Diese Übereinstimmung ist ein Indiz dafür, dass die aufgestellten Kausalzusammenhänge durchaus in den richtigen Größenordnungen liegen. Es gibt natürlich eine Schar von anderen Werten für die Parameter θ_h und θ_z , mit denen sich die Reduzierungsraten von STEUDEL et al. (1989) nachbilden lassen. Mit diesen Parametern würde aber z.B. die gemessene Population von 1989 (SCHLANG, 1991) nach Ölrettich "Nemex" stark unterschätzt (620 E.u.L. simuliert zu 1100 E.u.L./100 g Boden gemessen).

In Abhängigkeit von der Ausgangsverseuchung unter Winterweizen lässt sich die Population durch den Einsatz von Zwischenfrüchten nur in einem geringen Bereich reduzieren. Es gibt also einen Dichtebereich, ab dem die Zwischenfruchtvarianten nicht mehr in der Lage sind, die Population in die Nähe der Schadensschwelle zu drücken. Anhand der Simulationen ergibt sich ein Bereich von 1200-1600 E.u.L./100 g Boden unter Winterweizen und ist abhängig von der Dichte über der Schadensschwelle, die toleriert wird.

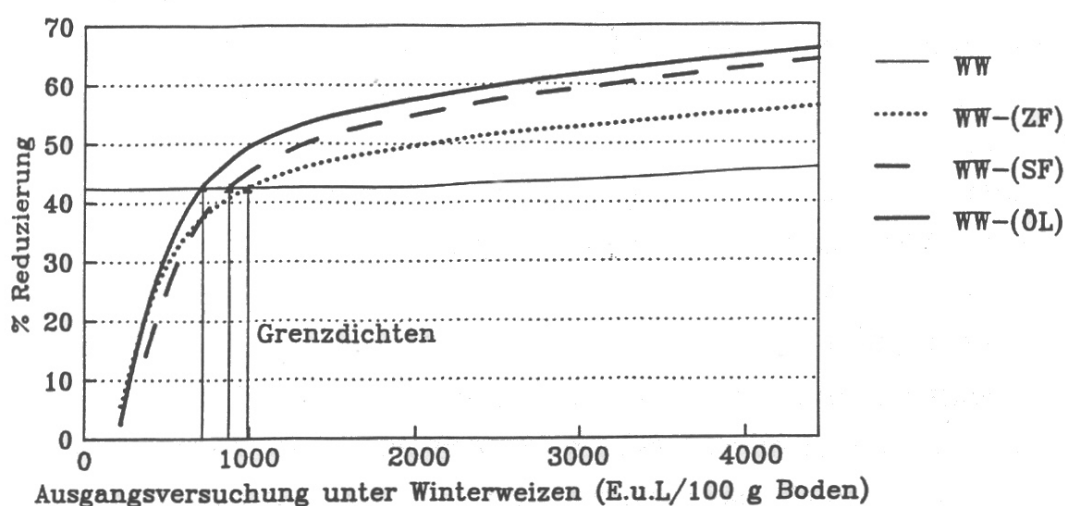


Abb. 9: Untersuchung der Grenzdichten der einzelnen Zwischenfruchtverfahren nach Winterweizen und gleicher *H. schachtii* Verseuchung

Mit abnehmender Ausgangsdichte unter Winterweizen nimmt der relative Bekämpfungserfolg der einzelnen Zwischenfrüchte immer mehr ab (Abb. 9). Bei den Dichten von 600-950 E.u.L./100 g Boden sind je nach Variante die Grenzdichten erreicht, bei

denen dem Aufwand von ca. 300,- DM/ha für den Zwischenfruchtanbau keinerlei positiver Effekt bezüglich der Nematodenreduzierung gegenübersteht. Diese "ökonomischen" Grenzdichten werden umso größer, je größer das Reduzierungspotential der eigentlichen Hauptkultur ist, wie z.B. beim Mais, oder je kleiner das Potential der Zwischenfruchtvariante ist. TACCONI et al. (1990) haben in mediterranem Klima mit der resistenten Ölrettichsorte "Pegletta" Versuche nach Weizen durchgeführt. Obwohl die Temperaturbedingungen für die Vermehrung des Nematoden wesentlich günstiger sind, vermuten sie für den Einsatz von Zwischenfrüchten die ökonomische Schadensschwelle sogar erst ab 1000 E.u.L/100 g Boden.

3.5 Zwischenfruchteinfluss mit zunehmender Verseuchung

Der relative Dichteunterschied von *H. schachtii* wird nach Zuckerrüben sehr klein (Abb. 4 und Abb. 5). In Jahren mit günstigen klimatischen Verhältnissen gleicht der Nematode die zur Saat Zuckerrüben bestehenden Differenzen zwischen den einzelnen Varianten aufgrund seiner Vermehrungsrate aus. Bei einem erneuten Zwischenfruchteinsatz wird der Unterschied zur nächsten Saat Zuckerrübe aber wieder erreicht. Biologisch erklären lässt sich dieses Phänomen mit der verstärkten Vermehrungsrate bei niedrigerer Ausgangsverseuchung (GOFFART, 1952; SCHLANG, 1987 b; HEYLAND et al., 1990), bzw. verbesserten Wachstumsbedingungen der folgenden Zuckerrüben (CRUMP und KERRY, 1987; HEYLAND et al., 1988). HEINEN-DEBRUS (1985) hatte genau diesen Effekt in ihren Untersuchungen beobachten können. Um dieses Phänomen quantifizieren zu können, wurde das Simulationsexperiment in Kap. 2.2.4 bis zur Endverseuchung nach Zuckerrüben weiter verfolgt. Ausgehend von den Unterschieden zwischen der Nullvariante (Brache) und den Zwischenfruchtvarianten zur Saat Zuckerrüben wurde der quantitative Unterschied vor Zuckerrüben mit dem quantitativen Unterschied nach Zuckerrüben verglichen. Bei einem niedrigen Ausgangsniveau bleibt die verfahrensbedingte Differenz auch nach Zuckerrüben weitgehend erhalten. Mit zunehmender Populationsdichte steigt die Differenz zur Saat Zuckerrüben zwischen den Zwischenfruchtvarianten und der Nullvariante um 20%, die unterschiedliche Vermehrung unter Zuckerrüben reduziert diese Differenz bei der gegebenen Temperatur auf 5% nach Zuckerrüben (Abb. 10). Das nematodenreduzierende Potential einer Zwischenfrucht wird in Abhängigkeit von der Dichte nicht oder nur eingeschränkt an die folgende Rotation weitergegeben. Nur mit weiterem Zwischenfruchtanbau lässt sich das vorherige Ausgangsniveau wieder erreichen. Diese Ergebnisse deuten auf einen Dichtebereich hin, in dem der Zwischenfruchteinsatz den größten Nutzen bringt. Dieser Bereich liegt dort, wo der relative Unterschied zwischen der Nullvariante und der Zwischenfruchtvariante sowohl zur Saat als auch nach Zuckerrüben am größten ist. An-

hand der Simulationen lässt sich dieser Bereich quantifizieren, wobei wiederum von den Dichten unter Winterweizen ausgegangen wird. Ist das Ziel die maximale Reduzierung der Population, so sollte die Zwischenfrucht bei einer Dichte von 1800 - 2500 E.u.L./100 g Boden in Winterweizen angewendet werden. Es muss jedoch erwähnt werden, dass bei diesem Verseuchungsgrad die Population nicht in die Nähe der Schadensschwelle reduziert wird.

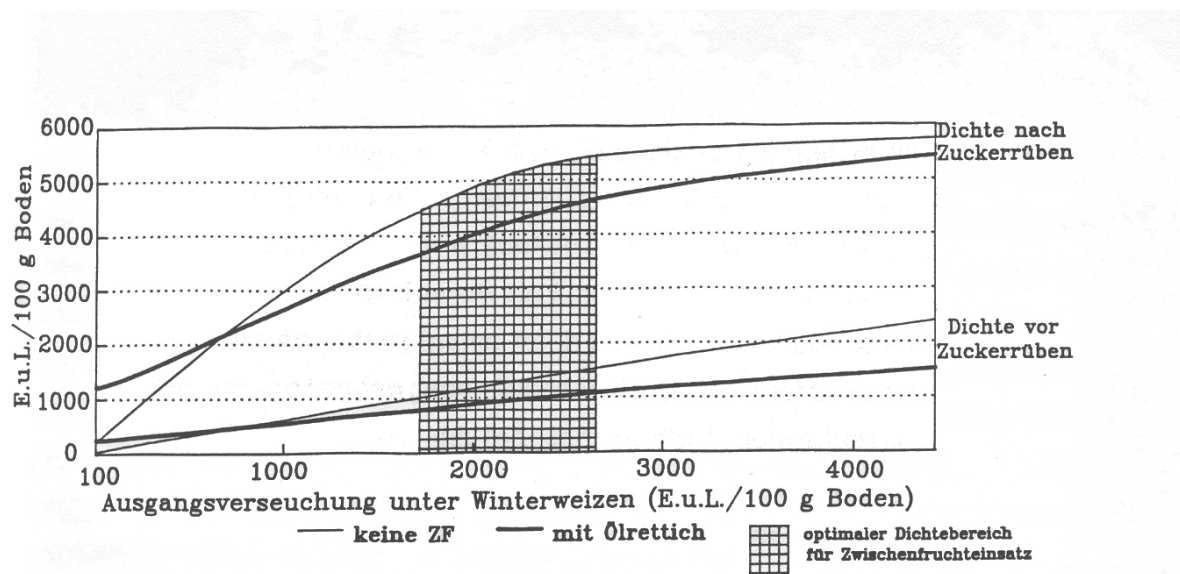


Abb. 10: Untersuchung des Zwischenfruchteinflusses auf die Populationsdichte von *H. schachtii* nach Zuckerrüben und der optimale Reduzierungsnutzen in Abhängigkeit von der Populationsdichte

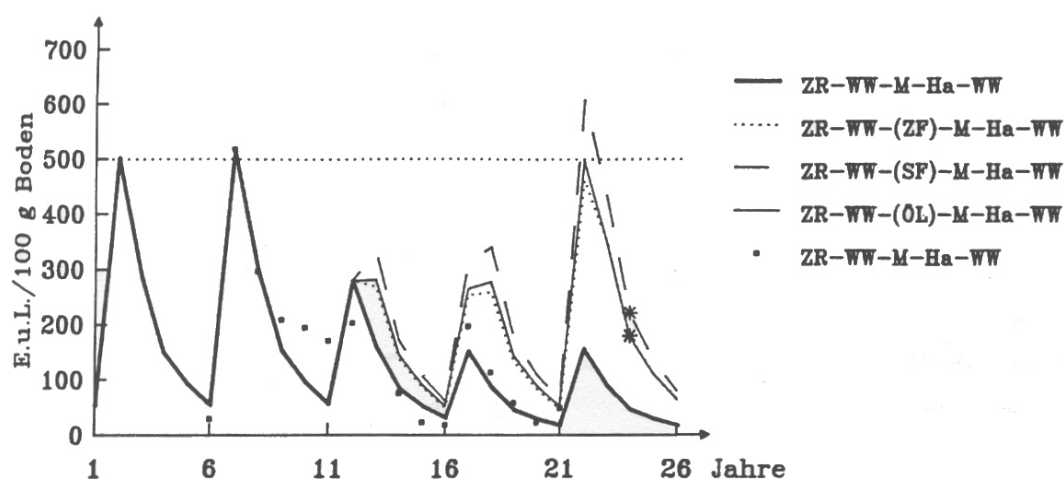


Abb. 11: Einfluss der Zwischenfruchtverfahren auf die *H. schachtii* Population in Abhängigkeit von der Stellung in der Fruchtfolge, (*) kennzeichnet die Populationsdichte im 3. Jahr (Daten Pflanzenschutzamt Rheinland-Pfalz)

3.6 Optimierung des Zwischenfruchteinsatzes

Nachdem die Simulationen gezeigt haben, dass es Dichtebereiche gibt, in welchem der Einsatz von Zwischenfrüchten unterschiedliche Effekte hat, besteht eine weitere Optimierungsmöglichkeit darin, das maximale Reduzierungspotential durch die Stellung der Zwischenfrucht innerhalb der Fruchtfolge zu verändern. Als Beispiel dient wiederum der Datensatz des Pflanzenschutzamtes Rheinland-Pfalz. Will man aber auf die zahlreichen anderen Vorzüge von Zwischenfrüchten innerhalb der Fruchtfolge nicht verzichten, so müssen sie in einem Dichtebereich angewendet werden, der sich zukünftig nicht nachteilig auswirkt. Es wird hierbei natürlich auf die positive Vorfruchtwirkung in Zuckerrüben verzichtet. In der gegebenen Fruchtfolge bietet sich arbeitstechnisch ein Einsatz vor Mais an. Wie man in Abb. 11 erkennt, wird die Abundanz immer noch negativ beeinflusst, aber in wesentlich geringeren Größenordnungen gegenüber des Zwischenfruchteinsatzes am Ende der Rotation (Abb. 8). Es bleibt die Möglichkeit der Fruchtfolgeänderung nach dem dritten Jahr bestehen, die Verseuchung ist auf ein Niveau unter der Schadensschwelle abgeklungen (*). Das Pflanzenschutzamt Mainz hat in einem anderen Versuch genau diese "optimierte" Stellung der Zwischenfrucht Raps in der Fruchtfolge untersucht. Auch wenn bei den sehr niedrigen Abundanzen Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Dynamiken zu beobachten sind (Abb. 12), kommt AUGUSTIN (unveröffentlicht) anhand der Messergebnisse zu der Schlussfolgerung, dass "der normale Rückgang der Population in der Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten weniger deutlich zum Ausdruck kommt, und ein eindeutig höherer Wiederanstieg beim Anbau der Hauptwirtspflanze offensichtlich" ist. In Betrachtung über die gesamte Rotation entsprechen diese Beobachtungen den simulierten Zusammenhängen.

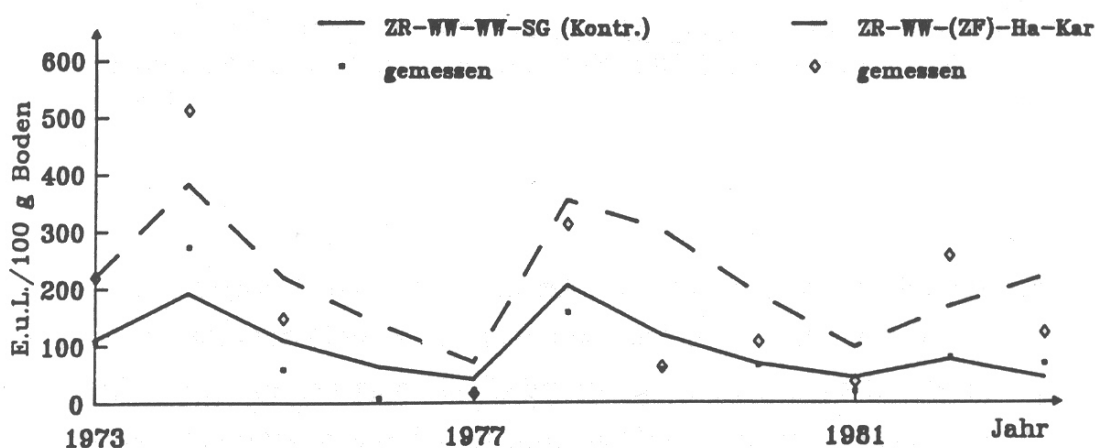


Abb. 12: Einfluß der Zwischenfrucht auf die *H. schachtii* Population in Abhängigkeit von der Stellung in der Fruchtfolge, 1969-1984 (Standort Nonnenhof, Daten Pflanzenschutzamt Rheinland-Pfalz)

Ein zweites Beispiel verdeutlicht die Ausnutzung der optimalen Reduzierung (Abb. 13). Verglichen werden ZR-WW-WW-(ZF) mit ZR-WW-(ZF)-WW. Die Zwischenfrucht (Raps als Fangpflanze) wurde nach dem 1. Winterweizen eingesetzt. In der ersten Simulationsphase (Jahre 1-7) besteht kein Dichteunterschied zur Saat Zuckerrübe zwischen den Verfahren. Ab dem Jahr 7 macht sich der dichteabhängige Reduzierungsunterschied bemerkbar. Er beträgt bis zu 24% Unterschied zur Saat Zuckerrüben im Jahr 13 (424 zu 322 E.u.L./100 g Boden). Der epidemische Anstieg im Jahr 13 (entspricht dem sehr warmen Jahr 1983) wird durch das zweite Verfahren wesentlich stärker gebremst, was sich auch in der unterschiedlichen Abundanz zur nächsten Saat Zuckerrübe im Jahr 16 auswirkt (1437 zu 1183 E.u.L./100 g Boden).

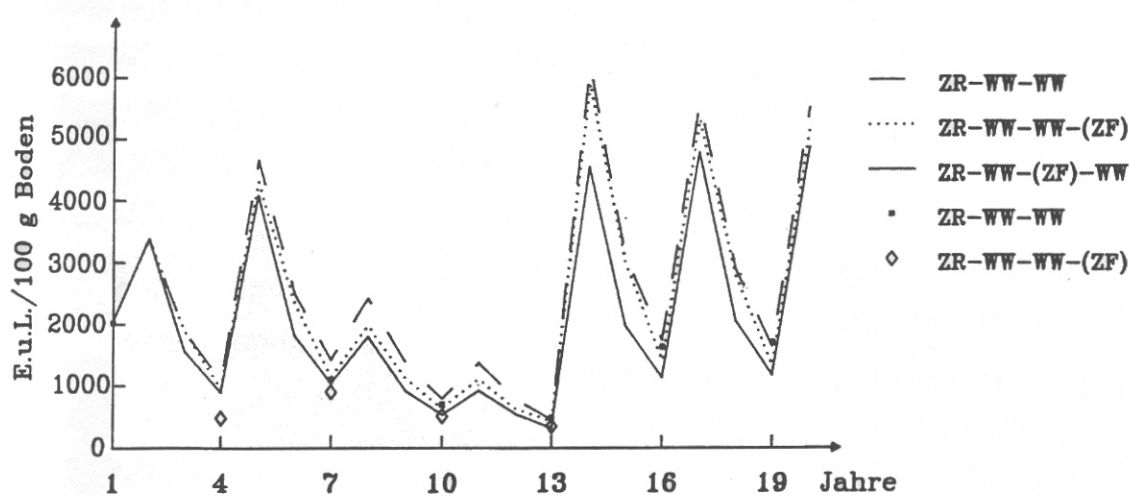
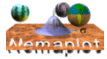


Abb. 13: Einfluß der Zwischenfrucht auf die *H. schachtii* Population in Abhängigkeit von der Stellung in der Fruchtfolge (Daten HAMBÜCHEN, 1990)

4 Diskussion

Bei den hier dargestellten Simulationen handelt sich um rechnerisch konstruierte Szenarien. In dieser strikten Eindeutigkeit kommen solche Situationen in der Natur nicht vor. In den Simulationen sind die Erkenntnisse von SCHLANG (1985) über den nicht-linearen Zusammenhang der wirtspezifischen Verseuchungsdichten von Zwischenfrüchten, sowie der Vermehrungsleistung des Nematoden anhand der Differenzgleichung auf bestimmte Situationen angewendet worden. Es galt zu klären, welche Auswirkungen eine Vermehrung unter Zwischenfrüchten haben könnte.

Anhand der Ausführung ist gezeigt worden, dass eine biologische Bekämpfung von *H. schachtii* mit Hilfe von Zwischenfrüchten genauso komplex wie jede andere Pflanzenschutzmaßnahme ist. Schon HEYLAND et al. (1988) hatten anhand ihrer Unter-



suchungsergebnisse festgestellt, dass der Einsatz von Zwischenfrüchten nicht immer zu dem gewünschten Nutzen führt. Die dargestellte Dichteabhängigkeit in der Effizienz der Zwischenfrüchte erfordert für den Anwender einen Überblick über die dynamischen Prozesse im Boden über die Dauer einer Rotation hinaus.

Dieselben Überlegungen gelten auch für alternative Bekämpfungsverfahren unter Ausnutzung des antagonistischen Potentials im Boden. Der Einfluss parasitierender oder räuberischer Pilze auf die verschiedenen Stadien einer Nematodenpopulation wird unterschiedlich diskutiert (CRUMP und KERRY, 1987; NICOLAY und SIKORA, 1989; STEUDEL et al., 1990, SIKORA, 1992). Ungeachtet der tatsächlichen Relationen, ist man bestrebt, die natürlich vorkommenden Gegenspieler von *H. schachtii* auszunutzen und zu fördern (SIKORA, 1992). Bei diesen Beispielen handelt sich um Überlegungen, inwieweit dieses Modell unterstützend bei zukünftigen oder schon realisierten Forschungsrichtungen Verwendung finden kann.