

INSTITUT FÜR LANDWIRTSCHAFTLICHE BETRIEBSLEHRE
DER
RHEINISCHEN FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN

**Konzeption und Entwicklung eines Entscheidungs-
unterstützungssystems für das Integrierte
Nematodenmanagement im Zuckerrübenanbau**

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften

(Dr.agr.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 30.12.2005

von Henrik Ebers

aus Helmstedt

D 98

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Referent: Prof. Dr. Ernst Berg

Korreferent: Prof. Dr. Richard A. Sikora

Tag der mündlichen Prüfung: 16.02.2006

Gedruckt bei:

Konzeption und Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für das Integrierte Nematodenmanagement im Zuckerrübenanbau - Kurzfassung

In Hinblick auf die bevorstehenden Preissenkungen im Rahmen der Reform der europäischen Zuckermarktordnung ist es entscheidend, den Zuckerrübenanbau zum Erhalt der innerbetrieblichen Wettbewerbsfähigkeit so effizient wie möglich zu gestalten. Integriertes Management des wichtigsten Schaderregers an Zuckerrüben, des Rübenzystennematoden *Heterodera schachtii*, ist ein wesentlicher Bestandteil eines effizienten Zuckerrübenanbaus. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein bio-ökonomisches Entscheidungsunterstützungssystem als eigenständig lauffähiges Computerprogramm entwickelt. Dieses versetzt Landwirte und deren Berater in die Lage, durch Prognose der ökonomischen Auswirkungen der im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen die relativen Vorzüge der Maßnahmen zu bewerten.

Die entwickelten biologisch-technischen Simulationsmodelle, die als Informationssystem des Entscheidungsunterstützungssystems dienen, umfassen die Simulation und Prognose der Abundanzdynamik des Nematoden unter Wirts- und Nichtwirtpflanzen und unter dem Einfluss der Managementmaßnahmen sowie der Ertragsdynamik der Zuckerrübe mit und ohne Schaderegerbefall. Die Simulationsmodelle sind dynamisch und stochastisch gestaltet. Ihre Entwicklung erfolgt nach dem Schema Konzeption – Formalisierung der Modellelemente in Form mathematischer Gleichungen – Kalibrierung der Modellparameter – Verifikation und Validierung des Modellansatzes. Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgt auf der Basis von Auswertungen mehrjähriger nematologischer und pflanzenbaulicher Feldversuche aus dem Rheinland, Literaturangaben, Expertenmeinungen und ergänzend plausiblen Annahmen.

Mit dem Entscheidungsunterstützungssystem werden längerfristige Simulationsexperimente durchgeführt, in denen die durch Carry-over-Effekte hervorgerufenen Folgekosten der einzelnen Managementmaßnahmen für die vergleichende Bewertung erfasst werden können. Als politische Systemumwelt für diese Simulationsexperimente wird die bis 2006 geltende Zuckermarktordnung der EU in der für das Rheinland maßgeblichen Ausgestaltung des Zuckererzeugers Pfeifer & Langen KG aus Köln nachgebildet. Wichtigstes Ergebnis dieser Simulationsexperimente ist, dass die vornehmliche Leistung der betrachteten Maßnahmen des Nematodenmanagements in der Verringerung der Variabilität der ökonomischen Zielgröße kumulierter Gesamtdeckungsbeitrag besteht. Nematodenmanagement empfiehlt sich daher in erster Linie als ein Instrument der Risikominderung im Zuckerrübenanbau. In zweijährigen Fruchtfolgen (50% Zuckerrübenanteil) erweist sich das so genannte Resistenzmanagement, d.h. der wechselnde Anbau nematodenresistenter und -anfälliger Zuckerrübensorten, unabhängig von der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers als am vorzüglichsten. In der verbreiteten dreijährigen Fruchtfolge verzichten risikoneutrale Entscheidungsträger auf Nematodenmanagement, während risikoaverse Entscheidungsträger den frühen Anbau nematodenresistenter Zwischenfrüchte nach Stoppelweizen bzw. Wintergerste gegenüber einer Fruchtfolge ohne Nematodenmanagement präferieren könnten. Selbst bei Fruchtfolgen, in denen Zuckerrüben lediglich alle vier Jahre angebaut werden, senkt Nematodenmanagement noch die Volatilität der Zielgröße.

Als Ansatzpunkt für Modellerweiterungen werden abschließend gesamtbetriebliche Planungs- und Optimierungsansätze diskutiert.

Concept and development of a decision-support-system for the integrated nematode-management in sugar beet cultivation – abstract

With regard to the forthcoming price cut within the reform of the Common Market Organization for sugar it is vital to form the sugar beet cultivation as efficiently as possible to preserve its intra-farm competitiveness. Integrated management of the most important pest in sugar beets, the sugar beet cyst nematode *Heterodera schachtii*, is an essential component of efficient sugar beet cultivation. In this doctoral thesis a bioeconomic decision-support-system (dss) is developed as a stand-alone computer program. It enables farmers and their advisers to assess the excellence of the measures available within the integrated nematode management by predicting their economic consequences.

The developed biological-technical simulation models serve as an information system of the dss and enclose the simulation and prediction of the nematodes abundance under hosts and nonhosts and under the influence of the management measures, as well as the sugar beet yield development with and without the influence of the nematode. The simulation models are dynamic and stochastic. Their development occurs according to the pattern concept - formalization of the model elements in form of mathematical equations - calibration of the model parameters - verification and validation of the model. The calibration of the model parameters is based upon evaluations of long-time nematological and agronomic field trials located in the Rhineland, references, expert's opinions and additional feasible assumptions.

With the dss long-term simulation experiments are carried out in which the costs caused by carry-over effects of the single management measures can be grasped for comparative assessments. The political system environment for these experiments is the EU's Common Market Organization for sugar valid until 2006 and its regional implementation by the sugar producer Pfeifer & Langen based in Cologne. The most important result of these simulation experiments is that the main achievement of the considered measures for nematode management exists in the reduction of the variability of the economic model output "accumulated total gross margin". Hence, nematode management is primarily recommended as an instrument of risk management in sugar beet cultivation. In two-year sugar beet rotations, the so-called resistance management, i.e. the alternating cultivation of nematode resistant and susceptible sugar beet cultivars, turns out most superior independent of the decision makers risk preference. Indeed, in widespread three-year sugar beet rotations risk neutral decision makers resign nematode management, but risk averse decision makers could prefer early catch crop cultivation after wheat or winter barley to a crop rotation without nematode management. Even in four-year sugar beet rotations nematode management still reduces the accumulated total gross margin's volatility.

Finally, attempts of total rotation planning and optimization are discussed as a first step for further model development.

Inhaltsübersicht

Verzeichnis der Abbildungen	VII
Verzeichnis der Übersichten.....	X
Verzeichnis der Abkürzungen.....	XI
1 Einleitung	1
2 Komponenten des Systems Zuckerrübe - Nematode	4
3 Integriertes Nematodenmanagement (INM).....	20
4 Konzeption und Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems.....	57
5 Simulationsexperimente mit dem Entscheidungsunterstützungssystem.....	159
6 Erweiterung des Entscheidungsunterstützungssystems	213
7 Auswirkungen der Reform der EU-Zuckermarktordnung.....	240
8 Bewertung und Ausblick.....	244
9 Zusammenfassung	247
Literaturverzeichnis	255
Anhang.....	280

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen.....	VII
Verzeichnis der Übersichten	X
Verzeichnis der Abkürzungen	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise	3
2 Komponenten des Systems Zuckerrübe - Nematode.....	4
2.1 Zuckerrübenanbau in Deutschland und insbesondere im Rheinland	4
2.2 Phytoparasitäre Nematoden	6
2.2.1 Überblick.....	6
2.2.2 Bedeutung und Verbreitung von <i>Heterodera schachtii</i>	6
2.2.3 Biologie des Schaderregers <i>H.schachtii</i>	8
2.2.3.1 Lebenszyklus unter anfälligen Wirtspflanzen.....	8
2.2.3.2 Lebenszyklus unter resistenten Wirtspflanzen.....	10
2.2.3.3 Abundanz unter Nichtwirtspflanzen	11
2.2.3.4 Einflussfaktoren auf die Abundanzdynamik.....	12
2.3 Die Interaktion Nematode-Zuckerrübe	14
2.3.1 Empfindliche Wirtspflanzen	15
2.3.2 Tolerante Wirtspflanzen.....	15
2.3.3 Einflussfaktoren auf die Interaktion Nematode-Zuckerrübe	16
2.4 Zusammenfassender Überblick.....	19
3 Integriertes Nematodenmanagement (INM)	20
3.1 Grundlagen des Integrierten Nematodenmanagements	20
3.1.1 Schad- bzw. Bekämpfungsschwellen im Rahmen des INM.....	22
3.1.2 Befallserhebungen im Rahmen des INM.....	25
3.1.2.1 Bodenproben	26
3.1.2.2 Infrarotluftbilder.....	27
3.1.2.3 Erdschwadbeprobung.....	28
3.2 Managementmaßnahmen im Rahmen des INM.....	29
3.2.1 Anbaumanagement anfälliger Wirtspflanzen.....	30
3.2.1.1 Anbauumfang der Zuckerrüben	30
3.2.1.2 Wahl des Aussattermins der Zuckerrüben	32
3.2.1.3 Wahl des Erntetermins der Zuckerrüben	33
3.2.1.4 Anbau weiterer Wirtspflanzen in der Zuckerrübenfruchtfolge.....	34
3.2.1.5 Fangpflanzen-Methode	34
3.2.1.6 Wirtsunkräuter	35

3.2.2	Fruchtfolge- und Fruchtfolge-Management	35
3.2.2.1	Grundlagen	35
3.2.2.2	Nematologische Aspekte unterschiedlicher Rotationslängen.....	36
3.2.2.3	Planungsproblem Fruchtfolge	40
3.2.3	Zwischenfrucht- und Stilllegungsmanagement	41
3.2.3.1	Anbau als Zwischenfrucht	44
3.2.3.2	Anbau auf Stilllegungsflächen	46
3.2.3.3	Ölrettich versus Gelbsenf	48
3.2.3.4	Wahl der Anfälligkeitsstufe.....	49
3.2.3.5	Positionierung der Zwischenfrucht bzw. der Flächenstilllegung	50
3.2.3.6	Phazolie.....	50
3.2.4	Anbau resistenter Zuckerrüben.....	51
3.2.5	Erweitertes Resistenzmanagement	53
3.3	Zusammenfassender Überblick	55
4	Konzeption und Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems.....	57
4.1	Systemsimulation mittels Modellen	57
4.1.1	Systeme.....	57
4.1.2	Modelle.....	57
4.1.3	Entscheidungsunterstützungssysteme.....	59
4.2	Anforderungen an das Entscheidungsunterstützungssystem.....	59
4.2.1	Leistungsumfang	60
4.2.2	Standortspezifität	60
4.2.3	Implementierung.....	61
4.3	Modell zur Abbildung der Populationsdynamik von <i>H. schachtii</i>	61
4.3.1	Einordnung des Subsystems im Entscheidungsunterstützungssystem	61
4.3.2	Modellgrundlagen.....	61
4.3.2.1	Logistisches Wachstum	61
4.3.2.2	Critical-point-Modelle	62
4.3.2.3	Simulationsmodelle	67
4.3.3	Literaturübersicht.....	68
4.3.3.1	Critical-point-Modelle	69
4.3.3.2	Simulationsmodelle	69
4.3.3.3	Konsequenzen aus der Literaturübersicht	76
4.3.4	Modellkonzeption.....	77
4.3.5	Kalibrierung der Modellparameter	78
4.3.5.1	Für anfällige Zuckerrüben	79
4.3.5.2	Für resistente Zuckerrüben	80
4.3.5.3	Für resistente Kreuziferen	81
4.3.5.4	Für weitere anfällige Wirtspflanzen wie Winterraps.....	83

4.3.5.5	Für Nichtwirtspflanzen	84
4.3.6	Erweiterung zum stochastischen Modellansatz	85
4.3.6.1	Grundlagen der Abbildung von Stochastik in Modellen	85
4.3.6.2	Verwendeter Ansatz zur Implementierung der Stochastik	85
4.4	Modell zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe	90
4.4.1	Einordnung des Subsystems im Entscheidungsunterstützungssystem.....	90
4.4.2	Modellgrundlagen	90
4.4.3	Literaturübersicht	93
4.4.3.1	Empirische Ertragsprognosemodelle	93
4.4.3.2	Mechanistische Pflanzenwachstumsmodelle	95
4.4.3.3	Konsequenzen aus der Literaturübersicht	98
4.4.4	Modellkonzeption	99
4.4.5	Kalibrierung der Modellparameter.....	103
4.4.5.1	Saisonfunktion	103
4.4.5.2	Pflanzenwachstumsmodell.....	105
4.4.6	Differenzierung von Produktionsorten.....	110
4.4.7	Validierung des Modellansatzes	112
4.4.8	Abbildung der Interaktion Zuckerrübe-H.schachtii	115
4.4.8.1	Grundlagen.....	115
4.4.8.2	Literaturübersicht	118
4.4.8.3	Im Modellansatz verwendete Implementierung.....	124
4.4.9	Erweiterung zum stochastischen Modellansatz	126
4.4.9.1	Ertragsvolatilität der Zuckerrübe	126
4.4.9.2	Implementierung im Ertragsmodell	129
4.4.9.3	Implementierung bei der Befall-Schadens-Relation	130
4.4.9.4	Überlegungen zur Korrelation der stochastischen Größen	132
4.5	Bio-ökonomisches Modul	133
4.5.1	Politische Systemumwelt	133
4.5.1.1	Gemeinsame Agrarpolitik	134
4.5.1.2	Zuckermarktordnung.....	135
4.5.1.3	Regionale Ausgestaltung der Zuckermarktordnung	136
4.5.2	Verwendetes Kostenrechnungsverfahren.....	141
4.5.2.1	Deckungsbeitragsrechnung bei Zuckerrüben.....	142
4.5.2.2	Deckungsbetragsrechnung bei den alternativen Produktionsverfahren	146
4.5.3	Sozio-technisches System	148
4.5.3.1	Zielsystem des Entscheidungsträgers.....	148
4.5.3.2	Risikopräferenz des Entscheidungsträgers.....	149
4.6	Implementierung des Modells.....	150
4.6.1	Wahl der Programmiersprache.....	150

4.6.2	Zentrale Funktionen, Prozeduren und Algorithmen	151
4.6.3	Programmbeschreibung	153
4.6.3.1	Programmstruktur	153
4.6.3.2	Datenfluss	153
4.6.3.3	Grafische Benutzeroberfläche	156
4.7	Zusammenfassender Überblick	157
5	Simulationsexperimente mit dem Entscheidungsunterstützungssystem.....	159
5.1	Literaturübersicht.....	159
5.2	Simulationseinstellungen.....	163
5.3	Einjährige Simulationsexperimente.....	164
5.4	Simulationsexperimente über eine Rotation.....	168
5.5	Vergleich unterschiedlicher Rotationslängen.....	173
5.5.1	Einfluss der Ausgangspopulationsdichte auf die Simulationsergebnisse.....	173
5.5.2	Simulationsergebnisse	174
5.5.2.1	Fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichten	174
5.5.2.2	Rübenerträge im Vergleich.....	177
5.6	Aktives Nematodenmanagement bei unterschiedlichen Rotationslängen.....	179
5.6.1	Aktives Nematodenmanagement in zweijährigen Rotationen.....	179
5.6.1.1	Anbau nematodenresistenter Zwischenfrüchte.....	179
5.6.1.2	Anbau nematodenresistenter Zuckerrüben	182
5.6.1.3	Anbau nematodenresistenter Kruziferen auf Flächenstilllegung.....	184
5.6.1.4	Erweitertes Resistenzmanagement	186
5.6.1.5	Zusammenfassende Bewertung	188
5.6.2	Aktives Nematodenmanagement in dreijährigen Rotationen.....	191
5.6.2.1	Anbau nematodenresistenter Zwischenfrüchte.....	192
5.6.2.2	Anbau nematodenresistenter Zuckerrüben	199
5.6.2.3	Anbau nematodenresistenter Kruziferen auf Flächenstilllegung.....	200
5.6.3	Aktives Nematodenmanagement in vierjährigen Rotationen.....	203
5.6.4	Simulationsexperimente mit unregelmäßigen Fruchtfolgen.....	207
5.6.4.1	Sechsjährige Rotation mit 50% Rübenanteil.....	207
5.6.4.2	Sechsjährige Rotation mit 33% Rübenanteil und Raps.....	208
5.6.4.3	Achtjährige Rotation mit 25% Rübenanteil und Raps	210
5.7	Überlegungen zur Länge des Simulationszeitraums	211
5.8	Zusammenfassender Überblick	212
6	Erweiterung des Entscheidungsunterstützungssystems	213
6.1	Ansatzpunkte für Erweiterungen.....	213
6.1.1	Gesamtbetriebliche Betrachtung.....	213
6.1.2	Schlagspezifische Ausrichtung.....	215
6.2	Wahl eines problemadäquaten Planungs- und Optimierungsansatzes	217

6.2.1	Umfang des Planungsproblems.....	217
6.2.2	Fruchtfolgeplanung	218
6.2.2.1	Steuerung	218
6.2.2.2	Flexible Planung	219
6.2.2.3	Regelung	219
6.2.3	Anbauplanung	219
6.2.3.1	Anbauplanung für Zuckerrüben nach Erfüllungsgrad des Lieferrechts.....	220
6.2.3.2	Anbauplanung für Zuckerrüben nach deren Grenzdeckungsbeitrag.....	222
6.2.3.3	Konsequenzen für die Anbauplanung der Zuckerrüben	225
6.2.3.4	Anbauplanung der alternativen Produktionsverfahren	225
6.2.3.5	Anbauplanung unter Fruchtfolgerestriktionen	226
6.2.4	Literaturübersicht	227
6.2.5	Kritische Wertung bestehender Planungsansätze	232
6.3	Einzelerschlagspezifischen Ansatz	237
6.3.1	Realer Ackerschlag versus Einheitsparzelle	237
6.3.2	Berechnung der Zuckerrübenenerträge im parzellenspezifischen Ansatz.....	237
6.3.3	Parzellenspezifische Ausgangsbefallsdichte.....	238
6.4	Zusammenfassender Überblick.....	238
7	Auswirkungen der Reform der EU-Zuckermarktordnung	240
7.1	Die neue Zuckermarktordnung ab 2006.....	240
7.2	Folgen für den Zuckerrübenanbau in Deutschland.....	241
7.3	Folgen für das Integrierte Nematodenmanagement.....	243
8	Bewertung und Ausblick	244
8.1	Bewertung des vorhandenen Modells	244
8.2	Inhaltliche Fortentwicklung des vorhandenen Modells	245
8.2.1	Fortentwicklung des Populationsmodells	245
8.2.2	Fortentwicklung des Ertragsdynamikmodells.....	245
8.2.3	Fortentwicklung des ökonomischen Moduls	246
8.3	Technische Fortentwicklung des vorhandenen Modells.....	246
9	Zusammenfassung.....	247
	Literaturverzeichnis.....	255
	Anhang.....	280

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Entwicklung der Anbauflächen im Rheinland	4
Abbildung 2:	Bedeutung der Zuckerrüben in Nordrhein-Westfalen	5
Abbildung 3:	Verbreitung des Rübenzystemnematoden in Europa.....	7
Abbildung 4:	Befall mit <i>H.schachtii</i> im Rheinland	8
Abbildung 5:	Schema zur Abgrenzung verschiedener Fachbegriffe der Nematologie	9
Abbildung 6:	Biotische und abiotische Einflussfaktoren auf die Populationsdynamik.....	13
Abbildung 7:	Einflussfaktoren auf die auf die Befall-Schadens-Relation.....	17
Abbildung 8:	Ertragsverluste und Aussaatzeitraum	18
Abbildung 9:	Optimaler Entscheidungsprozess im Rahmen des INM.....	21
Abbildung 10:	Komponenten eines Integrierten Nematodenmanagementsystems	22
Abbildung 11:	Unterschiede beim Schädlingsmanagement	26
Abbildung 12:	Managementtaktiken je nach Kulturpflanze und Nematodenspezies.....	29
Abbildung 13:	Ergebnisse des Monokultur Dauerversuchs in Elsdorf/Rhld. (P_i -Werte).....	37
Abbildung 14:	Relative Entwicklung des Endbefalls je nach Anbaupause.....	38
Abbildung 15:	Nematodenbefall und Rübenenerträge je nach Zuckerrübenanteil	39
Abbildung 16:	Abundanzregulierender Einfluss resistenter Zwischenfrüchte	42
Abbildung 17:	Vermehrungsrate unter resistenten Zwischenfrüchten je nach Aussaat	45
Abbildung 18:	Populationsrückgang unter unterschiedlich resistenten Ölrettichsorten.....	49
Abbildung 19:	Fruchtfolge im erweiterten Resistenzmanagement.....	54
Abbildung 20:	Dichteabhängige Vermehrung von <i>H.schachtii</i> unter Zuckerrüben	64
Abbildung 21:	Populationsrückgang mit konstanter Abbaurrate.....	65
Abbildung 22:	Vergleich verschiedener Abbaumodelle.....	67
Abbildung 23:	Das System Meloidogyne - Weinrebe nach FERRIS	70
Abbildung 24:	Das System Pratylenchus - Mais nach MCSORLEY UND FERRIS.....	71
Abbildung 25:	Das System Globodera - Kartoffel nach WARD ET AL.....	72
Abbildung 26:	Das System <i>H.schachtii</i> - Zuckerrübe nach VAN DER WERF ET AL.....	73
Abbildung 27:	Kompartimentmodell des einfachen Ansatzes nach SCHMIDT	74
Abbildung 28:	Kompartimentmodell des erweiterten Ansatzes nach SCHMIDT.....	75
Abbildung 29:	Parameterkalibrierung für anfällige Zuckerrüben	80
Abbildung 30:	Vermehrungsraten von <i>H.schachtii</i> unter resistenten Zuckerrüben.....	81
Abbildung 31:	Vermehrungsraten von Ölrettich unterschiedlicher Anfälligkeitsstufen.....	82
Abbildung 32:	Verteilung der Versuchsergebnisse der BBA für anfällige Zuckerrüben.....	87
Abbildung 33:	Zwei lognormalverteilte Nematodenpopulationen mit $E(N)=1.000$	89
Abbildung 34:	90%-Intervall der zwei lognormalverteilten Nematodenpopulationen	89
Abbildung 35:	Einflüsse auf Ertrag und Qualität der Zuckerrübe.....	91
Abbildung 36:	Blockdiagramm des Zuckerrübenmodells von THOER	96
Abbildung 37:	Allgemeine Struktur von SUBEMO.....	97
Abbildung 38:	Strukturdiagramm von AGROSIM-ZR	98
Abbildung 39:	Blockdiagramm des modifizierten Zuckerrübenmodells	100
Abbildung 40:	Entwicklung sekundärer Ertragsparameter der Zuckerrübe	102
Abbildung 41:	Jahresgang der Bodentemperatur	104
Abbildung 42:	Partialsaisonfigur Bodentemperatur	104
Abbildung 43:	Saisonfigur aus Bodentemperaturen und Globalstrahlung	105

Abbildung 44:	Entwicklung des Zuckerrübenenertrags über die Vegetationsperiode	106
Abbildung 45:	Entwicklung der Blattbiomasse über die Vegetationsperiode	107
Abbildung 46:	Anpassungsgüte nach der Parameterkalibrierung	109
Abbildung 47:	Bereinigter Zuckerertrag je nach Aussaatzeit nach MÄRLÄNDER	113
Abbildung 48:	Bereinigter Zuckerertrag je nach Aussaatzeit im Modellansatz	114
Abbildung 49:	Verläufe von Schadensfunktionen nach OOSTENBRINK	117
Abbildung 50:	Ein einfacher diskreter Befall-Schadens-Ansatz	120
Abbildung 51:	Schadensfunktion nach SEINHORST	121
Abbildung 52:	Funktionslauf des Sommerweizenenertrags bei ACKERMANN	122
Abbildung 53:	Befall-Schadens-Relation der AG Nematoden	123
Abbildung 54:	Verschiedene Schadensfunktionen im Vergleich	125
Abbildung 55:	Stochastische Ertragsentwicklung	127
Abbildung 56:	Zuckerrübenenerträge des AK 1	128
Abbildung 57:	Ertragsverluste bei Früh- und Spätsaat anfälliger Zuckerrübensorten	131
Abbildung 58:	Abhängigkeit von Liefermenge und Rübenpreise vom Zuckergehalt	137
Abbildung 59:	Regelung des C-Rüben-Vortrags bei Pfeifer & Langen	138
Abbildung 60:	Entwicklung der proportionalen Spezialkosten im AK 1	144
Abbildung 61:	A-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt	145
Abbildung 62:	B-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt	145
Abbildung 63:	Datenflussplan im Entscheidungsunterstützungssystem INM-Consult	154
Abbildung 64:	Berechnung der optimalen Anbaupause nach BURT UND FERRIS	161
Abbildung 65:	Optimale Pfade der Nematodenpopulation der Fruchtfolge	162
Abbildung 66:	Rübenenerträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben je nach P_1 -Wert	165
Abbildung 67:	Deckungsbeiträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben nach P_1 -Wert	166
Abbildung 68:	Verteilungsfunktionen der Deckungsbeiträge ausgewählter Szenarien	167
Abbildung 69:	Mittlere P_1 -Werte einer dreijährigen Rotation	168
Abbildung 70:	Deckungsbeiträge der Zuckerrüben nach Zwischenfrüchten	170
Abbildung 71:	Verteilungsfunktionen des DB(ZR-ZWF) bei geringem Ausgangsbefall	172
Abbildung 72:	Verteilungsfunktionen des DB(ZR-ZWF) bei hohem Ausgangsbefall	172
Abbildung 73:	Mittlere P_1 -Werte einer dreijährigen Fruchtfolge im Zeitablauf	173
Abbildung 74:	Mittlere P_1 -Werte unterschiedlicher Rotationslängen	174
Abbildung 75:	Schadschwellenunterschreitung je nach Rotationslänge	176
Abbildung 76:	Mittlere P_1 -Werte und Rübenenerträge der Rotationsszenarien	178
Abbildung 77:	Dichtefunktionen der Rübenenerträge zwei- bis vierjähriger Rotationen	179
Abbildung 78:	Mittlere P_1 -Werte der Zwischenfruchtszenarien	180
Abbildung 79:	Schadschwellenunterschreitung je nach Zwischenfruchtszenario	181
Abbildung 80:	Gesamtdeckungsbeiträge der Zwischenfruchtszenarien	182
Abbildung 81:	Mittlere P_1 - und P_2 -Werte bei Resistenzmanagement	183
Abbildung 82:	Gesamtdeckungsbeitrag bei Resistenzmanagement im Vergleich	184
Abbildung 83:	Mittlere P_1 -Werte der Stilllegungsszenarien	185
Abbildung 84:	Schadschwellenunterschreitung je nach Stilllegungsszenario	185
Abbildung 85:	Gesamtdeckungsbeiträge der Stilllegungsszenarien	186
Abbildung 86:	Mittlere P_1 -Werte des erweiterten Resistenzmanagements	187
Abbildung 87:	Gesamtdeckungsbeiträge der Resistenzmanagementszenarien	188

Abbildung 88:	Gesamtdeckungsbeiträge im Vergleich.....	189
Abbildung 89:	Verteilungsfunktionen einiger Gesamtdeckungsbeiträge.....	191
Abbildung 90:	Mittlere P_i -Werte mit Zwischenfrüchten nach Stoppelweizen.....	193
Abbildung 91:	Schadsschwellenunterschreitung mit Zwischenfrüchten nach StW.....	193
Abbildung 92:	GDB der Zwischenfruchtszenarien mit Stoppelweizen.....	194
Abbildung 93:	Mittlere P_i -Werte mit Zwischenfrüchten nach Wintergerste.....	195
Abbildung 94:	Schadsschwellenunterschreitung mit Zwischenfrüchten nach WG.....	195
Abbildung 95:	GDB der Zwischenfruchtszenarien mit Wintergerste.....	196
Abbildung 96:	Verteilungsfunktionen der GDB ausgesuchter Szenarien.....	198
Abbildung 97:	Mittlere P_i - und P_f -Werte bei aZR und rZR in dreijähriger Fruchtfolge....	199
Abbildung 98:	Gesamtdeckungsbeitrag bei resistenten Zuckerrüben im Vergleich.....	200
Abbildung 99:	Mittlere P_i -Werte der Stilllegungsszenarien in dreijähriger Fruchtfolge ...	201
Abbildung 100:	Schadsschwellenunterschreitung je nach Stilllegungsszenario.....	202
Abbildung 101:	GDB der Stilllegungsszenarien bei dreijähriger Fruchtfolge.....	203
Abbildung 102:	Mittlere P_i -Werte der ZWF-Szenarien bei vierjähriger Fruchtfolge.....	204
Abbildung 103:	Gesamtdeckungsbeiträge der Szenarien bei vierjähriger Fruchtfolge....	205
Abbildung 104:	Verteilungsfunktionen der GDB bei vierjähriger Rotation.....	206
Abbildung 105:	Mittlere P_i -Werte bei sechsjähriger Rotation mit 50% Zuckerrüben....	207
Abbildung 106:	Verteilungsfunktionen zweier Szenarien mit 50% Zuckerrüben.....	208
Abbildung 107:	Mittlere P_i -Werte bei sechsjähriger Rotation mit ZR und Raps.....	209
Abbildung 108:	Mittlere P_i -Werte bei achtjähriger Rotation mit ZR und Raps.....	210
Abbildung 109:	Lieferrechtserfüllung bei stochastischem Rübenertrag.....	222
Abbildung 110:	Grenzdeckungsbeiträge von Zuckerrüben.....	223
Abbildung 111:	Lieferrechtserfüllung bei Anbauplanung mit Grenzdeckungsbeitrag....	224
Abbildung 112:	Das Planungsproblem in CROPS.....	230
Abbildung 113:	Deckungsbeitrag der Zuckerrüben nach Reform der ZMO.....	242

Verzeichnis der Übersichten

Übersicht 1:	Notwendige Mehrerträge bei Reduktion des Anbauumfangs.....	31
Übersicht 2:	Fragenkomplex nematodenkontrollierter Kruziferenanbau.....	43
Übersicht 3:	Pflanzenbauliche Nachteile nematodenresistenter Zuckerrübensorten.....	52
Übersicht 4:	Wirkung unterschiedlicher Einflussfaktoren auf den BZE.....	92
Übersicht 5:	Relative Korrekturfaktoren für resistente Zuckerrüben.....	110
Übersicht 6:	Relative Ertragsmerkmale der Produktionsorte nach ZENS.....	111
Übersicht 7:	Verwendete relative Differenzierung der Produktionsorte.....	112
Übersicht 8:	Statistische Momente der Rübenertragsverteilungen.....	130
Übersicht 9:	Parameter der dreiecksverteilten Befall-Schadens-Relationen.....	132
Übersicht 10:	Höhe der Ackerprämien in Nordrhein-Westfalen.....	135
Übersicht 11:	Entwicklung der C-Rübenpreise im Rheinland seit 2001.....	138
Übersicht 12:	Entwicklung der Schnitzelvergütung im Rheinland seit 2001.....	139
Übersicht 13:	Herleitung der Auszahlungspreise für Zuckerrüben.....	140
Übersicht 14:	Verwendetes Verfahren der Deckungsbeitragsberechnung.....	141
Übersicht 15:	Herleitung der Saatkosten resistenter Kruziferen.....	147
Übersicht 16:	Output des Prognose- und Optimierungsmoduls von NemaPlot.....	160
Übersicht 17:	Einfluss der Rotationslänge auf den folgenden P_1 -Wert.....	177
Übersicht 18:	Ranking der Maßnahmen bei zweijähriger Rotation.....	190
Übersicht 19:	Ranking der Zwischenfruchtszenarien bei dreijähriger Fruchtfolge.....	197
Übersicht 20:	Ranking der Maßnahmen bei vierjähriger Fruchtfolge.....	206
Übersicht 21:	Dreijährige Fruchtfolge, Idealfall.....	215
Übersicht 22:	Dreijährige Fruchtfolge, Problemfall.....	216
Übersicht 23:	Planungsmatrix des nematodenkontrollierten Ackerbaus.....	217
Übersicht 24:	Parameter für die Anbauplanung der Zuckerrüben.....	220
Übersicht 25:	Anbauplanung der Zuckerrüben je nach Quotenerfüllungsgrad.....	221
Übersicht 26:	Durchschnittliche Quotenerfüllung der Betriebe des AK 1.....	225
Übersicht 27:	Schema einer Vorfrucht-Nachfruchtmatrix.....	227
Übersicht 28:	Kernpunkte der Reform der Zuckermarktordnung.....	240
Übersicht 29:	Preissenkungen im Rahmen der Reform der Zuckermarktordnung.....	241

Verzeichnis der Abkürzungen

Die im Modell verwendeten Abkürzungen für Fruchtarten sind in Anhang 63 aufgeführt.

AKh	Arbeitskraftstunde(n)
AK 1	Arbeitskreis für Betriebsführung Köln-Aachener Bucht der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
aZR	nematodenanfällige Zuckerrübe(n)
BBA	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
c.p.	ceteris paribus (lat.: unter [sonst] gleichen Bedingungen)
CV	coefficient of variation (Variationskoeffizient)
DB	Deckungsbeitrag
DSS	Decision-Support-System, vgl. EUS
dt	Dezitonne (100 kg)
ebd.	ebenda
E+L	Eier und Larven (je 100g oder 100ml Boden)
et al.	et alii (lat.: und andere)
etc.	et cetera (lat.: und so weiter)
EU	Europäische Union
EUS	Entscheidungs-Unterstützungs-System, vgl. DSS
f., ff.	folgende, fortfolgende
ha	Hektar
IfZ	Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen
INM	Integriertes Nematodenmanagement
IPM	Integrated Pest Management (Integrierter Pflanzenschutz)
KWS	KWS Saat AG, Einbeck
LIZ	Landwirtschaftlicher Informationsdienst Zuckerrübe, Elsdorf / Rhld.
LP	Lineare Programmierung
mündl.	mündlich
NRW	Nordrhein-Westfalen
NW	Nichtwirt, Nichtwirtspflanze
p.a.	per annum (lat.: jährlich, für das Jahr)
P _f , P _f -Wert	final population, Endpopulation
P _i , P _i -Wert	initial population, Anfangspopulation
P&L	Pfeifer & Langen KG, Köln
PSD	Pflanzenschutzdienst der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
RRV	Rheinischer Rübenbauer-Verband e.V., Bonn
rZR	nematodenresistente Zuckerrübe(n)
Stabw.	Standardabweichung
usw.	und so weiter
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
vs.	versus (lat.: gegen, gegenüber)
z.B.	zum Beispiel
ZMO	Zuckermarktordnung der EU
z.T.	zum Teil

1 Einleitung

Sich verändernde Wertschöpfungen im Ackerbau bedingen eine stetige Veränderung des Anbauspektrums auf den Feldern. Insbesondere mit der Ausdehnung des Hackfruchtanteils in der Fruchtfolge (Zuckerrüben, Kartoffeln, teilweise auch Feldgemüse), die aus betriebswirtschaftlichen Gründen gut nachzuvollziehen ist, stellen sich jedoch Fragen hinsichtlich der Nachhaltigkeit solch enger Fruchtfolgen. Mit dem Hinweis auf eine gebotene Ausdehnung zu enger Fruchtfolgen lässt sich das Problem alleine nicht mehr lösen. Mehr als in der Vergangenheit sind darum nicht Rezepte zur kurzfristigen Optimierung des Fruchtfolgeablaufs auf dem Acker gefragt, sondern Konzepte einer mittel- bis langfristigen Strategie, Anbausysteme auf das Ziel höchster nachhaltiger Wertschöpfung vor dem Hintergrund der von den Märkten zwingend vorgeschriebenen Wirtschaftlichkeit im Feldfruchtanbau auszurichten.

1.1 Problemstellung

Ende der 30er Jahre des 19. Jahrhunderts expandierte der Zuckerrübenanbau in ganz Europa. Wiederholter Zuckerrübenanbau auf dem gleichen Schlag führte bald zu substantiellen Ertragsverlusten. Dieses Phänomen wurde „Rübenmüdigkeit“ des Bodens genannt. Der Botaniker SCHACHT bemerkte, dass der Grund für dieses Phänomen „kleine Würmer“ im Boden waren, die zu den Nematoden gehören und die Rübenwurzeln parasitieren (vgl. SCHACHT, 1859, S. 176). SCHMIDT (1871) untersuchte die Parasiten genauer und benannte sie *Heterodera schachtii* nach ihrem Entdecker. Die Tatsache, dass 24 Zuckerfabriken um das Jahr 1876 infolge ungenügender Rübenversorgung geschlossen werden mussten, zeigt die große ökonomische Bedeutung des Rübenzystemnematoden zu der Zeit. In der Mehrheit der Fälle waren die nematodenbedingten Ertragsverluste Grund für die Schließungen (MÜLLER, 1999b, S. 205).

Schon Ende des 19. Jahrhunderts wendeten sich Biologen und Agrarwissenschaftler vermehrt dem Problem zu. Trotz der seitdem geleisteten beachtlichen Forschungsarbeit erwies sich die Kontrolle dieses Schädling als schwierig. Bis zum Aufbau gefährlicher Populationsdichten vergeht zwar oft eine längere Zeit, aber dann erwies es sich als unmöglich, sich des Schädling wieder zu entledigen. Nach Inkrafttreten der EU-Zuckermarktordnung im Jahre 1968 wurde zu Beginn der siebziger Jahre der Zuckerrübenanbau in der Bundesrepublik wie im Rheinland¹ stark ausgeweitet (siehe Abbildung 1 in Kapitel 2.1) und es kam zu einer Verschärfung der Nematodenproblematik. Aktuelle Versuchsergebnisse und Praxiserfahrungen zeigen, dass bei Betrachtung möglicher Ertragseinbußen bei der Zuckerrübe durch Krankheiten und Schädlinge (Rizomania, Nematoden, pilzliche Blattkrankheiten und Rhizoctonia) der Rübenzystemnematode *Heterodera schachtii* zu den größten möglichen Ertragseinbußen führt (BÜRCKY, 2001) und in den intensiven Zuckerrübenanbaugebieten zum ertragsbegrenzenden Faktor geworden ist (vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 7 und BALKE, 2001, S. 67). Aktuelle Modellrechnungen des Landwirtschaftlichen Informationsdienst Zuckerrübe (LIZ) zeigen, dass, gemessen an Schadpotential, Bekämpfungsaufwand und Restschaden, Insekten- und Rizoma-

¹ Der im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Ausschnitt der Systemumwelt entspricht dem so genannten Gebiet Nordrhein, welches im Wesentlichen deckungsgleich mit dem durch die ehemalige Landwirtschaftskammer Rheinland repräsentierten Gebiet Rheinland, den Regierungsbezirken Köln und Düsseldorf sowie dem geologisch bezeichneten Gebiet „Niederrheinisches Tiefland / Niederrheinische Bucht“ ist (vgl. ZENS, 2002, S. 12). Diese Begriffe und die damit gekennzeichneten Gebiete werden daher im Folgenden synonym verwendet.

niabefall relativ wirkungsvoll unterdrückt werden, die Maßnahmen gegen *Heterodera schachtii* dagegen noch effizienter eingesetzt werden könnten (LIZ, 2005a).

Der im Vergleich zur restlichen Bundesrepublik unbefriedigende Verlauf der Zuckerertragsentwicklung im Rheinland in den letzten Jahren (vgl. KOCHS, 2000a, S. 698), das Fehlen direkter Bekämpfungsmöglichkeiten mit Nematiziden, die eher schwankenden Erfolge der biologischen Bekämpfungsmöglichkeiten in der Praxis, die Reduktion des Flächenstilllegungssatzes im Laufe der 1990er Jahre, die alternative Nutzung der Flächenstilllegung zum Anbau nachwachsender Rohstoffe und die Züchtung nematodenresistenter bzw. -toleranter Zuckerrübensorten erfordern es, wirkungsvolle Bekämpfungsstrategien zu entwickeln. Der einzelne Landwirt ist mit dem Angebot an Bekämpfungsmaßnahmen und der Eruiierung der jeweiligen Vor- und Nachteile häufig überfordert, und es kostet Aufwand und Zeit, die für den eigenen Betrieb geeignetsten Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen und -abfolgen zu finden.

Die Nematodenproblematik ist für die reinen Marktfruchtbetriebe im Rheinland ökonomisch von großer Bedeutung, da die Zuckerproduktion eine wichtige Einnahmequelle darstellt. Bei intensivem Marktfruchtbau werden auf 28% der Ackerfläche Zuckerrüben angebaut, die einen Anteil am gesamten Umsatzerlös aus landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion von durchschnittlich 35% haben. In den extensiv geführten Betrieben stammen sogar 39% der gesamten Umsatzerlöse aus dem Zuckerrübenanbau (ZENS, 2002, S. 1). Nematodenbedingte Ertragsdepressionen im Zuckerrübenanbau bedeuten für diese Betriebe deshalb hohe Einnahmeausfälle. Gerade in Hinblick auf die bevorstehende Reform der europäischen Zuckermarktordnung ist es entscheidend, den Zuckerrübenanbau so effizient wie möglich zu gestalten, wenn die Zuckerrübe weiterhin wesentlich zur Einkommenserzielung landwirtschaftlicher Betriebe beitragen soll.

1.2 Zielsetzung

Erfolgreiche Landwirte unterscheiden sich von weniger erfolgreichen dadurch, dass sie zur richtigen Zeit die richtigen Entscheidungen treffen. Fehlentscheidungen werden immer teurer in Zeiten sich verschlechternder Kosten-Leistungs-Relationen. Gleichzeitig wird das Treffen der „richtigen“ Entscheidung immer komplizierter, da dem Entscheidungsträger eine stets breiter und größer werdende Palette von Techniken zur Verfügung steht, die es erlauben, die Produktion zu sichern und zu steigern, die Produktivität zu erhöhen und die Qualität zu verbessern. Informationen, die bei der Entscheidungsfindung dienlich sind, werden daher immer wichtiger, und zur Identifikation optimaler Handlungsalternativen wird immer wieder die Notwendigkeit der Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen betont (vgl. SODTKE, 2003, S. 10 und die von ihm zitierten Autoren).

Vor dem im vorangegangenen Kapitel dargestellten Hintergrund ist es notwendig, den zuckerrübenanbauenden Landwirten und den ihnen zur Seite stehenden Beratern eine Entscheidungshilfe zur Verfügung zu stellen, die mittels Simulationen und Alternativrechnungen detaillierte Informationen über die Auswirkungen der verschiedenen zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements generiert. Schwerpunkt dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems, das Dank moderner rechnergestützter Simulationstechnik Effizienz und Effektivität der Informationsverarbeitung steigert und so Fehlentscheidungen mit großen ökonomischen Konsequenzen zu verhindern in der Lage ist.

1.3 Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit werden Simulationsmodelle entwickelt, die als Informationssystem für ein bio-ökonomisches Entscheidungsunterstützungssystem dienen, d.h. die für die Planungen und Entscheidungen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements benötigten Daten als Output liefern. Sich daran orientierend, ist die Arbeit in neun Kapitel gegliedert.

Im zweiten Kapitel werden der Zuckerrübenanbau und die Befallsituation mit *H.schachtii* in Deutschland und insbesondere im Rheinland betrachtet. Insbesondere die Biologie des Nematoden wird beleuchtet, um die Populationsdynamik und die abundanzregulierenden Einflüsse der Managementmaßnahmen in einem dynamischen Modell nachbilden zu können.

Im Zentrum von Kapitel drei stehen die ausführliche Vorstellung des Konzepts des Integrierten Nematodenmanagements sowie der einzelnen im Rahmen des Managements des Schaderregers *H.schachtii* relevanten aktiven und passiven Maßnahmen.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit, die Entwicklung des bio-ökonomischen Entscheidungsunterstützungssystems mit biologisch-technischen Simulationsmodellen als Informationssystem, bildet das vierte Kapitel. Aus Abgrenzung und Strukturierung der betrachteten Systeme ergeben sich die zu berücksichtigenden Modellelemente. Dies sind die Systeme Nematode und Zuckerrübe sowie deren Interaktion. Gleichzeitig müssen im Rahmen der Entscheidungsunterstützung das politische und das sozio-technische System des Entscheidungsträgers beschrieben werden. Die Entwicklung der Modelle zur Simulation der biologisch-technischen Systeme wird einzeln betrachtet. Ebenso gibt es für jedes Submodell eine Literaturübersicht, die den Stand des Wissens im jeweiligen Bereich dokumentiert. Das Kapitel schließt mit der Umsetzung des Modellkonzepts in ein Computerprogramm.

Kapitel fünf präsentiert die Ergebnisse von Simulationsexperimenten mit dem bio-ökonomischen Entscheidungsunterstützungssystem. Dabei werden unterschiedliche Szenarien durchgerechnet und verschiedene Managementmaßnahmen vergleichend bewertet.

Aus der Verwendung des Entscheidungsunterstützungssystems für die Simulationsexperimente resultieren die in Kapitel sechs diskutierten Erweiterungen des bisherigen Ansatzes. Es werden gesamtbetriebliche Planungs- und Optimierungsansätze im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements und die schlagspezifische Ausrichtung diskutiert.

Im siebten Kapitel erfolgen eine qualitative Darstellung der bevorstehenden Reform der Zuckermarktordeung sowie deren Auswirkungen auf den Zuckerrübenanbau in Deutschland und das Integrierte Nematodenmanagement.

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems für das Integrierte Nematodenmanagement wird in Kapitel acht bewertet. Dort werden auch Fortentwicklungsmöglichkeiten der Modellansätze des Entscheidungsunterstützungssystems aufgezeigt.

Kapitel neun stellt den Abschluss dieser Arbeit dar, indem es die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse zusammenfasst.

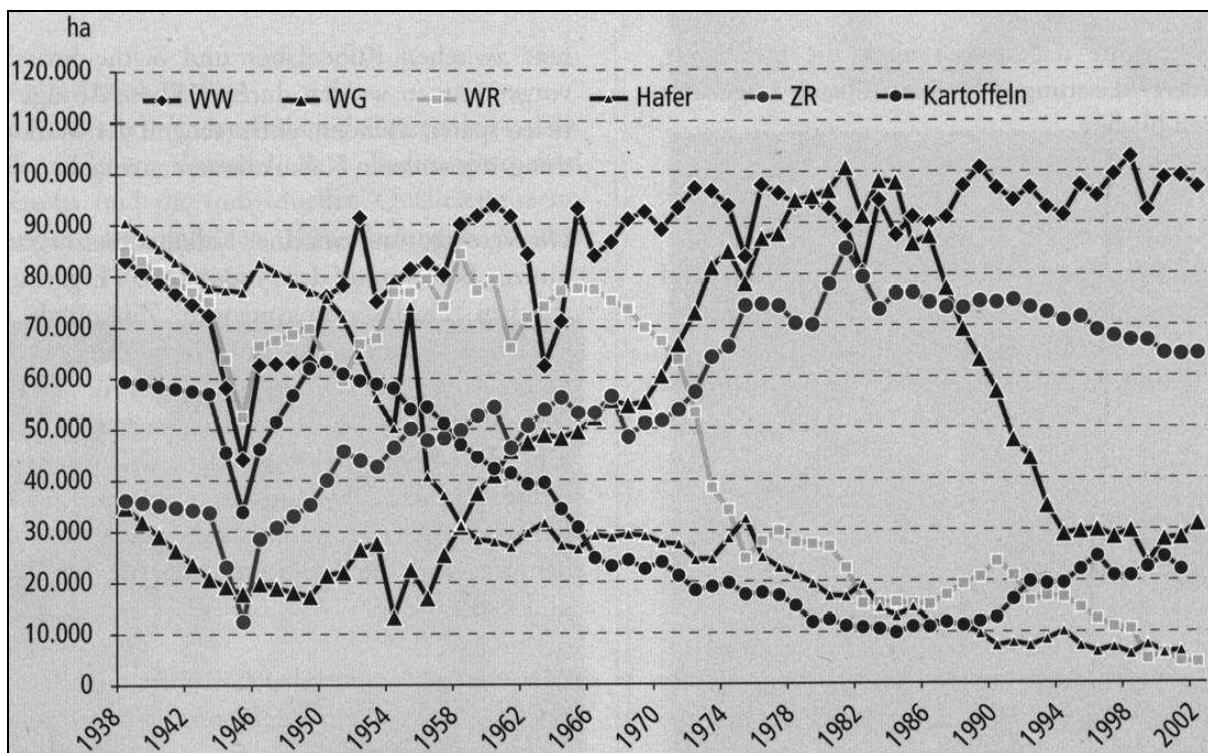
2 Komponenten des Systems Zuckerrübe - Nematode

Ziel dieses Kapitels ist es, einen Überblick über den Anbau von Zuckerrüben und die Bedeutung des Zuckerrübenanbaus in Deutschland zu geben, sowie die Schaderreger Nematoden, ihre Verbreitung und ihre Biologie, vorzustellen.

2.1 Zuckerrübenanbau in Deutschland und insbesondere im Rheinland

Der Zuckerrübenanbau in Deutschland weist eine ausgeprägte regionale Konzentration auf (vgl. I.M.A, 2005, S. 17). Das Rheinland ist ein Kerngebiet des deutschen Zuckerrübenanbaus. Nach Niedersachsen mit einem Zuckerrübenanbau auf ca. 125.000 Hektar (ha) und Bayern mit ca. 75.000 ha ist das Rheinland die drittgrößte Anbauregion Deutschlands. Auf einem Areal von ca. 64.000 ha (siehe Abbildung 1) bauten hier im Jahr 2002 über 6.000 landwirtschaftliche Betriebe Zuckerrüben an (HAASE, 2003, S. 73).

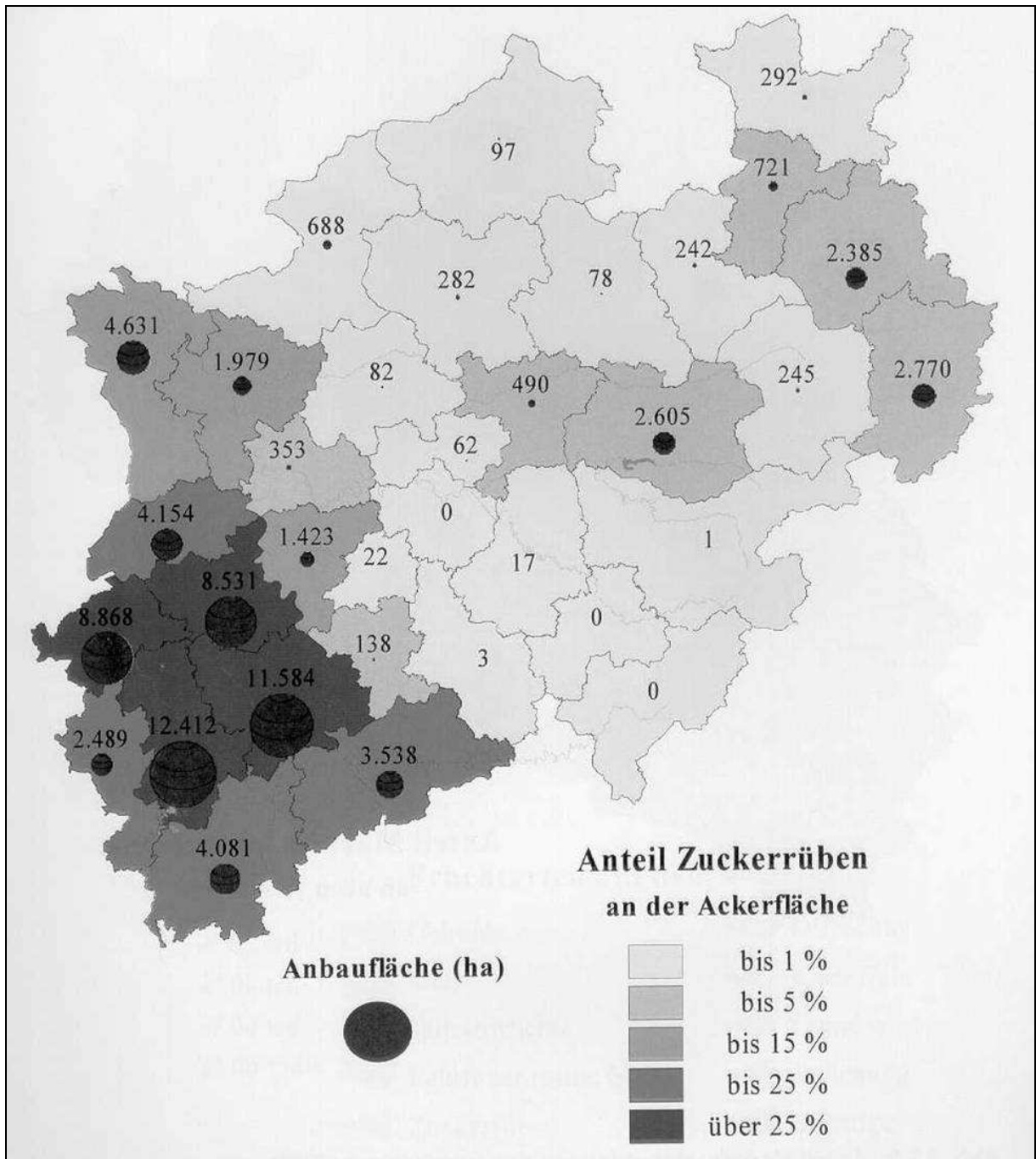
Abbildung 1: Entwicklung der Anbauflächen im Rheinland



Quelle: HAASE, 2003, S. 117

Wie Abbildung 2 zeigt, konzentriert sich der Zuckerrübenanbau in Nordrhein-Westfalen (NRW) auf die rheinischen Landkreise Erftkreis, Düren, Heinsberg, Aachen und Neuss. Hier, im Bereich der Köln-Aachener Bucht, werden rund 70% der rheinischen Rüben angebaut. Der durchschnittliche Anteil Zuckerrüben am Ackerland beträgt hier 27%. Da nur ein Teil der landwirtschaftlichen Betriebe Zuckerrüben anbaut, ist der Fruchtfolgeanteil der Zuckerrüben in den zuckerrübenanbauenden Betrieben höher, als es die Durchschnittszahlen erwarten lassen (ZENS, 2002, S. 104).

Abbildung 2: Bedeutung der Zuckerrüben in Nordrhein-Westfalen



Quelle: ZERGER UND HAAS, 2003, S. 20

2.2 Phytoparasitäre Nematoden

2.2.1 Überblick

Eng gekoppelt mit dem Zuckerrübenanbau ist das Auftreten phytoparasitärer Nematoden, aus deren Vielzahl im Folgenden nur die wichtigsten Spezies benannt werden. Eine ausführliche Übersicht über an Zuckerrüben parasitierende Nematodenspezies gibt z.B. COOKE (1993).

Die Gattung der Wurzelgallennematoden *Meloidogyne spp.* ist weltweit die wirtschaftlich bedeutendste Gattung phytoparasitärer Nematoden, spielt aber im Zuckerrübenanbau in Deutschland nur eine unbedeutende Rolle (KWS, 2000, S. 7).

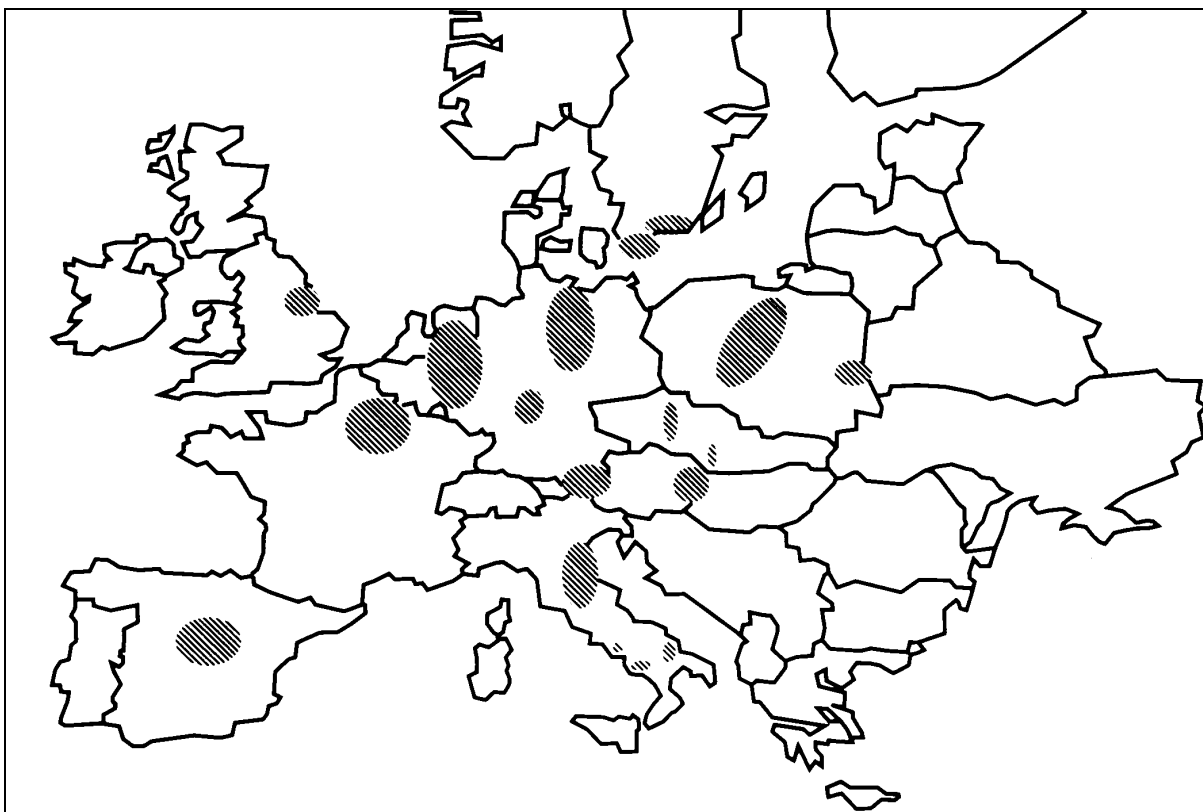
Die Ausbreitung der durch das Stock- und Stängelälchen *Ditylenchus dipsaci* verursachten Rübenkopffäule hat sich in den letzten Jahren weiter fortgesetzt. Neue Befallsflächen treten immer häufiger im Kerngebiet des rheinischen Zuckerrübenanbaus auf (SCHLANG, 2003, S. 56) und die Zahl der Betriebe mit erstmaligem Befall mit *Ditylenchus dipsaci* steigt seit 1999 deutlich an (HAASE, 2003, S. 63). Bei gehäuftem Auftreten können Ertragsverluste in Höhe von bis zu 50% auftreten. Neben dem Verlust an Rübenmasse ist auch ein Qualitätsverlust zu verzeichnen, da ein Befall mit *Ditylenchus dipsaci* zu einem Rückgang des Zuckergehaltes bei gleichzeitigem Anstieg der Melassebildner führt (KWS, 2000, S. 10).

Unter den zahlreichen Arten wandernder Wurzel nematoden befinden sich etliche, die an Zuckerrübenwurzeln parasitieren. Die wichtigsten gehören den drei Gattungen *Trichodorus*, *Paratrichodorus* und *Longidorus* an. Wirtschaftliche Bedeutung besitzen die Wandernematoden innerhalb Europas nur in England und den Niederlanden. Dort führt ein Befall nur in Ausnahmefällen, bei hoher Verseuchung und entsprechenden Klimabedingungen, zu Ertragsausfällen in Höhe von 50% (KWS, 2000, S. 11ff.).

2.2.2 Bedeutung und Verbreitung von *Heterodera schachtii*

Der Rübenzystemnematode *Heterodera schachtii* führt nach Ansicht von BÜRCKY (2001) bei Betrachtung möglicher Ertragseinbußen im Zuckerrübenanbau durch Krankheiten und Schädlingen zu den größten möglichen Ertragseinbußen und ist unter mitteleuropäischen Bedingungen der verbreitetste und wirtschaftlich wichtigste Schadnematode an Zuckerrüben (SCHLANG, 1997, S. 230). Aus diesem Grund umfasst diese Arbeit ausschließlich den Schaderreger *Heterodera schachtii*, und die Begriffe Nematode, Rübennematode und Rübenzystemälchen werden im Folgenden synonym verwendet und bezeichnen ausschließlich die Spezies *Heterodera schachtii*, auch *H.schachtii* abgekürzt, soweit nicht explizit andere Nematodenspezies angesprochen werden.

Der Rübennematode ist heute in Europa in nahezu allen Gebieten mit intensivem Rübenanbau vertreten (Abbildung 3). Weltweit ist er zusätzlich in Asien, Nordamerika und Australien vorzufinden (KWS, 2000, S. 14).

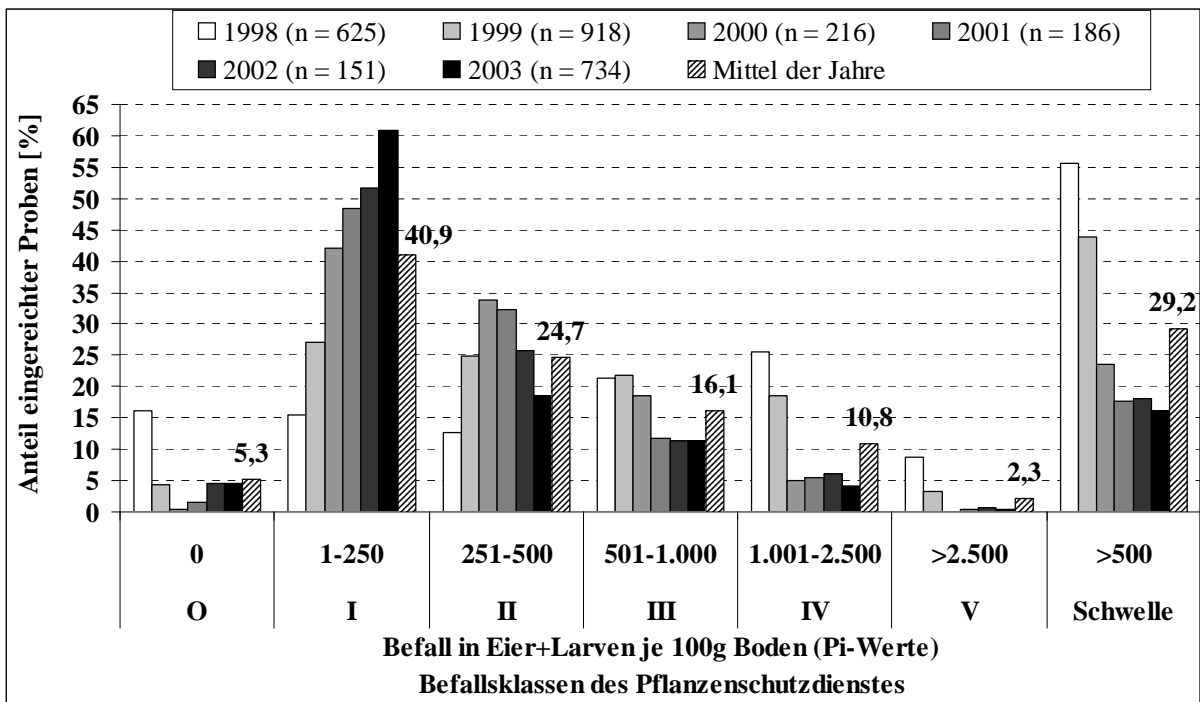
Abbildung 3: Verbreitung des Rübenzystemnematoden in Europa

Quelle: KWS, 2000, S. 15

Auch in Deutschland besteht eine weitgehende Deckungsgleichheit von Gebieten mit intensivem Zuckerrübenanbau und stärkerem Nematodenbefall (LENZ, 2000). Nach Schätzungen ist in der Bundesrepublik Deutschland etwa ein Viertel (BEHRINGER, 1990, S. 287) bis ein Drittel (SAATEN-UNION, 1991, S. 7) der mit Zuckerrüben bestellten Ackerfläche vom Rübennematoden unterschiedlich stark befallen. Dabei konzentriert sich der Rübennematode auf die Hauptanbauggebiete der Zuckerrübe, die im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden.

1998 regte der Pflanzenschutzdienst (PSD) der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen unter den rheinischen Landwirten eine Beprobung ihrer Flächen auf Nematodenbefall an, um ein Bild über die aktuelle Verseuchungssituation zu erhalten. Nach 625 eingesendeten Proben im Jahr 1998 stieg deren Anzahl 1999 Dank des neuen, unkomplizierteren Erdschwadbeprobungsverfahrens (siehe Kapitel 3.1.2) auf über 900 an. Danach wiesen 1998 ca. 56% und 1999 ca. 44% aller eingesendeten Proben einen Befall oberhalb der Schadschwelle² auf (HEINRICHS, 2000, mündl.). In den Jahren 2000-2003 ergaben die Erdschwadbeprobungen einen Anteil von Proben oberhalb der Schadschwelle von 16-24% (Abbildung 4).

² Der Begriff Schadschwelle wird in Kapitel 3.1.1 definiert.

Abbildung 4: Befall mit *H.schachtii* im Rheinland

Hinweis: Ab 2000 nur Ergebnisse der Erdschwadbeprobung und errechnete P_1 -Werte; n = Anzahl Proben

Quelle: HEINRICHS, 2004a

Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse sind aufgrund der negativen Selektion im Rahmen einer solchen Untersuchung nicht repräsentativ für die Befallssituation im Rheinland, sondern zeigen lediglich die Befallssituation auf den Schlägen, von denen die Landwirte diese Proben gezogen haben. Des Weiteren sind die Ergebnisse der Erdschwadbeprobung mit denen der klassischen Befallserhebung bedingt durch die unterschiedliche Methodik nur eingeschränkt vergleichbar (siehe Kapitel 3.1.2). Andererseits ist ein gewisser „Verdünnungseffekt“ nicht auszuschließen, da durch die Schwadproben vor allem neue Betriebe angesprochen werden, die sich bisher nicht um die Nematodenproblematik kümmerten (HEINRICHS, 2004b, mündl.).

2.2.3 Biologie des Schaderregers *H.schachtii*

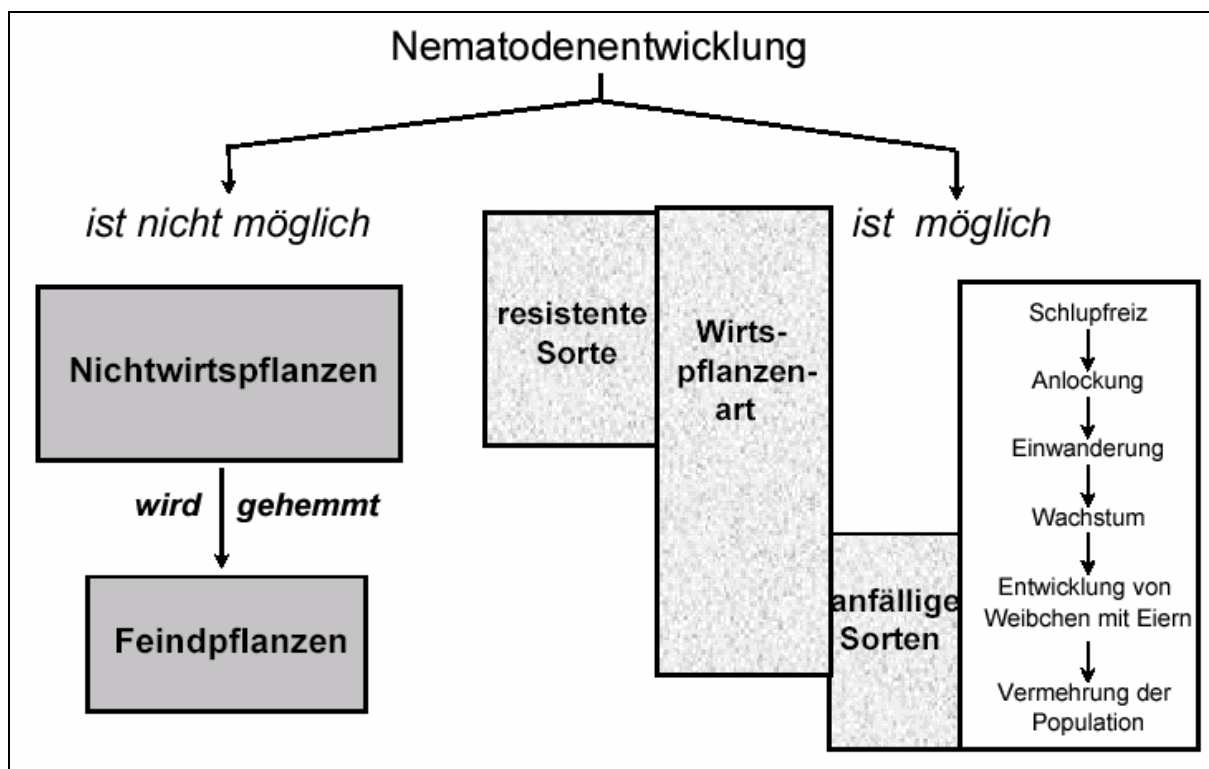
Um *H.schachtii* in seiner Umwelt modellieren zu können, müssen sowohl die wesentlichen Elemente der Biologie des Nematoden als auch die Wirkung exogener und endogener Faktoren auf die Populationsdynamik bekannt sein.

2.2.3.1 Lebenszyklus unter anfälligen Wirtspflanzen

Als obligater Phytoparasit benötigt *H.schachtii* eine Wirtspflanze, um einen vollständigen Lebenszyklus durchlaufen zu können (SCHMIDT, 1992, S. 106). In der Nematologie wird der Begriff der Wirtspflanze enger gefasst als in anderen Fachgebieten. Während im allgemeinen eine Pflanzenart als Wirtspflanze bezeichnet wird, wenn sie einem Parasiten die Möglichkeit der Ansiedlung und Nahrungsaufnahme gewährt, ist eine Pflanzenart im nematologischen Kontext nur dann eine Wirtspflanze, wenn sich ein phytoparasitärer Nematode an oder in ihr

fortpflanzen kann (vgl. MÜLLER, 1989b, S. 139 und Abbildung 5). Als polyphager Parasit ist der Kreis der Wirtspflanzen bei *H.schachtii* sehr groß und umfasst u.a. Gänsefußgewächse (*Chenopodiceae*), zu denen z.B. die Zuckerrübe, Rote Beete, Spinat, Chinakohl, Ölrettich, Senf und Raps gehören. Einen umfassenden Überblick über den Kreis der Wirtspflanzen des Rübenzystennematoden geben z.B. GEIBL (1987) und KWS (2000, S. 27).

Abbildung 5: Schema zur Abgrenzung verschiedener Fachbegriffe der Nematologie



Quelle: MÜLLER, 1989, S.138

Der Nematode entwickelt sich in klar definierten Stadien. Die zu Beginn der Vegetation im Boden vorliegenden Zysten beinhalten Eier unterschiedlicher Entwicklungsstufen. Die Eier sind z.T. in der Embryonalentwicklung oder aber gefüllt mit L1-Larven (Larven im 1. Entwicklungsstadium) oder infektiösen L2-Larven. Nur die L2-Larven sind in der Lage, aus den Eiern zu schlüpfen und die Zyste zu verlassen. Diese verschiedenen physiologischen Stadien sind in dem Begriff „Eier und Larven“, kurz „E+L“, zusammengefasst und werden bei der Messung der Besatzdichte mit Rübenzystennematoden an einem Standort ermittelt, indem die Anzahl Eier und Larven je 100 ml Boden³ ausgezählt wird (siehe Kapitel 3.1.2).

Die nach dem Verlassen der Zyste frei im Boden befindlichen L2-Larven orientieren sich nach den Wurzelexsudaten der Wirtspflanzen und penetrieren die Wirtswurzel, werden sedentär (sesshaft) und entwickeln sich innerhalb der Pflanze über weitere Larvenstadien zu geschlechtsreifen Adulten unterschiedlichen Geschlechts. Die Männchen verlassen die Wurzel, befruchten die Weibchen und sterben ab. In den befruchteten Weibchen entwickeln sich die Eier der nächsten Generation. Die in der Folge absterbenden Weibchen metamorphosieren zu Zysten, dem Überdauerungsstadium des Nematoden. Mit zunehmender Alterung im Boden

³ In der Literatur finden sich sowohl Angaben in Milliliter (ml) als auch Gramm (g) Boden.

verfärbt sich die Zyste von weiß nach braun. Die Eier entwickeln sich innerhalb der Zyste über verschiedene Embryonalstadien zu neuen infektiösen L2-Larven. Da bei *H.schachtii* keine Diapause besteht, kann der Lebenszyklus mehrere Male während der Vegetationsperiode vollendet werden und zu einem erheblichen Populationsanstieg unter Wirtspflanzen führen. Unter den Bedingungen der Köln-Aachener Bucht und vergleichbarer Regionen kann der Nematode i.d.R. drei Generationen ausbilden (vgl. MÜLLER, 1979, S. 92 und SAATEN-UNION, 1991, S. 13). Im klimatisch sehr günstigen Jahr 2003 konnten vier Vermehrungsgenerationen erreicht werden (vgl. LIZ, 2003b). Im Imperial Valley (Kalifornien) sind bis zu fünf Generationen im Jahr (vgl. GRIFFIN, 1988, S. 398) bzw. bis zu sieben Generationen während der Vegetationszeit der Zuckerrüben möglich (THOMASON UND CASWELL, 1987, S. 116)⁴. Nach SCHMIDT (1992, S. 49) wird diese diskrete Generationeneinteilung der Biologie des Nematoden nicht gerecht. Vielmehr ist zu erwarten, dass es innerhalb der genetischen und umweltbedingten Variabilität einer Population zu sich überlappenden Generationen kommt.

Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen einer angebauten Fruchtart und der Entwicklung der Nematodenpopulation werden die Anfangspopulationsdichte (initial population, P_i -Wert) und die Dichte der Population bei „Kulturrende“ (final population, P_f -Wert) in Relation gesetzt. Die sich daraus ergebende Abundanzdynamik (Vermehrungsrate) von *H.schachtii* wird als „ P_f/P_i -Wert“ oder r bezeichnet. Ist der P_f/P_i -Wert >1 , hat sich der Nematode vermehrt, ist der Wert < 1 , so ist die Nematodenpopulation zurückgegangen. Die Anfangspopulationsdichte, bei der sich eine Vermehrungsrate von 1 einstellt, wird „wirtschaftliche Verseuchungsdichte“ (WVD) bzw. equilibrium density (vgl. SEINHORST, 1966, S. 157 sowie ENGEL UND STELTER, 1976, S. 330) genannt. Anhand der WVD bzw. der Vermehrungsrate unterscheiden SEINHORST (1967b, S. 429), MÜLLER (1989b, S. 139), SCHMIDT (1992, S. 23f.), BELL (1997, S. 141) und MCSORLEY (1998, S. 121) gute bis schlechte Wirtspflanzen. So gilt z.B. Winterraps im Vergleich mit der Zuckerrübe als besserer Wirt für *H.schachtii* (vgl. KRAUS, 1981, S. 91; SCHMIDT, 1992, S. 24; BELL, 1997, S. 141 und SCHLANG, 2003a, mündl.). HEIJBROEK UND WITHAGEN (1997, S. 217) fassen dagegen alle Wirtspflanzen als „Zuckerrübe“ zusammen, da die Unterschiede bei den Vermehrungsraten zwischen den einzelnen Wirtspflanzen vernachlässigbar gering seien.

2.2.3.2 Lebenszyklus unter resistenten Wirtspflanzen

Resistenz wird in der Nematologie definiert als Eigenschaft einer Pflanzenart oder -sorte, durch genetisch festgelegte Barrieren die Fortpflanzung einer bestimmten Nematodenart zu hemmen (MÜLLER, 1989b, S. 139). Somit ist eine Pflanze-Schaderreger-Beziehung vorausgesetzt, d.h. die betrachtete Pflanzenart oder -sorte hat Wirtspflanzenstatus (siehe Abbildung 5). Das Gegenteil von Resistenz wird in der Nematologie als Anfälligkeit bezeichnet (ebd., S. 139). Das Wirkungsprinzip resistenter Pflanzen besteht dabei in einer Unterbrechung des Entwicklungskreislaufs von *H.schachtii*. Nematodenresistente Pflanzen üben wie anfällige Wirtspflanzen einen Schlupfreiz auf die Larven aus, so dass es zu einer Anlockung und zum Eindringen der Larven in die Wurzeln kommt. Im Gegensatz zu der weiteren Entwicklung in anfälligen Wirtspflanzen ist aber in resistenten Pflanzen die Bildung eines Nährzellensystems (Syncytium) eingeschränkt. Der Nematode kann sich nicht ausreichend ernähren und stirbt ab. Ein weiterer Mechanismus der Resistenz besteht in einem Verschieben des Geschlechterver-

⁴ 6-7 Generationen werden in Kalifornien erreicht, wenn die Zuckerrüben im April ausgesät und 12-14 Monate später, im April bis Juni des folgenden Jahres, geerntet werden (vgl. THOMASON UND CASWELL, 1987).

hältnisses. Während in anfälligen Wirtspflanzen ein Männchen:Weibchen-Verhältnis von nahezu 1:1 vorzufinden ist, beträgt dieses in resistenten Pflanzen 100:1. Da die Weibchen während ihrer Entwicklung ca. vierzigmal mehr Nahrung aufnehmen als die Männchen, ist es weiblichen Tieren bei gestörter Nahrungsaufnahme nur vereinzelt möglich, ihren Entwicklungszyklus abzuschließen. Der deutliche Männchenüberschuss führt zu einem Populationsrückgang (KWS, 2000, S. 37).

2.2.3.3 Abundanz unter Nichtwirtspflanzen

Eine Nichtwirtspflanze ist definiert als eine Pflanzenart, an der sich ein phytoparasitärer Nematode nicht fortpflanzen kann (MÜLLER, 1989b, S. 139, siehe Abbildung 5)⁵. Ohne aufstehende Wirtspflanze kommt es zu einem Populationsrückgang, der verursacht wird durch

Schlupf: Spontanschlupf und Schlupfreiz durch Wurzelexsudate;

Antagonisten, Predatoren und Parasiten (vgl. RÖMPLER UND SIKORA, 1988, S. 440): Eine Vielzahl von Gegenspielern, Räubern und Parasiten (andere Nematodenarten, Bakterien und Pilze) leben im Boden und sorgen für eine biologische Regulation der Nematodenpopulation.

Wie groß der Einfluss der natürlichen Populationsregulierung ist, konnten BELL (1997) sowie HEIJBROEK UND WITHAGEN (1997) in ihren Untersuchungen zeigen. BELL (1997) untersuchte die Abundanzdynamik von *H.schachtii* auf rekultivierten Tagebauflächen im Rheinland. Diesen fehlen in den Jahren nach der Rekultivierung natürliche Antagonisten, so dass die Nematodenpopulation bis zum 15. Jahr nach der Rekultivierung steil ansteigt und anschließend mit hoher Amplitude um einen Gleichgewichtszustand fluktuieren (ebd., S. 63). Das Phänomen „explodierender“ Nematodenpopulationen in sog. Neulandböden konnten auch HEIJBROEK UND WITHAGEN (1997, S. 220) für Polderflächen in den Niederlanden nachweisen.

Versuche, natürliche Antagonisten oder Parasiten gezielt zur Bekämpfung von *H.schachtii* einzusetzen, waren bisher nicht bis zur Praxisreife entwickelt (vgl. HOFFMANN-HERGARTEN, 1994 und GUTBERLET ET AL., 2000). HALLMANN (2003) gibt einen Überblick über den Stand des Wissens zu diesem Thema. Mit BioAct[®]WG der Firma prophyta Biologischer Pflanzenschutz GmbH wird zukünftig das erste biologische Nematizid zur Verfügung stehen, das als Wirkstoff die Konidien des Pilzes *Paecilomyces lilacinus* enthält. Der Bekämpfungserfolg ist vergleichbar mit dem chemischer Vergleichspräparate. Die mehrmalige Applikation mittels Gießen oder Sprühen gefolgt von einer Einregnung genau an den Stellen, an denen später die Pflanzen wachsen, ist für die großflächige Anwendung allerdings zu aufwendig (vgl. LÜTH, 2004, S. 38 und LÜTH, 2005).

Während FICHTNER ET AL. (1984, S. 619) und LAUENSTEIN (1991, S. 293) die verschiedenen Arten von Nichtwirtspflanzen in ihrer abundanzregulierenden Wirkung als gleichwertig ansehen und auch HEIJBROEK UND WITHAGEN (1997, S. 217) alle Nichtwirtspflanzen wie auch die Wirtspflanzen zusammenfassen, differenzieren andere Autoren anhand ihrer Erhebungen zwi-

⁵ Vereinzelt ist in der Literatur der Begriff „Neutralpflanze“ zu finden. Damit werden Pflanzen gekennzeichnet, die von einer bestimmten Nematodenart nicht befallen werden, aber auch ihrerseits keinen spezifischen Einfluss auf die Nematodenpopulation ausüben (vgl. MÜLLER, 1989b, S. 138). Da im Allgemeinen aber nicht bekannt ist, ob eine Pflanzenart eine Nematodenpopulation wirklich in keiner Weise, z. B. auch nicht indirekt über die Förderung von Antagonisten, beeinflusst, wird von der Verwendung des Ausdrucks Neutralpflanze abgeraten (vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 19).

schen verschiedenen Nichtwirtspflanzen. Unter Luzerne, Mais und Kartoffeln werden in der Literatur regelmäßig überdurchschnittliche Abbauraten ermittelt (vgl. FICHTNER ET AL., 1982, S. 16f.; DUDA, 1984, S. 24ff.; BEHRINGER UND FÜRST, 1985a, S. 27; DUDA UND FISCHER, 1988, S. 158; SCHMIDT; 1992, S. 24) und unter Sommergetreide niedrigere als unter ihren Winterpendants (vgl. SCHMIDT; 1992, S. 24 und die von ihm zitierten Autoren).

MÜLLER (1989b, S. 139, siehe Abbildung 5) sieht „Feindpflanzen“ als Sonderfall innerhalb der Nichtwirtspflanzen an. Eine Feindpflanze ist eine Nichtwirtspflanze, die durch spezielle Stoffwechselfvorgänge die Entwicklung einer bestimmten Nematodenart hemmt und zur Abnahme der Populationsdichte führt. Von Feindpflanzen ist demnach zu fordern, dass durch ihren Einfluss die Nematodenpopulation stärker zurückgeht als unter Brache oder anderen Nichtwirtspflanzen (ebd.). Aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu den Nichtwirtspflanzen dürfen Feindpflanzen trotz gegenteiliger Angaben in der Literatur nicht gleichgesetzt werden mit resistenten Wirtspflanzen (vgl. MÜLLER UND RUMPENHORST, 2000, S. 7). Ein Beispiel für eine Feindpflanze gegen Nematoden ist die Studentenblume *Tagetes patula* (vgl. BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2001, S. 1).

2.2.3.4 Einflussfaktoren auf die Abundanzdynamik

Die Populationsdynamik des Nematoden ist von einer Reihe biotischer und abiotischer Faktoren abhängig, die an dieser Stelle nicht ausschöpfend erläutert werden können. WHITEHEAD (1998, S. 202) weist darauf hin, dass die biologischen und exogenen Faktoren, die die Populationsdynamik insbesondere unter Nichtwirtspflanzen beeinflussen können, zwar deskriptiv bekannt, aber quantitativ nicht bestimmt sind. Einen sehr guten Überblick über die wichtigsten Einflussgrößen sowie deren Interaktion geben DUDA UND FISCHER (1990, siehe Abbildung 6) sowie MCSORLEY (1998, S. 121ff.).

(1986, S. 189) weisen empirische Beobachtungen der Überlebenswahrscheinlichkeit von Nematodenpopulationen an Mikroplots auf eine Dichteabhängigkeit hin, was in gewisser Hinsicht überraschend ist, da Ressourcenbegrenzungen nicht auf sich nicht ernährende Nematoden wirken und man daher eher eine Dichteunabhängigkeit des Überlebens erwartet. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Nematoden ausgestattet mit einem Energievorrat überleben, der ihnen von den Eltern mitgegeben wurde, so dass bei hoher Populationsdichte unter hohem Wettbewerbsdruck produzierte Populationen verringerte Energiereserven haben könnten und Parasitierung und Predation (s.o.) bei hoher Populationsdichte der Nematoden weiter verbreitet sind, verbunden mit einer höheren Sterberate bei hohen Dichten (ebd., S. 190). Auch nach DUDA (1984, S. 24ff.) sowie DUDA UND FISCHER (1988, S. 158) führen höhere Ausgangsverseuchungen mit *H.schachtii* zu größeren Reduzierungen beim Anbau von Nicht-wirtspflanzen.

Die Untersuchungen von HAMBÜCHEN (1990, S. 54) zeigten, dass das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen Anfangs- und Endbesatz maximal 50% erklärte Varianz beträgt, so dass neben der Höhe der Ausgangsverseuchung noch andere Faktoren eine wichtige Rolle in der langfristigen Entwicklung der Dichte der Nematodenpopulation spielen. Wichtigster abiotischer Faktor für den poikilothermen (wechselwarmen) Nematoden ist die Temperatur des ihn umgebenden Bodens (vgl. COOKE UND THOMASON, 1979; GRIFFIN, 1981; GRIFFIN, 1988; STEUDEL ET AL., 1981, S. 30ff.; RÖMPLER UND SIKORA, 1988, S. 440; SCHMIDT, 1992, S. 17 und S. 61f. sowie MCSORLEY, 1998, S. 121ff.), gefolgt von der damit korrelierten Bodenfeuchte (vgl. DEITERMANN, 1983, S. 70; RÖMPLER UND SIKORA, 1988, S. 440; MCSORLEY, 1998, S. 121ff. sowie WARNECKE, 2000, S. 10). Beide zusammen sind entscheidend für die Entwicklungsdauer einer Nematodengeneration und die Mobilität der infektiösen L2-Larven. Als Basistemperatur für die Nematodenentwicklung sind 8°C anzusehen (vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 11 und SCHLANG, 1997, S. 231). Weitere bodenphysikalische Einflussgrößen wurden u.a. von FICHTNER (1986) untersucht.

LAUENSTEIN (1991, S. 35) zitiert ENGEL UND STELTER (1976, S. 337), nach denen Düngung, Bestandsdichte der Wirtspflanze oder allgemein alle Maßnahmen, die den Zustand der Pflanze, insbesondere den des Wurzelsystems, zeitlich und räumlich quantitativ oder qualitativ verändern, direkt auf die Abundanzdynamik der Nematoden einwirken. Alle Maßnahmen, die Wachstum und Entwicklung der Pflanzen begünstigen, fördern die Ertragsbildung, allerdings auch die Reproduktion der Nematoden.

Viele Bewirtschaftungsmaßnahmen führen gewollt oder unbewusst zu einer Verringerung der Nematodenpopulation. Eine intensive Bodenbearbeitung incl. Pflügen wirkt sich negativ auf die Entwicklung des Nematoden aus (vgl. DECKER, 1963, S. 140; RÖMPLER UND SIKORA, 1988, S. 440; HEYLAND UND HAMBÜCHEN, 1991, S. 157 sowie BELL, 1997, S. 113). Dies ist auch ein Erklärungsansatz für den unter Kartoffeln festgestellten überdurchschnittlichen Populationsrückgang. Nur nach HEIJBOEK (1996, S. 245) gibt es bisher keinen Beweis für den Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Vermehrungsrate und den Schaden.

2.3 Die Interaktion Nematode-Zuckerrübe

Die Abschätzung zu erwartender nematodenbedingter Schäden an der Kulturpflanze und die Entscheidung über zu treffende Gegenmaßnahmen erfordern zuverlässige Informationen über die Zusammenhänge zwischen Schadensverursacher und Schaden.

2.3.1 Empfindliche Wirtspflanzen

Die anfällige Wirtspflanze Zuckerrübe reagiert gemäß der nematologischen Begriffsdefinition nach MÜLLER (1989b, S. 139) *empfindlich* auf Nematodenbefall, d.h. mit Ertragsverlusten. Der funktionale Zusammenhang zwischen Nematodenbefall und Höhe der Ertragsverluste wird als Befall-Schadens- oder Befall-Verlust-Relation bezeichnet. Die Schädigung der Wirtspflanze erfolgt vor allem durch die Zerstörung der Primärwurzel, die Deformierung der Wasser- und Nährstoffleitungsbahnen und den Entzug von Assimilaten (vgl. FERRIS, 1986, S. 197 sowie SAATEN-UNION, 1991, S. 20). Ein Befall mit *H.schachtii* führt in erster Linie über eine Minderung des Rübenenertrags zu einem Rückgang der Zuckererträge, während die Qualität der Rüben, d.h. Zuckergehalt und Anteil Melassebildner, nicht beeinflusst wird (vgl. COENEN, 1980, S. 146; STEUDEL, 1985, S. 126; FICHTNER ET AL., 1982, S. 12 und KWS, 2000, S. 31). Die Ertragsausfälle können dabei in den Rübenanbaugebieten Deutschlands je nach Befallslage bis zu 50% (WARNECKE, 2000, S. 10) oder 55% (vgl. STEUDEL UND THIELEMANN, 1979, S. 179f. sowie SCHLANG, 2001, mündl.) betragen. Nur vereinzelt werden Schäden >60% in anderen Rübenanbaugebieten genannt (vgl. COOKE, 1993, S. 137 und WHITEHEAD, 1998, S. 202).

Neben diesem direkten Schaden können indirekte Schäden auftreten. Durch den bei Nematodenbefall typischen Wurzelbart an der Zuckerrübe kann z.B. der Erdanhang erhöht sein, wodurch je nach Bezahlungsmodalitäten des belieferten Zuckerunternehmens ein Malus bei der Bezahlung entsteht. Auch können die durch die Parasitierung wassergestressten Pflanzen eine verminderte Widerstandsfähigkeit gegen andere Schadorganismen wie Pilze und Bakterien aufweisen (vgl. BARKER UND OLTHOF, 1976, S. 331).

2.3.2 Tolerante Wirtspflanzen

Die Eigenschaft einer Pflanzenart oder -sorte, auf Nematodenbefall nicht oder weniger empfindlich mit Krankheitssymptomen und/oder Ertragsminderungen zu reagieren, wird in der Nematologie als Toleranz bezeichnet (vgl. MÜLLER, 1989b, S. 139). Das Merkmal Nematodentoleranz war in der Vergangenheit kein Zuchtziel und wurde durch Selektion auf hohen Ertrag allenfalls indirekt berücksichtigt. Allerdings weisen moderne Sorten mit einer Toleranz gegen die Viruskrankheit Rizomania ein sehr gutes Regenerationsvermögen aus und reagieren nicht so sehr auf nematodenbedingten Wasserstress (vgl. MOUHANNA ET AL., 2001, S. 393; HEIJBROEK ET AL., 2002, S. 225 sowie SCHLANG, 2003a, mündl.). Dies ist von Relevanz, da wie in vielen europäischen Zuckerrübenanbauregionen auch im Rheinland eine Vergesellschaftung von Rizomania und Nematoden auftritt (vgl. KWS, 2000, S. 57 und LIZ, 2004a). Erste Untersuchungen geben allerdings Hinweise darauf, dass bei gleichzeitigem Befall mit Rizomania und Nematoden rizomaniatolerante Sorten die Vermehrung des Nematoden nicht so ausgeprägt hemmen wie nicht rizomaniatolerante Sorten, die aufgrund des Rizomaniabefalls geschädigt waren und daher keine so guten Wirte für den Nematoden mehr darstellten (vgl. MOUHANNA ET AL., 2001, S. 395). Die Entwicklung toleranter Sorten und ihr gezielter Einsatz in integrierten Anbauverfahren werden derzeit noch limitiert durch das mangelhafte Verständnis über die Ursachen und Wirkungsweisen der Toleranz (MÜLLER, 2002, S. 106)⁶. Erste Untersuchungen mit der zur Saat 2005 zugelassenen Sorte „Pauletta“ der KWS Saat AG

⁶ Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf die Arbeiten von BALKE (2001) und GIERTH (2005) verwiesen.

mit partieller Resistenz und ausgeprägter Toleranz verliefen Erfolg versprechend. Solche teilresistenten Sorten vermehren den Nematodenbesatz deutlich weniger als eine voll anfällige Sorte (SCHLANG, 2005, S. 52), ihre Ertragsleistung ist aber im Gegensatz zu den resistenten Sorten (siehe Kapitel 3.2.4) auch bei geringem Nematodenbesatz mit der von Normalsorten vergleichbar. Es fehlt aber noch an Versuchen, um das langfristige Resistenzverhalten solcher Sorten auszutesten und eine abgestimmte Anbaustrategie aufzubauen (ebd., S. 53).

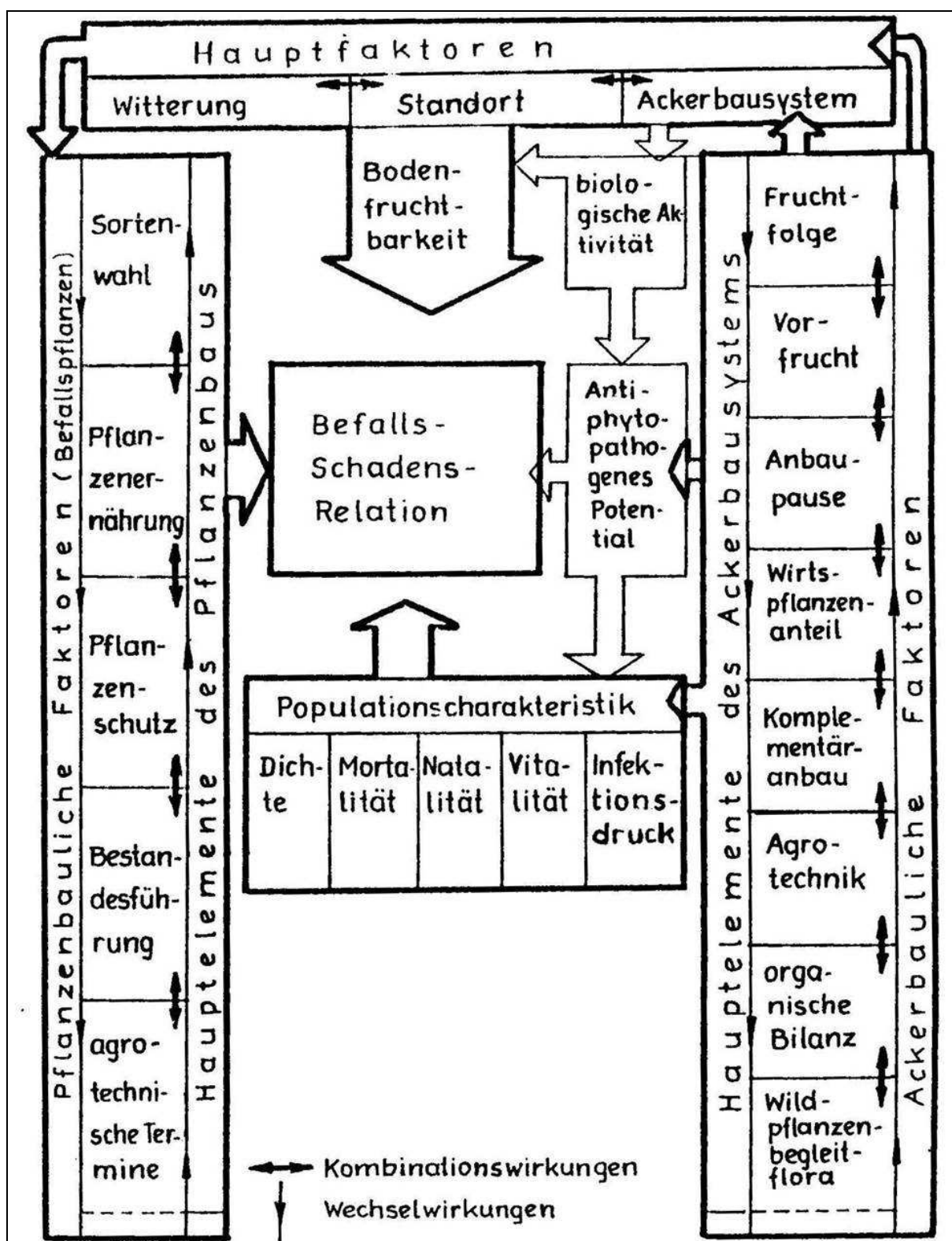
2.3.3 Einflussfaktoren auf die Interaktion Nematode-Zuckerrübe

Genauso wie die Nematodenpopulation einen Einfluss auf die Wirtspflanze ausübt, haben die Wirtspflanzen einen Einfluss auf die Nematodenpopulation. Die Nahrungsreserven der Nematoden werden mit zunehmender Schädigung der Wirtspflanze und zunehmender Populationsdichte kontinuierlich geringer. Dies kann sich bei den Nematoden in einer verringerten Wachstumsrate durch verminderte Fruchtbarkeit (geringere Anzahl Eier pro Weibchen), verändertem Geschlechterverhältnis (zu Ungunsten der Weibchen) und erhöhter Mortalität (geringere Vitalität, vermehrte Parasitierung) manifestieren (vgl. FERRIS, 1986, S. 197ff.). Auch RÖMPLER UND SIKORA (1988, S. 441) konnten feststellen, dass die Dichteabhängigkeit der Vermehrungsrate beim Nematoden von den Wachstumsbedingungen der Zuckerrübe abhängig ist.

Wie Abbildung 7 zeigt, ist die Nematode-Zuckerrübe-Interaktion ähnlich der Populationsdynamik von einer Vielzahl interagierender biotischer und abiotischer Faktoren abhängig. Der Schaden wird überwiegend von den Nematoden verursacht, die frühzeitig die Pfahlwurzel der jungen Zuckerrübe, den späteren Rübenkörper, befallen. Die Fachwelt ist sich daher einig, dass die Befallshöhe zum Saatzeitpunkt (P_1 -Wert) zentraler biotischer Einflussfaktor auf die Schadenshöhe ist (vgl. OOSTENBRINK, 1966, S. 28; BARKER UND OLTHOF, 1976, S. 327; FERRIS, 1980, S. 164; GRIFFIN, 1981, S. 187; KOCHS, 2000a, S. 698 und MÜLLER, 2002, S. 106).

Als wichtigste abiotische Einflussfaktoren sind die Witterung und damit der Jahreseinfluss anzusehen, gefolgt vom Standortfaktor Boden. Den Einfluss der Temperatur haben z.B. COOKE UND THOMASON (1979) sowie GRIFFIN (1981), untersucht und festgestellt, dass die Pathogenität von *H.schachtii* bei mittleren Temperaturen am höchsten ist und bei geringen und höheren Temperaturen aufgrund abnehmender Mobilität der L2-Larven sinkt. Darin ist auch der Grund zu sehen, dass Frühsaaten c.p. weniger geschädigt werden als späte Saaten, bei denen das empfindliche Jugendstadium der Rübe gerade mit der durch höhere Temperaturen verstärkten Aktivität der Larven zusammentrifft (vgl. DECKER, 1963, S. 140; THIELEMANN UND STEUDEL, 1973, S. 148 sowie ALIO, 1993, S. 110f.). Bei frühen Saaten dagegen kann einem größeren Schaden vorgebeugt werden, da die Minimaltemperatur für das Wachstum der Rübenwurzel ($>3^{\circ}\text{C}$) und für die Aktivität des Rübenzystemnematoden ($>8^{\circ}\text{C}$) etwas voneinander abweichen (SAATEN-UNION, 1991, S. 20) und mit zunehmendem Altersvorsprung der Rübenpflanze die negativen nematodeninduzierten Effekte auf die Entwicklung der Pflanze geringer werden.

Abbildung 7: Einflussfaktoren auf die auf die Befall-Schadens-Relation

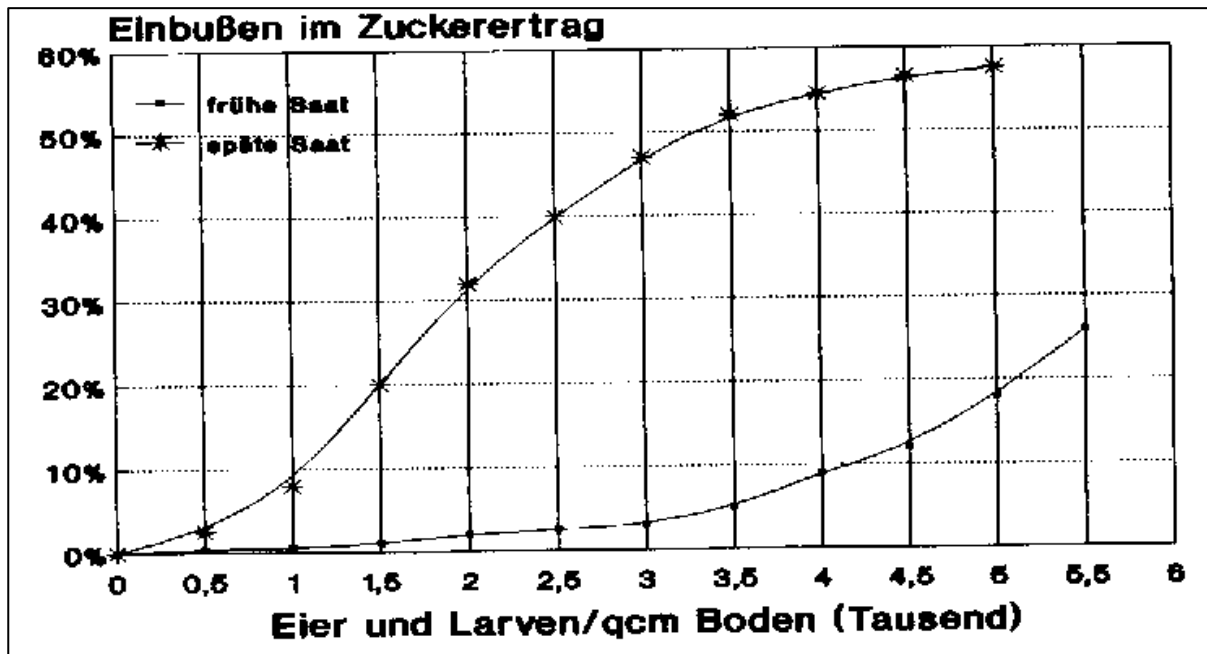


Quelle: FISCHER, 1990a, S. 32

Nach STEUDEL UND THIELMANN (1979) zeigen mehrjährige Feldversuche in der Köln-Aachener Bucht nicht nur, dass der Rübennematode *H.schachtii* Spätsaaten (Saattermin im Mai) im Durchschnitt erheblich stärker schädigt als Frühsaaten (ortsüblich Saat Ende März bis Anfang April) (ebd., S. 179, siehe auch Abbildung 8). Die Versuche zeigen auch, dass die

Streuung der Verluste in den einzelnen Jahren bei den Spätsaaten deutlich höher ist, was auf einen größeren Einfluss anderer Faktoren, wie Temperatur und Bodenfeuchte, auf das Ausmaß des Schadens bei Spätsaaten hinweist (ebd., S. 181).

Abbildung 8: Ertragsverluste und Aussaatzeitraum



Quelle: STEUDEL UND THIELMANN, 1979, S. 179

Die Schadenshöhe ist c.p. abhängig von der Bodenart und ihren für die Bodentemperaturen und -feuchte maßgeblichen physikalischen Eigenschaften. Der Rüben-ertragsverlust ist bei gleichem Verseuchungsgrad auf leichten Böden höher als auf schweren Böden wie Lehm oder Schwarzerden (vgl. BARKER UND OLTHOF, 1976, S. 344; STEUDEL UND THIELEMANN, 1979, S. 180; FERRIS, 1980, S. 165; FICHTNER, 1986 sowie ALIO, 1993, S. 110 und S. 176). HEIJBROEK (1996, S. 239) ist dagegen der Meinung, dass Schäden durch Nematoden und deren Vermehrung auf Sandböden nicht wesentlich höher sind als auf Tonböden und der Einfluss des Bodentyps ohnehin gering oder nicht existent ist (ebd., S. 244). Als Rangfolge für den Einfluss auf die Befall-Schadens-Relation konnte nach derzeitigem Erkenntnisstand Witterung > Standort > Ackerbausystem (Zuckerrübenanteil > Vorvorfrucht > Vorfrucht > Anbaupause) festgestellt werden (FISCHER, 1990a, S. 31).

Welch entscheidenden Einfluss die biotischen und abiotischen Faktoren auf die Höhe der Ertragsdepression ausüben, wird deutlich, wenn bei einem P_i -Wert von 1.000 E+L je nach Jahr auf ein und demselben Standort Schäden von 10 bis 125 dt/ha Rüben-ertrag auftreten (vgl. FISCHER, 1990a, S. 28) oder je nach Jahr, Region und Boden Ertragsdepressionen zwischen 1% und 64% ermittelt werden (vgl. COOKE, 1993, S. 137 und WHITEHEAD, 1998, S. 202, sowie die von diesen Autoren zitierten Quellen). Aus diesen Ausführungen geht zum einen hervor, dass der vor der Aussaat festgestellte Vorbefall mit Nematoden nur als ein Hinweis auf die zu erwartende durchschnittliche Höhe der Ertragsverluste angesehen werden kann (vgl. STEUDEL UND THIELEMANN, 1979, S. 181). Zum anderen müssen so genannte „Vermehrungsjahre“ (Jahre mit starker Nematodenvermehrung) nicht zwangsläufig auch „Schadensjahre“ (Jahre mit ausgeprägten nematodenbedingten Ertragsdepressionen) und Schadensjahre vice versa

nicht zwangsläufig auf hohen Nematodenbefall zurückzuführen sein (vgl. KOCHS, 2000b, S. 40). Die unterschiedlich starke Beziehung zwischen der Höhe des Vorbefalls und dem Rübenenertrag dokumentiert sich nach HAMBÜCHEN (1990, S. 126) in der Höhe des Korrelationskoeffizienten zwischen diesen Größen. Nach seinen Untersuchungen deuten sich erwartungsgemäß steigende Ertragsverluste mit Zunahme des Befalls an (negative Korrelationskoeffizienten), jedoch unterliegt diese Tendenz starken Schwankungen bzw. sogar Umkehrungen (positive Korrelationskoeffizienten).

2.4 Zusammenfassender Überblick

Das Rheinland und insbesondere das Gebiet der Köln-Aachener Bucht ist eines der wichtigsten deutschen Anbaugebiete für Zuckerrüben und daher auch eine Region mit Verseuchung mit dem Rübenzystennematoden *H.schachtii*. Dieser hat bis zu einem Drittel der bundesdeutschen Rübenanbaufläche befallen und gilt als der wirtschaftlich wichtigste Schädling im Zuckerrübenanbau. *H.schachtii* vermehrt sich unter der Wirtspflanze Zuckerrübe sehr stark und kann über 50% Ertragsdepressionen verursachen. Unter resistenten Wirtspflanzen und Nichtwirtspflanzen kommt es dagegen zu einem Populationsrückgang. Wichtige Einflussfaktoren auf die Höhe nematodenbedingter Ertragsdepressionen bei Zuckerrüben sind neben der Empfindlichkeit oder Toleranz der Zuckerrübensorte die Befallshöhe zur Saat der Zuckerrübe, die Saatzeit sowie die Witterung und die Bodenart.

3 Integriertes Nematodenmanagement (INM)

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der Grundlagen des Integrierten Nematodenmanagements als Bestandteil des Integrierten Pflanzenschutzes sowie die Beschreibung dessen wesentlicher Elemente.

3.1 Grundlagen des Integrierten Nematodenmanagements

Der wachsende Konsens zwischen Wissenschaft und Politik über die Notwendigkeit, die Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Praktiken zu berücksichtigen, gibt Wissenschaftlern, Beratern und Landwirten die Möglichkeit, Praktiken des Schädlings- oder Krankheitsmanagements zu entwickeln und zu implementieren, die die langfristige Produktion betonen und nicht die kurzfristige Rentabilität auf Kosten zukünftiger Generationen. So entstand zunächst in einem entomologischen Kontext der Begriff des integrierten Pflanzenschutzes (vgl. MCSORLEY ET AL., 1982, S. 153f.), im angelsächsischen Raum als „integrated pest management“, kurz IPM, bezeichnet. Integriertes Nematodenmanagement ist ein Bestandteil des integrierten Pflanzenschutzes, indem es dessen Grundgedanken aufnimmt und auf den Schaderreger Nematode anwendet (vgl. BIRD, 1981, S. 356). Daher ist es angebracht, zunächst den integrierten Pflanzenschutz näher zu betrachten.

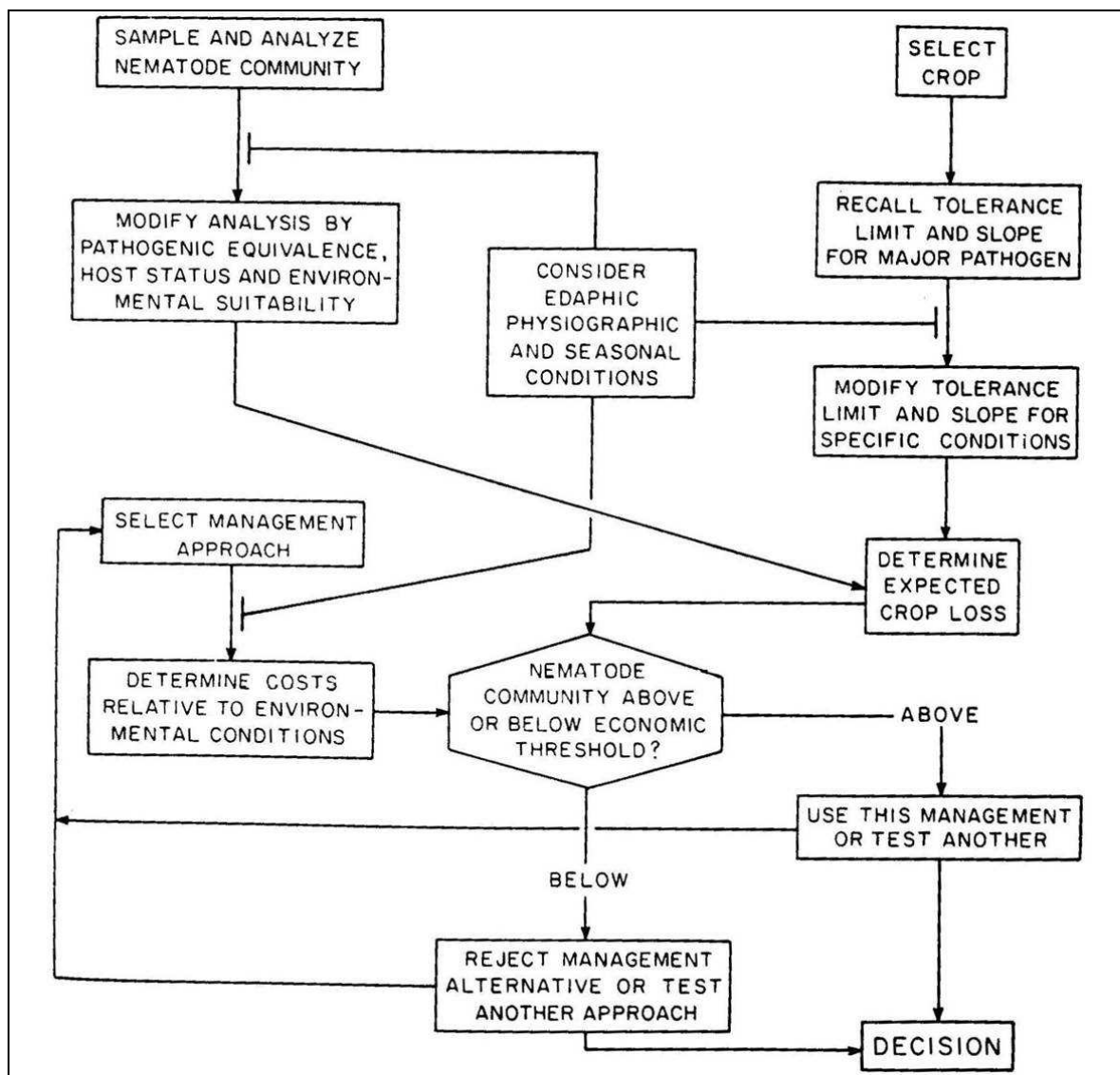
Nach BIRD (1987, S. 114) ist Integrierter Pflanzenschutz ein Systemansatz zur Reduktion des Schadens einer Krankheit bzw. eines Schädlings auf ein tolerierbares Niveau mit dem Idealziel Maximierung des Gewinnes bei gleichzeitiger Minimierung der Gesundheits- und Umweltrisiken. Da es jedoch mathematisch unmöglich ist, zwei oder mehrere abhängige Variablen gleichzeitig zu maximieren oder minimieren, ist IPM stets ein Optimierungsprozess. Zur Anwendung kommen dabei Kombinationen von Verfahren, bei denen unter vorrangiger Berücksichtigung biologischer, biotechnischer, pflanzenzüchterischer sowie anbau- und kulturtechnischer Maßnahmen die Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel auf das notwendige Maß beschränkt wird.

Es ist zu beachten, dass die Begriffe *Schädlingskontrolle* und *Schädlingsmanagement* in der Landwirtschaft häufig synonym verwendet werden. THOMASON UND CASWELL (1987, S. 88) sind jedoch der Auffassung, dass dem nicht so sein sollte. Ihrer Ansicht nach ist „Kontrolle [...] definiert als eine Anstrengung, den Schädling zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort zu vernichten, Management dagegen die Handlung oder Art und Weise des Mitumgehens bzw. Leitens, einschließlich des gesamten Systems von Pflege und Behandlung“ (ebd.). Kontrolle impliziert eine spezielle Handlung oder mehrere Handlungen innerhalb eines begrenzten Zeitrahmens, die zu einer Reduktion entweder der Schädlingspopulation oder des Schadens, verursacht durch diesen Schädling, führt bzw. führen. Im Gegensatz dazu impliziert das Management die Anwendung mehrerer dieser miteinander abgestimmten Schädlingskontrolltaktiken über eine lange Zeitperiode zur Maximierung des Gewinns. Weiterhin beansprucht das strategisch ausgerichtete Schädlingsmanagement nicht die Ausrottung des Schädlings als Ziel; die Schädlingspopulation wird vielmehr dahingehend beeinflusst, dass ihre Anzahl unter die ökonomische Schadschwelle (siehe Kapitel 3.1.1) reduziert wird oder sie diese gar nicht erst erreicht.

Auch beim Schaderreger Rübensystemnematode wurde früher als Bekämpfungsziel die restlose Beseitigung angestrebt, vorwiegend mit Hilfe ganzflächiger Anwendung von Bodenentseuchungsmitteln, seltener durch jahrelangen Anbau von Nichtwirts-Ersatzfrüchten. Heute und im Rahmen des integrierten Nematodenmanagements ist die Zielsetzung weniger rigoros; man versucht vielmehr, gleichsam „mit den Nematoden zu leben“ (BEHRINGER, 1990, S. 281). Dies entspricht dem Grundgedanken des integrierten Pflanzenschutzes bzw. Landbaus, nicht den Schädling um jeden Preis zu vernichten, sondern nur tatsächliche Schäden, also wirtschaftliche Verluste, zu verhindern und die Populationsdichte des Zielnematoden unter dem Niveau der Schadschwelle zu stabilisieren (vgl. BIRD, 1981, S. 356).

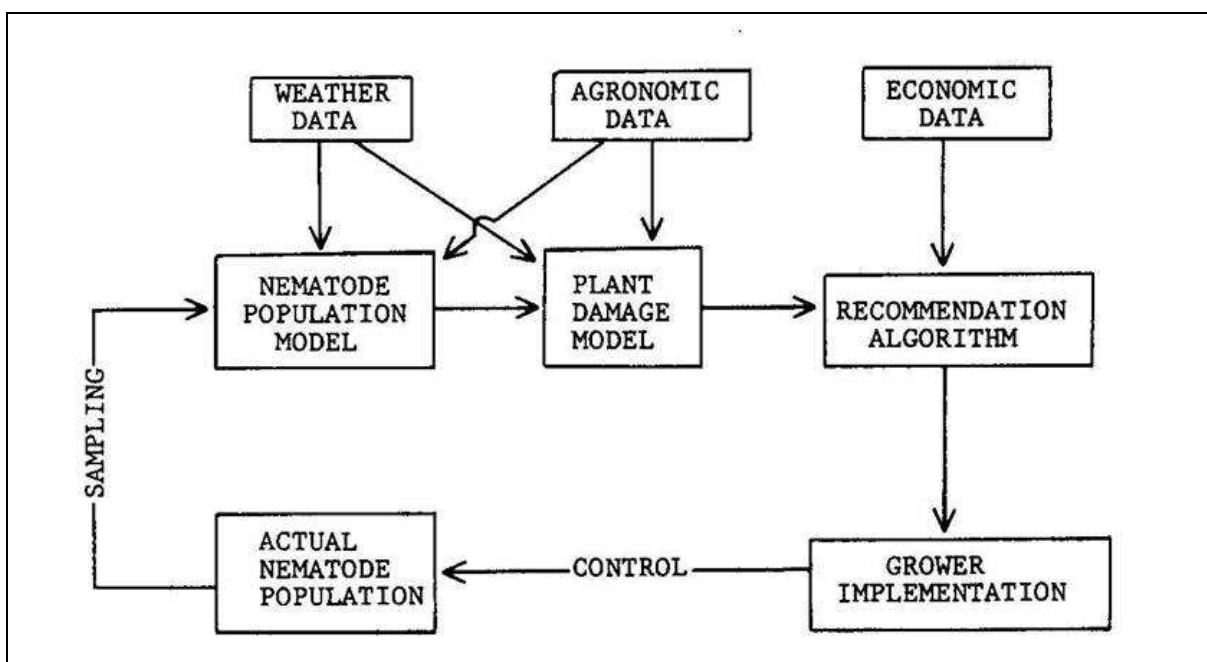
FERRIS (1980, S. 169) gibt in einem Flussdiagramm einen Überblick über den optimalen Entscheidungsablauf im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements (Abbildung 9). Die zentralen Komponenten Bekämpfungsschwellen und Befallserhebungen werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt, während die Abschätzung des zu erwartenden Schadens bereits in Kapitel 2.3 Gegenstand der Betrachtung war.

Abbildung 9: Optimaler Entscheidungsprozess im Rahmen des INM



Die Komponenten eines Integrierten Nematodenmanagementsystems lassen sich aus diesem Entscheidungsprozess ableiten (vgl. MCSORLEY ET AL., 1982, S. 152 sowie Abbildung 10): Ein Nematodenpopulationsmodell verwendet externe Inputs wie Wetterdaten und agronomische Daten sowie Ergebnisse von Befallserhebungen, um daraus eine Prognose der Befalldichte zu einem in der Zukunft liegenden Zeitpunkt zu generieren, und ein Ertragsverlustmodell prognostiziert den die zu erwartenden Ertragsdepressionen bei dieser Populationsdichte. Eine ökonomische Evaluation dieser potentiellen Ertragsverluste und der Vergleich mit den Kosten zur Verfügung stehender Gegenmaßnahmen sind Bestandteil des Empfehlungsalgorithmus. Ist eine Gegenmaßnahme ökonomisch gerechtfertigt, wird sie vom Entscheidungsträger umgesetzt.

Abbildung 10: Komponenten eines Integrierten Nematodenmanagementsystems



Quelle: MCSORLEY ET AL., 1982, S. 152

Die Modelle zur Prognose der Nematodenpopulation und zur Vorhersage der Ertragsverluste sowie die ökonomische Bewertung des Schadens und der Kosten der Gegenmaßnahmen bilden mithin das Informationssystem für den Empfehlungsalgorithmus. Die Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems im Rahmen dieser Arbeit orientiert sich an diesem Schema (siehe Kapitel 4-6).

3.1.1 Schad- bzw. Bekämpfungsschwellen im Rahmen des INM

Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, nimmt das Schadschwellenkonzept im Entscheidungsprozess im Rahmen des integrierten Nematodenmanagements eine zentrale Stellung ein (vgl. FERRIS, 1978b, S. 341ff.; FERRIS, 1980, S. 168; MÜLLER, 1986, S. 235). Unter der *physiologischen* Schadschwelle wird die Populationsdichte des Nematoden verstanden, ab der signifikante Ertragsverluste gemessen werden können (englisch: „damage threshold“). Für den Zuckerrübenanbau auf Lehm- und Schwarzerdestandorten in Deutschland und den Niederlanden wird seit den Untersuchungen von HEIJBROEK (1977) sowie STEUDEL UND MÜLLER (1983,

S. 365) übereinstimmend von der Fachwelt eine physiologische Schadschwelle von 500 Eier und Larven je 100g Boden angegeben. Die Schäden liegen dann in der Größenordnung von 5% und sind statistisch absicherbar.

Dabei handelt es sich bei der Schadschwelle um eine gemittelte, nicht fixe Größe, deren Lage in erster Linie durch die zwei Faktoren Pathogenität des Nematoden und Toleranz der betroffenen Kulturpflanzen bestimmt wird. Beides sind keine festen Größen, sondern können durch Umwelteinflüsse stark verändert werden. Wie bei der Abundanzdynamik und der Befall-Schadens-Relation spielen dabei abiotische Faktoren wie Klima und Boden, sowie biotische Faktoren eine wichtige Rolle (vgl. WEISCHER, 1985, S. 15 sowie FISCHER, 1990a, S. 30f.). Als wichtige Einflussgrößen gelten die Aussaatzeit der Zuckerrübe und die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Bodentemperaturen (vgl. COOKE UND THOMASON, 1979). Bei den Versuchen von STEUDEL UND THIELEMANN (1970, S. 107) in der Köln-Aachener Bucht betrug die kritische Befallszahl, bei der signifikante Ertragsdepressionen auftraten, ca. 2.000 lebensfähige Eier und Larven je 100g Boden bei Aussaat Ende März bis Anfang April und ca. 250 lebensfähige Eier und Larven je 100 g Boden bei Aussaat Mitte Mai. Nach FICHTNER (1985, S. 31f.) variiert der Schadschwellenwert für Zuckerrüben in Abhängigkeit von der Aussaatzeit zwischen etwa 1.000 Eier und Larven bei einer Aussaat vor dem 5. April und etwa 250 Eier und Larven bei einer Aussaat nach dem 25. April in den mitteldeutschen Schwarzerderegionen. COOKE (1993, S. 137) legt die Schadschwelle für den Zuckerrübenanbau im kalifornischen Imperial Valley aufgrund der klimatisch begünstigten starken Vermehrung des Rübennematoden auf nur 143 Eier und Larven fest.

Die *ökonomische* Schadschwelle kennzeichnet dagegen die Populationsdichte des Nematoden, bei deren Überschreitung eine Kontrollmaßnahme ökonomisch sinnvoll ist, da der Grenzertrag der Maßnahme ΔL , die verhinderten Ertragsdepressionen, ihre Grenzkosten ΔK , d.h. den Aufwand für die Durchführung der Maßnahme, überschreitet (vgl. WÜSTEN ET AL., 1981, S. 477, siehe Gleichung 1).

$$\frac{\Delta K}{\Delta L} \leq 1 \quad (1)$$

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, warum neben dem Wissen um die Befall-Schadens-Relation genaue Kenntnisse über die Kosten und die „control efficacy“ einzelner Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements nötig sind (vgl. MCSORLEY UND DUNCAN, 1995, S. 148). Die ökonomische Schadschwelle liegt ebenfalls im Bereich von 500 Eier und Larven je 100g Boden, variiert aber deutlich je nach Bekämpfungsmaßnahme (vgl. MÜLLER, 1999b, S. 207 sowie KOCHS, 2000a, S. 698).

Das Konzept der ökonomischen Schadschwelle ist exakt definiert und leicht zu verstehen für direkte Kontrollmaßnahmen, wenn die Konsequenzen der Maßnahme nicht relevant sind für zukünftige Maßnahmen, egal ob für die aktuell aufstehende Frucht oder folgende Früchte. Daher ist das Konzept der ökonomischen Schadschwelle in der traditionellen Definition statisch, in der einfachsten Form mit vorgegebenem Applikationszeitpunkt, einer einzigen Applikation und einer zum Zeitpunkt der Applikation bestimmten oder geschätzten Schaderregerpopulation. Für die Anwendung der ökonomischen Schadschwelle auf bodenbürtige phytoparasitäre Nematoden gilt zu berücksichtigen, dass die Schaderregerpopulation bereits zum Zeitpunkt der Aussaat der Kulturfrucht in messbarem Umfang vorhanden ist, es einen mit

wechselnder Präzision definierten Zusammenhang zwischen der Nematodenpopulation zur Saat und dem erwarteten Ertragsrückgang gibt (siehe Kapitel 2.3) und die Managemententscheidungen normalerweise vor dem Saatzeitpunkt gefällt werden (siehe Kapitel 3.1.2). Der Einfluss der Nematodenpopulation des einen Jahres ist von großer Bedeutung für die Nematodenpopulation des Folgejahres, so dass der Umfang der Population im Folgejahr mitbestimmt wird von den Managemententscheidungen, die in diesem Jahr gefällt werden, um Schaden von der diesjährigen Frucht abzuwenden. Diese dynamischen und überjährlichen Auswirkungen werden als Carry-over-Effekte bezeichnet. Daher ist die Anwendung des statischen Konzepts der ökonomischen Schadschwelle nur von begrenztem Nutzen (vgl. BIRD, 1981, S. 357 sowie BURT UND FERRIS, 1996, S. 457).

Eine verbesserte Annäherung an die Realität wird erreicht, wenn nicht nur der Einfluss einer Maßnahme auf den Ertrag der jeweiligen Kulturpflanze, sondern auch die Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf die nachfolgenden Früchte bei einer Entscheidung im Rahmen des Schadschwellenkonzeptes einbezogen werden. In Abhängigkeit von der Durchführung einer Maßnahme ergibt sich eine Schaderregerpopulation am Ende der betrachteten Periode (Kalkulationszeitraum), die Ertragsveränderungen beim nächsten Anbau der Wirtspflanze, d.h. im Erwartungszeitraum, hervorrufen kann. Hiermit verbundene Leistungsveränderungen können als sog. Folgekosten erfasst werden (vgl. DROSSERT-STELTGES UND STEFFEN, 1994). Im Hinblick auf die ökonomische Bedingung zur Durchführung einer Bekämpfung bringt die Einbeziehung der Folgekosten eine Erweiterung des Nenners der Gleichung 1 um die zusätzlich zu erfassende Leistungsveränderung im Erwartungszeitraum mit sich (Gleichung 2).

$$\frac{\Delta K_K}{\Delta L_K + \Delta L_E} \leq 1 \quad (2)$$

Die Kosten für eine Maßnahme im Kalkulationszeitraum (ΔK_K) dürfen hiernach die erwartete zusätzliche Gesamtleistung, die sich aus der Leistungsveränderung im Kalkulationszeitraum (ΔL_K) sowie derjenigen im Erwartungszeitraum (ΔL_E) ergibt, nicht übersteigen. Durch die Folgekosten wird der Nenner im Quotienten größer. Aus diesem Grunde ergibt sich ein niedrigerer kritischer Schwellenwert und ein positiver Effekt auf die Ertragshöhe der Kulturpflanze (DROSSERT-STELTGES UND STEFFEN, 1994, S. 236).

WÜSTEN ET AL. (1981, S. 476f.) sowie THOER, (1986, S. 12) weisen darauf hin, dass die Berechnung der ökonomischen Schadschwelle ausschließlich als Instrument der ex-post-Analyse konzipiert ist: Zum Erntezeitpunkt wird ein Schwellenwert errechnet, der anzeigen soll, ob die zum davor liegenden Bekämpfungszeitpunkt getroffene Entscheidung für eine Bekämpfung zutreffend war oder ob die Handlungsalternative „Nichtbekämpfen“ einen optimalen Zielbeitrag hervorgerufen hätte (THOER, 1986, S. 12). Damit ist dieses Konzept für eine entscheidungsorientierte Betrachtung des Problems nicht geeignet und leistet lediglich einen Erklärungsbeitrag (WÜSTEN ET AL., 1981, S. 477). Die Autoren stellen alternativ das Konzept der Bekämpfungsschwelle (englisch: „action threshold“) in den Vordergrund, da dieses Kriterium der Situation des Anwenders zum aktuellen Entscheidungszeitpunkt entspricht. Die Bekämpfungsschwelle bezeichnet die Schaderregerdichte, bei der eine Bekämpfung bei Erstreben der optimalen einzelkostenfreien Leistung je Hektar eingeleitet werden sollte. Liegt die Schaderregerpopulation zum potentiellen Bekämpfungszeitpunkt unterhalb der Bekämpfungsschwelle, so sollte eine Bekämpfungsmaßnahme unterbleiben. Übersteigt die Schaderregerdichte die

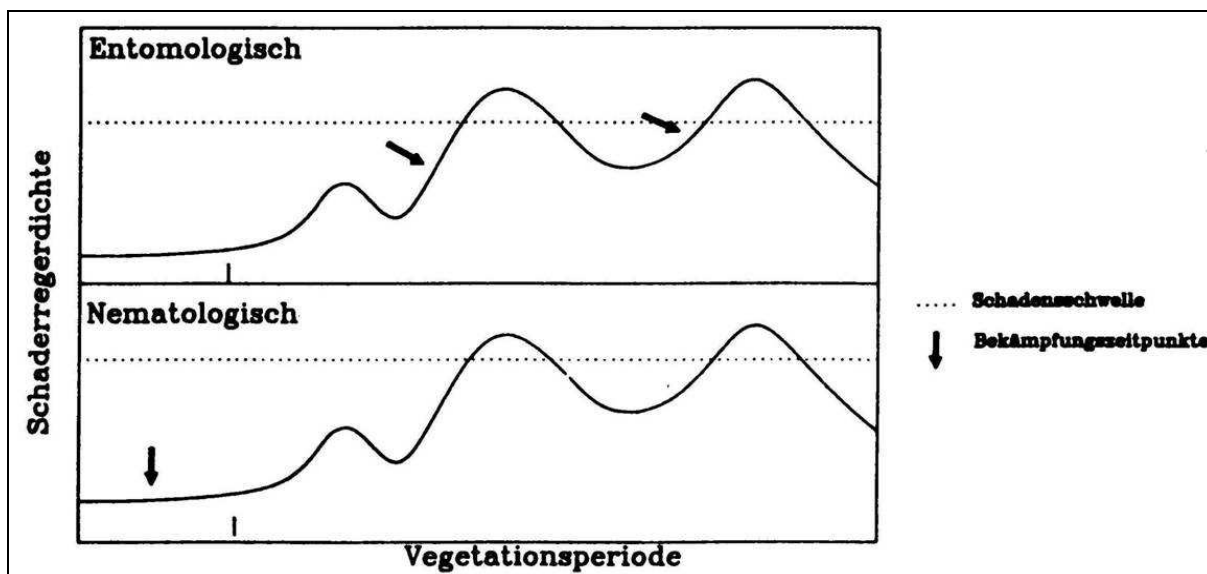
Bekämpfungsschwelle, so wird in jedem Fall eine Bekämpfung für notwendig erachtet, da die Verhinderung der zu erwartenden Leistungseinbußen höher anzusetzen sind als die Kosten, die mit der Bekämpfungsmaßnahme in direktem oder indirektem Zusammenhang stehen. Die Ermittlung der Ertragsdifferenz zwischen der behandelten und der unbehandelten Variante beruht auf einer Prognose, die als Ergebnis den Erwartungswert für jede Bekämpfungsalternative aufweist (THOER, 1986, S. 12).

3.1.2 Befallserhebungen im Rahmen des INM

Das Bekämpfungsschwellenkonzept kann nur dann zum Einsatz kommen, wenn die aktuelle Befallssituation bekannt ist. Daher sind Befallserhebungen, das biologische Monitoring, unerlässlich im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements (vgl. MCSORLEY ET AL., 1982, S. 153; BEHRINGER UND FÜRST, 1985a, S. 21; BIRD, 1987, S. 116; BEHRINGER, 1990, S. 282 sowie MÜLLER, 1990, S. 567) und eine Betrachtung der Beprobungsmethoden angebracht, zumal die Zustandsbeobachtbarkeit des Systems einen entscheidenden Einfluss auf den Planungsansatz im Rahmen des INM hat (siehe Kapitel 6.2.5).

MCSORLEY ET AL. (1982, S. 153f., siehe Abbildung 11) weisen darauf hin, dass es bezüglich der Befallserhebungen im Rahmen des Schädlingsmanagements einen entscheidenden Unterschied gibt zwischen Schadinsekten und Schadnematoden. Während der Vegetationsperiode kann die Population eines phytophagen Insekts mehrmals über die ökonomische Schadschwelle steigen. Diese Anstiege können allerdings durch häufige Feldüberwachungen festgestellt und Gegenmaßnahmen, wie z.B. der Einsatz von Insektiziden, eingeleitet werden. Die Feldüberwachung geht weiter und Gegenmaßnahmen können wiederholt angewendet werden (mehrstufige Entscheidung, vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 281). In nematologischen Systemen können übliche Gegenmaßnahmen nur vor Aussaat der Wirtskulturpflanze durchgeführt werden. Daher gibt es i.d.R. nur einen Eingriffszeitpunkt (einstufige Entscheidung). Befallserhebungen nach Aussaat der Frucht sind in der Praxis erst wieder nach der Ernte möglich (s.u.) und können sinnvoll sein für Kontrollstrategien für zukünftige Früchte, sind aber für die aktuell angebaute Frucht nicht mehr relevant.

Abbildung 11: Unterschiede beim Schädlingsmanagement



Quelle: MCSORLEY ET AL., 1982, S. 153, verändert

Neben der (durchschnittlichen) Besatzdichte umfasst eine möglichst genaue Kenntnis des Nematodenbesatzes nach Möglichkeit auch die Verteilung auf der Fläche. Zystenbildende Nematoden der Gattung *Heterodera* weisen zu vernachlässigende aktive Migrationsbewegungen auf, von vertikaler Migration im Boden abgesehen. Die Nematodenverbreitung in der Fläche erfolgt nur passiv und in sehr geringem Maße z.B. durch Wind- und Wassererosion und durch Verschleppung über Erntemaschinen zwischen einzelnen Schlägen, hauptsächlich aber innerhalb eines Schlages in Bearbeitungsrichtung (vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 24). In der Regel liegen daher inhomogene Verteilungen (Befallsnester, siehe Anhang 1) vor. Diese kann man zu bestimmten Zeiten sehr deutlich anhand „schlafender“ Rübenblätter erkennen. Die Verteilung des Nematoden im Boden ist wichtig für die Abschätzung des zu erwartenden Schadens. Je stärker der Nematode im Feld aggregiert ist, d.h. die Verteilung des Nematoden im Boden von der Gleichverteilung abweicht, desto stärker wird typischerweise der Ertragsverlust überschätzt (vgl. SEINHORST, 1973, S. 421ff. sowie DUNCAN UND NOLING, 1998, S. 259). Viele Studien haben gezeigt, dass die Verteilungen von Nematodenpopulationen in einem Feld der negativen Binomialverteilung entsprechen (MÜLLER, 1983b, S. 152; siehe auch BARKER UND CAMPBELL, 1981, S. 457).

Im Folgenden werden die im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements zur Verfügung stehenden Beprobungsmöglichkeiten vorgestellt. Anhang 2 gibt eine Übersicht über die Einsatzzeitpunkte dieser Befallserhebungen in einer dreijährigen Fruchtfolge.

3.1.2.1 Bodenproben

Klassischerweise erfolgt eine Beprobung der gesamten Fläche mittels Bodenproben, was eine relativ sichere Aussage über den Nematodenbesatz im Feld ermöglicht. Zu beachten ist, dass zum Zeitpunkt der Bodenprobenahme keine Wirtspflanze des Nematoden auf dem Acker Schlag angebaut sein darf. Die Beprobung kann im Jahr vor dem Zuckerrübenanbau durchgeführt werden und so den aktuellen Nematodenbesatz (Ermittlung des P_i -Wertes) gut abbilden. Damit Nematodennester sicher erfasst werden, muss jedoch eine hohe Zahl von Einzeleinstitichen (mindestens 100, besser 200 je ha, vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 23f.) vorgenommen

werden. Der daraus resultierende hohe Arbeitsbedarf und die hohen Beprobungskosten (bis zu 128 Euro/ha nach MÜLLER, 1990, S. 564) verhindern in der Praxis jedoch oft die exakte Befallserhebung. Eine weitere Möglichkeit ist, Bodenproben gezielt aus Befallsnestern nach der Zuckerrübenenernte zu entnehmen (Ermittlung des P_f -Wertes), um die Nematodenbelastung zu quantifizieren. Diese Methode spiegelt jedoch nicht mehr den Durchschnittswert der Nematoden auf einer Fläche wieder.

MÜLLER (1983b) untersuchte die Größenordnung des Fehlers, der bei der Bestimmung der Populationsdichte von *H.schachtii* auftritt und verdeutlichte dadurch die Aussagekraft von Bodenuntersuchungsergebnissen. Die Varianz der Untersuchungsergebnisse wird zum größten Teil durch die biologisch bedingten starken Schwankungen des Zysteninhalts und die unterschiedliche Verteilung der Zysten im Feld verursacht. Um im Hinblick auf den untersuchten Zysteninhalt repräsentative Stichproben zu untersuchen, sollten Bodenmengen von 2,5-3 kg, in Einzelfällen sogar bis 10 kg, extrahiert werden. Da das selbst bei wissenschaftlichen Untersuchungen aus Arbeits- und Kostengründen nicht immer möglich ist, sind ermittelte Eier- und Larvenzahlen pro Bodeneinheit immer auch zufälligen Schwankungen unterworfen. Dies sollte bei der Interpretation von Versuchsergebnissen stets berücksichtigt werden (ebd., S. 154). Werden von einer Bodenprobe von 5kg Teilproben von je 1kg untersucht, so zeigte sich im Bereich der Schadschwelle von 500 Eier und Larven, dass Böden mit weniger als 325 Eier und Larven als sicher unterhalb, und solche mit mehr als 825 Eier und Larven oberhalb der Schadschwelle eingeordnet werden konnten bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% (vgl. MÜLLER, 1990, S. 568).

3.1.2.2 Infrarotluftbilder

Infrarotluftbild-Aufnahmen (siehe Anhang 1) ermöglichen eine schnelle, sichere und preiswerte Erfassung von Unterschieden auf einzelnen Schlägen. Die Übersichtlichkeit wird dabei von keiner anderen Untersuchungsmethode erreicht. Diese Technik wird im Rheinland schon seit vielen Jahren eingesetzt. Im Jahr 1999 wurde erstmalig das gesamte Rheinland ganzflächig beflogen, wodurch es zu einer erheblichen Kostenreduktion kam (vgl. KOCHS, 2000a, S. 698). Rübenanbauer innerhalb dieser Region erhalten heute Bildausschnitte mit den gewünschten Flächen zum Preis von 1,55 Euro je Hektar betrieblicher Ackerfläche (LIZ, 2004b). Aufgrund der langjährigen Erfahrung mit Infrarotluftbildern im Rheinland ist eine Analyse der Ursachen für Nesterbildung (Nematoden, Bodenunterschiede, Krankheiten etc., siehe Anhang 1) möglich. Es fehlt jedoch die Information über die Dichte des Nematodenbesatzes, die aus den Infrarot-Luftbildern noch nicht exakt abzuleiten ist, da der Vegetationszustand der Zuckerrübenkultur nur bedingt Hinweise auf die Abundanzdynamik des Nematoden für den Zeitraum bis zur nächsten Rübenkultur zulässt. Aus dem Luftbild lässt sich daher bisher nur ableiten, dass der Rübennematode auf dem Feld vorhanden und somit ein Ertragsverlust möglich ist (vgl. MÜLLER, 1990, S. 567). Für genauere Bestimmungen bedarf es noch der klassischen Bodenprobe mit anschließender Auszählung. Die mangelnde Repräsentanz der Probenahme hat jedoch häufig Probleme bereitet. Im Zusammenhang mit vorliegenden Infrarot-Luftbildern wird die Stichprobe zwar deutlich besser, der Aufwand der Beprobung mit mindestens 50 Einstichen je 0,5 ha ist jedoch nach wie vor erheblich (KOCHS, 2000a, S. 699). Den Makel der fehlenden Quantifizierung der Populationsdichte versuchen Wissenschaftler an der Universität Bonn durch Nutzung von Fernerkundungstechniken zu beseitigen. Auch Möglichkeiten zur Prognose der Populationsdynamik des Nematoden aus Luftbildern wird

untersucht. Einen Überblick über den Forschungsstand geben SPICKERMANN (2003), SCHMITZ ET AL. (2003), SPICKERMANN UND PLÜMER (2004) sowie SCHMITZ (in Vorbereitung).

3.1.2.3 Erdschwadbeprobung

Um den Arbeitsaufwand und die Kosten gegenüber der flächigen Bodenbeprobung einzusparen, ist die so genannte Erdschwadbeprobung eine mögliche Alternative, den Nematodenbesatz einer Fläche (P_f -Wert) festzustellen. Da im Rheinland die geernteten Zuckerrüben verstärkt am Feldrand zwischengelagert und später über selbstfahrende Reinigungs- und Überlademaschinen („Reinigungsmäuse“) abtransportiert werden, verbleibt nach der Abreinigung der Rüben ein Erdschwad zurück. Dieses Erdschwad stellt eine homogene Mischprobe der entsprechenden Anbaufläche dar. In dieser ist aufgrund zahlreicher Literaturangaben davon auszugehen, dass die Zysten von *H.schachtii* in Poisson-Verteilung vorliegen. Es gilt dann, dass die aus einer Serie von Einzelproben errechnete Varianz etwa in der Größenordnung des Mittelwertes liegt und daher geringer ist als bei Feldproben (MÜLLER, 1983a, S. 133).

1997 wurde erstmalig die Beprobung der abgereinigten Rübenerde am Feldrand näher untersucht. Wegen der Konzentration der Zysten in der abgereinigten Rhizosphärenerde muss eine Umrechnung auf den Feldbesatz vorgenommen werden. Der Umrechnungsfaktor ist z.B. wegen des unterschiedlichen Erdanteils jährlich an Schwad-Feld-Vergleichen in jeder Region auf mehreren Referenzflächen zu ermitteln. Anhand dieser Werte kann dann das Ergebnis der Schwadprobe auf den durchschnittlichen Nematodenbesatz der jeweiligen Fläche berechnet werden. Aus den vorliegenden Erfahrungen der letzten Jahre kann entsprechend der Jahreswitterung sowie der Erntebedingungen zwischen dem Nematodenbesatz im Reinigungsschwad und auf dem Feld ein festes Verhältnis ermittelt werden. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass ausgehend von der Schwadbeprobung mit hoher Genauigkeit auf den jeweiligen Feldbesatz mit Nematoden geschlossen werden kann (SCHLANG, 2000a, S. 229). In einem zweiten Schritt wird der natürliche Populationsabbau der Nematoden über die Fruchtfolge bis zu den folgenden Zuckerrüben und damit deren Anfangsbefall (P_i -Wert) prognostiziert (siehe Kapitel 4.3.2.2). Anhand dieses Ergebnisses entscheidet der Landwirt über die Einleitung entsprechender Gegenmaßnahmen.

Wesentlicher Vorteil der 1999 im Rheinland in die Praxis eingeführten Schwadbeprobung, neben der repräsentativen Messung des P_f -Wertes, den geringen Kosten von rd. 17, maximal 29 Euro je Probe (vgl. LIZ, 2003a) und dem geringen Arbeitsaufwand, ist der Informationsvorsprung. Dank der Schwadbeprobung stehen dem Landwirt je nach geplanter Fruchtfolge zwei, drei oder mehr Jahre bis zum nächsten geplanten Zuckerrübenanbau für das Nematodenmanagement zur Verfügung. Als Nachteile sind zu nennen der Einfluss der Lagerdauer der Feldmiete auf das Schwadbeprobungsergebnis⁷, die von vielen Einflussfaktoren abhängigen und lediglich gewogene Mittelwerte darstellenden Umrechnungsfaktoren (SCHLANG, 2004, mündl.), die ebenso nicht sichere Prognose des P_i -Wertes zum nächsten Zuckerrübenanbau z.B. für die Schadensprognose und die fehlenden Informationen über die Befallsverteilung sowie die Schwankungsbreite des Befalls im Feld.

⁷ Je länger diese liegt, desto eher stellt sich ein „Kompostmilieu“ ein, in dem durch beschleunigtes Absterben der Nematoden das Ergebnis verfälscht wird (SCHLANG, 2004b, mündl.).

Die Resonanz auf die Befallserhebung mittels Schwadbeprobung ist groß im Rheinland und erreichte mit 734 eingereichten Proben im Jahr 2003 ihren bisherigen Höhepunkt. Die Anzahl von Proben aus klassischer Feldbeprobung lag bisher immer um 200 Stück im Jahr und hat sich auch durch den Einstieg in die Schwadbeprobung nicht verändert. Durch die Schwadproben werden demnach vor allem neue Betriebe erreicht, die sich bisher nicht um Nematoden gekümmert haben (HEINRICHS, 2004b, mündl.).

3.2 Managementmaßnahmen im Rahmen des INM

Als Grundstrategien im Rahmen des INM nennen BARKER UND KOENNING (1998, S. 171):

1. Ausschluss bzw. Vermeidung von Befall (Quarantäne),
2. Reduktion des Ausgangsbefalls,
3. Unterdrückung der Vermehrung und
4. Vermeidung von Ertragsdepressionen.

Am gleichen Ort stellen die Autoren auch eine Übersicht der zu den einzelnen Strategien gehörenden Taktiken (Einzelmaßnahmen) vor und bewerten deren Effizienz. Die dort aufgeführten Maßnahmen sind nicht auf alle phytoparasitären Nematoden gleichermaßen anwendbar. DUNCAN UND NOLING (1998, S. 277) geben einen Überblick über die Verfügbarkeit von Taktiken des INM bei verschiedenen Nematoden (Abbildung 12). Die Tatsache, dass weder Zuckerrüben noch *H.schachtii* in dieser Abbildung aufgeführt sind, ist darauf zurückzuführen, dass in den USA andere Früchte und andere Schadnematoden den Schwerpunkt bilden.

Abbildung 12: Managementtaktiken je nach Kulturpflanze und Nematodenspezies

Crop nematode	IPM decisions			IPM tactics								
	Damage/ function	Cropping system models	Crop rotation	Resistant varieties	Tolerant varieties	Planting date	Maturity group	Crop destruction	Certified plant material	Chemical	Stress avoidance	
	<u>Soybean</u>											
<i>Heterodera glycines</i>	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
<i>Hoplotaimus columbus</i>	X	X	X		X	X	X		X	X	X	
<i>Meloidogyne</i> spp.	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
	<u>Cotton</u>											
<i>Rotylenchulus reniformis</i>	X		X					X		X	X	
<i>H. columbus</i>	X	X	X		X			X		X	X	
<i>Belonolaimus longicaudatus</i>	X		X					X		X	X	
<i>M. incognita</i>	X		X	X				X		X	X	
	<u>Peanut</u>											
<i>M. arenaria</i>	X		X							X	X	
	<u>Tomato</u>											
<i>Meloidogyne</i> spp.	X		X	X	X		X	X	X	X	X	
	<u>Potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.)</u>											
<i>Globodera</i> spp.	X	X	X	X	X		X		X	X	X	
<i>M. hapla</i>	X		X			X	X	X	X	X	X	
<i>Pratylenchus penetrans</i>	X		X		X		X		X	X	X	
<i>M. chitwoodi</i>	X		X				X		X	X	X	
	<u>Tobacco (<i>Nicotiana tabacum</i> L.)</u>											
<i>M. javanica</i>	X		X	X				X	X	X	X	
<i>M. incognita</i>	X		X	X				X	X	X	X	
<i>M. arenaria</i>	X		X	X				X	X	X	X	

Quelle: DUNCAN UND NOLING, 1998, S. 277

Wie Abbildung 12 zeigt, ist der Einsatz chemischer Nematizide im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements eine zulässige Maßnahme (vgl. MÜLLER, 1986, S. 235f.; DUNCAN UND NOLING, 1998, S. 277 sowie BARKER UND KOENNING, 1998, S. 171), wie der Einsatz von Herbiziden, Fungiziden oder Insektiziden im Integrierten Pflanzenschutz. Mit den bisher verfügbaren Nematiziden ist die Bekämpfung des Nematoden allerdings ohnehin weder umwelt-schonend, noch entspricht ihr Einsatz dem Grundgedanken der Nachhaltigkeit. Sie sind sehr giftig für den Anwender und weisen eine hohe Persistenz im Boden auf, so dass ihr Einsatz mit der Gefahr der Grundwasserkontamination verbunden ist. Auch dienen sie lediglich der Ertragssicherung, indem sie die freien L2-Larven im Boden immobilisieren, nicht aber der Reduktion der Nematodenpopulation, die sich nach Abklingen der Nematizidwirkung weiter vermehren kann (vgl. SCHMIDT, 1992, S. 72 und MÜLLER, 1996, S. 154). In Deutschland sind seit 1991 keine Nematizide im Zuckerrübenanbau mehr zugelassen (BELL, 1997, S. 16) und stehen damit auch im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements nicht mehr zur Verfügung⁸. Die biologische Nematodenbekämpfung mit resistenten Wirtspflanzen ist daher zurzeit die einzige Form der aktiven Bekämpfung des Rübenzystemnematoden.

In den folgenden Abschnitten werden die für das Management des Rübenzystemnematoden relevanten Einzelmaßnahmen sowie ihr nematologischer, ackerbaulicher und ökonomischer Kontext vorgestellt. Die zur Verfügung stehenden Bekämpfungsmöglichkeiten sind Teil der strategischen, taktischen oder operationalen Betriebsplanung (vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 262ff. und ALIO, 1993, S. 27ff.). Strategische Betriebsplanung umfasst u.a. die Betriebsgröße (z.B. Pacht oder Kauf von Land) und die langfristige Betriebsorganisation, zu der auch die Fruchtfolgeplanung gehört (vgl. POHLMANN, 1993, S. 24 und SMIT, 1996, S. 25f.), während die jährliche Anbauplanung in den Bereich der taktischen Planung fällt (vgl. POHLMANN, 1993, S. 24 und SMIT, 1996, S. 25). Sortenwahl und die Entscheidung über Saat- und Erntetermin sind Bestandteile der operativen Planung (SMIT, 1996, S. 25).

3.2.1 Anbaumanagement anfälliger Wirtspflanzen

Diese passive Bekämpfungsstrategie umfasst den Verzicht auf den Anbau von Kulturpflanzen, die *H.schachtii* als Wirtspflanzen dienen, die Variation des Aussaat- und Erntetermins der Wirtspflanzen und damit deren Vegetationslänge, sowie die Vermeidung des Wachstums von Unkräutern, die *H.schachtii* als Wirtspflanzen dienen.

3.2.1.1 Anbauumfang der Zuckerrüben

Der Anbau der Zuckerrüben ist in Deutschland an die europäische Zuckermarktordnung gebunden und erfolgt auf den landwirtschaftlichen Betrieben im Rahmen des ihnen zur Verfügung stehenden Lieferrechts. Wie in Kapitel 4.5.2.1 gezeigt wird, ist es nicht nur aus nematologischer, sondern auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll, den Zuckerrübenanbau und damit den Anteil der Zuckerrübe an der Fruchtfolge auf das notwendige Maß zur Erfüllung der Lieferrechte zu beschränken. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, durch Nutzung des individuellen Vortrags eines Teils der Rüben, die über das Lieferrecht hinaus produziert wurden, auf das folgende Jahr, das verfügbare Lieferrecht und damit den Zuckerrübenanbau einzu-

⁸ Das Nematizid Nemathorin 10 G[®] wurde im Mai 2004 zur Bekämpfung von Kartoffelnematoden in Deutschland zugelassen und steht ab der Saison 2005 zur Verfügung. Zulassungserweiterungen [...] werden angestrebt, auch erste Versuche in Zuckerrüben wurden durchgeführt (FRENKING, 2005).

schränken. Dieser Reduktionseffekt wird ad absurdum geführt, wenn aufgrund der rationalen Erwartung, Rüben vortragen zu können, der Zuckerrübenanbau zuvor um die vortragbare Rübenmenge ausgedehnt wurde, der Rübenvortrag also fester Bestandteil der Anbauplanung ist.

Eine weitergehende Reduktion des Anbaus aus nematologischen Gründen ist mit dem Risiko verbunden, nicht die für die Erfüllung des Lieferrechts notwendige Rübenmenge zu ernten. Die folgende Übersicht 1 zeigt die nicht unerheblichen notwendigen Mehrerträge je ha Zuckerrübenfläche, die notwendig sind, um bei einer Reduktion der Anbaufläche weiterhin die gleiche Erntemenge und damit den gleichen Grad der Lieferrechtserfüllung zu erreichen. Mit der Reduktion des Zuckerrübenanteils in der Fruchtfolge erreichbare Ertragssteigerungen werden in Kapitel 3.2.2.2 dargestellt.

Übersicht 1: Notwendige Mehrerträge bei Reduktion des Anbauumfangs

<u>Bisheriger Anbauanteil</u>	<u>Neuer Anbauanteil</u>	<u>Reduktion der Anbaufläche</u>	<u>Notwendiger Mehrertrag je ha</u>
50%	33,33%	-33,33%	+50%
33,33%	25%	-25%	+33,33%
25%	20%	-20%	+25%

Quelle: Eigene Berechnungen;

Ein im Rahmen des INM entweder gezielt vor- oder in Kauf genommenes Nichterfüllen des betrieblichen Lieferrechts dürfte abgesehen von ökonomischen Einbußen ohne einzelbetriebliche Folgen sein, solange es lediglich temporär und nicht wiederholt auftritt⁹. Insbesondere risikoaverse Landwirte werden allerdings den Anbauumfang der Zuckerrüben wegen oder trotz der zum Zeitpunkt der Anbauentscheidung nur schwer zu prognostizierenden Rübenerträge eher zu groß als zu klein einplanen. Dies zeigt auch die kontinuierliche Überlieferung der Betriebe des Arbeitskreises für Betriebsführung Köln-Aachener Bucht (AK 1) der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (siehe Übersicht 26 in Kapitel 6.2.3.3).

Eine weitergehende Maßnahme zur Reduktion des Zuckerrübenbaus zwecks Sanierung befällener Flächen wäre die (temporäre) Verpachtung eines Teils des Lieferrechts. Dies ist im Rheinland aufgrund der Handhabung der Lieferrechtsvergabe seitens des Kölner Zuckerunternehmens Pfeifer & Langen KG, Lieferrechtsverkehr nur gekoppelt mit Flächenverkehr (Pacht, Kauf) zuzulassen, offiziell nicht möglich. Auch Zupacht oder -kauf von möglichst unbelasteten Ackerflächen ohne Rübenlieferrecht zur Verringerung des Anbauanteils der Zuckerrübe dürfte zumindest im Kerngebiet des rheinischen Rübenanbaus nicht ohne weiteres im notwendigen Umfang möglich sein. Zur Verringerung des relativen Anbauumfangs der Zuckerrübe von 50% auf ein Drittel der Ackerfläche müsste die betriebliche Ackerfläche bei

⁹ Bei einer mancherorts praktizierten revolvierenden Quotenanpassung besteht grundsätzlich die Gefahr der Lieferrechtskürzung bei wiederholter bzw. anhaltender Nichterfüllung (vgl. ISERMEYER, 1987, S. 50 und SMIT, 1996, S. 162). Gezielte Überlieferungen können teilweise auch stattfinden, um sich im Falle einer Umverteilung neue Quoten verdienen zu können (ISERMEYER, 1987, S. 50), was aber angesichts der anstehenden Reform der Zuckermarkordnung mittlerweile auszuschließen ist.

gleichem absoluten Anbauumfang und konstanten Ernteerträgen analog zu den in Übersicht 1 dargestellten Ergebnissen um 50% ausgedehnt werden, bei einer Reduktion des Anbauanteils von einem Drittel auf ein Viertel um 33% und bei einer Reduktion von 25% auf 20% immerhin noch um 25%.

Betriebe mit einer schweren und verbreiteten Nematodenverseuchung geraten ohne ein funktionierendes Nematodenmanagement in einen Teufelskreis mit multiplen Fruchtfolgeproblemen: Aufgrund nematodenbedingter Ertragsdepressionen vergrößern diese Betriebe den Anbauumfang der Zuckerrübe und erhöhen damit den Anteil an Zuckerrüben in der Fruchtfolge, um das betriebliche Lieferrecht zu erfüllen. Dadurch verschärft sich die Nematodenproblematik weiter, die Ertragsdepressionen nehmen auch infolge anderer Fruchtfolgekrankheiten der Zuckerrübe zu, ebenso wie der Zwang, die Anbaufläche der Zuckerrüben weiter auszudehnen. KÖCKLER (1997, S. 58) bezeichnet dies als den Ertrags- und Flächeneffekt des Nematodenbefalls.

Die Frage des Lieferrechtsmanagements und damit verbunden des optimalen Anbauumfangs der Zuckerrübe ist in erster Linie ein dynamisches ökonomisches Optimierungsproblem nicht nur mit nematologischen Nebenbedingungen, das im Rahmen der Modellbildung berücksichtigt werden muss (siehe Kapitel 6.2.3).

3.2.1.2 Wahl des Aussaattermins der Zuckerrüben

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 dargestellt, steigen c.p. Schadensrisiko und -höhe, je später die Aussaat der Zuckerrüben im Frühjahr erfolgt. Eine frühe Saat stellt daher im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements eine Maßnahme der Minimierung der Ertragsdepressionen dar. Eine Maßnahme zur Nematodenbekämpfung ist eine frühe Saat allerdings nicht, ganz im Gegenteil: Eine Verlängerung der Vegetationszeit der Wirtspflanze Zuckerrübe im für die Entwicklung des Nematoden günstigen Frühjahr kann zu höheren P_f -Werten führen und damit die Abundanzdynamik in den folgenden Jahren beeinflussen (Carry-over-Effekt).

Neben dem rein nematologischen Aspekt sind acker- und pflanzenbauliche Aspekte des Saatzeitpunktes der Zuckerrüben zu berücksichtigen. Vorteil einer frühen Aussaat ist die damit verbundene längere Vegetationsdauer der Zuckerrüben, wodurch höhere Rübenenerträge möglich werden (ZENS, 2002, S. 31). Die Ausdehnung der Wachstumszeit durch die Vorverlegung der Saat wirkt sich günstiger aus als eine Verlängerung durch eine spätere Ernte. Des Weiteren wird das Wachstum der Zuckerrübe im Spätherbst oft durch stärkere Niederschläge oder Fröste sowie die in Hinblick auf die Aussaat der Folgefrucht rechtzeitig vorzunehmende Ernte begrenzt (vgl. ALIO, 1993, S. 117 und MÄRLÄNDER, 1991, S. 36ff). Gleichzeitig steigt aber die Wahrscheinlichkeit von Ertragsdepressionen durch Bestellung des Ackers in nicht garem, i.d.R. zu feuchtem, Zustand, so dass Schadverdichtungen sowie verzögertes und lückiges Auflaufen möglich sind. Auch steigt die Gefahr einer vermehrten Schosserbildung durch mögliche Kältereize bis hin zu frostbedingtem Umbruch der Kulturpflanze¹⁰ (vgl. ZENS, 2002, S. 31), wobei diese späten Umbruchsaaen wiederum sehr gefährdet sind durch den Befall mit *H.schachtii*. Das Stock- und Stängelälchen *Ditylenchus dipsaci* verhält sich dagegen genau umgekehrt, es verursacht um so mehr Schaden, je früher die Rüben gelegt werden, da es die

¹⁰ So kam es im Jahr 2003 aufgrund von Nachtfrösten im April zu Flächenumbrüchen im Rheinland. Nach Einschätzung des RRV erreicht die Umbruchfläche etwa 4.000 ha (STEUERWALD, 2003, mündl.). Von den im Frühjahr 2005 aufgetretenen Nachtfrösten blieb das Rheinland dagegen weitestgehend verschont.

kühl-feuchte Witterung, die i.d.R. bei Fröhsaaten herrscht, bevorzugt (vgl. SCHLANG, 2004, S. 110).

Zu welchem Zeitpunkt der Vorteil der längeren Vegetationsdauer größer ist als die zu erwartenden Nachteile, sorgt in der Praxis immer wieder für Diskussionen. Der optimale Saattermin für einen Standort ist abhängig von naturräumlichen sowie betriebs- und schlagspezifischen Parametern, daher weitgehend von der Umwelt vorgegeben und nur mäßig prognostizierbar. Auch die Risikoeinstellung des Anbauers spielt eine wichtige Rolle. Eine Aufnahme als fest einzuplanende Taktik im Rahmen des INM erscheint daher nicht sinnvoll, auch wenn die Fröhsaat von Zuckerrüben neben den erst jüngst in der Praxis verfügbaren nematodentoleranten Zuckerrübensorten (siehe Kapitel 2.3.2) die einzige Möglichkeit der Reduktion von Ertragsdepressionen bei gegebenem Befall ist.

3.2.1.3 Wahl des Erntetermins der Zuckerrüben

Die Zuckerrübenkampagne, also der Zeitraum, in dem die Zuckerfabriken Rüben verarbeiten, beginnt in der Regel in der zweiten Septemberhälfte und endet Ende Dezember. Je früher die Ernte der Wirtspflanze Zuckerrübe erfolgt, desto geringer ist die wirksame Temperatursumme, damit tendenziell die Zahl der unter dem Wirt gebildeten Generationen und damit der Endbefall. Bleibt die dritte Generation, die im Rheinland frühestens Ende September/Anfang Oktober abgeschlossen ist (SAATEN-UNION, 1991, S. 13), unvollendet, werden selten P_f -Werte oberhalb von 3.000 Eier und Larven, die Hälfte des sonst üblichen Endbefalls, erreicht (SCHLANG, 2001, mündl.). FICHTNER (1985, S. 37) rechnet in diesem Fall mit einer Endverseuchung von maximal 2.000-2.500 Eier und Larven in den mitteldeutschen Rübenanbaugebieten. Nach COENEN (1980, S. 76) sowie GARDNER UND CASWELL-CHEN (1997, S. 269) besteht dagegen die Gefahr, dass die Nematoden sich bei höheren Bodentemperaturen auch nach der Ernte der Zuckerrübe an Wurzelresten weiterentwickeln können.

Die geringere Endverseuchung beeinflusst die Abundanzdynamik des Nematoden in der weiteren Fruchtfolge, die Befall-Schadens-Relation im betrachteten Jahr wird dagegen kaum beeinflusst, auch wenn gezielte Untersuchungen bezüglich des Einflusses des Erntezeitpunktes auf den Schaden bisher fehlen (vgl. HEIJBOEK, 1996, S. 244). Nematodenbedingte Welkeerscheinungen des Blattapparates der Zuckerrübe können nach Mitte August im Allgemeinen nicht mehr beobachtet werden, wenn der Blattapparat nicht zu sehr geschädigt ist. Unter nordwesteuropäischen Bedingungen sind die Bodentemperaturbedingungen in der Zeit vor der Rübenernte für den Rübennematoden suboptimal, gleichzeitig nimmt das Evaporationsdefizit ab, so dass sich die Pflanzen erholen können, wenn der Erntezeitpunkt nicht zu früh ist (ebd.).

Neben den rein nematologischen Aspekten sind, ähnlich der Wahl des Aussaatzeitpunktes, acker- und pflanzenbauliche sowie ökonomische Aspekte bei der Wahl des Erntezeitpunktes zu berücksichtigen. Eine aus nematologischen Beweggründen vorgezogene Rübenernte ist mit Ertragsverlusten verbunden, wenn der Zeitpunkt der Zuckerrübenernte vor dem Vegetationsende bzw. vor der physiologischen Reife liegt, da der mögliche Ertrags- und Qualitätszuwachs bis zum Vegetationsende nicht realisiert werden kann (indirekte Ertragsverluste, vgl. WINNER, 1982, S. 126 sowie ZENS, 2002, S. 59ff.). Die Höhe der Zuwächse ist regional und von Jahr zu Jahr sehr verschieden, sinkt im Allgemeinen aber mit sich dem Ende zuneigender Vegetationsperiode. Da mit der Wahl des Erntezeitpunktes der erzielte Zuckerertrag beeinflusst wird, kann dieses Instrument in einem gewissen Rahmen auch zur optimalen Anpassung der Erntemenge an das betriebliche Lieferrecht genutzt werden (siehe Kapitel 6.2.3).

Zum Ausgleich der indirekten Ertragsverluste zahlt das Zuckerunternehmen eine nach Liefertermin degressiv gestaffelte Frühlieferprämie, ebenso wie eine progressiv gestaffelte Spätlieferprämie bei sehr späten Liefer- und damit Ernteterminen, mit der z.B. das höhere Witterungsrisiko für die Ernte der Zuckerrüben, die damit verbundene Gefahr für nachhaltige Schädigung des Bodens durch Verdichtung, und die ertragsrelevanten Verzögerungen bei der Bestellung der Folgefrucht (vgl. ZENS, 2002, S. 24f.), zumindest teilweise kompensiert werden sollen (siehe Kapitel 4.5.1.3).

Der Liefertermin für die Zuckerrüben ist i.d.R. eine Vorgabe der Zuckerfabriken als Folge deren logistischer Planung zur kontinuierlichen hohen Auslastung ihrer Anlagen und nur in geringem Umfang vom Landwirt selbst überhaupt beeinflussbar bzw. frei wählbar. Eng verbunden mit dem Liefertermin ist der Erntetermin der Zuckerrüben, da zu langes Liegen gerodeter Rüben in der Feldmiete die Lagerungsverluste erhöht (direkter Ertragsverlust, vgl. ZENS, 2002, S. 59 sowie SCHMITZ, 2003) und eine zu spät erfolgende Ernte die Gefahr erhöht, nicht die geforderte Menge bereitgestellt zu haben.

Die Auswahl des „optimalen“ Erntetermins bei gegebenem Abfuhrtermin ist demnach immer eine Entscheidung unter Unsicherheit. Die Risikoeinstellung des Anbauers spielt eine wichtige Rolle darin, wie das Risiko von zunehmenden Niederschlägen oder Frost, resultierend in einer Verschlechterung der Erntebedingungen bis hin zu Nichtbefahrbarkeit des Ackers, gewichtet wird. Risikoaverse Anbauer werden eher zu einem frühen Erntetermin tendieren, auf mögliche Ertragszuwächse verzichten, höhere Lagerungsverluste akzeptieren und eine frühere, risikogeminderte Aussaat der Folgefrucht vornehmen.

3.2.1.4 Anbau weiterer Wirtspflanzen in der Zuckerrübenfruchtfolge

Auch andere Kulturpflanzen wie Raps und einige Feldgemüse gehören als Kreuzblütler zum Kreis der Wirtspflanzen von *H.schachtii*. Stehen sie gemeinsam mit Zuckerrüben in der Fruchtfolge des Betriebs, potenziert sich die Nematodenproblematik. Gerade im Rheinland hat der Anbau von Feldgemüse (Spinat, Kohl) eine lange Tradition. Aufgrund der ab 2005 erweiterten Stilllegungsverpflichtung (siehe Kapitel 4.5.1.1) und der im Jahr 2006 anstehenden Reform der EU-Zuckermarktordnung (siehe Kapitel 7), in deren Rahmen der Zuckerrübenanbau seine herausragende ökonomische Stellung zu verlieren droht, überlegen viele Landwirte, Raps als alternative Blattfrucht vermehrt in die Fruchtfolge aufzunehmen. Die Südzucker AG setzt rigoros auf Vermeidung dieser Anbauproblematik, indem sie ihren Vertragsanbauern den Anbau von anderen Nematodenwirtspflanzen in der Fruchtfolge mit Zuckerrüben in den Branchenvereinbarungen für die Zuckerrübenlieferungen nicht gestattet (vgl. SÜDZUCKER, 1999, S. 3). Spätestens die Einführung homozygot nematodenresistenter Raps-hybriden wird zu einer Neubewertung des Anbausystems Raps-Zuckerrübe führen müssen.

3.2.1.5 Fangpflanzen-Methode

Ganz den gegenteiligen Weg ging Prof. Julius Kühn, der schon 1850 in der Magdeburger Börde ein Verfahren zur biologischen Nematodenbekämpfung entwickelte. Bei seiner „Fangpflanzen-Methode“ werden Kreuzblütler als Zwischenfrüchte angebaut, so dass die Nematoden zum Schlupf angeregt werden und ihnen prinzipiell die Möglichkeit geboten wird, den Lebenszyklus zu vollenden und sich stark zu vermehren. Ein rechtzeitiges Umbrechen der Zwischenfrucht vor Vollendung der ersten Generation führt dagegen zu einer Reduzierung der Population. Allerdings ist die Zeitspanne für das Einwandern der Larven in die Wurzel bis zur

erneuten Zystenbildung sehr stark von Temperatur und Witterung abhängig, so dass die Zwischenfrucht nicht in jedem Fall rechtzeitig vernichtet werden kann. Das führte in der Vergangenheit oft – statt zu der erhofften Nematodenverminderung – zu einer deutlichen Vermehrung (MÜLLER, 1985, S. 95). Daher und durch die Züchtung nematodenresistenter Kreuzblütler spielt der Fangpflanzenanbau heute in der Praxis keine Bedeutung mehr (vgl. KRAUS, 1981, S. 94 und MÜLLER, 1985, S. 95)¹¹.

3.2.1.6 Wirtsunkräuter

Der Kreis der Wirtspflanzen von *H.schachtii* umfasst nicht nur Kulturpflanzen, so dass er immer wieder auch auf Flächen nachzuweisen ist, auf denen über viele Jahre kein Ackerbau betrieben wurde (vgl. KWS, 2000, S. 26). Daher müsste im Rahmen des INM nicht nur die Interaktion zwischen Kulturpflanzen und dem Nematoden betrachtet werden, sondern auch die zwischen dem Nematoden und Ackerunkräutern. Durch das Auftreten der Wirtsunkräuter Hederich, Hirtentäschel, Ackerhellerkraut, Gemeine Melde, Weißer Gänsefuß oder Vogelmieze kann die Populationsdynamik des Nematoden in der Rotation nachhaltig beeinflusst werden (GEIBL, 1987, S. 180). In der Praxis dürfte dem Aspekt „Ackerunkräuter-*H.schachtii*“ allerdings nur dann eine Bedeutung zukommen, wenn die stark vermehrenden Unkrautarten in hohen Dichten auftreten (ebd., S. 182). Auf normal verunkrauteten Ackerflächen findet eine problematische Vermehrung des Nematoden nicht statt (KWS, 2000, S. 26), so dass dieser Aspekt der Abundanzdynamik nicht weiter Gegenstand der Betrachtung ist. Der interessierte Leser findet nähere Informationen zur Nematoden-Unkrauter-Interaktion bei KRAUS (1981), die den Einfluss der Applikation verschiedener Herbizide auf die Wirt-Parasit-Beziehungen bei *H.schachtii* untersuchte, und bei DOWE UND DECKER (1985) sowie BLOOM (1997).

3.2.2 Fruchtfolgemangement

3.2.2.1 Grundlagen

In der Pflanzenproduktion wird das Produktionsprogramm durch Anzahl und Flächenanteile der Früchte und ihre zeitliche Aufeinanderfolge, d.h. durch Anbauverhältnis und Fruchtfolge bestimmt (KUHLMANN, 1990, S. 40). BÄUMER (1990, S. 61) sieht in dem Anbauverhältnis die *räumliche*, und in der Fruchtfolge die *zeitliche* Dimension des Bodennutzungssystems, welches wiederum ein Subsystem des Agrarökosystems ist. STEFFEN UND BORN (1987, S. 47) definieren die Fruchtfolge als dynamisches System, da aufeinander folgende Fruchtarten als Fruchtfolge zu einem Anbausystem zusammengefasst werden, dessen Subsysteme dann die einzelnen Früchte sind. Als Inputgrößen des Anbausystems sind u.a. die verschiedenen Pflanzenarten sowie deren Anbauumfang anzusehen, weiterhin die Bodenbearbeitung, der Düngemittel- und der Pflanzenbehandlungsmiteleinsatz.

Der Zeitraum bis zum wiederkehrenden Anbau einer Fruchtart wird als eine Rotation oder ein Glied der Fruchtfolge bezeichnet. Je nach Länge der Rotation spricht man von einer zwei-, drei- oder vierjährigen Fruchtfolge. Eine Rotation bzw. ein Glied der aufgrund ihrer weiten Verbreitung im Rheinland so genannten „Rheinischen Fruchtfolge“ besteht aus der Dreijah-

¹¹ Der interessierte Leser sei an die Arbeit von HEINEN-DEBRUS (1985) verwiesen, in der der Fangpflanzenanbau genauer untersuchte.

resabfolge Zuckerrüben – Winterweizen – Wintergerste / Winterweizen und ist verbunden mit einer zweijährigen Anbaupause der Zuckerrüben.

3.2.2.2 Nematologische Aspekte unterschiedlicher Rotationslängen

Ziel der Fruchtfolgeplanung und -gestaltung im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements ist nicht nur die Reduktion des Schadnematodenbefalls zum nächsten Zuckerrübenanbau, sondern auch die Erhaltung eines Populationsniveaus von Antagonisten, Parasiten und Predatoren des Rübennematoden, um dessen Populationsentwicklung unter der Wirtspflanze zu regulieren (vgl. NUSBAUM UND FERRIS, 1973, S. 440). COOKE (1987, S. 142) weist darauf hin, dass bei *H.schachtii* die Rate der unter Nichtwirten spontan schlüpfenden Larven (vgl. Kapitel 2.2.3.3) mit bis zu 60% in einem Jahr sehr hoch ist z.B. im Vergleich zu den Kartoffelnematoden der Gattung *Globodera*, so dass Anbaupausen im Rahmen des passiven Managements von *H.schachtii* einen hohen Stellenwert haben. Die Verlängerung der Anbaupausen der Wirtspflanze Zuckerrübe, also die Ausweitung der Rotationslänge entweder durch Aufnahme weiterer oder wiederholtem Anbau bereits eingesetzter Nichtwirtspflanzen, verstärkt den natürliche Populationsrückgang des Nematoden erheblich.

In Deutschland führte BEHRINGER (1978, S. 4) den Begriff des „nematodenkontrollierten Rübenganbaus“ ein, der darunter zunächst nur die zeitweise Freistellung verseuchter Flächen vom Zuckerrübenanbau bei gleichzeitiger Erhöhung der Anbauhäufigkeit der Zuckerrübe auf den nematodenfreien Flächen des Betriebes verstand. Dieses Konzept, das gekennzeichnet ist durch genaue Bodenuntersuchungen im ganzen Betrieb und durch konsequente Ausrichtung der weiteren Fruchtfolgegestaltung nach den Bodenuntersuchungsergebnissen, wird nach Ansicht von BEHRINGER UND FÜRST (1985a, S. 21) der Forderung nach einer integrierten, sogar einer möglichst biologischen, Bekämpfung der Nematoden am besten gerecht. Die beschriebene Vorgehensweise ist allerdings nur dann möglich und wirtschaftlich ohne Folgen, wenn sich der diagnostizierte Nematodenbefall auf einzelne wenige Schläge eines Betriebes beschränkt. Mittlerweile ist die biologische Bekämpfbarkeit des Rübennematoden deutlich verbessert worden. Aber da es sich bei den zystenbildenden Nematoden um typische Fruchtfolgegeschädlinge handelt, bleibt einer Sanierungsmaßnahme der Dauererfolg versagt, wenn nicht fortan eine möglichst weit gestellte, artenreiche Fruchtfolge eingehalten wird (BEHRINGER, 1990, S. 282). Auch nach STONE ET AL. (1992, S. 60) sind sorgfältige Fruchtfolgegestaltung und Anbauplanung der erste Schritt zu jeder betrieblichen Lösung der ökologisch-ökonomischen Probleme, mit denen ein Landwirt konfrontiert ist. Falls dies alleine nicht ausreicht, das Planungsproblem zu lösen, führen sie aber wenigstens einen großen Schritt hin zur Lösung und stellen die Grundlage dar für andere Strategien im Rahmen des Integrierten Krankheits- und Schädlingsmanagements.

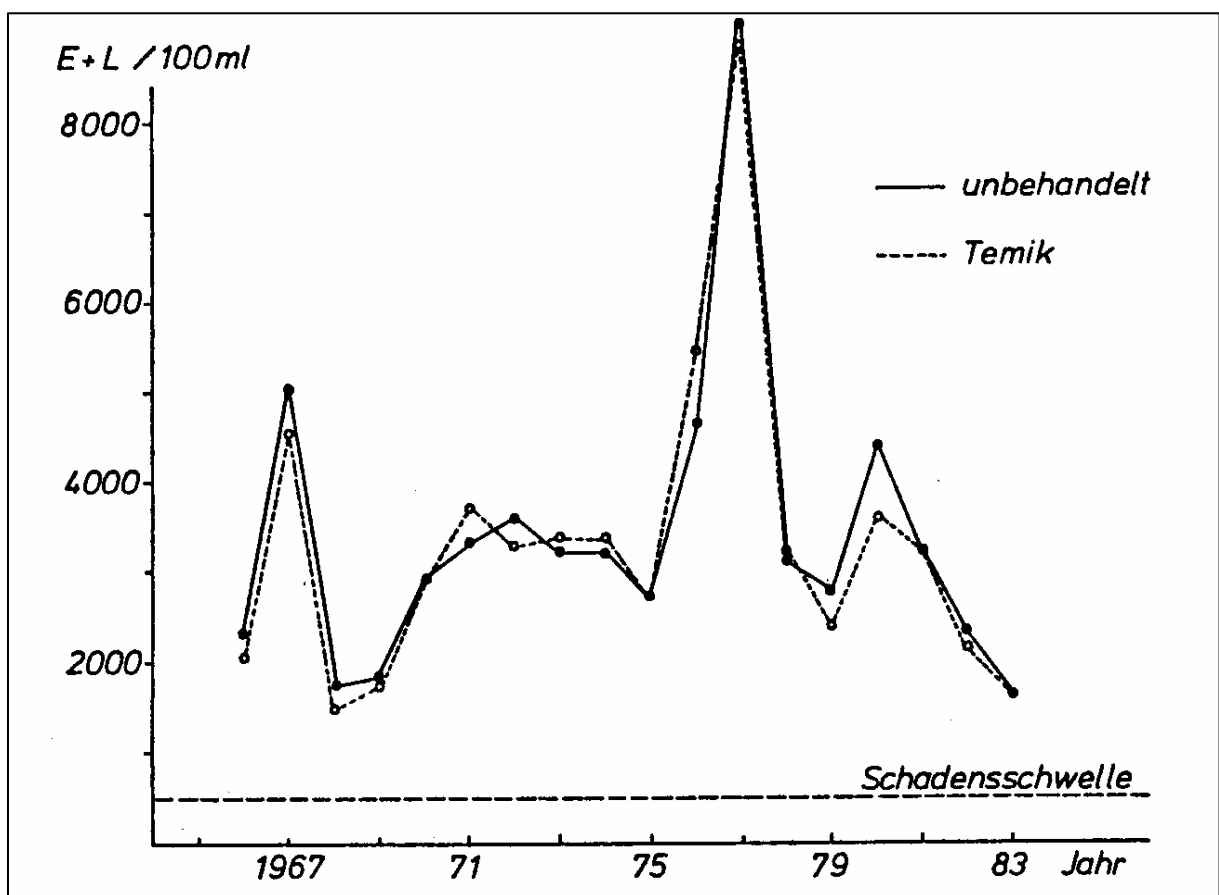
Im Rheinland, einem Gunstraum für den Anbau von Zuckerrüben, ist der Zuckerrübenanteil in der Fruchtfolge traditionell hoch (siehe Kapitel 2.1). Auswertungen von HEINRICHS (2004a) in der Kampagne 2003 ergaben, dass ca. 76% der Landwirte, die Angaben zur geplanten Anbaupause im Rahmen der Schwadbeprobung machten, eine dreijährige Fruchtfolge planen und je rd. 11% eine zwei- oder vierjährige. Gleichermäßen rigoros wie bei der Wahl der Früchte, die mit der Zuckerrübe in einer Fruchtfolge stehen dürfen (siehe Kapitel 3.2.1.2), verpflichtet die Südzucker AG ihre Vertragsanbauer in den Branchenvereinbarungen für die Zuckerrübenlieferungen, zur Gesunderhaltung der Böden Zuckerrüben frühestens in jedem dritten Jahr auf demselben Feldstück wieder anzubauen, d.h. eine dreijährige Fruchtfolge einzuhalten (vgl.

SÜDZUCKER, 1999, S. 3). Nach Ansicht von BEHRINGER (1990, S. 289) erscheint diese Art nichtstaatlicher Verpflichtungen zur Anbaubegrenzung durch die enge Kooperation zwischen Zuckerwirtschaft, Anbauverbänden und Erzeugern nahe liegend.

Ob eine zweijährige Anbaupause der Zuckerrübe ohne aktive Nematodenbekämpfung ausreichend ist und ob es eine in diesem Sinne ideale Anbaupause für Zuckerrüben gibt, ist Gegenstand der folgenden Betrachtungen.

Eine Zuckerrübenmonokultur ist nicht nur aus nematologischen Gründen abzulehnen. WINNER (1982, S. 75) spricht beim Anbau von Rüben nach Rüben von Kurzsichtigkeit in der Anbauplanung. Nach den Untersuchungen einer Zuckerrübenmonokultur von STEUDEL (1985, S. 120) lag in keinem der betrachteten 20 Versuchsjahren der Nematodenbefall zur Saat der Rübe auch nur in der Nähe der physiologischen Schadschwelle (Abbildung 13).

Abbildung 13: Ergebnisse des Monokulturdauerversuchs in Elsdorf/Rhld. (P₁-Werte)



Hinweis: „Temik“ ist die Handelsbezeichnung eines Nematizids

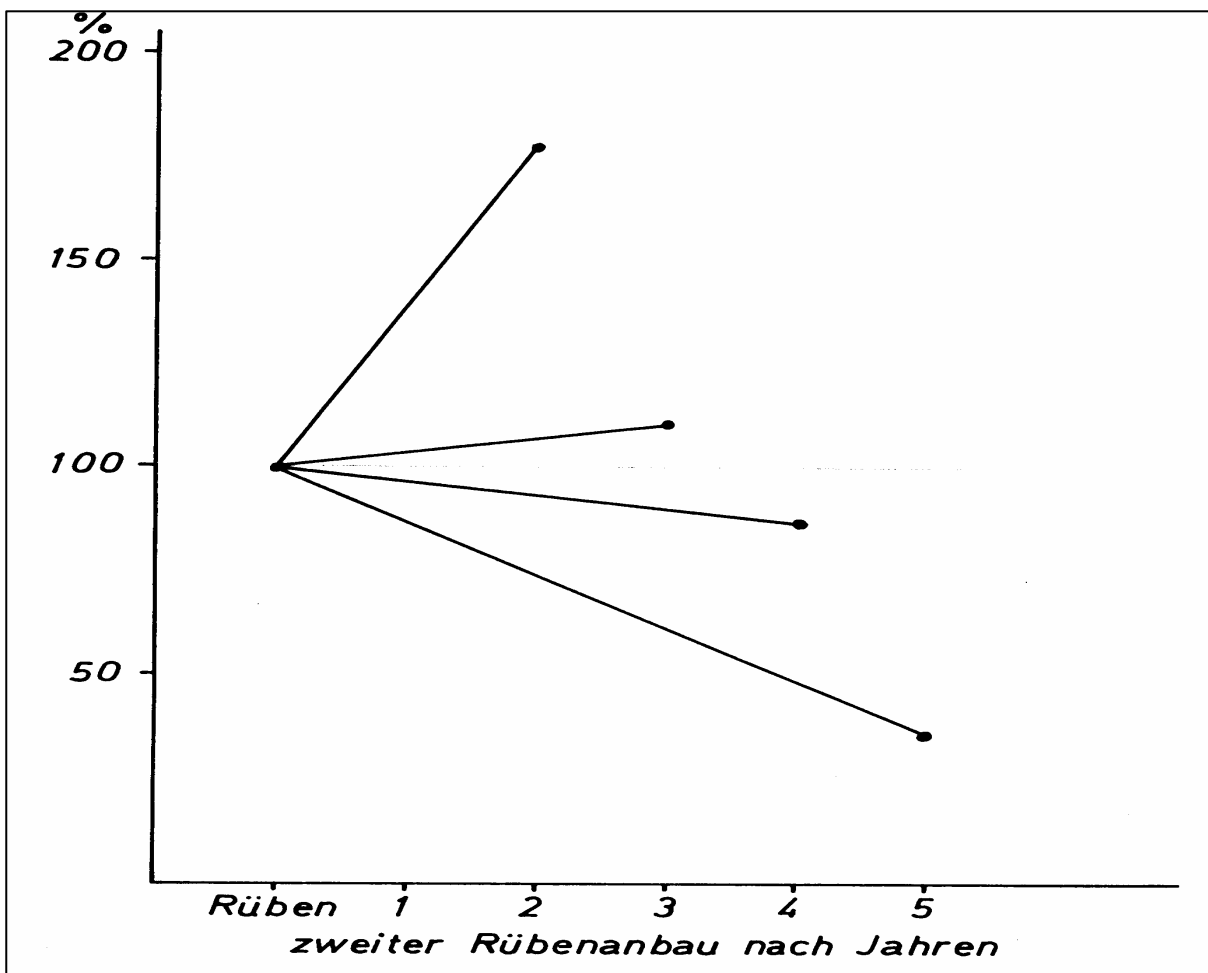
Quelle: STEUDEL, 1985, S. 120

Abbildung 13 zeigt mit einer Ausnahme aber auch, dass im Gegensatz zu Neulandflächen (siehe Kapitel 2.2.3.3) eine „Explosion“ der Nematodenpopulation auf normalen Ackerflächen, d.h. bei normalem Antagonistenvorkommen, selbst bei Wirtspflanzenmonokultur nicht zu erwarten ist. Vielmehr oszilliert der Vorsaat-Befall mehr oder weniger stark um den von THIELEMANN UND STEUDEL (1973, S. 147) auf 3.000 und von ARNDT (2002, S. 76) auf 2.500 Eier und Larven bezifferten Mittelwert. Solche typischen Befallsmittelwerte können für jede

Fruchtfolge ermittelt und in Anlehnung an die WVD *fruchtfolgespezifische* Verseuchungsdichte (FVD) genannt werden. Aufgrund der Interaktion mit den Gegenspielern sind JONES UND KEMPTON (1978, S. 348) der Ansicht, dass zystenbildende Nematoden nur wenig fluktuieren und dies teilweise sogar gedämpft, d.h. sich über die Jahre stabilisierend.

STEUDEL ET AL. (1981) untersuchten die Entwicklung der P_f -Werte der folgenden Rüben relativ zu den vorangegangenen Rüben in Abhängigkeit von der Anbaupause und kamen zu dem in Abbildung 14 dargestellten Ergebnis, dass eine zweijährige Rotation (sog. Fruchtwechsel) mit Sicherheit schon in kurzer Zeit zu einem schnellen Anstieg des Befalls¹² und entsprechenden Ertragsverlusten führt, eine fünfjährige dagegen zu einem deutlichen Rückgang der Populationsdichte (signifikante Ergebnisse). Die Befunde für die drei- und vierjährige Rotation passen zwar in ihrer Tendenz in dieses Muster, doch unterscheiden sich die Mittelwerte nach dem zweiten Anbau so wenig von denen des ersten, und die Befunde sind so wechselhaft, dass eine Entscheidung über eine Zunahme der Population bei beiden Rotationsvarianten selbst bei dieser 15jährigen Versuchszeit praktisch nicht möglich war (ebd., S. 54).

Abbildung 14: Relative Entwicklung des Endbefalls je nach Anbaupause

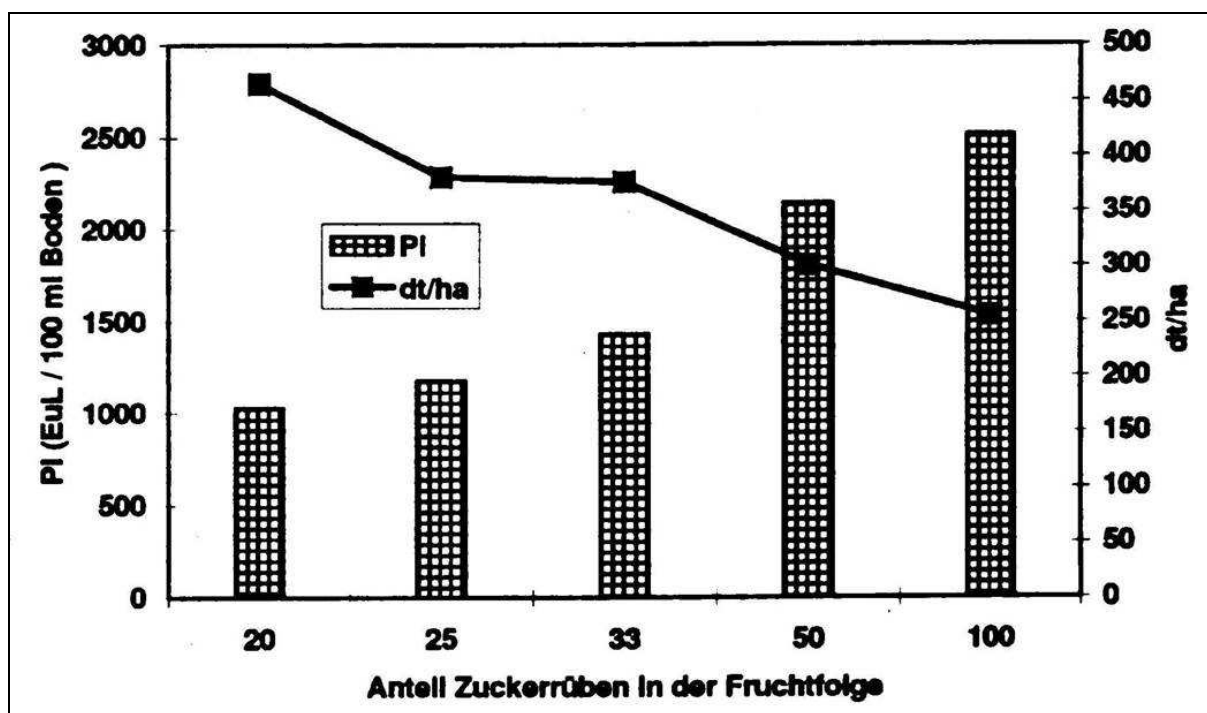


Quelle: STEUDEL ET AL., 1981, S. 15

¹² Nach BEHRINGER UND FÜRST (1985a, S. 21) führt der Anstieg zum gleichen Verseuchungsgrad wie die Zuckerrübenmonokultur.

Andere Untersuchungen in verschiedenen Rübenanbaugebieten Deutschlands zeigten, dass in einer dreijährigen Fruchtfolge mit einer Zunahme der Nematodenpopulation im Zeitablauf zu rechnen ist, während eine vierjährige Fruchtfolge (dreijährige Anbaupause) zu einem Absinken der Befallshöhe führt (vgl. WINNER, 1982, S. 75; STEUDEL UND MÜLLER, 1983; FICHTNER ET AL., 1984; BEHRINGER UND FÜRST, 1985a, MÜLLER, 1986; ARNDT UND KRAUSE, 1988; KRIEGER, 1989, S. 91; BINH, 1991 sowie ARNDT, 2002). Nicht in allen Untersuchungen konnte mit einer dreijährigen Anbaupause der Nematodenbefall sicher unter die Schadschwelle gedrückt werden (vgl. BEHRINGER UND FÜRST, 1985a sowie WHITEHEAD, 1998, S. 203). Unter den Standortbedingungen Unterfrankens war es in einem langjährigen Versuch sogar bei vierjährigen Anbaupausen nicht möglich, den Befall vor Zuckerrüben unter der Schadschwelle von 500 Eier und Larven je 100ml Boden zu halten (ARNDT, 2002, S. 76). Dies zeigt die folgende Abbildung 15, in der die fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten je nach Anbaupause dargestellt sind.

Abbildung 15: Nematodenbefall und Rübenenerträge je nach Zuckerrübenanteil



Quelle: ARNDT, 2002, S. 76

LAUENSTEIN (1991, S. 130) warnt vor zu langen Anbaupausen zur Nematodenbekämpfung, da dadurch eine Selektion auf Langlebigkeit des Nematodenbesatzes ausgeübt wird. Auch SCHLANG (2001, mündl.) ist der Meinung, dass die vierjährige Fruchtfolge der fünfjährigen vorzuziehen ist, da sich nach drei Jahren ohne Wirt immer noch eine kleine Restpopulation von Antagonisten (v.a. Pilze) hält, die unter den folgenden Rüben noch aktiv werden kann und die Nematodenvermehrung dämpft. Nach WESTPHAL (1998, S. 142) führt dagegen bereits der zweimalige Anbau von Weizen nach Rüben zu einer signifikanten Abnahme des antagonistischen Potentials des Bodens.

Beim Vergleich der Rübenenerträge in verschiedenen langen Rotationen, wie in Abbildung 15 dargestellt, ist zu berücksichtigen, dass Fruchtfolgen nicht nur über die Nematodenpopulation

einen Einfluss ausüben, sondern ein ganzer Wirkungskomplex zum Tragen kommt. SCHACHT (1859, S. 176), KÄMPF UND PETZOLDT (1980, S. 27 und S. 97), BISCHOFF (1985, S. 354) und BEHRINGER (1990, S. 287) führen die fruchtfolgebedingten Ertragsdepressionen der Zuckerrüben, die sog. Rübenmüdigkeit, ausschließlich bzw. hauptsächlich auf *H.schachtii* zurück. Nach Untersuchungen von HEYLAND (1988, S. 52) ist der Zuckerertrag dagegen nicht mit dem Anteil der Zuckerrübe an der Fruchtfolge korreliert, wenn Fruchtfolgen als System angesehen werden und beim Austauschen einer Frucht durch die andere bei der neu eingeführten Frucht alle die Faktoren durch Betriebsmitteleinsatz wieder ergänzt werden, die durch den Fortfall der nicht mehr angebaute Art im System verloren gehen. Nach WINNER (1982, S. 74ff.) führt eine zu enge Stellung von Zuckerrüben in der Rotation dagegen auch durch verstärktes Auftreten anderer spezifischer Krankheiten und Schädlinge der Zuckerrübe wie Wurzelbrand, Cercospora, Ramularia, Rhizoctonia, Rizomania oder das Rübenkopffälchen ebenso wie die Begünstigung bestimmter, im Rübenbestand auftretender Unkräuter zu Ertragsdepressionen. Die Versuche von LISTE UND FISCHER (1988, S. 137) in den mitteldeutschen Rübenanbaugebieten ergaben sogar, dass der Ertrag mit steigendem Zuckerrübenanteil in der Fruchtfolge unabhängig vom Auftreten des Rübenzystenälchens abnimmt. Nach KRIEGER (1989, S. 2) erklärt „der Einfluss von *H.schachtii* im Mittel nur ca. 10 von 20% der Ertragsunterschiede zwischen Fruchtfolgen mit steigendem Zuckerrübenanteil“. Diese Halbierung der Bestimmtheitsmaße der Regressionen von Zuckerrübenanteil bzw. Anbaupause mit den durch Nematizideinsatz „bereinigten“ Körpererträgen deutet im Vergleich zu nicht bereinigten Körpererträgen auf 50% nicht nematodenbedingte Ertragsdifferenzierung im Untersuchungszeitraum (ebd., S. 80). FISCHER (1990b, S. 444) kommt zu dem Schluss, dass sich die Ertragsdifferenzen zwischen Ackerbausystemen sogar nur zu 30-50% der Population des Rübennematoden zuordnen lassen. Als eigentliches Problem der spezialisierten Hackfruchtbetriebe bezeichnet KÄMPF (1987, S. 129) die Humusbilanz, die bei einem Hackfruchtanteil von 50% keinesfalls auch nur annähernd abgesichert werden kann.

Die Fruchtfolgeversuche zeigen deutlich, dass die Zuckerrübe zu Recht zu den so genannten „selbstunverträglichen“ Kulturpflanzen gehört (vgl. WINNER, 1982, S. 74). Nach WINNER (1982, S. 78) spricht man zwar auch heute noch von Rübenmüdigkeit, solange ein Ertragsabfall, offenbar bedingt durch einen zu häufigen Rübenanbau, nicht eindeutig einer bestimmten Ursache zugeschrieben werden kann. Ist die Ursache dagegen eindeutig bekannt, sollte auf diesen „Hilfsbegriff“ verzichtet werden.

3.2.2.3 Planungsproblem Fruchtfolge

Die nach dem Verzicht auf den Anbau anfälliger Wirtspflanzen naheliegendste und seit vielen Jahren von Nematologen propagierte passive Bekämpfung des Fruchtfolgeschädling *H.schachtii* durch eine konsequente Ausrichtung der Fruchtfolge stellt ein erhebliches Planungsproblem dar, da die Fruchtfolgegestaltung und Anbauplanung nicht nach rein phytosanitären Gesichtspunkten durchgeführt werden kann. Sie muss vielmehr unter Berücksichtigung vieler pflanzenbaulicher und vor allem betriebswirtschaftlicher Aspekte erfolgen (vgl. VON BOGUSLAWSKI, 1981, S. 385; WINNER, 1982, S. 75 und SCHMIDT, 1992, S. 106). Nach STONE ET AL.(1992, S. 61) versetzt das vorhandene fundierte Wissen über die phytosanitären, pflanzenbaulichen und ökonomischen Aspekte von Fruchtfolgen Landwirte in die Lage, eine etablierte Fruchtfolge wählen zu können, anstatt jedes Jahr neu entscheiden zu müssen, welche Frucht anzubauen ist. Dies reduziert die Komplexität des Planungsproblems. Es ist allerdings zu hinterfragen, inwiefern in der Praxis diese klassische Fruchtfolgeplanung, d.h. die mehrjäh-

rige Planung und Einhaltung der Fruchtfolge auf betrieblicher oder schlagspezifischer Ebene, überhaupt noch stattfindet, oder ob nicht Anbauentscheidungen immer mehr spontan nach den Gegebenheiten des Marktes getroffen werden. Schließlich ist es bei unsicheren Produktpreisen und Vermarktungschancen nicht sinnvoll, sich auf eine bestimmte Fruchtfolge und damit ein bestimmtes Anbauverhältnis für einen längeren Zeitraum festzulegen. Die aus nematologischer Sicht sinnvolle Forderung nach mindestens mittelfristig einzuhaltenden Fruchtfolgen dürfte entsprechende Probleme bei der Umsetzung in der landwirtschaftlichen Praxis hervorrufen, da diese mit der Schnelligkeit der Übernahme wettbewerbsstärkerer Kulturen (z.B. Raps, Kohlgemüse) zeigt, dass die strikte Einhaltung von Fruchtfolgen betriebswirtschaftlichen Kriterien untergeordnet wird. Dies geht einher mit der Tatsache, dass die Vernachlässigung mancher klassischen Fruchtfolgegrundsätze zumindest teilweise durch vermehrten Betriebsmitteleinsatz ausgeglichen wird (vgl. HEYLAND, 1988, S. 52; POTHS, 1992, S. 5 und DOLESCHEL, 1993, S. 83).

Ob diese Flexibilität bei der Anbauplanung auch in diesem Umfang für die Anbauplanung für die wirtschaftspolitisch stark reglementierten Zuckerrüben gilt, kann bezweifelt werden. Von Nematologen wird seit Jahrzehnten wiederholt ein Verzicht auf zweijährige Fruchtfolgen und die Einhaltung einer mindestens dreijährigen Anbaupause (vierjährige Fruchtfolge) empfohlen. Die Auswertungen von HEINRICHS (2004a, s.o.) zeigen, dass die überwiegende Mehrheit der rheinischen Landwirte aufgrund umfangreicher Ausstattung mit Lieferrechten und aus Angst vor deren Einzug durch das Zuckerunternehmen bei Nichterfüllung (siehe Kapitel 3.2.1.1) an einer engen dreijährigen Fruchtfolge festhält.

Hinzu kommt, dass die Flexibilität der Anbauplanung vermehrt eingeschränkt wird durch politische Reglementierung. So muss ein Landwirt im Rahmen der ab dem Jahr 2005 geltenden Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik sicherstellen, dass das jährliche Anbauverhältnis aus mindestens drei Kulturen besteht und jede Kultur mindestens einen Anteil von 15% der Ackerfläche ausmacht (vgl. BMVEL, 2005, S. 76). Andererseits können politische Vorgaben auch mit zusätzlichen Anreizkomponenten versehen sein. In Nordrhein-Westfalen werden seit 2003 vielfältige Fruchtfolgen mit 50 Euro/ha zuwendungsfähige Ackerfläche und Jahr gefördert. Antragsteller müssen sich für die Dauer von fünf Jahren verpflichten, jährlich mindestens fünf verschiedene Hauptfruchtarten auf der Ackerfläche anzubauen, jährlich auf mindestens 7% der Ackerfläche den Anbau von Leguminosen anzubauen und bei den anderen Hauptfruchtarten einen Anteil an der Ackerfläche des Betriebs von mindestens 10% und maximal 30% je Hauptfruchtart einzuhalten (TICHY, 2004, S. 48).

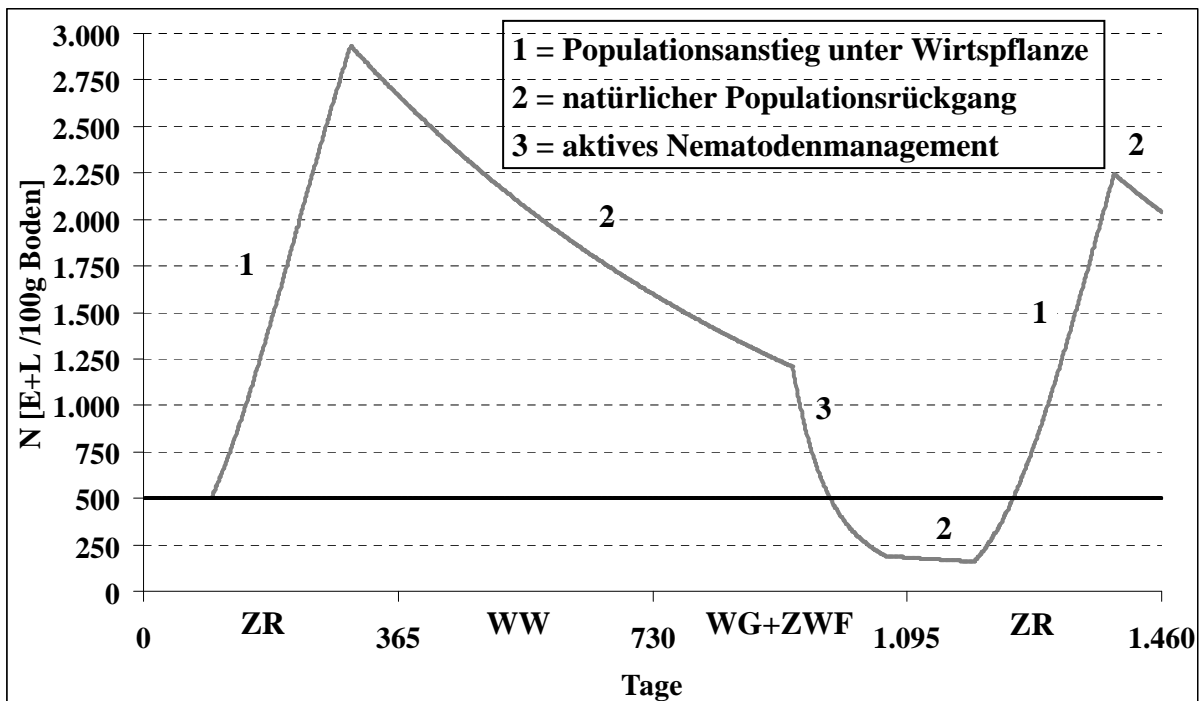
3.2.3 Zwischenfrucht- und Stilllegungsmanagement

1980 ist es der Züchtung erstmals gelungen, aus der Reihe kreuzblütiger (kruziferer) Gründüngungspflanzen Ölrettich- (*Raphanus sativus oleiformis*) und Gelbsensorten (eine Form des Weißen Senfs, *Sinapis alba*) auf den Markt zu bringen, die Resistenzeigenschaften gegenüber der Rübennekrose *H. schachtii* besitzen (vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 54). Im Rahmen der Sortenbewertung für die Beschreibende Sortenliste des Bundessortenamtes wird Resistenz definiert als Eigenschaft einer Pflanzensorte, die Vermehrungsrate einer bestimmten Nematodenart unter standardisierten Bedingungen auf ein festgelegtes Niveau zu begrenzen (MÜLLER, 1989b, S. 139). Dabei gelten nur solche Ölrettich- und Senfsorten als resistent gegen *Heterodera schachtii*, die nach Verrechnung mit anfälligen Standardarten im Labor ei-

nen P_f/P_i -Wert von 0,5 unterschreiten. Es erfolgt eine weitere Einteilung nach Noten bzw. Anfälligkeitsstufen nach BEHRINGER ET AL. (1984, S. 125), wobei Sorten mit P_f/P_i -Werten zwischen 0,31 und 0,5 (50-69% Reduktion) die Note 3, zwischen 0,1 und 0,3 (70-90% Reduktion) die Note 2 und unter 0,1 (>90% Reduktion) die Note 1 erhalten. Die Sorteneigenschaft Nematodenresistenz bezieht sich ausschließlich auf das Rübenzystenälchen *H.schachtii*. Sie hat in Bezug auf andere Nematoden, wie z.B. das Rübenkopfälchen, keine Bedeutung (vgl. KNUTH, 2005, S. 51)¹³.

Ziel des Anbaus nematodenresistenter Kruziferen ist es, die Populationsdichte von *H.schachtii* stärker zu senken als bei einer Brache oder dem Anbau von Nichtwirtspflanzen, um dadurch die Gefährdung der nachfolgenden Zuckerrüben zu verringern. Die eigentliche nematodenreduzierende Wirkung entspricht daher der Differenz zwischen der natürlichen Nematodenreduktion über die Zeit und der Nematodenreduktion durch die biologische Bekämpfung (vgl. STEUDEL UND MÜLLER, 1983, S. 366 sowie MÜLLER UND STEUDEL, 1983, S. 107). Dieses Ziel veranschaulicht die folgende Abbildung 16, in der die Populationsdynamik des Nematoden in der rheinischen Fruchtfolge Zuckerrüben (ZR) – Weizen (WW) – Wintergerste (WG) schematisch dargestellt ist. Durch den nach der Wintergerste erfolgenden Zwischenfruchtanbau (ZWF) gelingt es, die Befallsdichte wesentlich stärker zu verringern, als dies zuvor unter den Nichtwirtspflanzen der Fall war. Die Ausgangsverseuchung der Zuckerrüben im vierten Jahr liegt deutlich unterhalb der Schadschwelle von 500 Eiern und Larven / 100g Boden und das Befallsniveau konnte insgesamt gesenkt werden.

Abbildung 16: Abundanzregulierender Einfluss resistenter Zwischenfrüchte



Quelle: Eigene Darstellung

¹³ Erstmals weist der Ölrettich „Terranova“ eine doppelte Resistenz sowohl gegen die Rübenzysten nematoden *H.schachtii* und *H.trifolii* als auch gegen die Wurzelgallen nematoden *Meloidogyne chitwoodi* und *M.fallax* auf (FELDSAATEN FREUDENBERGER, 2005, S. 1).

Die Verringerung des Nematodenbesatzes gelingt dabei bis in tiefere Bodenschichten, ausreichende Durchwurzelbarkeit vorausgesetzt. Für das Schadensausmaß an der Zuckerrübe ist zwar die Populationsdichte der Oberkrume entscheidend, doch stabilisiert die Verseuchung der tiefen Bodenschichten langfristig gesehen die Populationsdichte des Rübennematoden, da Larven aus der Tiefe in die Oberkrume nachwandern oder durch tiefe Bodenbearbeitung passiv dorthin verlagert werden (STEUDEL ET AL., 1985, S. 139). Diese Nematoden könnten eine der Ursachen sein, warum die Nematodendichte nach einem scheinbar niedrigen Restbesatz in der Oberkrume schon nach einmaligem Rübenanbau auf sehr hohe Werte ansteigt (STEUDEL ET AL., 1989, S. 203 und BELL, 1997, S. 147).

Im Zusammenhang mit dem Einsatz nematodenresistenter Kreuzblütler im Rahmen des INM ergeben sich einige Fragen, deren Beantwortung in den folgenden Abschnitten und durch das zu entwickelnde Entscheidungsunterstützungssystem erfolgt. Die in der folgenden Übersicht 2 aufgeführten Fragen können in Anlehnung an BEHRINGER (vgl. Kapitel 3.2.2) zur Definition eines nematodenkontrollierten Zwischenfrucht- und Stilllegungsmanagements dienen.

Übersicht 2: Fragenkomplex nematodenkontrollierter Kruziferenanbau

1. Soll die resistente Kruzifere als Zwischenfrucht und/oder zur Begrünung der Flächenstilllegung eingesetzt werden? Der Anbau von Ölrettich oder Senf kann regelmäßig entweder als Zwischenfrucht oder seit der Reform der gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union 1993 (sog. „McSharry-Reform“) hauptfruchtartig zur aktiven Begrünung der konjunkturellen Flächenstilllegung erfolgen. Was unterscheidet die beiden Anbausysteme?
2. Soll Ölrettich oder Gelbsenf verwendet werden? Gibt es nematologisch, phytosanitär oder ackerbaulich relevante Unterschiede?
3. Welche Anfälligkeitsstufe sollte gewählt werden?
4. Nach welcher Hauptfrucht soll die nematodenresistente Zwischenfrucht angebaut werden, so dass sich ein optimaler Bekämpfungserfolg einstellt?
5. In welchem Umfang soll die Flächenstilllegung zur Nematodenbekämpfung eingesetzt werden? Soll die Flächenstilllegung über das obligate Maß ausgedehnt werden?
6. Schlagmanagement: Welche Schläge sollen stillgelegt werden? Die schlechtesten, um die besten für Zuckerrüben- und Getreideanbau zu nutzen, oder gerade die besten, auf denen vermehrt Zuckerrüben angebaut werden?
7. Wie soll der Anbau nematodenresistenten Ölrettichs oder Gelbsenfs in der Fruchtfolge positioniert werden, möglichst bald nach erfolgtem Zuckerrübenanbau oder unmittelbar vor dem kommenden?

Quelle: Eigene Darstellung

Auf die Nennung von in Feldversuchen festgestellten Reduktionsleistungen der resistenten Kruziferen, die in allen im Folgenden zitierten Quellen zahlreich genannt werden, wird an dieser Stelle verzichtet. Zu groß sind die Unterschiede, die es aufgrund unterschiedlicher

Standorte, Versuchsjahre und fehlender Angaben über die Höhe des Ausgangsbefalls in und zwischen den Quellen gibt.

3.2.3.1 Anbau als Zwischenfrucht

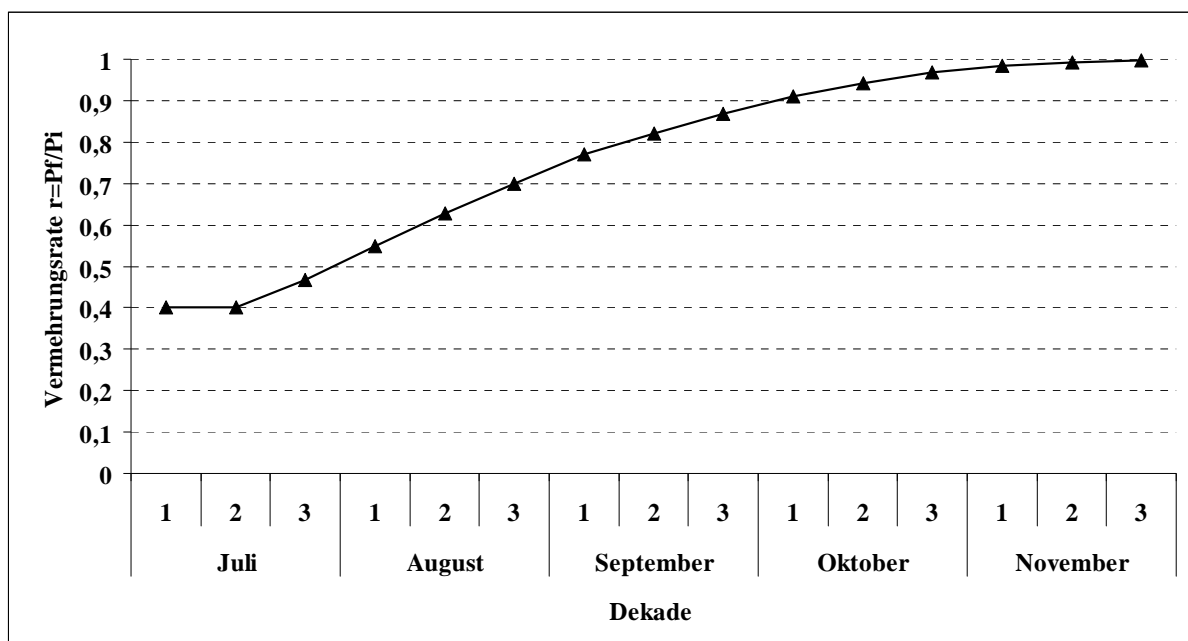
Zwischenfruchtanbau ist definiert als Anbau von Gründungs- oder Futterpflanzen zur Schließung von Anbaulücken oder Teilbrachen zwischen zwei Hauptfrüchten. Als Anforderungen an einen aus nematologischer Sicht erfolgreichen Zwischenfruchtanbau sind in erster Linie zu nennen eine frühe Saat (vgl. MÜLLER UND STEUDEL, 1983, S. 104; SAATEN-UNION, 1991, S. 43 sowie SCHLANG, 1997, S. 238ff.) wegen der notwendigen wirksamen Temperatursummen und alle Maßnahmen, die einen schnellen und gleichmäßigen Feldaufgang sowie eine rasche Durchwurzelung bis in tiefe Bodenschichten wegen der geringen aktiven Migrationsbewegungen des Nematoden fördern (vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 43). Daher haben sich als Vorfrucht die frühräumende Wintergerste, die eine Aussaat der Zwischenfrucht noch im Juli ermöglicht, eine „hauptfruchtartige“ Bestellung der Zwischenfrucht mit gründlicher Stoppelbearbeitung und Pflugfurche sowie eine bedarfsgerechte Düngung¹⁴ bewährt. Wie anhand der Entwicklung der Anbauverhältnisse im Rheinland in Abbildung 1 (Kapitel 2.1) zu erkennen ist, wurde seit Beginn der 1980er Jahren Wintergerste immer mehr aus der Fruchtfolge durch ökonomisch leistungsfähigere, aber später räumende Früchte wie Weizen, Hybridroggen, Triticale oder Kartoffeln verdrängt. Die Anbaufläche der Gerste reduzierte sich seitdem von über 90.000ha auf etwas über 20.000ha im Jahre 2002. Dadurch reduzieren sich die für die Nematodenbekämpfung relevante nutzbare Vegetationslänge der Zwischenfrucht und der Zeitraum für eine ordnungsgemäße Einarbeitung des Strohs der Vorfrucht.

Während MÜLLER UND STEUDEL (1983, S. 106) noch zu dem Ergebnis kamen, dass bei resistenten Zwischenfrüchten die Populationsentwicklung von *H. schachtii* unabhängig von den Saat- und Umbruchterminen ist, zeigen die Untersuchungen von SCHLANG (1997) den entscheidenden Einfluss des Aussaat-, genauer gesagt des Auflaufzeitpunktes der Zwischenfrucht für den Erfolg der Populationsreduktion. Zur Erreichung optimaler Reduktionsergebnisse sieht SCHLANG (ebd., S. 236) eine Bodentemperatursumme in 10 cm Tiefe von 800°C als notwendig an. Zur Ermittlung der Temperatursummen sind allerdings nur die über der Basistemperatur von 8°C (siehe Kapitel 2.2.3.4) liegenden Tagesmittelwerte aufzusummieren. In dem Maß, in dem diese Temperatursumme verfehlt wird, sinkt der Wirkungsgrad der biologischen Nematodenbekämpfung mit resistenten Kruziferen. SCHLANG (1997) wertete für den Standort Elsdorf/Rhld. eine 16jährige Untersuchungsperiode von 1981 bis 1996 aus. Die Dekadenmittelwerte der so ermittelten Temperatursummen sind in Anhang 3 wiedergegeben. Bei Aussaat resistenter Kruziferen als Zwischenfrucht kann nur bei Aussaat bzw. Auflauf bis zur 2. Julidekade die Temperatursumme von 800°C erreicht und überschritten werden (Anhang 3, Reihe „Summe November-April“). Nur bis zu diesem Zeitpunkt werden demnach mindestens 100% der „wirksamen“ Temperatursumme erreicht und die Bodentemperatur ist nicht der begrenzende Faktor (Anhang 4). Ab Ende Juli nimmt die Bodentemperatursumme stark ab, bei Aussaaten Ende August kann nur noch mit 50% der Bodentemperatursumme gerechnet werden. In jeder Septemberdekade nimmt die Bodentemperatursumme um weitere 10% ab, so dass ab Ende September nur noch 20% der wirksamen Bodentemperatursumme zur Verfügung stehen (SCHLANG, 1997, S. 237, siehe Anhang 4). Eine resistente Kruzifere, die, in der

¹⁴ Die Stickstoffdüngung der Zwischenfrucht fördert die Bildung von ober- und unterirdischer Biomasse, hat aber keinen direkten Einfluss auf die Nematodenpopulation (vgl. HAFEZ UND SUNDARARAJ, 1999, S. 29).

2. Julidekade gedrillt, eine 60%ige Reduktionsleistung ($r = 0,4$) erreicht, erreicht demnach bei Aussaat in der 3. Augustdekade nur noch eine 30%ige Reduktionsleistung ($r = 0,7$, siehe Abbildung 17).

Abbildung 17: Vermehrungsrate unter resistenten Zwischenfrüchten je nach Aussaat



Quelle: Eigene Darstellung

Die vorgestellten Befunde beziehen sich auf mitteleuropäische Verhältnisse, insbesondere auf die Bedingungen der Köln-Aachener Bucht mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von $9,8^{\circ}\text{C}$ und einer mittleren Jahresniederschlagssumme von 712 mm am Standort Elsdorf. Abweichende Ergebnisse sind unter anderen klimatischen Gegebenheiten nicht auszuschließen. Dies dürfte dann eher auf andere Feuchte-, als auf andere Temperaturverhältnisse zurückzuführen sein (SCHLANG, 1997, S. 240).

Nematodenresistente Kruziferen beeinflussen als Zwischenfrüchte nicht nur die Populationsdynamik von *H.schachtii*, sie wirken gleichzeitig auch als Gründüngung. Wie Anhang 5 zeigt, sind die Wirkungen des Zwischenfruchtanbaus sehr komplex und können sowohl negativ als auch positiv sein. Hervorzuheben ist der Aufbau von Humus sowie die phytosanitäre Wirkung von Gelbsenf und Ölrettich, deren Anbau zu einer Minderung des Schadens, der durch die späte Rübenfäule (*Rhizoctonia solani*) verursacht wird, führen kann (vgl. KESSEL UND KY-NAST, 2003, S. 185). Wird die Wirkung resistenter Zwischenfrüchte auf der Grundlage der nachfolgenden Zuckerrübenenerträge beurteilt, ist zu beachten, dass wie bei Betrachtung unterschiedlicher Rotationslängen (siehe Kapitel 3.2.2.2) neben der Verminderung der Populationsdichte von *H.schachtii* der gesamte Wirkungskomplex zum Tragen kommt und dieser nicht nur den Ertrag der folgenden Zuckerrüben beeinflusst, sondern Auswirkungen auf alle folgenden Früchte hat. So führte bei Feldversuchen auch der Anbau der Nichtwirtspflanze Phazelia (*Phacelia tanacetifolia*) zu Ertragssteigerungen im nachfolgenden Rübenanbau (vgl. THOMAS, 1990, S. 7 und SAATEN-UNION, 1991, S. 37). Auf einem der Köln-Aachener Bucht vergleichbaren Standort führte die allgemeine Vorfruchtwirkung von Zwischenfrüchten zu einem Mehrertrag von 3-5 dt/ha Zucker bei den anschließenden Zuckerrüben (vgl. BRUNOTTE

ET AL., 1992, S. 225). Zu beachten ist ferner, dass der Anbau von Zwischenfrüchten mit anschließender Mulch- oder Direktsaat der Zuckerrüben in NRW im Rahmen des Erosionsschutzprogramms mit 102 Euro/ha gefördert werden kann, wenn die geförderten Flächen sich in Gebieten befinden, die als besonders erosionsgefährdet anerkannt sind (KÖNIG-GOHLA, 2004, S. 50).

Nachteilig am Zwischenfruchtanbau ist die zusätzliche Arbeitsbelastung im Sommer, einer Arbeitsspitze in den meisten Ackerbaubetrieben. Mit Sommerfurche sind ca. 3-3,5 Arbeitskraftstunden (AKh)/ha für den Zwischenfruchtanbau in der Phase „Frühgetreideernte“ zu veranschlagen, dafür werden in der Phase „Rübenernte“ durch Mulchen statt Winterfurche ca. 0,5 AKh/ha freigesetzt. Eine Herbstfurche benötigt in der Zeit der Rübenernte ca. 2 AKh/ha. Ist der notwendige Arbeitszeitbedarf in den betreffenden Zeitspannen aufgrund der Faktorausstattung des Betriebs nicht gedeckt, entstehen zusätzlich auch Nutzungskosten für termingebundene Arbeiten (vgl. KESSEL UND KYNAST, 2003, S. 185).

Ein genereller Nachteil des Anbaus von Zwischenfrüchten ist deren Wasserbedarf, den ARNDT ET AL. (1992, S. 58) mit 60-80 mm und LEHRKE (2000, S. 207) mit 200 mm beziffern. In den Jahren 2001 und 2003, die gekennzeichnet waren durch einen trockenen Sommer, haben sich insbesondere in der Trockenregion der Kreise Rhein-Sieg und Euskirchen und bei früh gesäten Zwischenfrüchten oftmals nur sehr lückige Bestände mit ungleichmäßigem Wuchs entwickelt, von denen kaum eine nematologisch befriedigende Wirkung zu erwarten war (vgl. LIZ, 2003c). Der Trockenstress wird noch verstärkt, wenn statt Wintergerste Winterweizen als Vorfrucht aufstand, dessen längere Abreifephase die Ackerkrume bis zum Welkepunkt ausschöpfen kann (BUCHNER, 1997, S. 8). Für die nachfolgenden Zuckerrüben ist ein Nachteil durch den Wasserverbrauch der Zwischenfrucht nur dann zu erwarten, wenn über Winter keine Aufsättigung der Feldkapazität erfolgt. So ergaben Zwischenfruchtversuche der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen südlich von Köln keinen Zusammenhang zwischen Wassermangel und Zwischenfruchtanbau, sehr wohl aber eine erhöhte Trockenheitsresistenz der Zuckerrüben nach nematodenresistenten Zwischenfrüchten infolge eines verringerten Nematodenbesatzes (vgl. THOMAS, 1991, S. 119). Lediglich in den mitteldeutschen Löß-Schwarzerdegebieten traten teilweise verminderte Rübenerträge nach Zwischenanbau in Folge von Wassermangel auf bei <400mm Niederschlag (ARNDT ET AL., 1992, S. 61).

3.2.3.2 Anbau auf Stilllegungsflächen

Die Gewährung von Direktbeihilfen ist an die Einhaltung einer Stilllegungsverpflichtung geknüpft. Die Höhe der Stilllegungsverpflichtung ist in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich hoch und beträgt in NRW ab dem Jahr 2005 8,05% der gesamten Ackerfläche (vgl. BMVEL, 2005, S. 50). Ausgenommen von der Stilllegungsverpflichtung sind lediglich Kleinerzeuger (in NRW Betriebe unter 19,68 ha Ackerfläche) und Biobetriebe. Auf den stillgelegten Flächen ist jede Art der wirtschaftlichen Nutzung grundsätzlich verboten, nur der Anbau nachwachsender Rohstoffe (NAWARO) ist in Form des Vertragsanbaus erlaubt (vgl. BMVEL, 2005, S. 52f.). Nachwachsende Rohstoffe sind land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte, die einer Verwendung im Nichtnahrungsbereich zugeführt werden, wie z.B. Raps als Grundstoff für Biodiesel oder Getreide für energetische Zwecke. Konkurrierende Nutzungsformen der Flächenstilllegung sind daher:

1. Selbstbegrünung: Da eine Schwarzbrache während des Stilllegungszeitraums aus ökologischen Gründen nicht zulässig ist, muss mindestens eine Selbstbegrünung zugelassen werden (vgl. BMVEL, 2005, S. 53).
2. Aktive Begrünung: Statt der Selbstbegrünung ist eine gezielte Begrünung möglich, allerdings ist die Aussaat von Kulturpflanzen mit Ausnahme der NAWARO nicht gestattet (ebd.). Zum Einsatz kommen z.B. Gräser- oder Klee-Gras-Mischungen.
3. Aktive Begrünung zur biologischen Nematodenbekämpfung: Anstatt einer Gräser- oder Klee-Gras-Aussaart kann nematodenresistenter Ölrettich oder Gelbsenf gesät werden.
4. Aktive Begrünung mit Raps oder Getreide als NAWARO.

Aus ackerbaulicher und nematologischer Sicht hat die Nutzung der Flächenstilllegung zur Nematodenbekämpfung gegenüber dem Zwischenfruchtanbau Vorteile. Der hauptfruchtartige Anbau nematodenresistenter Kruzifere auf Stilllegungsflächen führt nicht nur in Regionen, in denen aufgrund fehlender Sommerniederschläge der Zwischenfruchtanbau aus nematologischer Sicht unsicher ist, zu höheren Bekämpfungswirkungsgraden und einer höheren Wirkungssicherheit (vgl. THOMAS, 1996, S. 16). MEYER (1994, S. 182) spricht von Leistungssteigerungen in Bezug auf die Nematodenreduktion gegenüber dem Zwischenfruchtanbau von 20-25%. Die Summe der nematologischen und ackerbaulichen Vorteile der hauptfruchtartigen Nutzung nematodenresistenten Ölrettichs oder Gelbsenfs gegenüber ihrem Anbau als Zwischenfrüchten zeigt sich nach THOMAS (1995, S. 15) in deutlich höheren Erträgen der nachfolgenden Zuckerrüben.

Hauptgrund für den höheren und sichereren Bekämpfungserfolg ist neben einer ausreichenden Bodenfeuchte bei der Frühjahrsbestellung die längere Vegetationszeit zur biologischen Nematodenbekämpfung in Verbindung mit höheren Bodentemperaturensummen, die den Schlupf und die Aktivität des Nematoden maßgeblich beeinflusst (vgl. SCHLANG, 1994, S. 13; SCHLANG, 1996, S. 374 und SCHLANG, 1997, S. 236). Nach SCHLANG (1996, S. 374) kann die Leistungsfähigkeit der neueren hochresistenten Ölrettich- und Senfsorten überhaupt nur bei den längeren Standzeiten mit höheren Bodentemperaturensummen, wie sie der Anbau auf Stilllegungsflächen bietet, optimal ausgenutzt werden. Anhang 3, Reihe „Summe April - November“ zeigt, dass bei Aussaat resistenter Kruziferen auf Stilllegungsflächen Anfang bis Mitte Mai die zur optimalen Bekämpfung notwendige Temperatursumme von 800°C Anfang bis Mitte August erreicht und überschritten wird. Zu diesem Zeitpunkt ist die natürliche Abreife resistenter Senf- und Ölrettichsorten schon weit fortgeschritten, so dass messbare biologische Wirkungen danach nicht mehr zu erwarten sind (SCHLANG, 1997, S. 236).

Der ackerbauliche Vorteil der biologischen Nematodenbekämpfung auf Stilllegungsflächen besteht in der wesentlich leichteren Eingliederung in das bestehende Bodennutzungssystem. Flächenstilllegung bringt keine Einschränkung der Fruchtfolgewardahl mit sich, während ein aus nematologischer Sicht erfolgreicher Zwischenfruchtanbau eine frühräumende Vorfrucht, i.d.R. die gegenüber Winterweizen weniger leistungsfähige Wintergerste, bedingt. Die Nutzung der Flächenstilllegung ist auch nicht verbunden mit zeitlichen Einschränkungen bei der Stoppelbearbeitung, so dass eine ordnungsgemäße Stroheinarbeitung und -rotte sichergestellt ist. Auch der Wasserhaushalt der Folgefrucht wird weniger in Anspruch genommen als durch Zwischenfrüchte.

Auf Stilllegungsflächen besteht nicht die Möglichkeit der Düngung der Kruziferen. Daraus ergibt sich aber nicht zwangsläufig eine schlechtere Bestandsentwicklung in Verbindung mit einer verminderten Nematodenbekämpfung, schließlich fehlt hier die stickstoffzehrende Strohrotte, und nach der Vorfrucht Zuckerrübe kann die Stickstoffversorgung der Böden nicht mehr als begrenzender Faktor angesehen werden (vgl. SCHLANG, 1996, S. 374).

Die Flächenstilllegung kann natürlich nur derjenige im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements nutzen, der nicht in erster Linie Grenzertragsstandorte oder schlecht geformte Schläge, auf denen ohnehin keine Zuckerrüben angebaut werden, stilllegt. Nur wer bereit ist, gute Ackerstücke oder Teile davon in die Stilllegung aufzunehmen, kommt in den Genuss der Vorteile. Trotzdem reicht der Umfang der obligatorischen Flächenstilllegung i.d.R. nicht zur alleinigen biologischen Nematodenbekämpfung auf den gut mit Lieferrechten ausgestatteten rheinischen Ackerbaubetrieben aus.

3.2.3.3 Ölrettich versus Gelbsenf

Zwischen nematodenresistenten Ölrettich- und Senfsorten gibt es nematologisch und ackerbaulich relevante Unterschiede. Beim Zwischenfruchtanbau hat Gelbsenf gegenüber Ölrettich ackerbauliche Vorteile. Er ist spätsaat- und trockenheitsverträglicher und eignet sich besser für eine anschließende Mulchsaat der Zuckerrüben, da er schon bei geringem Frost sicher abfriert (vgl. HEINICKE, 1999, S. 10 und SCHLATHÖLTER, 2001, S. 14). Die Spätsaatverträglichkeit des Senfes kann allerdings aus nematologischer Sicht wegen der hohen Temperaturansprüche von *H.schachtii* nicht genutzt werden. Die Aussaat von Senf ist zudem kostengünstiger aufgrund geringerer Saatgutkosten und Aussaatmengen.

Zur Begrünung von Stilllegungsflächen ist dagegen Ölrettich unter ackerbaulichen Gesichtspunkten im Vorteil. Er hat eine geringere Frühblühneigung und muss daher nicht so früh abgeschlegelt werden, damit der Bestand nicht zur Samenreife kommt und als Unkraut in der Folgekultur Probleme bereitet (vgl. LEHRKE, 2000, S. 204). Dies ist seit dem Jahr 2005 von besonderer Bedeutung, da ein Mulchen der Stilllegungsflächen nicht mehr vor dem 15. Juli zulässig ist (vgl. BMVEL, 2005, S. 53). Hinzu kommt, dass Ölrettich im Gegensatz zu Gelbsenf nach dem Abschlegeln wieder austreibt. Versuche haben gezeigt, dass mit der Wiederbegrünung zwar keine wesentliche Nematodenbekämpfung mehr einhergeht, wohl aber eine nachhaltige Unkrautunterdrückung (vgl. MEYER, 1994, S. 182; KWS, 2000, S. 40 sowie HEINICKE UND WARNECKE, 2001a, S. 22).

Aus nematologischer Sicht ist der Ölrettich dem Gelbsenf überlegen und hat daher den höheren Vorfruchtwert für die Zuckerrübe (SCHLATHÖLTER, 2001, S. 14). Ölrettich reduziert den Befall des Rübennematoden selbst bei gleicher Anfälligkeitsstufe stärker als Gelbsenf (vgl. GARDNER UND CASWELL-CHEN, 1993, S. 695; HAFEZ UND SUNDARARAJ, 1998, S. 146; HEINICKE, 1999, S. 12; LEHRKE, 2000, S. 204 sowie SCHLATHÖLTER, 2001, S. 14), so dass die nachfolgenden Zuckerrüben höhere Erträge als nach Gelbsenf aufweisen (THOMAS, 1995, S. 13f und SCHLANG, 2003a, mündl.). Auch der Wiederanstieg der Nematodenpopulation unter den Zuckerrüben ist nach Ölrettich geringer als nach Gelbsenf (vgl. STEUDEL ET AL., 1989, S. 202 und SAATEN-UNION, 1991, S. 38). Als Gründe für die nematologische Überlegenheit des Ölrettichs werden die tiefere Durchwurzelung des Bodens und die größere Wurzelmasse des Ölrettichs (vgl. LEHRKE, 2000, S. 204 und SCHLANG, 2003a) sowie eine fördernde Wirkung auf pilzliche Antagonisten des Rübennematoden, die allerdings bei „modernen“ Ölrettichsorten nicht mehr so ausgeprägt ist (SCHLANG, 2003a, mündl.), genannt.

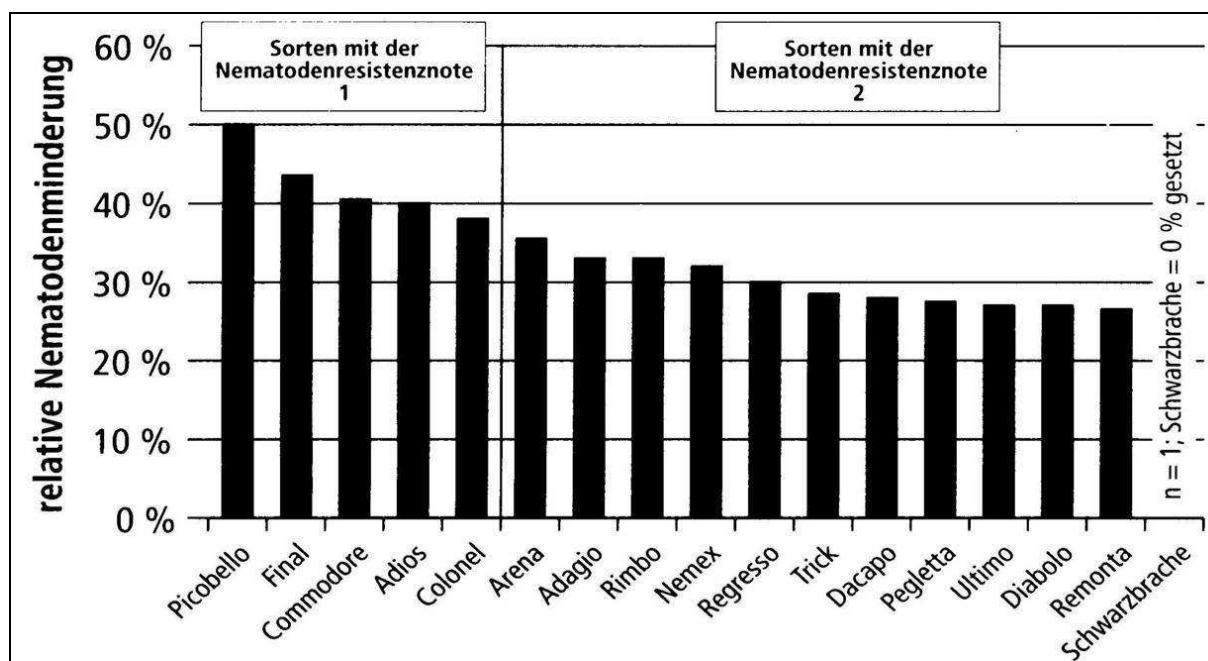
Gelbsenf weist weitere phytosanitäre Nachteile auf. So zählt Gelbsenf zum Kreis der Wirtspflanzen des Rübenkopfälchens (siehe Kapitel 2.2.1). Besteht also der Verdacht auf eine gleichzeitige Verseuchung mit dem Rübenzystenälchen und dem Rübenkopfälchen, ist von Senf Abstand zu nehmen (KESSEL UND KYNAST, 2003, S. 185; vgl. KNUTH, 2005). Dies gilt auch für Zuckerrüben-Kartoffel-Fruchtfolgen, vor allem auf leichten Sandböden, da Senf auch ein Wirt für viele frei lebende Nematoden ist (HEINRICHS, 2003b, S. 40), zu denen auch die Gattung *Trichodorus*, Überträger des Tabak-Rattle-Virus, gehört. Bei den von HEINRICHS (ebd.) ebenfalls getesteten Ölrettichsorten wurde dagegen keinerlei Vermehrung frei lebender Nematoden festgestellt. Ölrettich führt vielmehr zu einer Verringerung der Eisenfleckigkeit und Propfenbildung an den Kartoffelknollen (vgl. KESSEL UND KYNAST, 2003, S. 185).

3.2.3.4 Wahl der Anfälligkeitsstufe

Zur biologischen Nematodenbekämpfung stehen resistente Ölrettich- und Gelbsensorten der Anfälligkeitsstufen 1, 2 und 3 zur Verfügung. Auf resistente Sorten in der Anfälligkeitsstufe 3, deren wirtsspezifische Verseuchungsdichte mit ca. 700 Eier und Larven oberhalb der Schadschwelle liegt, sollte allerdings verzichtet werden (SCHLANG, 2002, S. 204). Ölrettiche und Senfe der Anfälligkeitsstufe 1 kosten 1-1,5 Euro/kg Saatgut mehr als 2er Sorten. Bei Aussaatmengen von 20-30kg ergibt sich eine Differenz bei den Saatgutkosten von 20-45 Euro/ha. Es ist daher zu hinterfragen, ob der Mehraufwand für die 1er Sorten durch die stärkere Reduktion der Nematodenpopulation, die zu höheren Rübenenerträgen führt, gerechtfertigt ist.

Mit Versuchsergebnissen der Jahre 1992-2000 versuchten HEINICKE UND WARNECKE (2001a, S. 22) eine Rangfolge der Sorten zu erstellen, mit der die besten von weniger guten Ölrettichsorten getrennt werden können (Abbildung 18).

Abbildung 18: Populationsrückgang unter unterschiedlich resistenten Ölrettichsorten



Quelle: HEINICKE UND WARNECKE, 2001a, S. 22

Eine Differenzierung einzelner Sorten hinsichtlich ihrer nematodenreduzierenden Wirkung ist anhand von Feldversuchen schwierig, da die Sortenunterschiede oft nicht statistisch absicher-

bar sind und starken Jahreseffekten unterliegen. Aufgrund dessen wollen HEINICKE UND WARNECKE (2001a, S. 22) diese Abstufungen lediglich als Orientierungshilfe verstanden wissen. Nach HEINRICHS (2003a, S. 8) ist eine Absicherung von Unterschieden bei der Nematodenreduktion innerhalb des Sortenspektrums 1er Ölrettichsorten nicht möglich. Tendenziell zeigen jedoch die vom Bundessortenamt mit der Anfälligkeit 1 eingestuften Sorten bessere Bekämpfungserfolge als Sorten mit der Anfälligkeitsstufe 2 und haben nach SCHLATHÖLTER (2003, S. 18) eine Art Sicherheitsreserve bei verkürzter Standdauer wegen verspäteter Aussaat beim Anbau als Zwischenfrüchte und bei mangelnder Durchwurzelung. Die Resistenzstufe 2 hat dagegen ein breites Spektrum bei der Reduktionsleistung (s.o.). Sorten im „unteren Bereich“ der Stufe 2 reduzieren schwächer bzw. vermehren u.U. den Nematoden bei mäßigem oder nesterweisem Auftreten bis zu ihrer wirtsspezifischen Verseuchungsdichte. Erst Sorten im „oberen Bereich“ der Stufe 2 und natürlich 1er Sorten vermindern nicht nur die Nematoden in den Befallsherden, sondern auch in den schwächer befallenen Bereichen (vgl. SCHLATHÖLTER, 2003, S. 18). SCHLANG (1999b, S. 7) definierte aus diesem Grund die Anfälligkeitsstufe „2+“ bzw. „1,5“ für sehr gute 2er Sorten¹⁵. Insbesondere risikoaverse Landwirte werden daher 1er Ölrettich- und Gelbsenssorten den Vorzug geben.

Abschließend kann diese Frage nur situationsspezifisch beantwortet werden, zu viele betriebsindividuelle und jahresspezifische Größen spielen eine Rolle. Zu beachten ist, dass sich die Anfälligkeitsstufen auf Laborprüfungen beziehen und nicht vorbehaltlos auf Feldbedingungen übertragen werden können. Dort werden regelmäßig geringere Reduktionsleistungen erzielt (vgl. MÜLLER, 1989a; MÜLLER UND RUMPENHORST, 2000, S. 17 sowie KESSEL UND KYNAST, 2003, S. 185).

3.2.3.5 Positionierung der Zwischenfrucht bzw. der Flächenstilllegung

Nach ARNDT ET AL. (1992, S. 63) sollten Zwischenfrüchte so dicht wie möglich nach Zuckerrüben angebaut werden, um bei noch hohen Populationsdichten des Rübennematoden höhere Bekämpfungswirkungsgrade zu erzielen und der Gefahr einer qualitativen Aufwertung der Nematodenpopulation (Zystenbildung) vor dem Zuckerrübenanbau entgegenzuwirken. Ein Anbau resistenter Kruziferen nicht unmittelbar vor Zuckerrüben, sondern zu einem früheren Zeitpunkt in der Fruchtfolge, verbessert darüber hinaus insbesondere auf trockenen Standorten die Wasserversorgung der Zuckerrüben und kommt der Forderung nach einem abgesetzten Saatbett mit gut verrotteter organischer Substanz entgegen (vgl. BEHRINGER UND FÜRST, 1985b, S. 36 sowie ARNDT ET AL., 1992, S. 61). Nach KOCHS (2000a, S. 699) ist die nematodenreduzierende Wirkung am besten, wenn die Stilllegung unmittelbar vor Zuckerrüben steht, da die Zysten ausgereifter sind und der Schlupferfolg höher ist. Dem widerspricht SCHLANG (2003a, mündl.), nach dessen Aussage noch junge Zysten einen hohen Schlupfreiz aufweisen. Hinzu kommt nach SCHLANG (ebd.), dass unmittelbar nach Zuckerrüben Stickstoff kein limitierender Faktor für die Bestandesentwicklung der Stilllegungsbegrünung ist.

3.2.3.6 Phazalie

BEHRINGER UND FÜRST (1985b, S. 36) kommen in Freilandversuchen in Bayern zu dem Schluss, dass der Anbau der als „nematodenneutral“ (siehe Kapitel 2.2.3.3) geltenden Phazalie sowohl im Hinblick auf die Nematodenreduzierung als auch auf den Rübenanbau keine re-

¹⁵ Die Resistenznote 1,5 ist keine offizielle Anfälligkeitsstufe der BBA und sollte daher stets in Anführungszeichen gesetzt werden.

levanten Vorteile bringt. STEUDEL ET AL. (1989, S. 199) sowie SCHLANG (1995, S. 48) kommen dagegen in einem Langzeitversuch auf einem landwirtschaftlichem Betrieb in Elsdorf/Rheinland zu dem Ergebnis, dass Phazellie als Zwischenfrucht zum deutlichsten Wiederanstieg der Nematodenpopulation unter Zuckerrüben führt, da Phazellie hemmend auf die Antagonisten des Nematoden wirkt und frei lebende Nematoden der Gattung *Pratylenchus* sowie das Rübenkopffälchen begünstigt. Nach LEHRKE (2003, S. 48) drohen sogar Mindererträge der Zuckerrüben nach Phazellie, wozu vor allem die schlechtere Durchwurzelung des Bodens beiträgt. Der Anbau von Phazellie wird daher von diesen Autoren nicht empfohlen.

3.2.4 Anbau resistenter Zuckerrüben

Die biologische Nematodenbekämpfung umfasst heute mehr als nur den Einsatz resistenter Ölrettich- oder Senfsorten. Durch die Einkreuzung von Resistenzgenen aus Wildarten der Sektion *Procumbentes* gelang es dem Züchter Hilleshög (Syngenta Seeds GmbH) 1998, eine nematodenresistente Kultursorte mit dem Namen Nematop für den deutschen Markt anzubieten. Im Jahr 2000 kam die Sorte Paulina der KWS Saat AG hinzu, die nicht nur nematodenresistent, sondern gleichzeitig auch rizomaniatolerant ist. Der große ackerbauliche Vorteil der aktiven biologischen Bekämpfung des Rübennematoden mit der Wirtspflanze Zuckerrübe selbst besteht in der leichteren Eingliederung in das bestehende Bodennutzungssystem, als dies bei Zwischenfrüchten der Fall ist.

Der Bekämpfungsmechanismus resistenter Zuckerrüben entspricht dem der nematodenresistenten Kreuziferen. Die Wirkungssicherheit ist ähnlich dem hauptfruchtartigen Anbau resistenter Kreuziferen auf Flächenstilllegung sehr hoch, je nach Jahr und Standort werden in der Literatur Reduktionsleistungen bis zu 80% (vgl. HEINRICHS, 2000, S. 68) genannt, so dass in der folgenden Rotation in aller Regel keine weitere Nematodenbekämpfung notwendig ist.

Die betrachteten Zuckerrübensorten weisen nicht nur eine Resistenz gegen den Schaderreger *H.schachtii* vor, sie erwiesen sich in vielen Untersuchungen und Feldversuchen auch als tolerant (vgl. HEINRICHS, 2000, S. 68; SCHLANG 2000b, S. 299; BALKE, 2001 sowie MÜLLER, 2002, S. 107). Die Toleranz ist besonders ausgeprägt in trockenen Jahren. Die nematodenresistenten Sorten zeigten ein besseres Kompensationswachstum, wurzelten tiefer und waren in ihrer Physiologie weniger negativ beeinflusst (MÜLLER, 2002, S. 107). HEIJBROEK UND WITHAGEN (1997, S. 226) sowie HEIJBROEK ET AL. (2002, S. 236) betonen dagegen, dass die Ertragstoleranz bei den nematodenresistenten Hybriden nie 100%ig sein wird, da eindringende Larven Hypersensitivitätsreaktionen auslösen und damit zu Wachstumsdepressionen führen. Aus diesem Grund werden die Erträge resistenter Sorten immer beeinflusst von steigenden Populationsdichten des Rübennematoden. Dies erklärt, warum z.B. SCHLANG (2000b, S. 300) bei den untersuchten resistenten Hybriden einen geringen nematodenbedingten Rückgang beim bereinigten Zuckerertrag von 1,0 dt/ha je 1.000 Eier und Larven Anfangsbesatzdichte feststellte. Dagegen zeigt nach MÜLLER (2002, S. 107) die tolerante Sorte Nematop selbst bei hohen Befallsdichten von >5.000 Eier und Larven keinen Ertragsabfall.

Mit der Einkreuzung von Fremdgenen aus der Wildrübenart wurden auch Eigenschaften übertragen, die als Nachteile der nematodenresistenten Kultursorten gegenüber den anfälligen anzusehen sind. HEINICKE UND WARNECKE (2000, S. 233ff.) nennen die in der Übersicht 3 zusammengestellten pflanzenbaulichen Nachteile sowie einen deutlich höheren Saatgutpreis.

Übersicht 3: Pflanzenbauliche Nachteile nematodenresistenter Zuckerrübensorten

1. ca. 10% Minderertrag unter Nichtbefall;
2. unterdurchschnittlicher Zuckergehalt;
3. unbefriedigende innere Rübenqualität der resistenten Sorten: höhere Ausbeuteverluste gegenüber den anfälligen Vergleichssorten, daher tendenziell geringere Qualitätsprämie;
4. verminderte Keimfähigkeit, langsame Jugendentwicklung und daher später Reihenschluss und größere Gefahr von Spätverunkrautung;
5. höhere Anfälligkeit gegenüber Blattkrankheiten (*Cercospora*, *Ramularia* und Mehltau), besonders Nematop;
6. Bildung von Blattwucherungen am Rübenkopf (Gallbildung, Mehrköpfigkeit) je nach Witterungsverlauf möglich;
7. geringere Schoßfestigkeit;
8. hohe Anfälligkeit für Rizomania (Nematop);

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an HEINICKE UND WARNECKE, 2000, S. 233ff.

Wann die Vorteile des Anbaus nematodenresistenter Zuckerrübensorten die zu erwartenden Nachteile überwiegen, ist in erster Linie eine Frage des Ausgangsbefalls auf einem Schlag. Bei geringem Befall kommt der Vorteil der Ertragstoleranz resistenter Sorten nicht zum Tragen, die o.g. Nachteile dagegen sind befallsunabhängig. Erst bei höheren Befalldichten, wenn anfällige und empfindliche Sorten mit deutlichen Ertragsdepressionen reagieren, überwiegt der konstante Ertrag der resistenten Sorten deren Nachteile. Als rein pflanzenbauliche Anbauschwelle für resistente Zuckerrüben, wenn der bereinigte Zuckerertrag der resistenten Sorten den der anfälligen übersteigt, werden P_i -Werte von ca. 500 bis 700 (LIZ, 2002) Eier und Larven genannt und als ökonomische Anbauschwelle ca. 1.000 Eier und Larven (HEINICKE UND WARNECKE, 2001b, S. 92 sowie LIZ, 2002). Wegen des Einflusses der Entscheidung für oder gegen resistente Zuckerrüben auf die Abundanzdynamik des Nematoden in den folgenden Jahren (Carry-over-Effekt) und damit auf die Entscheidungen in der weiteren Rotation ist eine solch statische Betrachtung allerdings unzureichend.

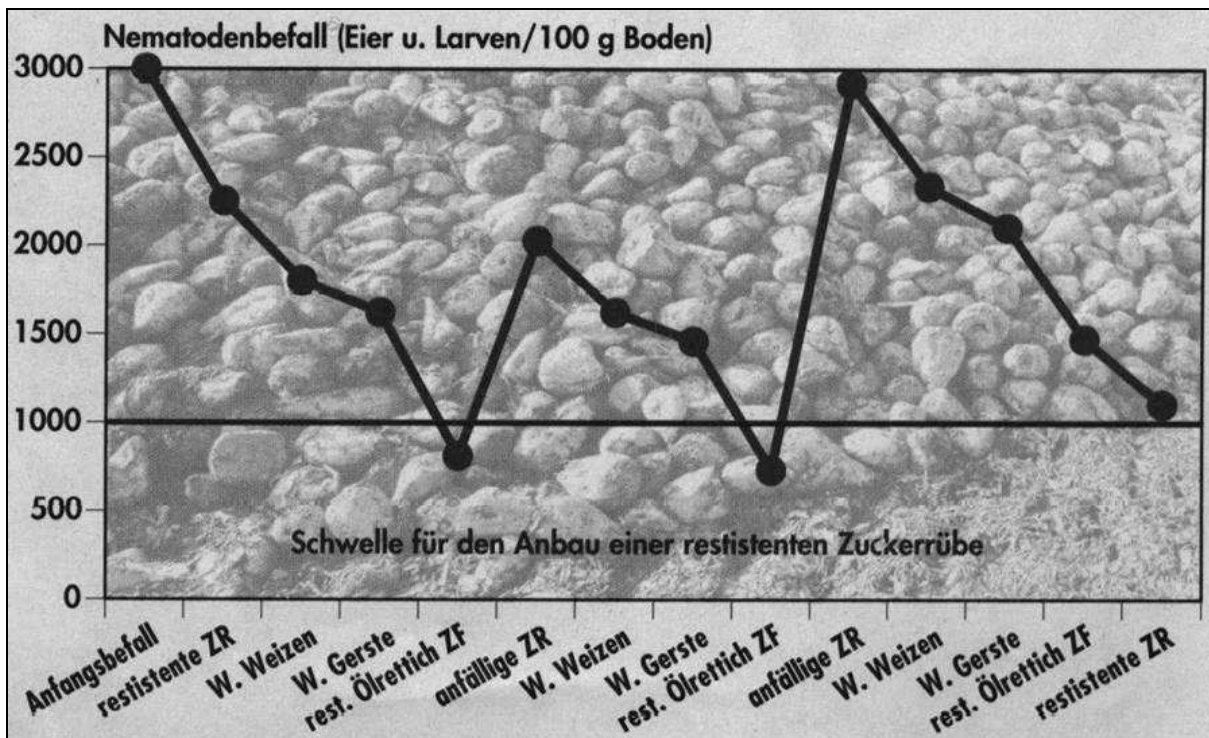
Die Akzeptanz nematodenresistenter Sorten in der Praxis ist gering. Die Sorte Nematop konnte sich aufgrund ihrer hohen Anfälligkeit gegenüber Rizomania in den süddeutschen Zuckerrübenanbaugebieten nicht etablieren und erreichte auch im Rheinland im Bereich des Zuckerunternehmens Pfeifer & Langen in den Jahren 1999 und 2000 nur einen Anteil von 1,8% bzw. 1,6% am ausgegebenen Saatgut (KREMER-SCHILLINGS, 2001, mündl.). Auch nach der Einführung der zweiten nematodenresistenten Kultursorte änderte sich wenig an der geringen Akzeptanz dieser Art der biologischen Nematodenbekämpfung. So wurden 2002 nach einer Umfrage des Instituts für Zuckerrübenforschung (IfZ) Göttingen nematodenresistente Sorten in der Region West, zu der das Rheinland zählt, auf 2% der Fläche eingesetzt (MERKES, 2003, S. 279). Im Rahmen der Saatgut-Frühbestellung, deren Anteil je nach am LIZ beteiligten Unternehmen zwischen 68 und 97% liegt, betrug der Anteil des Saatgutes mit Resistenz gegen Nematoden bei Pfeifer & Langen zur Saat 2004 3,2% und zur Saat 2005 (Frühbestellung) 3,0% (LIZ, 2004d). Dabei ist zu berücksichtigen, dass KWS die Sorte Paulina im Rheinland

nur „auf Rezept“ des KWS-Beraters zur Saat ausgibt (SIMON, 2000, mündl.). Grundsätzlich werden resistente Sorten von der landwirtschaftlichen Praxis akzeptiert. So ist der Anteil rizomaniatoleranter Sorten im Rheinland seit 1999 stark angestiegen von 4,1% auf 79,4% zur Saat 2003 (vgl. HAASE, 2003, S. 63). Erst die neuen gegen *H.schachtii* teilresistenten, aber toleranten Sorten könnten aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit (vgl. SCHLANG, 2005) zu einer höheren Akzeptanz dieser Form des aktiven Nematodenmanagements führen.

3.2.5 Erweitertes Resistenzmanagement

Die Resistenz gegen den Rübennematoden wird bei den vorhandenen Kultursorten oft nur durch ein Gen oder wenige Gene kontrolliert. Sind Resistenzeigenschaften stark ausgeprägt und spezifisch ausgerichtet - wie im Fall der nematodenresistenten Zuckerrüben - so kann durch häufigen Anbau ein Selektionsprozess auf der Seite der Nematoden einsetzen. Die Folge ist, dass die Erreger - dem Grundsatz der Erhaltung der Art folgend - die Resistenzbarriere irgendwann durchbrechen können (KWS, 2000, S. 52). Um dieser Gefahr zu begegnen, sind weiterhin der Einsatz von resistenten Ölrettich oder Gelbsenf als Zwischenfrüchte oder auf Flächenstilllegung, sowie der Wechsel von resistenten und anfälligen Zuckerrübensorten in der Fruchtfolge die wichtigsten Bestandteile eines so genannten Resistenzmanagements im Rahmen des INM. Unter dem Begriff Resistenzmanagement wird die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung der Bildung von Erregerrassen oder Pathotypen auf Seiten der Schadereger, die die Resistenz in Kulturpflanzen durchbrechen können, verstanden. Derartige Strategien sind Voraussetzungen dafür, dass die Resistenzeigenschaften in den Zuckerrüben langfristig erhalten bleiben (KWS, 2000, S. 53; vgl. HEINICKE UND WARNECKE, 2001a, S. 19f.). HEINICKE UND WARNECKE (2001c, S. 246) betonen daher, trotz resistenter Zuckerrüben Ölrettich und Senf nicht zu vernachlässigen und schlagen die folgende Fruchtfolge im Rahmen des erweiterten Resistenzmanagements vor, in der resistente Zuckerrüben nur eingesetzt werden, wenn der Ausgangsbefall zu Rüben oberhalb von 1.000 Eier und Larven liegt (Abbildung 19).

Abbildung 19: Fruchtfolge im erweiterten Resistenzmanagement



Quelle: HEINICKE UND WARNECKE, 2001c, S. 246, verändert

Noch ist nicht abzusehen, wann Sorten mit anderen Resistenzgenen als die mit Resistenz aus der Wildrübe *Beta procumbens* zur Verfügung stehenden Sorten auf den Markt kommen werden. Daher empfiehlt auch BALKE (2001, S. 67), die resistenten Sorten lediglich in größeren zeitlichen Abständen anzubauen, damit die jetzige Resistenzquelle möglichst lange nutzbar bleibt. Bei der in Anhang 6 vorgeschlagenen Fruchtfolge für das erweiterte Resistenzmanagement können hohe Ertragsleistung von Rüben, dauerhaft niedrige Populationsdichten des Nematoden sowie die Sicherung der Resistenz in Zuckerrüben erreicht werden, indem sich hoch nematodenresistenter Ölrettich und resistente Zuckerrüben bei der biologischen Nematodenbekämpfung abwechseln. Da in der Rotation mit resistenten Zuckerrüben keine weitere Nematodenbekämpfung notwendig ist, erfolgt deren Einsatz nur in jeder dritten Rotation.

Die Frage, ob es bereits resistenzbrechende Pathotypen bei *H. schachtii* gibt, ist umstritten. Nach MÜLLER (1992, S. 50) sowie HEINICKE UND WARNECKE (2001a, S. 20) konnten in Populationen von *H. schachtii* unter Gewächshausbedingungen nach mehreren aufeinander folgenden Generationen an der resistenten Rübe Pathotypen selektiert werden, die die Resistenz des hochresistenten Ausgangsstamms *B. procumbens* brechen konnten. Im Feld verläuft dieser Prozess allerdings langsamer und der Selektionsdruck, den die zugelassenen resistenten Kultursorten ausüben, ist geringer, da die Transmissionsrate der Resistenz nicht 100% beträgt (vgl. BALKE, 2001, S. 67). So erwiesen sich im Rahmen der zweijährigen Phase der amtlichen Resistenzprüfung der Kultursorte Nematop ca. 5% aller eigentlich resistenten Pflanzen als anfällig (MÜLLER, 1999a, S. 224), bei drei anderen Nachkommenschaften wurden Transmissionsraten von 99,2%, 99,3% und 99,6% festgestellt; nur in einem Fall lag der Wert mit 96,8% etwas niedriger (MÜLLER, 2001, S. 227). An diesem kleinen Anteil anfälliger Pflanzen konnte sich der Rübennematode vermehren, was in einigen Fällen fälschlicherweise zu der Annahme führte, dass es bereits resistenzbrechende Populationen im Feld gibt. Im Rahmen des Dauer-

versuchs der Biologischen Bundesanstalt für Landwirtschaft (BBA) mit Zuckerrüben-Monokultur, der seit 8 Jahren auch mit resistenten Sorten bestellt wird, hat bisher keine Pathotypenbildung stattgefunden (SCHLANG, 2003b, mündl.).

Die Gefahr der Pathotypenbildung besteht bei resistentem Ölrettich bzw. Gelbsenf soweit bisher bekannt nicht. Trotz zwanzigjähriger Erfahrungen aus dem Feldanbau sind bisher keine Typen des Rübenzystenälchens bekannt, die resistente Kruziferen überwinden können (HEINICKE UND WARNECKE, 2001a, S. 19). Sie verfügen über einen anderen, stärker quantitativ ausgerichteten Resistenzmechanismus, der wahrscheinlich polygen bedingt ist (MÜLLER, 2000, S. 227). Auch bei nematodentoleranten Zuckerrüben tritt das Problem der Selektion von Pathotypen nicht auf (BALKE, 2001, S. 55 und MÜLLER, 2002, S. 107). Da ab der Saat 2005 die erste tolerante Sorte zur Verfügung steht (vgl. Kapitel 2.3.2), kann zukünftig ein gezieltes Resistenzmanagement auch durch abwechselnden Anbau von resistenten mit toleranten Sorten erfolgen. Zum Aufbau einer abgestimmten Anbaustrategie mit der teilresistenten, aber toleranten Sorte sind allerdings noch weitere Versuche erforderlich (SCHLANG, 2005, S. 52).

3.3 Zusammenfassender Überblick

Integriertes Nematodenmanagement, die Anwendung der Prinzipien des Integrierten Pflanzenschutzes auf den Schaderreger Nematode, ist ein Systemansatz, der eine Vielzahl verschiedener Managementmaßnahmen umfasst, die zum Ziel haben, Schaden von der Kulturpflanze Zuckerrübe abzuwenden. Die zur Verfügung stehenden aktiven und passiven Kontrollmaßnahmen können lediglich im Vorfeld des Zuckerrübenanbaus, spätestens zur Saat der Zuckerrübe, durchgeführt werden. Sie tangieren die Prozessebenen Frucht, Feld und landwirtschaftlicher Betrieb und sind gekennzeichnet durch weit reichende, überjährige Folgen (Carry-over-Effekte). Unterstützung bei der Entscheidungsfindung durch Bereitstellung zusätzlicher Informationen erscheint daher angebracht.

Zentrale Elemente des INM sind das biologische Monitoring und die Anwendung von Bekämpfungsschwellen. Die Zustandsbeobachtbarkeit der Populationsdynamik des Nematoden ist sehr aufwendig, nur die Befallsfeststellung nach Zuckerrüben via Schwadbeprobung findet umfangreiche Anwendung in der Praxis. Die entwickelten Bekämpfungsschwellenkonzepte können lediglich als Richtgrößen angesehen werden und sind aufgrund des statischen Charakters in ihrer Aussagefähigkeit begrenzt.

Nicht alle der im Kapitel 3.2 vorgestellten Managementmaßnahmen werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit betrachtet. Dies gilt z.B. für verbindliche Fruchtfolge- und Anbauregelungen in den Liefer- oder Branchenvereinbarungen. Solche Regelungen stellen nicht nur einen nicht unerheblichen dirigistischen Eingriff in die unternehmerische Freiheit des Landwirts dar. Sie beschneiden auch die betrieblichen Anpassungsmöglichkeiten an sich immer schneller ändernde politische Rahmenbedingungen, die in zunehmendem Maße vom Landwirt verlangen, sein Produktionsprogramm den Gegebenheiten des Marktes anzupassen. Hinzu kommt, dass das Vorschreiben dreijähriger Fruchtfolgen alleine, d.h. ohne aktive Bekämpfungsmaßnahmen, für die Sanierung bereits verseuchter Flächen nicht zwangsläufig eine ausreichende Maßnahme ist.

Quarantänemaßnahmen zur Verhinderung der passiven Migration werden nicht betrachtet. Aufgrund der kaum vorhandenen Migrationsbewegungen des Nematoden finden Neuinfektio-

nen bzw. die Zufuhr von Nematoden hauptsächlich über die Rücknahme unbehandelter Rübenerde aus den Zuckerfabriken statt. Dies dürfte auch der Hauptweg der passiven Verbreitung zwischen Schlägen sein. Die Vermeidung dieser Art der Verbreitung wird als selbstverständlich angesehen.

Die Interaktion *H.schachtii* - Unkräuter wird ebenso wie die Fangpflanzenmethode und der Anbau von Phazalie zum Nematodenmanagement nicht weiter betrachtet. Der gezielten Bekämpfung von *H.schachtii* mit natürlichen Antagonisten oder Parasiten fehlt es noch an Praxisreife und Praxiserfahrungen. Dagegen wird das erweiterte Resistenzmanagement dem Nachhaltigkeitsanspruch des INM in besonderem Maße gerecht, verlangt aber vom Praktiker die langfristige Einhaltung einer einmal festgelegten Fruchtfolge. Zwischen nematodenresistenten Ölrettich- und Gelbsenssorten wird bezüglich ihrer abundanzregulierenden Wirkung nicht differenziert.

Der Einsatz neuer teilresistenter und toleranter Zuckerrübensorten, ob solo oder im Rahmen des erweiterten Resistenzmanagements, kann aufgrund noch fehlender umfassender Untersuchungen zur abundanzregulierenden Wirkung und zum langfristigen Ertrags- und Resistenzverhalten im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

4 Konzeption und Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems

Kapitel 4 bildet einen Schwerpunkt dieser Arbeit. Es umfasst vornehmlich die Entwicklung und Implementierung des modellbasierten Entscheidungsunterstützungssystems mit seinem biologisch-technischen Informationssystem. Zunächst wird jedoch das Konzept der Systemsimulation mittels Modellen vorgestellt. Anschließend wird jedes Partialmodell separat konzeptioniert, indem die funktionalen Zusammenhänge herausgearbeitet und die Parameter kalibriert werden, und schließlich verifiziert.

4.1 Systemsimulation mittels Modellen

Um die Charakteristika eines modellgestützten Entscheidungsunterstützungssystems nachvollziehen zu können, sollen an dieser Stelle die Grundlagen der Systemtheorie und die Begriffe System, Modell, Simulation und Entscheidungsunterstützungssystem erläutert werden.

4.1.1 Systeme

Ein System ist definiert als Anzahl von Objekten bzw. Elementen, zwischen denen bestimmte Beziehungen bestehen oder zumindest hergestellt werden können. Charakterisiert werden Systeme durch ihre Elemente, durch die Beziehungen zwischen den Elementen und durch ihre Beziehungen zur Umwelt. Systeme, die Zusammenhänge zwischen im Zeitablauf unveränderlichen Größen beschreiben, werden statische Systeme genannt. Dynamische Systeme charakterisieren dagegen Prozesse, die in der Zeit ablaufen (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 2). Das Verhalten dynamischer Systeme wird maßgeblich von Inputs und Parametern beeinflusst. Inputs sind Größen, die das System von außen beeinflussen. Nicht kontrollierbare Inputs (Umwelteinflüsse) werden selbst nicht vom System beeinflusst. Kontrollierbare Inputs werden dagegen ausdrücklich vom Nutzer des Systems zur Beeinflussung des Systemzustands bzw. der Outputs eingesetzt (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 4). Parameter sind Größen, die über den Zeitraum der Beobachtung des Systems konstant bleiben. Inputs und Parameter beeinflussen gemeinsam die Entwicklung der Zustandsgrößen, die den Systemzustand beschreiben, und die der Systemoutputs, Größen, die das System verlassen (ebd., S. 5).

4.1.2 Modelle

Unter einem Modell wird die vereinfachte Nachbildung realer bzw. gedachter Systeme verstanden (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 8). Modelle dienen als methodische Hilfsmittel zur Problemerkennung und -lösung. Tritt bei der Systemanalyse ein Modell an die Stelle des Originalsystems und werden Experimente mit diesem Modell durchgeführt, um Einsichten in die Strukturen und Verhaltensweisen des realen Systems zu gewinnen, spricht man ganz allgemein von Simulation (vgl. PAGE, 1991, S. 7 sowie BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 137).

Statische Modelle sind dadurch gekennzeichnet, dass sie den Zeitverbrauch für einen Transformationsprozess nicht beinhalten. Sie beziehen Input und Output auf einen Zeitpunkt (STEFFEN UND BORN, 1987, S. 24). Dynamische Modelle zeichnen sich dagegen nicht nur durch die Zeitabhängigkeit des Modellzustandes aus, sondern es besteht auch mindestens bei einer Variablen eine Verknüpfung von vor- und nachgelagerten Perioden, so dass die Änderungen der

Variablen ihrerseits einen Einfluss auf das Modellsystem nehmen (vgl. HESSELBACH UND EISGRUBER, 1967, S. 19). Die Zustandsvariablen eines kontinuierlichen Modells lassen sich durch stetige Funktionen beschreiben. Bei diskreten Modellen ändern sich die Werte der Zustandsvariablen dagegen sprunghaft zu bestimmten, auf der Zeitachse diskret verteilten Zeitpunkten (PAGE, 1991, S. 6).

Deterministisch heißt ein Modell, wenn seine Reaktion auf eine bestimmte Eingabe, ausgehend von einem bestimmten Zustand, eindeutig festgelegt ist. Lassen sich die Reaktionen des Modells nur durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. durch deren Momente beschreiben, nennt man es stochastisch (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 27). Die Ursache der Stochastik ist entweder der Einfluss von Störgrößen aus der Systemumwelt, die zu stochastischen Inputgrößen führen oder auf den durch das Modell beschriebenen Transformationsprozess wirken, der dann stochastische Elemente aufweist (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 27f.), oder das Vorliegen von Messfehlern. Deterministische Modelle implizieren das Vorliegen vollkommener Informationen. Diese Annahme führt dazu, dass die Wirklichkeitsnähe deterministischer Modelle im Allgemeinen gering ist (vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 27).

Der Verwendungszweck eines Modells ist durch die Fragestellung und Zielsetzung der Modellstudie festgelegt (PAGE, 1991, S. 7). Es werden Erklärungs-, Prognose- und Entscheidungsmodelle unterschieden. Die Anforderungen an die Modelle unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Verwendungszweck (vgl. BERG ET AL., 1988, S. 1 sowie BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 8f.). Ein Erklärungsmodell muss die Struktur des Originalsystems sowie die Beziehungen zwischen den Subsystemen so detailliert abbilden, dass es zur Erklärung des beobachteten Systemverhaltens herangezogen werden kann (Strukturisomorphie). Man spricht von einem strukturierten oder mechanistischen Ansatz. Ein Prognosemodell dient dazu, künftige Systemzustände unter dem Einfluss kontrollierbarer und nicht kontrollierbarer Variablen abzuschätzen (vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 216). Hierbei steht die Verhaltensisomorphie im Vordergrund (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 9 sowie KOLLIG, 1993, S. 21). Es ist durchaus möglich, dass ein bestimmtes Modell als Prognoseinstrument nützlich ist, ohne das Systemverhalten zu erklären. Man spricht in diesem Fall von einem Black-Box-Ansatz, da die innere Struktur des Modells keinerlei Erklärungsgehalt aufweist (BERG ET AL., 1988, S. 1). Entscheidungsmodelle dienen dem Erarbeiten von Modellstrukturen und der Erfassung von Wirkungen kontrollierbarer Inputvariablen auf einen zielorientierten Systemzustand. Die einzelnen Modelle bauen aufeinander auf. So sind Prognosemodelle auf Erklärungsmodelle angewiesen, die ihrerseits Kenntnisse über den Systemzustand verlangen. Das Entscheidungsmodell seinerseits setzt das Prognosemodell voraus (STEFFEN UND BORN, 1987, S. 216).

Die Vorgehensweise bei der Modellbildung wurde in der Literatur wiederholt detailliert beschrieben (vgl. HESSELBACH UND EISGRUBER, 1967, S. 35ff.; FERRIS, 1981, S. 408f.; BERG ET AL., 1988, S. 2f.; PAGE, 1991, S. 10ff. sowie BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 7f.), so dass an dieser Stelle auf eine Darstellung verzichtet werden kann. Das zu entwickelnde Entscheidungsunterstützungssystem soll modular aufgebaut sein. Ein modularer Modellaufbau gestattet es, unterschiedliche Modellteile getrennt voneinander zu entwickeln und damit auch verschiedene Informationsquellen zur Quantifizierung der Modellparameter zu nutzen (BERG ET AL., 1988, S. 3). Als weitere Vorteile eines modularen Modellaufbaus sind zu nennen:

1. Das Verhalten der Elemente eines Subsystems ist oft besser bekannt als das des komplexen Gesamtsystems, so dass die Modellentwicklung insgesamt einfacher wird.

2. Die Konzeption der Submodelle kann methodisch unabhängig voneinander erfolgen. Für jedes Modell kann die problem- und lösungsadäquate Methode gewählt werden.
3. Bei verbesserter Information können einzelne Modellteile angepasst werden, ohne das gesamte Modell zu ändern.
4. Ergänzung und Erweiterung einzelner Module werden einfacher.

4.1.3 Entscheidungsunterstützungssysteme

Mit dem Begriff Entscheidungsunterstützungssystem (kurz EUS, englisch: decision support system, dss) werden im Allgemeinen Planungssysteme bezeichnet, die den Planungsprozess in Form von Modellanalysen begleiten bzw. in den wichtigsten Stufen unterstützen (vgl. SCHNEEWEISS, 1992, S. 167). Ziel eines EUS ist es, dem Entscheidungsträger aufzuzeigen, wie sich das Ergebnis einer Handlungsalternative ändert, wenn sich der Ausgangswert oder die Systemumweltgrößen verändern („Was-wäre-wenn?“-Prinzip). EUS geben somit Entscheidungshilfen für eine verbesserte Entscheidungsfindung, da durch Variation der kontrollierbaren Inputvariablen die Möglichkeit besteht, im Sinne des vorliegenden Entscheidungsproblems schlechte von guten Entscheidungen zu differenzieren (vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 277). Die Entscheidungsunterstützung kann die Bereiche Informationsbeschaffung, Definition von Zielen und Zielpräferenzen, Auswahl geeigneter Handlungsalternativen sowie Bewertung zielbezogener Handlungskonsequenzen umfassen (vgl. SCHNEEWEISS, 1992, S. 167ff.), entbindet den Entscheidungsträger aber nicht aus seiner Verantwortung, selbst die „beste“ Entscheidung zu treffen.

Je größer die Komplexität des betrachteten Entscheidungsproblems und je größer der Einfluss vorangegangener und/oder zukünftiger Entscheidungen ist, desto eher bieten sich Computermodelle bei der Entscheidungsunterstützung an, die die Effizienz und Effektivität der Informationsverarbeitung steigern. In einem EUS bleibt dabei nach KURBEL (1992, S. 113) die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Software erhalten, wobei der Computer z.B. die Simulation ausführt, die Interpretation der Ergebnisse, die Beurteilung von Alternativen oder die Wahl der Problemlösungsstrategien aber vom Menschen vorgenommen werden. Entscheidungsunterstützungssysteme verbinden daher die Fähigkeit des Computers, strukturierte Probleme zu lösen, mit der Fähigkeit des Menschen, heuristische Entscheidungen zu treffen und unstrukturierte Aufgaben zu bewältigen. Im Gegensatz hierzu übernimmt ein Expertensystem, das gleichermaßen auf ein Simulationsmodell als Informationssystem zurückgreift, auch die Auswertung dieser Daten.

4.2 Anforderungen an das Entscheidungsunterstützungssystem

Das zu entwickelnde Modell soll als Entscheidungsunterstützungssystem im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements eingesetzt werden. In diesem Kapitel wird diskutiert, welche Anforderungen sich aus den zuvor vorgestellten Managementmaßnahmen des Integrierten Nematodenmanagements für die Modellkonzeption ergeben.

4.2.1 Leistungsumfang

Die immer komplexer werdenden Produktionstechniken und Managementaufgaben verlangen in zunehmendem Maße Eingriffe in die der Produktion zugrunde liegenden biologischen Systeme. Zur Abschätzung der Auswirkungen derartiger Eingriffe bedient man sich in verstärktem Maße systemtheoretischer Modelle, die allgemein als bio-ökonomische Modelle bezeichnet werden. Derartige Modelle beschreiben in ihrem Kern den Ablauf biologischer Prozesse mit dem Ziel, Eingriffe in diese ökonomisch zu bewerten (vgl. BERG ET AL., 1988, S. 1). Ein Entscheidungsunterstützungssystem für das Integrierte Nematodenmanagement muss in der Lage sein,

1. die Abundanzdynamik des Rübenzystennematoden unter Wirts- und Nichtwirtskulturpflanzen und unter dem Einfluss passiver und aktiver Managementmaßnahmen sowie
2. die Ertragsdynamik der Zuckerrübe mit und ohne dem Einfluss des Schaderregers nachbilden und prognostizieren zu können und darüber hinaus
3. die physischen Modelloutputs in monetäre Größen zu transformieren, um auf dieser Basis das Finden in Hinblick auf eine ökonomische Zielgröße guter bzw. optimaler Entscheidungen unterstützen zu können.

Diese Kompartimente des Informationssystems zum Entscheidungssystem bilden aufgrund ihrer Größe und Komplexität selbst (Sub-)Systeme, so dass sich ein modularer Aufbau des EUS anbietet.

Vor allem die Erfassung der Dynamik in den biologisch-technischen Systemen Nematode und Zuckerrübe ist für die Entscheidungsunterstützung im Rahmen des INM von Bedeutung, da es bei mangelnder Berücksichtigung dieser Prozesse zu Fehlern bei der Abschätzung der Endzustände kommen kann. Ebenso kommt der Nachbildung der Stochastik in diesen Systemen eine zentrale Bedeutung zu. Sowohl die Populationsdynamik des Schaderregers als auch die Ertragsdynamik der Zuckerrübe und die Interaktion *H.schachtii*-Zuckerrübe unterliegen dem Einfluss der Witterung (vgl. Kapitel 2.2.3.4 und 2.3.3). Sehr große Abweichungen in beide Richtungen können eintreten, so dass nur bei entsprechender Nachbildung zielkonforme Entscheidungen getroffen werden können (vgl. ESSER, 1992, S. 10). Als Konsequenz ergeben sich zwingend dynamische und stochastische Modellansätze für die beiden biologischen Systeme. Da diese ausschließlich als Prognosemodelle dienen, muss Verhaltensisomorphie gewährleistet sein. Strukturisomorphe mechanistische Ansätze sind daher nicht zwingend erforderlich. Die Langfristigkeit der abundanzregulierenden Wirkung der aktiven und passiven Maßnahmen des Nematodenmanagements verlangt darüber hinaus die Entwicklung mehrperiodischer Modellansätze.

4.2.2 Standortspezifität

Das Modell muss in erster Linie in der Lage sein, die für die biologisch-technischen Partialmodelle relevanten naturräumlichen Verhältnisse im Rheinland wiederzugeben (Standortspezifität). Desgleichen gilt für die ökonomisch-politischen Rahmenbedingungen im Untersuchungsgebiet, die maßgeblich sind für die ökonomischen Bewertungen. Andererseits muss das Modell auch so flexibel sein, dass nur mit geringem Aufwand eine Anpassung an andere Standort- und Umweltbedingungen möglich ist.

4.2.3 Implementierung

Der Modellprototyp soll auf PC-Ebene als eigenständig lauffähige Software (sog. stand-alone-Lösung) implementiert werden, um so die Eignung und breite Anwendbarkeit des Entscheidungsunterstützungssystems für die landwirtschaftliche Praxis zu gewährleisten. Ebenso soll eine geeignete graphische Benutzeroberfläche für das EUS entwickelt werden. Durch die Entwicklung der stand-alone-Software ist es ohne weiteres möglich, das Entscheidungsunterstützungssystem zu einem späteren Zeitpunkt an landwirtschaftliche Betriebe und Berater im Sinne einer Praxiserprobung und weiteren Überprüfung (Modellvalidierung) weiterzugeben. So kann das EUS Landwirten unmittelbar oder mittelbar (über Beratungsinstitutionen) eine Unterstützung in ihrer konkreten Betriebssituation liefern und auf seine Praxiseignung und Anwenderfreundlichkeit überprüft werden.

4.3 Modell zur Abbildung der Populationsdynamik von *H.schachtii*

In diesem Kapitel wird zunächst der Zweck des zu entwickelnden Submodells definiert und die sich daraus ergebenden Anforderungen an das Modell dargestellt. Anschließend werden modelltheoretische Grundlagen der Populationsdynamik beschrieben, vorhandene Modelle und Ansätze vorgestellt und bewertet und schließlich ein eigener Modellansatz entwickelt.

4.3.1 Einordnung des Subsystems im Entscheidungsunterstützungssystem

Die Entwicklung des Modells zur Nachbildung der Populationsdynamik des Nematoden erfolgt unter der Zielsetzung der Integration in ein System, das die Entscheidungsfindung im Rahmen des INM unterstützt. Das zu entwickelnde biologisch-technische Prognosemodell muss somit als Informationssystem die Grundlage für die zu fällenden Entscheidungen bereitstellen, indem es in mehr oder minder formalisierter Form das verfügbare technologische Wissen repräsentiert, mit dem die Konsequenzen der zur Wahl stehenden Handlungsalternativen bestimmt werden können (vgl. BLÖNNIGEN, 1986, S. 51). Daher muss das Modell in der Lage sein, die Abundanzdynamik unter anfälligen und resistenten Zuckerrüben, Nichtwirtpflanzen, resistenten Kruziferen als Zwischenfrüchte und als Begrünung von Flächenstilllegung sowie unter Brache verhaltensisomorph nachzubilden. Dies setzt voraus, dass im gewählten Modellansatz die wesentlichen der in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Zusammenhänge und Einflussgrößen in geeigneter Weise Berücksichtigung finden.

4.3.2 Modellgrundlagen

Aus der Sicht eines Modellbauers ist die Immobilität der Nematoden der Gattung *Heterodera* ein Vorteil, da aktive Migrationsbewegungen bei der Konzeption eines Modells zur Simulation der Populationsdynamik vernachlässigt werden können.

4.3.2.1 Logistisches Wachstum

Die mathematische Formulierung populationsdynamischer Modelle ist abhängig von der in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Art der Zustandsübergänge im betrachteten biologischen System. Bei stetigen Populationsänderungen ermöglichen einfache oder gekoppelte nichtlineare Differentialgleichungsmodelle die realitätsnahe Abbildung solcher Systeme. In der Populationsdy-

namik gibt es aber auch diskrete Prozesse, die sich nicht mehr durch stetige Modelle approximieren lassen. Diskrete Prozesse lassen sich mit Hilfe von Differenzgleichungen beschreiben und finden dort Verwendung, wo Populationen mit getrennten Generationen oder verschiedenen Entwicklungsstadien auftreten (vgl. RICHTER, 1985, S. 3 und S. 24 sowie BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 26). Bei überlappenden Generationen, wie es bei *H.schachtii* der Fall ist (vgl. Kapitel 2.2.3.1), finden im Grenzfall wieder stetige Modelle, d.h. Differentialgleichungen (Gleichung 3), Verwendung (vgl. SCHMIDT, 1992, S. 3).

Natürliche Wachstumsprozesse sind durch eine Limitierung auf einen maximalen Wert gekennzeichnet, bedingt durch die begrenzte Verfügbarkeit der von der Umwelt bereitgestellten Wachstumsfaktoren. Dies gilt auch für Nematoden, auch wenn kurzfristig exponentielles Wachstum, vor allem bei geringen Populationsdichten, möglich ist. Dieses Wachstum kann nicht unendlich beibehalten werden, mit zunehmender Populationsdichte begrenzen die Nahrungsversorgung oder andere Umwelteinflüsse das Wachstum (MCSORLEY, 1998, S. 116). Damit das Populationsmodell verhaltensisomorph ist, muss die Reproduktionsrate mit der Dichte der Population abnehmen. Die einfachste Möglichkeit ist es, einen linearen Zusammenhang zwischen der Dichte und der Reproduktionsrate zu postulieren (RICHTER, 1985, S. 3). Es ergibt sich die nichtlineare Differentialgleichung 3

$$\frac{dy}{dt} = r_0 y \left(1 - \frac{y}{K} \right) \quad (3)$$

und für die o.g. Anfangsbedingung die in Gleichung 4 vorgestellte Lösung.

$$y(t) = \frac{Ky_0}{y_0 - (y_0 - K)e^{-r_0 t}} \quad (4)$$

Gleichung 4 ist die bekannte Wachstumsfunktion für logistisches oder retardiertes Wachstum von VERHULST und PEARL (zitiert bei RICHTER, 1985, S. 3). Für $t \rightarrow \infty$ erreicht die Population den Wert K , die von der Umwelt vorgegebene Kapazität.

4.3.2.2 Critical-point-Modelle

Im nematologischen Kontext ist die kontinuierliche Beobachtbarkeit der Population des betrachteten Schaderregers in der Praxis nicht gegeben (siehe Kapitel 3.1.2), die Zustandsbeobachtbarkeit beschränkt sich auf die P_i - und P_f -Werte. Als erste bildeten OOSTENBRINK (1966) und SEINHORST (1966) für Nematoden unter Wirtspflanzen funktionale Beziehungen der Form $P_f = f(P_i)$ ab. Diese diskreten Modelle, die sich auf eine einzige Betrachtung des Systems (hier: P_i -Wert) als Basis für die Vorhersage des Systemverhaltens (hier: Abundanzdynamik, P_f -Wert) beziehen, werden als *critical-point*-Modelle bezeichnet.

OOSTENBRINK (1966, S. 9ff.) leitet aufbauend auf unterschiedlichen Dichteabhängigkeiten der Vermehrungsrate r Vermehrungskurven für verschiedene Nematoden-Wirtspflanzen-Systeme mit unterschiedlichen Verläufen für geringe Ausgangsbefallsdichten ab. Als Kurvenverläufe bei sehr hohen Befallsdichten kommen nach OOSTENBRINK (1966, S. 11) eine „Sättigungskurve“ (asymptotische Annäherung an die Umweltvariable K) oder ein Wiederabsinken der Befallsdichten nach Überschreitung eines Maximums („Maximumkurve“) in Frage.

SEINHORST (1966, S. 160) differenziert nach der Biologie der betrachteten Nematoden und übernimmt für sich kontinuierlich vermehrende wandernde Nematoden die logistische Wachstumsfunktion, um daraus einen funktionalen Zusammenhang zwischen P_f - und P_i -Wert abzuleiten.

$$P_f = \frac{aKP_i}{(a-1)P_i + K}, \text{ mit } a = e^{r_0(t_f-t_i)} \quad (5)$$

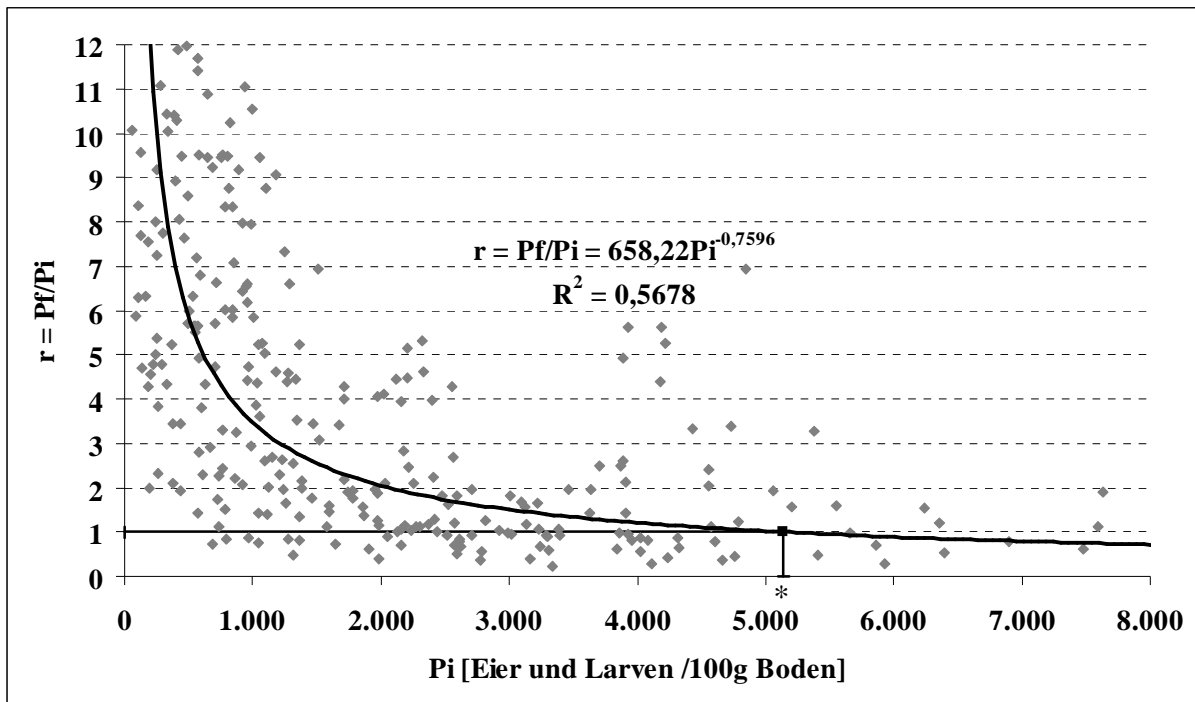
Für sedentäre Nematoden erweitert SEINHORST (1967a, S. 157) den in Gleichung 5 vorgestellten Ansatz, indem er den „verfügbaren Nahrungsraum“, d.h. den Anteil des pflanzlichen Gewebes, der noch nicht parasitiert wird, mit einbezieht, und passt ihn anschließend für sich in getrennten Generationen sowie kontinuierlich vermehrende Nematoden an.

Mangels geeigneter Versuchsanstellungen und deren Auswertungen, die für die Quantifizierung der Parameter der erweiterten Ansätze notwendig sind (vgl. SEINHORST, 1967a, S. 161), begnügen sich Nematologen heutzutage i.d.R. mit einem statischen Black-Box-Ansatz. Der Verlauf der Populationsentwicklung zwischen den Befallserhebungen ist im Gegensatz zu SEINHORST (1966) nicht mehr Gegenstand der Betrachtungen, statt dessen wird lediglich mit empirischen Regressionsmodellen ein funktionaler Zusammenhang zwischen P_i - und P_f -Wert postuliert, um anschließend die Parameter dieser Beziehung zu schätzen, die eine möglichst gute Anpassung an die empirischen Daten ergeben.

Für die Regressionen in critical-point-Modellen erwiesen sich überwiegend Potenzfunktionen (Gleichung 6) als am geeignetsten, den Verlauf von in Versuchen ermittelten Vermehrungsraten r in Abhängigkeit vom Ausgangsbefall wiederzugeben (vgl. STEUDEL UND MÜLLER, 1983; FERRIS, 1985; SCHLANG, 1985; FERRIS UND NOLING, 1987, S. 70). Bei der Ermittlung von Ausgleichskurven zur Abbildung der Abundanzdynamik unter verschiedenen resistenten Kruziferen testete SCHLANG (1997, S. 231) verschiedene Modelle und kam ebenfalls zu dem Ergebnis, dass in fast allen Fällen eine Potenzfunktion gegenüber einer linearen, logarithmischen oder exponentiellen Kurvenanpassung das höchste Bestimmtheitsmaß zeigte.

$$r = \frac{P_f}{P_i} = aP_i^{-b} \Leftrightarrow P_f = aP_i^{1-b} \quad (6)$$

In der Gleichung 6 ist die Konstante a ein Skalierungsfaktor und b eine ratenbestimmende Variable (FERRIS UND NOLING, 1987, S. 70). Wie beim logistischen Wachstum ist die Vermehrungsrate r bei geringen P_i -Werten am höchsten und sinkt kontinuierlich, aber eben nicht linear, mit steigendem Ausgangsbefall. Die dichteabhängige Vermehrung wird durch Abbildung 20 verdeutlicht. Diese zeigt die von SCHLANG in zahlreichen Versuchen in den Jahren 1995-2000 ermittelten Vermehrungsraten von *H.schachtii* unter anfälligen Zuckerrüben.

Abbildung 20: Dichteabhängige Vermehrung von *H.schachtii* unter Zuckerrüben

* Wirtsspezifische Verseuchungsdichte ($r = 1$) für anfällige Zuckerrüben, vgl. Kapitel 2.2.3.1

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHLANG, 2002, S. 204

Abbildung 20 zeigt auch, dass die Regression für die Vermehrungsrate r bei sehr kleinen P_i -Werten gegen unendlich strebt. Es ist daher nicht nur mathematisch, sondern auch biologisch sinnvoll, den Gültigkeitsbereich der Regression auf den höchsten beobachteten Wert der Vermehrungsrate zu begrenzen (vgl. FERRIS UND NOLING, 1987, S. 72).

Die bisher vorgestellten zeitdiskreten Ansätze bilden die Abundanzdynamik zwischen P_i - und P_f -Wert einer Vegetationsperiode, also zwischen Saat und Ernte bzw. Umbruch der betrachteten Wirtspflanze, ab. Für eine überjährige Betrachtung, z.B. für ein Modell über eine Fruchtfolge, bedarf es daher noch eines Ansatzes zur Abbildung der Populationsdynamik über Winter und unter Nichtwirtspflanzen. Die Formulierung dieser Ansätze erfolgte in der Vergangenheit sowohl mit dichteabhängigen als auch mit konstanten Abbauraten, wodurch die bereits im Kapitel 2.2.3.4 beschriebene Kontroverse über die Dichteabhängigkeit der Abundanz für den Zeitraum, in dem keine Wirtspflanze aufsteht, widerspiegelt wird. ROBERTS ET AL. (1981) verwendeten dafür bei Untersuchungen von *H.schachtii* einen zeitkontinuierlichen Ansatz auf der Basis der exponentiellen Zerfallsfunktion mit dem Startwert 1 (Gleichung 7, vgl. RICHTER, 1985, S. 2).

$$P = ae^{-bt} \quad (7)$$

Bei diesem Ansatz ist der Populationsrückgang unmittelbar nach der Ernte der Wirtspflanze am stärksten und wird im Laufe der Zeit geringer. FERRIS (1985) postulierte einen dichteabhängigen Ansatz für die Überwinterung mit einer Potenzfunktion wie für die Abundanz unter Wirtspflanzen (Gleichung 8) und belegte diesen Ansatz für *Meloidogyne incognita* empirisch.

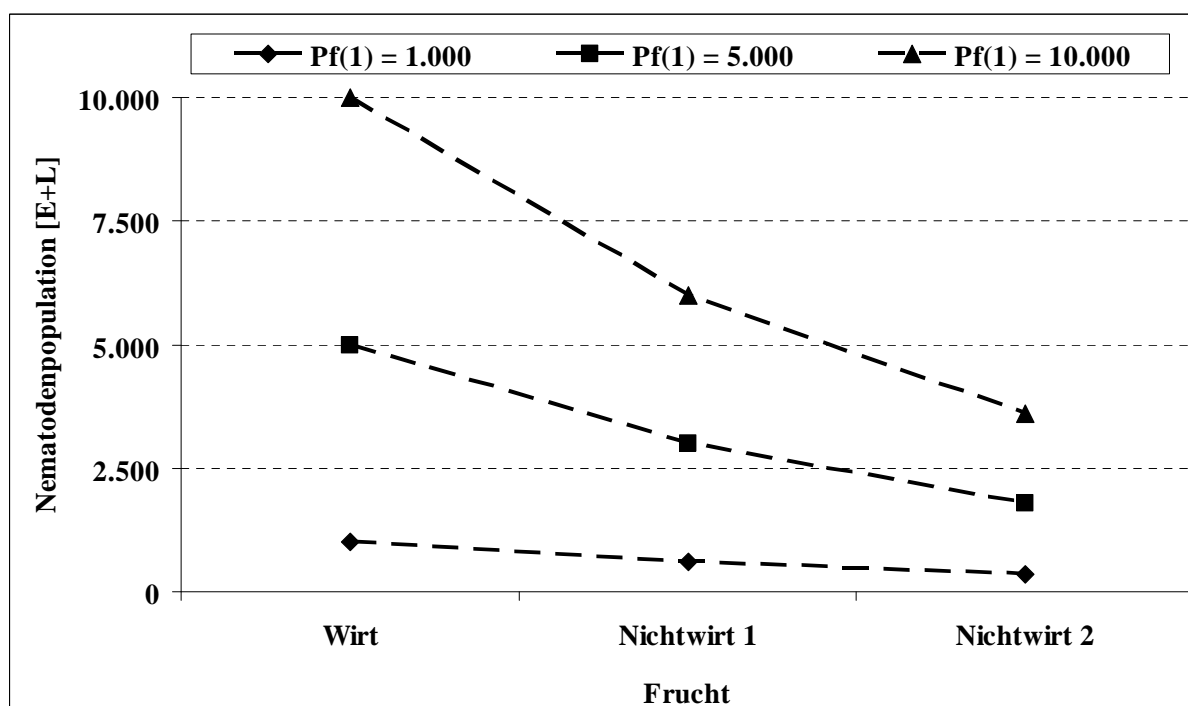
$$\frac{P_{i2}}{P_{f1}} = cP_{f1}^{-d} \Leftrightarrow P_{i2} = cP_{f1}^{1-d} \quad (8)$$

Wie bereits bei der Populationsdynamik unter Wirtspflanzen gibt es auch an dieser Stelle vereinfachte Ansätze, die auf die Trennung zwischen Überwinterung und Nichtwirtsphase verzichten, eine konstante Abbaurrate s annehmen und den prozentualen Abbau über eine diskrete Zeitspanne (i.d.R. ein Jahr) empirisch ermitteln. Dieser vereinfachte Ansatz (Gleichung 9) ist nach SCHLANG (2001, mündl.) sachgerecht, da eine Trennung der Effekte Vegetationsruhe und Nichtwirtspflanze auf die Nematodenpopulation methodisch kaum möglich ist.

$$P_{i2} = (1 - s)P_{f1} \quad (9)$$

In der Literatur finden sich Abbauraten von 30-80% per annum (vgl. DECKER, 1963, S. 139; WINNER, 1982, S. 185; COOKE, 1987, S. 142; DUDA UND FISCHER, 1988, S. 158; LAUENSTEIN 1991, S. 132 sowie WHITEHEAD, 1998, S. 202), wobei unter mitteleuropäischen Bedingungen 40-60% am häufigsten genannt werden. Nicht immer ist anhand der Literaturquelle erkennbar, ob sich die angegebenen Abbauraten stets genau auf ein (Kalender-)Jahr als Zeitreferenz beziehen, oder ob z.B. die Angabe über den Populationsrückgang im Jahr nach Zuckerrüben nicht auch den Zeitraum zwischen Zuckerrübenenernte und Jahresende umfasst. Dass eine konstante Abbaurrate nicht gleichzusetzen ist mit konstantem absolutem Abbau, verdeutlicht Abbildung 21 für eine Abbaurrate von 40% p.a. bei unterschiedlicher Ausgangsverseuchung. Die Verbindungslinien zwischen den (Mess-)Punkten haben bei einem zeitdiskreten Ansatz im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Modell keinerlei Gültigkeit bezüglich der Wiedergabe des Verlaufs der Populationsentwicklung; sie dienen lediglich der Verbesserung der Übersichtlichkeit.

Abbildung 21: Populationsrückgang mit konstanter Abbaurrate



Quelle: Eigene Darstellung

In anderen Versuchsanstellungen wurde dagegen eine im ersten Jahr nach der Wirtspflanze höhere und im Laufe der folgenden Jahre sinkende Abbaurate ermittelt (vgl. FICHTNER ET AL., 1982, S. 16f.). LAUENSTEIN (1991, S. 132) zitiert Quellen, die von einem degressiven Populationsrückgang bei den Kartoffelnematoden sprechen, z.B. von 40% im ersten Jahr nach Kartoffeln, über 30% im zweiten und 20% im dritten Jahr. SCHMIDT (1992, S. 22) unterstellt bei *H.schachtii* 60% Reduktion im ersten und 40% in den folgenden Jahren.

An der Biologischen Bundesanstalt wurde bereits frühzeitig die Abbaudynamik von *H.schachtii* in einer Fruchtfolge untersucht. Für die rheinische Fruchtfolge Zuckerrüben – Winterweizen – Wintergerste konnten erstmals STEUDEL UND MÜLLER (1983, S. 367) einen typischen Verlauf über die Jahre feststellen. Wird die Populationsdichte nach Zuckerrüben, d.h. der P_f -Wert, 100% gesetzt, konnten nach dem folgenden Weizen im Mittel noch 53% der Ausgangspopulation ermittelt werden. Nach der Gerste im dritten Jahr und damit zum folgenden Rübenanbau betrug die Nematodenverseuchung noch 33% der Ausgangssituation. Nach neueren Untersuchungen von SCHLANG (1999b, S. 2) kann dieser Modellansatz beibehalten werden, lediglich die Zahlen ändern sich minimal auf 100%, 50% und 33%. Der Populationsabbau ist demnach im ersten Jahr mit 50% am größten und sinkt im zweiten Jahr nach Rüben auf 34% ab. Wird nach der Wintergerste im dritten Jahr eine nematodenresistente Zwischenfrucht angebaut, kann nach dieser regelmäßig noch 20% der Ausgangspopulationsdichte nach den Zuckerrüben gemessen werden. Auch wenn die Gültigkeit dieses „100-50-33(-20)“-Ansatzes auf die o.g. Fruchtfolge und konventionelle Bewirtschaftung mit wendender Bodenbearbeitung beschränkt ist (SCHLANG, 2003a, mündl.), wird er im Rheinland für die Vorhersage des Nematodenbefalls zum kommenden Zuckerrübenanbau anhand der Ergebnisse der Schwadbeprobung verwendet (vgl. HEINRICHS, 2004a) und von SCHLANG (2004b, mündl.) zu einem allgemeinen Abbaumodell nach Gleichung 10 erweitert.

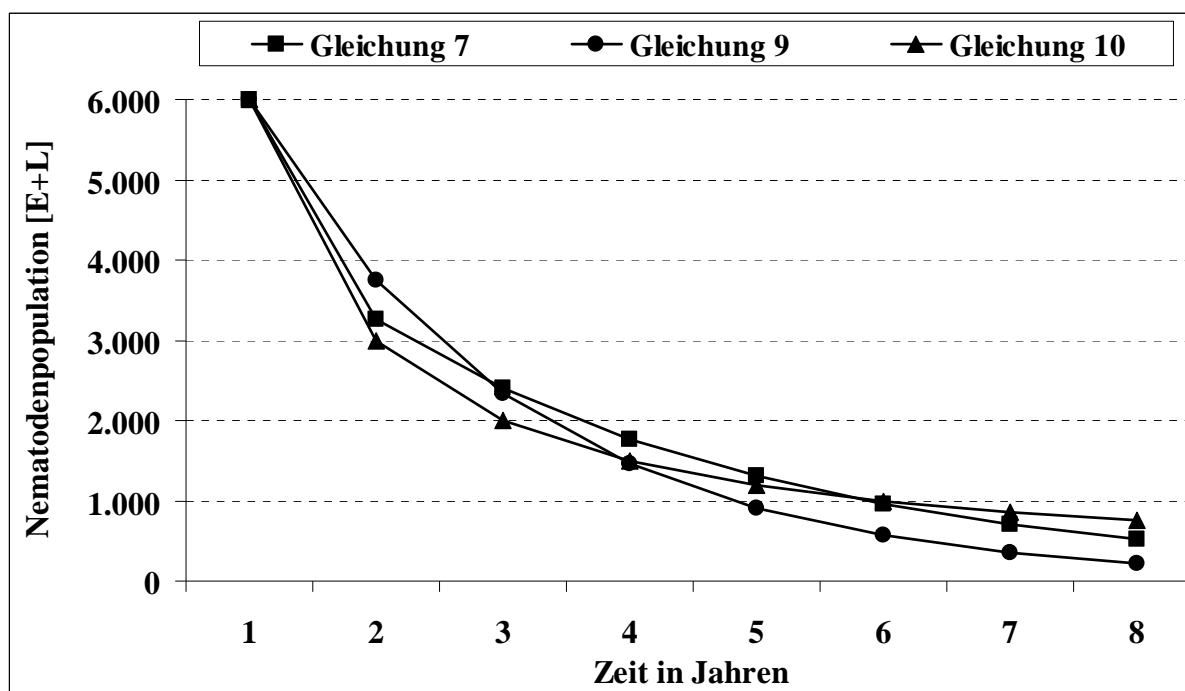
$$B = Pn^{-1} \quad (10)$$

Es gelten folgende Bezeichnungen:

- B = Besatzdichte in Eier und Larven / 100ml Boden nach den Folgefrüchten
- P = P_f -Wert nach den ersten Zuckerrüben
- n = Zeit in Jahren mit n_1 = nach Zuckerrüben

In der folgenden Abbildung 22 wird die Abnahmeprogno des Ansatzes von SCHLANG verglichen mit der durch Gleichung 7 beschriebenen Zerfallsfunktion und der durch Gleichung 9 beschriebenen Abbaukinetik mit konstanter Abbaurate, deren Parameter nach dem Prinzip der kleinsten Abweichungsquadrate mit dem Microsoft[®] Excel Solver angepasst wurden. Für die konstante Abbaurate s in Gleichung 9 ergibt sich ein Optimum von 0,378, d.h. eine jährliche Abbaurate in Höhe von 37,8%. Wie zu erwarten, führt der Ansatz von SCHLANG in den ersten Jahren zu deutlich höheren Abbauraten und in späteren Jahren zu geringeren Abbauraten als die Vergleichsansätze.

Abbildung 22: Vergleich verschiedener Abbaumodelle



Quelle: Eigene Darstellung

4.3.2.3 Simulationsmodelle

Bei der Abbildung realer komplexer, meist nicht linearer Systeme gibt es grundsätzliche Einwände gegen die Anwendung von critical-point-Modelle. Kritisiert wird der hohe Vereinfachungs- und Abstraktionsgrad der critical-point-Modelle, der nicht der komplexen Interaktion der ökologischen Systeme entspricht (vgl. SCHMIDT, 1992, S. 4). Die abstrakten Parameter der Critical-point-Modelle haben selten eine Entsprechung im realen System und leisten daher keinen Beitrag zum Verständnis des Systems (vgl. SEINHORST, 1965, S. 138). Die Annahme eines einfachen monofaktoriellen Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße mittels Regression oder Korrelation basiert weder auf strukturellem Wissen noch schafft sie welches. Auch vernachlässigt dieser Ansatz die bereits aus dem Kapitel 2.2.3.4 bekannte Erkenntnis, dass neben der Ausgangspopulation andere Einflussgrößen für die Höhe des Endbefalls eine wesentliche Rolle spielen. Dies wird z.B. am Bestimmtheitsmaß der in Abbildung 20 dargestellten Regression deutlich: Die P_i -Werte lieferten in diesen Untersuchungen nur rd. 57% erklärte Varianz für die Vermehrungsrate, ähnliche P_i -Werte führen zu sehr unterschiedlichen Vermehrungsraten und damit P_f -Werten.

Anstatt den P_f -Wert über eine mathematische Regression aus einem P_i -Wert analytisch zu bestimmen, versuchen Simulationsmodelle, die Entwicklung einer Nematodenpopulation mit der gesamten Biologie der Wechselwirkung innerhalb der Nematoden sowie zwischen Nematoden und aufstehenden Pflanzen und der Umwelt zeitkontinuierlich nachzuahmen. Der Einfluss aktueller Umweltbedingungen auf die Wechselbeziehungen wird berücksichtigt, anstatt durchschnittliche saisonale Umweltbedingungen anzunehmen (FERRIS UND NOLING, 1987, S. 55). Simulationsmodelle sind „Echtzeit-Erklärungsmodelle“ und entsprechen daher dem strukturierten Ansatz (FERRIS, 1981, S. 412). Als Vorteile der Simulation gegenüber den Black-Box-Ansätzen für die Abbildung der Abundanzdynamik nennt FERRIS (1976, S. 255):

1. In Simulationsmodellen können Umwelteinflüsse berücksichtigt werden, die zwischenzeitlich einwirken und im Allgemeinen dafür sorgen, dass kein gesicherter funktionaler Zusammenhang zwischen P_i - und P_f -Werten gebildet werden kann (siehe Kapitel 2.2.3.4 sowie Abbildung 20).
2. Beschreibbarkeit und Anpassungsfähigkeit der critical-point-Modelle sind beschränkt durch die Notwendigkeit, analytische Lösungen zu liefern.
3. Numerische Integrationsverfahren erlauben die schrittweise Simulation der Wechselwirkungen zwischen den Organismen, und die für sie wichtigen Änderungen der Umweltbedingungen können bei jedem Schritt berücksichtigt werden, ebenso Störungen oder Bekämpfungsmaßnahmen.
4. Critical-point-Modelle gelten nur für die zugrunde liegenden Konditionen und können nicht so leicht veränderten (Umwelt-)Bedingungen angepasst werden wie Simulationsmodelle. Schon bei leichter Änderung der (Umwelt-)Bedingungen sind bei Critical-point-Modellen bereits keine zuverlässigen Ergebnisse mehr zu erwarten.

Trotzdem sind zur Abbildung und Prognose von Nematodenpopulationen critical-point-Modelle weiter verbreitet als Simulationsmodelle. Hauptgrund dürften die für ein geeignetes Simulationsmodell notwendigen spezifischen Daten und zu treffenden Annahmen sein, die die vielfältigen Wechselbeziehungen zwischen externen Faktoren und der Nematodenpopulation beschreiben. Deren begrenzte Verfügbarkeit oder gar Fehlen hat wahrscheinlich die Entwicklung und den Gebrauch von Simulationsmodellen eingeschränkt (vgl. MCSORLEY, 1998, S. 126). Critical-point-Modelle kommen dagegen mit einem minimalen Umfang an Messungen und Beobachtungen aus, sind wesentlich verständlicher und als Basis für Entscheidungsmodelle im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements sachgerecht und ausreichend, da alle Managementmaßnahmen gegen den Nematoden Vor-Saat-Entscheidungen sind, Migration die Nematodenpopulation kaum beeinflusst und die Populationen vieler Nematodenarten innerhalb gewisser Grenzen bei normalen Umweltbedingungen zu einem stabilen Zustand tendieren (vgl. MCSORLEY ET AL., 1982, S. 153f; MCSORLEY UND DUNCAN, 1995, S. 148; NOE, 1998, S. 166 sowie DUNCAN UND NOLING, 1998, S. 256).

4.3.3 Literaturübersicht

In diesem Kapitel werden einige der in der Vergangenheit entwickelten Populationsmodelle für Nematoden vorgestellt, um den Stand des Wissens zu eruieren und Konsequenzen sowie Ideen für die eigene Modellentwicklung abzuleiten. Die Kriterien zur Beurteilung existenter Modelle ergeben sich aus den zuvor formulierten Anforderungen an das Populationsmodell. Hierunter fallen die Berücksichtigung der nachzubildenden Elemente und Beziehungen, die Input- und Outputbeziehungen sowie die Erfassung des Systemverhaltens. Grundsätzliche Beurteilungskriterien sind die Struktur- bzw. Verhaltensisomorphie und die Operationalität der Modelle. Nach BLÖNNIGEN (1986, S. 52f.) wird die Operationalität eines Modells bestimmt durch die Möglichkeit der mathematischen Bewältigung, einem dem Problemumfang angemessenen Rechenzeitbedarf sowie durch die anwendergerechte Informationseingabe und Ergebnispräsentation (nomologische Erfüllbarkeit).

4.3.3.1 Critical-point-Modelle

Zeitdiskrete Modelle wurden in der Vergangenheit für eine Vielzahl von Schadnematoden entwickelt. Einige davon wurden bereits im vorangegangenen Kapitel vorgestellt. Die Modelle von OOSTENBRINK (1966) und SEINHORST (1966 und 1967a) wurden auf der Basis der logistischen Wachstumsfunktion entwickelt, ebenso das von JONES UND KEMPTON (1978) sowie JONES UND PERRY (1978) vorgestellte Modell für die *Globodera*-Kartoffelnematoden. MCSORLEY UND PHILLIPS (1993, S. 69f.) geben eine Übersicht über weitere in der Praxis verwendete critical-point-Modelle. Danach finden sich neben exponentiellen Funktionen auch lineare und quadratische Regressionen zur Abbildung der Befallsrelation, allerdings nicht im System *H.schachtii*-Zuckerrübe.

BURT UND FERRIS (1996) koppelten zwei zeitdiskrete Ansätze, um die Populationsdynamik von *H.schachtii* über eine Fruchtfolgerotation abzubilden. Für die Abbildung der Abundanzdynamik unter Zuckerrüben wurde die Potenzfunktion (Gleichung 6), und für Nichtwirtpflanzen die lineare Regression (Gleichung 9) gewählt, so dass die Populationsdynamik über die Fruchtfolge fortgeführt wird mit der Gleichung 11, in der m die Anzahl Jahre ohne Zuckerrübenanbau darstellt. Erweitert um einen Befall-Schadens-Ansatz, dient das Modell der Bestimmung der optimalen, d.h. gewinnmaximierenden, Rotationslänge bzw. Anbaupause.

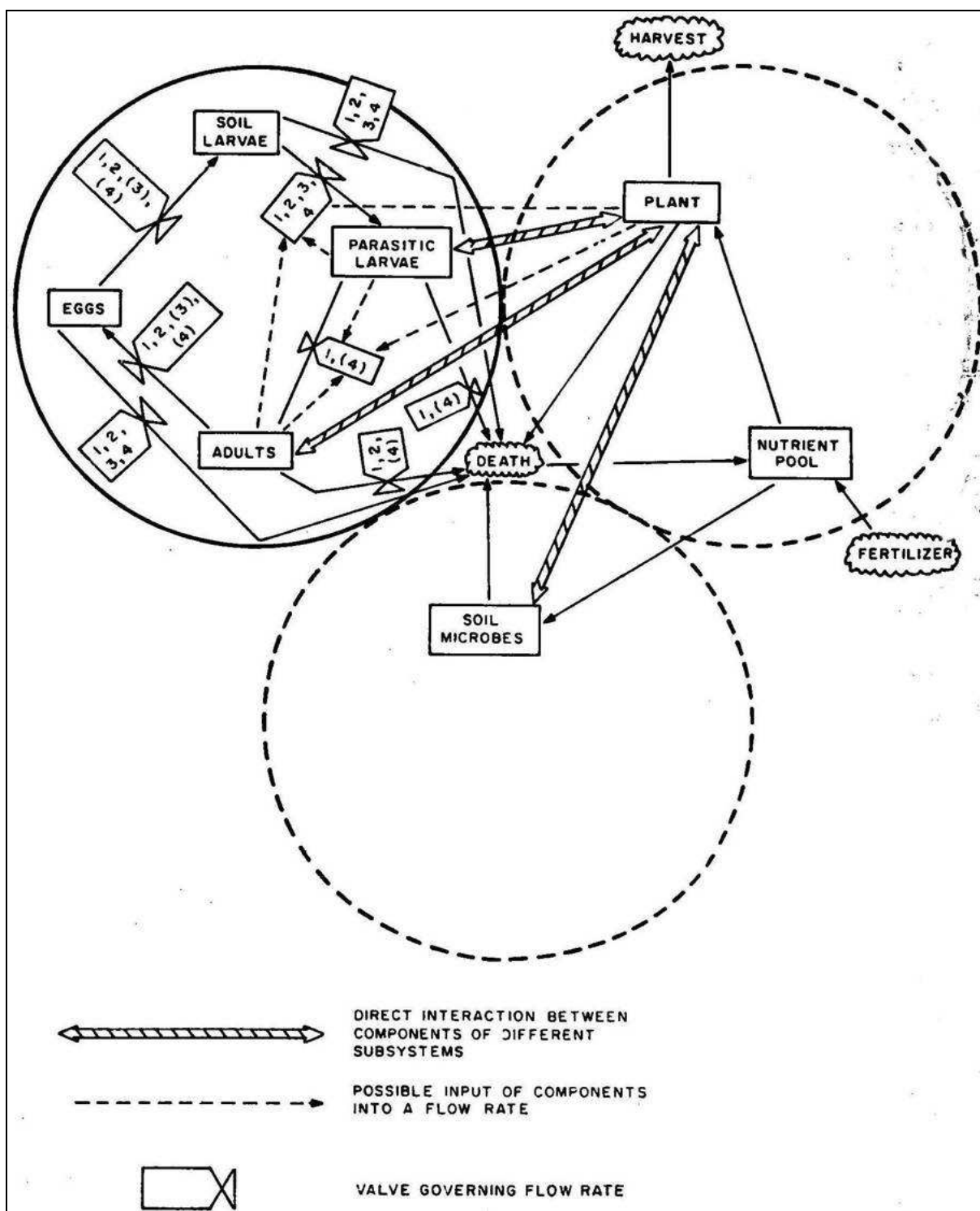
$$P(n+1) = (1-s)^m (aP_n^{-b}) \quad (11)$$

SCHLANG entwickelte in über 20-jähriger Arbeit am Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde, Außenstelle Elsdorf/Rhld., Regressionsfunktionen für die Abbildung der Abundanzdynamik von *H.schachtii* unter anfälligen und resistenten Zuckerrüben sowie für unterschiedlich resistente Ölrettich- und Gelbsensensorten. Diese Potenzfunktionen können daher als repräsentativ für rheinische (Umwelt-)Bedingungen angesehen werden. Sie werden im Rahmen der Parameterkalibrierung des Populationsmodells verwendet und an geeigneter Stelle vorgestellt.

4.3.3.2 Simulationsmodelle

1976 stellte FERRIS sein Simulationsmodell MELSIM vor. Das rechnergestützte Modell, das als Prognosemodell für Lehr- und Beratungszwecke eingesetzt werden sollte, bildet die Populationsdynamik der Schaderreger *Meloidogyne arenaria* mit allen Entwicklungsstadien an der Wirtspflanze Weinrebe ab (Abbildung 23). Jedes Stadium wird als Zustandsvariable dargestellt und die stündliche Veränderung der Zahl der Individuen in jedem Stadium mit Regressionsgleichungen beschrieben, deren Parameter von biotischen und abiotischen Faktoren abhängen.

Abbildung 23: Das System Meloidogyne - Weinrebe nach FERRIS

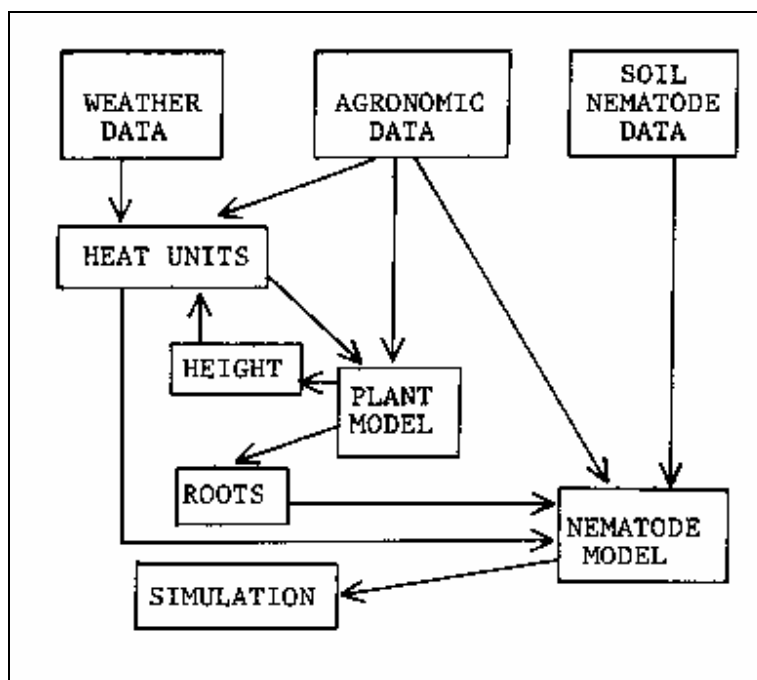


Quelle: FERRIS, 1976, S. 256

Die Modellgleichungen, die die Interaktionen der Systemelemente darstellen sollten, konnten allerdings mangels Verständnis des Systems nur unzureichend aufgestellt und deren Parameter anhand von Feldversuchen und -beobachtungen kalibriert werden, so dass die Modellergebnisse die Realität auch nur unzureichend widerspiegeln (FERRIS, 1976, S. 262 und FERRIS, 1978a).

PHEX ist ein von MCSORLEY UND FERRIS (1979) vorgestelltes Modell zur Simulation des Systems *Pratylenchus hexincisus*-Mais während einer Vegetationsperiode. Das zur Prognose der Nematodenpopulation und des Pflanzenwachstums eingesetzte Modell simuliert die Entwicklung des Maises getrennt nach den oberirdischen Pflanzenteilen und dem Wurzelsystem. Die oberirdischen Pflanzenteile haben einen Einfluss auf die Temperatursummenbildung, da mit zunehmender Pflanzenlänge der Boden zunehmend abgeschattet wird. Das Wurzelsystem hat als Nahrungsquelle einen Einfluss auf die Populationsdynamik des Nematoden (Abbildung 24). Der Temperaturverlauf wird mit einer Sinusfunktion in 1/8-Tagesschritten zwischen Saat und Ernte des Maises simuliert. Das Wurzelwachstum wird mit einer logistischen Wachstumsfunktion ebenfalls temperaturabhängig nachgebildet. Die Populationsdynamik des Nematoden ist neben der Temperaturabhängigkeit an die Entwicklung der Wurzelmasse gekoppelt und daher abhängig von der Reihenweite und der Bestandsdichte. Diese Abhängigkeit wird in Form verschiedener empirisch ermittelter Regressionsfunktionen abgebildet. PHEX aktualisiert sieben Zustandsvariablen kontinuierlich in 1/8-Tages-Schritten, während Saat, Ernte und tägliche Wettervorgaben diskrete Variablen sind. Erste Verifikationen ergaben, dass PHEX die eigene Datengrundlage gut nachbilden kann. Eine Validierung an nicht für die Modellentwicklung verwendeten Daten fand nicht statt.

Abbildung 24: Das System *Pratylenchus* - Mais nach MCSORLEY UND FERRIS

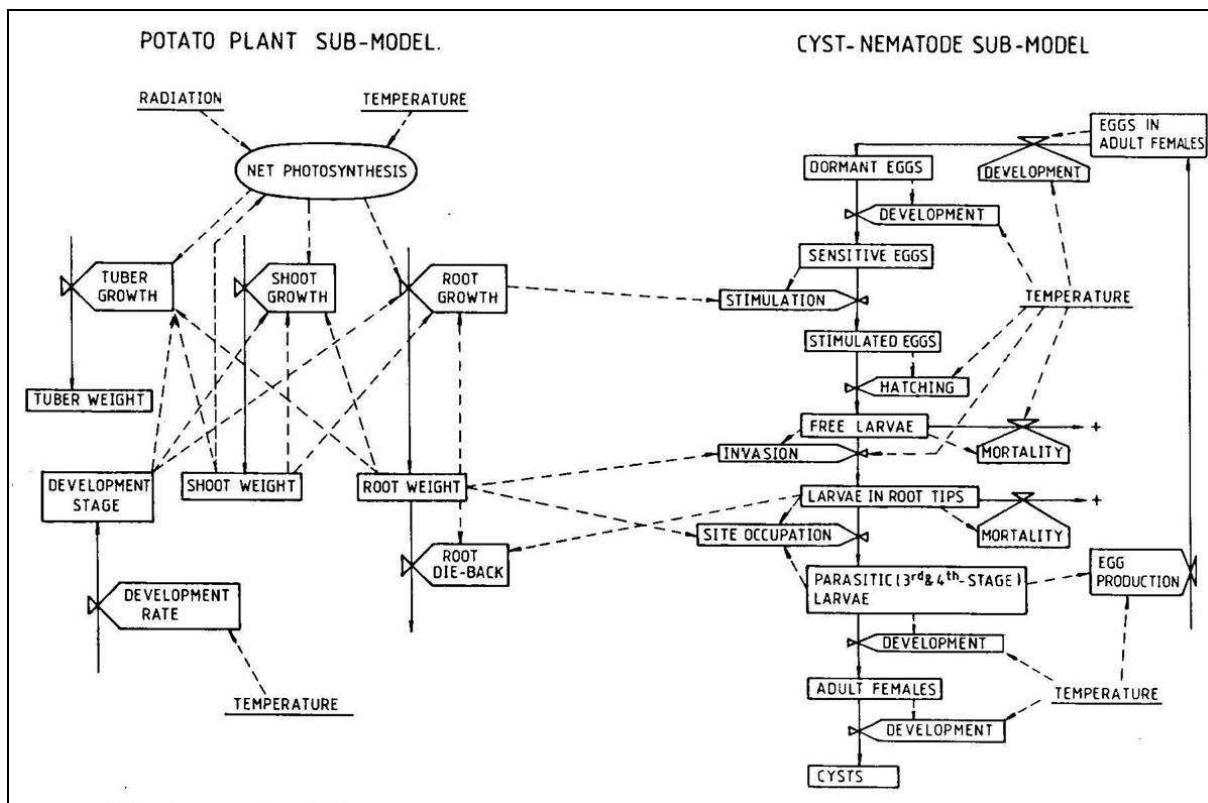


Quelle: MCSORLEY UND FERRIS, 1979, S. 1

WARD ET AL. (1985) konstruierten ein Modell für die Simulation der Population des Kartoffelzystennematoden *Globodera pallida* und dessen Effekt auf das Wachstum der Kartoffelpflanze. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, umfasst das Modell ebenfalls die zwei gekoppelten Submodelle Pflanzenwachstum und Nematodenpopulation. Das Pflanzenwachstumsmodell basiert auf einem vorhandenen Modellansatz namens SUCROS (VAN KEULEN ET AL., 1982, siehe Kapitel 4.4.3.2) und simuliert die Trockenmasseentwicklung des Blattes, der Wurzeln und der Knollen als Funktion der Temperatur und Lichteinstrahlung. Das zweite Submodell simuliert die sich verändernde Zahl einzelner Nematoden in den einzelnen der sieben Ent-

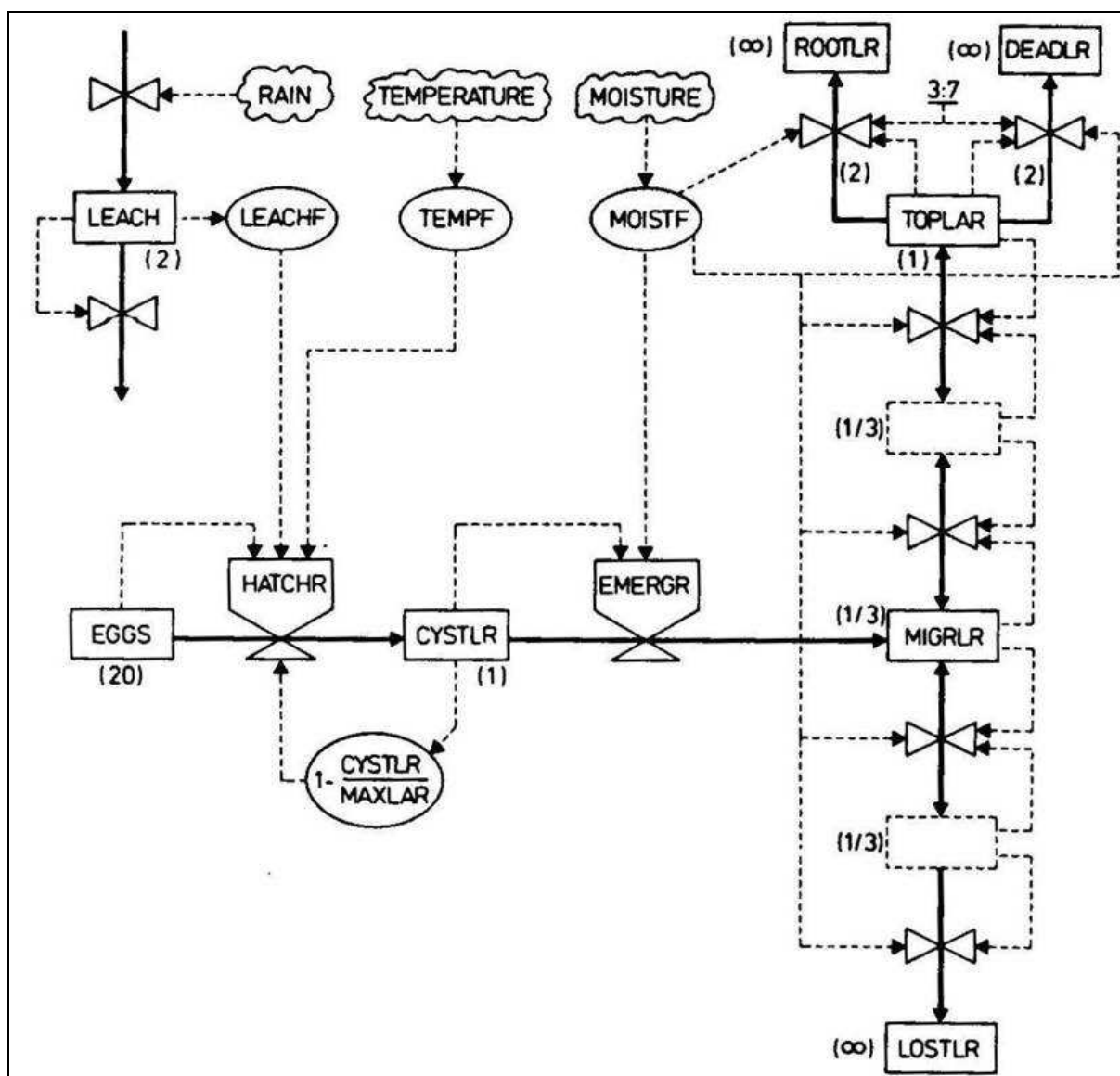
wicklungsstadien. Simulationsexperimente ergaben, dass das Modell realistische Vorhersagen des Verhaltens des realen Systems machen konnte.

Abbildung 25: Das System Globodera - Kartoffel nach WARD ET AL.



Quelle: WARD ET AL., 1985, S. 30

Ebenfalls in den Niederlanden entwickelten VAN DER WERF ET AL. (1986) ein computergestütztes Simulationsmodell für das System *H.schachtii* - Zuckerrübe, das als Zustandsvariablen die Prozesse Eischlupf, Austritt der L₂-Larven, Wanderung zu den Wurzeln und deren Penetration witterungsabhängig stündlich abbildet (Abbildung 26). Mit dem Modell sollte die Lücke zwischen Labor- und Felduntersuchungen des Befalls der jungen Rübenpflanzen mit schlüpfenden *H.schachtii*-Larven im Frühjahr geschlossen werden. Die Modellergebnisse ließen den Schluss zu, dass sowohl große Teile der Modellstruktur als auch der Modellparameter weitgehend korrekt sind.

Abbildung 26: Das System *H.schachtii* - Zuckerrübe nach VAN DER WERF ET AL.

Quelle: VAN DER WERF ET AL., 1986, S. 34

CASWELL ET AL. stellten 1986 ein Modell vor, das die Infektion einer einzelnen Zuckerrübenpflanze mit *H.schachtii* simuliert. Ausgehend von einer Startpopulation ermittelt das Modell die Populationsdynamik und das Wurzelwachstum in zwei vertikal unterteilten Zonen des Bodenprofils in 0,05-Tages-Schritten temperaturabhängig. Bei der Populationsdynamik steuert die Temperatur eine Verzögerungsfunktion, die die Verweildauer in einem bestimmten Entwicklungsstadium steuert. Die errechneten Werte weichen teilweise erheblich von den beobachteten ab, was die Autoren auf Unzulänglichkeiten des Modells bei der Erfassung aller populationsdynamisch relevanten Phänomene zurückführen.

Aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung innerhalb der Dynamik des Nematoden entwickelte SCHMIDT (1992) zwei zeitdiskrete Simulationsmodelle zur Beschreibung der Populationsdynamik des Rübenzystemnematoden. In einem ersten Modellansatz (Abbildung 27) wurde bei Betrachtung der Populationsdynamik über die Fruchtfolge hinweg der Populationsaufbau unter Zuckerrüben und die klimaunabhängige Abbaurrate unter Nichtwirten anhand einer Differenzgleichung (Gleichung 12) modelliert.

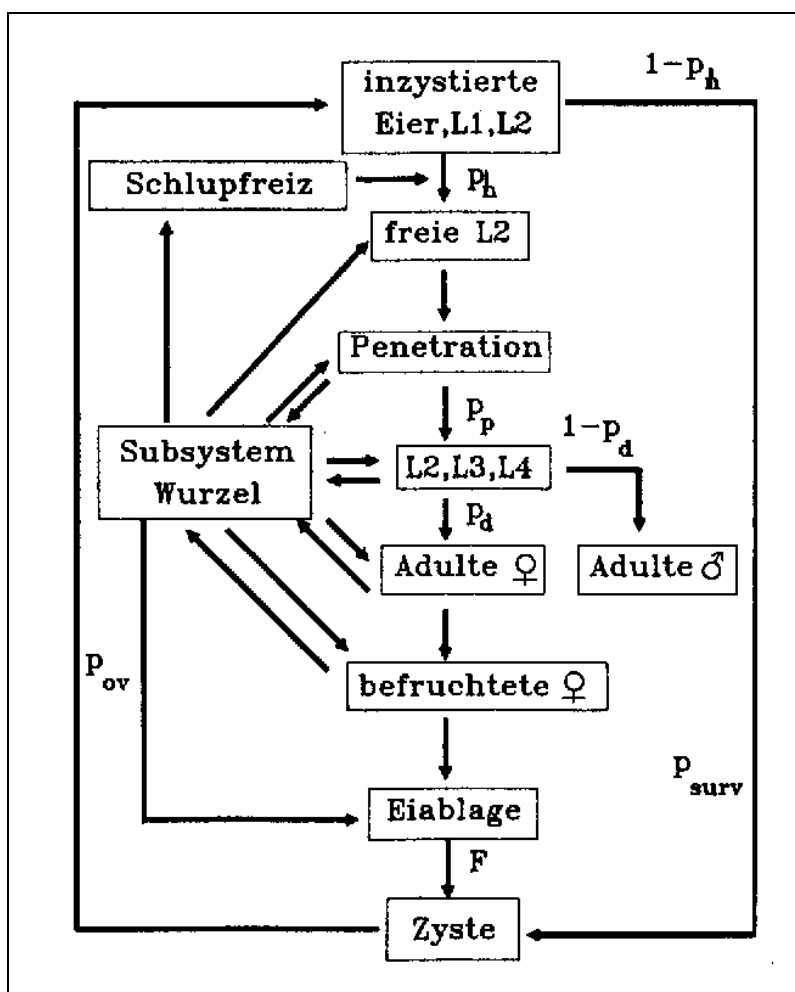
$$x_{n,i+1} = x_{n,i} \cdot p_{h,i} \cdot p_p \cdot (L2_{n,i}) \cdot p_d \cdot (L3_{n,i}) \cdot F(A) + p_{surv} \cdot (1 - p_{h,i}) \cdot x_{n,i} \quad (12)$$

Es gelten folgende Bezeichnungen:

- $x_{n,i}$ = Eier und Larven der i-ten Generation des Jahres n
- L2 = Entwicklungsstadium L2
- L3 = Entwicklungsstadium L2, L3, L4, Adulte in der Wurzel
- A = adulte Weibchen
- F = Vermehrungsrate
- $p_{h,i}$ = Schlupfwahrscheinlichkeit
- p_p = Penetrationswahrscheinlichkeit in die Wurzel
- p_d = Wahrscheinlichkeit, sich zum Adulten zu entwickeln
- p_{surv} = Überlebenswahrscheinlichkeit für eine Generation
- $1 - p_{h,i}$ = Gegenwahrscheinlichkeit des Schlupfes

Der Einfluss der verschiedenen Nichtwirte innerhalb einer Fruchtfolge wurde relativ zum Wirt Zuckerrübe parametrisiert und die abiotischen Faktoren vereinfachend zu einer diskreten Anzahl von Generationen pro Vegetationsperiode zusammengefasst.

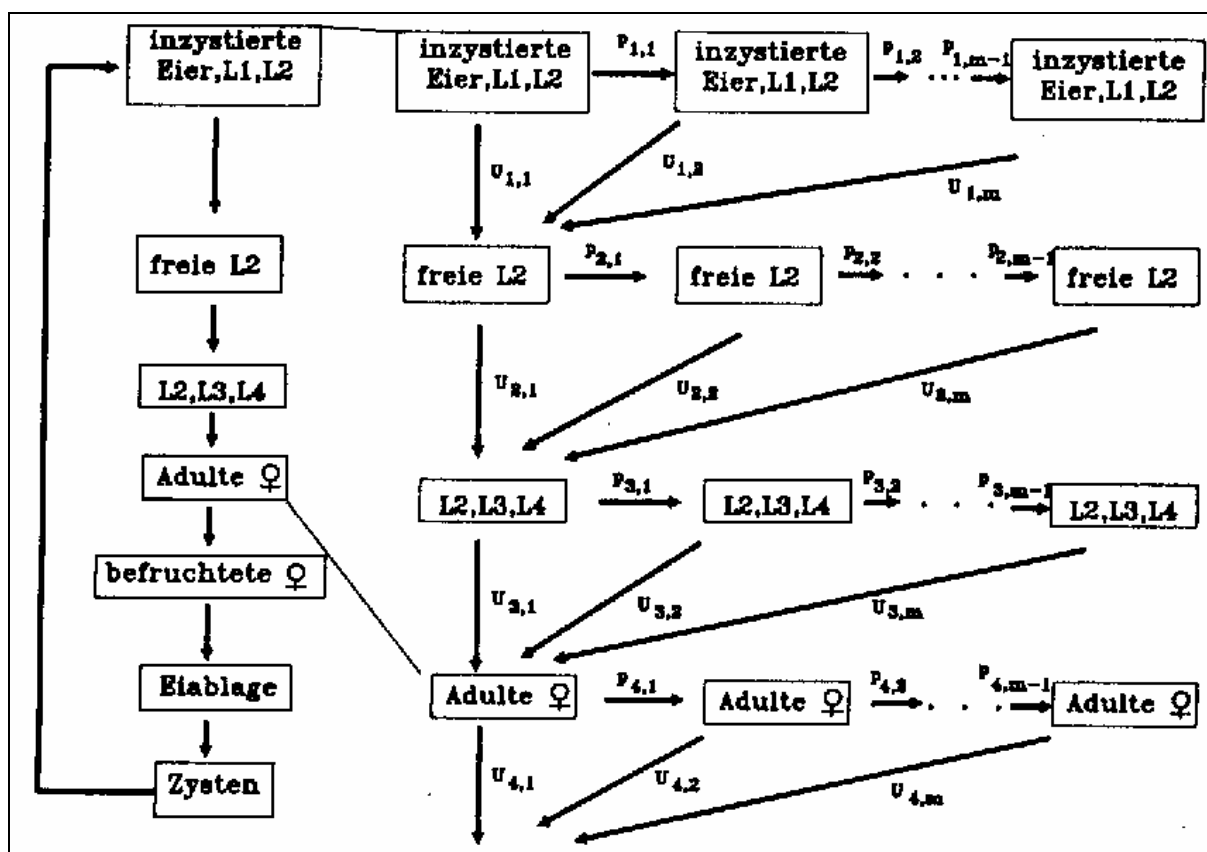
Abbildung 27: Kompartimentmodell des einfachen Ansatzes nach SCHMIDT



Quelle: SCHMIDT, 1992, S. 8

Für den Einsatz als Prognosemodell reichte dieser einfache Modellansatz zur Nachbildung der Populationsdynamik unter Zuckerrüben nicht aus (SCHMIDT, 1992, S. 127). Zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der Dynamik von den einzelnen biotischen und abiotischen Einflussgrößen erweiterte SCHMIDT das bestehende Modell zu einem altersstrukturierten zweiten Modell namens NemaPlot. Auf der Basis des von SÖNDGERATH (1987) um die stochastische Kovariante Temperatur erweiterten Modellansatzes von LESLIE (1945,1948) für altersstrukturierte Populationen¹⁶ wurden die Individuen und deren verschiedenen Entwicklungsstadien modelliert (Abbildung 28). Diese größere Auflösung des Modells ermöglicht es, die Entwicklungsgeschwindigkeit der einzelnen Stadien des Nematoden, die so genannte biologische Zeit, in Abhängigkeit von der Temperatur zu berücksichtigen. Die dafür notwendigen Temperaturdaten werden nicht simuliert, sondern als Tageswerte vorgegeben. Diese Vorgehensweise erlaubt es, das Modell einfach für unterschiedliche Jahre und Standorte einzusetzen.

Abbildung 28: Kompartimentmodell des erweiterten Ansatzes nach SCHMIDT



Quelle: SCHMIDT, 1992, S. 52

Da der Entwicklungszyklus von *H. schachtii* stark von der Wirtspflanzenentwicklung abhängt, wurden die einzelnen Stadienübergangswahrscheinlichkeiten an das Wurzelwachstum gekoppelt, das in Form eines einfachen Differentialgleichungssystems beschrieben wurde. Gleichzeitig findet eine Rückkopplung in Form einer Konsumfunktion statt, in der der Einfluss der einzelnen Stadiendichten des Nematoden auf das Wurzelwachstum der Zuckerrübe berück-

¹⁶ Der Leslie-Ansatz und seine Implementierung in Modellen wird ausführlich von FERRIS UND NOLING (1987, S. 72ff.) behandelt.

sichtigt wird. In Anhang 7 sind die Ergebnisgrafiken zweier Modellläufe von NemaPlot wiedergegeben. Sie zeigen den hohen Grad der Auflösung des Modells. In beiden Simulationsläufen wird die rheinische Fruchtfolge betrachtet, im ersten mit einer Nematodengeneration unter den Zuckerrüben und im zweiten mit derer drei.

NOE (1998, S. 167) stellt den erweiterten Ansatz von SCHMIDT als detailliertesten und komplexesten Versuch der Nachbildung der Populationsdynamik eines Nematoden in der Fruchtfolge dar und lobt dessen beachtliche Exaktheit bei der Prognose der Populationsdynamik von *H.schachtii* in zahlreichen Anbausystemen mit Zuckerrüben für einen Zeitraum bis zu 18 Jahren, da SCHMIDT (1992) Modellvalidierungen mit Versuchsergebnissen verschiedenster Standorte in Deutschland durchführte. Das von SCHMIDT (1992) vorgestellte Modell wird an der Universität Bonn weiterentwickelt und heute eingesetzt als Prognosemodell zur Ableitung der Abundanzdynamik des Nematoden aus Luftbildern (vgl. SPICKERMANN UND PLÜMER, 2004 sowie Kapitel 3.1.2.2).

4.3.3.3 Konsequenzen aus der Literaturübersicht

Die vorgestellten Simulationsmodelle repräsentieren eine enge Orientierung anhand der bekannten Biologie der betrachteten Systeme und sind zunehmend realitätsnah, d.h. struktur- und verhaltensisomorph, aufgebaut. Diese Modelle können dazu eingesetzt werden, bestimmte Wissenslücken innerhalb des ökologischen Systems Nematode zu schließen und neue Anstöße in der zukünftigen Forschungsrichtung zu liefern, drohen aber aufgrund ihrer Realitätsnähe ihre Flexibilität zu verlieren (vgl. SCHMIDT, 1992, S. 4). Vor allem das Ziel, die komplexen Zusammenhänge der Entwicklungsdynamik des Nematoden auf bekannte mathematische Strukturen abzubilden, wobei die biologische Begründbarkeit des Ansatzes im Vordergrund steht (vgl. SCHMIDT, 1992, S. 4), geht weit über die Anforderungen, die an das Populationsdynamikmodell als Prognosemodell im Rahmen des EUS gestellt werden (vgl. Kapitel 4.3.1), hinaus. Ein derart mechanistischer strukturisomorpher Ansatz ist daher nicht nötig. Der Grundgedanke des einfachen Modells von SCHMIDT (1992), ein und denselben Ansatz sowohl für Wirts- als auch für Nichtwirtspflanzen zu verwenden und lediglich die Modellparameter entsprechend zu variieren, entspricht dagegen der grundsätzlichen Anforderung an ein verhaltensisomorphes Black-Box-Modell, möglichst einfach, übersichtlich und nachvollziehbar zu sein. Unumgänglich ist die Kopplung der Systeme Nematode und Wirtspflanze, um die in Kapitel 2.3 beschriebene Interaktion nachzubilden. In einem Black-Box-Ansatz kann dies in Form einer diskreten Befall-Schadens-Relation abgebildet werden.

Die Gültigkeit von Critical-point-Modellen beschränkt sich auf das betrachtete Nematode-Pflanze-System und die zugrunde gelegten Umweltbedingungen. Für diese können sie allerdings ungleich einfacher empirisch kalibriert und validiert werden. Vor diesem Hintergrund entsteht die Überlegung, einen einfachen kontinuierlichen Ansatz an einem vorhandenen und die rheinischen Umweltbedingungen repräsentierenden zeitdiskreten Modellansatz zu kalibrieren. Für einen dynamischen, zeitkontinuierlichen Ansatz des Modells zur Simulation der Population des Nematoden sprechen sowohl die Biologie des Schaderregers, sich in überlappenden Generationen zu vermehren, als auch ein wichtiger systemtheoretischer Grund: Zeitdiskrete Variablen verursachen im allgemeinen Sprünge in der Lösungsoberfläche eines Modells und führen damit zu schlechten Konvergenzeigenschaften (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 328).

Trotz Einbeziehung stochastischer Elemente bei den Simulationsmodellen, insbesondere der Witterungsgrößen Temperatur und (Boden-)Feuchtigkeit, sind die vorgestellten Modelle deterministisch. Die Auswirkungen der stochastischen Einflussgrößen können nur durch Alternativrechnungen mit verschiedenen Szenarien zum Ausdruck gebracht werden. MCSORLEY (1992, S. 178) nennt als Mindestanforderung an ein Modell zur Abbildung der Abundanzdynamik des Nematoden, dass unabhängig vom gewählten Modellansatz eine Maßzahl für die Variabilität des Modelloutputs, z.B. der vorhergesagten Populationsdichten, ausgewiesen werden muss, auch wenn das Modell deterministisch sein sollte und Variabilität nicht explizit angezeigt wird. Nur so kann verhindert werden, dass der Anwender einer Genauigkeit der Modellergebnisse vertraut, die im biologischen Realsystem nicht vorhanden ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein stochastisches Modell als unumgänglich angesehen zur Abbildung der Wirkung der Störgrößen. Nur so kann die Forderung nach Verhaltensisomorphie in einem Black-Box-Ansatz erfüllt werden.

4.3.4 Modellkonzeption

Ausgangspunkt der Modellentwicklung soll der in der Nematologie verbreitete Critical-point-Ansatz mit Potenzfunktionen als Regression sein. Diese Regressionen beschreiben die dichteabhängige Entwicklung der Nematodenpopulation N zeitdiskret als funktionalen Zusammenhang zwischen der *Vermehrungsrate* r und dem P_i -Wert, d.h. über ein Zeitintegral Δt , das im Idealfall exakt dem Abstand zwischen Ernte bzw. Umbruch der betrachteten Kulturfrucht (Messung des P_f -Werts) und deren Aussaat (Messung des P_i -Werts) und damit deren Vegetationslänge entspricht (Gleichung 13, siehe Gleichung 6). Idealfall deshalb, weil die Zeitgleichheit von Messung und Saat bzw. Ernte in der Praxis kaum gewährleistet werden kann. Der systematische Fehler, der durch Abweichungen zwischen den Messzeitpunkten und der Saat bzw. Ernte entsteht, wird vernachlässigt.

$$r = \frac{P_f}{P_i} = \frac{N(t + \Delta t)}{N(t)} = aP_i^{-b} \quad (13)$$

In einer für ein kontinuierliches Modell notwendigen Differentialgleichung beschreibt dagegen dN/dt die *Veränderungsrate* pro Zeitintervall dt (Gleichung 14).

$$\frac{dN}{dt} \approx \frac{N(t + dt) - N(t)}{dt} \quad (14)$$

Bezogen auf die gesamte Vegetationslänge V einer Wirtspflanze ($dt = V$) gibt dN/dt die mittlere Veränderungsrate pro Intervall dt wieder, $N(t+V)$ entspricht dem P_f - und $N(t)$ dem P_i -Wert.

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &= \frac{P_f - P_i}{dt} \\ &= \frac{rP_i - P_i}{dt} \\ &= \frac{(r-1)P_i}{dt}\end{aligned}$$

Einfügen der Gleichung 13 ergibt

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &= (aN(t)^{-b} - 1)N(t) \\ &= \underline{\underline{aN(t)^{1-b} - N(t)}}\end{aligned}\tag{15}$$

Mit der Gleichung 15 kann für ein vorher festgelegtes Intervall (Vegetationslänge) die Populationsdynamik zeitkontinuierlich simuliert werden. Der dynamische Ansatz führt bei gegebenem Startwert ($N(0) = N(\text{Saat}) = P_i$ -Wert) zum gleichen Ergebnis ($N(\text{Ernte}) = P_f$ -Wert) wie der zu Grunde gelegte Regressionsansatz, wenn die Modellparameter a und b zuvor an den Ergebnissen dieser Regression kalibriert wurden. Das in Gleichung 15 abgebildete Modell stellt demnach die dynamische Transformation eines zeitdiskreten Regressionsansatzes dar, das durch geeignete Kalibrierung der Modellparameter universell eingesetzt werden kann für verschiedene Kulturfrüchte incl. (Schwarz-)Brache und mit unterschiedlicher Vegetationsdauer. In Gleichung 16 ist die Berechnung der wichtigen Modellgröße (Umwelt-)Kapazität N_K dargestellt, für die gilt: $dN/dt = 0$ (siehe Kapitel 4.3.2.1). Anhand der Herleitung der Gleichung 15 ist zu erkennen, dass dies der Fall ist für $r = 1$. Die Kapazitätsgrenze entspricht daher der in Kapitel 2.2.3.1 vorgestellten wirtsspezifischen Verseuchungsdichte.

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &= (aN^{-b} - 1)N = 0 \\ \Leftrightarrow aN^{-b} - 1 &= 0 \\ \Leftrightarrow aN^{-b} &= 1 \\ \Leftrightarrow \ln(a) - b\ln(N) &= \ln(1) \\ \Leftrightarrow -b\ln(N) &= \ln\left(\frac{1}{a}\right) \\ \Leftrightarrow \ln(N) &= \frac{-1}{b} \cdot \ln\left(\frac{1}{a}\right) \\ \Leftrightarrow N &= e^{\ln\left(\frac{1}{a}\right) \cdot \left(\frac{-1}{b}\right)} \\ \Leftrightarrow N &= \underline{\underline{N_K = \left(\frac{1}{a}\right)^{\left(\frac{-1}{b}\right)}}}\end{aligned}\tag{16}$$

4.3.5 Kalibrierung der Modellparameter

Die Kalibrierung der Modellparameter a und b stellt ein nichtlineares Optimierungsproblem dar. Ziel der Optimierung ist die bestmögliche Anpassung des Modells an die Realität.

Die Kalibrierung erfolgt mit einem am Lehrstuhl für Produktions- und Umweltökonomie der Universität Bonn zu Lehrzwecken entwickelten Werkzeug. Die mit Cherwell ModelMaker[®], Version 3.03, implementierte Routine kalibriert die Parameter einer Differentialgleichung mit Hilfe der Methode der Kleinsten Abweichungsquadrate an Beobachtungswerten. Zur Kalibrierung wird die Nematodenpopulation N mit 41 Startwerten in Schritten von 250 Eiern und Larven bis 10.000 Eiern und Larven mit der Differentialgleichung 15 simuliert. Mit diesen 41 P_i -Werten ist der größte Teil der im Feld beobachtbaren Populationsdichten mit Ausnahme von Ausreißern dicht abgedeckt. Als erster P_i -Wert werden 100 Eier und Larven gewählt wegen der für geringe P_i -Werte eingeschränkten Gültigkeit der Potenzregressionen (vgl. Kapitel 4.3.2.2) und als Simulationsdauer zur Berechnung der Modellergebnisse die Vegetationslänge der jeweiligen Kulturfrucht angenommen, für die die Parameter geschätzt werden.

Am Ende eines Simulationslaufs erfolgt die Summierung der Fehlerquadrate zwischen den vom Modell errechneten P_f -Werten und den im Modell hinterlegten P_f -Werten. Letztere wurden mit den Regressionsansätzen von SCHLANG auf der Basis von Potenzfunktionen für die 41 Startwerte errechnet. Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgt demnach an den Schlang'schen Regressionsmodellen. Anschließend wird ein neuer Parametervektor generiert und die Simulationsläufe wiederholt, bis die Summe der Abweichungsquadrate minimal ist. Zur Veranschaulichung wird das Kalibrierungswerkzeug um grafische Darstellungen für die Entwicklung der Nematodenpopulation und der Fehlerwerte erweitert.

Der Vergleich des Modelloutputs mit den empirisch ermittelten Versuchsergebnissen und die Betrachtung der Fehlerquadrate erbringen im Rahmen der Parameterkalibrierung gleichzeitig einen Gültigkeitsnachweis für den Modellansatz. Dieser unmittelbare Bestandteil einer jeden Modellierungsaufgabe wird als Verifikation bezeichnet (vgl. SCHULTZ UND MIRSCHER, 1993, S. 238). Ein Modell gilt als verifiziert, wenn es sich tatsächlich so verhält, wie der Modellbauer es wollte, d.h. die in die Modellierung eingeflossenen Daten werden mit einem bestimmten Genauigkeitsniveau wiedergegeben (ebd., S. 239). Anders formuliert bedeutet Verifikation den Nachweis der Verhaltensisomorphie (vgl. BOSSEL, 1994, S. 36).

Alle im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Modellparameter werden in Anhang 20 zusammengefasst. Um den Ansatz neueren empirischen Modellen aus dem Rheinland oder für andere Regionen und damit Umweltbedingungen anzupassen, müssen die Modellparameter anhand der im Folgenden beschriebenen Vorgehensweise neu kalibriert werden.

4.3.5.1 Für anfällige Zuckerrüben

Für die Kalibrierung der Modellparameter a und b für anfällige Zuckerrüben werden die bereits in Abbildung 20 dargestellten Versuchsergebnisse aus den Jahren 1995-2000 verwendet, die zu der Regressionsgleichung 17 führen (vgl. SCHLANG, 2002, S. 204). Die für die Regression verwendeten 304 Rohdatensätze wurden dem Verfasser vom Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde der BBA in Elsdorf zur Verfügung gestellt.

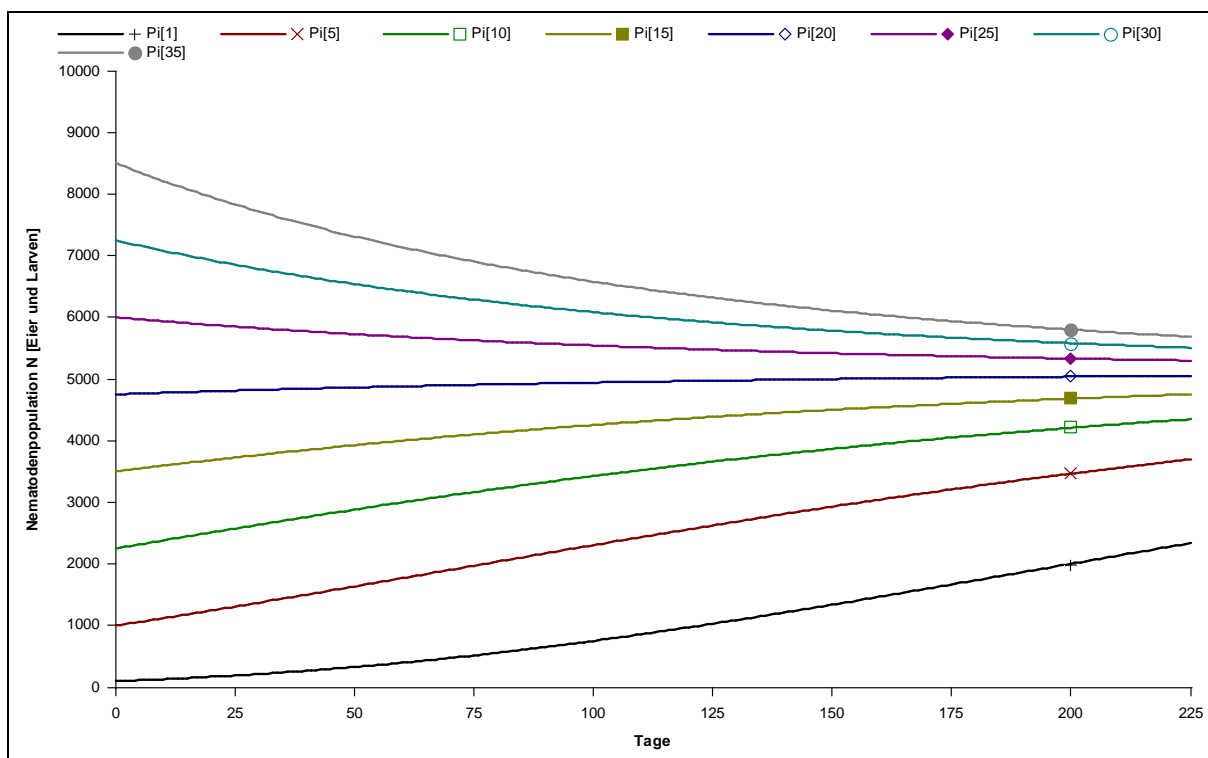
$$r_{aZR} = 658,22P_i^{-0,7596} \quad (17)$$

Die mit Gleichung 17 beschriebene Regression weist gegenüber älteren Berechnungen aus dem Rheinland (vgl. SAATEN-UNION, 1991, S. 14f., SCHLANG, 1998b, S. 313 und SCHLANG, 1999b, S. 8) insgesamt geringere Vermehrungsraten auf. Nach SCHLANG (2003a, mündl.) ist dies ein Indiz für den beschleunigten Aufbau eines Antagonistenpotentials im rheinischen

Ackerbau, der auf den regelmäßigen Anbau von Zuckerrüben und nematodenresistenten Kruziferen als Zwischenfrüchte und zur Brachebegrünung zurückzuführen ist.

Als Simulationsdauer wird die Standardvegetationslänge der Wirtspflanze Zuckerrübe von 200 Tagen (vgl. Kapitel 4.4.7) gewählt, so dass das zeitkontinuierliche Modell am 200. Tag die aus den Start- (P_i) -Werten errechneten P_f -Werte ergeben und die Summe der Fehlerquadrate minimal sein sollte. Dies ist in der Abbildung 29 der Übersicht wegen auf acht Startwerte reduziert dargestellt. Anhang 8 und 9 zeigen die Entwicklung der Nematodenpopulation und der Fehlerwerte über die Simulationsdauer.

Abbildung 29: Parameterkalibrierung für anfällige Zuckerrüben



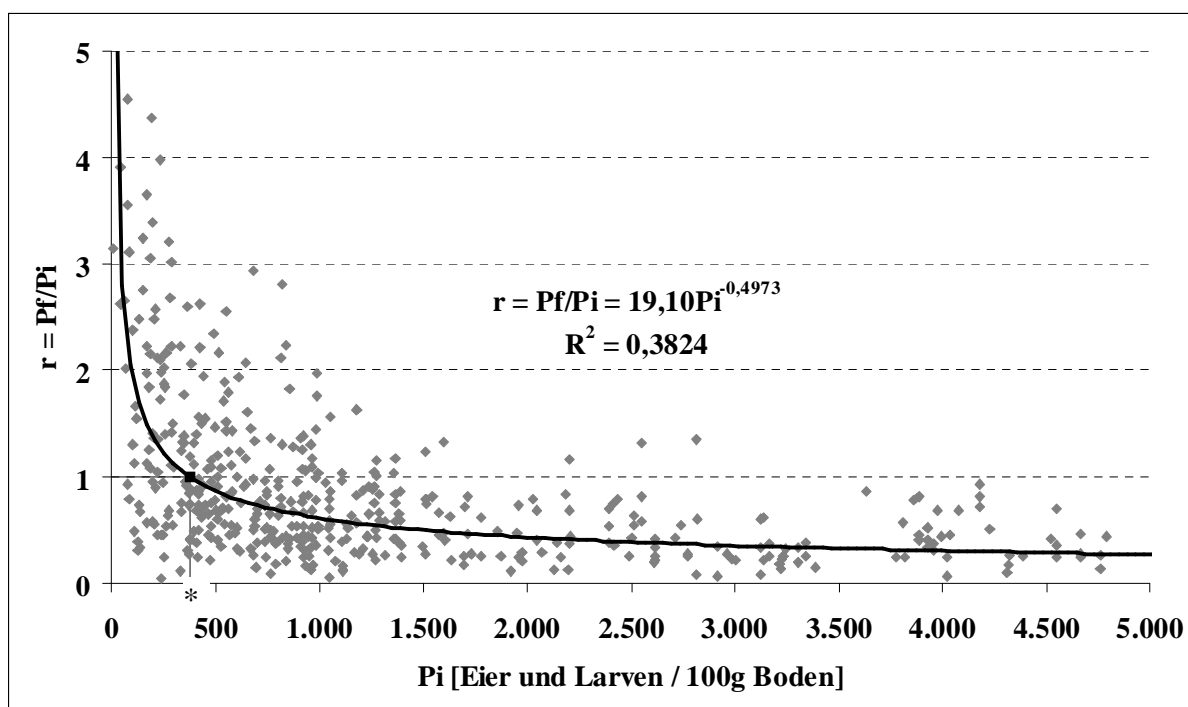
Quelle: Eigene Darstellung

Die Modellparameter werden zu $a = 1,06$ und $b = 0,007$ ermittelt und führen zu einer sehr guten Anpassung an die vorgegebenen P_f -Werte. Die Kapazitätsgrenze N_K beträgt gemäß Gleichung 16 5.133 Eier und Larven.

4.3.5.2 Für resistente Zuckerrüben

Die Kalibrierung der Modellparameter a und b für resistente Zuckerrüben erfolgt ebenfalls an Versuchsergebnissen der BBA aus den Jahren 1995-2000. Die 495 Rohdatensätze führen zu der Regressionsgleichung 18 (siehe Abbildung 30).

$$r_{iZR} = 19,01P_i^{-0,4973} \quad (18)$$

Abbildung 30: Vermehrungsraten von *H.schachtii* unter resistenten Zuckerrüben

* Wirtsspezifische Verseuchungsdichte ($r = 1$) für resistente Zuckerrüben

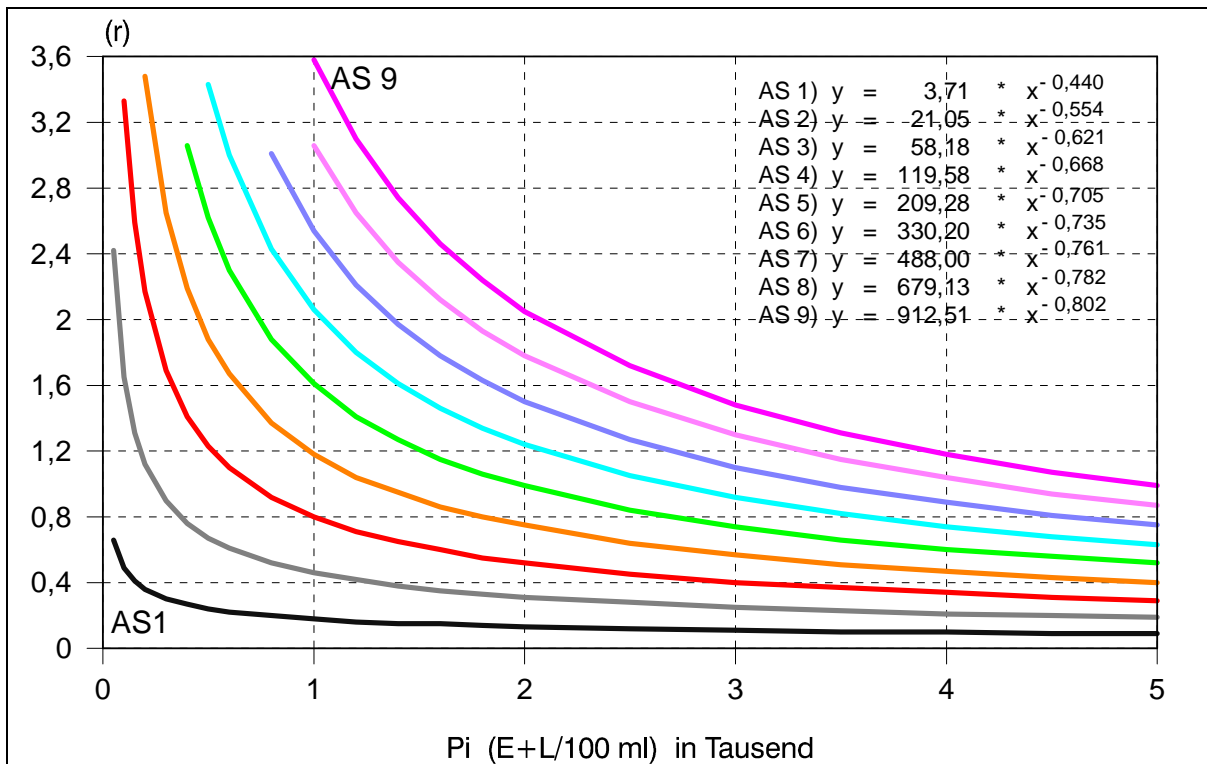
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHLANG, 2002, S. 204

Wie unterschiedlich der Einfluss anfälliger und resistenter Zuckerrüben auf die Populationsdynamik von *H.schachtii* ist, wird beim Vergleich der in den Anhängen 10 und 11 dargestellten Grafiken deutlich. Diese zeigen die in den Versuchen der BBA ermittelten P_i -Werte und die dazugehörigen P_f -Werte unter anfälligen und resistenten Zuckerrübensorten. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide Grafiken gleich skaliert. Oberhalb der Winkelhalbierenden fand eine Vermehrung des Nematoden statt ($r > 1$), unterhalb eine Reduktion der Population ($r < 1$). Anfällige Zuckerrüben vermehrten den Nematoden insbesondere bei geringem Ausgangsbestand sehr stark, während resistente Sorten überwiegend zu einem Populationsrückgang führten.

Die Kalibrierung entsprechend der zuvor vorgestellten Vorgehensweise führt mit $a = 1,02$ und $b = 0,03$ zur besten Anpassung bei resistenten Zuckerrüben, wie in Anhang 12 und 13 anhand der Entwicklung der Nematodenpopulation und der Fehlerwerte zu sehen ist. Die wirtsspezifische Verseuchungsdichte beträgt 374 Eier und Larven.

4.3.5.3 Für resistente Kruziferen

Für die Modellkalibrierung für resistente Kruziferen standen keine Rohdaten der BBA zur Verfügung. Stattdessen wurde auf von SCHLANG (1997, S. 234 und 1998a, S. 158) veröffentlichte Regressionsrechnungen für resistente Zwischenfrüchte verschiedener Anfälligkeitsstufen (AS, vgl. Kapitel 3.2.3) auf der Basis langjähriger Feldversuche zurückgegriffen (Abbildung 31). Die Kurvenschar setzt sich aus experimentell ermittelten (AS 2, 4, 7) und aus abgeleiteten Kurvenzügen (AS 1, 3, 5, 6, 8, 9) zusammen (SCHLANG, 1998a, S. 157).

Abbildung 31: Vermehrungsraten von Ölrettich unterschiedlicher Anfälligkeitsstufen

Quelle: SCHLANG, 1998a, S. 158

SCHLANG (1999b, S. 7) ergänzte die in Abbildung 31 dargestellten Anfälligkeitsstufen um die Note „1,5“ mit der Regressionsgleichung $y = 11,55 x^{-0,518}$, um damit sehr gute Sorten innerhalb der AS 2, wie die Ölrettichsorte Adagio (SCHLANG, 2001, mündl.), zu kennzeichnen. Da nur die Anfälligkeitsstufen 1-3 als resistent bezeichnet werden, werden die Modellparameter nur für die AS 1, 1,5, 2 und 3 kalibriert. Eine weitere Unterscheidung zwischen den Sorten einer Anfälligkeitsstufe findet im Rahmen dieser Arbeit nicht statt. Ebenso wird bei der Parameterschätzung mangels ausreichender Quantifizierbarkeit der in Kapitel 3.2.3.3 festgestellten Unterschiede nicht zwischen Gelbsenf und Ölrettich differenziert. Beide Kreuziferen werden demnach als nematologisch gleichwertig angesehen.

Bei der Modellkalibrierung für die biologische Nematodenbekämpfung muss eine andere Vegetationslänge und damit Simulationsdauer als beim Anbau von Zuckerrüben zugrunde gelegt werden. Erfolgt der Anbau resistenter Kreuziferen im Rahmen des Anbausystems Flächenstilllegung, ist zu beachten, dass zur Ausnutzung optimaler Temperatursummen die Aussaat Anfang bis Mitte Mai erfolgen sollte (siehe Kapitel 3.2.3.2), ein Mulchen zwischen dem 1.4. und 15.7. nicht zulässig ist und ein Umbruch der Stilllegungsflächen nicht vor dem 1.9. des Jahres erfolgen darf. Nur zur Vorbereitung der Herbstaussaat von Ackerfrüchten, die zur Ernte im folgenden Kalenderjahr bestimmt sind, ist ein Umbruch ab dem 15.7. erlaubt, sofern dies aus ackerbaulichen Gründen vor dem Ende des Stilllegungszeitraums erforderlich ist (vgl. BMVEL, 2005, S. 53). Für die Modellkalibrierung wird daher eine Vegetationsdauer von 130 Tagen (1.5.-7.9.) für das Anbausystem Flächenstilllegung angenommen (vgl. SCHLANG, 2002, S. 205). Um für den Zwischenfruchtanbau mit den gleichen Modellparametern arbeiten zu können, werden auch bei diesem Anbausystem 130 Tage Vegetationslänge unterstellt. Die Parameterkalibrierung an den Regressionsergebnissen für eine resistente Sorte der AS 1 ist in

den Anhängen 14 und 15 exemplarisch für alle Anfälligkeitsstufen dargestellt. Die Kalibrierung für die weiteren Anfälligkeitsstufen erfolgt analog. Die Modellparameter und die zu den Anfälligkeitsstufen gehörenden wirtsspezifischen Verseuchungsdichten sind in Anhang 20 zu finden. 694 Eier und Larven wirtsspezifische Verseuchungsdichte unterstreichen die Aussage, vom Einsatz von Ölrettichen oder Senfen der Anfälligkeitsstufe 3 zur biologischen Nematodenbekämpfung abzuraten (siehe Kapitel 3.2.3.4).

Die in Kapitel 3.2.3.1 gezeigte Abhängigkeit des Bekämpfungserfolges vom Aussaat- bzw. Auflaufzeitpunktes der Zwischenfrucht muss sich im Populationsmodell wieder finden. Dazu wird zunächst die gemäß den Regressionsfunktionen in Abbildung 31 mögliche Populationsreduktion durch eine resistente Kruzifere als bestmögliche Reduktionsleistung, d.h. 100% Bekämpfungswirkungsgrad ($\eta=1,0$), angenommen und als $r_{100\%}$ bezeichnet. Die bereits kalibrierten Modellparameter für die vier Anfälligkeitsstufen gelten daher nur für $r_{100\%}$, d.h. bei Aussaat der Zwischenfrucht bis zum Ende der zweiten Julidekade (20. Juli). Durch die nach der zweiten Julidekade sinkende Bodentemperatursumme (siehe Anhang 4) verringert sich die erzielbare Populationsreduktion und steigt die Vermehrungsrate r_η (siehe Abbildung 17) in dem Maße, in dem die notwendige Temperatursumme von 800°C unterschritten wird. Der in Anhang 4 dargestellte Verlauf der relativen Bodentemperatursumme gibt daher auch den Verlauf des Bekämpfungswirkungsgrads über die Aussaatdekaden der Zwischenfrucht wieder. Der funktionale Zusammenhang zwischen theoretischer und erzielbarer Populationsreduktion lässt sich mit Gleichung 19 darstellen.

$$r_\eta = 1 + \eta(r_{100\%} - 1) \quad (19)$$

Die Staffelung der Aussaatzeiten der Zwischenfrucht entsprechend der Temperatursummen in Dekaden (10-Tages-Schritten) reduziert die Zahl der Systemzustände, für die die Modellparameter zu kalibrieren sind und ist angesichts der Ungewissheit bezüglich des genauen Erntetermins der vorangegangenen Hauptfrucht, Erntedauer und Dauer der Bodenbearbeitung ausreichend genau. Als frühestmöglicher Aussaatzeitraum wird im Modell die zweite Julidekade (11.-20. Juli) angesehen, der nur nach frühräumender Hauptfrucht Wintergerste erreicht werden kann, und als letzmöglicher die 3. Septemberdekade (21.-30.9.), da später gesäte resistente Kruziferen nematologisch nahezu ohne Effekt sind (vgl. Abbildung 17).

Da die Modellparameter für die Aussaat bis zur zweiten Julidekade bereits ermittelt wurden, müssen für die Anfälligkeitsstufen 1-3 einschließlich der AS „1,5“ für jede der verbleibenden sieben Aussaatdekaden der Zwischenfrucht die Modellparameter nach der in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweise ermittelt werden. Da die biologische Nematodenbekämpfung durch Begrünung der Flächenstilllegung mit resistenten Kruziferen gegenüber dem Zwischenfruchtanbau i.d.R. höhere Bekämpfungserfolge und eine höhere Bekämpfungssicherheit aufweist (siehe Kapitel 3.2.3.2), wird diesem Anbauverfahren stets ein Bekämpfungswirkungsgrad von 100% ($r_\eta = r_{100\%}$) zugeordnet.

4.3.5.4 Für weitere anfällige Wirtspflanzen wie Winterraps

Raps gilt als bessere Wirtspflanze für *H.schachtii* als die Zuckerrübe selbst (siehe Kapitel 2.2.3.1). Ob die starke Nematodenvermehrung nur am unvermeidbaren Ausfallraps nach der Ernte und/oder am eigentlichen Winterraps geschieht, bedarf noch weiterer Untersuchungen

(SCHLANG, 2003a, mündl. sowie LIZ, 2004c). Daher werden die abundanzdynamischen Wirkungen des Winterraps nicht über dessen gesamte Vegetationszeit nachgebildet, sondern vereinfachend auf ein Kalenderjahr, beginnend mit dem 1. Januar, beschränkt. Wird dem Raps analog zu den Zuckerrüben eine Standardvegetationslänge von 200 Tagen unterstellt, wobei im Gegensatz zu den Zuckerrüben das Kalenderjahr nach der Aussaat gemeint ist, ergibt sich eine Rapsernte am 19. Juli. Um die besseren Wirtseigenschaften des Winterraps im Modell nachbilden zu können, wird zur Kalibrierung der Modellparameter das von SCHLANG (1998b, S. 313 und 1999b, S. 8) vorgestellte Regressionsmodell (Gleichung 20) verwendet, das auf den ersten drei Versuchsjahren (1995-1997) der bereits für die Parameterkalibrierung der anfälligen Zuckerrüben verwendeten Versuche der Biologischen Bundesanstalt beruht.

$$r_{Raps} = 1096,16P_i^{-0,782} \quad (20)$$

Wie bereits in Kapitel 4.3.5.1 ausgeführt, weist diese ältere Regressionsrechnung insgesamt höhere Vermehrungsraten auf als das mit der Gleichung 17 beschriebene Modell. Dies zeigt sich auch bei einem Vergleich der Modellläufe für Winterraps (Anhang 16) und anfällige Zuckerrüben (Anhang 8) sowie der in Anhang 20 aufgeführten wirtsspezifischen Verseuchungsdichten. Diese ist mit 7.717 Eier und Larven bei Winterraps deutlich höher als bei anfälligen Zuckerrüben mit 5.133 Eier und Larven.

Vermehrt sich der Rübennematode lediglich am Ausfallraps, könnte die Populationsvermehrung unter der Wirtspflanze Raps durch einen rechtzeitigen Umbruch oder eine gezielte chemische Bekämpfung des Ausfallraps unterbunden werden. Nähere Untersuchungen dazu liegen allerdings noch nicht vor, ebenso wenig wie über die abundanzregulierende Wirkung zukünftig verfügbarer homozygot nematodenresistenter Rapshybriden. Der Ausfallraps dieser Rapshybriden wäre ebenfalls resistent, dessen Beseitigung demnach aus nematologischen Gründen nicht mehr erforderlich.

4.3.5.5 Für Nichtwirtspflanzen

Bei der Simulation der Populationsdynamik für den Zeitraum, in dem keine anfälligen oder resistenten Wirtspflanzen aufstehen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein einfacher allgemeiner Abbauansatz gewählt, d.h. die Phasen bzw. Systemzustände „Vegetationsruhe/Winter“ und „Nichtwirtspflanze“ werden ebenso wenig unterschieden wie zwischen unterschiedlichen Arten von Nichtwirtspflanzen. Nach SCHLANG (2001, mündl.) ist eine Trennung der Effekte „Winter“ und „Nichtwirtspflanze“ auf die Nematodenpopulation ohnehin kaum möglich, zumal sich die Zustandsbeobachtbarkeit der Nematodenpopulation in der Praxis auf die Feststellung des P_i - oder P_f -Wertes zu Zuckerrüben beschränkt. Die nematologische Gleichbehandlung aller Nichtwirtspflanzen ist konform mit den in Kapitel 2.2.3.3 aufgeführten Aussagen von FICHTNER ET AL. (1984, S. 619), LAUENSTEIN (1991, S. 293) sowie HEIJBROEK UND WITHAGEN (1997, S. 217), die verschiedenen Arten von Nichtwirtspflanzen in ihrer abundanzregulierenden Wirkung als gleichwertig anzusehen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden konstante Abbauraten (siehe Gleichung 9, Kapitel 4.3.2.2) angenommen. Bezugsgröße für die Abbauraten des „Nichtwirte-Ansatzes“ ist das Kalenderjahr, so dass die Modellparameter a und b für eine Simulationsdauer von 365 Tagen zu kalibrieren sind. Um im Abbauansatz die unterschiedlichen in der Literatur genannten jährlichen Abbauraten berücksichtigen zu können, werden die Modellparameter für diskret gestaffelte

Raten von 30-60% p.a. ($s = 0,3-0,6$) kalibriert. Die Kalibrierung ist exemplarisch für einen 30%igen Populationsrückgang pro Jahr in Anhang 18 und 19 dargestellt. Die kalibrierten Modellparameter für 30, 40, 50 und 60% Populationsrückgang im Jahr finden sich in Anhang 20.

4.3.6 Erweiterung zum stochastischen Modellansatz

Wie bereits in Kapitel 2.2.3.4 dargestellt, wirken auf die Abundanzdynamik des Rübennematoden eine Vielzahl stochastischer Einflussgrößen. An erster Stelle ist hier der Einfluss verschiedener Witterungsgrößen zu nennen. Hinzu kommen die Unsicherheiten bei Befallserhebungen in Form von ungleichmäßiger räumlicher Verteilung des Nematoden im Feld und Messfehlern. Diese Faktoren führen zu einer starken Volatilität der Populationsdynamik, die sich z.B. in den geringen Bestimmtheitsmaßen R^2 bei den monofaktoriellen Regressionsansätzen manifestiert. So weist die Potenzfunktion für anfällige Zuckerrüben lediglich 57% erklärte Varianz auf (Abbildung 20) und die für resistente Zuckerrüben 38% (Abbildung 30).

4.3.6.1 Grundlagen der Abbildung von Stochastik in Modellen

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, stochastische Einflüsse aus der Systemumwelt in einem Modell abzubilden (vgl. MCSORLEY, 1992, S. 172ff.; BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 26ff. sowie MCSORLEY, 1998 S. 126f.). In deterministischen Modellansätzen können Monte-Carlo-Techniken zum Einsatz kommen. Dazu wird z.B. für P_i -Werte eine statistische Verteilung unterstellt und aus dieser einzelne Startwerte für wiederholte Alternativrechnungen gezogen, so dass eine Verteilung von Outputgrößen generiert wird, die anhand ihrer statistischen Momente charakterisiert werden kann. Zusätzlich können Abbauraten unter Nichtwirten zufällig oder aus einer empirisch hinterlegten Verteilung gezogen werden. In Simulationsmodellen, die Witterungsgrößen inkorporieren, können Alternativrechnungen mit zufällig ausgewählten Witterungsszenarien durchgeführt werden. Bei Simulationsmodellen mit einem alterstrukturiertem Ansatz (vgl. Kapitel 4.3.3.2) besteht des weiteren die Möglichkeit, verteilte Verzögerungsfunktionen zu benutzen, um den Übergang einer Population von einem Stadium in das nächste zu beschreiben, anstatt anzunehmen, dass jedes Individuum einer Population nach genau der gleichen Zeit oder Wärmesumme ins nächste Stadium wechselt (vgl. MCSORLEY UND PHILLIPS, 1993, S. 74).

In zeitdiskreten Ansätzen auf der Basis von Regressionsmodellen können Jahresschwankungen z.B. durch die Verwendung jahresspezifischer Regressionsfunktionen berücksichtigt werden. Per Zufallsgenerator könnte zwischen Regressionen ausgewählt werden, denen jeweils nur Versuchsergebnisse aus einer Vegetationsperiode zugrunde liegen (vgl. MCSORLEY, 1992, S. 171f. sowie HEIJBOEK UND WITHAGEN, 1997). Alternativ können Vertrauensintervalle um Regressionsfunktionen mit geringem Bestimmtheitsmaß angegeben werden (vgl. FERRIS, 1984, S. 6 und MCSORLEY, 1992, S. 174f.). Dies ist aber verbunden mit einem Ausschluss möglicher Realisationen und daher einer unzulässigen Einschränkung der Ergebnisvariabilität, auch wenn MCSORLEY (1992, S. 179) eine Einschränkung der Streuung für sinnvoll und notwendig hält, da ansonsten die Gefahr besteht, dass schon nach wenigen Jahren die Streuung der Nematodenpopulation so groß ist, dass Vorhersagezwecke kaum mehr zu erfüllen sind.

4.3.6.2 Verwendeter Ansatz zur Implementierung der Stochastik

Die Forderung nach Verhaltensisomorphie des einfachen Black-Box-Modellansatzes zur Nachbildung der Abundanzdynamik des Nematoden bedeutet, dass die mit dem Modell gene-

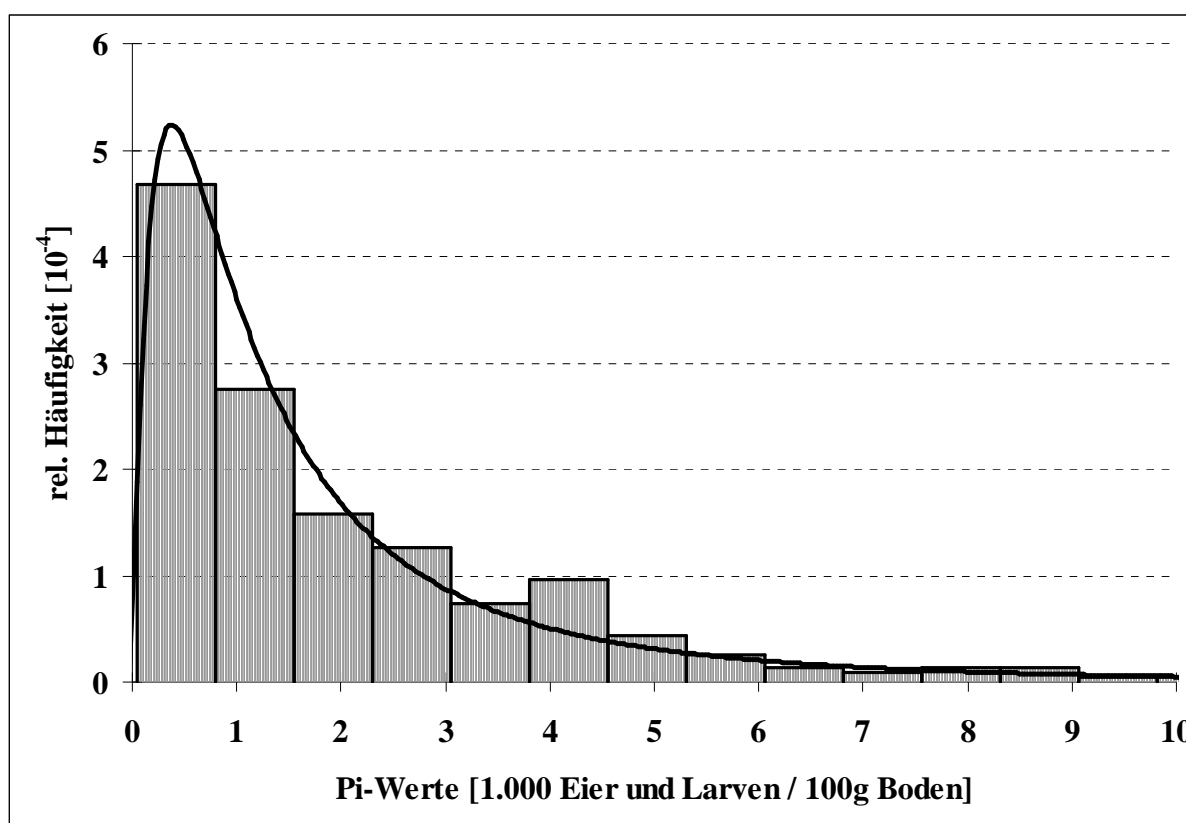
rierte Verteilungsform und Streubreite der Outputgrößen die im Feld beobachtbare Verteilung und Streuung der Nematodenpopulation wiederzugeben hat. Da sich in der Praxis die Befallserhebungen und damit die Quantifizierung der natürlichen Populationsstreuung im Laufe einer Fruchtfolge auf die Feststellung der P_i - und P_f -Werte zu Zuckerrüben beschränken, kann eine empirische Verifikation und Validierung des stochastischen Ansatzes bestenfalls für diese zwei diskreten Systemzustände während des Anbaus der Wirtspflanze Zuckerrübe vorgenommen werden. Daher bietet es sich an, die Nematodenpopulation $N(t)$ mit dem kontinuierlichen Modellansatz (Gleichung 15) über die Zeit fortzuführen und das an sich deterministische Simulationsergebnis zu den Zeitpunkten Saat und Ernte der Wirtspflanze Zuckerrübe, $N(Saat)$ und $N(Ernte)$, in geeigneter Weise so zu „verrauschen“, dass Verteilungsform und -streuung der in Kapitel 4.3.5.1 und 4.3.5.2 vorgestellten Rohdaten der Vermehrungsversuche der BBA unter resistenten und anfälligen Zuckerrüben erreicht werden. Dazu werden zu den genannten Zeitpunkten aus der im Folgenden festzustellenden Verteilung P_i - und P_f -Werte als stochastische Modelloutputgrößen gezogen und für die weitere Fortentwicklung der Nematodenpopulation zu Grunde gelegt. Man kann diese Vorgehensweise als Monte-Carlo-Simulation bezeichnen (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 240f.). In einem erwartungstreuen stochastischen Modellansatz muss der Erwartungswert der gezogenen P_f -Werte der Modellgröße $N(Ernte)$ und der Erwartungswert der gezogenen P_i -Werte der Modellgröße $N(Saat)$ entsprechen (Gleichung 21 und 22).

$$E(P_{i,gezogen}) = N(Saat) \quad (21)$$

$$E(P_{f,gezogen}) = N(Ernte) \quad (22)$$

Im Feld beobachtete Nematodenpopulationen entsprechen in aller Regel rechtsschiefen Verteilungen für positive Merkmalsausprägungen (Nichtnegativität), je nach Beprobungstechnik der negativen Binomial- oder der Poisson-Verteilung (vgl. Kapitel 3.1.2). Als kontinuierliches Pendant zu diesen diskreten Verteilungen kann die Lognormalverteilung sehr gut für die Versuchsergebnisse der BBA der Jahre 1995-2000 angenommen werden, wie exemplarisch für die P_i -Werte unter anfälligen Zuckerrüben in Abbildung 32 dargestellt ist. Darstellungen der Verteilung aller Versuchsergebnisse der BBA befinden sich in Anhang 21 und 22.

Abbildung 32: Verteilung der Versuchsergebnisse der BBA für anfällige Zuckerrüben



Quelle: Eigene Darstellung

Zur Überprüfung der Lognormalverteilung der Versuchsergebnisse der BBA werden in SPSS[®], SPSS Inc., den P_i - und P_f -Werten für anfällige und resistente Zuckerrüben in so genannten P-P-Plots (Wahrscheinlichkeitsnetzen) Lognormalverteilungen gegenübergestellt. Je mehr die kumulierten Anteile der zu untersuchenden Datenmenge den kumulierten Anteilen der Testverteilungen entsprechen, desto stärker gruppieren sich die Punkte entlang der Winkelhalbierenden (vgl. SPSS INC., 1989-2003). Anhang 23 und 24 zeigen, dass Lognormalverteilungen für die Populationserhebungen sowohl unter anfälligen als auch unter resistenten Zuckerrüben angenommen werden können.

Die Lognormalverteilung steht in engem Zusammenhang zur algorithmisch leicht zu implementierenden Normalverteilung (NV)¹⁷. Ist $\ln(X)$ eine $NV(\mu, \sigma^2)$ -verteilte Zufallsvariable, so heißt X selbst logarithmisch normalverteilt oder lognormalverteilt (HARTUNG ET AL., 1998, S. 151). Der Erwartungswert der lognormalverteilten Zufallsvariablen X ist

$$E(X) = e^{\mu + \sigma^2 / 2}. \quad (23)$$

Aufgrund der geforderten Erwartungstreue (vgl. Gleichung 21 und 22) ergibt sich somit für den stochastischen Modellansatz mit lognormalverteilten P_i - und P_f -Werten:

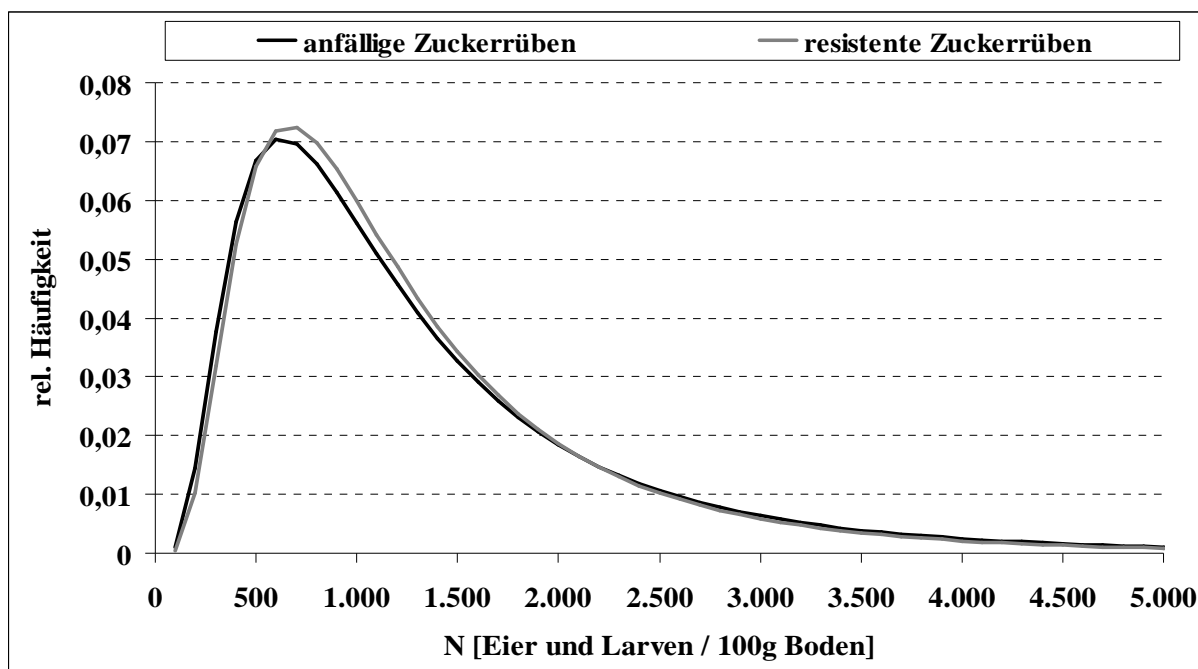
¹⁷ Zur Darstellung der Normalverteilung wird im Rahmen dieser Arbeit die Abkürzung NV verwendet, da die Variable N bereits die Nematodenpopulation charakterisiert.

$$\begin{aligned}
E(P_{f,gezogen}) &= N(Ernte) = e^{\mu + \sigma^2 / 2} \\
\Leftrightarrow \ln(N(Ernte)) &= \mu + \sigma^2 / 2 \\
\Leftrightarrow \mu &= \ln(N(Ernte)) - \frac{\sigma^2}{2} \\
\Rightarrow \ln(P_{f,gezogen}) &= NV\left(\ln(N(Ernte)) - \frac{\sigma^2}{2}, \sigma^2\right) \\
\Leftrightarrow P_{f,gezogen} &= e^{NV\left(\ln(N(Ernte)) - \frac{\sigma^2}{2}, \sigma^2\right)} \tag{24}
\end{aligned}$$

$$\Rightarrow P_{i,gezogen} = e^{NV\left(\ln(N(Saat)) - \frac{\sigma^2}{2}, \sigma^2\right)} \tag{25}$$

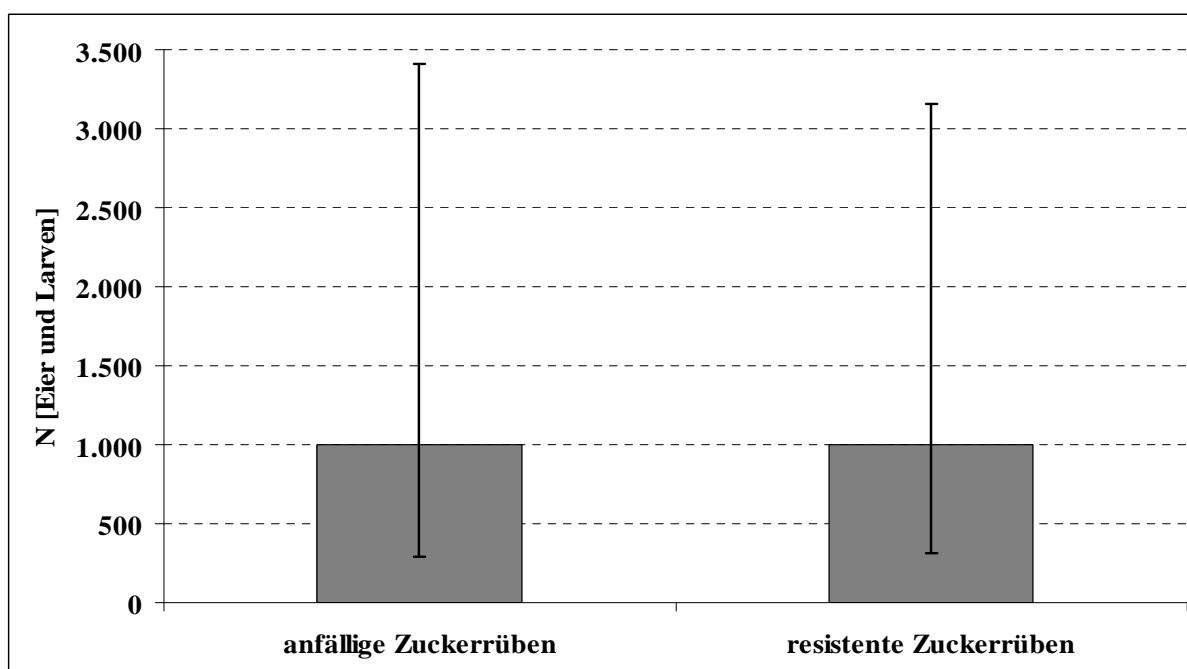
Nachdem die Lognormalverteilung als Verteilungsform für den stochastischen Modelloutput mit den Gleichungen 24 und 25 festgelegt ist, muss als verbleibende Unbekannte die Standardabweichung σ als Streuungsmaß bestimmt werden. Sind die Rohdaten der Versuche der BBA lognormalverteilt, sind sie zur Basis e logarithmiert normalverteilt, so dass deren Stichprobenstandardabweichung für diesen Zweck verwendet werden kann. Allerdings werden ausschließlich die Stichprobenstandardabweichungen der P_f -Werte nach anfälligen und resistenten Zuckerrüben, und nicht auch die der P_i -Werte, ermittelt und verwendet, da die Historie der Versuchsfelder nicht bekannt ist und daher keinerlei Aussagen bezüglich des Zustandekommens der P_i -Werte und deren Streuung möglich ist. Es wird angenommen, dass die zu ermittelnden Standardabweichungen der P_f -Werte auch für die P_i -Werte Gültigkeit haben.

Zur Ermittlung der Stichprobenstandardabweichungen müssen die logarithmierten Rohdaten trendbereinigt werden. Dieser Trend kommt in Form der Dichteabhängigkeit der Nematodenvermehrung zum Ausdruck, die in den Rohdaten mit Potenzfunktionen als Regressionen (siehe Abbildung 20 und Abbildung 30) und damit in den logarithmierten Rohdaten mit Linearfunktion (Anhang 31 und 32) dargestellt wird. Die Stichprobenstandardabweichung der logarithmierten und trendbereinigten Versuchsergebnisse der BBA beträgt für die P_i - und P_f -Werte bei anfälligen Zuckerrüben $\sigma_{aZR} = 0,746$ und bei resistenten Zuckerrüben $\sigma_{rZR} = 0,699$. Abbildung 33 zeigt die Dichtefunktionen der Lognormalverteilungen einer Nematodenpopulation mit dem Erwartungswert $E(N) = 1.000$ Eier und Larven bei anfälligen und resistenten Zuckerrüben.

Abbildung 33: Zwei lognormalverteilte Nematodenpopulationen mit $E(N)=1.000$ 

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 34 sind Erwartungswerte und 90%-Intervall der Verteilungen dargestellt. Das 90%-Intervall umfasst 90% aller Realisationen und errechnet sich als Abstand zwischen dem 5%- und dem 95%-Perzentil der stochastischen Größe. Abbildung 33 und Abbildung 34 verdeutlichen, wie die Nematodenpopulation im stochastischen Ansatz gestreut wird und dass der stochastische Output erwartungstreu gegenüber dem deterministischen Ergebnis ist.

Abbildung 34: 90%-Intervall der zwei lognormalverteilten Nematodenpopulationen

Quelle: Eigene Darstellung

4.4 Modell zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe

Das Wissen um die Zuckerrübenenerträge in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen und dem Nematodenbefall spielt ebenso wie das Wissen um die Populationsdynamik des Schaderregers eine wichtige Rolle im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements. Ohne die physischen Größen potentieller Rübenenertrag und zu erwartende nematodenbedingte Ertragsdepressionen können keine ökonomisch sinnvollen Entscheidungen getroffen werden.

Die Gliederung dieses Kapitels entspricht der des vorangegangenen Kapitels 4.3, in dem das Populationsmodell für *H.schachtii* entwickelt wurde. Zunächst werden Zweck und Anforderungen des zu entwickelnden Modells definiert und anschließend die Grundlagen für ein Zuckerrübenmodell beschrieben, vorhandene Ansätze vorgestellt und bewertet. Dem schließt sich die Konzeptionierung des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Modells und dessen Validierung an.

4.4.1 Einordnung des Subsystems im Entscheidungsunterstützungssystem

Die einzelnen Managementmaßnahmen im Rahmen des INM bedingen Entscheidungen, die vor der Saat der Wirtspflanze Zuckerrübe zu treffen sind. Damit zum Entscheidungszeitpunkt Wissen um potentielle und realisierbare Zuckerrübenenerträge vorhanden ist, muss das Modell zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe in der Lage sein, den Rübenenertrag mit und ohne Nematodeneinfluss zum Erntezeitpunkt zu prognostizieren und dies sowohl für anfällige, als auch für nematodenresistente Zuckerrüben, zwischen denen es diesbezüglich Unterschiede gibt, wie in Kapitel 3.2.4 gezeigt.

Der wichtigste physische Modelloutput muss der bereinigte Zuckerertrag als Basis für die ökonomische Bewertung des Anbausystems (Kapitel 4.5) sein. Gleichung 26 zeigt, dass sich der bereinigte Zuckerertrag (BZE) errechnet aus dem Rübenmasseertrag (RE), gemessen in Dezitonnen je Hektar (dt/ha), dem Zuckergehalt (ZG), gemessen in % Polarisation, und den Ausbeuteverlusten (AV), gemessen in Prozentpunkten, einem Maß für die innere Qualität des Rübenkörpers (vgl. MÄRLÄNDER, 1991, S. 16).

$$BZE = RE * (ZG - AV) \quad (26)$$

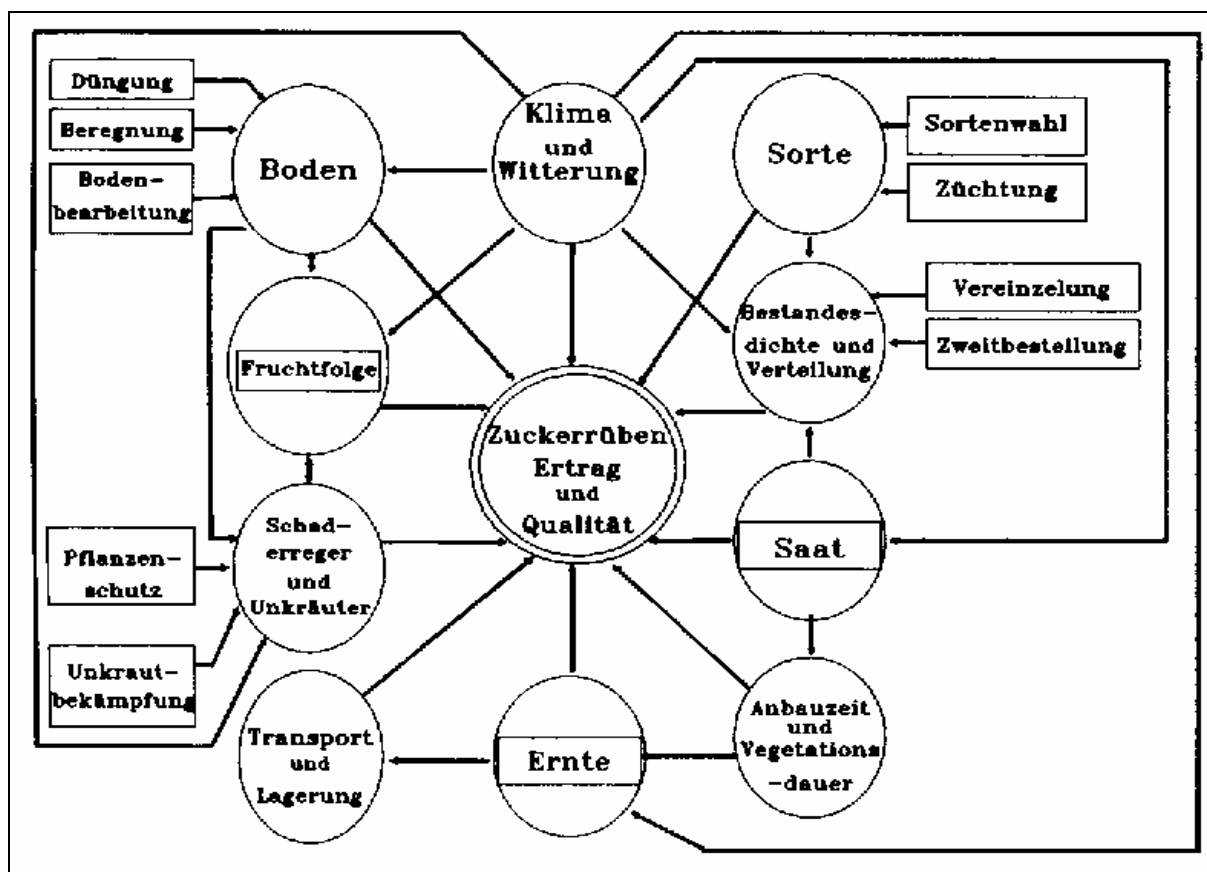
Das Modell zur Simulation der Ertragsdynamik muss daher als für das Integrierte Nematodenmanagement relevante Größen neben dem Rübenenertrag die sekundären Ertragsparameter Zuckergehalt und Ausbeuteverluste als Output mit und ohne Nematodeneinfluss generieren können. Es erfolgt zunächst die Betrachtung des Systems Zuckerrübe ohne die Interaktion Zuckerrübe – *H.schachtii*.

4.4.2 Modellgrundlagen

Wie bereits beim Schaderreger Nematode, gilt auch für die Modellierung des Rübenenertrags und der sekundären Ertragsparameter der Zuckerrübe, dass sowohl die wesentlichen physiologischen Elemente des Pflanzenwachstums als auch die Wirkung exogener und endogener Faktoren bekannt sein müssen. ALIO (1993, S. 13), der in dem biologischen System Zuckerrübe, das die Entwicklung und das Wachstum der Zuckerrübenpflanze im Laufe der Vegetati-

onsperiode umfasst, ein Subsystem des Agrarökosystems Zuckerrübe sieht, das mit den anderen Subsystemen Standort und landwirtschaftliches Unternehmen interagiert, gibt einen systemanalytischen Überblick über die Einflüsse auf Ertrag und Qualität der Zuckerrübe sowie deren Interaktion (ebd., S.78, siehe Abbildung 35). Von denen werden im Folgenden die wichtigsten abgehandelt.

Abbildung 35: Einflüsse auf Ertrag und Qualität der Zuckerrübe



Quelle: ALIO, 1993, S. 78

Wie Abbildung 35 zeigt, ist der Ertrag eines Zuckerrübenbestandes das Endergebnis einer Kette vielfach ineinander greifender und sich wechselseitig bedingender Prozesse in Pflanze und Umwelt. Das physiologische Potential der Pflanze wird von den am Standort wirksamen Witterungsfaktoren wie Temperatur, Einstrahlung und Wasserverfügbarkeit beeinflusst und in der Regel durch mindestens einen dieser Faktoren begrenzt.

Die Einflussfaktoren auf den Ertrag und die Qualität der Zuckerrübe sind in ihrer Wirkung unterschiedlich stark. MÄRLÄNDER (1991) untersuchte die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf den bereinigten Zuckerertrag in Nordwestdeutschland und stellt fest, dass, gemessen an den mittleren Varianzanteilen im Untersuchungszeitraum, das betrachtete Anbaujahr die größte relative Bedeutung hat (ebd., S. 92, siehe Übersicht 4). Der Effekt des Jahres setzt sich dabei aus der Jahreswitterung mit Temperaturverlauf, Niederschlagsmenge und -verteilung sowie Einstrahlungsintensität zusammen, die als essentielle Wachstumsfaktoren die Ertragsbildung der Zuckerrübe grundlegend bestimmen.

Übersicht 4: Wirkung unterschiedlicher Einflussfaktoren auf den BZE

<u>Einflussfaktor</u>	<u>Mittlerer Varianzanteil in %</u>
Jahr	37,7
Aussaatzeit	23,4
Produktionsort	20,5
Bestandsdichte	10,1
Erntezeit	7,5
Sorte	0,5
N-Düngung	0,3

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an MÄRLÄNDER, 1991, S. 99

Nach Übersicht 4 übt auch die Aussaatzeit einen großen Einfluss aus. Da diese im Wesentlichen von der Feuchte und damit Befahrbarkeit des Bodens im Frühjahr abhängt, wird sie maßgeblich von Produktionsort und Jahreswitterung bestimmt. Der Produktionsort als dritt-wichtigste Einflussgröße kann nur in Wechselwirkung mit der Jahreswitterung betrachtet werden, da Bodentyp und Bodenart nicht nur die Nährstoffverfügbarkeit beeinflussen, sondern über Korngrößenzusammensetzung und Tiefgründigkeit auch die nutzbare Feldkapazität und damit die Wasserverfügbarkeit bestimmen. Im Vergleich dazu haben Bestandsdichte, Sortenwahl und N-Düngung eine weitaus geringere Wirkung auf den BZE, auch wenn der Einfluss auf Einzelgrößen sehr deutlich sein kann, z. B. der N-Düngung auf die Ausbeuteverluste oder des Sortentyps auf den Zuckergehalt.

Die natürlichen Umweltfaktoren beeinflussen die Ertrags- und Qualitätsmerkmale ackerbaulicher Produktionsverfahren demnach sehr stark und können als die wesentlichste Ursache für die Bildung von Ertrag und Qualität der Zuckerrübe im Vergleich zu anbautechnischen Maßnahmen betrachtet werden (vgl. MÄRLÄNDER, 1991, S. 98). Ein Ertragsmodell muss die wichtigsten Einflussgrößen inkorporieren. Dabei stellt sich wie beim Modell zur Simulation der Populationsdynamik des Nematoden (vgl. Kapitel 4.3.3.3) die Frage, ob ein einfacher Black-Box-Ansatz auf der Basis empirischer Regressionsrechnungen ausreichend ist, den Rübenertrag und die sekundären Ertragsparameter zeitdiskret am Tag der Ernte zu prognostizieren (Verhaltensisomorphie), oder ob ein strukturisomorpher mechanistischer Ansatz, der die Outputgrößen zeitkontinuierlich, d.h. über die gesamte Vegetationsdauer der Zuckerrübe, generiert, problemadäquat ist.

Black-Box-Ansätze auf der Basis empirischer Regressionen tragen Umweltparameter gegen den Ertrag ab. Sie sind einfach anzuwenden und gültig, wenn sie innerhalb der Region oder unter den Klimabedingungen eingesetzt werden, für die sie entwickelt und verifiziert wurden. Die am häufigsten zur Anwendung kommenden Umweltparameter sind Niederschlag, Temperatur, Sonneneinstrahlung und teilweise auch Nährstoffversorgung (VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM, 1995, S. 270). Neben dieser Kombination aus Wetterdaten sind der Saat- bzw. Auf- und der geplante Erntetermin Inputgrößen. Allerdings gibt es Beschränkungen bei der Allgemeingültigkeit dieser Modelle, weshalb für verschiedene Regionen verschiedene

Modelle notwendig sind. Darüber hinaus werden keine Erklärungen für den Einfluss von Umweltfaktoren auf Rüben- und Zuckerertrag gegeben. Tatsächlich stellen diese rein deskriptiven Ertragsmodelle lediglich eine statistische Analyse der Pflanze-Witterungs-Beziehungen dar (vgl. ebd., S. 272).

Zur Vermeidung dieser Einschränkungen und Nachteile bilden strukturisomorphe Ansätze die hinter der Ertragsentwicklung stehenden physiologischen Prozesse wie Photosynthese und Transpiration und ihre Wechselwirkungen detailliert nach. In solchen Pflanzenwachstumsmodellen wird die Pflanze typischerweise unterteilt nach Gewebearten oder Organen, wie Blätter, Wurzeln, Rübenkörper, etc. (vgl. VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM, 1995, S. 272). Es wird angenommen, dass das betrachtete System eine bekannte Struktur hat und dass Eigenschaften und Prozesse der Komponenten mit Hilfe mathematischer Gleichungen beschrieben werden können. Da bei solch komplexen Modellen analytische Lösungsverfahren i.d.R. nicht durchführbar sind, eignet sich die Simulation als numerisches Lösungsverfahren.

Nicht für alle Modellzwecke ist ein komplexer mechanistischer Modellansatz notwendig. Es gibt vereinfachte Pflanzenwachstumsmodelle, die mit einem einfachen mathematischen Ansatz die Veränderungen der Zustandsvariablen über die Zeit qualitativ darstellen. Mit dem Wissen, dass natürliche Wachstumsprozesse wie das der Zuckerrübe in ihrer mengenmäßigen Ausdehnung bzw. Vermehrung begrenzt sind, können mit einem Ansatz auf der Basis logistischer Wachstumsfunktionen nach VERHULST und PEARL (siehe Gleichung 3) die wesentlichen Bedingungen einer begrenzten Umwelt nachgebildet werden (vgl. THOER, 1986, S. 48).

4.4.3 Literaturübersicht

Zuckerrübenmodelle wurden für verschiedene Zwecke entwickelt, wobei der Zweck eines Modells maßgeblich ist für seinen Komplexitätsgrad (vgl. VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM, 1995, S. 271):

1. Prognose der Zuckererträge auf regionaler Ebene für die Kampagneplanung der Zuckerrübenfabriken (Beginn, Kampagnedauer, etc.) oder auf Länderebene für Marktübersichten und -planungen der EU;
2. Integration wissenschaftlicher Erkenntnisse und Testen von Hypothesen sowie
3. Einsatz als Informationssysteme im Rahmen von Systemen zur Unterstützung von insbesondere taktischen oder operationalen Entscheidungen auf gesamtbetrieblicher Ebene.

Die im folgenden Kapitel vorgenommene Unterteilung vorhandener Pflanzenmodelle in empirische Regressionsmodelle und strukturisomorphe mechanistische Modelle erfolgt in Anlehnung an die Modellübersicht von VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM (1995).

4.4.3.1 Empirische Ertragsprognosemodelle

Die traditionelle Ertragsvorhersage beruht auf Proberodungsergebnissen vor Beginn der Kampagne. In genau festgelegten Zeitintervallen während der Wachstumsphase werden Pflanzen von repräsentativen Feldern entnommen. Das in vorangegangenen Jahren ermittelte Verhältnis zwischen dem gezogenen Pflanzenmaterial und Erträgen wird dazu benutzt, den diesjährigen Ertrag vorherzusagen. Diese rein statistische Vorgehensweise ist einfach und

wird daher in vielen Ländern angewandt. Nichtsdestotrotz weist dieses Verfahren einige Nachteile auf, die zur Entwicklung empirischer Simulationsmodelle führten (VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM, 1995, S. 270). So sind Proberodungen sehr arbeitsintensiv, die Repräsentativität der Versuchsfelder ist nicht immer gegeben und Datensätze vieler Jahre sind notwendig, um die Beziehung Einzelpflanze-Bestandsertrag abbilden zu können. Darüber hinaus erlauben Proberodungen nicht, Hintergründe und Ursachen für die erheblichen Schwankungen zwischen den Ergebnissen verschiedener Jahre einzusehen.

VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM (1995, S. 270f.) geben einen Überblick über vorhandene empirische Modelle zur Ertragsvorhersage von Zuckerrüben. Bei den verwendeten mathematischen Methoden handelt es sich i.d.R. um lineare oder nichtlineare Regressionen. Vergleiche zwischen den Modellvorhersagen und Beobachtungswerten zeigen, dass diese Modelle durchaus exakt arbeiten.

Der Prototyp von PIEteR (=Production model for sugar beet, including interactions between environment and growing decisions, and their influence on quantitative, qualitative and financial result) wurde 1989 von BIEMOND ET AL. vorgestellt und von SMIT (1996) durch Erweiterung mit neuen Modulen zu einem Entscheidungsunterstützungsmodell für taktische (Wahl der Zuckerrübenanbaufläche), semi-operative (Bestandesdichte und N-Düngung) und operative (Umbruch, Ernte- und Lieferzeitpunkt) Entscheidungen ausgebaut. Das Modell simuliert das Wachstum und die Ernte der Zuckerrübe feldspezifisch und in Abhängigkeit von der Witterung, Bodenfaktoren (Bodenart und -feuchte) und den Entscheidungen des Anbauers. PIEteR ist modular aufgebaut und verwendet Temperatursummen, um Auflaufdatum, Blattentwicklung und Bestandesschluss vorauszusagen. Während PIEteR unter „normalen“ Witterungsbedingungen die Realität mit nur geringen Vorhersagefehlern wiedergibt, neigt es bei unvorteilhaften Bedingungen zur Überschätzung des Ertrags, der Qualität und des Erlöses, und bei sehr günstigen Bedingungen zur Unterschätzung dieser Outputgrößen (SMIT, 1996, S. 184). Verbesserungsbedarf besteht darüber hinaus bei der Simulation des Zuckergehalts (ebd., S. 192).

BETAVAR ist ein Modell zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Sortenwahl von Zuckerrüben. Aufbauend auf Daten über Zuckerrübensorten aus der Beschreibenden Sortenliste, Standort und Betrieb bzw. Schlag, ist das von ALIO (1993) entwickelte Computerprogramm in der Lage, den erwarteten Ertrag und die Qualitätsmerkmale der Zuckerrübensorten für den jeweiligen Standort zu prognostizieren. Die Prognosen über den erwarteten Rübenertrag, den erwarteten Blattanteil und den erwarteten bereinigten Zuckerertrag werden anhand unterschiedlicher Produktionsfunktionen durchgeführt, die mit Hilfe der Regressionsanalyse ermittelt und quantifiziert werden. Der Teilprozesses Rübenertrag umfasst 14 Einflussfaktoren, die als Regressoren in die Regressionsanalyse eingehen (siehe Abbildung 35).

KOLLIG (1993, S. 186) erschienen die für die Entwicklung eines Ertragsprognosemodells bislang üblichen Abbildungstechniken, insbesondere der regressionsstatische Ansatz, unzureichend, da die Annahme der Prämissen für solche Modelle, die aus der Normalverteilungsannahme bezüglich der Grundgesamtheit resultieren, ein erhebliches Problem darstellt und in dem Zusammenwirken von Autokorrelation und Multikollinearität weitere Hemmnisse zu sehen sind (ebd., S. 31f.). Für die Entwicklung seines Entscheidungsunterstützungssystems „DSS-BETA“ beschreitet KOLLIG (1993) daher neue Wege mit der Verwendung eines neuronalen Netzes und konnte damit komplexe Vorgänge wie die Ertragsbildung bei Zuckerrüben

mit einer hohen Präzision abbilden. Auswahl und Anpassung der neuronalen Netze erwiesen sich allerdings als aufwändiger und langwieriger Prozess. Das mit diesem Werkzeug entwickelte Modul zur optimalen Anbauflächenplanung bietet dem Benutzer die Möglichkeit, schlagspezifische Ertragserwartungen in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen für das aktuelle Anbaujahr zu schätzen. Diese Schätzungen können im Laufe der Vegetationszeit mit jeweils aktuellen und den bis dato aufgetretenen und damit sicheren Umweltdaten wiederholt werden, um die Qualität der Ertragsschätzung zu steigern. Mit diesen Informationen kann zwecks Optimierung der Lieferrechtsausschöpfung der Erntetermin variiert werden.

ZENS (2002) entwickelte ein statisches Simulations- und Optimierungsmodell zur Analyse der unternehmerischen Entscheidungen im Produktionsverfahren Zuckerrübe in rheinischen Ackerbaubetrieben. Das Modell verwendet Regressionsansätze für die Entwicklung der Ertragsparameter Rübenenertrag, Zuckergehalt und Ausbeuteverluste im Laufe der Vegetationszeit (siehe Abbildung 40 und Abbildung 44) sowie deren Abhängigkeit von verschiedenen biotischen und abiotischen Faktoren. Mit ihm werden Informationen erarbeitet, die es ermöglichen, das Produktionsverfahren Zuckerrübenanbau innerhalb gegebener Umweltbedingungen ökonomisch effizient auszurichten bzw. Anpassungsreaktionen im Zuckerrübenanbau auf veränderte Umweltbedingungen vorherzusagen.

4.4.3.2 Mechanistische Pflanzenwachstumsmodelle

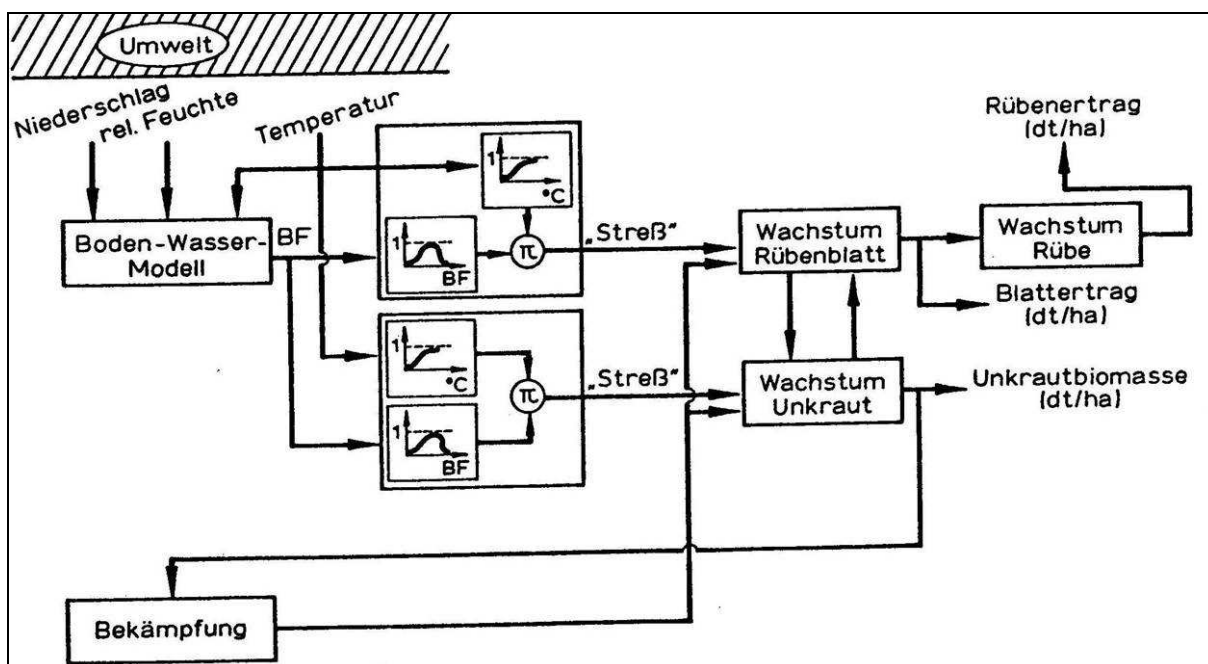
Nach VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM (1995, S. 272) werden komplexe mechanistische Simulationsmodelle zur Nachbildung des Wachstums von Zuckerrüben typischerweise für Lehr- und Forschungszwecke entwickelt, eignen sich aber auch zur Ertragsprognose. Über den neuesten Stand der Forschung über die physiologische Entwicklung der Zuckerrübe und deren Simulation mittels Modellen informiert IIRB (2003).

SUCROS (=Simple and universal crop growth simulator) wurde erstmals von VAN KEULEN ET AL. (1982) beschrieben. Das komplexe mechanistische Modell simuliert die Trockenmasseproduktion einer Pflanze von der Keimung bis zum Absterben als Funktion der täglichen Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur. SUCROS liegt mittlerweile in verschiedenen Ausbaustufen vor. Während SUCROS1 das Pflanzenwachstum unter Idealbedingungen simuliert, wurde SUCROS2 um ein Bodenwasser-Modul erweitert, um Wassermangel und Dürre implementieren zu können (vgl. VANDENDRIESSCHE UND VAN ITTERSUM, 1995, S. 274). SUCROS87 (SPITTERS ET AL., 1989) erweitert den Ansatz zur Nachbildung der Photosynthese und verbessert die Simulation der Blattflächenentwicklung.

THOER (1986) entwickelte ein dynamisches Systemsimulationsmodell für das biologisch-technische System Zuckerrübe - Unkraut auf der Basis logistischer Wachstumsfunktionen, das die Basis für eine ex ante ausgerichtete Entscheidung über den Herbizideinsatz im Zuckerrübenanbau liefert. Innerhalb des Systems erfolgt in diesem Modell eine Differenzierung nach den Subsystemen Zuckerrübe, Unkraut und Boden (Abbildung 36). Bei der Nachbildung des Zuckerrübenwachstums wird zwischen Assimilationsorgan Rübenblatt und Speicherorgan Wurzelkörper unterschieden, wobei sich die Wurzelkörperentwicklung in Abhängigkeit von der Biomasseentwicklung des Rübenblatts vollzieht. Besondere Berücksichtigung erfahren die Konkurrenzbeziehungen im Pflanzenbestand bei der Ermittlung der Biomasse. Sowohl die intraspezifische als auch die interspezifische Konkurrenz zwischen Unkraut und Zuckerrübe werden durch Erweiterungen der logistischen Wachstumsfunktionen in diesem Modellansatz einbezogen. Als endogene Inputvariablen gehen in das System die Unkrautbekämpfungsmaß-

nahmen, Bekämpfungszeitpunkt und -häufigkeit, ein. Der Einsatz der chemischen Unkrautbekämpfung führt simultan zu einem Bekämpfungserfolg bei den Unkräutern und zu einer Schädigung bei der Zuckerrübe. Der Einfluss auf die Entwicklung der Pflanzen wird abgebildet durch eine anteilmäßige Verringerung der Bestandsdichte beim Unkraut und bei der Zuckerrübe. Als das Wachstum beeinflussende exogene Variablen werden die Witterungsvariablen Temperatur, Niederschlag und relative Luftfeuchte angenommen. Diese bestimmen zunächst den Zustand des Bodenwassersystems, das innerhalb des Subsystems Boden differenziert nachgebildet wird. Der Bodenwassergehalt geht zusammen mit der Temperatur in die Berechnung der Wachstumsraten für die Pflanzen ein. Die übrigen Anbaumaßnahmen, wie z.B. Düngung und Bodeneigenschaften, werden als Systemparameter betrachtet.

Abbildung 36: Blockdiagramm des Zuckerrübenmodells von THOER

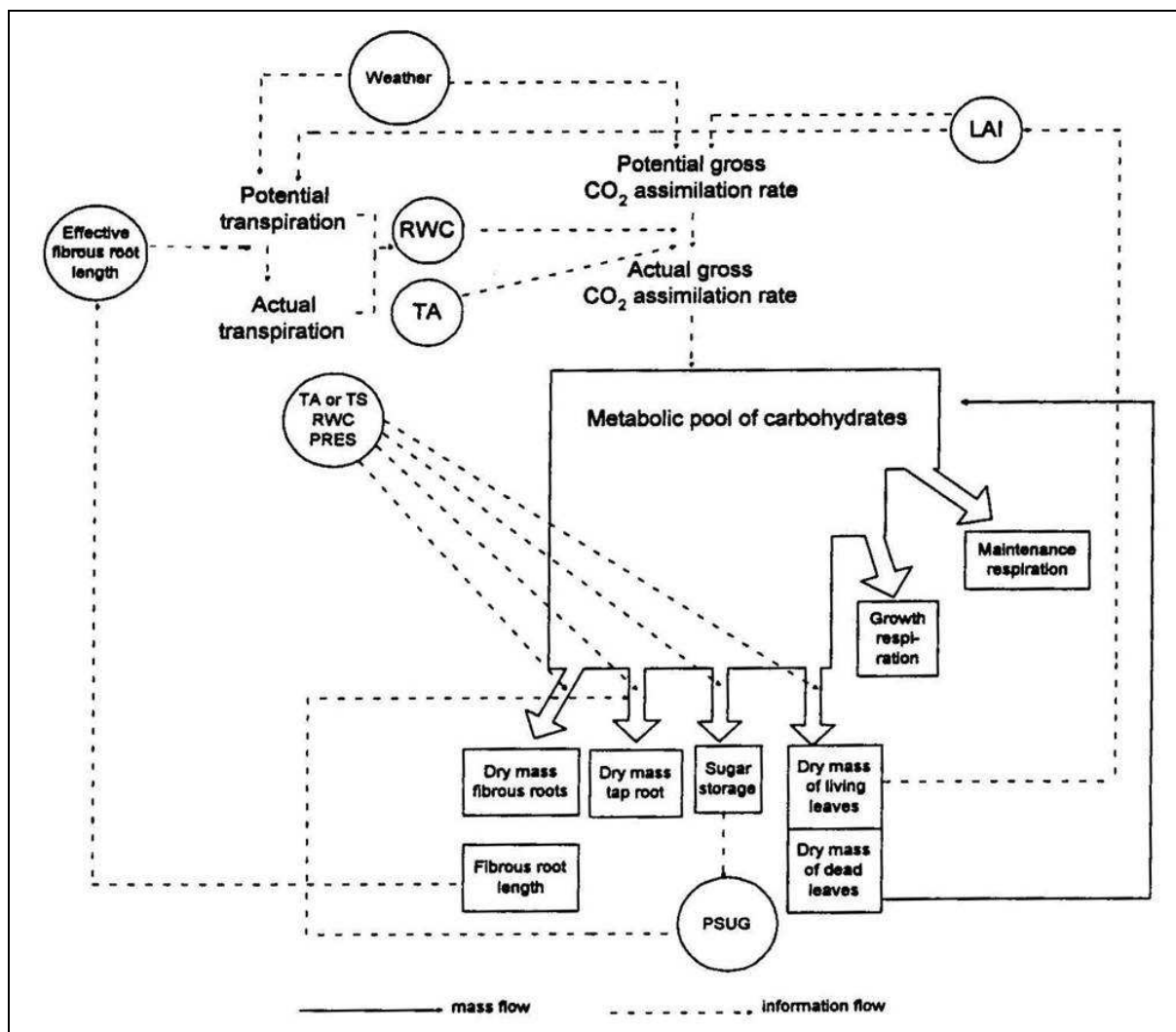


Quelle: BERG ET AL., 1988, S. 4

Als Outputvariable liefert das Modell den Rübenertrag, differenziert nach Blatt- und Wurzelkörpermasse sowie Unkrautbiomasse je ha (siehe Anhang 33 und 34). Der stochastische Charakter des Zuckerrüben-Unkraut-Systems wird durch die Ermittlung von Ertragsverteilungen auf der Basis diskreter Alternativrechnungen mit 32 Wetterjahren dokumentiert. Nach BLÖNNIGEN (1986, S. 69) zeichnet sich das von THOER entwickelte Modell durch eine hohe Abbildungsgüte bezüglich der naturalen Beziehungen im biologischen System und ihrer Steuerung durch chemische Unkrautbekämpfungsmaßnahmen aus und hat daher einen hohen Erklärungswert.

Das von VANDENDRIESSCHE (1995) entwickelte Modell SUBEMO (= Sugar Beet Model) ist ein mechanistisches Modell, welches die Entwicklung des Zuckergehalts und der Trockenmasse der Zuckerrübe stündlich auf der Basis der CO₂-Assimilation berechnet. Physiologische Prozesse werden auf Organebene simuliert. Einflussgrößen sind Temperatur, Strahlung und der relative Wassergehalt im Blattapparat der Pflanze.

Abbildung 37: Allgemeine Struktur von SUBEMO

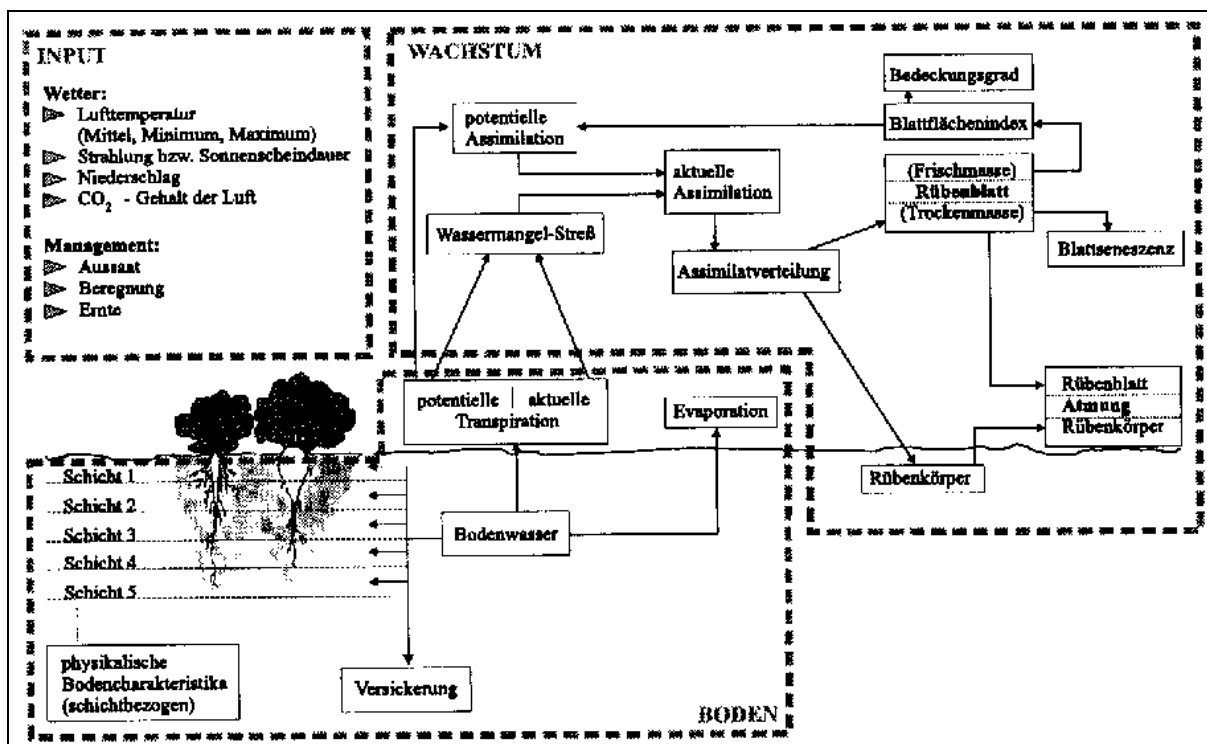


LAI: leaf area index; TA: air temperature; TS: soil temperature; RWC: relative water content of the leaves; PRES: carbohydrate status of the plant; PSUG: percentage sugar in the beet on fresh weight basis

Quelle: VANDENDRIESSCHE, 1995, S. 118

MIRSCHER ET AL. (2002) entwickelten AGROSIM-ZR, ein modularer Bestandteil der AGROSIM-Modellfamilie (AGROSIM = AGROökosystem SIMulation) des Zentrums für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) in Müncheberg. Es handelt sich um ein dynamisches Wachstumsmodell für Zuckerrüben mit Regressionsansätzen für Assimilation, Assimilatverteilung, Atmung, Biomasse- und Ertragsbildung sowie Blattflächenentwicklung. Für den gesamten Zeitraum zwischen Aussaat und Ernte der Zuckerrüben werden in Tagesschritten die Entwicklung und das Wachstum eines Zuckerrübenbestandes unter Feldbedingungen beschrieben. Abgebildet werden dabei die wichtigsten biomasseproduzierenden, aber auch biomasseverbrauchenden Prozesse, wie in der folgenden Abbildung 38 zu erkennen ist.

Abbildung 38: Strukturdiagramm von AGROSIM-ZR



Quelle: MIRSCHEL ET AL., 2002, S. 138

Ein ähnlich strukturiertes Pflanzenwachstumsmodell ist CROPGRO. Dieses von HOOGENBOOM ET AL. (1991) vorgestellte Programm simuliert das tägliche Wachstum von Halmen, Blättern, Wurzeln und Früchten mit Hilfe eines Satzes nichtlinearer Differentialgleichungen. Das Modell simuliert die physiologischen Prozesse Photosynthese, Atmung und Seneszenz und kann den Einfluss von Wasserstress, Nährstoffmangel und Krankheiten abbilden.

4.4.3.3 Konsequenzen aus der Literaturübersicht

Vor dem Hintergrund der zuvor definierten Anforderungen an das zu entwickelnde Prognosemodell als Bestandteil des Informationssystems für das Entscheidungsunterstützungssystem wird die Verwendung bzw. Entwicklung eines strukturisomorphen mechanistischen Modellansatzes als unverhältnismäßig angesehen. Neben der Beschränkung auf Verhaltensisomorphie spricht für einen aggregierteren Modellansatz, dass komplexe mechanistische Modelle wegen ihres geringen Aggregationsgrads normalerweise viele zu schätzende Parameter haben, von denen jeder mit einem Schätz- oder Messfehler behaftet sein kann. Daher muss der Modelloutput aufgrund der Kombination aller detailliert nachgebildeter Prozesse und ihrer jeweiligen Fehler nicht zwangsläufig exakter sein als der einfacher empirischer Black-Box-Ansätze (vgl. SPITTERS ET AL., 1989, S. 177). Hinzu kommt, dass zwischen der Akzeptanz eines Modells und seiner Komplexität vor allem außerhalb der Forschung eine negative Beziehung besteht (vgl. BLÖNNIGEN, 1986, S. 52 und ACKERMANN, 1992, S. 172).

Die Verwendung bzw. Entwicklung eines rein empirischen Regressionsmodells nach dem Black-Box-Ansatz wird allerdings ebenfalls als nicht problemadäquat angesehen. Vielmehr soll ein dynamisches Simulationsmodell zum Einsatz kommen, das Umwelteinflüsse auf die Ertragsentwicklung der Zuckerrübe und den Einfluss des Schaderregers *H.schachtii* in vereinfachter Form nachbilden kann. Als Kompromiss bietet sich das zu Lehrzwecken von BERG

UND KUHLMANN (1993, S. 185ff.) modifizierte Simulationsmodell von THOER (1986) als Basis für die Modellkonzeption an. Dieses generiert, wie einige andere der vorgestellten Zuckerrübenmodelle, als Modelloutput lediglich Rübenmasseerträge. Für die sekundären Ertragsparameter muss daher ein anderer Ansatz gewählt werden. Da diese, wie in Kapitel 2.3.1 dargestellt, nicht durch den Befall mit *H.schachtii* beeinflusst werden, ist ein einfacher Regressionsansatz über die Vegetationszeit für diese Modellgrößen ausreichend.

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Modelle weisen deterministische Transformationsprozesse auf. Zur Abbildung der natürlichen und auch ohne den Einfluss von Schaderregern auftretenden Ertragsvolatilität werden diskrete Alternativrechnungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird dagegen ein stochastischer Modellansatz analog zum Populationsmodell des Nematoden gewählt.

4.4.4 Modellkonzeption

In diesem Kapitel werden das von BERG UND KUHLMANN (1993, S. 185ff., Abbildung 39) modifizierte Simulationsmodell nach THOER (1986), sowie die im Rahmen dieser Arbeit daran vorgenommenen Veränderungen vorgestellt.

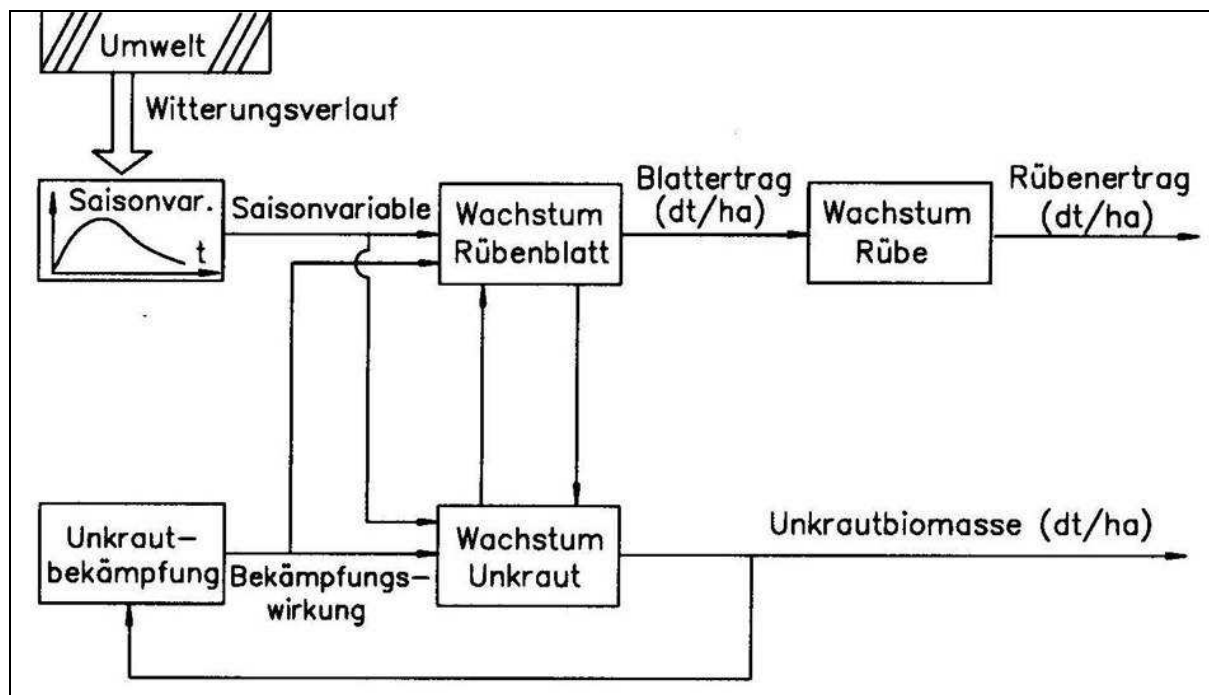
Wie bereits in Kapitel 4.4.3.2 dargestellt, basiert der Ansatz von THOER (1986) auf zwei mit einander gekoppelten Differentialgleichungen für logistisches Wachstum nach VERHULST und PEARL (siehe Gleichung 5 und 6) für die Kompartimente Rübenblatt und Wurzelkörper. THOER (1986, S. 49) erweiterte diesen Ansatz durch Einführung eines linearen Zerfallsterms bei der Biomasseentwicklung des Rübenblatts, um den natürlichen Abbauprozess abzubilden. Des Weiteren erfasst THOER (ebd., S. 49f.) intraspezifische Konkurrenz analog zu dem von LOTKA UND VOLTERRA beschriebenen Ansatz für konkurrierende Arten (vgl. RICHTER, 1985, S. 55ff.). Damit wird berücksichtigt, dass mit zunehmender Bestandsdichte das Wachstum einer Einzelpflanze aufgrund der Konkurrenz durch Nachbarpflanzen negativ beeinflusst wird. Das maximal erreichbare Einzelpflanzengewicht ist niedriger als bei einem Wachstum ohne Standraumkonkurrenz. Im ausgewählten Ansatz ist diese Wachstumsdepression umso stärker, je höher das bereits erreichte Einzelpflanzengewicht ist. Damit wird gewährleistet, dass sich der Konkurrenzeinfluss während der Jugendentwicklung der Pflanze kaum auswirkt, sondern vielmehr erst spürbar wird, wenn mit zunehmender Größe der Standraumbedarf der Einzelpflanze ebenso ansteigt (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 187).

Während THOER (1986, S. 58ff.) den Einfluss der Witterung auf die Wachstumsparameter der Rübenpflanze in Form potentieller Evapotranspiration, Bodenfeuchte, Versickerung und Temperatur explizit nachbildet (siehe Abbildung 36), aggregieren BERG UND KUHLMANN (1993, S. 185f.) den Witterungseinfluss auf das Assimilationsorgan Blatt zu einer Saisonvariablen (Abbildung 39). Durch die Formulierung zeitlicher Abhängigkeit der Saisonvariablen können so genannte Saisonfiguren abgebildet werden, mit Hilfe verschiedener Interpolationsverfahren generierte Approximationen der Saisonalität verschiedener Größen, wie z.B. der Jahresgang klimatischer Größen (Temperatur, Strahlung, etc.) oder saisonale Preisverläufe (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 157).

Eine bedeutende Stellung als ertrags- und qualitätsbestimmender Faktor im Zuckerrübenanbau hat die Temperatur, da die Ertragsbildung ein Stoffwechselprozess und die Temperatur dessen wichtigste Steuerungsgröße für Geschwindigkeit und Intensität der Reaktionsabläufe

ist. Der Temperaturfaktor steht in engen Beziehungen zu zahlreichen anderen Einflussfaktoren wie z.B. Wasserversorgung, Sonneneinstrahlung und Luftfeuchtigkeit. Da der Temperaturverlauf der gesamten Wachstumsperiode die Ertrags- und Qualitätsmerkmale der Zuckerrübe beeinflusst, wird im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der Witterungsgrößen Temperatur und Sonneneinstrahlung mit der Saisonfunktion abgebildet. Die Abbildung der Saisonfigur über das gesamte Jahr erlaubt darüber hinaus, Aussaat- und Erntezeitpunkt der Zuckerrüben als Modellvariablen verwenden zu können.

Abbildung 39: Blockdiagramm des modifizierten Zuckerrübenmodells



Quelle: BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 186

Der sowohl im Originalmodell als auch im modifizierten Ansatz nachgebildete Einfluss der Unkrautbiomasse auf die Zuckerrübe (interspezifische Konkurrenz) ist im Rahmen dieser Arbeit ohne Bedeutung und wird aus dem Modellansatz entfernt. Die Biomasseentwicklung des Rübenblatts $Y(t)$ und die des Rübenkörpers $R(t)$ wird daher mit den Differentialgleichungen 27 und 28 dargestellt.

$$\frac{dY}{dt} = S(t)g_Y Y(t) \left(1 - \frac{1 + a_{YY} D_Y}{K_Y} Y(t) \right) - w_Y Y(t) \quad (27)$$

$$\frac{dR}{dt} = g_R Y(t) \left(1 - \frac{1 + a_{RR} D_Y}{K_R} R(t) \right) \quad (28)$$

Es gelten folgende Bezeichnungen:

- $Y(t)$ = Biomasseentwicklung des Rübenblatts
- $R(t)$ = Biomasseentwicklung des Rübenkörpers
- $S(t)$ = Saisonvariable, Wertebereich zwischen 0 und 1
- g_Y = relative Aufbaurrate für das Rübenblatt
- g_R = relative Aufbaurrate für den Rübenkörper
- w_Y = relative Abbaurate des Blatts
- K_Y = physiologische Kapazitätsgrenze (Maximalgewicht) des Rübenblatts
- K_R = physiologische Kapazitätsgrenze (Maximalgewicht) eines Rübenkörpers
- a_{YY} = intraspezifischer Konkurrenzfaktor des Rübenblatts
- a_{RR} = intraspezifischer Konkurrenzfaktor der Rübenkörper
- $D_Y(t)$ = Bestandsdichte in Pflanzen/m².

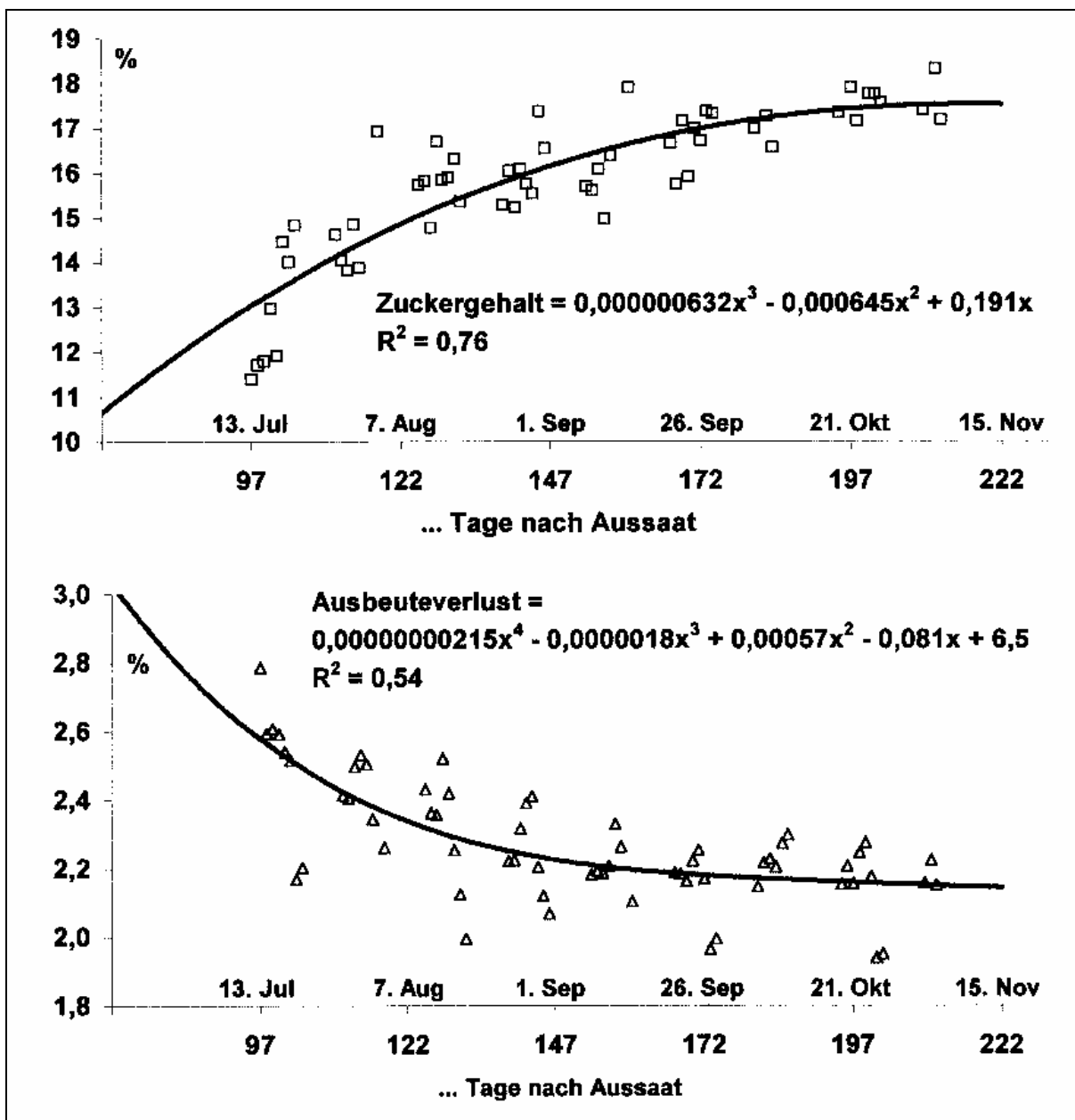
Die Differentialgleichungen modellieren das Wachstum einer Einzelpflanze unter Berücksichtigung der Standraumkonkurrenz. Die Biomasse des gesamten Bestandes, der Rübenenertrag $E_R(t)$ und der Blattertrag $E_Y(t)$, ergibt sich durch Multiplikation des Einzelpflanzenenertrags mit der Bestandsdichte (Gleichungen 29 und 30). Der Faktor 100 sorgt dabei für die Umrechnung der Biomasseerträge in Dezitonnen je Hektar (dt/ha).

$$E_Y(t) = 100Y(t)D_Y(t) \quad (29)$$

$$E_R(t) = 100Y(t)D_Y(t) \quad (30)$$

Für die Abbildung der Entwicklung der sekundären Ertragsparameter von Standardsorten wird auf die alljährlich vom Rheinischen Rübenbauer-Verband (RRV) durchgeführten Proberodungen zurückgegriffen, die ab Mitte Juli in einem ca. 14-tägigen Abstand bis Anfang November auf mehreren Praxisschlägen durchgeführt werden und repräsentativ für das Rheinland sind. ZENS (2002) hat die Proberodungsergebnisse des RRV der Jahre 1990-99 ausgewertet und für die Entwicklung von Zuckergehalt und Ausbeuteverluste Regressionen in Abhängigkeit vom Erntetermin berechnet (Abbildung 40), die im Rahmen dieser Arbeit übernommen werden.

Abbildung 40: Entwicklung sekundärer Ertragsparameter der Zuckerrübe



Quelle: ZENS, 2002, S. 62

Als Aussaattermin setzte ZENS (2002, S. 31) den 7. April fest, den durchschnittlichen Aussaattermin der Proberodungsflächen des Rheinischen Rübenanbauer-Verbands im Untersuchungszeitraum. Daher wird der 7. April auch im Rahmen dieser Arbeit als Standardaussaatzeitpunkt für die Zuckerrüben angesehen. Um den Einfluss eines variierenden Saatzeitpunkts im Modell abbilden zu können, werden die Regressionsgleichungen umgerechnet auf die Basis „Tage im Jahr“. Zuckergehalt und Ausbeuteverluste sind daher im gewählten Modellansatz nur vom Erntetermin abhängig und verändern sich nicht bei variierendem Saattermin. Dies ist nach den Untersuchungen von MÄRLÄNDER (1991, S. 49) sachgerecht, da die Abnahme des bereinigten Zuckerertrags mit zunehmender Saatzeit im Wesentlichen durch die Veränderung des Rübenertrags verursacht wird, während sich Zuckergehalt und technische Qualität der Zuckerrübe kaum verändern. Eine Differenzierung der Ertragsparameter inner-

halb des Sortenspektrums nematodenanfälliger Zuckerrüben wird nicht vorgenommen, da dieser Aspekt bei der hier behandelten Problemstellung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Nematodenresistente Zuckerrübensorten unterscheiden sich allerdings hinsichtlich der sekundären Ertragsparameter von anfälligen Standardsorten (siehe Kapitel 3.2.4). Da Proberodungsreihen nematodenresistenter Zuckerrüben nicht vorliegen, werden für diese Sorten zunächst die Zuckergehaltswerte und Ausbeuteverluste der Standardsorten berechnet und anschließend korrigiert. Für die Korrektur werden die Versuchsergebnisse der resistenten Zuckerrübensorten Nematop und Paulina verwendet, die in dem Beratungsprogramm „LIZ-Sortinfo“ (LIZ, 2004e) aufgeführt sind. Im Mittel der beiden zugelassenen nematodenresistenten Sorten Nematop und Paulina betragen der Zuckergehalt relativ 96,2% und die Ausbeuteverluste relativ 107,7% (Stand des Programms: Herbst 2004), d.h. die nematodenresistenten Sorten (rZR) erreichen nur einen um 3,8% niedrigeren Zuckergehalt und um 7,7% höhere Ausbeuteverluste als die anfälligen Vergleichssorten, (aZR), wie in Gleichung 31 und 32 dargestellt.

$$ZG_{rZR}(t) = 0,962 ZG_{aZR}(t) \quad (31)$$

$$AV_{rZR}(t) = 1,077 AV_{aZR}(t) \quad (32)$$

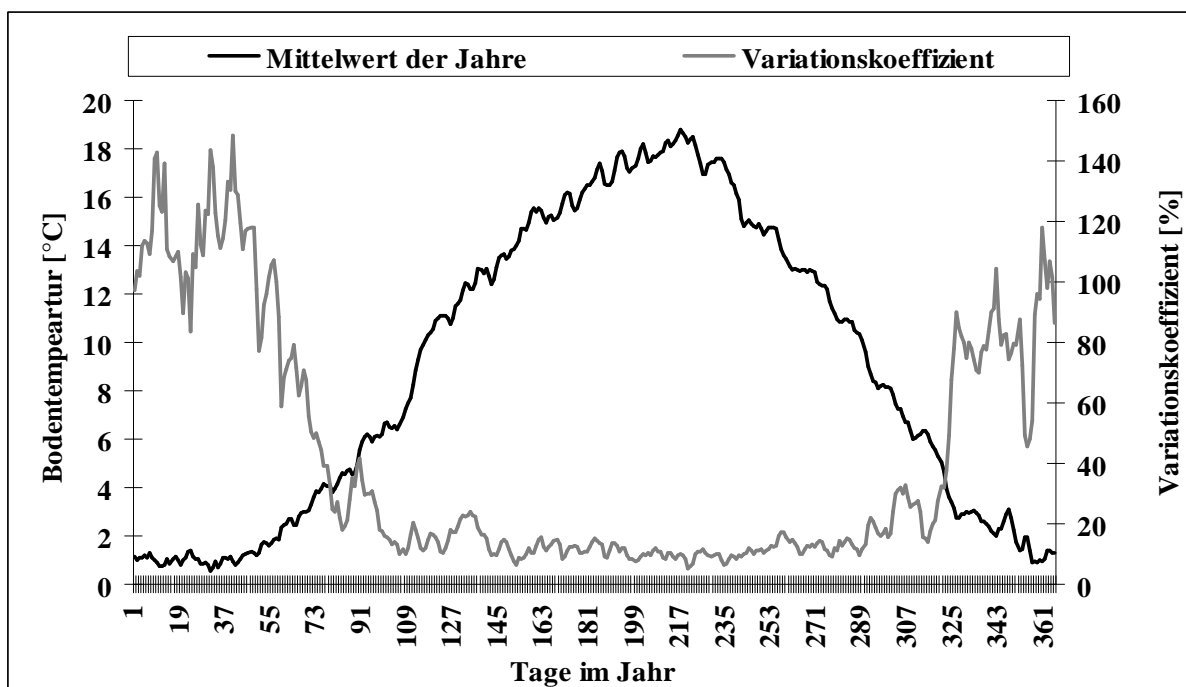
4.4.5 Kalibrierung der Modellparameter

Bevor die Parameter des mit den Gleichungen 27 und 28 definierten Zuckerrübenmodells an empirischen Ertragsdaten kalibriert werden, erfolgt die Bestimmung der Saisonfunktion. Mit ihr wird die Klimaregion definiert, für die das Zuckerrübenmodell gültig ist. Daher wird die Saisonfunktion auch nicht wie bei BERG UND KUHLMANN (1993, S. 192 und S. 323ff.) zugunsten einer Verbesserung der Anpassungsgüte der Modellergebnisse an die Beobachtungswerte simultan mit den anderen Modellparametern kalibriert.

4.4.5.1 Saisonfunktion

Die Bildung der Saisonfunktion erfolgt anhand von Tageswerten der Wetterstation der Obstbauversuchsanlage (OVA) Klein-Altendorf der Universität Bonn, die dem Autor für die Jahre 1993 bis 2000 zur Verfügung gestellt wurden. Die OVA liegt zwischen Meckenheim und Rheinbach in der südlichen Niederrheinischen Bucht. Nach langjährigen Aufzeichnungen der OVA beträgt der mittlere Jahresniederschlag 596 mm und die Jahresmitteltemperatur der Luft 9,2°C. Für die Bildung der Saisonfunktion wird allerdings die Bodentemperatur der der Luft vorgezogen, da zumindest in der Keim- und Frühphase der Zuckerrüben die Bodentemperatur maßgeblich ist und diese gegenüber der Lufttemperatur geringeren Schwankungen unterliegt. Als Basistemperatur für das Pflanzenwachstum wird in Anlehnung an MILFORD ET AL. (1985, S. 164) sowie KENTER UND HOFFMANN (2002, S. 207) 3°C angenommen. Abbildung 41 zeigt den Jahrgang der Tagesmittelwerte der Bodentemperaturmessungen der OVA.

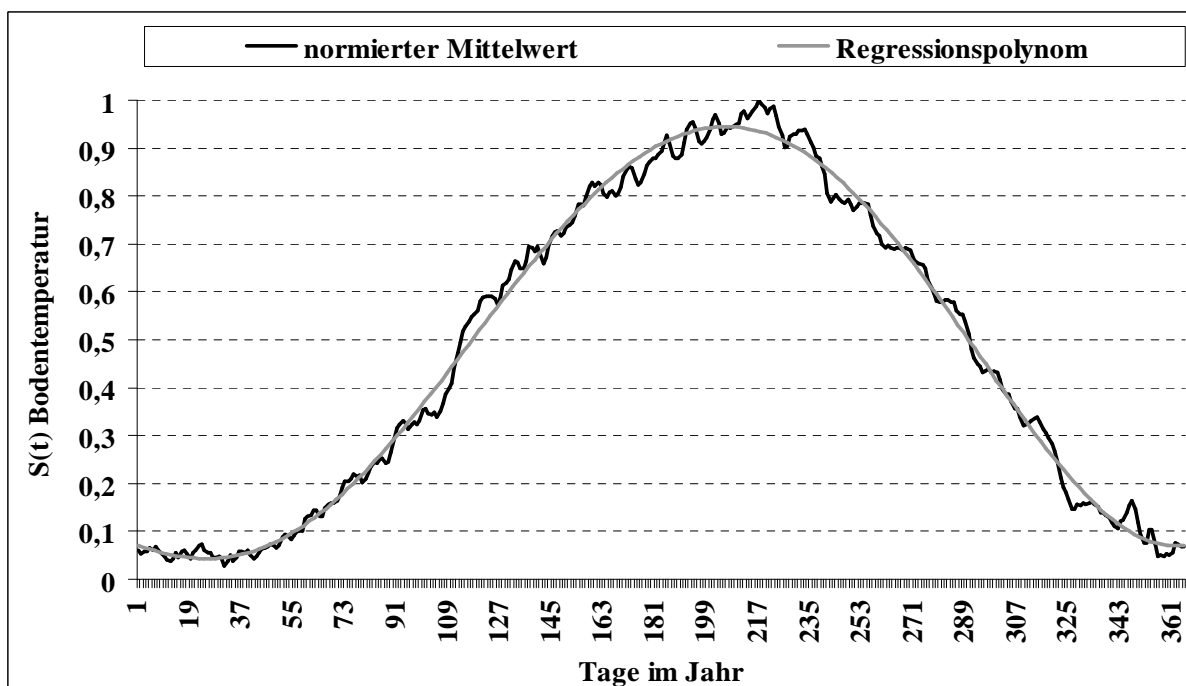
Abbildung 41: Jahrgang der Bodentemperatur



Quelle: Eigene Darstellung

Aus dem Jahrgang der Bodentemperatur entsteht die Partialsaisonfigur $S(t)_{\text{Bodentemperatur}}$, indem der Maximalwert der Bodentemperatur auf 1 normiert wird und alle anderen Tagesmittelwerte zum Maximalwert relativiert werden (Abbildung 42). Durch ein Polynom höheren Grades kann die Saisonfigur gut angenähert und gleichzeitig geglättet werden.

Abbildung 42: Partialsaisonfigur Bodentemperatur

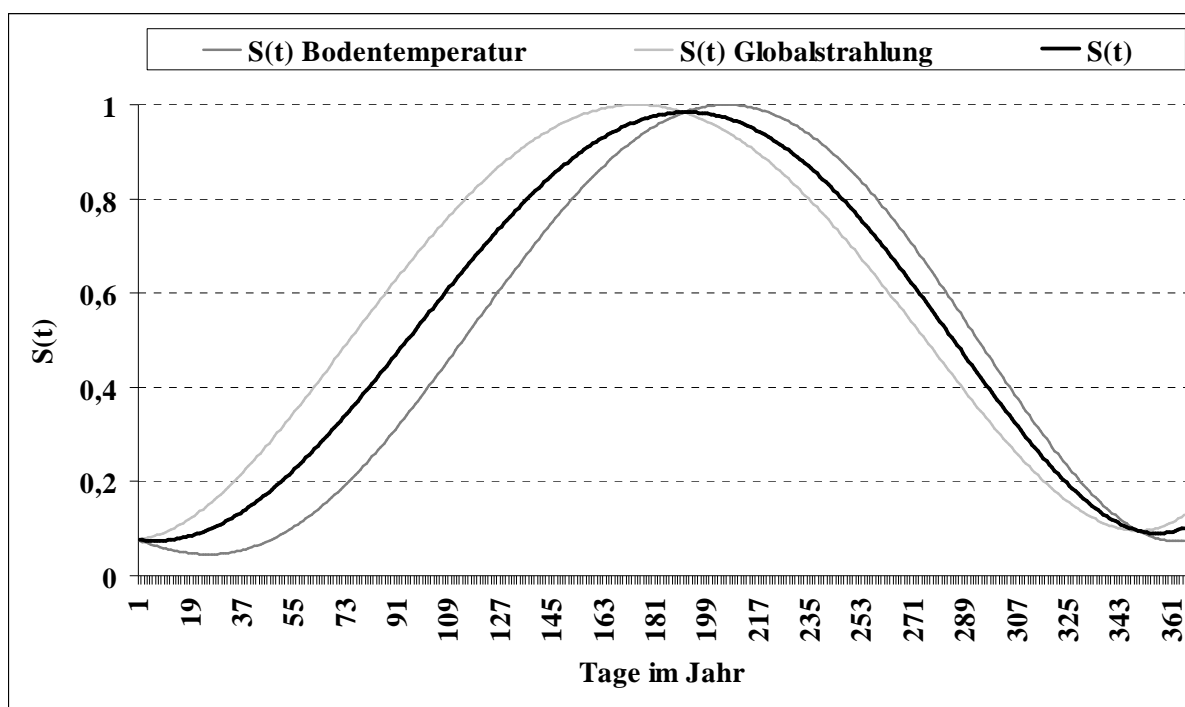


Quelle: Eigene Darstellung

Als Strahlungsgröße steht anstatt der für pflanzliche Wachstumsprozesse aussagekräftigeren „photosynthetisch aktiven Strahlung“ (PAR), die den Wellenlängenbereich von 400-700 nm umfasst, lediglich die Globalstrahlung zur Verfügung, die Summe der eingestrahnten Energie pro Tag in kWh/m². Da die PAR aber als 50% der Globalstrahlung geschätzt werden kann (vgl. RÖVER, 1995, S. 22), gibt auch die Globalstrahlung den korrekten Verlauf der Strahlungsintensität wieder. Vernachlässigt werden der vom Blattflächenindex und damit von der Bestandsentwicklung abhängige Anteil absorbiertes PAR (Absorptionsgrad) und die Reflektion eines Teils der Strahlung von den Blättern nach oben, der dadurch nicht mehr photosynthetisch genutzt werden kann (vgl. ebd., S. 22f.). Die Darstellungen des Jahresgangs der Globalstrahlung sowie der Partialsaisonfigur $S(t)_{\text{Globalstrahlung}}$ befinden sich in Anhang 35 und 36.

Beide Partialsaisonfiguren werden wiederum auf ein Maximum 1 normiert und anschließend durch Mittelwertbildung zu einer Saisonfigur $S(t)$ zusammengefasst. Die Mittelwertbildung impliziert, dass die Witterungsgrößen Temperatur und Globalstrahlung als gleichwertig bezüglich ihres Einflusses auf das Zuckerrübenwachstum angesehen werden. Die Verwendung von Niederschlagsmengen für die Saisonfunktion erwies sich als ungeeignet, da mit Niederschlagsangaben auf Tagesbasis kein Jahresgang des Niederschlags abgebildet werden kann.

Abbildung 43: Saisonfigur aus Bodentemperaturen und Globalstrahlung



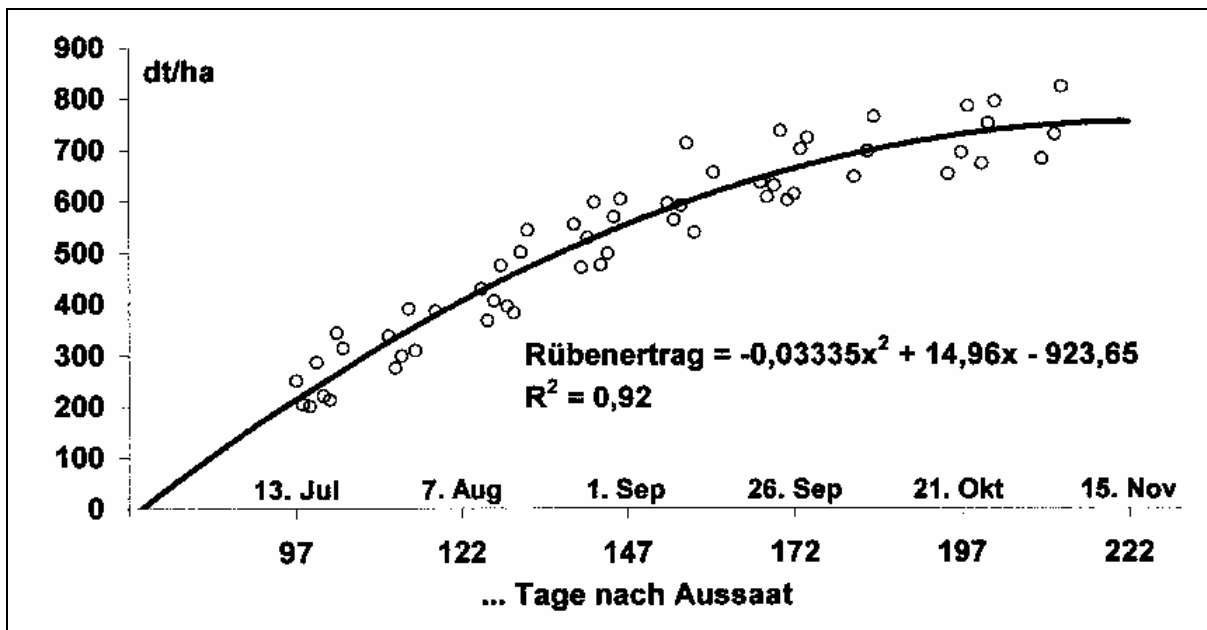
Quelle: Eigene Darstellung

4.4.5.2 Pflanzenwachstumsmodell

Da die Entwicklung des Pflanzenwachstums über den gesamten Vegetationszeitraum der Zuckerrübe zu simulieren ist, reichen Angaben über Ernteergebnisse zur Modellkalibrierung nicht aus. Es werden vielmehr Ergebnisse empirisch ermittelter Biomasseentwicklungen über die Vegetationszeit benötigt, die im Allgemeinen in Form von Proberodungen gewonnen werden. Für den Rübenmasseertrag anfälliger Zuckerrüben kann auf die von ZENS (2002) ausgewerteten Proberodungsergebnisse des RRV der Jahre 1990-99 zurückgegriffen werden

(siehe Abbildung 44). Durchschnittlicher Aussattermin der Proberodungsflächen in dem von ZENS (2002) untersuchten Zeitraum war der 7. April, der 97. Tag eines Jahres (kein Schaltjahr). Es gilt zu berücksichtigen, dass das Ertragsniveau der Proberodungen i.d.R. über dem der in anderen Statistiken genannten Ernteergebnisse liegt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Handbeerntung der Flächen für die Proberodungen, die gegenüber der maschinellen Ernte und Verladung zu 10-15% höheren Erträgen führt (STEUERWALD, 2003, mündl.).

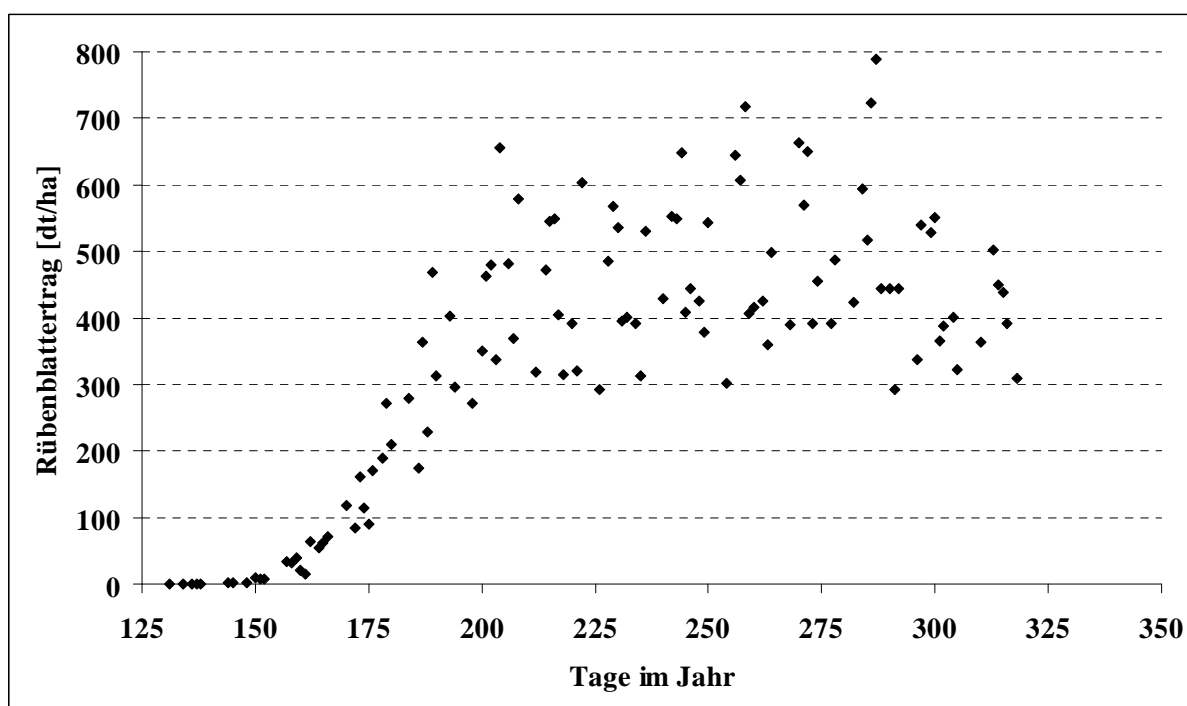
Abbildung 44: Entwicklung des Zuckerrübenetrags über die Vegetationsperiode



Quelle: ZENS, 2002, S. 62

Für die Kalibrierung der Parameter des mit den Gleichungen 27 und 28 definierten Pflanzenwachstumsmodells werden neben empirischen Daten über den Rübenkörperertrag auch Versuchsergebnisse über die Entwicklung der Blattbiomasse benötigt. Hierfür stehen dem Autor Proberodungsergebnisse des IfZ in Göttingen aus den Jahren 1986 bis 1996 zur Verfügung. Die Proberodungen, die zwischen Mitte Mai und Mitte November in ungefähr 14-tägigem Abstand durchgeführt wurden, waren Teil einer 44jährigen Versuchsserie auf einem Löß-Standort im südlichen Niedersachsen mit 8,8°C Jahresmitteltemperatur und 595 mm Jahresniederschlag (vgl. STOCKFISCH ET AL., 2002, S. 64). Die Aussaat der Zuckerrüben fand im Mittel der Versuchsjahre am 9. April (vgl. STOCKFISCH ET AL., 2002, S. 64) annähernd zeitgleich mit der Aussaat der Proberodungsflächen des RRV statt, so dass kaum ein Fehler entsteht, wenn die Entwicklung der Blattbiomasse auch auf den 7. April festgelegt wird.

Wie in Abbildung 45 an den mittleren Blatterträgen des Untersuchungszeitraums zu erkennen ist, nimmt im Laufe der Vegetationsperiode die Streuung der Blatterträge zu. Dies zeigt nicht nur den Einfluss des Anbaujahres, sondern auch die bei den Blattwiegungen auftretenden Messfehler, die dazu führen können, dass an einem Beprobungstermin eine geringere Blattmasse ermittelt wird als am vorherigen und am nachfolgenden Termin (STEUERWALD, 2003, mündl.).

Abbildung 45: Entwicklung der Blattbiomasse über die Vegetationsperiode

Quelle: Eigene Darstellung

Zur Kalibrierung der Modellparameter der Gleichungen 27 und 28 wird analog zur Kalibrierung der Parameter des Populationsmodells ein am Lehrstuhl entwickeltes ModelMaker[®]-Programm verwendet. Dieses simuliert die Entwicklung des Rübenkörper- und Blattertrags nach dem modifizierten Ansatz des Thorer-Modells ohne Unkrautkonkurrenz und erlaubt einen Vergleich zwischen beobachteten und errechneten Ergebnissen. Die Modellparameter können mit Hilfe iterativer numerischer Optimierungsmethoden (vgl. CHERWELL SCIENTIFIC, 1997, S. 244) kalibriert werden. Wie bereits in Kapitel 4.3.5 ausgeführt, umfasst die Kalibrierung der Modellparameter gleichzeitig die Verifikation des Modellansatzes.

Für die Parameterkalibrierung im Rahmen dieser Arbeit enthält die Saisonvariable S die 365 Tageswerte der im vorangegangenen Kapitel gebildeten Saisonfunktion $S(t)$. Als Beobachtungswerte sind die Ergebnisse der Regressionsrechnung für den Zuckerrübenenertrag von ZENS (2002) und die der Proberodungen des IFZ für die Blattbiomasse gespeichert. Die Gültigkeit der Zens'schen Regressionen ist beschränkt auf den mit Beobachtungswerten versehenen Zeitraum zwischen dem 13. Juli (97 Tage nach der Saat am 7. April bzw. 194. Tag im Jahr) und dem 15. November, dem 222. Tag nach der Saat oder 319. Tag im Jahr (siehe Abbildung 44). Da eine Extrapolation mithin unzulässig und ein weiteres Anwachsen der Rübenenerträge über Mitte November hinaus nicht anzunehmen ist, wird der 16. November als Vegetationsende t_{Ende} definiert. Damit ist am 319. Tag des Jahres der Maximalertrag erreicht, der bis zu einer später erfolgenden Ernte konstant bleibt, da ab dem 320. Tag $dR/dt=0$ gesetzt wird. dY/dt , die Entwicklung des Rübenblatts, wird nicht vom Vegetationsende beeinflusst. Die Biomasse des Blattes nimmt zu diesem Zeitpunkt bereits ab (siehe Abbildung 45), was den witterungsbedingten Absterbeprozess des Blattapparates anzeigt. Dafür wird ein Zeitraum nach der Aussaat definiert, in dem $dY/dt=0$ gilt, um so die Keimungsphase bis zum Auflaufen der Pflanzen nachzubilden. Dieser Zeitraum beträgt in Anlehnung an STOCKFISCH ET AL. (2002, S. 64) 20 Tage. Durch die Kopplung der Differentialgleichungen 27 und 28 ist bis zum

Auflauf am $97 + 20 = 117$. Tag im Jahr ($t_{Y_0} = 117$) auch keine Ertragsentwicklung möglich ($dR/dt=0$). Ungleichmäßiger Feldaufgang ist nicht Gegenstand der Betrachtung, ebenso wie die Temperaturabhängigkeit der Auflaufgeschwindigkeit (vgl. WINNER, 1982, S. 34 sowie KENTER UND HOFFMANN, 2002, S. 207). Die Modifikationen sind in den Gleichungen 33 und 34 wiedergegeben.

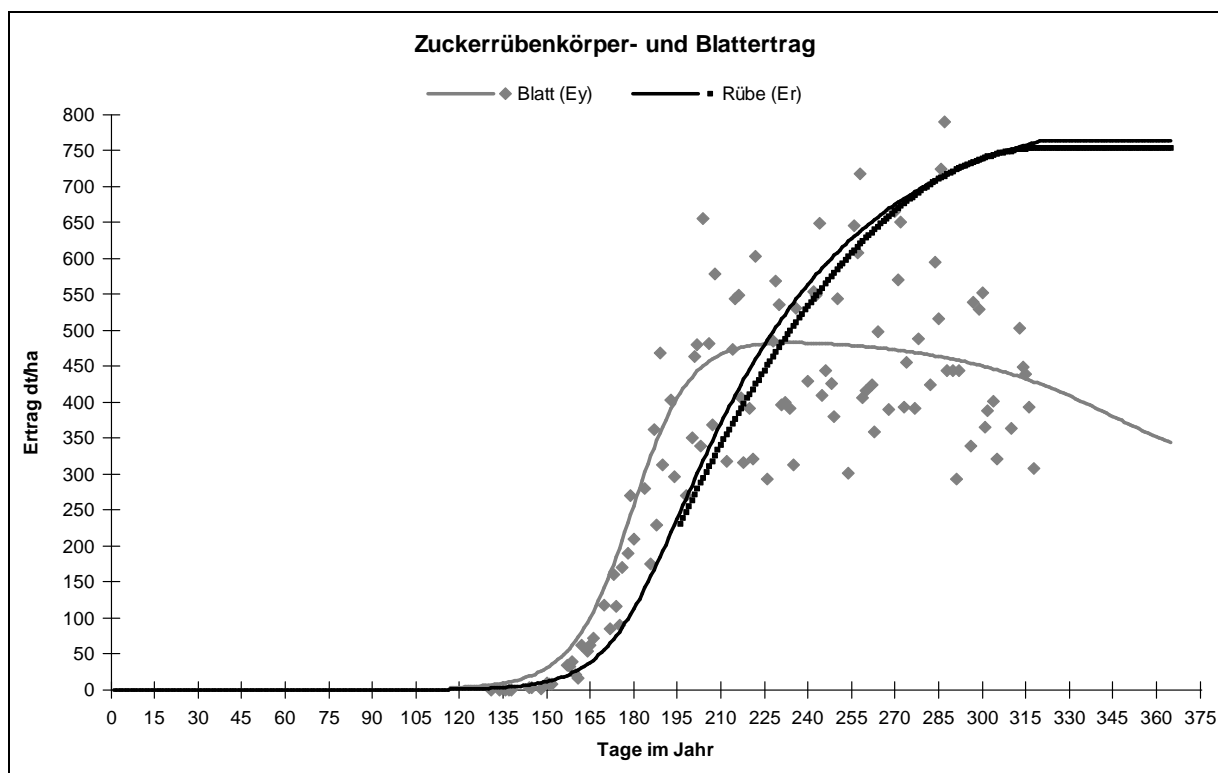
$$\frac{dY}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{für } t < t_{Y_0} \\ S(t)g_Y Y(t) \left(1 - \frac{1 + a_{YY} D_Y}{K_Y} Y(t) \right) - w_Y Y(t) & \text{für } t \geq t_{Y_0} \end{cases} \quad (33)$$

$$\frac{dR}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{für } t < t_{Y_0} \\ g_R Y(t) \left(1 - \frac{1 + a_{RR} * D_Y}{K_R} * R(t) \right) & \text{für } t_{Y_0} \leq t < t_{\text{Ende}} \\ 0 & \text{für } t \geq t_{\text{Ende}} \end{cases} \quad (34)$$

t_{Ende} beeinflusst auch die Abundanzdynamik des Nematoden: Ab diesem Datum findet aufgrund zu geringer Bodentemperaturen kein weiteres Anwachsen der Nematodenpopulation unter anfälligen Zuckerrüben statt. Dafür wird zwischen diesem Datum und dem Tag der Ernte $dN/dt = 0$ gesetzt. Unter resistenten Zuckerrüben findet ab diesem Datum lediglich der natürliche Populationsrückgang des Nematoden wie unter Nichtwirtspflanzen statt.

Die Bestandsdichte D_Y wird nicht als Modellvariable, sondern als Systemparameter angesehen und auf 9 Pflanzen/m² festgesetzt, da nach WINNER (1982, S. 153) und MÄRLÄNDER (1991, S. 72) der höchste Zuckerertrag bei Bestandsdichten zwischen 75.000-100.000 Pflanzen pro Hektar erreicht wird und davon auszugehen ist, dass in diesem Bereich die Bestandsdichte keinen Einfluss auf die Entwicklung des Rübennematoden hat und vice versa. Desgleichen gilt für Auflaufdauer und Vegetationsende.

Um die Simulationen durchführen zu können, ist für die Biomasse des Blattes ein Startwert Y_{Start} vorzugeben. Dieser wird zunächst mit 0,005 kg/Pflanze angesetzt. Abbildung 46 zeigt, wie gut das Pflanzenwachstumsmodell (Linien) an die empirischen Beobachtungswerte (Punkte) angepasst werden konnte.

Abbildung 46: Anpassungsgüte nach der Parameterkalibrierung

Quelle: Eigene Darstellung

Die kalibrierten Modellparameter dieses „optimalen“ Simulationslaufs sind in Anhang 31 aufgeführt. Wie in Abbildung 46 zu sehen ist, können mit den Modellgleichungen 33 und 34 die Beobachtungswerte nach der Kalibrierung gut wiedergegeben werden. Die stärkere Krümmung des Modellertrags des Rübenkörpers gegenüber den Regressionsergebnissen ist auf das Fehlen eines Wendepunktes bei dem von ZENS (2002) verwendeten Regressionspolynom 2. Grades zurückzuführen. Die Anhänge 32 und 33 zeigen den Simulationsfehler beim Rübenertrag. In Anhang 32 ist der Modelloutput Rübenertrag über das Regressionsergebnis von ZENS (2002) abgetragen. Je größer die Abweichungen des Modelloutputs von der Winkelhalbierenden, dem Regressionsergebnis, sind, desto größer der Simulationsfehler (vgl. MCSORLEY ET AL., 1982, S. 148ff.). Anhang 33 zeigt den Verlauf des relativen Simulationsfehlers im Laufe des Jahres. Aus beiden Anhängen wird deutlich, dass der Simulationsfehler im Laufe der Vegetationszeit der Zuckerrübe sinkt und im relevanten Erntebereich der Zuckerrübe Ende September bis Mitte November mit < 2% minimal ist.

Bei der Modellkalibrierung ist zu beachten, dass die Schätzungen der Kapazitätsgrenzen und die der relativen Abbauraten simultan voneinander abhängig sind. Aus einer Steigerung der Kapazitätsgrenzen resultiert eine Zunahme der relativen Abbauraten, so dass bei einer Schätzung für beide Parameter unplausible Ergebnisse entstehen könnten. THOER (1986, S. 92f.) umging dieses Problem, indem er die Kapazitätsgrenzen für Rübenblatt und Wurzelkörper exogen vorgab. Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die von THOER (ebd.) gewählten Vorgabewerte für die Kapazitätsgrenzen übernommen, anschließend aber auch der Optimierung zugeführt, wobei nur Erhöhungen der Kapazitäten akzeptiert werden, um so dem seit THOER (ebd.) gestiegenen Ertragsniveau gerecht zu werden. Um zu verhindern, dass der Optimierungsalgorithmus die Modellparameter nur auf ein lokales Optimum hin kalibriert, wird

die Optimierung von verschiedenen Startpunkten aus wiederholt (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 278).

Die bisherigen Betrachtungen gelten lediglich für nematodenanfällige Standardsorten. Da Proberodungsreihen nematodenresistenter Zuckerrüben nicht vorliegen, ist die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Erträge resistenter Zuckerrüben analog zu der in Kapitel 4.4.4 vorgestellten für die sekundären Ertragsparameter: Bei resistenten und anfälligen Zuckerrübensorten werden die gleichen Modellparameter verwendet und daher zunächst die gleichen Modelloutputs generiert. Anschließend wird bei resistenten Zuckerrüben eine Korrektur vorgenommen, die sich aus den im Programm „LIZ-Sortinfo“ (LIZ, 2004e) aufgeführten Versuchsergebnissen (Stand: Herbst 2004) ergibt. Danach weisen Nematop und Paulina im Mittel einen gegenüber den anfälligen Standardsorten um 9% geringeren Rübenkörperertrag auf. Die mit dem Pflanzenwachstumsmodell generierten Rübenenerträge von Standardsorten werden daher für resistente Zuckerrüben mit dem Faktor 0,91 multipliziert. Alle Korrekturfaktoren für nematodenresistente Zuckerrübensorten sind in Übersicht 5 zusammengefasst.

Übersicht 5: Relative Korrekturfaktoren für resistente Zuckerrüben

<u>Parameter</u>	<u>Standardsorte</u>	<u>Resistente Sorten</u>	<u>Korrekturfaktor</u>
RE	100	91,0	0,910
ZG	100	96,2	0,962
AV	100	107,7	1,077

Quelle: Eigene Darstellung; Abkürzungen siehe Kapitel 4.4.1

Wie groß die Leistungseinbußen der resistenten Zuckerrübensorten ohne Befall mit *H.schachtii* gegenüber anfälligen Standardsorten sind, verdeutlicht folgendes Beispiel: Erzielt eine Standardsorte einen Rübenenertrag von 600 dt/ha, einen Zuckergehalt von 17,0% und betragen die Ausbeuteverluste 2,1%, ergibt sich gemäß Gleichung 26 ein bereinigter Zuckerertrag von 89,4 dt/ha. Eine nematodenresistente Sorte erzielt c.p. einen BZE in Höhe von 76,9 dt/ha, ca. 14% weniger.

Ein Ertragstrend der Zuckerrüben wird nicht implementiert. SCHLEEF (1999, S. 79) unterstellt eine Steigerung des Rübenenertrags um 0,2% pro Jahr, HOFFMANN UND MÄRLÄNDER (2001, S. 28) ermitteln eine jährliche Steigerung des bereinigten Zuckerertrags um 1,6 dt/ha und die landwirtschaftlichen Betriebe des AK 1 konnten ihre Rübenenerträge jährlich um 3,9 dt/ha in den vergangenen 25 Jahren und um 14,4 dt/ha in den vergangenen 10 Jahren steigern (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, 2005, S. 13, siehe Abbildung 56). Im Rahmen dieser Arbeit steht allerdings die natürliche und nematodenbedingte Volatilität der Zuckerrübenenerträge stärker im Vordergrund als die durch züchterischen Fortschritt und verbesserte Anbautechniken bedingte Ertragsentwicklung über die Jahre.

4.4.6 Differenzierung von Produktionsorten

Als nach dem Jahr und der Aussaatzeit drittichtigsten Einflussfaktor auf die Ertragsbildung der Kulturpflanzen identifizierte MÄRLÄNDER (1991, S. 18) den Produktionsort (siehe

Übersicht 4). „Der Einfluss des *Standorts* umfasst die Gesamtheit der Wirkung aller existierenden Einflussfaktoren, die auf das Wachstum der Pflanzen an einem Ort einen Einfluss ausüben oder ausgeübt haben. Dagegen ist die Wirkung des *Produktionsortes* durch die geographisch unterschiedliche Lage verschiedener Standorte definiert, die auch durch unterschiedliche witterungs- oder standortgebundene anbautechnische Maßnahmen gekennzeichnet sein kann. Die Wirkung des Produktionsortes auf Ertrag und Qualität der Zuckerrübe ist außerordentlich schwierig zu analysieren, da der Einfluss verschiedener anbautechnischer Maßnahmen [...] nicht zu trennen ist von der Wirkung anderer standortbedingter Einflussfaktoren, die gleichermaßen zu erheblichen Unterschieden in der Ertragshöhe führen können.“ (ebd.).

Mit der Differenzierung nach dem Produktionsort können Erkenntnisse gewonnen werden, ob, und wenn ja, wie, die relativen Vorzüglichkeiten der in Kapitel 3.2 vorgestellten Maßnahmen im Rahmen des Nematodenmanagements mit der Güte des Produktionsortes variieren. Bei der Differenzierung der Produktionsorte wird auf die Vorgehensweise von ZENS (2002, S. 93ff.) zurückgegriffen. Dieser bildet die natürlichen Umweltbedingungen als ganzes durch die Vorgabe eines repräsentativen Ertrags- und Qualitätsniveaus des Produktionsverfahrens Zuckerrübe ab, die durch Zu- und Abschläge von durchschnittlichen Werten entstehen. So definiert ZENS (ebd.) drei Produktionsorte (gut, mittel und schlecht), die sich hinsichtlich des Rübenenertrags und der sekundären Qualitätsparameter unterscheiden (Übersicht 6). Dies stellt einen Kompromiss aus guter Operationalität und genauer Abbildung der realen Verhältnisse dar. Die Abweichungen von den Mittelwerten leitet ZENS (2002, S. 96) aus Schlagkarteiauswertungen der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen sowie aus Statistiken des RRV ab. Die Auswertungen decken sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen von MÄRLÄNDER (1991, S. 22), nach denen die Differenzierung des bereinigten Zuckerertrags in Abhängigkeit des Produktionsortes im Wesentlichen durch Veränderungen des Rübenenertrags hervorgerufen wird.

Übersicht 6: Relative Ertragsmerkmale der Produktionsorte nach ZENS

<u>Merkmal</u>	<u>Schlecht</u>	<u>Mittel</u>	<u>Gut</u>
RE	92,0	100	112,0
ZG	96,2	100	103,5
AV	104,8	100	96,9
BZE	87,6	100	117,1

Quelle: ZENS, 2002, S. 97, verändert

Da die im Rahmen dieser Arbeit für die Parameterkalibrierung verwendeten Proberodungsergebnisse wegen der Handbeerntung ein sehr hohes Ertragsniveau aufweisen (vgl. Kapitel 4.4.5.2), werden die mit dem daran kalibrierten Pflanzenwachstumsmodell errechneten Ertragsgrößen als Ertragsparameter des guten Standortes definiert und die Standorte „mittel“ und „schlecht“ so daran bemessen, dass die von ZENS (2002, S. 96) ermittelten Abstufungen in etwa wiedergegeben werden (Übersicht 7).

Übersicht 7: Verwendete relative Differenzierung der Produktionsorte

<u>Merkmal</u>	<u>Gut</u>	<u>Mittel</u>	<u>Schlecht</u>
RE	100	90	80
ZG	100	95	90
AV	100	105	110

Quelle: Eigene Berechnungen

Somit errechnen sich die Ertragsparameter für den Produktionsort „schlecht“ wie in den folgenden Gleichungen 35-37 dargestellt und für den Produktionsort „mittel“ entsprechend.

$$E_{R_schlecht}(t) = 0,8(100Y(t)D_Y(t)) \quad (35)$$

$$ZG_schlecht(t) = 0,9ZG(t) \quad (36)$$

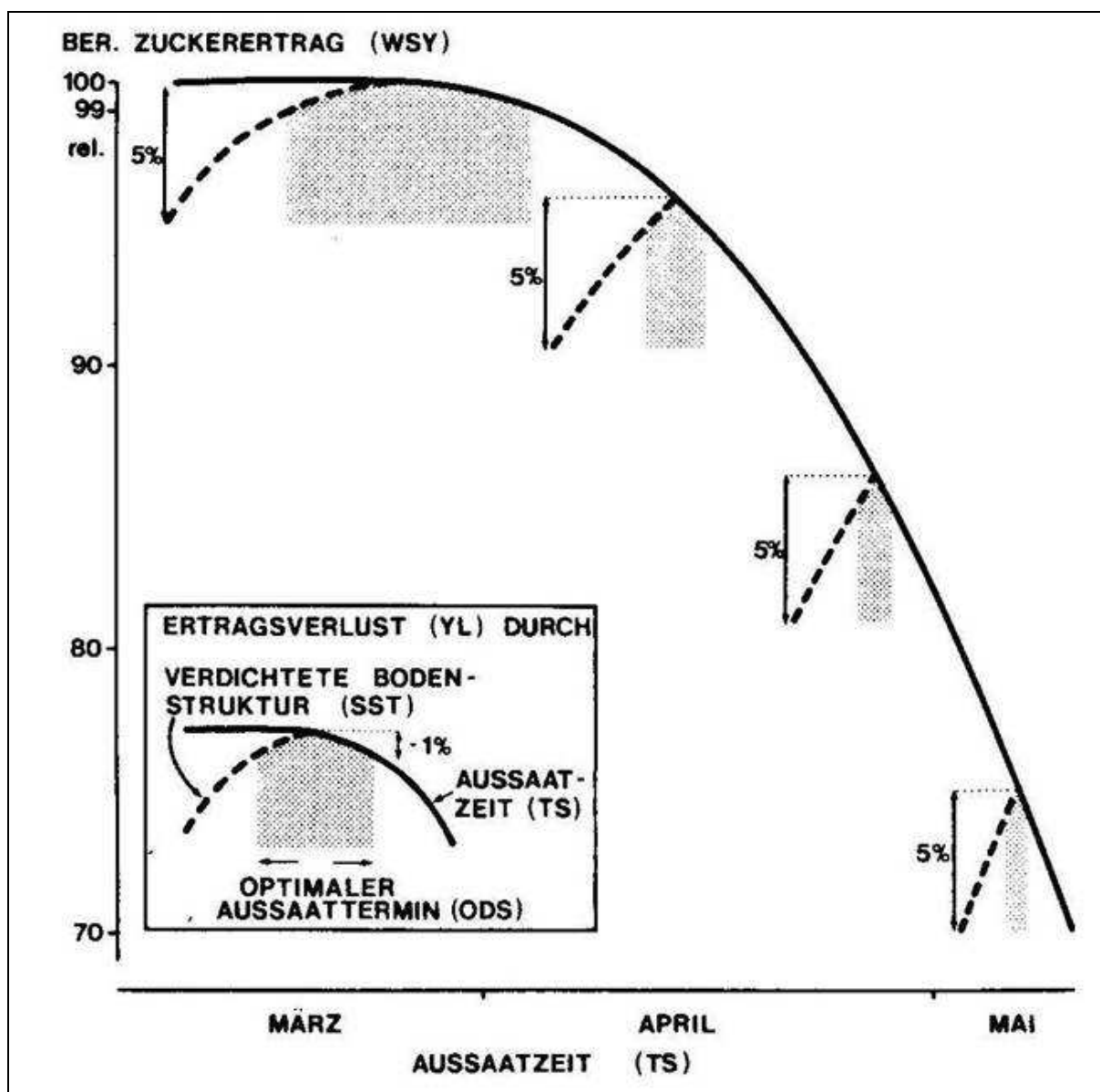
$$AV_schlecht(t) = 1,1AV(t) \quad (37)$$

4.4.7 Validierung des Modellansatzes

Nach der Kalibrierung der Parameter des Pflanzenwachstumsmodells und der damit einhergehenden Modellverifizierung wird das Modell nun validiert. Bei der Validierung wird nach objektiven Kriterien getestet, wie genau ein Modell Datenreihen trifft, die vorzugsweise nicht bei der Modellbildung und Parameterschätzung berücksichtigt wurden (SCHULTZ UND MIRSCHHEL, 1993, S. 239). Anders formuliert bedeutet Validierung den Nachweis der Adäquatheit der biologisch-ökologischen Strukturen, also dass das reale System durch die gewählte Modellstruktur wirklich repräsentiert wird (ebd.). Ein Modell gilt dann in diesem Sinne als auf einem bestimmten Genauigkeitsniveau validiert. Zur Modellvalidierung werden im Rahmen dieser Arbeit die Reaktionen des Ertragsmodells, d.h. die Änderungen der Outputgrößen Rüben-ertrag und sekundäre Ertragsparameter anfälliger Zuckerrüben, auf Variationen der Aussaatzeit und des Erntezeitpunkts untersucht und Versuchsergebnissen gegenüber gestellt.

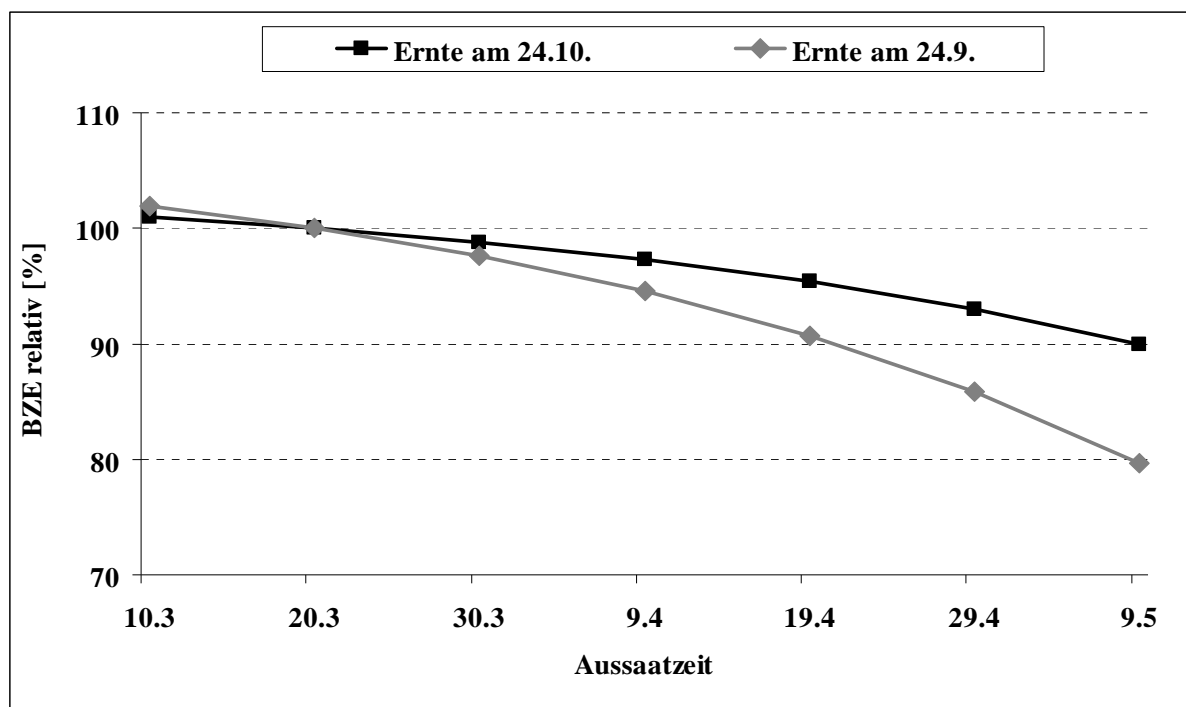
Für den Anbau von Zuckerrüben kann von einem Verlust an bereinigtem Zuckerertrag ausgegangen werden, der umso höher ist, je später die Aussaat erfolgt (MÄRLÄNDER, 1991, S. 47). WINNER (1982, S. 137) nennt als Faustzahlen für mögliche Ertragseinbußen bei Aussaat Ende März 0-5%, in der ersten Aprilhälfte 5-15%, in der zweiten Aprilhälfte 10-30% und in der ersten Maiwoche 20-40% im Vergleich zur Saat Mitte März. Diese Zahlen decken sich mit den Versuchsauswertungen von MÄRLÄNDER (1991, S. 47, siehe Abbildung 47), nach denen bei Saaten von Ende März bis Anfang April von 0,2%, von Anfang bis Ende April von 0,6% und ab Ende April bis Anfang Mai von 1,2% Ertragsverlust pro Tag ausgegangen werden kann. Zusätzlich muss bei Saaten Anfang März mit Ertragsverlusten von etwa 5% gegenüber dem Zeitraum Mitte bis Ende März kalkuliert werden, hervorgerufen durch eine verdichtete Bodenstruktur infolge zu früher Saatbettbereitung bei zu feuchtem Boden (ebd., und ALIO, 1993, S. 118 und S. 186).

Abbildung 47: Bereinigter Zuckerertrag je nach Aussaatzeit nach MÄRLÄNDER



Quelle: MÄRLÄNDER, 1991, S. 48

Abbildung 48 zeigt den Modelloutput bereinigter Zuckerertrag (BZE) von anfälligen Zuckerrüben als relative Größe über verschiedene Aussaatzeitpunkte im Abstand von 10 Tagen für den Produktionsort „gut“, wobei der BZE bei Aussaat am 20.3. gleich 100 gesetzt wird. Die Produktionsorte „mittel“ und „schlecht“ führen zwar zu anderen absoluten Ergebnissen, die Relationen des bereinigten Zuckerertrags in Abhängigkeit vom Aussaattermin bleiben aber konstant gegenüber dem guten Standort. Der BZE wurde zu einem frühen Erntetermin aller Rüben, dem 24. September, und dem 24. Oktober als „Standarderntetermin“ berechnet. Dieser ergibt sich bei einem Standardaussaattermin am 7. April und einer Standardvegetationsdauer von 200 Tagen in Anlehnung an WINNER (1982, S. 69), ALIO (1993, S. 115) und STOCKFISCH ET AL. (2002, S. 64). Je später die Ernte, desto eher können die auf eine späte Saat zurückzuführenden Ertragsdepressionen durch hohe Zuwächse im Herbst kompensiert werden im Rheinland.

Abbildung 48: Bereinigter Zuckerertrag je nach Aussaatzeit im Modellansatz

Quelle: Eigene Darstellung

Der Abbildung 48 darstellende Modelloutput ist in Anhang 34 und 35 in Tabellenform wiedergegeben. Daraus wird ersichtlich, dass mit dem Modellansatz das Untersuchungsergebnis von MÄRLÄNDER (1991, S. 49) wiedergegeben werden kann, wonach die Differenzierung des bereinigten Zuckerertrags mit fortschreitender Aussaatzeit im Wesentlichen durch die Veränderung des Rübenenertrags verursacht wird, während sich Zuckergehalt und technische Qualität der Zuckerrüben kaum verändern. Im gewählten Modellansatz ist dies zurückzuführen auf die saatzeitunabhängige Formulierung der sekundären Ertragsparameter (siehe Kapitel 4.4.4).

Auch der Erntezeitpunkt hat einen erheblichen Einfluss auf den Rübenmasseertrag und die sekundären Ertragsparameter. Nach MÄRLÄNDER (1991, S. 91) steigt der bereinigte Zuckerertrag mit zunehmender Erntezeit an, wobei der Anstieg mit späterer Ernte abnimmt. Verursacht wird der Anstieg des bereinigten Zuckerertrags mit fortschreitender Erntezeit sowohl durch einen Anstieg des Rübenenertrags wie des Zuckergehalts (ebd.). Dieses Verhalten kann mit dem gewählten Modellansatz für den Rübenenertrag und für die vom Erntetermin direkt abhängigen Größen Zuckergehalt und Ausbeuteverluste nachgebildet werden. Da die Höhe der Zuwächse regional sehr unterschiedlich ist, wird für die Modellvalidierung auf die mittleren täglichen Zuwachsraten des Rüben- und Zuckerertrags der Proberodungen des RRV zurückgegriffen, die in den Versuchsberichten für den Monat Oktober ausgewiesen sind. Im Mittel der Jahre 1992-2004 betrug die Zuwachsrate 2,26 dt/ha und Tag beim Rübenenertrag und 0,57 dt/ha und Tag beim Zuckerertrag. Die minimalen Zuwachsraten wurden im Jahr 1992 mit 1,11 dt/ha und Tag für den Rübenenertrag und 0,31 dt/ha und Tag für den Zuckerertrag erzielt. Mit 3,2 dt/ha und Tag waren 2004 das Jahr mit dem höchsten Zuwachs beim Rübenenertrag und 1996 mit 0,77 dt/ha und Tag das Jahr mit dem höchsten Zuwachs für den Zuckerertrag (vgl. VERSUCHSSTELLE DES RRV, 2005, S. 8). Anhang 36 und 37 zeigen, dass die Modellergebnisse Rüben- und Zuckerertrag für die drei definierten Produktionsorte gut, mittel und schlecht in-

nerhalb der von den Versuchsergebnissen des RRV gebildeten Spanne vom Minimum- bis zum Maximumwert liegen.

4.4.8 Abbildung der Interaktion Zuckerrübe-*H.schachtii*

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Pflanzenwachstum ohne den Einfluss von Schaderregern betrachtet, d.h. die Entwicklung des Ertragspotentials. Im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements ist es aber unerlässlich, die in Kapitel 2.3 beschriebene Interaktion zwischen dem Schaderreger *H.schachtii* und der Wirtspflanze Zuckerrübe nachzubilden und zu prognostizieren. Dem Entscheidungsträger müssen zu dem Zeitpunkt, an dem Managementmaßnahmen zu treffen sind, d.h. lange vor dem Auftreten eines vermeintlichen nematodenbedingten Schadens, konkrete und gesicherte Informationen über den tatsächlich erzielbaren Ertrag vorliegen, also darüber, ob nematodenbedingte Schäden an der Zuckerrübe (Ertragsdepressionen) mit und ohne Gegenmaßnahme(n) zu erwarten sind, und wenn ja, in welcher Höhe.

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 dargestellt, führt der Befall mit *H.schachtii* zu einer Reduktion des Masseertrags, während die sekundären Ertragsparameter nicht beeinflusst werden. Nematodenresistente Zuckerrübensorten erweisen sich als tolerant, d.h. sie reagieren nicht oder kaum mit Ertragsdepressionen auf zunehmenden Nematodenbefall. Eine eindeutige Beziehung zwischen dem P_i -Wert und dem Blattertrag kann nicht festgestellt werden (STEUDEL ET AL., 1978, S. 370). Die in den Sommermonaten beobachtbaren Welkeerscheinungen sind bei nicht allzu früher Ernte im Herbst nicht mehr vorhanden (vgl. HEIJBROEK, 1996, S. 244).

4.4.8.1 Grundlagen

Für die Nachbildung der Interaktion zwischen zwei biologischen Systemen gibt es mehrere Ansätze. Einer davon, die Kopplung eines mechanistischen Partialmodells für die Populationsentwicklung des Schaderregers mit einem für die Entwicklung der Wirtspflanze, wurde bereits in Kapitel 4.3.3.2 vorgestellt. Dabei tritt der Schadnematode i.d.R. als zusätzliche Senke für Wasser, Energie und Assimilate auf (vgl. FERRIS, 1981, S. 412f.) und führt zu Wachstumsverzögerungen („The same happens later“, SEINHORST, 1986, S. 199) und vorzeitiger Alterung der Wirtspflanzen („early senescence“, SEINHORST, 1986, S. 201f.). Biologisch-technische Konzepte für die Kopplung mechanistischer Modelle werden bei BOOTE ET AL. (1983), ROUSE (1988), RABBINGE UND BASTIAANS (1989) sowie GILLIGAN (1990) diskutiert.

Bei Simulationsmodellen biologischer Systeme auf der Basis logistischer Wachstumsfunktionen besteht die Möglichkeit, durch geeignete Kopplungen klassische Lotka-Volterra-Systeme konkurrierender Arten oder Räuber-Beute-Beziehungen abzubilden (vgl. MAY, 1980, S. 47ff. und RICHTER, 1985, S. 34ff.). Eine Räuber-Beute-Beziehung liegt vor, wenn die Zuwachsrate in einem biologischen System abnimmt und die im anderen System zunimmt; Konkurrenz liegt vor, wenn beim gemeinsamen Vorliegen zweier Arten beide Zuwachsraten abnehmen (MAY, 1980, S. 47). Konkurrenz scheidet damit als Definition der Interaktion Wirtspflanze-Nematode aus. Die Interaktion Zuckerrübe-*H.schachtii* kann auch nicht als Räuber-Beute-System beschrieben werden. Zwar kann sich die anfällige Zuckerrübe, die vermeintliche Beute, ohne *H.schachtii* entwickeln, aber der polyphage „Räuber“ stirbt ohne Zuckerrübe nicht aus. Neben den Lotka-Volterra-Systemen können Interaktionen zwischen trophischen Ebenen auch als Vegetation-Herbivore-Systeme (Weide-Systeme) angesehen werden, die durch einen

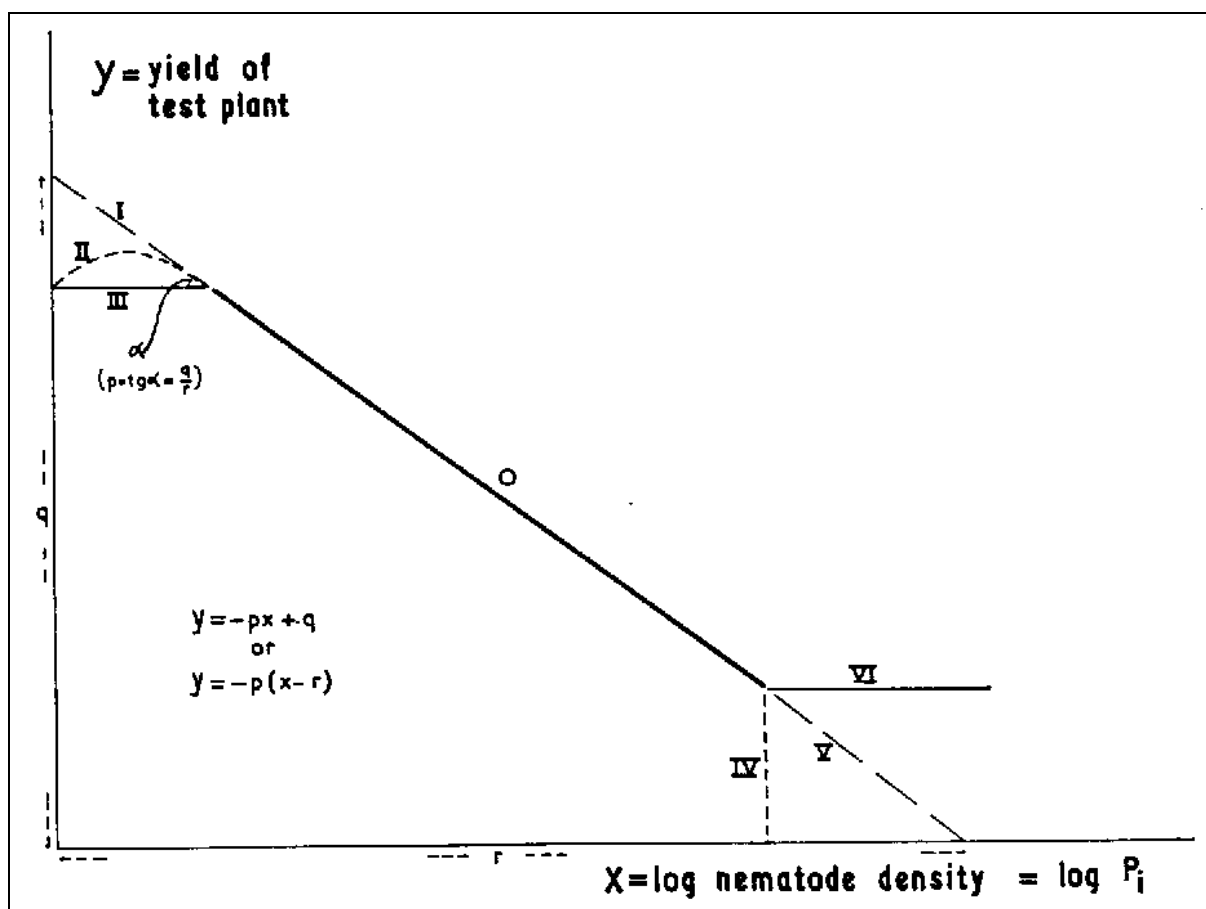
Wachstumsprozess und kontinuierlichen Entzug bzw. Ernteprozess gekennzeichnet sind (vgl. RICHTER, 1985, S. 74ff. sowie BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 107ff.).

Wie bei Populations- und Ertragsdynamikmodellen gibt es auch zur Abbildung der Interaktion Nematode-Wirtspflanze einfache aggregierte (Black-Box-)Ansätze. Diese reduzieren die Interaktion auf einen funktionalen Zusammenhang zwischen nematodenbedingten Ertragsverlusten und Befallshöhe (Befall-Verlust-Relation oder Schadensfunktion) und vernachlässigen die möglichen Rückkopplungen von der Wirtspflanze auf den Nematoden. JAMES (1974, S. 33) beschrieb als erster drei Haupttypen von Befall-Verlust-Regressionsmodellen: Critical-point-Modelle, Multiple-point-Ansätze und die Area-under-curve-Methode.

Critical-point-Modelle beziehen die Ertragsverluste auf den Befall zu einem einzelnen bestimmten Entwicklungsstadium des Schaderregers oder der Wirtspflanze. In der Nematologie werden die Ertragsdepressionen i.d.R. auf die Befallshöhe zur Saat der Zuckerrübe, den P_i -Wert, bezogen (FERRIS UND NOLING, 1987, S. 51, siehe Kapitel 2.3.3 und 3.1). Da der Critical-point-Ansatz einfach wie sachgerecht ist, ist er in der Nematologie zur Abbildung der Befall-Schadens-Relation ($Ertragsdepression = f(P_i)$) wie für die der Populationsdynamik ($P_f = f(P_i)$) weit verbreitet (ebd., S. 52). MCSORLEY UND DUNCAN (1995, S. 149) geben eine Übersicht über die für die Regressionen in Critical-point-Modellen verwendeten Funktionstypen, z.B. lineare, quadratische, log-lineare oder invers-logistische Funktionen.

OOSTENBRINK (1966) ermittelt lineare Beziehungen zwischen dem logarithmisch transformierten Ausgangsbefall mit Nematoden und dem erwarteten Ertrag. Ausnahmen von dieser Regel werden selten gefunden und müssen daher selten sein (ebd., S. 37). Als theoretisch mögliche Schadensverläufe bei sehr niedrigen und sehr hohen Populationsdichten sind nach OOSTENBRINK (1966, S. 29ff., siehe Abbildung 49) ein weiterhin linearer Verlauf bei niedrigen und hohen Befalldichten (Kurvenverläufe I und V), eine Anregung des Pflanzenwachstums bei geringen Befalldichten (II), Toleranz und Minimalertrag (III und VI) sowie Absterben der Pflanzen bei hohen Befalldichten (IV) denkbar.

Abbildung 49: Verläufe von Schadensfunktionen nach OOSTENBRINK



Quelle: OOSTENBRINK, 1966, S. 29

OOSTENBRINK (1966, S. 30) fand keine Hinweise auf eine Anregung des Pflanzenwachstums bei geringem Nematodenbefall, SEINHORST (1986, S. 198) hält eine leichte Wachstumsstimulation durch geringen Nematodenbefall für unwahrscheinlich und auch SCHLANG (2001, mündl.) verneint diesen so genannten Umkehreffekt. Dieser wurde aber von den von BARKER UND OLTHOF (1976, S. 331) zitierten Autoren im Feld nachgewiesen und auch von SCHMIDT (1992, S. 70) im System *H.schachtii*-Zuckerrübe unterstellt.

In Multiple-point-Modellen wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Schadhöhe und mehreren Erhebungen der Schaderregerpopulation im Laufe der Vegetationsperiode der Wirtskulturpflanze hergestellt (multiple Regression). Dies verbessert im Allgemeinen die Präzision der Prognose, der Aufwand für die wiederholten Messungen ist allerdings erheblich (vgl. JAMES, 1974, S. 33) und der Nutzen gering, wenn Managemententscheidungen nur vor der Saat getroffen werden können (FERRIS, 1981, S. 412). Im Gegensatz zu Critical-point-Ansätzen sind Multiple-point-Modelle aber für die Anwendung bei mehrjährigen Kulturen geeignet, da mit ihnen abgebildet werden kann, dass der Ertrag nicht nur vom aktuellen Nematodenbefall abhängt, sondern auch vom Nematodenbefall der Vorjahre, der die Assimilateinlagerung in den überdauernden Pflanzenteil beeinträchtigt hat (ebd., S. 411). NOLING UND FERRIS (1987) verwenden ein Multiple-point-Modell für die Abbildung der Befall-Verlust-Relation im System *Meloidogyne hapla*-Alfalfa und zitieren weitere Quellen mit Multiple-point-Modellen für mehrjährige Früchte.

Der Multiple-point-Ansatz kann als diskrete Vorstufe zur „Area-under-curve“-Methode angesehen werden. Dieser unter der Bezeichnung AUDPC (area under disease progress curve) bekanntere Ansatz beinhaltet kontinuierliche Beobachtungen, um Ertragsabweichungen mit der kumulierten Exposition mit der Krankheit oder dem Schädling zu verbinden (vgl. JAMES, 1974, S. 33). Der von VANDERPLANK (1963) entwickelte Ansatz schätzt den Ertragsverlust anhand der Fläche unter der Entwicklungskurve der Population des Schaderregers.

In der folgenden Literaturübersicht werden zunächst zwei gekoppelte mechanistische Simulationsmodelle und anschließend einige empirische Critical-point-Ansätze vorgestellt.

4.4.8.2 Literaturübersicht

SCHMIDT (1992, S. 67ff.) entwickelte einen Ansatz, mit dem das veränderliche Wurzelwachstum bei Nematodenbefall (Gleichung 38) ebenso wie die Rückkopplung, der zeitlich veränderliche Einfluss des Wurzelwachstums auf die Schlüpfwahrscheinlichkeiten der einzelnen Entwicklungsstadien des Nematoden (Gleichung 40), berücksichtigt werden kann. Zur Simulation des Wachstums der Zuckerrübe wird die Pflanze, ähnlich wie beim Modell von THOER (1986), in zwei Kompartimente unterteilt (Wurzel, Gleichung 40 sowie Rübenkörper, Gleichung 39), wodurch das folgende System gekoppelter Differentialgleichungen entsteht.

$$\frac{dW}{dt} = r_w \xi_{(x)} \phi W \left(1 - \frac{W}{A}\right) - s_w R \frac{W}{A} \quad (38)$$

$$\frac{dR}{dt} = r_R \phi R \frac{W}{A} \quad (39)$$

$$Z(t) = \text{Min} \left(\frac{W(t)}{A(t)} + \frac{R(t)}{K(t)}, 1 \right) \quad (40)$$

Es gelten folgende Bezeichnungen:

W	= Wurzelbiomasse
r_w	= intrinsische Wachstumsrate der Wurzelbiomasse
$\xi_{(x)}$	= Einfluss penetrierender Nematoden (Konsumfunktion)
ϕ	= Temperaturreponsefunktion
s_w	= Sterberate
R	= Rübenkörperbiomasse
r_R	= intrinsische Wachstumsrate der Rübenkörperbiomasse
A	= genetische Kapazität
Z(t)	= Einfluss des Wirts auf die Stadienübergänge des Nematoden
K	= Kapazität des Rübenkörpers

Die Konsumfunktion $\xi_{(x)}$ berücksichtigt den Einfluss der einzelnen Stadiendichten des Nematoden auf das Wurzelwachstum der Zuckerrübe. Die auf der Weibull-Verteilung basierende Funktion führt bei geringer Anzahl in die Wurzel eingedrungener Larven und adulter Weibchen zu einer Förderung des Wurzelwachstums (Umkehrereffekt). Erst bei höherem Befall wird das Wurzelwachstum gebremst.

„Nemaplex“, das Nematode-Plant Expert Information System, wurde von FERRIS (1992) zu Lehr- und Forschungszwecken vorgestellt. Zur Nachbildung der Interaktion Pflanze-Nematode verwendet FERRIS (1999-2004) ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem auf der Basis logistischer Wachstumsfunktionen. Die Kapazität K_N der Wachstumsfunktion für die Nematodenpopulation N wird dabei als von der vorhandenen Pflanzenbiomasse P abhängige Größe definiert (Gleichung 41). Das Pflanzenwachstum geht mit steigender Populationsdichte gegen Null (Gleichung 42).

$$\frac{dN}{dt} = r_N N(t) \frac{K_N(t) - N(t)}{K_N(t)}, \quad K_N(t) = sP(t-1) \quad (41)$$

$$\frac{dP}{dt} = r_P P(t) \left(\frac{K_P - P(t)}{K_P} \frac{K_N(t) - N(t)}{K_N(t)} \right) \quad (42)$$

Auf der Basis dieses Differentialgleichungssystems entwickelt FERRIS (1999-2004) ein einfaches Entscheidungsunterstützungsprogramm, mit dem sich der Anwender vor Augen führen kann, wie sich die durch eine bestimmte Managementstrategie verursachte Veränderung eines Modellparameters oder mehrerer Modellparameter simultan auf die Populationsdynamik des Nematoden und das Pflanzenwachstum auswirkt und ob die Durchführung einer Maßnahme im Rahmen dieser Strategie ökonomisch sinnvoll ist (siehe Anhang 38). Getestet werden können die bereits in Kapitel 3.2 vorgestellten Strategien 1) Reduktion des Ausgangsbefalls, z.B. durch Anbau einer Nichtwirtspflanze, 2) Verminderung der Populationsvermehrung, z.B. durch Anbau einer nematodenresistenten Wirtspflanze und/oder 3) Vermeidung von Ertragsdepressionen, z.B. durch Anbau toleranter Wirtspflanzen.

Bei den Critical-point-Modellen können zwei Ansätze zur Abbildung des Zusammenhangs zwischen Vorsaats-Befallsdichte und Ertragsdepressionen unterschieden werden: Diskrete Ansätze und kontinuierliche Schadensfunktionen. Eine Übersicht über vorhandene Regressionsmodelle für Schadensfunktionen geben MCSORLEY UND DUNCAN (1995, S. 149).

Die Saaten-Union stellte 1991 einen Ansatz mit fünf diskreten Befallsgraden vor. Jedem dieser Befallsgrade ist eine Spannweite des Nematodenbefalls (von-bis-Werte) und eine für erfahrungsgemäße Ertragsverluste zugeordnet (Abbildung 50). Die Befall-Schadens-Klassen werden erweitert zu einem einfachen Expertensystem, indem zu jeder Klasse eine heuristische Empfehlung zur Länge der Anbaupause gegeben wird. Der Pflanzenschutzdienst (PSD) der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen verwendet noch heute ein ähnliches auf diskreten Befallsklassen beruhendes Expertensystem (Anhang 39), ebenso der Bodengesundheitsdienst der Südzucker AG (Anhang 40). Das Ableiten von Anbauempfehlungen aus den Befallsdichten des Schaderregers entspricht dem in Kapitel 3.2.2.2 vorgestellten Konzept des nematodenkontrollierten Rübenanbaus nach BEHRINGER (1978).

Abbildung 50: Ein einfacher diskreter Befall-Schadens-Ansatz

Befallsgrad	Anzahl Zysten mit lebendem Inhalt je 100 ml Boden	Anzahl Eier + Larven je 100 ml Boden	Grad der Infektion	Erfahrungsgemäße Ertragsverluste in %	Bewertung
0	0	0	-	-	-
I	1-5	ca.150	leicht	-	keine Bedenken im Anbau von Rüben
II	6-10	150-800	leicht, keine Nesterbildung	3-5	keine Bedenken im Anbau von Rüben bei 3jähriger Fruchtfolge
III	11-20	800-1500	mäßig, Nesterbildung	6-12	Rübenanbau keinesfalls häufiger als jedes 4. Jahr
IV	21-40	1500-2500	schwer, teilweise schon Bildung größerer Nester und Kahlstellen	12-20	Rübenanbau 5-6 Jahre aussetzen
V	> 41	> 2500	sehr schwer, beträchtliche, meist ausgedehnte Kahlstellen	> 25	Rübenanbau 6-8 Jahre aussetzen

QUELLE: SAATEN-UNION, 1991, S. 22

SEINHORST (1965, S. 138) kritisiert die rein empirische Natur linearer oder nichtlinearer Regressionen, die für kontinuierliche Schadensfunktionen beobachtete Erträge mit vorhandenen Populationsdichten in Verbindung zueinander bringen. Dadurch können unplausible Ergebnisse, wie unendlich hohe Erträge bei Abwesenheit von Nematoden oder negative Erträge bei sehr hohen Populationsdichten, entstehen. Aus diesem Grund haben die Regressionsmodelle i.d.R. einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich über die Nematodendichte, in dem beobachtete und errechnete Werte annähernd übereinstimmen. Einen theoretischen Hintergrund haben diese Modelle nicht, d.h. die Regressionskoeffizienten haben keine biologische Bedeutung, da sie nicht auf die quantitative Beziehung zwischen Nematodendichte und Pflanzenwachstum eingehen. In einem „ordentlichen“ mathematischen Modell sind alle Variablen und Konstan-

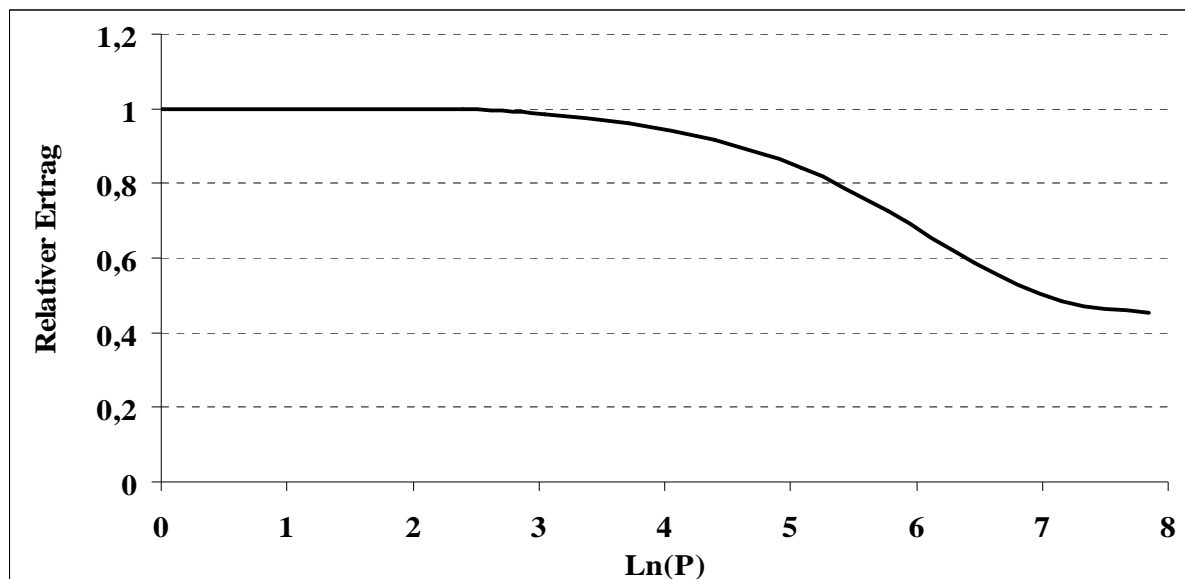
ten Abstraktionen der Eigenschaften der zu untersuchenden Organismen oder Populationen, die zuvor aufgedeckt werden müssen (ebd.).

Vor diesem Hintergrund entwickelte SEINHORST (1965, S. 138ff.) zwei Modellansätze, einen für wandernde Nematoden und einen für sedentäre Wurzelnematoden. Letzterer (Gleichung 43) ist zutreffend für *H.schachtii* und berücksichtigt die biologischen Phänomene, dass 1) bis zu einer bestimmten Befallsgrenze die Populationsdichte P den Pflanzenertrag Y nicht beeinflusst (Toleranzgrenze T) und 2) selbst bei höchsten Befalldichten ein bestimmter Ertrag der Pflanze nicht unterschritten wird (Minimalertrag, Y_{min}). Folglich muss der Ertragsrückgang der Befalldichte gegenüber unterproportional sein (ebd., S. 143).

$$Y = \begin{cases} Y_{max} & \text{für } P \leq T \\ Y_{min} + (Y_{max} - Y_{min})z^{P-T} & \text{für } P > T \end{cases} \quad (43)$$

z ist eine Konstante <1 , die den Anteil Pflanzen bzw. Wurzelmasse wiedergibt, der bei einer Nematodendichte von $P=1$ nicht befallen wird (SEINHORST, 1965, S. 139). Damit sinkt mit steigendem Nematodenbefall der Schaden pro Nematode, da für $P \rightarrow \infty z^{(P-T)} \rightarrow 0$. Auf diese Weise berücksichtigt der nichtlineare Seinhorst-Ansatz intraspezifische Konkurrenz beim Nematoden. Abbildung 51 zeigt einen typischen Verlauf der Seinhorstschen Schadensfunktion über logarithmierte Befalldichten.

Abbildung 51: Schadensfunktion nach SEINHORST



Quelle: Eigene Darstellung

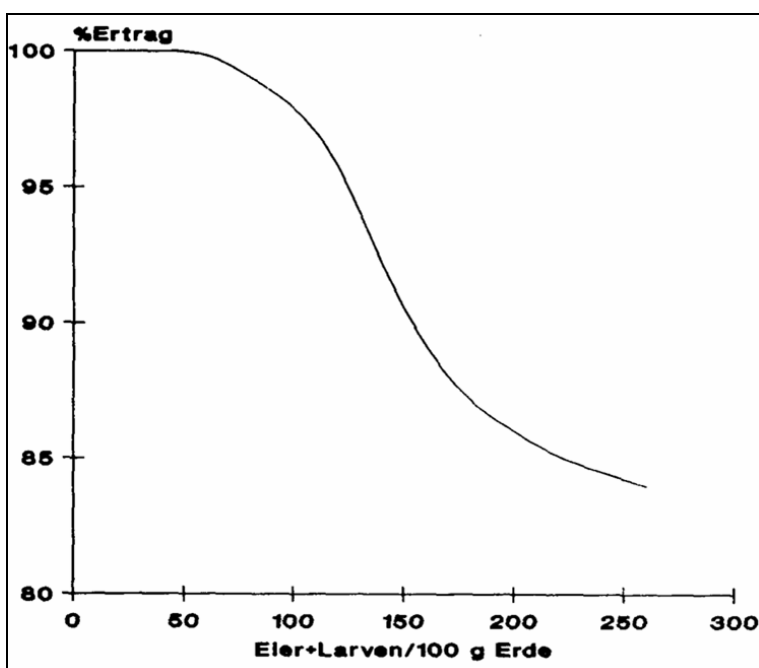
In den meisten Untersuchungen schwankt Y_{min} zwischen $0,1Y_{max}$ und $0,5Y_{max}$, während T eine vom betrachteten Nematode-Pflanze-System abhängige Größe ist (SEINHORST, 1965, S. 137). Nach Untersuchungen von Zuckerrübenenerträgen unter Befall mit *H.schachtii* in England betrug Y_{min} 27-94% von Y_{max} und T schwankte zwischen 100 und 270 Eier und Larven (vgl. COOKE, 1991, S. 155f.). Die korrekte Messung bzw. Schätzung der Toleranzgrenze ist schwierig, da bei so geringen Befalldichten der Einfluss von Messfehlern besonders groß ist (vgl. MCSORLEY UND PHILLIPS, 1993, S. 75 sowie Kapitel 3.1.2). Des Weiteren kritisieren

MCSORLEY UND PHILLIPS (ebd.), dass das Modell mit den Größen T , z und Y_{Min} überparametrisiert ist und darüber hinaus z und Y_{Min} hoch korreliert sind. Auch TRUGDILL (1986, S. 182) kritisiert, dass das Seinhorst-Modell die Kenntnis bestimmter vorher zu ermittelnder Konstanten voraussetzt, was die praktische Anwendbarkeit stark einschränkt. Zur Vereinfachung der Quantifizierung der Parameter im Modell kann nach SEINHORST (1986, S. 192) z^T als Konstante angesehen werden. In den bisher durchgeführten Experimenten ist $z^T = 0,95$ der häufigste Wert (ebd., S. 193).

Trotz der Kritik ist der Seinhorst-Ansatz im angelsächsischen Raum, vornehmlich im System Kartoffel-Kartoffelzystennematoden, sehr verbreitet (MCSORLEY UND PHILLIPS, 1993, S. 75). FERRIS (1978b) leitete aus dem Seinhorst-Modell Ansätze zur Berechnung der ökonomischen Schadschwelle ab und stellt im Rahmen von Nemaplex (FERRIS, 1999-2004) ein einfaches Programm zur Berechnung der Bekämpfungsschwelle (Anhang 41) sowie ein Werkzeug zur Parameterschätzung des Seinhorst-Ansatzes (Anhang 42) bereit. Zur Abbildung der Befall-Schadens-Relation im System Zuckerrübe- *H.schachtii* wurde der Ansatz von SEINHORST (1965) u.a. von SEINHORST (1965), OOSTENBRINK (1966), COOKE UND THOMASON (1979) sowie COOKE (1984) und COOKE (1991) angewendet.

Dem Seinhorst-Ansatz ähnlich, ermittelten BAUMER ET AL. (1979, S. 27) eine sigmoide Funktion für den Zusammenhang zwischen Ertrag und *H.avenae*-Befallsdichte, um drei wichtige Stadien der Ertragsreaktion beschreiben zu können. Im ersten Stadium kann die Pflanze die Wirkung des Schädlings weitgehend ausgleichen (Kompensationsniveau), im zweiten Stadium führen zunehmende Erregerdichten zu markanten Ertragseinbußen und das dritte Stadium ist dadurch gekennzeichnet, dass das erreichte Schadensniveau auch bei weiter steigender Verseuchung nicht mehr wesentlich unterschritten wird. Dieser Zusammenhang wird bei ACKERMANN (1992, S. 72, siehe Abbildung 52) durch eine Gompertz-Funktion zur Abbildung der Interaktion Sommerweizen – *Heterodera avenae* wiedergegeben.

Abbildung 52: Funktionslauf des Sommerweizenertrags bei ACKERMANN

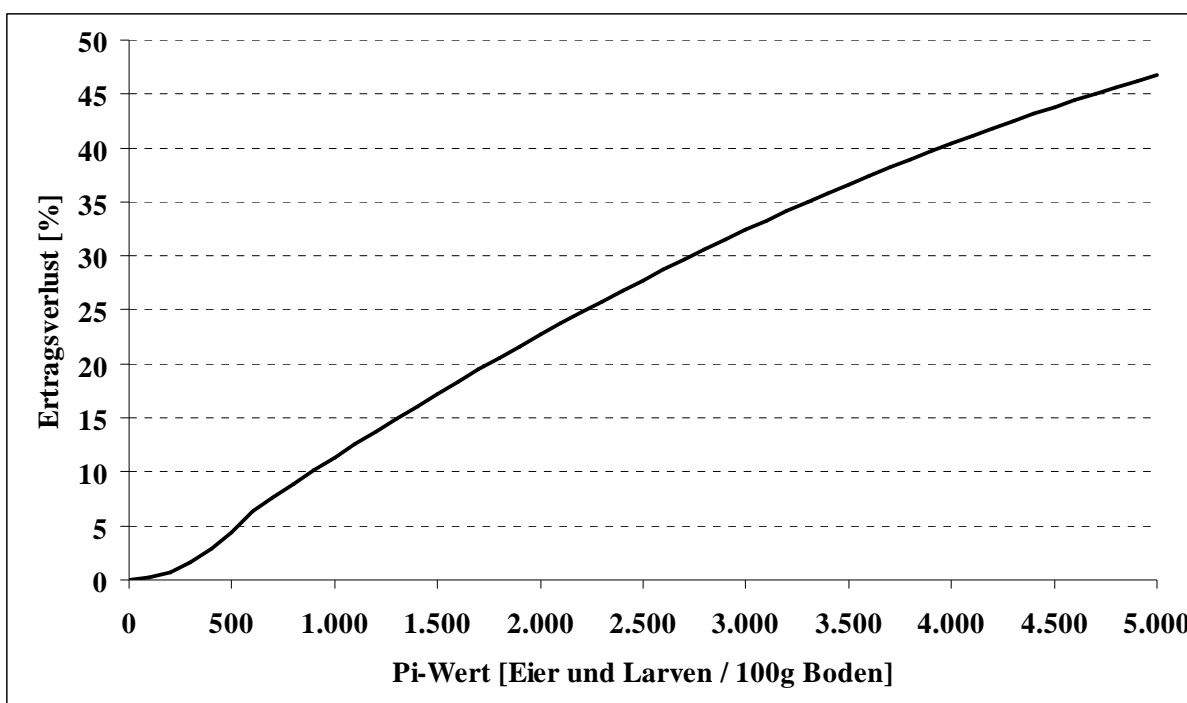


Quelle: ACKERMANN, 1992, S. 72

Die Arbeitsgemeinschaft Nematoden (AG Nematoden), in der sich die Biologische Bundesanstalt (BBA), der Pflanzenschutzdienst (PSD) der damaligen Landwirtschaftskammer Rheinland, der Rheinische Rübenbauer-Verband (RRV) und der LIZ 1997 zusammenfanden, fasste die Befall-Schadens-Ansätze der an ihr beteiligten Institutionen zu einem Regressionsansatz mit zwei quadratischen Regressionsfunktionen zusammen (vgl. KOCHS, 2000a, S. 698). Damit wird der mittlere relative Rübenertragsverlust Y für anfällige Zuckerrübensorten bei *H.schachtii*-Befalldichten unter- und oberhalb der Schadschwelle getrennt abgebildet (siehe Gleichung 44 und Abbildung 53)

$$Y = \begin{cases} 0,000202498P_i + 0,000017258P_i^2 & \text{für } 0 \leq P_i \leq 500 \\ -1,65761 + 0,013847472P_i - 0,000000832479P_i^2 & \text{für } P_i > 500 \end{cases} \quad (44)$$

Abbildung 53: Befall-Schadens-Relation der AG Nematoden



Quelle: KOCHS, 2000a, S. 698, verändert

Der in Abbildung 53 dargestellte Regressionsansatz der AG Nematoden weist gegenüber dem Ansatz von SEINHORST (1965) schon ab der ersten *H.schachtii*-Larve einen Ertragsverlust auf, eine Toleranzgrenze gibt es nicht. Anhang 43 und 44 zeigen den Regressionsansatz der AG Nematoden, wobei statt des Ertragsverlusts der relative Ertrag auf den Ausgangsbefall bezogen wird. Dadurch ist ein Vergleich zu den zuvor vorgestellten Ansätzen möglich.

Die von SEINHORST (1965) geäußerte Kritik an Regressionsmodellen trifft auf den Ansatz der AG Nematoden voll zu. Die Regressionsparameter haben keinerlei biologischen Erklärungsgehalt und der Gültigkeitsbereich der Regression ist auf P_i -Werte kleiner 8.316 Eier und Larven beschränkt. An dieser Stelle weist das Polynom 2. Grades, das für die Regression oberhalb der Schadschwelle verwendet wird, ein Maximum auf. Auch SCHLANG (2001, mündl.) kritisiert den Ansatz der AG Nematoden als insgesamt zu hoch und zu unflexibel. Bisher

konnte im Feld mit einem mittleren Ertragsverlust von ca. 10% pro 1.000 Eier und Larven gerechnet werden (vgl. SCHLANG, 1999b, S. 1 und KOCHS, 2000b, S. 40). Dieser lineare Ansatz beruht auf einem von SCHLANG (1999a, S. 224) vorgestellten Ansatz, der auf den Eckpunkten „ $P_i = 500$ Eier und Larven gleich 5% Ertragsverlust“ und „ $P_i = 5.000$ Eier und Larven gleich 50% Ertragsverlust“ aufbaut. In den vergangenen Jahren sanken die mittleren Ertragsverluste aber auf nur noch 8,0-10,0% pro 1.000 Eier und Larven (SCHLANG, 2001, mündl.). Als Hauptgründe für die geringeren nematodenbedingten Ertragsverluste nennt SCHLANG (2003a, mündl.) den vermehrten Anbau moderner rizomaniatoleranter Zuckerrübensorten, die nicht so anfällig gegen nematodenbedingten Wasserstress sind und ein besseres Regenerationsvermögen aufweisen, sowie ein durch wiederholten Anbau nematodenresistenter Kruziferen ausgeprägtes Antagonistenpotential. 10% Schaden pro 1.000 Eier und Larven sind nur noch auf Neulandflächen ohne dieses Antagonistenpotential zu finden (ebd.). Zu unflexibel ist der Ansatz der AG Nematoden nach Ansicht von SCHLANG (2001, mündl.), da er nur die mittlere Befall-Verlust-Relation widerspiegelt und nicht in der Lage ist, die auftretenden erheblichen Schwankungen in der Befall-Verlust-Relation abzubilden (siehe Kapitel 2.3.3). Insbesondere die vermeintliche Genauigkeit der Regressoren mit vielen Nachkommastellen täuscht eine Exaktheit vor, die es in Wirklichkeit nicht gibt (ebd.). Dies sind auch die ausschlaggebenden Gründe für das Festhalten des PSD an diskreten Befallsstufen mit Schadensspanweiten (HEINRICHS, 2000, mündl.).

4.4.8.3 Im Modellansatz verwendete Implementierung

Die Erkenntnisse, dass die Schädigung der Wirtspflanze in erster Linie von den zur Saat bereits aktiven Nematoden ausgeht und *H.schachtii* zum Erntezeitpunkt zwar den Rübenmasseertrag, nicht aber die Blattbiomasse negativ beeinträchtigt, sprechen gegen eine Nachbildung der Befall-Verlust-Relation als Räuber-Beute- oder Pflanze-Herbivor-Interaktion. Zugunsten einer einfachen verhaltensisomorphen Abbildung der Nematode-Zuckerrübe-Interaktion wird ebenso gänzlich auf einen Kopplungsansatz der Partialmodelle zur Simulation der Populationsdynamik und der Ertragsdynamik verzichtet. Vielmehr wird zunächst mit einem einfachen Critical-point-Ansatz die relative Schadenshöhe aus dem Ausgangsbefall zu Zuckerrüben bestimmt. Dabei wird ein Modell mit einer kontinuierlichen Schadensfunktion $s(P_i)$ dem grob gerasterten diskreten Ansatz des Pflanzenschutzdienstes vorgezogen, dessen Aussagefähigkeit bei P_i -Werten über 2.500 Eier und Larven durch die Aussage „>30% Ertragsverluste“ eingeschränkt ist. Anschließend wird der erzielte Rübenmasseertrag unter Nematodenbefall, $E_{R_Befall}(t)$, errechnet, indem das Ergebnis der Ertragssimulation ohne Nematodenbefall (siehe Gleichung 30) um die Verluste bereinigt wird (Gleichung 45).

$$E_{R_Befall}(t) = E_R(t) - s(P_i)E_R(t) \quad (45)$$

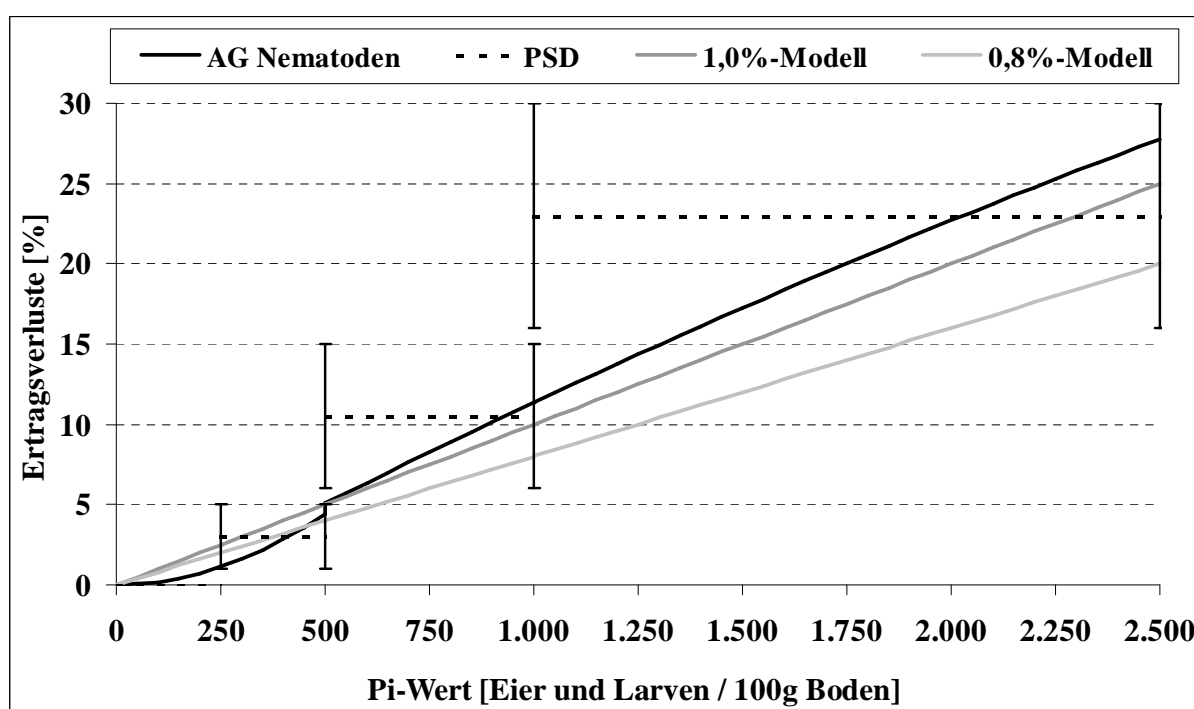
Zur Quantifizierung der Schadensfunktion dient der von SCHLANG (1999b, S. 1) angeregte lineare Ansatz mit konstantem prozentualen Verlust je 1.000 Eier und Larven. Vorteile dieses Ansatzes sind neben der leichten Verständlichkeit die einfache Berücksichtigung der Ertragsreaktionen resistenter Zuckerrübensorten (s.u.) und der wichtigsten abiotischen Einflussgröße auf die Schadenshöhe, der Saatzeit der Zuckerrüben (siehe Kapitel 2.3.3), sowie die unkomplizierte Erweiterung zu einem stochastischen Ansatz. Die Erweiterung um die Saatzeitabhängigkeit und Stochastik erfolgt in Kapitel 4.4.9.3.

Für anfällige Zuckerrübensorten werden in Anlehnung an SCHLANG (1999b, S. 1 und 2001, mündl.) 8,0-10,0% Ertragsverlust je 1.000 Eier und Larven angenommen, so dass Gleichung 46 die lineare Schadensfunktion für anfällige Zuckerrübensorten wiedergibt.

$$s_{aZR}(P_i) = (0,08 \dots 0,1) \frac{P_i}{1.000} \quad (46)$$

Die folgende Abbildung 54 zeigt, dass dieser Ansatz Größenordnung und Entwicklung der Schadenshöhe im Vergleich zu den alternativen Modellen der AG Nematoden (Gleichung 46) und des Pflanzenschutzdienstes (Anhang 39) gut wiedergibt und gleichzeitig die Forderung von SCHLANG (2001 und 2003a, mündl.) nach insgesamt niedrigerem Schadensniveau erfüllt.

Abbildung 54: Verschiedene Schadensfunktionen im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung

Wie das Modell der AG Nematoden weist auch der gewählte Ansatz einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich auf. So erreicht und übersteigt der Ansatz für anfällige Zuckerrüben mit 10,0% Schaden bei $P_i=10.000$ Eier und Larven und mit 8,0% Schaden bei $P_i=12.500$ Eier und Larven 100% Schaden (Absterben des Pflanzenbestands). Um dies zu verhindern, wird in Anlehnung an STEUDEL UND THIELEMANN (1979, S. 179f.) sowie SCHLANG (2001, mündl.) der maximale Ertragsverlust auf 55% begrenzt (siehe Kapitel 2.3.1), auch wenn P_i -Werte größer 10.000 Eier und Larven eher selten im Feld zu beobachten sind. Die Verläufe der Schadensfunktionen bei höheren Befallsdichten sind in Anhang 45 und Anhang 46 wiedergegeben.

Die nematodenresistenten Zuckerrübensorten erwiesen sich in den Feldversuchen als weitgehend tolerant. Da es aber keine absolute Toleranz gibt (siehe Kapitel 3.2.4), können Ertragseinbußen bis zu 4% je 1.000 Eier und Larven bei resistenten Zuckerrübensorten unterstellt werden (SCHLANG, 2003a, mündl., siehe Gleichung 47).

$$s_{rZR}(P_i) = (0,0\dots00,04) \frac{P_i}{1.000} \quad (47)$$

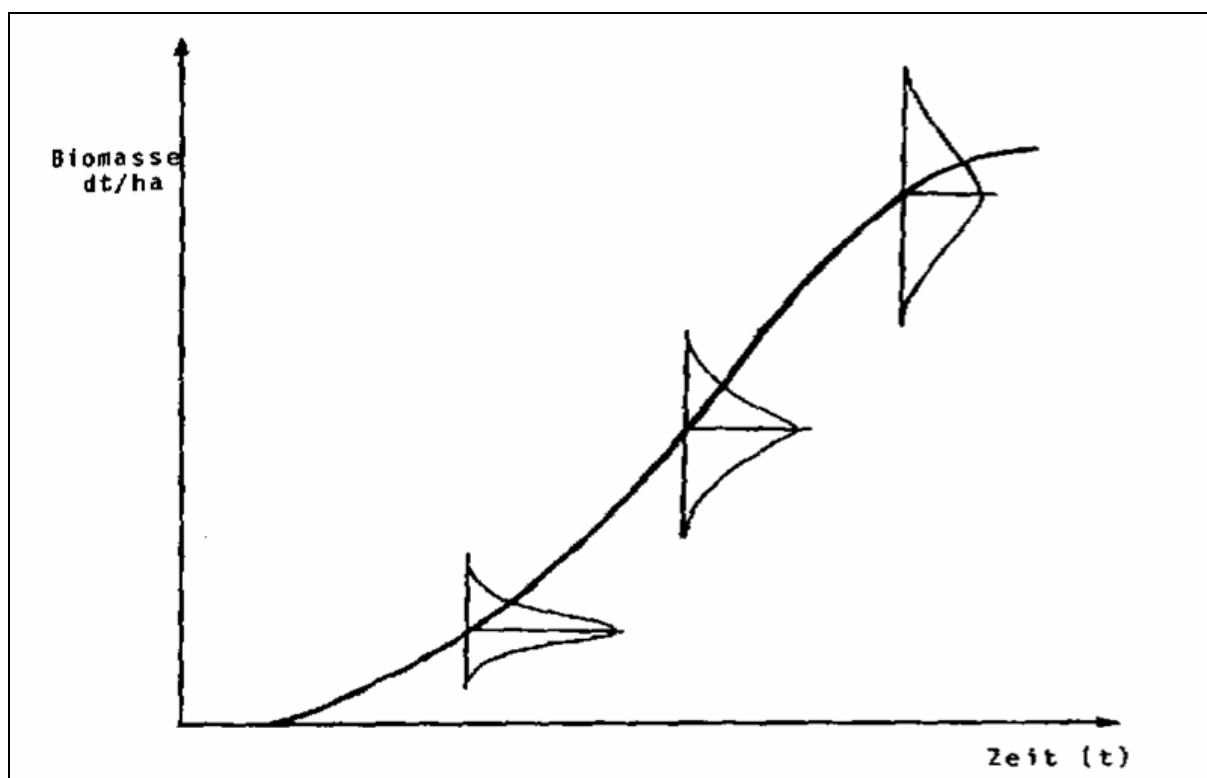
Eine Nachbildung der Befall-Schadens-Relation bei Vergesellschaftung mehrerer Schadnematodenarten, z.B. simultanen Befall mit *H.schachtii* und *D.dipsaci*, erfolgt nicht. Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf NOLING (1987) verwiesen, der die Schadensberechnung bei mehreren gleichzeitig auftretenden Nematodenarten betrachtet. Ebenso wird nicht unterschieden, ob neben dem Befall mit *H.schachtii* gleichzeitig Rizomaniabefall vorliegt oder nicht. Die Interaktion dieser beiden Schaderreger wird von MOUHANNA ET AL. (2001) betrachtet.

4.4.9 Erweiterung zum stochastischen Modellansatz

Nachdem das Ertragsmodell und die Befall-Schadens-Relation konzeptioniert und kalibriert wurden, wird an dieser Stelle die Ertragsvolatilität der Zuckerrübe inkorporiert. Der im Feld messbare stochastische Charakter des Zuckerrübenenertrags ist zurückzuführen auf die Unsicherheit über die Ausprägung der Witterungsgrößen, die seitens der Systemumwelt als Störgrößen das biologisch-technische System und sein Verhalten beeinflussen. Sie sind verantwortlich für natürliche Ertragsschwankungen, die auch ohne Schaderregerbefall auftreten, und für Schwankungen der Befall-Schadens-Relation. Daher wird dieses Kapitel dreigeteilt. In den ersten beiden Abschnitten wird der stochastische Ansatz des Pflanzenwachstumsmodells entwickelt, wobei die sekundären Ertragsparameter der Zuckerrübe, d.h. Zuckergehalt und Ausbeuteverluste, weiterhin als deterministisch betrachtet werden. Im dritten Abschnitt wird der Ansatz zur Nachbildung der Nematode-Zuckerrübe-Interaktion stochastisch gestaltet.

4.4.9.1 Ertragsvolatilität der Zuckerrübe

Bei der Ertragsprognose innerhalb eines Anbaujahr ist zu beachten, dass ausgehend von einem gegebenen Ist-Zustand des Systems die Eingriffsmöglichkeiten der exogenen Störvariablen auf das Systemverhalten mit zunehmender Länge des Prognosezeitraums zunehmen. Dies äußert sich in steigenden Streuungen der vorhergesagten Systemzustände (vgl. BLÖNNIGEN, 1986, S. 26 und Abbildung 55).

Abbildung 55: Stochastische Ertragsentwicklung

Quelle: BLÖNNIGEN, 1986, S. 27

Im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagement müssen dem Entscheidungsträger lediglich Informationen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Erträgen und Ertragsreaktionen auf verschiedene Managementmaßnahmen vorliegen (vgl. DUNCAN UND NOLING, 1998, S. 258), so dass sich ein verhaltensisomorpher Ansatz auf die Betrachtung der Zuckerrübenenerträge und deren Streuung am Tag der Ernte beschränken kann. Zur Erfassung dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zuckerrübenenerträge wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Literaturlauswertung vorgenommen.

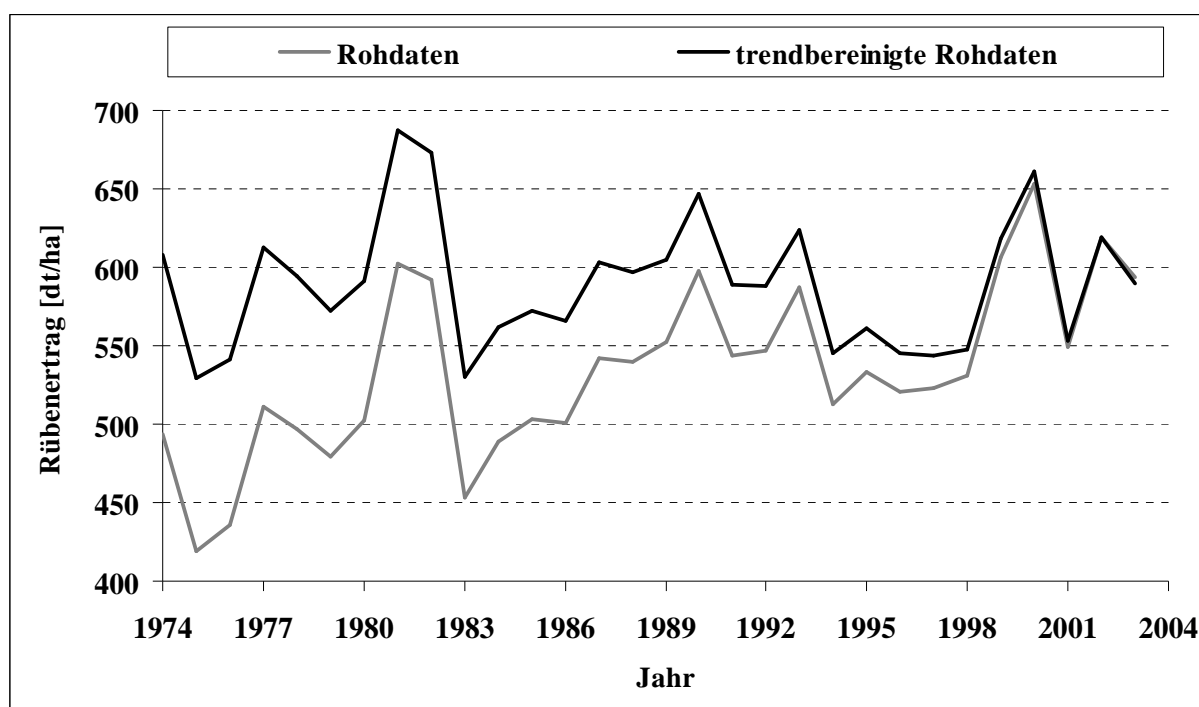
BLÖNNIGEN (1986, S. 26) weist darauf hin, dass sich die zur Wahrung der Übersichtlichkeit der Abbildung 55 sinnvolle Annahme der Normalverteilung der Zufallsvariablen in der Realität oft als falsch erweist. Dies gilt auch bei Betrachtungen von Ertragsschwankungen im Zeitablauf. So ist nach KLING (1984, S. 93) von einer (links-)schiefen Verteilung der Ertragsabweichungen vom Trend auszugehen, da witterungsbedingte Ertragsausfälle zu wesentlich gravierenderen Ausschlägen nach unten führen, als günstige Witterungsverhältnisse in Form einer positiven Ertragsabweichung an zusätzlichem Ertrag bringen. In der Literatur finden sich i.d.R. verteilungsunabhängige Angaben über die maximale Schwankungsbreite um den Mittelwert (Spannweite). Alternativ werden Normalverteilungen zur Darstellung der Zuckerrübenenerträge unterstellt und deren Momente Mittelwert und Variationskoeffizient (CV) ausgewiesen. Anhand dieser Angaben kann die Ertragsstochastik im Modell im folgenden Abschnitt umgesetzt werden.

RASMUSSEN (1990, S. 81ff.) untersuchte die Ertragsvariabilität der Zuckerrüben in verschiedenen Regionen Dänemarks und ermittelte Variationskoeffizienten zwischen 13,9% und 22,2%. Im langjährigen Untersuchungszeitraum von MÄRLÄNDER (1991, S. 24) ergaben sich

für Nordwestdeutschland Spannweiten des bereinigten Zuckerertrags von bis zu 53,1%. MEUWISSEN (2000, S. 47) erfasste insgesamt 13.000 landwirtschaftliche Betriebe in Europa und ermittelte im Bundesland Nordrhein-Westfalen einen mittleren Variationskoeffizient von lediglich 9,1% bei Zuckerrübenenerträgen für die Periode 1989-1995. ZENS (2002, S. 98f.) wertete Ertragsstatistiken der Wirtschaftlichen Vereinigung Zucker (Kampagneabschlussberichte der nordrheinischen Zuckerfabriken) und des Versuchsgutes Wahn (Eltzhof) für die Jahre 1950 bis 1998 aus. Für das Gebiet Nordrhein ergab sich nach Trendbereinigung eine Spannweite des Rübenenertrags von 28,2% (von -15,1% bis +13,1%) vom Mittel. Die Schwankungen der Ertragszahlen eines einzelnen Betriebs liegen ohne den ausgleichenden Effekt einer größeren Region („natural hedge“) erwartungsgemäß deutlich höher. So ergaben die Ertragsaufzeichnungen des Versuchsgutes Eltzhof eine Spanne für den Rübenenertrag von 52,2% (von -28,6% bis +23,6%) (ebd., S. 98). Daraufhin unterstellte ZENS (ebd., S. 99) Normalverteilung als Verteilungsform der Rübenenerträge mit einem Variationskoeffizienten von 11,8%. Auch STOCKFISCH ET AL. (2002, S. 65) ermittelten mit einer Spanne von -36,3% bis +37,7% beim Trockenmasseertrag der Zuckerrüben nahezu symmetrische Abweichungen vom Mittelwert. BUSENKELL (2004, S. 93) verwendete nach einer Literaturanalyse einen Variationskoeffizienten von 14,6% zur Abbildung der Ertragsunsicherheit der Zuckerrübe in seinem Modell.

Zusätzlich zur Literaturanalyse wurde die Ertragsstatistik für Zuckerrüben der Betriebe des AK 1 der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen für die Jahre 1974-2004 ausgewertet. Nach der Trendbereinigung ergab sich ein mittlerer Rübenenertrag von 590 dt/ha mit einer Standardabweichung von 42,5 dt/ha, d.h. einem Variationskoeffizient in Höhe von 7,2%. Die Abweichung vom Mittelwert betrug 26,9%, wobei der Zuckerrübenenertrag mit -10,2% bis +16,7% Abweichung vom Mittelwert leicht rechtsschief verteilt ist (vgl. LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, verschiedene Jahrgänge sowie Abbildung 56).

Abbildung 56: Zuckerrübenenerträge des AK 1



Quelle: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, verschiedene Jahrgänge

4.4.9.2 Implementierung im Ertragsmodell

Die Implementierung der Stochastik im Modell zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe erfolgt analog zur Vorgehensweise beim Populationsmodell (siehe Kapitel 4.3.6.2). Als Verteilungsform der Rübenenerträge wird Normalverteilung unterstellt. Die Auswertungen zeigen, dass der Fehler bei Unterstellung dieser symmetrischen Verteilungsform als gering angesehen werden kann. Ausgehend vom Standardvegetationszeitraum der Zuckerrübe (7.4.-24.10.) wird mit dem dynamischen Ertragsmodell ein Rübenenertrag von 733 dt/ha für anfällige Zuckerrüben auf dem guten Produktionsstandort errechnet. Daraus werden 73,3 dt/ha als Standardabweichung, mithin ein Variationskoeffizient von 10%, abgeleitet und als Normstandardabweichung festgesetzt. Der errechnete Ertrag anfälliger und resistenter Zuckerrüben am Tag der Ernte ist Mittelwert μ einer Normalverteilung mit der Standardabweichung $\sigma = 73,3$ dt/ha, aus der der Modelloutput Zuckerrübenenertrag für jedes Anbaujahr gezogen wird. Das Ergebnis der Ziehung dient der Berechnung des unter Nematodenbefall realisierten Rübenenertrags.

Im Gegensatz zu ZENS (2002, S. 99) wird im Rahmen dieser Arbeit nicht der Variationskoeffizient, sondern die Standardabweichung bei Szenarienrechnungen mit unterschiedlichen mittleren Ertragsniveaus konstant gehalten. Für diese Vorgehensweise sprechen folgende Gründe:

1. Eine Verkürzung der Vegetationszeit der Zuckerrübe führt nicht nur zu einer Verringerung des (mittleren) Zuckerrübenenertrags, sondern auch zu einer Erhöhung der Ertragsvolatilität (steigender Variationskoeffizient).
2. Resistente Zuckerrüben sind neben einem geringeren Ertragsniveau auch mit einem höheren Variationskoeffizienten verbunden. Dies kann als Folge der Einkreuzung der Wildrüben gene (siehe Übersicht 3) begründet werden. Bei Verwendung des Ansatzes von ZENS (2002, S. 99) wären die resistenten Zuckerrübensorten ohne Nematodenbefall die ertrags-sichereren. Anhang 47 zeigt die Ertragsverteilungen anfälliger ($NV(733;73,3^2)$) und resistenter Zuckerrüben ($NV(667;73,3^2)$) ohne Nematodenbefall für die Standardvegetationszeit auf dem Produktionsort „gut“. Die zwei Ertragsverteilungen sind deckungsgleich, da sie sich lediglich beim Lageparameter, dem Mittelwert, unterscheiden, während der Formparameter Standardabweichung identisch ist.
3. Desgleichen gilt für die drei Produktionsorte. Je schlechter der Produktionsort, desto geringer ist der mittlere Rübenenertrag bei gleichzeitig steigendem Variationskoeffizient. (siehe Anhang 48 und Übersicht 8). Der Ansatz von ZENS (2002) führte dazu, dass der schlechte Produktionsort der ertragssicherste wäre.

Die Übersicht 8 zeigt die statistischen Momente der Ertragsverteilungen anfälliger und resistenter Zuckerrüben bei 73,3 dt/ha Standardabweichung für die drei definierten Produktionsorte. Mit dem Wertebereich $\mu \pm 3\sigma$ werden bei einer Normalverteilung 99,73% aller Realisationen abgedeckt (vgl. HARTUNG ET AL., 1998, S. 147) und mit den Ergebnissen der Literaturanalyse vergleichbare Abweichungen vom Mittelwert bei einem einzelnen Betrieb erreicht.

Übersicht 8: Statistische Momente der Rübenertragsverteilungen

ZR-Sorte	Produktionsort	$\mu - 3\sigma$ (dt/ha)	μ (dt/ha)	CV (%)	$\mu + 3\sigma$ (dt/ha)	Spannweite (%)
anfällig	Gut	512,90	732,80	10,00	952,70	±30,01
	Mittel	439,70	659,60	11,11	879,50	±33,34
	Schlecht	366,40	586,30	12,50	806,2	±37,51
resistent	Gut	447,02	666,92	10,99	886,82	±32,97
	Mittel	380,32	600,22	12,21	820,12	±36,64
	Schlecht	313,63	533,53	13,74	753,43	±41,22

Quelle: Eigene Berechnungen

4.4.9.3 Implementierung bei der Befall-Schadens-Relation

Wie in Kapitel 2.3.3 gezeigt, ist die Beziehung zwischen der Populationsdichte und den Ertragsverlusten nicht sehr eng und die Reduktion auf eine monofaktorielle funktionale Beziehung zwischen P_i -Wert und Schadenshöhe mit einem erheblichen Verlust an erklärter Varianz verbunden. Wegen der im Feld beobachtbaren starken Schwankung der Ertragsverluste bei gleicher Populationsdichte sind die Regressionsergebnisse im Einzelfall daher mit einer erheblichen Unsicherheit belastet. Hinzu kommen die natürlichen Fluktuationen der Nematodenpopulation und die bei den Befallserhebungen unvermeidlichen Messungenauigkeiten. Nach STEUDEL UND THIELEMANN (1979, S. 181) kann der vor der Aussaat festgestellte Vorbefall an lebensfähigen Eiern und Larven des Rübennematoden lediglich Hinweise auf die zu erwartende durchschnittliche Höhe des Ertragsverlusts geben. Schon FERRIS (1984, S. 2) betonte, dass ein wahrscheinlichkeitsverteilter P_i -Wert auch zu wahrscheinlichkeitsverteilten Ertragsschätzungen führen muss, wenn Schadensfunktionen zu Grunde gelegt werden.

Um die Unsicherheiten der Befall-Schadens-Relation im Modell nachzubilden, können die relativen Schadenshöhen je 1.000 Eier und Larven des mit den Gleichungen 44-46 definierten Befall-Schadens-Ansatzes (8,0-10,0% bei anfälligen und 0,0-4,0% bei resistenten Zuckerrüben) als Eckpunkte einer Dreiecksverteilung angesehen werden. Vorteile der Dreiecksverteilung sind die gute Operationalität ihrer drei Parameter Minimum a , Maximum b und Modus m , der im Gegensatz zur Normalverteilung abgegrenzte Wertebereich und die Fähigkeit, sowohl symmetrische, als auch links- oder rechtsschiefe Verteilungen darzustellen (vgl. BRANDES UND ODENING, 1992, S. 186f.).

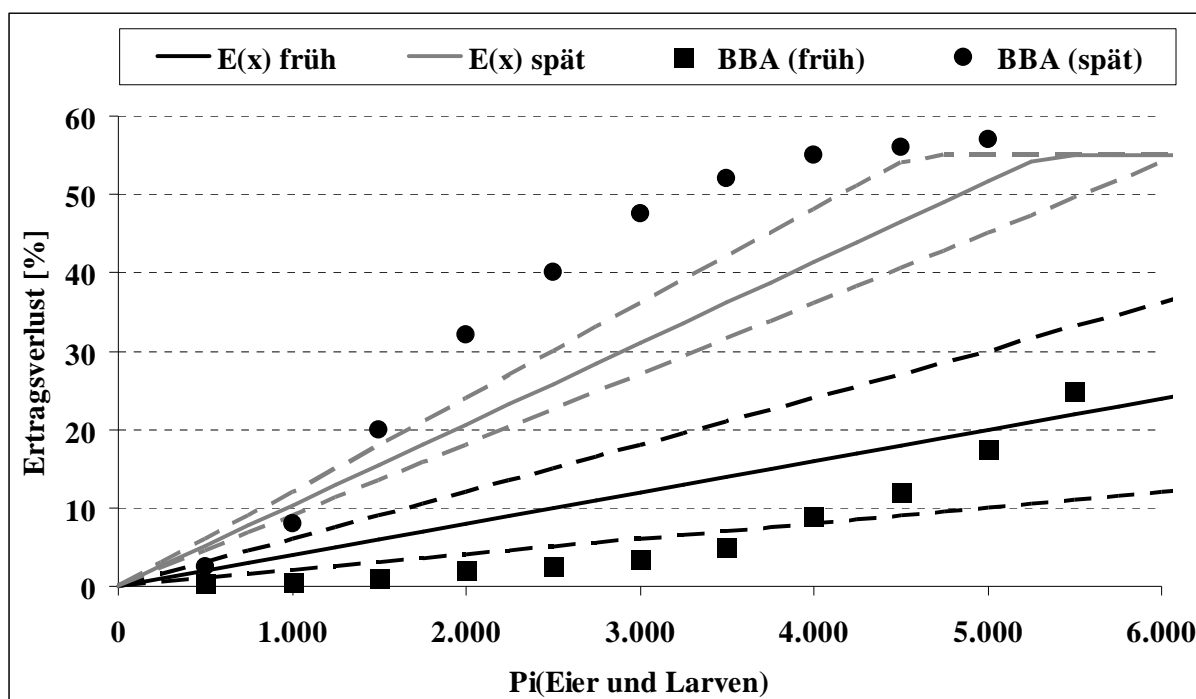
Als wichtigste abiotische Einflussfaktoren auf die Schadenshöhe wurden in Kapitel 2.3.3 die Saatzeit und die mit ihr eng korrelierte Bodentemperatur und -feuchte herausgestellt. Die Verwendung der Dreiecksverteilung ermöglicht es, die Saatzeitabhängigkeit durch geeignete Variation der Verteilungsparameter in den stochastischen Ansatz einzubeziehen. Dazu wird unterstellt, dass sich die Angaben von SCHLANG (1999b, S. 1 und 2001, mündl.) über die relative Schadenshöhe auf eine mittlere Aussaatzeit der Zuckerrüben beziehen, mithin Mitte April

im Rheinland (vgl. ZENS, 2002, S. 31 sowie Kapitel 4.4.4). Für den Aussaatzeitraum 1.4.-15.4. wird daher eine symmetrische Dreiecksverteilung mit den Parametern $a = 7,0\%$, $m = 8,0\%$ und $b = 9,0\%$ definiert, wodurch sich ein Erwartungswert des Schadens $E(x)$ in Höhe von $(7,0\% + 8,0\% + 9,0\%)/3 = 8,0\%$ ergibt.

Bei Fröhsaaten vor dem 1. April ist das Schadensniveau i.d.R. geringer. Als Orientierung dienen die Untersuchungen von STEUDEL UND THIELEMANN (1979, S. 179), die bei früher Saat (ortsüblich: Ende März – Anfang April) den in Abbildung 8 (Kapitel 2.3.3) dargestellten Schadensverlauf ermittelten. Um diesen Schadensverlauf wiedergeben zu können, werden die Parameter der Verteilung für das Modell bestimmt zu $a = 2,0\%$, $m = 4,0\%$ und $b = 6,0\%$ ($E(x) = 4,0\%$). Abbildung 57 zeigt den von STEUDEL UND THIELEMANN (ebd.) ermittelten Schadensverlauf bei Fröhsaaten („BBA (fröh)“) im Vergleich zu den Modellschadensverläufen mit dem Erwartungswert (durchgezogene Linien) und den Extremwerten der Dreiecksverteilung (gestrichelte Linien). Der empirisch ermittelte Schadensverlauf mit zunächst kaum ansteigenden Ertragsverlusten bei steigendem Ausgangsbefall und ab 3.000 Eier und Larven stärkerem Schadensanstieg kann mit dem linearen Ansatz annähernd wiedergegeben werden.

Spätsaaten weisen c.p. höhere nematodenbedingte Ertragsverluste auf. Für Maisaaten können wiederum die Untersuchungen von STEUDEL UND THIELEMANN (1979, S. 179) herangezogen werden, deren späte Aussaat ebenfalls auf Mai datiert ist. Um den Einfluss modernerer Sorten abbilden zu können und der Forderung nach einem geringeren maximalen Schadensniveau nachzukommen, wird eine Dreiecksverteilung mit den Parametern $a = 9,0\%$, $m = 10,0\%$ und $b = 12,0\%$ ($E(x) = 10,33\%$) für den Aussaatzeitraum nach dem 30. April festgelegt. Trotz des hohen Maximalwertes der Modellsdreiecksverteilung werden die empirisch ermittelten Ertragsverluste („BBA (spät)“) unterschritten (siehe Abbildung 57).

Abbildung 57: Ertragsverluste bei Fröh- und Spätsaat anfälliger Zuckerrübensorten



Quelle: Eigene Darstellung

Für den mittelspäten Saatzeitraum (16.-30. April) werden die Verteilungsparameter festgelegt auf $a = 8,0\%$, $m = 8,0\%$ und $b = 10,0\%$ ($E(x) = 8,67\%$). Bei resistenten Zuckerrübensorten wird mangels empirischer Belege die Befall-Schadens-Relation saatzeitunabhängig formuliert und die Dreiecksverteilung definiert mit $a = 0,0\%$, $b = 4,0\%$ und $m = 0,0\%$ ($E(x) = 1,33\%$). Die Rechtsschiefe dieser Verteilung mit Minimalwert = Modus = $0,0\%$ betont die ausgeprägte Toleranz der nematodenresistenten Zuckerübensorten.

In der nachfolgenden Übersicht 9 sind die Parameter der Dreiecksverteilungen nach dem Saatzeitraum gestaffelt aufgeführt. Die Streuungsmaße Varianz $V(x)$ und Variationskoeffizient CV zeigen, dass mit den gewählten Verteilungsparametern die Erkenntnis von STEUDEL UND THIELEMANN (1979, S. 181) wiedergegeben werden kann, dass die Streuung der nematodenbedingten Verluste in den einzelnen Jahren bei Maisaaten höher ist als bei Saaten im April. Die größere Streuung der Ertragsreaktion der nematodenresistenten Zuckerrüben kann als Folge der nicht 100%igen Transmission des Resistenzgens (siehe Kapitel 3.2.5) gedeutet werden, da dadurch stets ein Anteil anfälliger und empfindlicher Pflanzen im Bestand ist. Die grafische Darstellung der Dreiecksverteilungen erfolgt in Anhang 49 und 50.

Übersicht 9: Parameter der dreiecksverteilten Befall-Schadens-Relationen

<u>Saatzeitraum</u>	<u>a</u>	<u>m</u>	<u>b</u>	<u>E(x)</u>	<u>V(x)</u>	<u>CV [%]</u>
Vor dem 1. April	2,0	4,0	6,0	4,0	0,67	20,41
1.-15. April	7,0	8,0	9,0	8,0	0,17	5,10
16.-30. April	8,0	8,0	10,0	8,7	0,22	5,44
Nach dem 30. April	9,0	10,0	12,0	10,3	0,39	6,03
Resistente Sorten	0,0	0,0	4,0	1,3	0,89	70,71

Quelle: Eigene Berechnungen

4.4.9.4 Überlegungen zur Korrelation der stochastischen Größen

Bei den im Rahmen dieser Arbeit gewählten Ansätzen zur Simulation der Ertragsentwicklung der Zuckerrüben und zur Abbildung der Befall-Schadens-Relation werden die stochastischen Größen Ertragspotential und relative Schadenshöhe unabhängig von einander gezogen. Es ist zu hinterfragen, ob es nicht eine Korrelation zwischen diesen beiden Größen geben müsste, schließlich sind beide witterungsabhängig und unterliegen an einem Standort identischen Witterungsbedingungen, und wenn ja, ob Ertragspotential der Zuckerrüben und nematodenbedingte Ertragsverluste positiv oder negativ korreliert sein müssten. Gegen eine (allzu ausgeprägte) Korrelation spricht, dass für die Höhe des nematodenbedingten Schadens nur die Aktivität des Schaderregers und damit die Witterung in einem sehr kleinen Zeitraum nach der Saat der Zuckerrüben eine Rolle spielt, während für das Ertragspotential der Witterungsverlauf über die gesamte Vegetationszeit maßgeblich ist.

Im gewählten Modellansatz auf der Basis einer relativen Schadensfunktion ist in einem Jahr mit geringem Rübenenertragspotential (bspw. 500 dt/ha) ein mittlerer nematodenbedingter Ertragsverlust in Höhe von 10% gleichbedeutend mit einer absoluten Ertragsdepression von

50 dt/ha. In einem Jahr mit hohem Ertragspotential (bspw. 700 dt/ha) führt ein 10%iger Schaden zu einem absoluten Ertragsverlust von 70 dt/ha. Ertragspotential und absoluter Ertragsverlust sind demnach aufgrund der konstanten prozentualen Schadenshöhe positiv korreliert. Dieses Modellverhalten wird von den Untersuchungen von FICHTNER ET AL. (1979, S. 265f.) und HAMBÜCHEN (1990, S. 126) gestützt, nach deren Untersuchungen in Jahren mit hohem Ertragsniveau auch die nematodenbedingten Mindererträge größer ausfallen als in den Jahren mit geringem Ertragspotential.

Gleichzeitig führt die saatzeitabhängige Formulierung der relativen Schadenshöhe je 1.000 Eier und Larven zu einer negativen Korrelation zwischen relativer Schadenshöhe und Ertragspotential innerhalb eines Jahres. Je später die Aussaat der Zuckerrüben erfolgt, desto geringer ist c.p. das Ertragspotential bei gleichzeitig steigendem mittleren Ertragsverlust.

Wird zur Berechnung nematodenbedingter Ertragsdepressionen eine Schadensfunktion verwendet, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen absolutem Ertragsrückgang und Nematodenbefall herstellt (vgl. FISCHER, 1990a, S. 27), ergibt sich eine negative Korrelation zwischen relativem Schaden und Ertragspotential. In einem „guten“ Zuckerrübenjahr mit einem hohen Ertragspotential von 700 dt/ha entspricht ein nematodenbedingter Ertragsverlust in Höhe von 50 dt/ha 7,1% Ertragsdepression. In einem „schlechten“ Jahr mit nur 500 dt/ha Ertragserwartung bedeuten 50 dt/ha 10% Ertragsverlust. Eine solche Korrelation hält SCHLANG (2003b, mündl.) für möglich.

4.5 Bio-ökonomisches Modul

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 dargestellt, müssen die physischen Outputgrößen des biologisch-technischen Submodells zur Abbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe in monetäre Größen transformiert werden. Ebenso sind die Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements mit ihren Kosten zu erfassen. Die Transformation der abundanzregulierenden Wirkung der Managementmaßnahmen, d.h. die Bewertung ihrer „Leistung“, erfolgt über die Veränderungen der erzielten Zuckerrübenenerträge.

Das Integrierte Nematodenmanagement tangiert nicht nur den Anbau von Zuckerrüben, sondern den gesamten Ackerbau eines landwirtschaftlichen Unternehmens (siehe Kapitel 3.2). Neben den Zuckerrüben sind daher die weiteren Feldfrüchte, die neben Zuckerrüben angebaut werden und mit diesen in einer Fruchtfolge stehen, ökonomisch zu erfassen. Nur auf dieser Basis ökonomischer Kennzahlen ist das Ziel erreichbar, den Entscheidungsträger bei der Findung guter bzw. optimaler Managemententscheidungen zu unterstützen, wenn im Zielsystem die Güte bzw. „Optimalität“ einer Entscheidung als Steigerung des ökonomischen Ergebnisses definiert wird (siehe Kapitel 4.5.3.1). Das Modul, das die biologisch-technischen Modelle zu bio-ökonomischen Modellen ausbaut und die Anbaualternativen und Managementmaßnahmen ökonomisch erfasst, ist daher nicht als ein weiteres Subsystem, sondern vielmehr als übergeordnetes System anzusehen.

4.5.1 Politische Systemumwelt

Wie die Witterung für die biologisch-technischen Modelle ist die Agrarpolitik die wichtigste Komponente der Systemumwelt für das Bewertungssystem. Die gemeinsame Agrarpolitik

(GAP) der EU entscheidet über die Marktordnungssysteme, über die Preise einiger Ackerfrüchte sowie über die Höhe der Prämien und den Umfang der konjunkturellen Flächenstilllegung. Als politische Systemumwelt werden im Rahmen dieser Arbeit die ab dem 1. Januar 2005 gültigen Bestimmungen der GAP sowie die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit gültige Form der Zuckermarktordnung der EU angesehen.

4.5.1.1 Gemeinsame Agrarpolitik

Die Beschlüsse des EU-Agrarrates vom 26. Juni 2003 leiten mit ihren Kernelementen

1. Entkopplung der Direktzahlungen von der Produktion,
2. Cross-Compliance (Knüpfung der Gewährung von Direktzahlungen an die Einhaltung diverser Vorschriften und Auflagen) sowie
3. obligatorische Modulation (Kürzung von Direktzahlungen zugunsten zusätzlicher Mittel für die Förderung der ländlichen Räume)

eine grundlegende Neuausrichtung der zuvor in der so genannten „Agenda 2000“ definierten Gemeinsamen Agrarpolitik¹⁸ ein. In Deutschland wird ein dynamisches Kombinationsmodell realisiert, d.h. in den Jahren 2012/2013 wird es zu einheitlichen Flächenprämien je Bundesland kommen. Die Zahlungen werden künftig „entkoppelt“, das heißt ohne Bindung an die Erzeugung bestimmter Produkte, gewährt. Da die Flächenprämien nicht mehr aktionsgebunden sind und für alle betrachteten Produktionsverfahren gleichermaßen gewährt werden, stellen sie lediglich eine entscheidungsunabhängige Skalierungsgröße einer gesamtbetrieblichen Erfolgskennzahl dar.

Nach SCHLINDWEIN (2004, S. 18) ergeben sich für das Bundesland Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 2005-2012 die in der folgenden Übersicht 10 dargestellten und im Rahmen dieser Arbeit übernommenen regionalisierten Ackerprämien, die die Modulation und Kürzungen für die nationale Reserve berücksichtigen. Die Prämienhöhe für das bzw. ab dem Jahr 2013 beruht auf Angaben des BMVEL (BMVEL, 2005, S. 123).

¹⁸ Auf die in der Agenda 2000 definierte Gemeinsame Agrarpolitik der EU kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf BMVEL (2002) verwiesen.

Übersicht 10: Höhe der Ackerprämien in Nordrhein-Westfalen

<u>Jahr</u>	<u>Ackerprämie (Euro/ha)</u>
2005	270
2006	270
2007	276
2008	286
2009	298
2010	312
2011	321
2012	325
ab 2013	347

Quellen: SCHLINDWEIN, 2004, S. 18, verändert; BMVEL, 2005, S. 123

Die obligatorische Flächenstilllegung (siehe Kapitel 3.2.3.2) wurde im Rahmen der Reform der GAP im Grundsatz beibehalten, die Höhe des Stilllegungssatzes ist nun allerdings regionsspezifisch. In Nordrhein-Westfalen beträgt die Stilllegungsverpflichtung ab dem Jahr 2005 8,05%. Im Gegensatz zur bisherigen Stilllegungsregelung ist die stilllegungsfähige Fläche dabei grundsätzlich die gesamte Ackerfläche des Betriebs, d.h. vor allem auch die Flächen, auf denen Zuckerrüben und Kartoffeln angebaut werden (vgl. BMVEL, 2005, S. 50). In dieser Höhe werden dem Landwirt im Jahr 2005 Stilllegungsverpflichtungen (Prämienzertifikate, die nur mit Flächenstilllegung aktivierbar sind) zugeteilt. Über diese Stilllegungsrechte hinaus stillgelegte Fläche kann zur Aktivierung von Ackerprämienrechten verwendet werden (ebd.).

Ab dem 1. Januar 2005 ist im Rahmen der Cross-Compliance zum Erhalt der organischen Substanz im Boden und zum Schutz der Bodenstruktur sicherzustellen, dass auf betrieblicher Ebene das jährliche Anbauverhältnis aus mindestens drei Kulturen besteht. Stillgelegte und nicht bewirtschaftete Ackerflächen gelten dabei als eine Kultur. Jede Kultur muss mindestens einen Anteil von 15% der Ackerfläche bedecken (vgl. BMVEL, 2005, S. 76). Diese Anbauplanungs- bzw. Fruchtfolgerestriktion wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da nach BMVEL (2005, S. 76) ein Landwirt, der in einem Jahr nur eine oder zwei Kulturen anbaut, die Fruchtfolgeanforderungen dennoch erfüllen kann, wenn mindestens in drei aufeinander folgenden Jahren jeweils eine andere Kultur angebaut wird oder über einen Flächenwechsel mit anderen Betrieben sichergestellt werden kann, dass auf diesen Flächen in drei Folgejahren jeweils andere Kulturen angebaut werden. Alternativ zur Einhaltung der Vorgaben zum Anbauverhältnis ist eine betriebliche Humusbilanz für die Ackerfläche incl. Stilllegungsfläche nach vorgegebenen Abfuhr- und Zufuhrrichtwerten zu erstellen oder der Humusgehalt durch eine Untersuchung im sechsjährigen Rhythmus festzustellen.

4.5.1.2 Zuckermarktordnung

Der Anbau von Zuckerrüben findet in Deutschland unter den Bedingungen der Zuckermarktordnung (ZMO) der Europäischen Union statt, die mit der Verordnung Nr. 1009/67/EWG am

1. Juli 1968 in Kraft trat. Die zur Zeit der Entstehung dieser Arbeit gültige ZMO beruht auf der Verordnung (EG) Nr. 1260/2001, deren Gültigkeit mit Ende des Wirtschaftsjahres 2005/2006, d.h. am 30. Juni 2006, endet. Die in dieser Verordnung festgeschriebenen und für diese Arbeit relevanten Elemente der ZMO, die Quoten- und Preisregelungen, werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Im Rahmen der Verordnung Nr. 1009/67/EWG wurden den beteiligten Mitgliedsstaaten Produktionsquoten für Zucker zugeteilt, die sich in eine Grundquote (bekannt als A-Quote) und in eine Spezialisierungsquote (B-Quote) aufteilen. Diese Produktionsquoten teilen die Mitgliedsstaaten auf die nationalen zuckererzeugenden Unternehmen (Zuckerfabriken) auf, die ihrerseits wiederum Einzelverträge (Lieferverträge) und Branchenabkommen mit den Rübenanbauern gemäß den Gemeinschaftsvorschriften abschließen.

Sowohl für Zucker, der im Rahmen der A-Quote produziert wird (A-Zucker), als auch für B-Zucker gibt es Preis- und Absatzgarantien, wobei die Absatzgarantie den Gemeinschaftsmarkt und unter Gewährung von Exporterstattungen ebenso den Weltmarkt umfasst. Der in §4 der Verordnung (EG) Nr. 1260/2001 festgelegte Mindestpreis für A-Rüben beträgt 46,72 Euro/t, der für B-Rüben 28,84 Euro/t. Die über diese beiden Quoten hinaus erzeugten Zuckermengen bilden den C-Zucker, der nicht in der Gemeinschaft vermarktet werden darf und ohne Erstattungen auf den Weltmarkt ausgeführt werden muss. Für C-Rüben ist daher kein Mindestpreis definiert; dieser richtet sich nach den Erlösen, die die Verarbeiter auf dem Weltmarkt erzielen.

Zur Abschwächung der Auswirkungen der jährlichen Produktionsschwankungen können die Zuckererzeuger eine bestimmte Menge C-Zucker auf das folgende Wirtschaftsjahr übertragen (Vortrag). Entsprechend der Verordnung (EWG) Nr. 65/82 können bis zu 20% der A-Quote vorgetragen werden. Dieser Zucker ist 12 Monate lang zu lagern und wird auf die A-Quote des folgenden Wirtschaftsjahres angerechnet. Art und Umfang des individuellen Vortrags von C-Rüben durch den Rübenanbauer wird in Branchenvereinbarungen zwischen den Zuckerfabriken und den Rübenanbauern festgelegt. Eine Ausschöpfung des durch die ZMO vorgegebenen Vortragsumfangs erfolgt in aller Regel nicht, da der C-Vortrag mit der Bereitstellung entsprechend dimensionierten Lagerraums für den Zucker verbunden ist und zu einer Verringerung der Verarbeitungsmenge im Folgejahr führt. Beides erhöht die fixen Stückkosten des Zuckererzeugers. Die Bezahlung der vorgetragenen Rübenmenge erfolgt nach den A-Rübenpreisen des laufenden Zuckerwirtschaftsjahres, der Anbauer muss allerdings seit 2002 die anfallenden Lager- und Finanzierungskosten in Höhe von 5,46 Euro/t vorgetragene Rüben bei 16% Zuckergehalt selbst übernehmen (vgl. ZENS, 2002, S. 87).

4.5.1.3 Regionale Ausgestaltung der Zuckermarktordnung

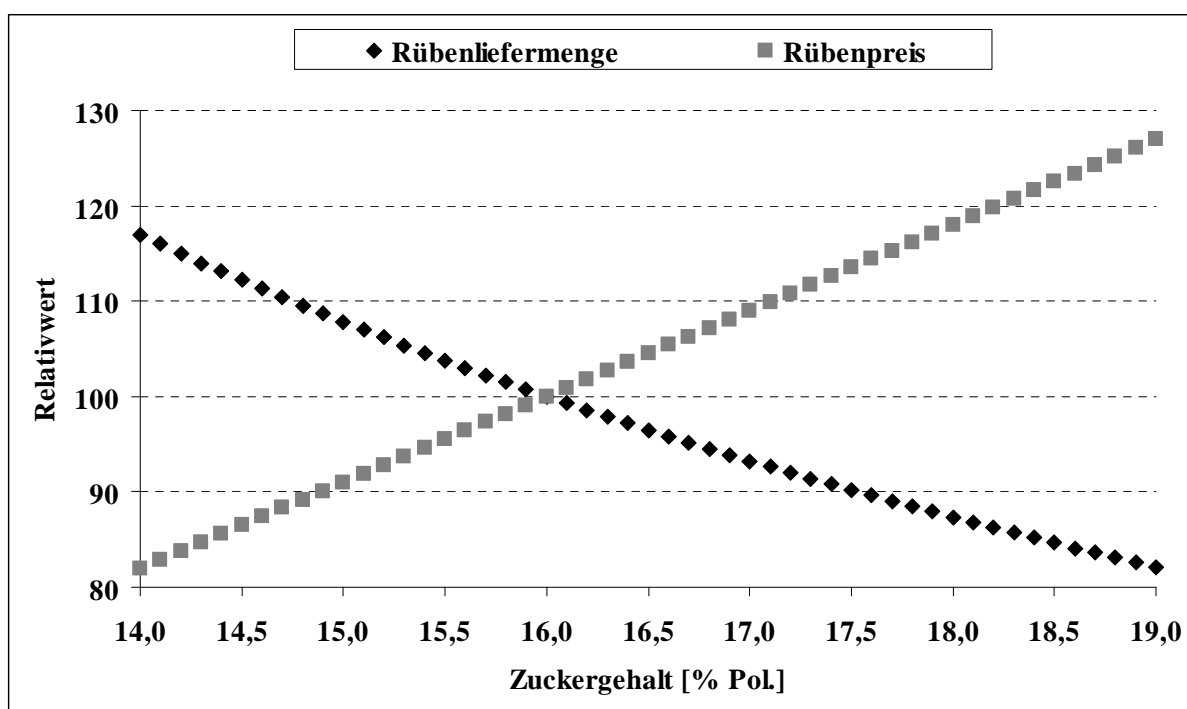
Die zuckererzeugenden Unternehmen haben einen maßgeblichen Einfluss auf die regionale Ausgestaltung der Zuckermarktordnung. Da im Rahmen dieser Arbeit der geographische Fokus auf dem Rheinland liegt (siehe Kapitel 4.2.2), sind die Ausgestaltung der Lieferverträge und Branchenvereinbarungen des Kölner Zuckerunternehmens Pfeifer & Langen KG maßgeblich für die marktordnungspolitische Systemumwelt des Zuckerrübenbaus im Untersuchungsgebiet¹⁹.

¹⁹ Pfeifer & Langen besitzt u.a. Zuckerfabriken in Appeldorn, Elsdorf, Euskirchen und Lage

Die betriebsindividuelle Rübenliefermenge wird von Pfeifer & Langen den zuckerrübenanbauenden Landwirten für jedes (Zucker-)Wirtschaftsjahr mit dem Rübenlieferungsvertrag ausgegeben. Die neben der A-Rübenliefermenge ausgegebene Liefermenge für B-Rüben entspricht 30% der A-Rübenliefermenge (vgl. PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 1). Die im Rübenlieferungsvertrag genannten A- und B-Rübenliefermengen werden auf der Basis 16,0% Zuckergehalt bei Annahme in der Fabrik ausgegeben. Bei Rüben mit höherem/niedrigerem Zuckergehalt ermäßigen/erhöhen sich die A- und B-Rübenliefermengen (siehe Abbildung 58 sowie Anhang 51).

Ebenso wie die Liefermengen basieren auch die Rübenpreise auf einem Zuckergehalt von 16,0% bei Annahme in der Fabrik. Die Über- und Untergrade werden je 1/10% Zuckergehalt über 16,0% mit einem Zuschlag von 0,9%, für jedes 1/10% unter 16,0% mit einem Abschlag von 0,9% abgerechnet (siehe Abbildung 58 sowie Anhang 52). Die gleiche Berechnungsweise gilt für Vortrags- und C-Rüben (PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 2).

Abbildung 58: Abhängigkeit von Liefermenge und Rübenpreise vom Zuckergehalt

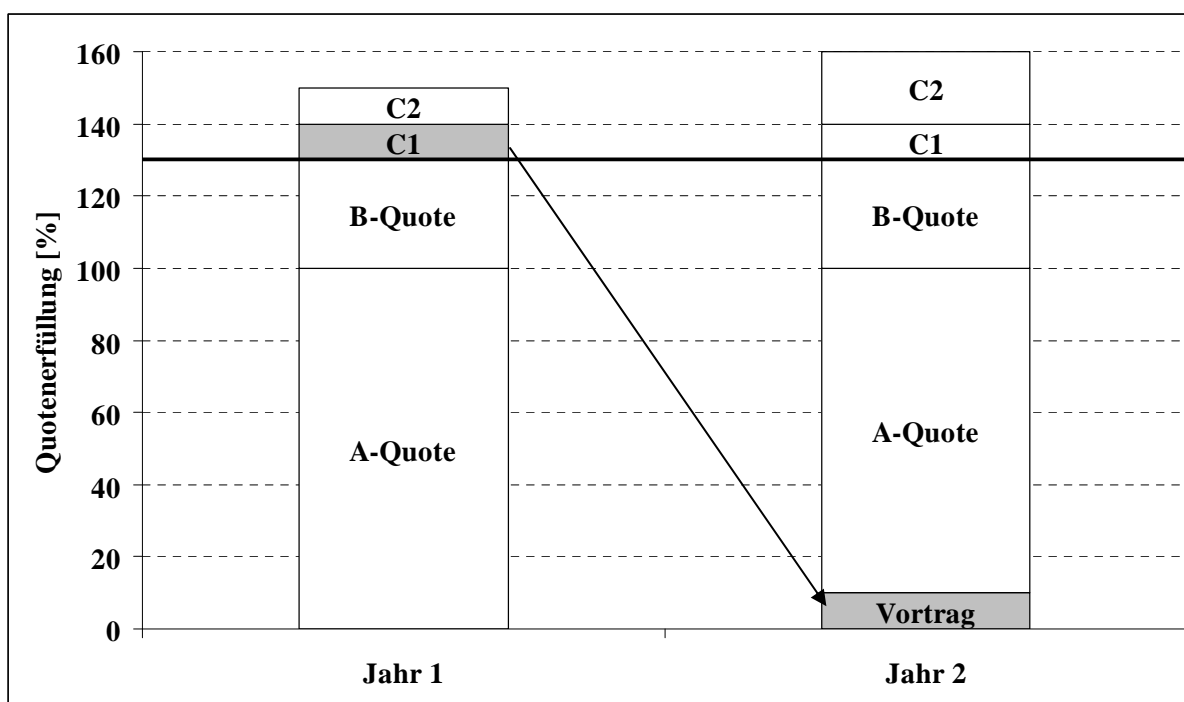


Quelle: Eigene Darstellung

Des weiteren ist in der Branchenvereinbarung festgelegt, dass alle Rüben, die im Bereich von 130 bis 140% der zugeteilten A-Rübenliefermenge vom Rübenanbauer geliefert werden, C1-Rüben entsprechen und Rübenlieferungen über 140% der zugeteilten A-Rübenliefermenge als C2-Rüben gelten. Zum Vortrag von C-Zucker können im Bereich Nordrhein nur C1-Rüben herangezogen werden (PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 1). Je nach Marktlage und vorheriger Vereinbarung der Unternehmen mit dem Rheinischen Rübenanbauer-Verband beträgt diese Vortragsmenge zunächst 7,5% der A-Rübenliefermenge, kann sich aber individuell bis auf 10% erhöhen. Die Vortragsrübenmenge wird, auf Basis von 16,0% Zuckergehalt umgerechnet, im folgenden (Zucker-)Wirtschaftsjahr von der A-Rübenliefermenge abgezogen. Durch den Vortrag werden C2-Rüben nicht in C1-Rüben umgewandelt (ebd., S. 3).

Die Lieferrechts- und Vortragsregelung von Pfeifer & Langen ist in Abbildung 59 dargestellt. In dieser Abbildung wird im ersten Rübenanbaujahr eine Gesamterntemenge erreicht, die 150% der A-Quote bei 16% Zuckergehalt entspricht, so dass 10% der Liefermenge vortragbare C1-Rüben sind und weitere 10% C2-Rüben anfallen. Werden die C1-Rüben komplett auf das zweite Anbaujahr vorgetragen, verringert sich die verfügbare A-Quote im zweiten Anbaujahr auf 90% der A-Quote im ersten Jahr. Die B-Quote entspricht weiterhin 30% der ungekürzten A-Quote. Entspricht die Gesamterntemenge im zweiten Jahr der des ersten Jahres, sind 20% der Liefermenge C2-Rüben.

Abbildung 59: Regelung des C-Rüben-Vortrags bei Pfeifer & Langen



Quelle: Eigene Darstellung

Während die Mindestpreise für A- und B-Rüben im Rahmen der ZMO festgeschrieben sind, werden die Preise für C-Rüben im Gebiet Nordrhein zwischen dem Rheinischen Rübenbauerverband und Pfeifer & Langen in einer ergänzenden Vereinbarung gesondert festgelegt (vgl. PFEIFER & LANGEN, 2000a). Übersicht 11 zeigt die festgelegten C-Rübenpreise seit dem Jahr 2001. Aufgrund weiterhin zu erwartender niedriger Weltmarktpreise für Zucker werden im Rahmen dieser Arbeit die niedrigen C-Rübenpreise des Jahres 2003 als relevante C-Rübenpreise angenommen.

Übersicht 11: Entwicklung der C-Rübenpreise im Rheinland seit 2001

Angaben in Euro/t	<u>2001</u>	<u>2002</u>	<u>2003</u>	<u>2004</u>	<u>Mittel</u>
C1-Rüben*	19,40	11,00	7,50	10,00	11,98
C2-Rüben	14,40	5,90	3,50	5,00	7,20

Quelle: LIZ, 2005c, verändert; * Hinweis: Ohne C-Rüben-Vortrag

Mit der Zahlung der vereinbarten A- bis C2-Rübenpreise ist nur der Zuckergehalt der Rüben abgegolten. Die anfallenden Nassschnitzel bleiben im Eigentum des Anbauers. Übernimmt Pfeifer & Langen die aus den Rübenlieferungen des Anbauers anfallenden Nassschnitzel, wird hierfür dem Anbauer eine Schnitzelvergütung gezahlt (vgl. PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 4). Diese wird nach Abschluss der Kampagne im Einvernehmen mit dem Rheinischen Rübenbauer-Verband festgelegt (Übersicht 12). Anders als bei den C-Rübenpreisen werden die Mittelwerte dieser Jahre für die Schnitzelvergütung angenommen.

Übersicht 12: Entwicklung der Schnitzelvergütung im Rheinland seit 2001

Angaben in Euro/t	<u>2001</u>	<u>2002</u>	<u>2003</u>	<u>2004</u>	<u>Mittel</u>
A-, B- und Vortragsrüben	3,50	3,42	3,44	3,45	3,45
C1-Rüben	2,19	2,14	2,15	2,16	2,16
C2-Rüben	0,88	0,86	0,86	0,86	0,87

Quelle: LIZ, 2005d, verändert

Pfeifer & Langen zahlt auf A-, B-, Vortrags- und C1-Rüben eine Qualitätsprämie. Als Bewertungsgröße wird der Fabrikdurchschnitt für den Ausbeuteverlust (AV) in jeder Kalenderwoche während der Kampagne zugrunde gelegt. Bei einem Wochen-Fabrikdurchschnitt über 2,45% AV wird individuell erst unterhalb 2,45% eine Qualitätsprämie nach der in Anhang 53 dargestellten Staffeln bezahlt (vgl. PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 2).

Für Rübenlieferungen im September bzw. ab Anfang Dezember zahlt Pfeifer & Langen in Abhängigkeit vom Datum der Annahme in der Fabrik auf A-, B-, Vortrags- und C1-Rüben eine Früh- bzw. Spätlieferprämie nach der in Anhang 54 dargestellten Staffeln. Während mit der Frühlieferprämie die infolge der Rübenernte vor der physiologischen Reife verbundenen indirekten Ertragsverluste (vgl. ZENS, 2002, S. 59ff.) kompensiert werden sollen, dient die Spätlieferprämie dem Ausgleich witterungsbedingter Ernteerschwernisse bei Spätroduktionen. Um die Lieferprämien korrekt berechnen zu können, müssen Annahmen über den zeitlichen Abstand zwischen Ernte und Abfuhr bzw. Anlieferung der Zuckerrüben getroffen werden. Nach SCHMITZ (2003, S. 31) ist die Lagerungsdauer der Zuckerrüben in Feldrandmieten abhängig vom Rodetermin und liegt in den Monaten September und Oktober zwischen 3 und 4 Tagen, im November zwischen 3 und 14 Tagen und im Dezember zwischen 10 und 30 Tagen. Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer einheitlichen Lagerungsdauer von 7 Tagen ausgegangen, d.h. für die Berechnung der Lieferprämie ist unter der Annahme, dass alle Zuckerrüben an einem Tag abgefahren werden, das Datum 7 Tage nach dem Rodetermin maßgeblich. Gemäß Anhang 54 gibt es für den Standarderntetermin, den 24.10., keine Lieferprämie. Die durch Lagerung der Zuckerrüben in Feldrandmieten entstehenden Veratmungsverluste (direkte Ertragsverluste, vgl. ZENS, 2002, S. 60) werden vernachlässigt.

Die bisher betrachteten Preise und Prämien sind Nettowerte. Der Umsatzsteuersatz beträgt für gemäß §24 Abs. 1-3 Umsatzsteuergesetz pauschalierende Landwirte 9% und für regelbesteuerte Landwirte 7%. Wird ein für die Umsatzsteuer pauschalierender Entscheidungsträger unterstellt, setzen sich die für die ökonomische Bewertung des Zuckerrübenanbaus maßgeblichen Auszahlungspreise wie in Übersicht 13 dargestellt zusammen.

Übersicht 13: Herleitung der Auszahlungspreise für Zuckerrüben

A-Rübenpreis	= (A-Rübengrundpreis · Zuckergehaltskorrektur + Schnitzelvergütung + Lieferprämie + Qualitätsprämie) · 1,09
B-Rübenpreis	= (B-Rübengrundpreis · Zuckergehaltskorrektur + Schnitzelvergütung + Lieferprämie + Qualitätsprämie) · 1,09
C1-Rübenpreis	= (C1-Rübengrundpreis · Zuckergehaltskorrektur + C1-Schnitzelvergütung + Lieferprämie + Qualitätsprämie) · 1,09
C2-Rübenpreis	= (C2-Rübengrundpreis · Zuckergehaltskorrektur + C2-Schnitzelvergütung) · 1,09
Vortragsrüben	= ((A-Rübengrundpreis – Lagerkostenbeitrag) · Zuckergehaltskorrektur + Schnitzelvergütung + Lieferprämie + Qualitätsprämie) · 1,09

Quelle: Eigene Darstellung

Die detaillierte Beschreibung dieser regionalen Ausgestaltung der Zuckermarktordnung ist nicht nur für die ökonomische Bewertung des Zuckerrübenanbaus von Bedeutung, sie ist auch eine entscheidungsrelevante Größe im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements: Zuckergehalt und Ausbeuteverluste sind erntezeitpunktabhängige Größen, und nematodenresistente Zuckerrübensorten weisen gegenüber Standardsorten c.p. geringere Zuckergehalte und höhere Ausbeuteverluste auf (siehe Kapitel 4.4.4).

Nicht betrachtet wird die so genannte Quotendeklassierung. Im Rahmen des GATT-Abkommens von 1995 verpflichtete sich die EU zur Begrenzung der zulässigen Exportmengen und -erstattungen. Um dem nachzukommen, können die betriebsindividuell verfügbaren Quotenmengen flexibel für jedes Zuckerwirtschaftsjahr angepasst, d.h. in aller Regel herabgesetzt, werden. Für diese temporäre Kürzung hat sich der Begriff „Deklassierung“ eingebürgert. Seit dem Erntejahr 2000 kam die Deklassierung regelmäßig zur Anwendung und die Quoten wurden entsprechend der Exportlimits um 0,94% - 7,1% reduziert (vgl. HAASE, 2003, S. 75). Eine Prognose möglicher Deklassierungen ist bereits für einen kurzfristigen Prognosehorizont und damit insbesondere für einen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements notwendigen mittel- bis langfristigen Betrachtungszeitraum nicht möglich.

Des gleichen gilt für Abfuhrarten und Anfuhrvergütungen (vgl. PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 3 sowie ZENS, 2002, S. 88) sowie für das Bonus-Malus-System auf der Basis der Gesamtabzüge (vgl. PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 2). Zwar kann Nematodenbefall zu erhöhten Gesamtabzügen führen (siehe Kapitel 2.3.1), Annahmen über die für die Berechnung des Bonus bzw. Malus notwendigen Tagesdurchschnittswerte der annehmenden Zuckerfabrik sind aber wenig sinnvoll.

4.5.2 Verwendetes Kostenrechnungsverfahren

Für die Transformation der physischen zu monetären Größen wird die Teilkostenrechnung in Form der Deckungsbeitragsrechnung angewendet. Der Deckungsbeitrag (DB) eines Produktionsverfahrens ist definiert als die Differenz zwischen Marktleistung und proportionalen Spezialkosten (Übersicht 14). Die Deckungsbeitragsrechnung als Grenzkostenrechnung ist bei vorgegebener und als Systemparameter, d.h. als unveränderlich, angesehener Faktorausstattung für die Planung absolut aussagekräftig, da in diesem Fall nur die relative Wettbewerbsfähigkeit der konkurrierenden Produktionsverfahren einen Einfluss auf die Entscheidung hat. Da sie keinen Einfluss auf die Optimalentscheidungen im Modell haben, werden Fixkosten nicht betrachtet.

Beim Vergleich der zu betrachtenden Produktionsverfahren muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Ansprüche an den Faktor Arbeit bestehen. Die Addition der Arbeitskosten, dem Produkt aus Arbeitszeitbedarf in Arbeitskraftstunden je Hektar (AKh/ha) und Entlohnung (Euro/AKh), sowie die Addition der Flächenprämien (siehe Kapitel 4.5.1.1) zum Deckungsbeitrag (DB I) führen zu einer als DB II bezeichneten Größe (Übersicht 14). Die Berücksichtigung der Arbeitskosten impliziert, dass eine alternative Verwendungsmöglichkeit für die betrieblich eingesetzten Arbeitsleistungen besteht. Zwischen familieneigenen und Fremdarbeitskräften (Lohnkosten bzw. Lohnkostenansatz) wird nicht unterschieden²⁰.

Übersicht 14: Verwendetes Verfahren der Deckungsbeitragsberechnung

<u>Operation</u>	<u>Größe</u>	<u>Einheit</u>	<u>Zuckerrüben</u>	<u>sonstige</u>
.	Ertrag Verkaufspreis	dt/ha Euro/dt	Errechnet Errechnet	
=	Marktleistung	Euro/ha	Errechnet	
+	proportionale Kosten ohne Saatgut	Euro/ha	Vorgabe	
+	Saatgutkosten	Euro/ha	Vorgabe	
+	sonstige proportionale Spezialkosten	Euro/ha	Vorgabe	
=	Summe proportionale Spezialkosten	Euro/ha	Errechnet	
	Marktleistung - prop. Spezialkosten	Euro/ha	Errechnet	
=	Deckungsbeitrag I	Euro/ha	Errechnet	Vorgabe
+	Flächenprämien	Euro/ha	Vorgabe	Vorgabe
-	Arbeitskosten	Euro/ha	Vorgabe	Vorgabe
=	Deckungsbeitrag II	Euro/ha	Errechnet	Errechnet

Quelle: Eigene Darstellung

²⁰ Die Arbeitskosten sind als Bestandteil des Fixkostenblocks anzusehen, wenn die Arbeit nicht durch Saisonarbeitskräfte erbracht wird.

Übersicht 14 zeigt ebenfalls die Differenzierung des Auflösungsgrades im Rahmen der Deckungsbeitragsrechnung. Die physischen Ergebnisgrößen des biologisch-technischen Modells zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe, die marktordnungsbedingte Abhängigkeit der Auszahlungspreise und der Höhe der betrieblichen Lieferrechte von diesen Größen sowie die monetär relevanten Differenzen zwischen anfälligen und resistenten Zuckerrübensorten bedingen einen strukturierten Ansatz zur Errechnung der ökonomischen Kenngrößen aus dem Anbau von Zuckerrüben. Die Deckungsbeitragsberechnung für das Produktionsverfahren Zuckerrübe, die im folgenden Kapitel dargestellt wird, enthält demnach insbesondere vom Modell errechnete und nur wenige exogene Kennzahlen (englisch: defaults). Für die anderen betrachteten Produktionsverfahren ist dieser Disaggregationsgrad nicht notwendig und ein Black-Box-Ansatz ausreichend. Als DB I der Produktionsalternativen werden defaults verwendet, die jederzeit vom Entscheidungsträger änderbar sind (siehe Kapitel 4.5.2.2).

Da als Verrechnungseinheit der einzelnen Produktionsverfahren im Modell der Anbauumfang von einem Hektar gewählt ist (siehe Übersicht 14), können die Verfahren zur gesamtbetrieblichen Erfolgskennzahl Gesamtdeckungsbeitrag (GDB) addiert werden. Wie Gleichung 48 zeigt, ergibt sich der GDB durch Summierung aller mit dem jeweiligen Anbauumfang x multiplizierten Deckungsbeiträge der n Produktionsverfahren.

$$GDB = \sum_{i=1}^n DB_i x_i \quad (48)$$

Der Gesamtdeckungsbeitrag ist eine einperiodische Größe. Wegen der notwendigen Mehrperiodizität der Betrachtung (Simulationsdauer m Jahre) müssen die Periodenerträge summiert und mit dem Zinssatz i diskontiert werden. Das Resultat ist die Erfolgskennzahl „kumulierter Gesamtdeckungsbeitrag“ (Gleichung 49). Mit diesem Barwert können die verschiedenen Auswirkungen der untersuchten Managementmaßnahmen im Betrachtungszeitraum verglichen und so relative Vorzughigkeiten einzelner Strategien herausgestellt werden. Die Diskontierung des ersten Simulationsjahres impliziert eine Betrachtung des gesamten Simulationszeitraums vom Beginn des ersten Simulationsjahres aus.

$$\text{kumulierter GDB} = \sum_{j=1}^m \frac{GDB_j}{(1+i)^j} \quad (49)$$

Die Höhe des Kalkulationszinssatzes i für die Diskontierung der Periodenerträge bringt vereinfacht die Zeitpräferenz des Entscheidungsträgers zum Ausdruck, die bei mehrperiodischen Betrachtungen eine wichtige Rolle spielt. Je höher der Zinssatz, desto ausgeprägter ist die Präferenz des Entscheidungsträgers für entscheidungsnah wirksame Managementmaßnahmen.

4.5.2.1 Deckungsbeitragsrechnung bei Zuckerrüben

Mit dem Modelloutput Rübenenertrag, Zuckergehalt und Ausbeuteverluste können die Auszahlungspreise gemäß Übersicht 13 und die Marktleistung des Zuckerrübenanbaus gemäß Übersicht 14 berechnet werden. Nebenleistungen des Zuckerrübenanbaus werden nicht betrachtet, da Schnitzelvergütung sowie Liefer- und Qualitätsprämien im Auszahlungspreis ent-

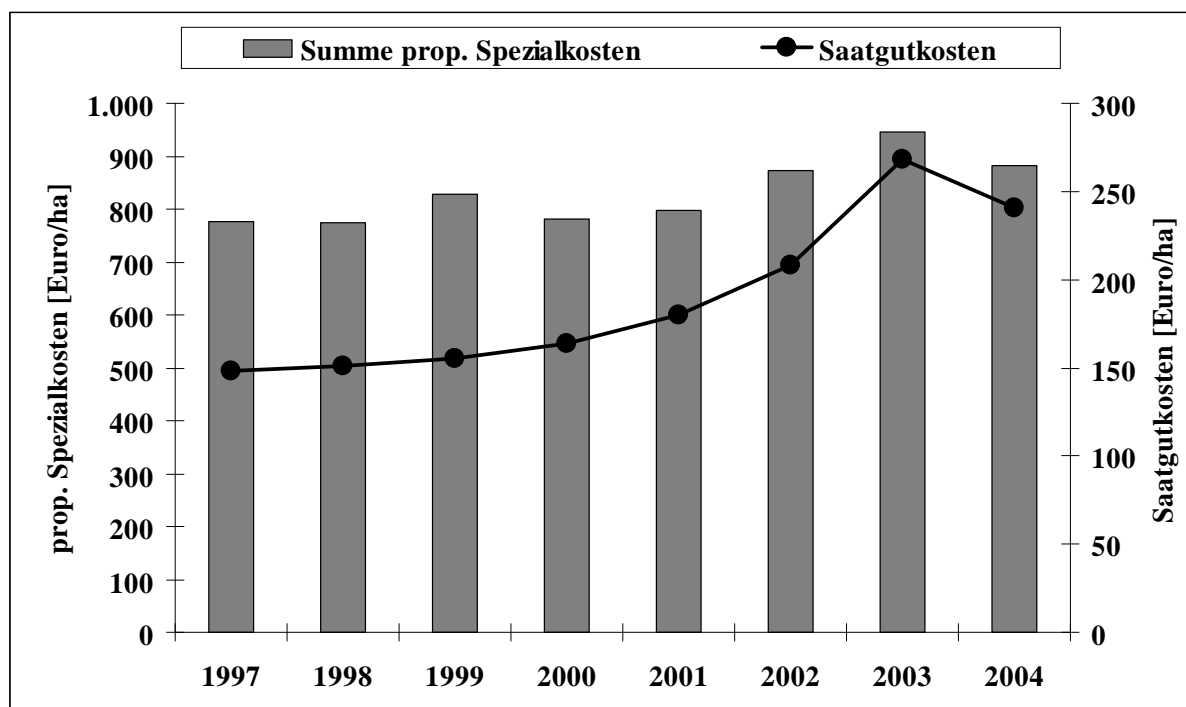
halten sind, Anfuhrvergütungen nicht berücksichtigt werden und der Futterwert des Rübenblatts²¹ im rheinischen Ackerbau eine vernachlässigbare Größe ist.

Die proportionalen Spezialkosten werden unterteilt in proportionale Spezialkosten ohne Saatgut und Saatgutkosten (siehe Übersicht 14). Während sich die proportionalen Spezialkosten nematodenresistenter Sorten im Rahmen dieser Arbeit nicht von denen der Standardsorten unterscheiden sollen²², sind die Saatgutkosten der nematodenresistenten Zuckerrübensorten höher anzusetzen als die der Standardsorten. Die Saatgutkosten der nicht-nematodenresistenten Rübensorten werden in Anlehnung an das Mittel der nach „LIZ-Sortinfo“ (LIZ, 2004e) zur Aussaat 2005 zur Verfügung stehenden Rübensorten auf 220 Euro/ha festgelegt. Dieser jederzeit vom Entscheidungsträger änderbare Vorgabewert beinhaltet die Saatgutbeizung mit Imprimo[®], die Umsatzsteuer und eine Aussaatstärke von 1,1 Einheiten/ha, aber keinen Frühbestellungsrabatt. Eine Differenzierung innerhalb des Sortenspektrums nach Standardsorten und gegen eine oder mehrere Krankheiten resistente Sorten wird nicht vorgenommen. Die Saatgutkosten nematodenresistenter Rübensorten werden zu 260 Euro/ha bestimmt. Mit diesen hohen Vorgabewerten werden die in den vergangenen Jahren zu beobachtenden Kostensteigerungen insbesondere durch neue mehrfachtolerante Rübensorten sowie neue Beizungen berücksichtigt (siehe Abbildung 60).

Die Summe der proportionalen Spezialkosten beträgt nach LIZ (2005b) 750-1.000 Euro/ha und bei den AK 1-Betrieben der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen im Mittel der Jahre 1997-2004 833 Euro/ha. Als Vorgabewert für die proportionalen Spezialkosten ohne Saatgut werden im Modell 700 Euro/ha festgelegt, so dass sich für Standardsorten eine Summe der proportionalen Spezialkosten in Höhe von 920 Euro/ha und für nematodenresistente Rübensorten 960 Euro/ha ergibt. Mit diesen hohen proportionalen Spezialkosten wird u.a. den in den letzten Jahren deutlich angestiegenen Kraftstoffpreisen Rechnung getragen. Auch Auswertungen der Zuckerrüenschlagkartei der AK 1-Betriebe ergeben zwar für die vergangenen 25 Jahre einen leichten Rückgang der proportionalen Spezialkosten, aber für die letzten zehn Jahre einen Anstieg von durchschnittlich 16 Euro/ha und Jahr (vgl. LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, 2004, S. 15).

²¹ VON KESSEL (1987, S. 17) bezifferte diesen auf ca. 194 Euro/ha.

²² Die Stickstoff- und Kalidüngung könnte dem geringeren Ertragsniveau resistenter Zuckerrübensorten angepasst werden, wodurch Düngungskosten und Ausbeuteverluste sinken würden.

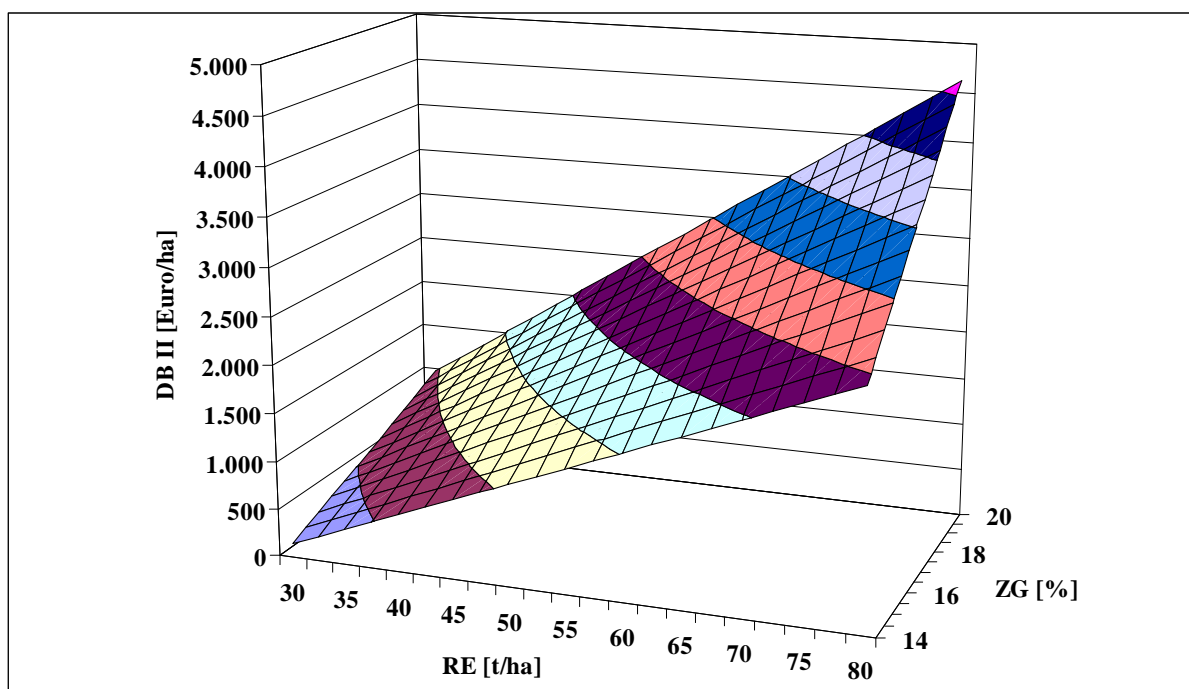
Abbildung 60: Entwicklung der proportionalen Spezialkosten im AK 1

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, 2005

Zusätzlich kann der Entscheidungsträger unter „sonstige proportionale Spezialkosten“ (siehe Übersicht 14) bisher nicht erfasste Kosten beziffern, die sich aus dem Anbau nematodenresistenter Zuckerrüben ergeben, z.B. höhere Rodekosten als Folge der Mehrköpfigkeit und Gallbildung (Rodeerschwernis, siehe Übersicht 3) oder ein geringerer Bonus bzw. ein Malus für höhere Gesamtabzüge. Mangels quantitativer Analysen in der Literatur werden 0 Euro/ha vorgegeben.

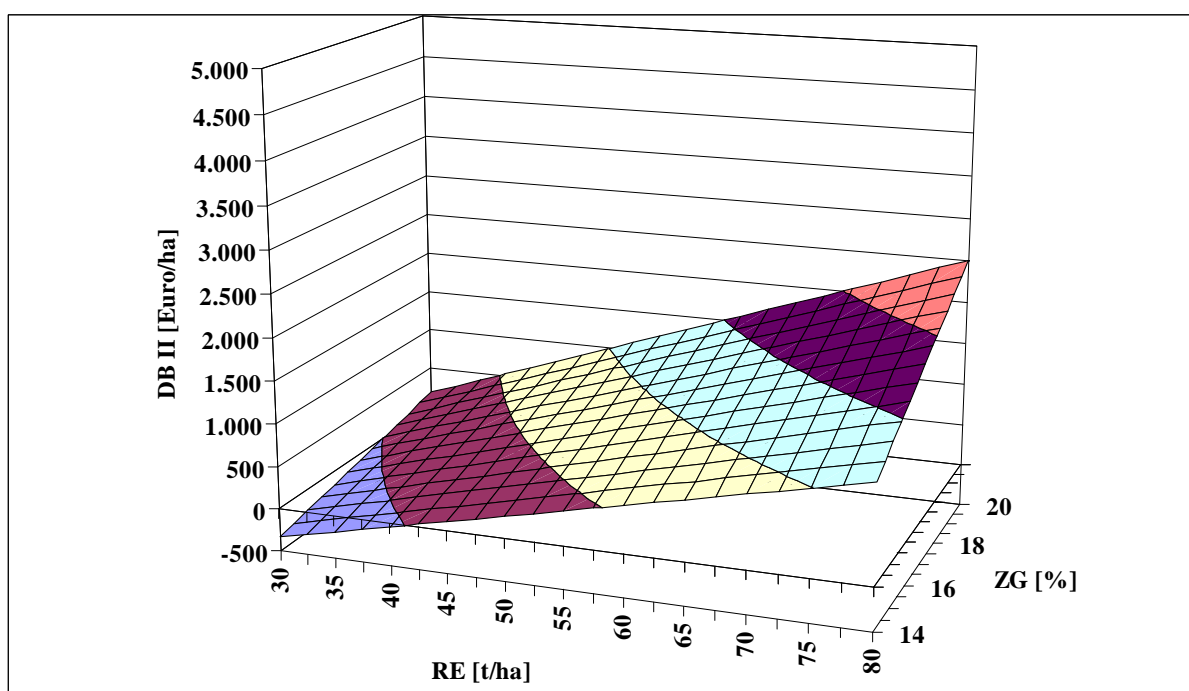
Um vom DB I den DB II der Zuckerrüben abzuleiten, müssen die Arbeitskosten des Zuckerrübenanbaus bestimmt werden. Auswertungen der Schlagkartei für Zuckerrüben der Betriebe des AK 1 ergeben kontinuierlich sinkende Arbeitskosten (Lohn und Lohnansatz) von 460 Euro/ha im Jahr 1996 auf 340 Euro/ha im Jahr 2004 (vgl. LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, verschiedene Jahrgänge). Daher wird im Modell in Anlehnung an KTBL (2002) ein Arbeitszeitbedarf in Höhe von 20 AKh/ha angesetzt und die Arbeitskraftstunde mit 15 Euro vergütet, so dass Arbeitskosten in Höhe von 300 Euro/ha entstehen. Die ab dem Jahr 2005 auch für Rübenflächen ausbezahlten Ackerprämien (siehe Übersicht 10) werden anschließend modellintern addiert.

Die folgende Abbildung 61 fasst die Abhängigkeit des Deckungsbeitrags der Zuckerrübe von Ertragsniveau und Zuckergehalt zusammen. Dargestellt ist der DB II von A-Rüben einer Standardsorte, incl. Schnitzelvergütung und Umsatzsteuer, aber excl. Liefer-, Qualitäts- und Ackerprämien. Der Anbau von A-Rüben weist demnach bereits bei relativ niedrigen Erträgen und geringen Zuckergehalten im Vergleich zu alternativen Ackerfrüchten sehr hohe Deckungsbeiträge auf, die ihre hohe relative Vorzüglichkeit gegenüber Anbaualternativen dokumentieren. Der Deckungsbeitrag vorgetragener C1-Rüben liegt abgesehen von der Lagerkostenbeteiligung auf vergleichbarem Niveau.

Abbildung 61: A-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt

Quelle: Eigene Darstellung

Der Mindestpreis der B-Rüben ist um 38% geringer als der der A-Rüben. Dementsprechend geringer fallen auch die Deckungsbeiträge der B-Rüben aus, die bei geringen Erträgen und Zuckergehalten bereits negativ werden können (Abbildung 62).

Abbildung 62: B-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt

Quelle: Eigene Darstellung

Die Deckungsbeiträge der C -Rüben sind in Anhang 55 und 56 dargestellt. Ohne Nutzung des C-Rübenvortrags weisen C1-Rüben selbst bei höchsten Erträgen und Zuckergehalten mit den gewählten Modellparametern einen negativen DB II auf. Ohne Berücksichtigung der Arbeitskosten erzielen C1-Rüben dagegen bei hohen Erträgen und Zuckergehalten noch einen - wenn auch geringen - positiven Deckungsbeitrag (DB I). Nicht vorgetragene C1-Rüben sind demnach den Anbaualternativen nicht nur wirtschaftlich unterlegen, sondern generell nicht anbauwürdig. Dies gilt in noch stärkerem Maße für C2-Rüben.

Je nach der Höhe des betrieblichen Lieferrechts, dem Anbauumfang und dem Ertragsniveau werden A-, B-, C1- und C2-Rüben produziert. Der Deckungsbeitrag des Zuckerrübenanbaus ergibt sich damit als Mischkalkulation aus den o.g. Berechnungen. Die AK 1-Betriebe erzielten im Mittel der Jahre 1990-2004 mit Zuckerrüben einen Deckungsbeitrag (DB I) in Höhe ca. 2.150 Euro/ha mit minimal 1.971 Euro/ha (2002) und maximal 2.364 Euro/ha im Jahr 2004 (vgl. LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, verschiedene Jahrgänge).

4.5.2.2 Deckungsbetragsrechnung bei den alternativen Produktionsverfahren

Aufgrund der außerordentlich großen Anzahl theoretisch möglicher alternativer Produktionsverfahren ist es ratsam, Art und Anzahl der neben Zuckerrüben zu berücksichtigenden Feldfrüchte vorzugeben. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die in Anhang 57 vorgestellten Produktionsverfahren betrachtet.

Wie bereits in Kapitel 4.5.2 beschrieben, werden die alternativen Produktionsverfahren mit einem Black-Box-Ansatz abgebildet. Naturale Größen werden nicht benötigt, das Modell greift entweder auf voreingetragene Werte für den DB I der alternativen Produktionsverfahren zurück oder verwendet vom Modellanwender eingegebene Kennzahlen. Als Defaultwerte für Weizen, Gerste, Raps, Kartoffeln sowie Flächenstilllegung ohne den Anbau nachwachsender Rohstoffe bzw. Nematodenbekämpfung dienen Werte des KTBL aus dem Beratungstool „LIZ-Anbauplanung“ (LIZ, 2005b) sowie Auswertungen verschiedener Jahrgänge der Schlagkartei für Getreide der Betriebe des AK 1. Wie bei den Zuckerrüben werden auch bei den anderen Hauptfrüchten die Produktionsorte gut, mittel und schlecht unterschieden. Die Differenzierung erfolgt durch eine 20%ige („mittel“) bzw. 40%ige („schlecht“) Verringerung des DB I des Produktionsortes „gut“ (siehe Anhang 57). Die für die Berechnung der Vergleichsgröße DB II nötigen Arbeitskosten der Produktionsverfahren ergeben sich aus Daten des KTBL (2002) zum Arbeitszeitbedarf je ha²³ bei einer Vergütung in Höhe von 15 Euro/AKh. Eine Anpassung der Arbeitintensität an die Güte des Produktionsorts erfolgt nicht.

Bei Winterweizen wird aufgrund der unterschiedlichen Ertragsfähigkeit und Pflegeintensität (vgl. WINNER, 1982, S. 79 und ZENS, 2002, S. 22f.) zwischen Winterweizen nach Blattfrucht (Zuckerrübe, Raps, Kartoffel) oder Stilllegung und Winterweizen nach Halmfrucht (Getreide) unterschieden. Weizen nach Blattfrucht („Rübenweizen“) weist einen um 50 Euro/ha höheren DB I gegenüber dem „Stoppelweizen“ auf (siehe Anhang 57). Wird das Stroh verkauft, ist der entsprechende DB I um den Wert dieser Nebenleistung zu erhöhen. Nicht unterschieden wird dagegen zwischen Brot- und Futtergetreide sowie Getreideanbau als Energiepflanzen auf Stilllegungsflächen. Erfolgt der Anbau von Energiepflanzen auf nicht stillgelegten Flächen, ist der Deckungsbeitrag um eine Beihilfe in Höhe von 45 Euro/ha zu erhöhen (vgl. BMVEL,

²³ Unterstellte Parzellengröße: 5 ha (vgl. KTBL, 2002, S. 7)

2005, S. 64). Dies gilt gleichermaßen für den Anbau von Raps. Die Ackerprämien werden anschließend modellintern addiert.

Bei den nematodenresistenten Kruziferen sind die Anfälligkeitsstufen zu unterscheiden, deren Saatgutkosten erheblich voneinander abweichen (siehe Übersicht 15). Zwischen Ölettich und Gelbsenf sowie zwischen verschiedenen Sorten innerhalb einer Anfälligkeitsstufe wird nicht differenziert. Die in Übersicht 15 unterstellte Saatmenge von 25 kg/ha unterdrückt die Retichbildung und sichert den Bekämpfungserfolg, da eine ausreichende Bodendurchwurzelung durch den etablierten Pflanzenbestand gewährleistet ist (vgl. HEINRICHS, 2002, S. 38). Die Saatgutpreise sind gemittelt aus einer Preisliste der Lagerhaus Barmke GmbH (Agravis Raiffeisen AG) für das Jahr 2004. Kruziferen der Anfälligkeitsstufe 3 werden aufgrund zu geringer Reduktionsleistungen (siehe Kapitel 4.3.5.3) nicht mehr berücksichtigt.

Übersicht 15: Herleitung der Saatkosten resistenter Kruziferen

<u>Anfälligkeitsstufe</u>	<u>Saatgutkosten (Euro/kg)</u>	<u>Saatstärke (kg/ha)</u>	<u>Saatkosten (Euro/ha)</u>
1	2,80	25	70
„1,5“	1,80	25	45
2	1,50	25	37,5

Quelle: Eigene Darstellung

Diese Saatkosten resistenter Kruziferen gelten sowohl für den Anbau als Zwischenfrucht als auch für den hauptfruchtmäßigen Anbau auf Stilllegungsflächen. Der Zwischenfruchtanbau führt zu proportionalen Spezialkosten ohne Saatgut in Höhe von 100 Euro/ha. Dieser Betrag umfasst Stoppelumbruch, Pflugfurche, Aussaat, Stickstoffdüngung und Mulchen. Eine (Markt-)Leistung weist der Zwischenfruchtanbau nicht auf, da der Erfolg der Populationsreduktion beim Schaderreger in Form gesteigerter Zuckererträge bei den nachfolgenden Zuckerrüben entsteht. Eine monetäre Bewertung des gesamten nichtnematologischen Wirkungskomplexes des Zwischenfruchtanbaus (siehe Anhang 5) erfolgt nicht. Der DB I der Zwischenfrüchte beträgt somit je nach Anfälligkeitsstufe zwischen -137,5 Euro/ha und -170 Euro/ha. Auch nach KESSEL UND KYNAST (2003, S. 185) belaufen sich die Kosten für den Zwischenfruchtanbau je nach Saatgutkosten und Aufwand für die Bodenbearbeitung auf 80-150 Euro/ha. Der mit dem Zwischenfruchtanbau verbundene Arbeitszeitbedarf wird gemäß Kapitel 3.2.3.1 auf 3,0 AKh/ha festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Zwischenfruchtanbau gekoppelt an die vorangegangene Hauptfrucht im gleichen Anbaujahr. Die Kosten der Zwischenfrüchte werden damit in dem Jahr geltend gemacht, in dem sie entstehen, indem der Deckungsbeitrag der Zwischenfrüchte mit dem des vorangehenden Winterweizens oder der Wintergerste verrechnet wird, auch wenn der Anbau der Zwischenfrüchte ausschließlich zum Zwecke der aktiven Nematodenbekämpfung erfolgte. Verursachungsgerecht wäre ein Anlassen der Kosten bei den nachfolgenden Zuckerrüben. Sollte der betrachtete Produktionsort innerhalb der Gebietskulisse des Erosionsschutzprogramms (Kapitel 3.2.3.1) liegen, sind die Deckungsbeiträge des Zwischenfruchtanbaus um die Prämie zu erhöhen. In diesem Fall sind allerdings auch eventuell variierende Erträge der im Mulch- oder Direktsaatverfahren gesäten nachfolgenden Zuckerrüben zu berücksichtigen.

Bei der Flächenstilllegung wird lediglich zwischen aktiver Begrünung ohne und mit Nematodenbekämpfung unterschieden. Selbstbegrünung wird wegen der Gefahr unkontrollierter Unkrautvermehrung nicht betrachtet. Bei Flächenstilllegung ohne Nematodenbekämpfung und ohne den Anbau nachwachsender Rohstoffe erfolgt die Aussaat eines Klee-Gras-Gemisches als einjährige Rotationsbrache, die mit Saatgutkosten und sonstigen proportionalen Spezialkosten in Höhe von jeweils 50 Euro/ha verbunden ist und deren DB I daher -100 Euro/ha beträgt. Bei 3,0 AKh/ha beträgt der DB II -145 Euro/ha (siehe Anhang 57). Flächenstilllegung zur Nematodenbekämpfung weist aufgrund der in Übersicht 15 dargestellten höheren Saatkosten geringere Deckungsbeiträge auf. Die Berücksichtigung der nematologischen und sonstigen Leistungen der Flächenstilllegung erfolgt analog zum Zwischenfruchtanbau.

4.5.3 Sozio-technisches System

Entsprechend den biologisch-technischen Systemen müssen auch der Entscheidungsträger und seine Beziehung zum landwirtschaftlichen Unternehmen bzw. der Anlass für betriebliches Handeln im Modell berücksichtigt werden. Daher werden im Folgenden das Zielsystem und die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers stark vereinfachend als Black-Box-Ansätze und die sich daraus ergebenden Konsequenzen dargestellt.

4.5.3.1 Zielsystem des Entscheidungsträgers

Rationale Entscheidungen setzen das Vorhandensein von Zielvorstellungen beim Entscheidungsträger voraus, auf deren Grundlage dieser die Konsequenzen verschiedener Handlungsalternativen beurteilen kann (vgl. BLÖNNIGEN, 1986, S. 68). Die Zielvorstellungen werden in Form einer Zielfunktion beschrieben, in der die Menge der verfolgten Zielgrößen sowie die Präferenzrelationen des Entscheidungsträgers bezüglich der Merkmalsausprägungen der Simulationsresultate zusammengefasst werden. Die Wahl der dem Entscheidungsträger unterstellten Zielfunktion bestimmt wesentlich den Realitätsgehalt der aus dem Entscheidungsunterstützungsmodell abzuleitenden Aussagen. Diese haben nur dann eine praktische Relevanz, wenn die Zielfunktion als hinreichend repräsentativ für die konkreten Handlungsmotive der realen Akteure angesehen werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine monovariablen Zielfunktion unterstellt. Alleiniges Ziel des Entscheidungsträgers ist Gewinnmaximierung. Daher werden die betrachteten Managementmaßnahmen anhand ihres Beitrags zum Gesamtbetriebserfolg bewertet und diejenige Strategie vom Entscheidungsträger als relativ vorzüglicher definiert, die einen höheren Erfolgsbeitrag als die Alternative(n) leistet. Dieses Menschenbild mit der Gewinnmaximierung als einzigem Handlungsziel ist zwar eine sehr starke Vereinfachung der Realität. Gemäß der Definition des Integrierten Nematodenmanagements kann aber die *nachhaltige* Gewinnmaximierung, d.h. die Maximierung einer kumulierten und diskontierten mehrperiodischen Erfolgskennzahl, als geeignete Arbeitshypothese angesehen werden. Auch nach HENRICHSMEYER UND WITZKE (1991, S. 221) ist bei laufenden betrieblichen Entscheidungen ein einkommensorientiertes Verhalten sehr wahrscheinlich und nur bei „grundlegenden“ Entscheidungen wie Berufswahl oder Weiterführung des Betriebs von komplexeren mehrfaktoriellen Zielfunktionen auszugehen, die die Definition von Zielpräferenzrelationen notwendig machten (vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 227).

Als denkbares alternatives Zielsystem kann die Minimierung des vorhandenen Nematodenbefalls angesehen werden. Zwar ist die Ausrottung des etablierten Schaderregers Nematode nicht möglich (siehe Kapitel 2.2.3) und auch nicht Ziel des Integrierten Nematodenmanagements, aber eine erhebliche Senkung der Befallsdichten weit unterhalb der Bekämpfungsschwellen ist mit geeigneten Maßnahmen möglich. Das Ziel „Verhinderung des Befalls mit *H.schachtii*“, ausgehend von einem befallsfreien Betrieb, wird nicht betrachtet.

4.5.3.2 Risikopräferenz des Entscheidungsträgers

Die Risikopräferenz bringt die Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers zum Ausdruck. Sie wird immer dann benötigt, wenn unvollkommene Informationen über die tatsächlichen Outputvariablen vorliegen (vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 227). Im Rahmen dieser Arbeit ist dies aufgrund der stochastischen Modellansätze zur Simulation der Abundanz des Schaderregers und der Ertragsdynamik der Zuckerrübe der Fall. Es wird von einem risikoneutralen Entscheidungsträger ausgegangen. Konsequenz der unterstellten Risikopräferenz ist, dass für den Entscheidungsträger bei der Beurteilung von Handlungsalternativen lediglich Erwartungswerte, nicht aber die in Abhängigkeit von den Managementmaßnahmen eintretenden Varianzen im Systemverhalten relevant sind. Unter Berücksichtigung des zuvor definierten Zielsystems bevorzugt der Entscheidungsträger demnach die Alternative mit dem höheren Erwartungswert des diskontierten kumulierten Gesamtdeckungsbeitrags.

BLÖNNIGEN (1986, S. 87) lehnt die strenge Beschränkung auf risikoneutrale Entscheidungsträger und den Erwartungswert als alleiniges Entscheidungskriterium bei unsicheren Systemzuständen ab. Im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements ist Risikoneutralität dagegen sachgerecht, da die Anwendung des Bekämpfungsschwellenprinzips im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements (siehe Kapitel 3.1.1) diese Risikopräferenz impliziert. Die Anwendung des Bekämpfungsschwellenkonzepts führt zu größeren Varianzen bei den Zielkomponenten, während die prophylaktische Bekämpfung bessere Wachstumsverhältnisse für die Kulturpflanze mit gleichzeitiger Begrenzung der Schaderregervarianz schafft (DROSERT-STELTGES UND STEFFEN, 1994, S. 230). Ein risikoaverser Entscheidungsträger wird daher aus Vorsorgegründen bereits bei einem niedrigeren Schwellenwert zu einer Bekämpfungsmaßnahme greifen als bei einem Schwellenwert, der zur Maximierung der Gewinnerwartung führt. Nach STEFFEN UND BERG (1985, S. 93) scheidet das Schadschwellenkonzept mit festen Bekämpfungsschwellen im Prinzip für alle diejenigen Entscheidungsträger aus, denen das ökonomische Risiko einer Fehlentscheidung zu hoch ist.

Um zum einen Auswirkungen unterschiedlicher Managementmaßnahmen auf die Variabilität verschiedener Outputgrößen darstellen zu können und damit BLÖNNIGEN (1986) entgegenzukommen und um zum anderen den Eindruck einer Scheingenauigkeit des Modelloutputs zu verhindern, werden im Rahmen dieser Arbeit neben dem Mittelwert stets weitere Verteilungsmomente des stochastischen Modelloutputs ausgewiesen. Kann die Symmetrie der Verteilung des Modelloutputs nicht gewährleistet werden, ist die Angabe des Mittelwerts und der Standardabweichung nicht ausreichend für die Beschreibung der Verteilung. Dies gelingt erst mit der Angabe weiterer Momente der Verteilung wie z.B. des 90%-Intervalls (siehe Abbildung 34). Erst mit dem Entscheidungsprinzip der stochastischen Dominanz (vgl. BRANDES UND ODENING, 1992, S. 205ff.) können effiziente Alternativen von ineffizienten unabhängig von Symmetrie oder Asymmetrie der Verteilung der Outputgrößen getrennt werden. Daher werden an geeigneter Stelle die Verteilungsfunktionen des Modelloutputs betrachtet.

4.6 Implementierung des Modells

Für die Umsetzung des vorliegenden Modellkonzepts in ein Computerprogramm gibt es eine Vielzahl gestalterischer und programmtechnischer Möglichkeiten. Diese reichen von der Umsetzung als Arbeitsblätter in einem Tabellenkalkulationsprogramm über eine Datenbankanwendung bis zur Erstellung eines eigenständig lauffähigen Programms (stand-alone-Lösung). Intention der vorliegenden Arbeit ist nicht, ein in technischer Hinsicht perfektes Programm mit dem „look and feel“ professioneller Standardsoftware zu entwickeln. Das entwickelte Programm trägt den Namen *INM-Consult*.

4.6.1 Wahl der Programmiersprache

Das Computermodell entsteht durch die Übersetzung der Modellalgorithmen in eine Computersprache. Die Zielsetzung, ein Entscheidungsunterstützungssystem als eigenständig lauffähiges Programm zu entwickeln (siehe Kapitel 4.2.3), das keine Voraussetzungen an beim Anwender verfügbare Standardsoftware stellt, schränkt die Auswahl verfügbarer Programmierwerkzeuge ein. Tabellenkalkulations- und Datenbankprogramme mit eigener Makrosprache sind zwar grundsätzlich geeignet für die Implementierung des Entscheidungsunterstützungssystems, können aber die Forderung nach einer stand-alone-Lösung nicht erfüllen. Zudem müssten bei bestimmten Programmteilen bzw. Berechnungen niedrige Programmablaufgeschwindigkeiten in Kauf genommen werden, die aus ergonomischen Gründen abzulehnen sind. Somit kamen lediglich höhere Programmiersprachen als Entwicklungswerkzeug für das zu entwickelnde Programm in Frage (vgl. DOLESCHEL, 1993, S. 98).

Die Wahl einer Programmiersprache ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wobei neben persönlichen Präferenzen, bestehenden Erfahrungen und der Eignung für die Problemstellung auch die Weiterverwendung des erzeugten Programmcodes (Quellcode) entscheidend ist. Als Programmiersprache wurde Object Pascal gewählt. Object Pascal ist eine höhere Compilersprache mit strenger Typisierung, die mehrere objektorientierte Erweiterungen zum Standard-Pascal beinhaltet und damit eine strukturierte und objektorientierte Programmierung ermöglicht. Zu ihren Vorzügen gehören einfache Lesbarkeit, schnelle Kompilierung und modulare Programmierung durch Verteilen des Quelltextes auf mehrere „Unit“-Dateien. Object Pascal verfügt über spezielle Leistungsmerkmale, die das Komponentenmodell und die visuelle Entwicklungsumgebung der Programmierungssoftware Borland Delphi[®], in der Object Pascal implementiert ist, unterstützen (vgl. INPRISE, 1998, S. 2-1). Delphi[®], das im Rahmen dieser Arbeit in der Version 6 zur Verfügung stand, ist eine objektorientierte visuelle RAD-Programmierungsumgebung (RAD = rapid application development). Als Vorteile der Verwendung von Borland Delphi[®] können genannt werden:

1. Performancevorteile der kompilierten Anwendung bei mehrperiodischen Simulationen,
2. Entwicklung von stand-alone-Anwendungen mit eigener Benutzeroberfläche (englisch: graphical user interface, GUI),
3. komfortable Entwicklungsumgebung,
4. verständlicher Syntax sowie
5. Vorliegen umfangreicher Erfahrungen mit diesem Tool an der Professur für Umwelt- und Produktionsökonomik des Instituts für landwirtschaftliche Betriebslehre.

4.6.2 Zentrale Funktionen, Prozeduren und Algorithmen

Sowohl die Simulation der Abundanzdynamik des Nematoden als auch der Ertragsdynamik der Zuckerrübe erfolgt mit kontinuierlichen Differentialgleichungen (siehe Gleichungen 15, 27 und 28). Diese werden numerisch mit Hilfe der Euler-Integration (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 161ff.) gelöst, die einfach zu implementieren und bei vergleichsweise geringen Genauigkeitsanforderungen mit einem Rechenaufwand in vertretbaren Grenzen verbunden ist. Berücksichtigt man die natürliche Variabilität der biologisch-technischen Systeme, resultiert daraus eine Unsicherheit der Modellparameter, die die Euler-Integration wegen ihrer Einfachheit in vielen Fällen zum zweckmäßigsten Verfahren macht. Dies gilt vor allem dann, wenn der Zeitschritt für die Integration ohnehin relativ klein gewählt werden muss (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 177). Zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Euler-Integration dient das folgende Beispiel: Aus der Differentialgleichung 15, die die Abundanzdynamik des Nematoden beschreibt, wird durch Euler-Integration die Differenzengleichung 50.

$$N(t + dt) = N(t) + dt[aN(t)^{1-b} - N(t)] \quad (50)$$

Mit dieser Gleichung lassen sich die Werte der endogenen Variablen, der Nematodenpopulation N , nur für diskrete Zeitpunkte, die um das Zeitinkrement dt voneinander entfernt liegen, auf rekursivem Wege bestimmen (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 138). Als Schrittweite wird ein Tag ($dt = 1$) gewählt, so dass die Abundanzdynamik des Nematoden sowie die Ertragsdynamik der Zuckerrübe taggenau simuliert werden. Diese Schrittweite ist beim gewählten Aggregationsgrad der biologisch-technischen Systeme Nematode und Zuckerrübe sowie vor dem Hintergrund des Modellzwecks vollkommen ausreichend und in Hinblick auf das gewählte Integrationsverfahren hinreichend exakt. Alle die Nematodenpopulation N beschreibenden Ergebnisgrößen werden modellintern zu ganzen Zahlen trunziert.

Für die Saisonfigur liegt ein geschlossener Formelausdruck vor (siehe Kapitel 4.4.5.1). Die Implementierung der Saisonfunktion im Modell kommt daher ohne Interpolationsverfahren zur Abbildung implizierter Funktionen (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 148ff.) aus. Im Gegensatz dazu müssen die Höhe des verfügbaren Zuckerrübenlieferpreises sowie des Rübenpreises mit Hilfe der Linearinterpolation (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 151f.) taggenau aus den Grundwerten abgeleitet werden. Hintergrund ist deren Abhängigkeit vom Zuckergehalt, der wiederum von der Rübensorte (Standard- oder nematodenresistente Sorte) und vom Erntetermin abhängig ist. Anhang 51 und 52 listen die Stützstellen (Zuckergehalte) und die Stützwerte (Korrekturfaktoren) für die Linearinterpolation auf. Je nach erzieltm Zuckergehalt, der in aller Regel zwischen zwei Stützstellen liegt, wird mittels einer Tabellenfunktion ein Schätzwert für den exakten Korrekturfaktor linear abgeleitet. Die verwendete Funktion *TabelleExE* zieht dafür nur jeweils die beiden Stützstellen heran, die die Interpolationsstelle umschließen, und erlaubt Extrapolationen über den vorgegebenen Stützbereich hinaus (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 151). Da die Stützstellen äquidistant sind, müssen der Tabellenfunktion lediglich der niedrigste und der höchste Wert des Stützbereichs sowie die Anzahl der Stützwerte vorgegeben werden. Die Eingabe aller 51 Wertepaare ist nicht notwendig. Zur Berechnung der realisierten Qualitätsprämie wird analog verfahren. Eine Extrapolation über den mit Anhang 53 vorgegebenen Stützbereich hinaus ist hier jedoch nicht zulässig (siehe Kapitel 4.5.1.3). Dies gewährleistet die Verwendung der Funktion *TabelleBgE*.

Die sich aus Ertrag und Anbaufläche der Zuckerrübe ergebende Erntemenge der Zuckerrüben muss zur ökonomischen Transformation in A-, B-, C1 und C2-Rüben eingeteilt werden. Dafür wird die Funktion *Min* verwendet, die den kleineren von zwei numerischen Werten zurückgibt (vgl. INPRISE, 1998, S. 5-12). Dies verdeutlicht der folgende Pseudocode:

A-Rüben = *Min*(*Erntemenge*, *A-Quote*);

B-Rüben = *Min*(*Erntemenge* – *A-Rüben*, *B-Quote*);

C1-Rüben = *Min*(*Erntemenge* – *A-Rüben* – *B-Rüben*, *C1-„Quote“*);

C2-Rüben = *Erntemenge* – *A-Rüben* – *B-Rüben* – *C1-Rüben*.

Im Populationsmodell des Nematoden (siehe Kapitel 4.3.6.2), im Ertragsdynamikmodell der Zuckerrübe (siehe Kapitel 4.4.9.2) sowie bei der Befall-Schadens-Relation (siehe Kapitel 4.4.9.3) müssen zur Implementierung der Stochastik Verteilungen generiert werden. Normalverteilte Ziehungen werden mit der von Delphi[®] bereitgestellten Funktion *RandG* ausgeführt. *RandG* generiert gauß-normalverteilte Zufallszahlen anhand des Marsaglia-Bray-Algorithmus und benötigt als Eingangsvariablen Mittelwert und Standardabweichung der zugrunde liegenden Normalverteilung (vgl. INPRISE, 1998, S. 5-27). Für die Ziehung der dreiecksverteilt relativen Ertragsdepressionen je 1.000 Eier und Larven steht die in BERG UND KUHLMANN (1993, S. 147) beschriebene Funktion *R_Dreieck* zur Verfügung, der die Momente Minimum, Maximum und Modus der Dreiecksverteilung vorgegeben werden müssen. Durch die Zuweisung eines bestimmten Wertes an die Variable *RandSeed* kann der integrierte Zufallszahlengenerator mehrmals eine bestimmte Folge von Zufallszahlen generieren (INPRISE, 1998, S. 4-9). Erst diese zumindest bei gleicher Compiler-Version identischen Reihen von Zufallszahlen ermöglichen Szenarienrechnungen.

Für die wiederholte Ausführung einer Anweisungsfolge werden in den Modellen *for*-Schleifen implementiert. Es sind drei hierarchische Schleifenebenen zu unterscheiden. Auf der untersten Ebene werden im Nematodenmodell die Nematodenpopulation und im Modell zur Simulation der Ertragsdynamik die Ertragsparameter taggenau berechnet bzw. fortgeführt. Auf der nächsthöheren Ebene werden Modellvariablen von einem Simulationsjahr auf das nächste übertragen. So ist z.B. sichergestellt, dass sich die Nematodenpopulation zu Beginn eines Jahres aus der am Ende des Vorjahres gemäß Gleichung 50 ableitet und vorgetragene C1-Rüben des vergangenen Jahres das verfügbare Lieferrecht dieses Jahres reduzieren. Über der Tages- und Jahresschleife steht die Schleife der Simulationsläufe. Ein Simulationslauf bezeichnet die Modellkalkulationen für eine einzelne durch eine Ziehung generierte Ausprägung der stochastischen Größen. Erst die Zusammenfassung einer größeren Anzahl von Simulationsläufen beschreibt dann die Simulation im eigentlichen Sinn, wenngleich jeder einzelne Simulationslauf die formalen Kriterien einer Simulation erfüllt. Die Simulationsläufe einer Simulation sind durch gleiche Parameterbestimmung gekennzeichnet und unterscheiden sich in den Ergebnissen nur aufgrund der stochastischen Einflüsse. Simulationen unterscheiden sich dagegen durch unterschiedliche Parameter infolge anderer Szenarien (vgl. SPIELHOFF, 2001, S. 154). Voruntersuchungen ergaben, dass 1.000 Simulationsläufe ein guter Kompromiss zwischen geringem Ziehungsfehler bei der Generierung stochastischen Modelloutputs und überschaubaren Rechenzeiten für eine Simulation sind. Zur Verdeutlichung der Hierarchie der Schleifen dient folgender Pseudocode:


```
for Simulationslauf = 1 to Simulationslauf = 1.000 do  
    for Jahr = 1 to Jahr = Simulationsdauer do  
        for Tag = 1 to Tag = 365 do
```

Die statistische Auswertung des Outputs der Modelle erfolgt mit der Prozedur *MomentSkew-Kurtosis*, die die ersten vier Momente einer Verteilung (Mittelwert, Varianz, Schiefe und Kurtosis) berechnet (INPRISE, 1998, S. 18-7), sowie mit der Funktion *Percentil* zur Berechnung des 5%- und des 95%-Percentils. Die Verwendung von *Percentil* erfordert die Sortierung der zu analysierenden Daten, so dass der Modelloutput mit der auf dem Sortieralgorithmus *QuickSort* beruhenden Funktion *QSort* (vgl. INPRISE, 1998, S. 20-11) vorsortiert werden muss.

4.6.3 Programmbeschreibung

4.6.3.1 Programmstruktur

Während bei der herkömmlichen Pascal-Programmierung der gesamte Quelltext einschließlich des Hauptprogramms in einem einheitlichen Dateityp gespeichert wird, besteht bei Borland Delphi[®] ein Programm aus einzelnen Quelltextmodulen, den so genannten Units. Jede Unit wird in einer eigenen Datei gespeichert und separat kompiliert. Die kompilierten Units werden dann zu einer Anwendung gelinkt. Das übergeordnete Hauptprogramm befindet sich in einer separaten Projektdatei. Jede Anwendung bzw. jedes Projekt besteht daher aus einer Projektdatei und einer oder mehreren Unit-Dateien (vgl. INPRISE, 1998, S. 2-5).

Units bieten die Möglichkeit der Aufteilung großer Programme in Module, die separat bearbeitet werden können. Dies ist ein entscheidender Vorteil bei der Umsetzung der modularen Modellstruktur in das lauffähige Programm. So sind die Quelltexte der biologisch-technischen Modelle und des ökonomischen Moduls jeweils in einer eigenen Unit untergebracht. Weitere Units bedienen die Startoberfläche sowie die Oberflächen für die Dateneingabe, Ergebnisdarstellung und die Ergebnisgrafiken. Zwischen den Units können Daten ungehindert ausgetauscht werden.

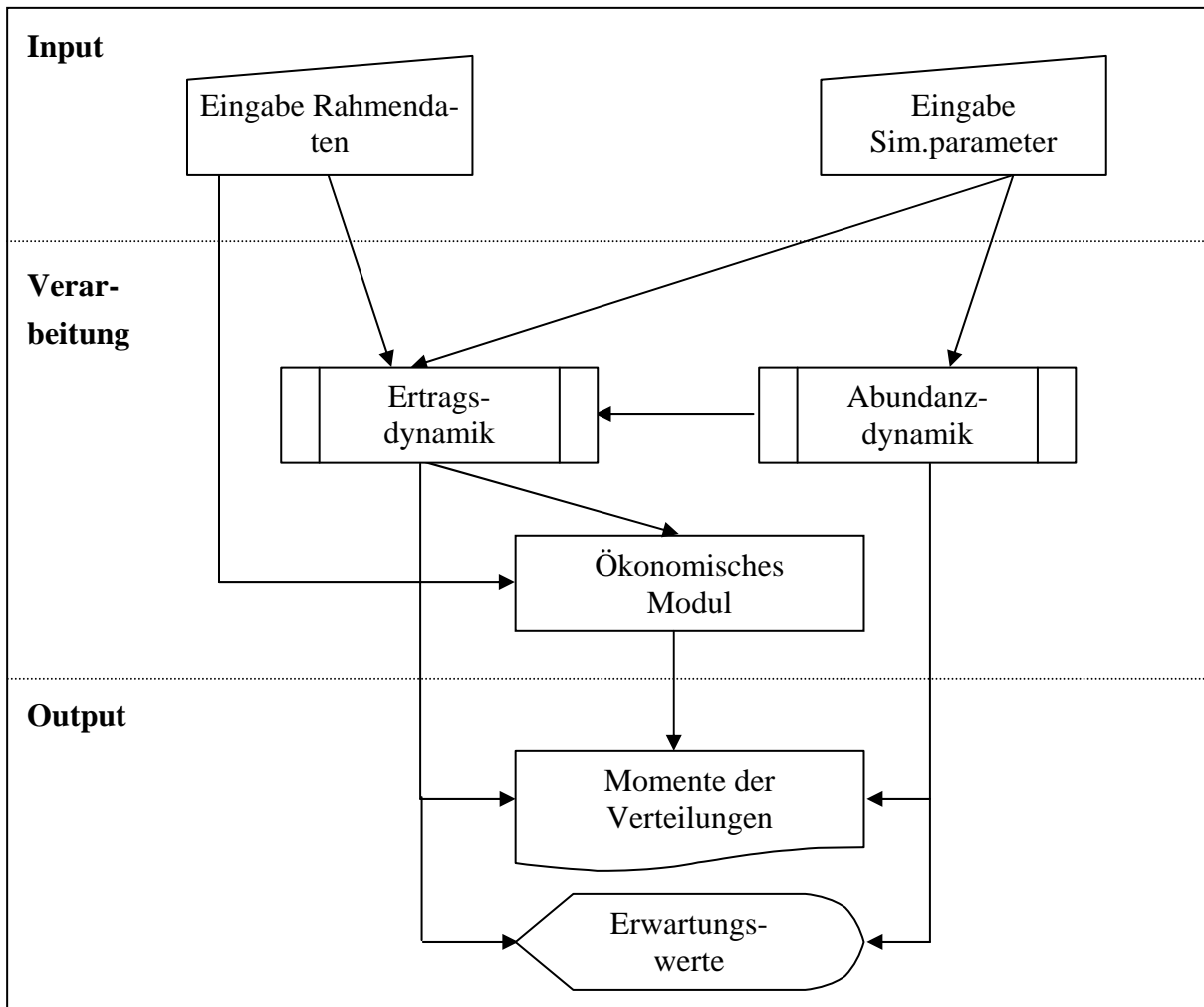
4.6.3.2 Datenfluss

Zur Veranschaulichung des Datenflusses in der Anwendung dient die folgende Abbildung 63. In ihr spiegelt sich die zuvor beschriebene modulare Programmstruktur wider. Nach dem Aufruf des Programms erfolgt zunächst die Dateneingabe. Diese umfasst zunächst die Eingabe neuer oder die Übernahme voreingetragener Rahmendaten, die i.d.R. zur Laufzeit des Programms während der Simulationsexperimente nicht verändert werden. Die Verwendung von default-Werten verkürzt die Dateneingabe und steigert so die Anwenderfreundlichkeit des Programms. Die wichtigsten Rahmendaten sind:

1. Allgemeine Daten (Definition des Produktionsorts, Länge des Simulationszeitraums, Umsatzsteuersatz und Zinssatz für die Diskontierung);
2. Kennzahlen des Zuckerrübenanbaus (A- und B-Rübenlieferrecht, Grund- und Schnitzelpreise für A- bis C2-Rüben, Saatgut- und sonstige variable Kosten sowie die Arbeitskosten der Zuckerrüben);

3. Kennzahlen für den Anbau resistenter Kruziferen (Mindestflächenstilllegungssatz, Saatgut- und Bestellungskosten je nach Anfälligkeitsstufe) und
4. Ökonomische Kennzahlen (DB I und DB II, ohne Flächenprämie) der alternativen Produktionsverfahren für die drei definierten Produktionsorte.

Abbildung 63: Datenflussplan im Entscheidungsunterstützungssystem INM-Consult



Quelle: Eigene Darstellung; Sinnbilder in Anlehnung an DIN 66001

Anschließend sind die Simulationsparameter einzugeben oder wiederum defaults zu übernehmen. Anhand dieser Simulationsparameter sind die Szenarien der Simulationsexperimente zu unterscheiden. Zu den Simulationsparametern gehören:

1. Wahl der jährlichen Abbaurrate der Nematodenpopulation unter Nichtwirtspflanzen,
2. Auswahl und Abfolge der zu betrachtenden Feldfrüchte,
3. Höhe des Ausgangsbefalls (P_i -Startwert) und Datum der Probenahme,
4. Saat-, Ernte- und Lieferzeitpunkt für die Zuckerrüben sowie
5. Anfälligkeitsstufe der nematodenresistenten Kruziferen (wenn ausgewählt) und Auflaufdekade (wenn Anbau als Zwischenfrucht ausgewählt).

Zu Beginn der Simulationsrechnungen werden die Rahmendaten und die Simulationsparameter von den biologisch-technischen Modellen sowie dem ökonomischen Modul eingelesen. Die Verarbeitung der eingegebenen Daten wird im Folgenden getrennt betrachtet.

Das Simulationsmodell zur Nachbildung der Abundanzdynamik liest zunächst den P_i -Startwert, das Datum der Bestimmung der Ausgangsbefallsdichte sowie die im betrachteten Simulationsjahr aufstehende Fruchtart ein. Beginnt das Simulationsexperiment mit dem Anbau von Zuckerrüben, kann das Datum der Probenahme zur Erhebung des P_i -Startwertes frei gewählt werden im Zeitraum Jahresanfang (1.1.) bis zum Tag der Saat der Zuckerrüben. Damit wird der landwirtschaftlichen Praxis entsprochen, in der der P_i -Wert zu Rüben bei Bodenbeprobung i.d.R. im Frühjahr bei Begehrbarkeit des Schlages bis unmittelbar vor der Saat der Zuckerrüben entnommen wird. Die Ergebnisse aus früheren Schwadbeprobungen können als Ausgangsbefall auf den 1. Januar gesetzt werden. Dieses Datum ist auch maßgeblich für den Fall, dass die Simulation mit einem Nichtwirt beginnt.

Die Nematodenpopulation N wird beginnend mit dem 1.1. oder dem Tag der Probenahme gemäß Gleichung 50 fortgeführt bis zum 31.12., dem 365. Tag des Jahres. In einem Jahr mit Nichtwirtpflanzen werden dafür während der 365 Tage die in Anhang 20 gelisteten Modellparameter für Nichtwirtpflanzen je nach vorgegebener jährlicher Abbaurate verwendet. Werden Zuckerrüben angebaut, finden zwischen Saat- und Erntetag die ebenfalls in Anhang 20 aufgeführten Modellparameter für anfällige oder resistente Zuckerrüben Verwendung. Am Tag der Saat wird aus $N [Saat]$ bzw. dem P_i -Wert die relative Schadenshöhe s berechnet und dem Simulationsmodell zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe für die Ermittlung der Ertragsdepressionen zur Verfügung gestellt. Am Tag der Ernte erfolgt die Übergabe wichtiger statistischer Momente der Verteilung der $N[Ernte]$ - bzw. P_f -Werte an Units zur tabellarischen und grafischen Ergebnisaufbereitung. In einem Jahr mit Raps sowie bei resistenten Kreuziferen zur Begrünung der Flächenstilllegung oder als Zwischenfrucht erfolgt die Verwendung der in Anhang 20 dargestellten Modellparameter analog zur Vorgehensweise in einem Zuckerrübenjahr.

Das Simulationsmodell zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe liest den definierten Produktionsort, den Aussaat- und Erntetag sowie die Information, ob anfällige oder resistente Zuckerrüben zu betrachten sind, ein. Im Simulationsmodell wird die Einzelpflanzenmasse ohne Nematodenbefall sowie die Blattmasse, wie in Kapitel 4.4.4 beschrieben, zwischen dem Tag der Saat und dem Tag der Ernte mit den in Anhang 31 aufgelisteten Parametern berechnet. Die für diese Berechnung notwendigen Werte der Saisonvariablen liegen als geschlossener Formelausdruck der Saisonfigur im Modell vor. Parallel erfolgt die Berechnung der sekundären Ertragsparameter. Nachdem die Einzelpflanzenmasse in den Rübenertrag RE_{ohne} umgerechnet ist, kann durch Übernahme der relativen Schadenshöhe aus dem Populationsmodell (s.o.) der unter Nematodenbefall erzielte Rübenertrag RE_{mit} abgeleitet werden. Am Tag der Ernte erfolgt die Übergabe des Modelloutputs an das ökonomische Modul, und die Ertragsparameter sowie die wichtigsten statistischen Momente der stochastischen Größen werden zur tabellarischen und grafischen Darstellung aufbereitet. Der Blattertrag stellt im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements eine entscheidungsunabhängige Größe dar und wird nicht als Modelloutput ausgewiesen.

Das ökonomische Modul liest aus den Rahmendaten die Rüben- und Schnitzelpreise sowie die Kosten des Zuckerrübenanbaus und die Höhe der betrieblichen Lieferrechte ein. Die Rü-

benauszahlungspreise werden anhand des aus dem Ertragsmodell übernommenen Zuckergehalts ebenso wie die verfügbaren Lieferrechte gemäß Kapitel 4.5.1.3 abgeleitet. Die Berechnung der Qualitätsprämie erfolgt aus der Ergebnisgröße Ausbeuteverluste, die der Lieferprämie aus dem abgefragten Simulationsparameter Lieferzeitpunkt. Damit sind alle notwendigen Angaben zur Transformation des physischen Outputs des Ertragsmodells in monetäre Größen vollständig.

Zu den Rahmendaten gehören auch die Deckungsbeiträge der alternativen Produktionsverfahren ohne Prämien sowie die jährlichen Ackerprämien gemäß Übersicht 10. Beides wird in das ökonomische Modul eingelesen und entsprechend der bei den Simulationsparametern ausgewählten Anbaualternative zu deren DB II verknüpft. Der Deckungsbeitrag wird anschließend über die Simulationsdauer zum Gesamtdeckungsbeitrag (GDB) kumuliert. Die statistischen Momente der Outputgrößen des ökonomischen Moduls, *DB_ohne* (DB II ohne Nematodenbefall), *DB_mit* (mit Nematodenbefall) sowie *GDB_ohne* und *GDB_mit* werden an die Ergebnismodule zur tabellarischen und grafischen Aufbereitung übergeben.

Nach erfolgter Simulation kann der Entscheidungsträger das Programm beenden oder durch Rückkehr zu den Simulationsparametern ein Alternativszenario rechnen.

4.6.3.3 Grafische Benutzeroberfläche

Nach BLÖNNIGEN (1986, S. 52f.) sind die die anwendergerechte Informationseingabe und Ergebnispräsentation wichtige Bestimmungsgrößen für die Operationalität eines Modells. Aus diesem Grund verfügt *INM-Consult* durchgehend über eine graphische Benutzeroberfläche, die eine komfortable Bedienung mit der Maus ermöglicht. Von der Startoberfläche gelangt der Modellanwender über die Menüleiste zum Eingabeblatt der Rahmendaten sowie zur Eingabe der Simulationsparameter oder nach erfolgter Simulation zu den Ergebnisdatenblättern und Grafiken. Die Eingabe der Rahmendaten ist mit einer den meisten Modellanwendern vertrauten Oberfläche eines Tabellenkalkulationsprogramms versehen (Anhang 58). Dafür wird das in Delphi[®] eingebundene ActiveX-Elemente *Formular One* von Visual Components Inc. verwendet. *Formular One* erlaubt den Ausdruck des Datenblattes sowie das Abspeichern u.a. im Microsoft Excel-Format und somit einen problemlosen Transfer zu diesem und anderen Tabellenkalkulationsprogrammen. Zur kompakten Dateneingabe sind die notwendigen Angaben auf ein Arbeitsblatt verdichtet.

Zur Eingabe der Simulationsparameter wird aufgrund der Vielschichtigkeit und teilweisen nichtnumerischen Eigenschaften der Eingaben eine in Anhang 59 dargestellte eigene Benutzeroberfläche entworfen. Diese erlaubt z.B. die Verwendung von Eingabefeldern mit einer dazugehörigen bildlauffähigen Dropdown-Liste, mit deren Hilfe eine Fruchtfolge zusammengestellt, Saat-, Ernte- und Lieferzeitpunkt der Zuckerrüben, die Anfälligkeitsstufe einer resistenten Kreuzifere sowie beim Anbau von Zwischenfrüchten die Auflaufdekade festgelegt werden kann. Vorgegeben ist eine Vegetationszeit der Zuckerrüben vom 7. April bis zum 24. Oktober, die Saat kann jedoch vom 10.3. bis zum 15.5. und die Ernte vom 10.9. bis zum 24.12. in Tagesschritten variiert werden. Der Auflauf der Zwischenfrüchte ist zwischen der 2. Julidekade und der 3. Septemberdekade in Dekadenschritten festzulegen. Zu jedem einzugebenden Simulationsparameter wird bei Ansteuerung mit der Maus eine Pop-up-Hilfe eingeblendet, die dem Anwender zusätzliche Informationen gibt, wie z.B. den Hinweis, dass das Datum der Probeentnahmen zwischen dem 1.1. und dem Tag der Saat zu liegen hat.

Die tabellarische Ergebnisdarstellung erfolgt wiederum mit *Formular One* (Anhang 60). Wie bereits bei der Eingabe der Rahmendaten bietet dies den Vorteil der Druckbarkeit und des Abspeicherns im Excelformat. Da sowohl die kompletten Datenreihen der stochastischen Modelloutputs als auch deren Verdichtung zu den wichtigsten statistischen Momenten in die Ergebnislisten geschrieben werden, besteht die Möglichkeit der weitergehenden statistischen Analyse oder grafischen Verarbeitung des Modelloutputs außerhalb INM-Consults mit Microsoft Excel oder anderen Statistikprogrammen. Die grafische Darstellung der Modellergebnisse erfolgt mittels der Delphikomponente *TeeChart* Standard 4.04, Steema Software, und beschränkt sich in der Anwendung auf die Abbildung der Erwartungswerte der P_i - und P_f -Werte (Anhang 61) sowie des Rübenertrags und der Deckungsbeiträge mit und ohne Nematodenbefall. Sie dient in erster Linie der Erhöhung der Transparenz der Simulationsergebnisse und der Erleichterung der Interpretation. Die ausgiebige Ergebnispräsentation ist der Akzeptanz der Resultate des Entscheidungsunterstützungssystems beim Modellanwender dienlich.

4.7 Zusammenfassender Überblick

Aufgabe des in diesem Kapitel entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems ist es, Daten über die Systemzustände und Handlungsalternativen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements zu erfassen und für die Entscheidung aufzubereiten. Eine Unterstützung unternehmerischer Entscheidungen kann nur erreicht werden, wenn aus der Fülle vorhandener Informationen die für die jeweilige Problemlösung relevanten Daten herausgefiltert und im spezifischen Informationssystem integriert werden. Das biologisch-technische Informationssystem ist modular aufgebaut, es besteht aus zwei dynamischen und stochastischen Simulationsmodellen. Deren Output wird in monetäre Größen transformiert und ist eine Eingangsgröße für einen ökonomischen Ansatz auf der Basis der (Gesamt-)Deckungsbeitragsrechnung.

Die Qualität von Entscheidungsunterstützungssystemen kann nicht allein davon abhängig gemacht werden, wie originalgetreu (strukturisomorph) die komplexe Realität durch die zugrunde liegenden Modelle wiedergegeben wird. Die Prognosemodelle des Informationssystems sollten vielmehr verhaltensisomorph und so einfach strukturiert sein, dass der Entscheidungsträger mit einem vertretbaren Aufwand für Dateneingabe und Rechenzeit korrekte und umfassende Informationen über die mittel- und langfristigen Auswirkungen möglicher Handlungsalternativen erhält und so eine in seinem Sinne gute Lösung finden kann. Andererseits müssen die Grundzüge der realen Entscheidungssituation insoweit erhalten bleiben, dass sich die daraus abzuleitende Lösung als brauchbar erweist. Für die biologisch-technischen Modelle werden daher aggregierte Black-Box-Ansätze gewählt.

Die Populationsdynamik des Nematoden wird mittels einer einzigen Differentialgleichung auf der Basis eines in der Nematologie weit verbreiteten zeitdiskreten Ansatzes zeitkontinuierlich nachgebildet. Dieser Ansatz ermöglicht es, lediglich durch angepasste Kalibrierung der Modellparameter die Abundanzdynamik bei anfälligen und resistenten Wirtspflanzen sowie Nichtwirtspflanzen gleichermaßen taggenau zu simulieren. Für die Simulation der Ertragsdynamik der Zuckerrübe wird die modifizierte Variante eines am Lehrstuhl entwickelten Modellansatzes verwendet, der die Entwicklung der Kompartimente Rübenblatt und Rübenkörper auf der Basis logistischer Wachstumsfunktionen unter Berücksichtigung intraspezifischer Konkurrenz zeitkontinuierlich nachbildet. Eine Saisonfunktion fasst den Einfluss wichtiger abiotischer Umweltparameter zusammen. Der Einfluss des Schaderregers *H.schachtii* auf die

Ertragsdynamik wird unter Berücksichtigung des wichtigsten abiotischen Schadensparameters mittels von der Saatzeit der Zuckerrüben abhängiger diskreter Befall-Ertragsverlust-Funktionen abgebildet.

Im Rahmen dieser Arbeit kann die notwendige Datenbasis für die Kalibrierung der Modellparameter nicht durch umfangreiche und langfristige Feldversuche selbst generiert werden. Die Kalibrierung - und damit verbunden die Verifikation der Modellansätze - erfolgt daher sowohl für das Modell zur Nachbildung der Abundanzdynamik als auch für das Modell zur Simulation der Ertragsdynamik mit Hilfe vorhandener Modellansätze und Versuchsergebnisse. Dadurch ist die räumliche Gültigkeit des Modells auf die natürliche Systemumwelt dieser Datenbasis beschränkt, eine Anpassung an andere Naturräume aber bei Vorliegen entsprechender Witterungs- und Ertragsdaten vergleichsweise einfach möglich. Die Kalibrierung der Parameter des Populationsmodells erfolgt für anfällige und resistente Zuckerrüben, die Wirtspflanze Raps, die zu einer Gruppe zusammengefassten Nichtwirtspflanzen, sowie für resistente Kreuziferen unterschiedlicher Anfälligkeitsstufen und in Abhängigkeit vom Aussaatzeitpunkt beim Anbau als Zwischenfrucht. Die Parameter des Ertragsmodells werden für nematodenanfällige Zuckerrüben kalibriert, ohne Sortenunterschiede oder unterschiedliche Intensitätsniveaus und Bestellverfahren zu berücksichtigen. Die Ertragsparameter resistenter ZR werden diskret abgeleitet, ebenso drei unterschiedliche Ertragsregionen (Produktionsorte) definiert.

Die Variabilität der betrachteten offenen biologischen Systeme erzwingt die Entwicklung stochastischer Modellansätze. Im Populationsmodell wird die Stochastik implementiert, indem durch deterministische Simulation generierte Ergebnisgrößen mit einem aus der empirischen Datenbasis der Parameterkalibrierung abgeleiteten Störterm zu erwartungstreuen lognormalverteilten Modelloutputs „verrauscht“ werden. Analog dazu liefert das Ertragsmodell stochastische Ergebnisgrößen durch Ziehungen aus einer Normalverteilung mit dem deterministischen Simulationsoutput als Mittelwert und einer an Literaturangaben angelehnten Standardabweichung.

Die zum Jahr 2005 reformierte Gemeinsame Agrarpolitik und die Zuckermarktordnung der EU in der zu diesem Zeitpunkt gültigen Fassung bilden die politische Systemumwelt für den Betrachtungszeitraum. Sie sind maßgeblich für die Herleitung der ökonomischen Kennzahlen der Zuckerrüben und der vorgegebenen Produktionsalternativen. Als Kostenrechnungsverfahren wird eine Teilkostenrechnung in Form der Deckungsbeitragsrechnung verwendet, mit deren Hilfe die relative Vorzüglichkeit verschiedener Anbaualternativen bewertet wird. Zielgröße des Informationssystems ist der diskontierte kumulierte Gesamtdeckungsbeitrag des Simulationszeitraums. Als Risikopräferenz des Entscheidungsträgers wird Risikoneutralität unterstellt.

Die Implementierung des *INM-Consult* genannten stand-alone-Computerprogramms erfolgt mit Borland Delphi[®], das Object Pascal als Programmiersprache verwendet. Delphi erlaubt die Umsetzung modularer Modellsysteme in eine modulare Programmstruktur und die Entwicklung anwenderfreundlicher Benutzeroberflächen.

5 Simulationsexperimente mit dem Entscheidungsunterstützungssystem

Im Folgenden werden mit dem zuvor entwickelten und implementierten bio-ökonomischen Modell Simulationsexperimente durchgeführt. Betrachtet werden die Konsequenzen des Befalls mit *H.schachtii* auf die Zuckerrüben sowie die abundanzdynamischen und ökonomischen Auswirkungen verschiedener vorgegebener Fruchtarten, Fruchtfolgen und Managementmaßnahmen. *INM-Consult* wird demnach als Entscheidungsunterstützungssystem eingesetzt, da dem Modellanwender zusätzliche Informationen über die Auswirkungen seines Handelns zur Verfügung gestellt werden. Alternativrechnungen erlauben darüber hinaus den Vergleich unterschiedlicher Managementmaßnahmen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements. Ziel dieses Kapitels ist es, an einigen ausgewählten Beispielen die Leistungsfähigkeit und die Grenzen des bio-ökonomischen Modellansatzes zu dokumentieren und nicht sämtliche denkbaren Fruchtfolge- und Managementszenarien zu simulieren. Zuvor werden Entscheidungsunterstützungsmodelle im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements vorgestellt, die ähnlich dem hier entwickelten Modellansatz auf ein biologisch-technisches Informationssystem zurückgreifen. Nach Durchführung der Simulationsexperimente mit *INM-Consult* kann dessen Leistungsfähigkeit mit den bestehenden EUS verglichen werden.

5.1 Literaturübersicht

Aufbauend auf dem in Kapitel 4.3.3.2 vorgestellten Populationsmodell des Rüben nematoden entwickelte SCHMIDT (1992) die Modellversion NemaPlot 2.0. Diese ist nicht nur in der Lage, dem Modellanwender durch Alternativrechnungen die Auswirkungen unterschiedlicher Fruchtfolgen und Bekämpfungsmaßnahmen auf die Populationsdynamik vor Augen zu führen (Einsatz als Entscheidungsunterstützungssystem). Sie kann auch - anders als *INM-Consult* - Anbauempfehlungen bezüglich Einsatz und Positionierung einer nematodenresistenten Zwischenfrucht oder Erweiterung der Fruchtfolge um ein Nichtwirtsglied aussprechen und deren populationsdynamischen Resultate darstellen. Dieser Einsatz als Optimierungsmodell ist nach Aktivierung einer entsprechenden Simulationsoption durch den Modellanwender möglich, indem die Alternativrechnungen mit den o.g. Maßnahmen automatisch durchgeführt und anhand der beim nächsten Zuckerrübenanbau zu erwartenden P_1 -Werte bewertet werden. Übersicht 16 zeigt den Modelloutput des Prognose- und Optimierungsmoduls von NemaPlot 2.0, basierend auf dem ersten in Anhang 7 vorgestellten Simulationslauf.

Übersicht 16: Output des Prognose- und Optimierungsmoduls von NemaPlot

Anbauempfehlung:

Die derzeitige Fruchtfolge (ZR-WW-WG) sollte unbedingt um eine Zwischenfrucht vor Zuckerrüben erweitert werden. Verstärkte Verluste sind zu erwarten!

Ergebnis 1: Ausgangsverseuchung im Jahr 1993 vor Zuckerrüben: 1.000 E.u.L/100 g Boden. Geschätzte Verseuchung im Jahr

1994 nach ZR unter WW:	5.151
1995 nach WW unter WG:	2.705
1996 nach WG zur Saat ZR:	1.470

Zur nächsten Saat Zuckerrüben im Jahr 1996 werden 1.470 Eier u. Larven/100 g Boden geschätzt. Unter den gegebenen klimatischen Bedingungen im Jahr 1993 waren keine nematodenbedingte Verluste im Rübenanbau zu vermuten

Ergebnis 2: Optimierung von Zwischenfrüchten

Unter Verwendung des Zwischenfruchtverfahrens Ölrettich werden bei verschiedenen Fruchtfolgestellungen folgende Verseuchungsdichten zur nächsten Saat Zuckerrüben geschätzt (Ihre Fruchtfolge: ZR-WW-WG: 1.470 E.u.L/100 g Boden):

ZR-WW+(ÖL)-WG:	1.075
ZR-WW-WG+(ÖL):	1.138
ZR-WW+(ÖL)-WG+(ÖL):	861

Die relativen Reduzierungsraten der Kombinationen sind den individuellen Produktionskosten gegenüberzustellen.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an NemaPlot 2.0 (SCHMIDT, 1992)

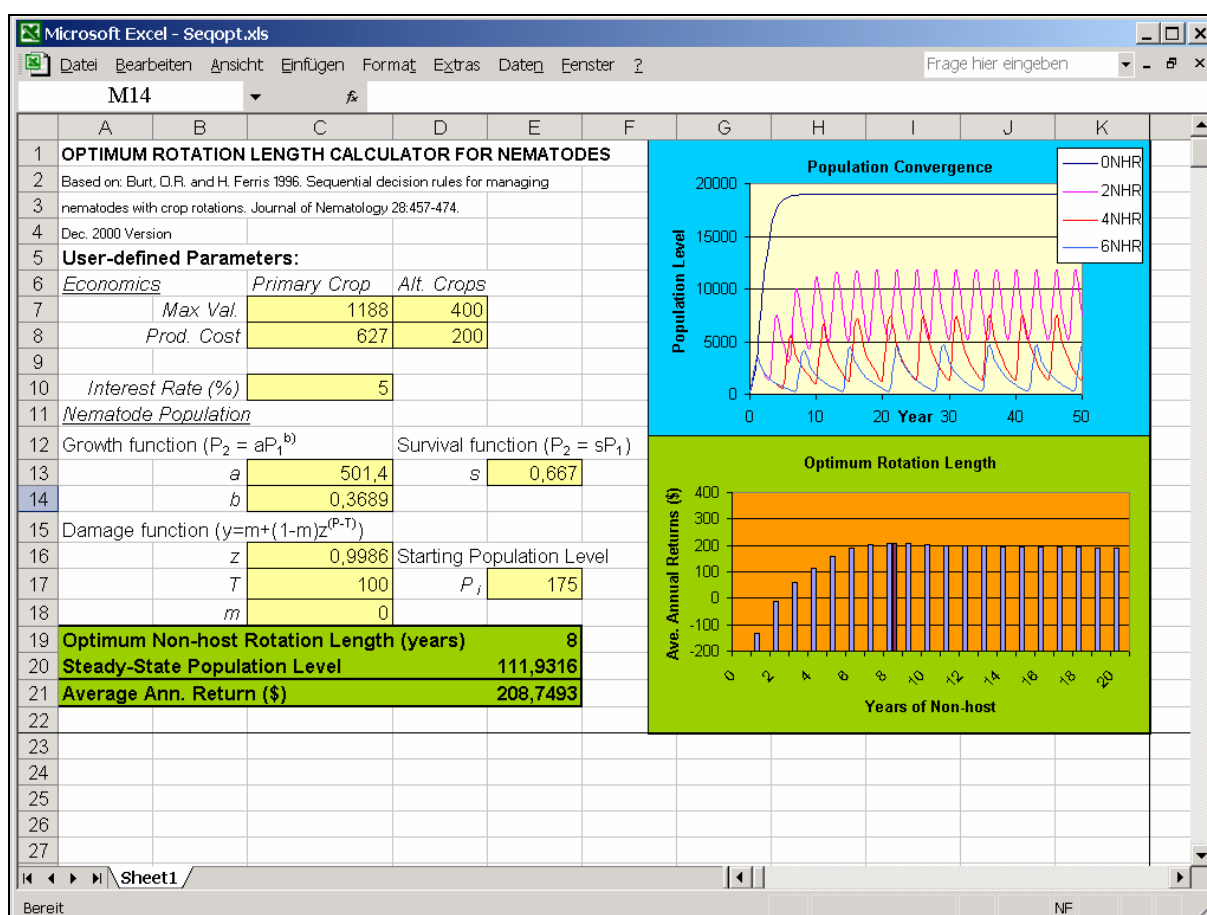
Bei NemaPlot handelt es sich im Gegensatz zu *INM-Consult* um ein deterministisches und rein biologisch-technisches Simulationsmodell ohne ökonomische Bewertung des Zuckerrübenanbaus bzw. deren nematodenbedingten Ertragsdepressionen sowie der Managementmaßnahmen. Daher erfolgt keine ökonomische Optimierung, maßgeblich ist lediglich der erwartete Befall zum folgenden Zuckerrübenanbau. Des weiteren ist der Betrachtungszeitraum für die Simulationen und Empfehlungen bei NemaPlot auf die Länge der untersuchten Rotation beschränkt, darüber hinausgehende Effekte werden somit nicht erfasst. *INM-Consult* kann dagegen für Simulationszeiträume von bis zu 20 Jahren eingesetzt werden (siehe Kapitel 5.5)²⁴.

BURT UND FERRIS (1996) stellen ein Modell zur Berechnung der gewinnmaximalen Anbaupause von Zuckerrüben unter Nematodenbefall vor, das die Abundanzdynamik bei Zuckerrüben über eine Potenzfunktion und bei Nichtwirten mit diskreten Überlebensraten, sowie die

²⁴ Überlegungen zur Länge des problemadäquaten Simulationszeitraums werden in Kapitel 5.7 angestellt.

Befall-Schadensrelation mit Hilfe des Seinhorst-Ansatzes abbildet (siehe Kapitel 4.3.3.1). Eine ökonomische Bewertung der Leistungen der Zuckerrübe sowie der Alternativfrüchte erlaubt schließlich die Berechnung des Fruchtfolgegewinns. Die Autoren demonstrieren, dass die Verwendung einer nur von der Dauer des Nichtwirtspflanzenanbaus abhängigen Gleichgewichtspopulation (steady-state oder fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte, siehe Kapitel 3.2.2.2) von *H.schachtii* als dynamische Schadschwelle zu annähernd gleich guten Ergebnissen führt wie der Einsatz der dynamischen Programmierung zur analytischen Ermittlung der optimalen Anbaupause. Während in einem ersten Modellansatz die Anbaupause Entscheidungsvariable ist und die steady-state-Population daraus abgeleitet wird, entscheidet der vorgestellte zweite Modellansatz anhand der beobachteten Nematodenpopulation selbstständig, ob nachfolgend die Wirts- oder eine Nichtwirtspflanze angebaut wird, so dass sich indirekt eine Abfolge optimaler Anbaupausen ergibt. Basierend auf diesem zweiten Modellansatz bietet FERRIS (1999-2004) ein excelbasiertes Werkzeug zur Berechnung der optimalen Anbaupause im Rahmen von NEMAPLEX an (siehe Abbildung 64).

Abbildung 64: Berechnung der optimalen Anbaupause nach BURT UND FERRIS

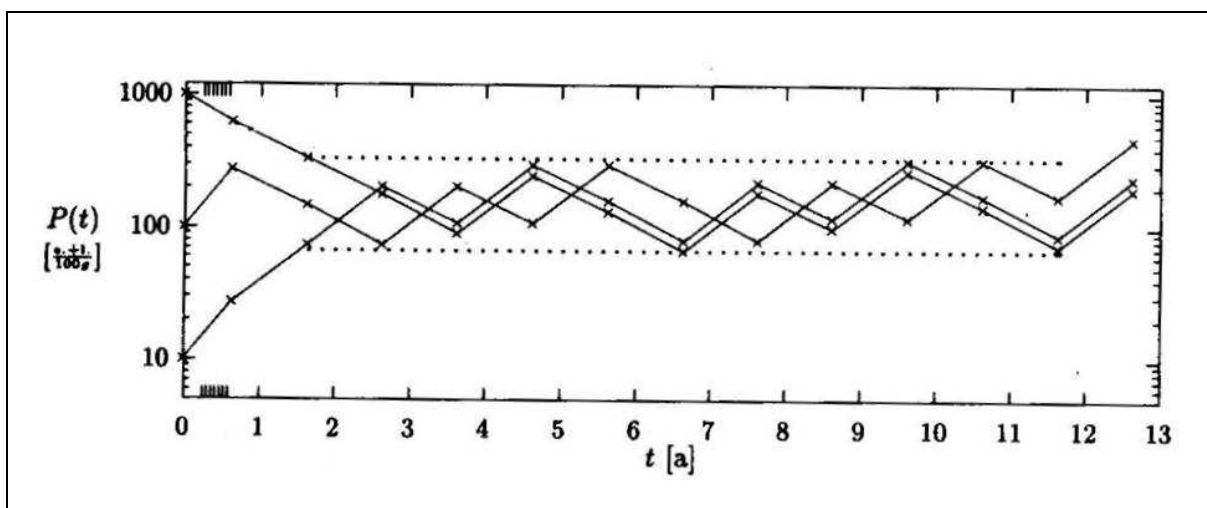


Quelle: FERRIS, 1999-2004

Ziel dieses deterministischen Ansatzes ist es nicht, eine „optimale“ Fruchtfolge zu generieren. Eine Fruchtfolge besteht aus mehr als nur der optimalen Anbaupause der Wirtspflanzen. Die Anbaualternativen zur Wirtspflanze sind im Modell als Nichtwirtspflanzen zusammengefasst, während *INM-Consult* die in Anhang 57 dargestellten Anbaualternativen individuell abbilden kann. Aktive Managementmaßnahmen im Rahmen des INM werden bei BURT UND FERRIS (1996) ebenfalls nicht betrachtet.

Ähnlich dem Ansatz von BURT UND FERRIS (1996) bestimmt SEPPELT (1997) mit Hilfe eines Simulationsmodells innerhalb des Modellsystems SIMULAT die optimale Bewirtschaftung innerhalb der Vegetationsperiode sowie über die Fruchtfolge nach ökonomischen und ökologischen Bewertungskriterien. Auf der Betrachtungsebene der Fruchtfolge wird unter anderem die optimale Anbauhäufigkeit von Zuckerrüben unter Nematodenbefall mit und ohne Flächenstilllegung in der Rotation untersucht. Die Abundanzdynamik von *H.schachtii* sowie die Nematode-Zuckerrübe-Interaktion werden dabei mit Hilfe des Differenzgleichungsmodells von SCHMIDT (1992) simuliert und die optimale Fruchtfolge bzw. Anbaupause der Zuckerrübe bei unterschiedlicher Gewichtung der Bewertungskriterien mittels dynamischer Programmierung für einen Zeitraum von bis zu dreizehn Jahren ermittelt (optimale Steuerung). Das Optimierungsmodell liefert als Ergebnis eine iterative Annäherung an „optimale Pfade“ (SEPPELT, 1997, S. 87), Befallsdichten, die unabhängig von der Ausgangsverseuchung zu Beginn des Betrachtungszeitraums aufgrund der gewählten Fruchtfolge bzw. Zuckerrübenanbaupause nach etwa zwei bis drei Jahren erreicht, unter der gewählten Modellkonstellation aber am Ende der Bewirtschaftungsdauer wieder verlassen werden (Abbildung 65).

Abbildung 65: Optimale Pfade der Nematodenpopulation der Fruchtfolge



Quelle: SEPPELT, 1997, S. 87

Der von SEPPELT (1997) verwendete Optimierungsansatz liefert zwar stets analytisch korrekte Resultate, die Praxisrelevanz dieses Modelloutputs ist aber aufgrund zu geringer oder fehlender Berücksichtigung agronomischer sowie pflanzen- und ackerbaulicher Aspekte eingeschränkt. So führt eine geringe Ausgangsverseuchung mit Nematoden oder Nichtbefall alleine aufgrund der Tatsache, dass die Zuckerrübe Hauptertragsfrucht ist, stets zu einer mehrjährigen Monokultur von Zuckerrüben zu Beginn des Betrachtungszeitraums (siehe Abbildung 65). Bei hohen Ausgangsverseuchungen führt die Optimierung dagegen zu einem mehrjährigen vollständigen Verzicht auf Zuckerrübenanbau zu Beginn und zu Zuckerrübenmonokultur am Ende des berücksichtigten Zeitintervalls, da die Endverseuchung nicht in die Bewertung eingeht. SEPPELT (ebd., S. 81) bezeichnet dieses methodische Defizit seines Optimierungsansatzes als „Randeffekt“.

Ein einfaches diskretes Computermodell der Abundanzdynamik von *H.schachtii* wurde von HEIJ BROEK UND WITHAGEN (1997, S. 215) für die Niederlande vorgestellt. Aufbauend auf Bodenprobenuntersuchungen kann der mittlere Nematodenbesatz über verschiedene vom

Anwender vorgegebene Fruchtfolgen sowie unter dem Einfluss kruzierer Zwischenfrüchte und resistenter Zuckerrüben simuliert werden. Durch Alternativrechnungen kann der Anwender die wirksamste Bekämpfungsmaßnahme ermitteln und somit das Prognosemodell als Entscheidungsunterstützungssystem einsetzen. Ebenfalls in der Form diskreter Alternativrechnungen kann der Einfluss verschiedener Jahre auf die Populationsdynamik untersucht werden. Dazu werden unterschiedliche Vermehrungsraten, wie sie aus Feldversuchen ermittelt wurden, verwendet.

Ebenfalls in den Niederlanden entwickeln BEEN UND SCHOMAKER (2003) ein Entscheidungsunterstützungssystem, das ähnlich wie *INM-Consult* die Populationsentwicklung der Nematoden und Ertragsverluste vorhersagen sowie die Kosten und Nutzen von Kontrollmaßnahmen errechnen kann. Ziel des allerdings deterministischen EUS namens NemaMod ist es, Anbauverfahren zu optimieren, mögliche phytosanitäre wie finanziellen Risiken zu erkennen und so genau wie möglich zu quantifizieren, sowie umweltbelastende Eingriffe zu minimieren (ebd., S. 48). Die Entwicklung des parzellenspezifischen EUS für Nematoden mit Schwerpunkt *Meloidogyne chitwoodi* und *M.fallax* begann im Jahr 2002. Eine Demoversion ist inzwischen fertig gestellt. Durch die Anwendung einer ActiveX-Komponente kann die implementierte Software in allen modernen Programmiersprachen hinzugefügt werden (ebd., S. 49).

5.2 Simulationseinstellungen

An dieser Stelle werden die über alle Simulationsexperimente konstanten Einstellungen von *INM-Consult* vorgestellt.

Zur vergleichenden Bewertung unterschiedlicher Früchte, Fruchtfolgen, Rotationslängen und Managementmaßnahmen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements sollen für die folgenden Simulationsexperimente alle ermittelten Erträge und Ertragsunterschiede anfälliger und nematodenresistenter Zuckerrüben ausschließlich auf den Befall mit *H.schachtii* und dessen Abundanzdynamik zurückzuführen sein und die natürliche Ertragsvolatilität ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck wird der stochastische Ansatz zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe dahingehend modifiziert, dass die aus der Literatur abgeleitete interperiodische Ertragsvolatilität (siehe Kapitel 4.4.9.2) gleich Null gesetzt wird. Der Rübenertrag ohne Nematodenbefall, das Ertragspotential, ist in diesem Fall eine über die Jahre konstante deterministische Größe, die dem Ergebnis der Ertragssimulation am Tag der Ernte entspricht. Ohne diese Modifikation wäre ein Vergleich unterschiedlich langer Rotationen nicht möglich, da bei Zuckerrübenanbau in unterschiedlichen Jahren durch unterschiedliche jahresspezifische Ertragspotentiale ein systematischer Fehler entstände.

Basis für die Simulationsrechnungen ist der einzelne Hektar. Als Grundpreis für die Zuckerrüben wird ein Mischpreis aus A- und B-Rüben angenommen, d.h. eine konstante Erfüllung des betrieblichen Lieferrechts in Höhe von 130% bezogen auf das A-Lieferrecht unterstellt²⁵. Da die B-Quote im Rheinland 30% der A-Quote beträgt, leitet sich der Mischpreis wie folgt aus den Grundpreisen für A- und B-Rüben ab: $46,72 \text{ Euro/t} \cdot 0,7 + 28,84 \text{ Euro/t} \cdot 0,3 = 41,36 \text{ Euro/t}$. Die Zuckergehaltskorrektur und das Hinzurechnen von Liefer- und Qualitätsprämien sowie der Umsatzsteuer (9%) erfolgen modellendogen.

²⁵ Zur Diskussion über die exogene Vorgabe eines Mischpreises siehe Kapitel 6.1.1.

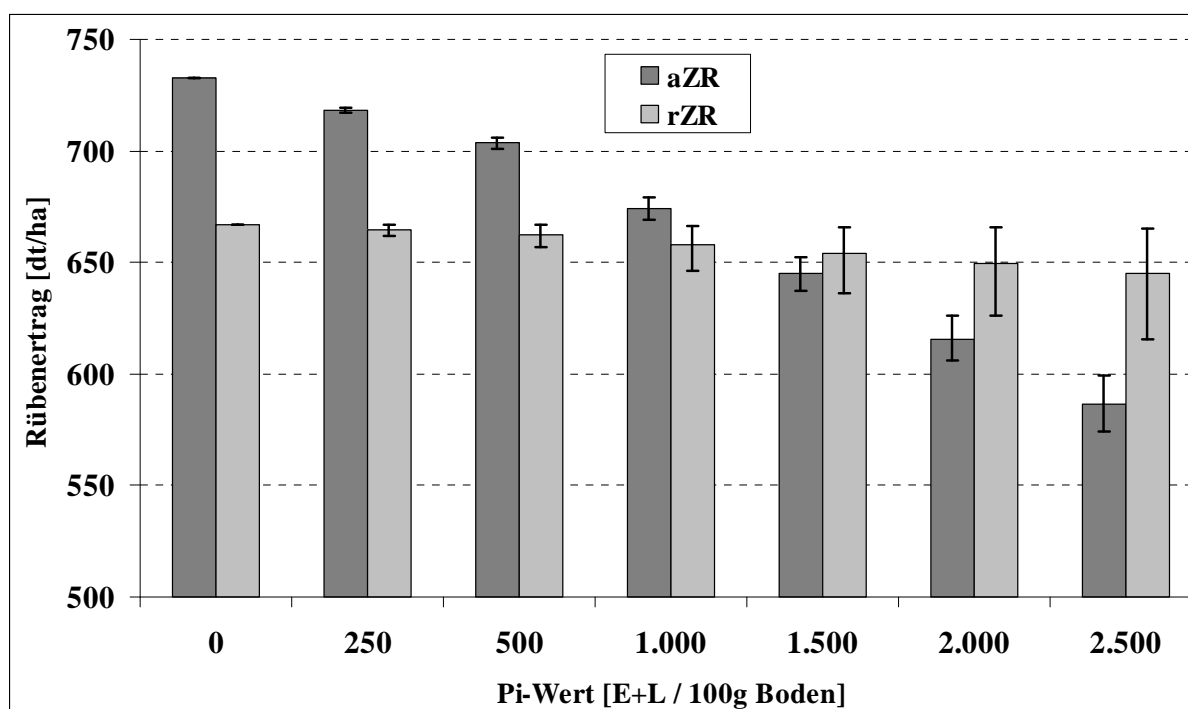
Die Nematodenreduktion in einem Jahr mit Nichtwirtspflanzen wird auf 40% p.a. und die Vegetationszeit der Zuckerrüben auf die Standardvegetationszeit (7.4. – 24.10., 200 Tage) festgesetzt. Neben diesen Simulationsparametern werden folgende Rahmendaten für die Simulationsexperimente angenommen: Der für die Diskontierung notwendige Zinssatz beträgt 0%, d.h. es findet keine Diskontierung statt bzw. dem Entscheidungsträger wird keine Zeitpräferenz vorgegeben. Die Simulationsexperimente sind auf den guten Produktionsort beschränkt. Die für die Simulationsexperimente verwendete Programmversion trägt den Namen *INM-Consult 2.0*.

Für die Codierung der Fruchtarten werden neben *aZR* für anfällige und *rZR* für resistente Zuckerrüben die in Anhang 57 aufgeführten Abkürzungen verwendet. Solange eine Differenzierung zwischen den Nichtwirtspflanzen nicht notwendig ist, wird aus Gründen der Vereinfachung entweder auf deren Nennung verzichtet oder von Nichtwirten (*NW*) gesprochen. Die Koppelung von Haupt- und Zwischenfrucht in einem Anbaujahr ist durch „+“ gekennzeichnet. Eine auf Wintergerste folgende Zwischenfrucht ist demnach mit „WG+ZWF“ codiert.

5.3 Einjährige Simulationsexperimente

Dieses Kapitel widmet sich dem Vergleich nematodenresistenter und -anfälliger Zuckerrüben. Verglichen werden dabei Rübenenertrag, bereinigter Zuckerertrag und der Deckungsbeitrag je Hektar für verschiedene Befallsniveaus. Abbildung 66 zeigt die Erwartungswerte und die 90%-Intervalle des Rübenenertrags anfälliger und resistenter Zuckerrüben für P_i -Werte zwischen 0 und 2.500 Eier und Larven je 100g Boden. Die anfälligen Zuckerrüben reagieren empfindlich auf zunehmenden Nematodenbefall zur Saat. Da die Befall-Schadens-Relation bei der gewählten Aussaatzeit im Mittel 8% je 1.000 Eier und Larven beträgt (siehe Übersicht 9), entspricht der Erwartungswert des Rübenenertrags anfälliger Sorten im Simulationsexperiment bei $P_i = 1.000$ Eier und Larven mit 674 dt/ha 91,9% des Ertragspotentials in Höhe von 733 dt/ha. Die zunehmende Streuung der Rübenenerträge ist auf den stochastischen Befall-Schadens-Ansatz zurückzuführen, nach dem die relative Schadenshöhe bei Aussaat zwischen 1.4. und 15.4. zwischen 7% und 9% dreiecksverteilt schwankt.

Die nematodenresistenten Zuckerrüben reagieren wesentlich toleranter auf den Befall mit *H.schachtii*, ihre Rübenenerträge sinken kaum mit zunehmendem Befall. Allerdings ist ihre Ertragsleistung unter Nichtbefall geringer, sie beträgt im Modellansatz 91% des Ertrags der Standardsorte (siehe Übersicht 5). Erst bei einem Ausgangsbefall in Höhe von 1.500 Eier und Larven ist der Erwartungswert des Rübenenertrags resistenter Sorten mit 654 dt/ha höher als der anfälliger Sorten, die 645 dt/ha erreichen. Durch die größere Streuung der relativen Befall-Schadens-Relation (0-4% je 1.000 Eier und Larven) ist die Streuung der Rübenenerträge resistenter Zuckerrüben c.p. größer. Dies ist erkennbar an den breiteren 90%-Intervallen der Erträge in Abbildung 66.

Abbildung 66: Rübenenerträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben je nach P_i -Wert

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 62

Die Befallsdichte, bei der die Erwartungswerte der Rübenenerträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben gleich sind, kann im erwartungstreuen Modellansatz analytisch bestimmt werden. Für den Erwartungswert relativer Rübenenerträge anfälliger und resistenter Sorten in Abhängigkeit vom Nematodenbefall gilt in Anlehnung an Gleichung 45:

$$E(RE_{aZR}) = 100 - 0,008P_i$$

$$E(RE_{rZR}) = 91 - 0,00133P_i$$

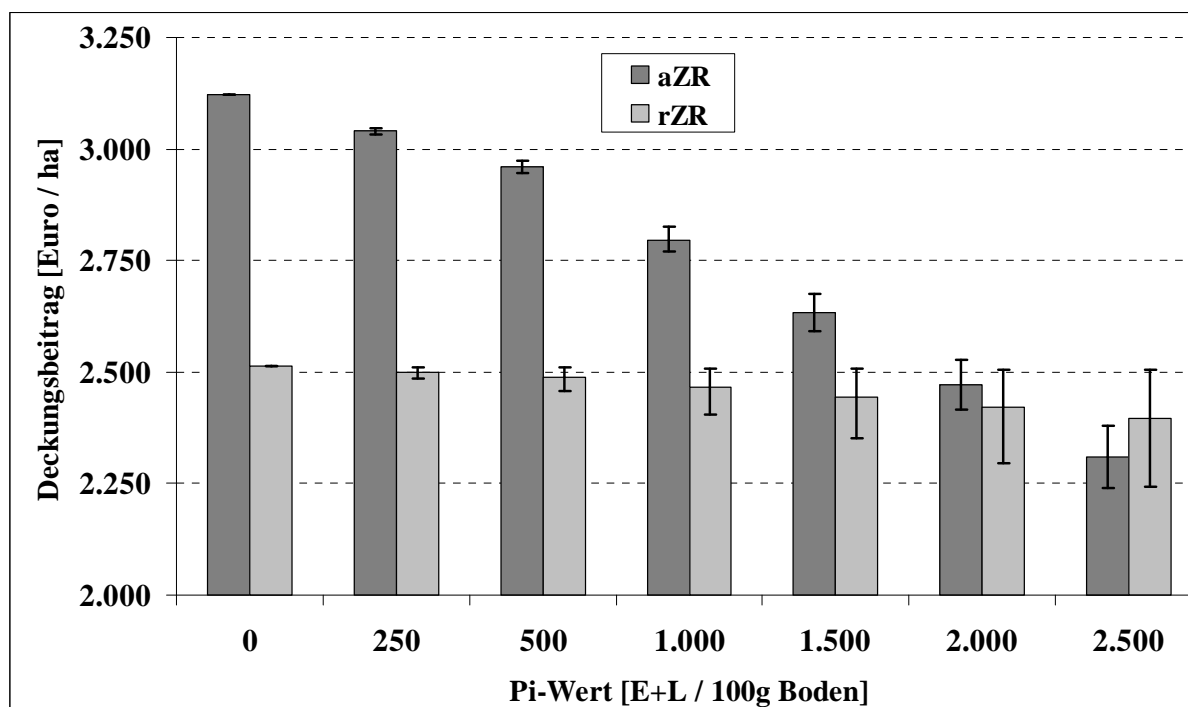
Durch Gleichsetzen errechnet sich ein P_i -Wert von 1.350 Eier und Larven, bei dem Ertragsgleichheit herrscht. Oberhalb dieses Schwellenwertes erreichen nematodenresistente Zuckerrübensorten im Mittel höhere Rübenenerträge.

Resistente Zuckerrüben unterscheiden sich von anfälligen Sorten gemäß Übersicht 5 auch bei den Ertragsfaktoren Zuckergehalt und Ausbeuteverluste. Im Simulationsexperiment erreichen anfällige Sorten einen Zuckergehalt von 17,52%, und die Ausbeuteverluste betragen 2,14%. Der Zuckergehalt resistenter Sorten beträgt dagegen nur 16,86% und der Ausbeuteverlust 2,31%. Aufgrund der schlechteren technischen Qualität resistenter Zuckerrüben ist deren Bereinigter Zuckerertrag (BZE) c.p. geringer als der anfälliger Sorten (siehe Anhang 62). Erst bei Befallsdichten zur Saat oberhalb von analytisch ermittelten 2.064 Eier und Larven übersteigt der BZE resistenter Zuckerrüben den der Standardsorten.

Unterschiede bei den sekundären Ertragsparametern haben Auswirkungen auf den Auszahlungspreis (siehe Übersicht 13). Anfällige Sorten erzielen einen auf dem Mischpreis basierenden Auszahlungspreis von 55,56 Euro/t Rüben, resistente Sorten dagegen nur 52,51 Euro/t. Zusammen mit den unterschiedlichen Rübenenertragsleistungen und den höheren Saatgutkosten der resistenten Sorten ergeben sich die in der folgenden Abbildung 67 dargestellten Erwar-

tungswerte und 90%-Intervalle der Deckungsbeiträge. Ohne Nematodenbefall erbringen die resistenten Rüben einen Deckungsbeitrag in Höhe von 2.512 Euro²⁶, nur rund 80% des Deckungsbeitrags anfälliger Zuckerrüben (3.122 Euro). Mit zunehmendem Befall sinkt der Deckungsbeitrag der anfälligen Sorten wie ihr Ertrag schneller als der resistenter Sorten, um im vorliegenden Simulationsexperiment ab analytisch ermittelten 2.190 Eier und Larven diesen zu unterschreiten. Erst ab diesem Schwellenwert präferierte der risikoneutrale Entscheidungsträger den Anbau nematodenresistenter Zuckerrübensorten.

Abbildung 67: Deckungsbeiträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben nach P_i-Wert



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 63

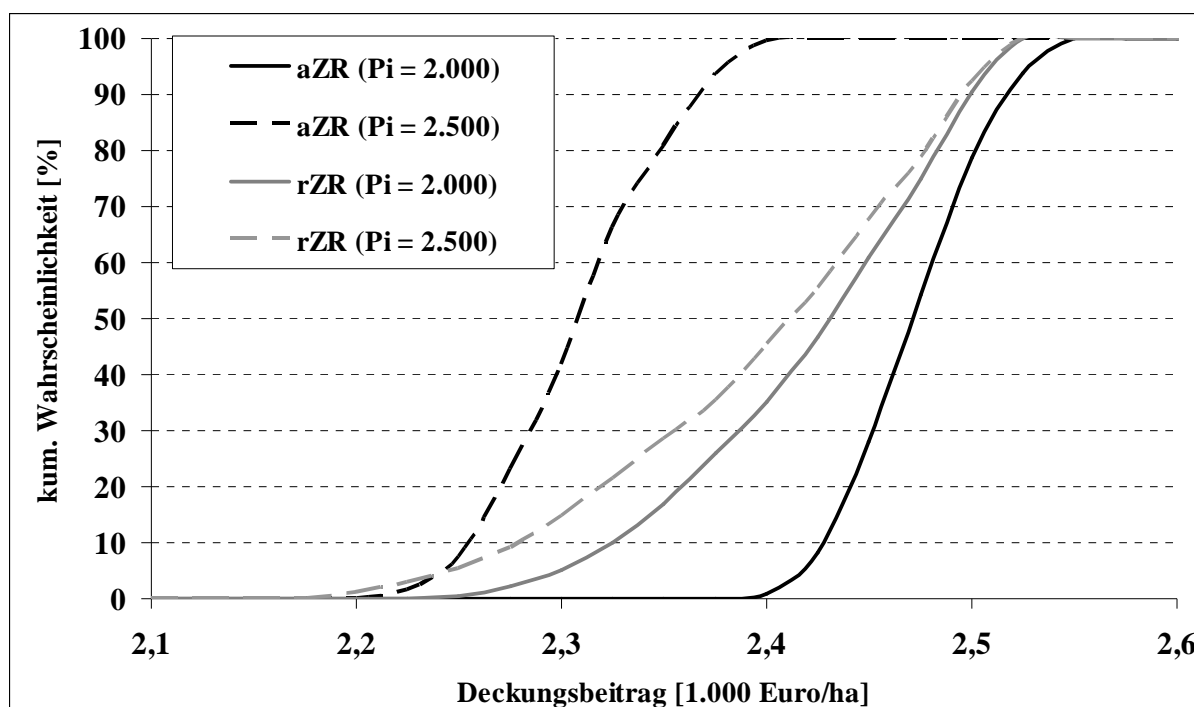
Um zu überprüfen, ob die ermittelten Deckungsbeiträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben bei gleichem Ausgangsbefall als signifikant verschieden angesehen werden können, werden die Ergebnisreihen der Simulationsexperimente paarweise mit dem Mann-Whitney- oder U-Test (vgl. HARTUNG ET AL., 1998, S. 519f.) untersucht. Dieser nichtparametrische, d.h. verteilungsfreie, Test ist anzuwenden, da bei keiner der hier und im Folgenden zu betrachtenden Datenreihen Normalverteilung unterstellt werden kann. Die Ausführung des in SPSS[®] implementierten U-Tests für zwei unabhängige Stichproben ergibt für alle sieben betrachteten Deckungsbeitragspaare zum Niveau von 1% signifikante Unterschiede zwischen anfälligen und resistenten Zuckerrüben.

Bedingt durch die größere Streuung der Rübenenerträge streut auch der Deckungsbeitrag der resistenten Zuckerrüben c.p. unter Befall stärker. Risikoaverse Entscheidungsträger werden daher auch bei Überschreitung der ökonomischen Bekämpfungsschwelle nicht zwangsläufig auf nematodenresistente Zuckerrüben zurückgreifen. Zur weiteren Differenzierung wird das Ent-

²⁶ Im Rahmen der Simulationsexperimente ist die Betrachtungsebene gemäß Kapitel 5.2 ein Hektar. Die Skalierung Euro/ha ist daher gleichbedeutend mit Euro und wird durch diese im Folgenden ersetzt.

scheidungsprinzip der stochastischen Dominanz verwendet. Dafür sind in Abbildung 68 die Verteilungsfunktionen der Deckungsbeiträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben für die der Bekämpfungsschwelle benachbarten Befallsdichten abgebildet. Bei $P_i = 2.000$ Eier und Larven wird der Anbau von Standardsorten von allen Entscheidungsträgern unabhängig von deren Risikopräferenz bevorzugt gegenüber dem Anbau resistenter Sorten, da die Verteilungsfunktion ihres Deckungsbeitrags stets rechts von der der resistenten Sorten liegt und damit stochastisch dominant 1. Grades ist (vgl. BRANDES UND ODENING, 1992, S. 207). Bei 2.500 Eier und Larven schneiden sich die Verteilungsfunktionen. Stochastische Dominanz 1. Grades ist daher nicht gegeben. Anfällige Sorten sind auch nicht stochastisch dominant 2. Grades gegenüber den resistenten Sorten, da die Fläche zwischen den Verteilungskurven unterhalb des Schnittpunkts wesentlich kleiner ist als die oberhalb des Schnittpunkts (vgl. BRANDES UND ODENING, 1992, S. 207).

Abbildung 68: Verteilungsfunktionen der Deckungsbeiträge ausgewählter Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung

In diesen Simulationsexperimenten schneidet das Nematodenmanagement mittels resistenten Zuckerrüben demnach vergleichsweise schlecht ab. Bei einjährigem Betrachtungszeitraum liegt die ökonomische Bekämpfungsschwelle bei ca. 2.200 Eier und Larven, während in Kapitel 3.2.4 Schwellenwerte von ca. 1.000 Eier und Larven genannt werden. Diese geringen Schwellenwerte, die teilweise nur auf Versuchsergebnissen eines Jahres beruhen, können mit dem Modellansatz nicht erreicht werden. Hauptgrund dafür ist die im Modellansatz unterstellte geringere Leistungsfähigkeit der nematodenresistenten Sorten unter Nichtbefall sowie deren nicht 100%ige Ertragtoleranz. Die jüngst vorgestellte nematodentolerante Zuckerrübensorte Pauletta würde im Rahmen einer solchen Bekämpfungsschwellermittlung wesentlich besser als die älteren nematodenresistenten Sorten abschneiden, da sie unter Nichtbefall das gleiche Ertragspotential aufweist wie Standardsorten (siehe Kapitel 2.3.2).

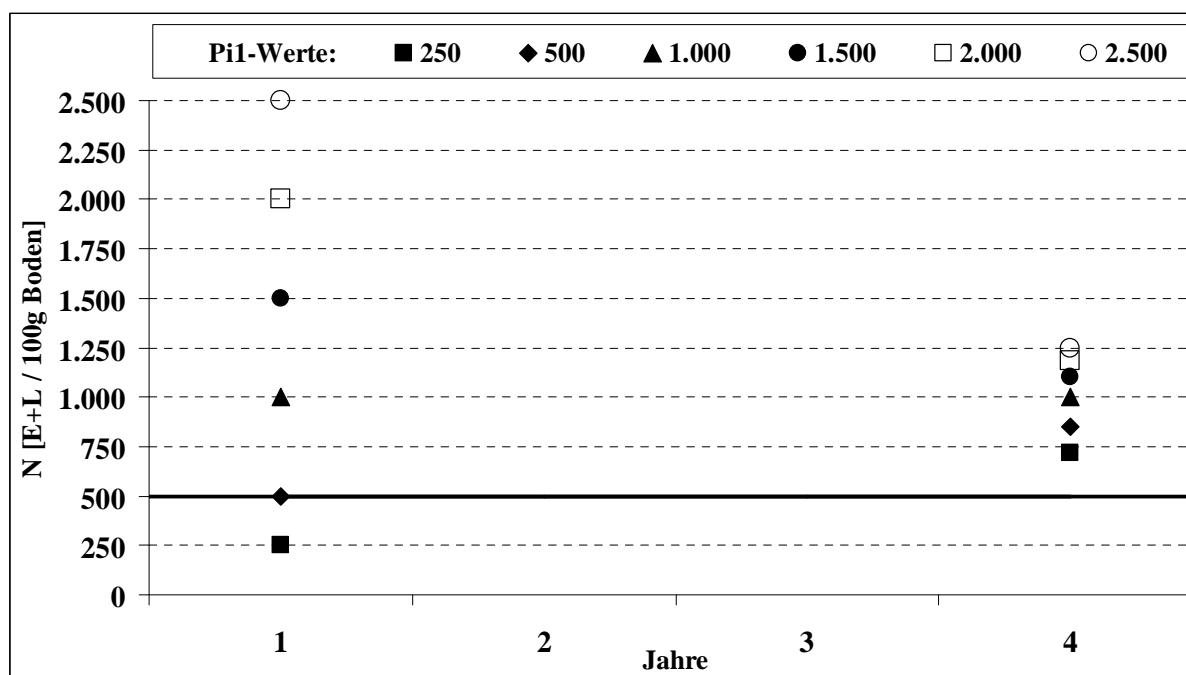
Da es sich aber bei diesen Simulationsexperimenten um eine statische Betrachtung der Bekämpfungsschwellen handelt und die unterschiedliche abundanzregulierende Wirkung des Anbaus anfälliger oder resistenter Zuckerrüben, die die Leistungsfähigkeit nachfolgender Zuckerrüben beeinflusst (Folgekosten), außer Acht gelassen wurde, sind längerfristige Betrachtungszeiträume notwendig, um diese Carry-over-Effekte erfassen und nematodenresistente Zuckerrüben umfassend beurteilen zu können. Dies erfolgt in Kapitel 5.6.

5.4 Simulationsexperimente über eine Rotation

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen des Anbaus nematodenresistenter Kruziferen unterschiedlicher Anfälligkeitsstufen in der im Rheinland weit verbreiteten dreijährigen Fruchtfolge mit Zuckerrüben und zwei Nichtwirtspflanzen untersucht. Ziel dieser Simulationsexperimente ist wie bei der Befallsprognose anhand der Schwadbeprobungsergebnisse (siehe Kapitel 3.1.2.3) die Ableitung von Aussagen über die Wahrscheinlichkeit, einen Nematodenbefall zu den im vierten Jahr folgenden Zuckerrüben zu erzielen, der unterhalb der Schadschwelle von 500 Eier und Larven liegt. Anschließend werden die ökonomischen Bekämpfungsschwellen ermittelt. Die Länge des Simulationszeitraums beträgt daher vier Jahre.

Anhand der Abbildung 69 ist zu sehen, dass es aufgrund der Dichteabhängigkeit der Nematodenvermehrung unter den Zuckerrüben und dem Populationsrückgang unter Nichtwirtspflanzen mit konstanter Abbaurate (siehe Abbildung 21) zum folgenden Zuckerrübenanbau im vierten Jahr zu einer deutlichen Vereinheitlichung der P_i -Erwartungswerte kommt. In der Ergebnistabelle (Anhang 64) ist dies vor allem anhand der ausgewiesenen P_{f1} -Werte zu erkennen. Ein zehnfacher P_{i1} -Wert (2.500 und 250 Eier und Larven) führt lediglich zu einem nicht einmal doppelt so hohen P_{f1} -Wert (4.445 und 2.556 Eier und Larven).

Abbildung 69: Mittlere P_i -Werte einer dreijährigen Rotation

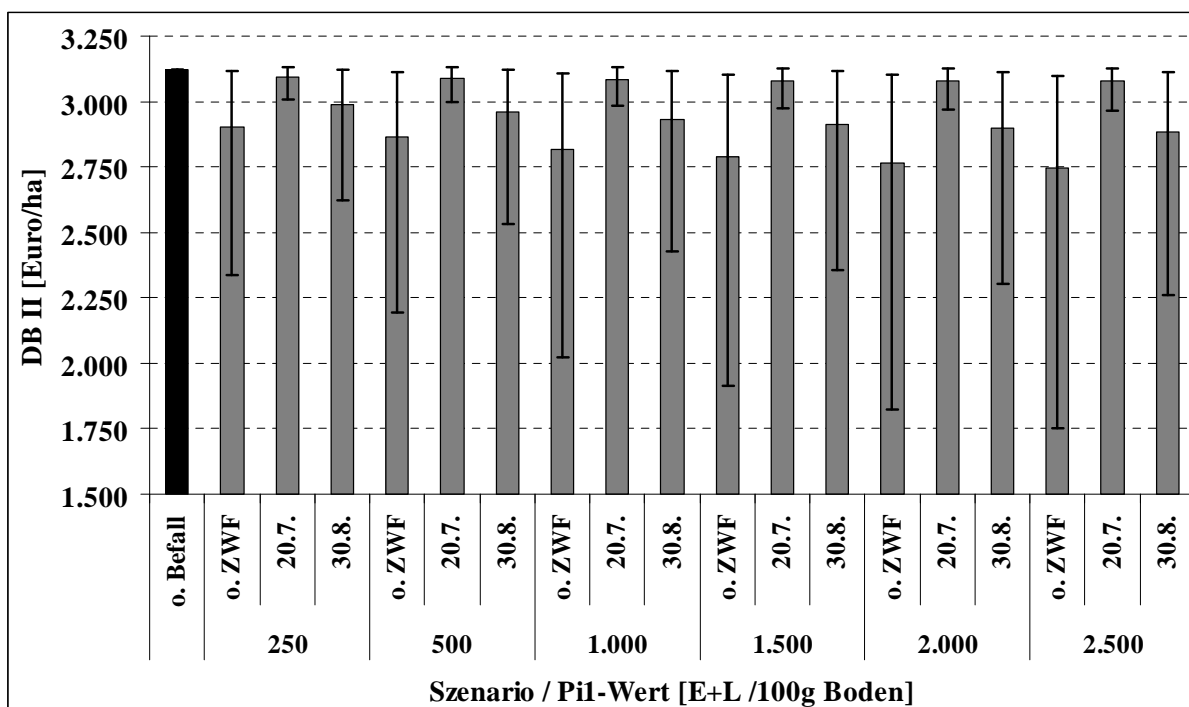


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 64

Die P_i -Erwartungswerte der Zuckerrüben im vierten Jahr liegen oberhalb der Schadschwelle. Bei Betrachtung der Modellergebnisse in Anhang 64 sind die starke Streuung des Modelloutputs sowie die Rechtsschiefe der unterstellten Lognormalverteilung der Nematodenpopulation zu erkennen. Daher werden in den folgenden Betrachtungen neben den Erwartungswerten der Befallsdichte stets auch die Wahrscheinlichkeiten ausgewiesen, mit denen die Schadschwelle in Höhe von 500 Eiern und Larven unterschritten werden kann ($p(N < 500 E+L)$). Diese beträgt in der betrachteten dreijährigen Rotation je nach Ausgangsbefallsdichte 36-55%.

Die Zwischenfruchtszenarien bestehen aus dem Anbau einer höchstresistenten Kruzifere (Anfälligkeitsstufe (AS) 1) als Zwischenfrucht im dritten Jahr, die entweder sehr früh oder sehr spät ausgedrillt wird bzw. aufläuft. Der frühe Aussaat- bzw. Auflauftermin, der 20.7., ist z.B. nach Wintergerste erreichbar und mit einem Bekämpfungswirkungsgrad von 100% verbunden (siehe Kapitel 3.2.3.1). Beim späten Auflauftermin 30.8., z.B. nach später Weizenernte, beträgt der Wirkungsgrad dagegen nur noch 50% aufgrund einer geringeren erreichbaren Temperatursumme. Wie Anhang 64 zeigt, kann durch den Zwischenfruchtanbau die Befallsdichte zu den unmittelbar nachfolgenden Zuckerrüben deutlich gesenkt werden. Allerdings steigt bei der späten Zwischenfrucht die Wahrscheinlichkeit der Schadschwellenunterschreitung nur auf 52-74% je nach Ausgangsbefallsdichte, während bei früher Zwischenfruchtsaat 94-97% erreicht werden.

Die Kosten des Anbaus der Zwischenfrüchte der AS 1 betragen unabhängig vom Aussaattermin 215 Euro/ha gemäß Anhang 57. Ob die abundanzregulierende Wirkung der resistenten Zwischenfrüchte ausreicht, durch geringere Ertragsdepressionen und damit höheren Deckungsbeiträge der nachfolgenden Zuckerrüben diese Kosten des Zwischenfruchtanbaus zu kompensieren, ist anhand Abbildung 70 zu klären. Der Erwartungswert des Deckungsbeitrags der anfälligen Zuckerrüben im vierten Jahr beträgt 3.122 Euro ohne Befall und sinkt mit zunehmendem P_{i1} - und damit auch P_{i2} -Wert auf bis zu 2.748 Euro ab, wenn keine Zwischenfrucht vorangestellt wird. Gleichzeitig nimmt die Volatilität des Deckungsbeitrags deutlich zu. So liegen bei $P_{i1} = 2.500$ Eier und Larven 90% der realisierten Deckungsbeiträge zwischen 1.752 Euro und 3.099 Euro.

Abbildung 70: Deckungsbeiträge der Zuckerrüben nach Zwischenfrüchten

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 65

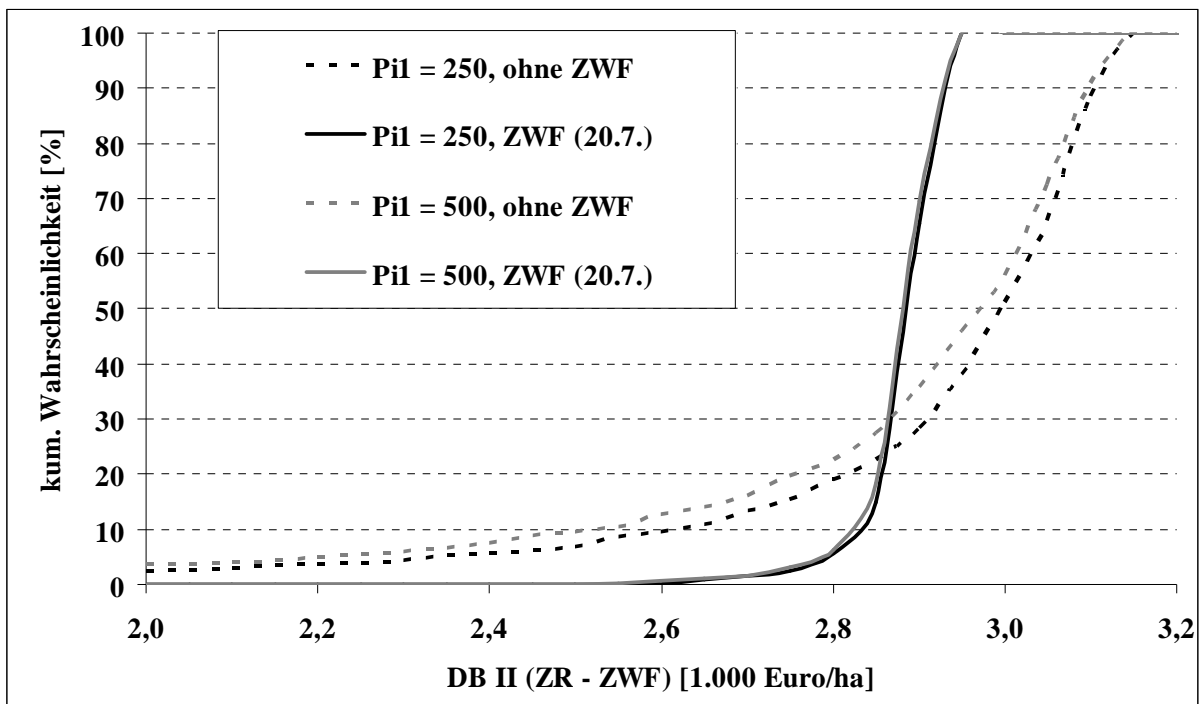
Der durch Nematodenbefall bedingte Schaden an den Zuckerrüben im vierten Jahr beträgt bei $P_{11} = 250$ Eier und Larven im Mittel $3.122 - 2.903 = 219$ Euro und bei $P_{11} = 2.500$ Eier und Larven 374 Euro, wenn keine Zwischenfrüchte angebaut werden. Um diese Beträge wird keine aktive oder passive Maßnahme im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements den Deckungsbeitrag steigern können, da er nur bei vollständiger Unterdrückung oder Ausrottung des Nematoden erzielbar wäre. Bei $P_{11} = 250$ Eier und Larven vermag der frühe Anbau einer Kruzifere der AS 1 den Erwartungswert des Deckungsbeitrags der nachfolgenden Zuckerrüben immerhin um 189 Euro gegenüber dem Zuckerrübenanbau ohne vorheriger Zwischenfrucht zu steigern. Der risikoneutrale und sich daher nur am Erwartungswert der Deckungsbeiträge orientierende Entscheidungsträger verzichtet trotz dieser Leistungssteigerung auf den Zwischenfruchtanbau bei diesem geringen Ausgangsbefall, da die erzielte Leistungssteigerung der Zuckerrüben nicht die Kosten des Zwischenfruchtanbaus kompensiert.

Bereits ab einem Ausgangsbefall von 500 Eier und Larven wendet sich das Blatt: Der Erwartungswert des Deckungsbeitrags der Zuckerrüben im vierten Jahr beträgt bei $P_{11} = 500$ Eier und Larven 3.088 Euro nach frühen Zwischenfrüchten und 2.863 Euro ohne Zwischenfrüchte. Die Erwartungswerte sind mit 1% Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant verschieden. Demnach sind die Kosten des Zwischenfruchtanbaus durch die Leistungssteigerung in Höhe von 225 Euro im Mittel mehr als gedeckt, und der risikoneutrale Entscheider baute ab dieser Befallshöhe Zwischenfrüchte an. Dies gilt allerdings nur, wenn der Auflauf der Zwischenfrucht bis zum 20.7. gewährleistet werden kann. Ist dies nicht der Fall, sondern vielmehr ein Auflaufen erst bis Ende August sichergestellt, beträgt die erzielbare Deckungsbeitragssteigerung durch den Zwischenfruchtanbau je nach Ausgangsverseuchung lediglich 84-136 Euro bei den Zuckerrüben im vierten Jahr. Die Kosten des Zwischenfruchtanbaus werden damit im Mittel nicht gedeckt, und der risikoneutrale Entscheidungsträger baute selbst bei höchstem Aus-

gangsbefall keine Zwischenfrüchte an, wenn deren Aussaat erst bis Ende August sichergestellt werden kann.

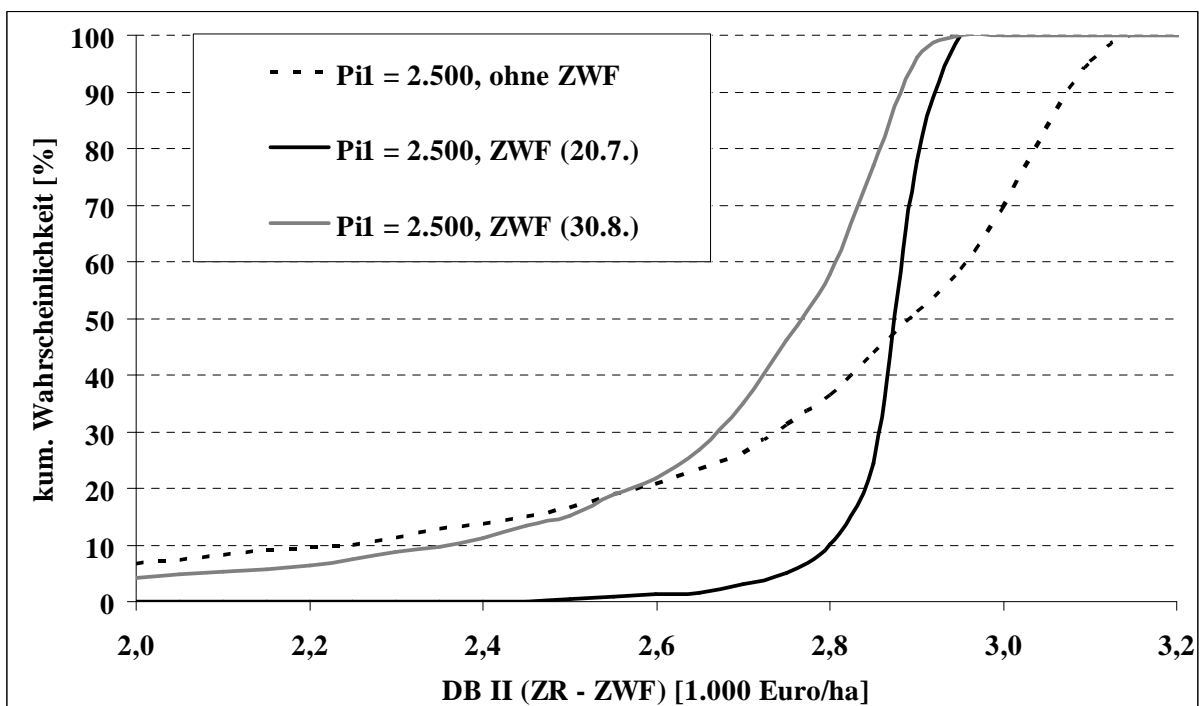
Abbildung 70 zeigt auch, dass ein wesentlicher Effekt des Zwischenfruchtanbaus die Leistungsstabilisierung der nachfolgenden Zuckerrüben ist, erkennbar an den geringeren Standardabweichungen und 90%-Intervallen beim Deckungsbeitrag der Szenarien mit Zwischenfruchtanbau. 90% der realisierten Deckungsbeiträge der Zuckerrüben im vierten Jahr liegen bei $P_{i1} = 2.500$ Eier und Larven im engen Korridor zwischen 2.964 und 3.122 Euro, wenn zuvor eine früh auflaufende Zwischenfrucht angebaut wurde.

Bei $P_{i1} = 250$ Eier und Larven beträgt die Leistungssteigerung durch frühen Zwischenfruchtanbau im Mittel lediglich 189 Euro (s.o.). Die Wahrscheinlichkeit, Leistungssteigerungen bei den Zuckerrüben oberhalb der Kosten des Zwischenfruchtanbaus in Höhe von 215 Euro zu erzielen, beträgt aber immerhin 24,5%. Selbst bei sehr spät auflaufenden Zwischenfrüchten können mit 8,6%iger Wahrscheinlichkeit die Kosten des Zwischenfruchtanbaus mindestens gedeckt werden. Zur Anwendung des Entscheidungsprinzips der stochastischen Dominanz sind in Abbildung 71 die Verteilungsfunktionen der Deckungsbeiträge der Zuckerrüben bei $P_{i1} = 250$ und 500 Eier und Larven abgebildet. Damit die Zwischenfruchtszenarien mit denen ohne verglichen werden können, sind die Kosten des Zwischenfruchtanbaus bei den Szenarien mit Zwischenfrüchten von den Deckungsbeiträgen der Zuckerrüben subtrahiert. Aufgrund des Verzichts auf Diskontierung im Rahmen dieser Simulationsexperimente entsteht durch diese periodenübergreifende Verrechnung kein Fehler. Die Verteilungsfunktionen der Szenarien mit und ohne Zwischenfruchtanbau schneiden sich, so dass stochastische Dominanz 1. Grades in keinem Fall gegeben ist. Berechnungen ergeben allerdings, dass der nicht im Wirkungsgrad eingeschränkte Zwischenfruchtanbau (Auflauf bis 20.7.) bei einem Ausgangsbefall von 500 Eiern und Larven stochastisch dominant 2. Grades gegenüber dem Verzicht auf Zwischenfruchtanbau ist, da die Fläche zwischen den Verteilungskurven unterhalb des Schnittpunktes beider Kurven größer ist als die oberhalb der Schnittpunkte (vgl. BRANDES UND ODENING, 1992, S. 207). Der Zwischenfruchtanbau wird daher ab dieser Befallshöhe auch von risikoaversen Entscheidungsträgern präferiert. Bei $P_{i1} = 250$ Eier und Larven sowie bei spätem Zwischenfruchtanbau (nicht abgebildet) ist keine stochastische Dominanz 2. Grades gegeben.

Abbildung 71: Verteilungsfunktionen des DB(ZR-ZWF) bei geringem Ausgangsbefall

Quelle: Eigene Darstellung

Entsprechendes gilt auch für einen Ausgangsbefall von 2.500 Eier und Larven. Abbildung 72 zeigt, dass der Deckungsbeitrag der Zuckerrüben nach früh auflaufenden Zwischenfrüchten wiederum stochastisch dominant 2. Grades gegenüber dem ohne vorherigen Zwischenfruchtanbau ist. Bei Zuckerrüben nach späten Zwischenfrüchten ist dies nicht der Fall.

Abbildung 72: Verteilungsfunktionen des DB(ZR-ZWF) bei hohem Ausgangsbefall

Quelle: Eigene Darstellung

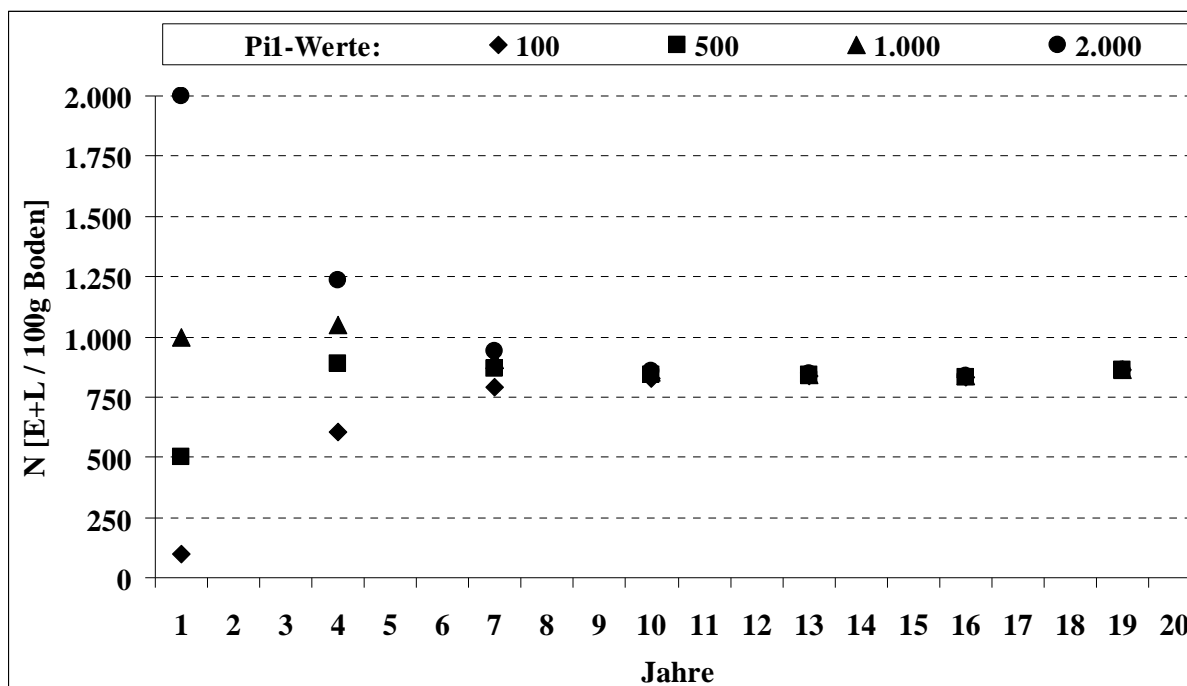
5.5 Vergleich unterschiedlicher Rotationslängen

In diesem und den folgenden Kapiteln werden unterschiedliche Fruchtfolgen und Bekämpfungsmaßnahmen über einen Zeitraum von bis zu 20 Jahren betrachtet. Mit diesem langen Simulationszeitraum werden nematologisch und damit auch ökonomisch relevante Carry-over-Effekte erfasst. Zuvor ist zu klären, ob die Wahl der Ausgangspopulationsdichte P_{i1} einen Einfluss auf die Ergebnisse der langfristigen Simulationen hat.

5.5.1 Einfluss der Ausgangspopulationsdichte auf die Simulationsergebnisse

In Abbildung 73 sind die Erwartungswerte der P_i -Werte für die dreijährige Fruchtfolge ZR-NW-NW für einen 20jährigen Simulationszeitraum dargestellt. Der Ausgangsbefall mit Nematoden zu den ersten Zuckerrüben P_{i1} beträgt 100, 500, 1.000 und 2.000 Eier und Larven. Wie bereits bei Betrachtung einer Rotation in Kapitel 5.4 ist auch hier zu sehen, dass es bereits zum nächsten Zuckerrübenanbau im vierten Jahr zu einer deutlichen Vereinheitlichung der P_i -Erwartungswerte kommt und ab dem vierten Zuckerrübenanbau in Jahr 10 praktisch nicht mehr anhand der P_i -Werte zwischen den Ausgangsbefallsdichten P_{i1} unterschieden werden kann. Weder bei der mittleren Befallsdichte zu Zuckerrüben noch in deren Streuung treten nennenswerte Unterschiede auf (siehe Anhang 66). Im weiteren Verlauf der Simulation verändern sich die P_i -Erwartungswerte nicht mehr wesentlich, d.h. die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte (FVD) ist mit Beginn der vierten Rotation im zehnten Jahr erreicht. In den folgenden Betrachtungen wird stets die Befallsdichte zum letztmaligen Zuckerrübenanbau als fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte angenommen.

Abbildung 73: Mittlere P_i -Werte einer dreijährigen Fruchtfolge im Zeitablauf



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 66

Als Erkenntnis der zuvor angestellten Berechnungen ist ableitbar, dass die folgenden 20jährigen Simulationsexperimente mit verschiedenen Szenarien aufgrund des unabhängig

von der Ausgangsverseuchung raschen Erreichens der fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichte mit nur einem P_{11} -Wert durchgeführt werden müssen. Als geeigneter Ausgangsbefall wird $P_{11} = 500$ Eier und Larven / 100g Boden gewählt.

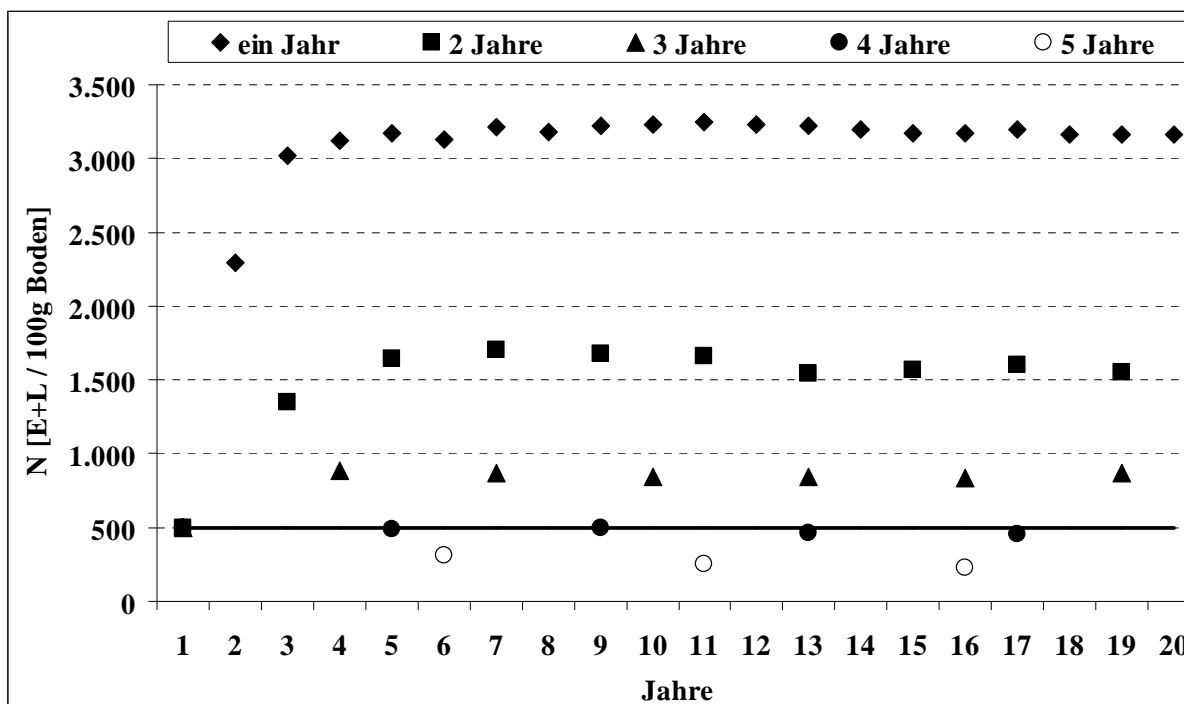
5.5.2 Simulationsergebnisse

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 dargestellt, hat die Rotationslänge einen entscheidenden Einfluss auf den Fruchtfolgeschädling *H.schachtii*. Daher werden Rotationen von anfälligen Zuckerrüben und Nichtwirtpflanzen untersucht, die eine ein- bis vierjährige Anbaupause der Wirtspflanze bzw. eine Länge von zwei (aZR-NW) bis fünf Jahren (aZR-NW-NW-NW-NW) aufweisen. Die Zuckerrübenmonokultur dient zu Vergleichszwecken. Der Anteil der Zuckerrüben an den betrachteten Fruchtfolgen beträgt demnach 100%, 50%, 33%, 25% oder 20%.

5.5.2.1 Fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichten

Zunächst werden die im Laufe des Simulationszeitraums errechneten Befallsdichten zu Zuckerrüben für die unterschiedlichen Rotationslängen betrachtet. Ziel der Berechnungen ist ein Vergleich zu den in Kapitel 3.2.2.2 vorgestellten Untersuchungsergebnissen sowie die Klärung der Frage, welche Anbaupause anfälliger Zuckerrüben notwendig ist, um bei Befall mit *H.schachtii* die Schadschwelle von 500 Eier und Larven je 100g Boden zu unterschreiten. Abbildung 74 zeigt die Entwicklung der Erwartungswerte der P_i -Werte je nach Länge der Rotation. Die statistischen Momente der Befallsdichten des letztmaligen Zuckerrübenanbaus, d.h. der fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten, sind in Anhang 67 aufgeführt.

Abbildung 74: Mittlere P_i -Werte unterschiedlicher Rotationslängen



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 67

Abbildung 74 verdeutlicht, dass sich in einer Monokultur nematodenanfälliger Zuckerrüben bereits nach drei Jahren ein Ausgangsbefall zu Zuckerrüben in Höhe von ca. 3.150 Eier und

Larven einstellt und anschließend auf diesem Niveau stabilisiert. Dies entspricht den Untersuchungsergebnissen von THIELEMANN UND STEUDEL (1973, S. 147) sowie STEUDEL (1985, S. 120), liegt aber etwas über den Untersuchungsergebnissen von ARNDT (2002, S. 76). Dieser ermittelte bei Monokultur eine mittlere Befallshöhe von 2.500 Eier und Larven. Die Differenz zwischen der fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichte und der in Anhang 20 genannten wirtsspezifischen Verseuchungsdichte anfälliger Zuckerrüben in Höhe von 5.133 Eier und Larven ist begründet in dem Populationsabbau, der in einer Monokultur in einem Zeitraum von mehr als fünf Monaten zwischen Ernte (24. Oktober) und erneuter Aussaat der Zuckerrüben (7. April) stattfindet.

Bei einer zweijährigen Rotation ergibt sich die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte zu 1.550 Eier und Larven und bei einer dreijährigen Rotationslänge zu 864 Eier und Larven. Demnach kann mit der klassischen dreijährigen Fruchtfolge die Schadschwelle, die in Abbildung 74 als durchgezogene Linie gekennzeichnet ist, ohne aktives Nematodenmanagement im Mittel nicht unterschritten werden. Wird eine jährliche Abbaurate unter Nichtwirtspflanzen in Höhe von 50% statt 40% angenommen, pendelte sich die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte der dreijährigen Fruchtfolge bei 480 Eier und Larven und damit knapp unterhalb der Schadschwelle ein (nicht dargestellt). Dies entspricht nahezu dem Ergebnis einer vierjährigen Rotation bei 40%iger Absterberate ohne Nichtwirtspflanzen, deren spezifische Verseuchungsdichte 450 Eier und Larven beträgt. Bei nur 20% Zuckerrüben in der Rotation halbiert sich der mittlere Ausgangsbefall zu Zuckerrüben auf 230 Eier und Larven. Diese rheinische Standortbedingungen widerspiegelnden Modellergebnisse verdeutlichen den Unterschied zu den Untersuchungen von ARNDT (2002, S. 76), nach denen es unter den Standortbedingungen Unterfrankens selbst bei vierjährigen Anbaupausen nicht möglich ist, den Befall vor Zuckerrüben unter der Schadschwelle zu halten.

Um zu überprüfen, ob die ermittelten fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten als signifikant verschieden angesehen werden können, werden die Ergebnisreihen der P_i -Werte am Ende des Simulationszeitraums der fünf betrachteten Rotationsszenarien dem nichtparametrischen Kruskal-Wallis- oder H-Test (vgl. HARTUNG ET AL., 1998, S. 613f.) unterzogen. Danach sind die Mittelwerte von p Datenreihen zum Niveau γ signifikant verschieden, wenn gilt

$$H > \chi_{p-1;1-\gamma}^2 \quad (51)$$

Die Quantile der χ^2 -Verteilung sind bei HARTUNG ET AL. (1998, S. 893) vertafelt. Die Ausführung des in SPSS[®] implementierten H-Tests für mehrere unabhängige Stichproben ergibt für die zu vergleichenden fünf Rotationslängen

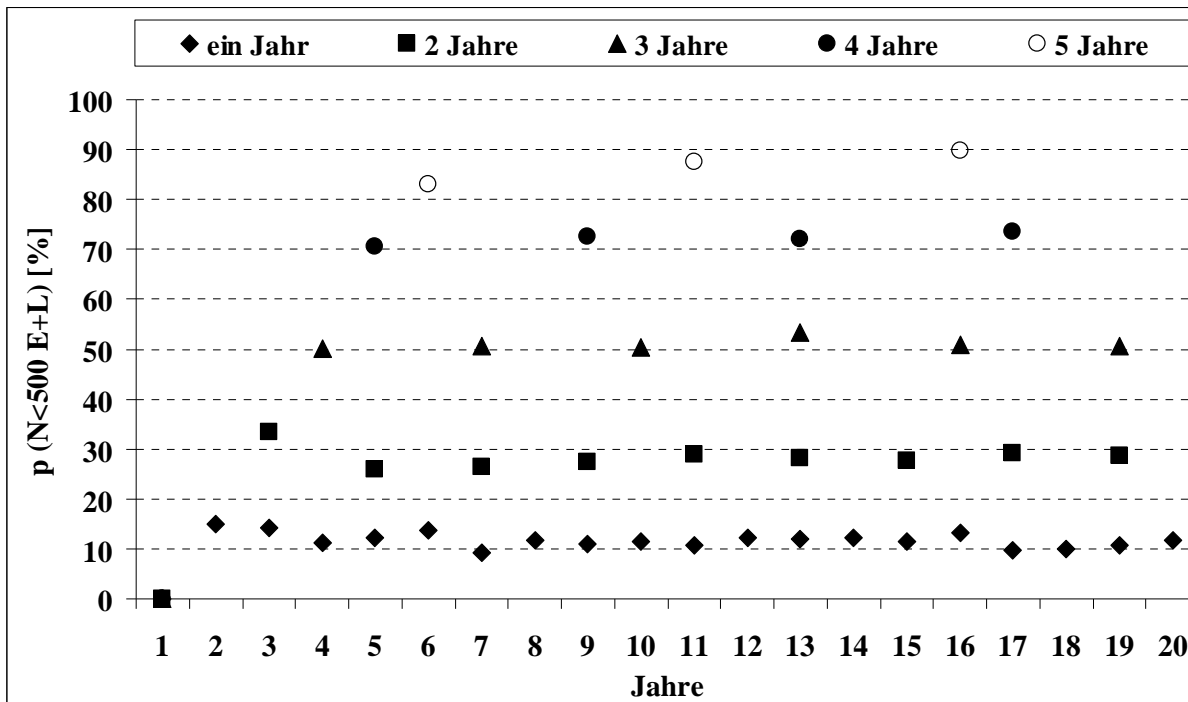
$$H = 2.173 > 13,28 = \chi_{4;0,99}^2,$$

so dass zum Niveau von 1% signifikante Unterschiede zwischen den fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten bestehen. Analog dazu werden „benachbarte“ Rotationslängen paarweise mit dem U-Test untersucht. Dabei ergeben sich zum Niveau von 1% signifikante Unterschiede zwischen den fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten aller fünf Szenarien.

Bei einer Monokultur anfälliger Zuckerrüben beträgt die mittlere spezifische Verseuchungsdichte 3.158 Eier und Larven, 90% aller P_i -Werte liegen aber innerhalb des sehr großen Bereichs von 268-9.798 Eier und Larven (siehe Anhang 67). So verwundert es nicht, dass selbst

bei Zuckerrübenmonokultur mit ca. 12%iger Wahrscheinlichkeit Ausgangsbefallsdichten unterhalb 500 Eier und Larven realisiert werden (Abbildung 75). Bei Fruchtwechsel steigt diese Wahrscheinlichkeit bereits auf über 25% an und beträgt bei dreijähriger Rotationslänge 50,5% (bei einer unterstellten Abbaurate von 50% p.a. sogar 71%, nicht dargestellt). Bei 25% Zuckerrüben in der Rotation kann mit nahezu 75%iger Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, die Schadschwelle nicht zu übersteigen und bei 20% Zuckerrüben mit 90%iger Wahrscheinlichkeit.

Abbildung 75: Schadschwellenunterschreitung je nach Rotationslänge



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 67

Die Chancen, in einer dreijährigen Fruchtfolge wie der rheinischen bei Nematodenbefall ohne aktives Nematodenmanagement unterhalb der Schadschwelle von 500 Eiern und Larven zu bleiben, sind nahezu 50:50. Die Ergebnisse verdeutlichen auch, warum in der Literatur unterschiedliche und teilweise widersprüchliche Aussagen zu den abundanzdynamischen Auswirkungen unterschiedlich langer Fruchtfolgen und bei der Bestimmung einer aus nematologischer Sicht ausreichend langen Anbaupause zu finden sind (siehe Kapitel 3.2.2.2).

Zum Vergleich mit den Modellergebnissen können die Ergebnisse von HEINRICHS (2004a) herangezogen werden. Dieser untersuchte anhand der Angaben zur Rotationslänge auf den Auftragsblätter für die Schwadbeprobungen in der Kampagne 2003, mit welcher Wahrscheinlichkeit der mit Hilfe des Abbaumodells nach SCHLANG (siehe Gleichung 12, Kapitel 4.3.2.2) prognostizierte P_1 -Wert zur nächsten Rübenaussaat überschritten wird. Wie Übersicht 17 zeigt, gaben 10,5% der Landwirte an, eine vierjährige Fruchtfolge einzuhalten. Die Schwadbeprobung dieser Landwirte ergaben P_f -Werte, aus denen prognostiziert wurde, dass in nur 9,7% der Fälle P_1 -Werte über 500 Eier und Larven zum nächsten Zuckerrübenanbau zu erwarten sind. Ein nahezu gleich großer Anteil teilnehmender Landwirte plant, Zuckerrüben in zweijähriger Rotation anzubauen. Deren Befallsdichten nach Zuckerrüben führt zu der Prog-

nose, mit ca. 35%iger Wahrscheinlichkeit Befallsdichten oberhalb der Schadschwelle zu den folgenden Zuckerrüben zu haben. Wie nicht anders zu erwarten, plant mit 75,9% die überwiegende Mehrheit der Landwirte einen Zuckerrübenanbau in dreijähriger Rotation. Nach den Berechnungen von HEINRICHS (2004a) ist hier in ca. 15% aller Fälle davon auszugehen, die Schadschwelle zu überschreiten.

Übersicht 17: Einfluss der Rotationslänge auf den folgenden P_i -Wert

<u>Geplante Rotationslänge</u>	<u>Anteil an Proben (%) (n = 734)</u>	<u>p($P_i > 500$ E+L) (%)</u>	<u>Modellergebnis für p($P_i > 500$ E+L) (%)</u>
4 Jahre	10,5	9,7	26,4
3 Jahre	75,9	15,3	49,5
2 Jahre	10,8	35,1	71,4

Quelle: HEINRICHS, 2004a und eigene Berechnungen

Im Vergleich mit diesen empirischen Erhebungen führen die Simulationsexperimente zu zwei- bis dreifach höheren Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Schadschwelle (siehe Übersicht 17), was zurückzuführen ist auf das schwache Befallsjahr 2003 sowie einen möglichen Verdünnungseffekt infolge der erstmaligen weiten Verbreitung der Schwadbeprobung in diesem Jahr (siehe Kapitel 2.2.2).

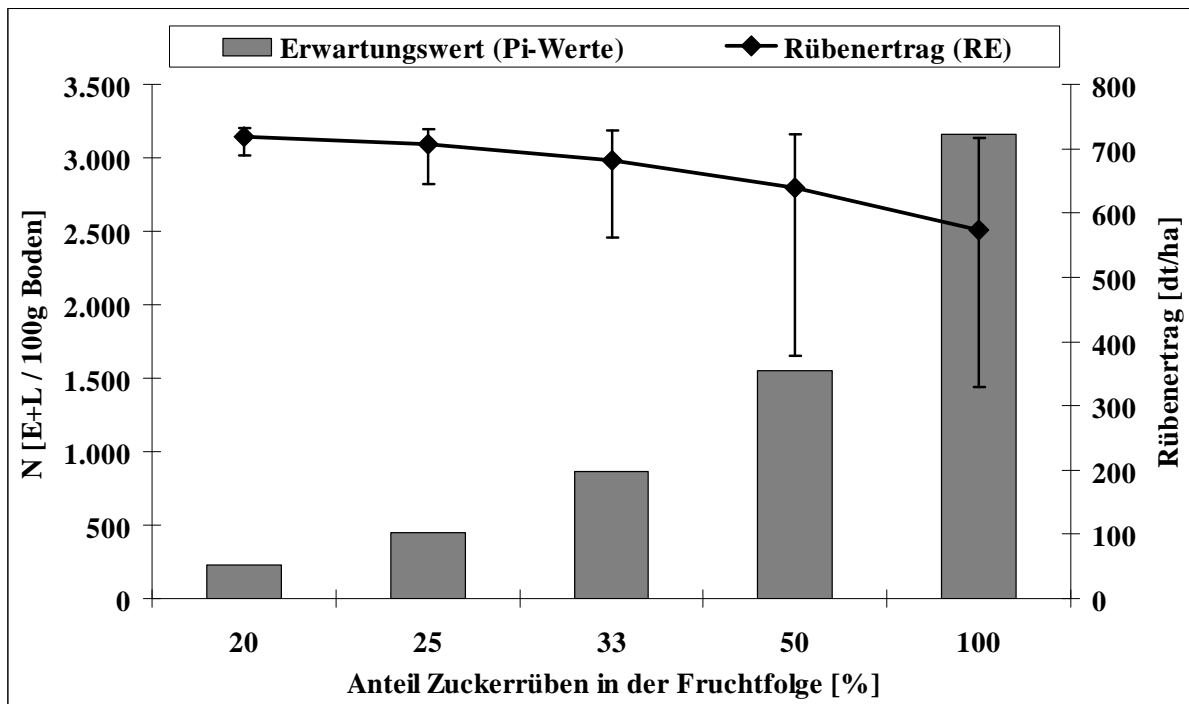
5.5.2.2 Rübenenerträge im Vergleich

Die folgende Abbildung 76 zeigt die Rübenenerträge (Erwartungswert und 90%-Intervall) und die bereits bekannten mittleren P_i -Werte in Abhängigkeit von der Länge der Fruchtfolgerotation am Ende des Betrachtungszeitraums. Die Art der Darstellung entspricht der von Abbildung 15 (Kapitel 3.2.2.2), so dass ein direkter Vergleich möglich ist. Ausgehend von einem Ertragspotential nematodenanfälliger Zuckerrüben von 733 dt/ha (Produktionsort gut) sinkt das mittlere Ertragsniveau alleine aufgrund des Nematodenbesatzes in einer fünfjährigen Fruchtfolge um 1,9% auf 719 dt/ha. Werden Zuckerrüben alle vier Jahre angebaut, beträgt das mittlere Ertragsniveau noch 707 dt/ha (-3,6%) und in der dreijährigen Rotation 681 dt/ha (-6,6%). Die nematodenbedingten Ertragsdepressionen nehmen mit abnehmender Rotationslänge weiter zu, so dass in der Zuckerrübenmonokultur ein Erwartungswert von nur noch 574 (-21,7%) dt/ha erreicht wird. Paarweise durchgeführte U-Signifikanztests erkennen zum Niveau von 1% signifikante Unterschiede der Ertragsmittelwerte. Die nematodenbedingten Ertragsdepressionen fallen aber im Mittel wesentlich geringer aus als bei ARNDT (2002, S. 76), der Ertragsrückgänge von bis zu 50% bei Monokulturanbau ermittelte. Dies ist zum einen zurückzuführen auf die insgesamt geringeren Befallsniveaus, die mit dem für rheinische Verhältnisse kalibrierten Modell errechnet werden und zum anderen auf die geringe Befall-Schadens-Relation zur Standardaussaatzeit mit einem Erwartungswert von lediglich 8% (minimal 7%, maximal 9%) je 1.000 Eier und Larven zur Saat der Zuckerrübe.

Wie bei der Bewertung der vom Modell errechneten Populationsdynamik gilt es auch hier, die Streuung der Rübenenerträge zu berücksichtigen. Diese ist zurückzuführen auf die Streuung der Nematodenpopulation sowie die stochastische Befall-Schadens-Relation. So liegen 5% der er-

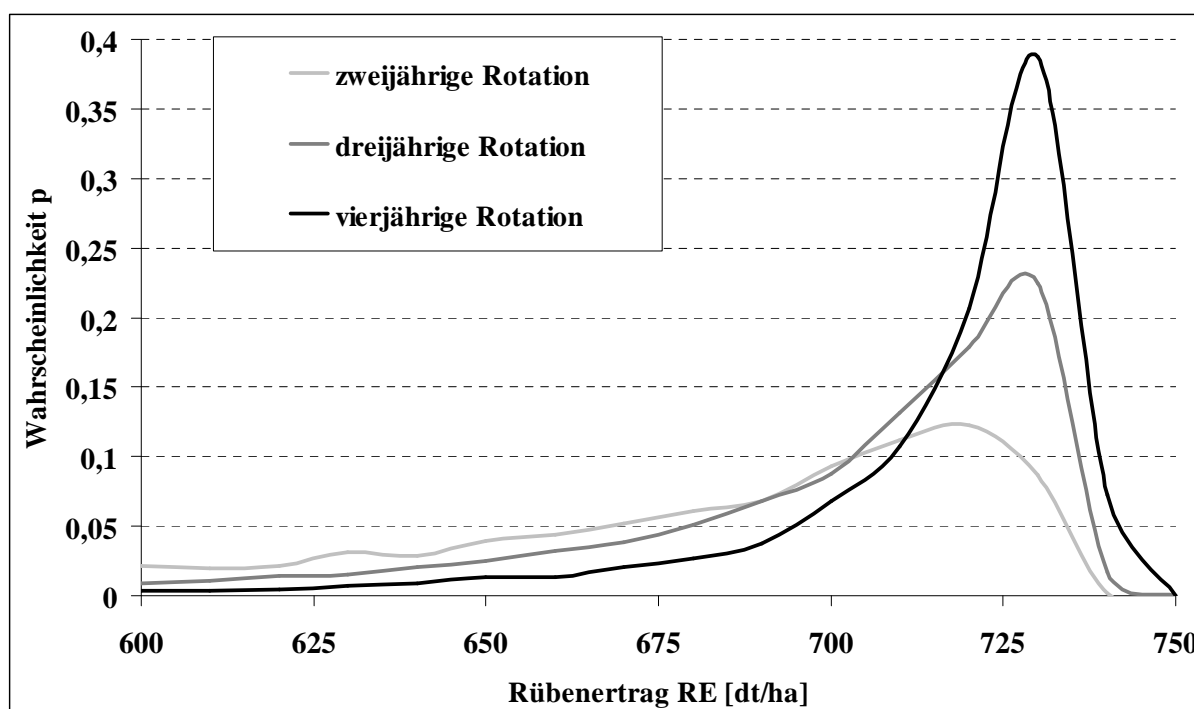
rechneten Rübenenerträge bei einer fünfjährigen Fruchtfolge unterhalb von 690 dt/ha (-5,9%), bei der dreijährigen Rotation unterhalb von 561 dt/ha (-23,5%) und in der Monokultur unterhalb von 329 dt/ha (-55%), wobei im letzten Fall aufgrund der Beschränkung der maximalen Ertragsdepressionen auf 55% (siehe Kapitel 4.4.8.3) Minimalertrag und 5%-Percentil identisch sind.

Abbildung 76: Mittlere P_i -Werte und Rübenenerträge der Rotationsszenarien



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an ARNDT, 2002, S. 76; Ergebnistabelle in Anhang 67 und 68

Die bereits aus Abbildung 76 und Anhang 68 ersichtliche Asymmetrie des 90%-Intervalls der Rübenenerträge zum Mittelwert spiegelt die Schiefe der Verteilung der erzielten Rübenenerträge wider. Die rechtsschiefe Lognormalverteilung der Nematodenpopulation bedingt eine linkschiefe Verteilung der Rübenenerträge unter Nematodenbefall, wie in Abbildung 77 dargestellt. Kennzeichnend für die linksschiefe Verteilung der erreichbaren Rübenenerträge ist der stets größere Abstand des 5%-Percentils zum Erwartungswert als der des 95%-Percentils.

Abbildung 77: Dichtefunktionen der Rübenerträge zwei- bis vierjähriger Rotationen

Quelle: Eigene Darstellung

Beim Vergleich der durch eine Verlängerung der Rotation erzielbaren Mehrerträge mit den für konstante Gesamterntemengen notwendigen Mehrerträgen (siehe Übersicht 1) wird deutlich, dass die realisierbaren Mehrerträgen weit unter den theoretisch notwendigen liegen. Um den Anteil der Zuckerrüben von 50% auf 33% zu senken (Verlängerung der Rotation von zwei auf drei Jahre), wäre eine Ertragssteigerung von 50% nötig, aber im Mittel sind nur 6,6% realisierbar. Eine Verringerung des Rübenanteils von 33% auf 25% bringt lediglich 3,8% Mehrertrag und eine weitere Reduktion auf 20% nur weitere 1,7% (siehe Anhang 68).

5.6 Aktives Nematodenmanagement bei unterschiedlichen Rotationslängen

Wie in Übersicht 17 zu sehen ist, sind zwei- bis vierjährige Fruchtfolgen im Rheinland weit verbreitet. Vor allem in zwei- und dreijährigen Fruchtfolgen ist nach den bisherigen Ergebnissen der Simulationsrechnungen mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer Überschreitung der Schadschwelle zum folgenden Zuckerrübenanbau zu rechnen. Daher werden in den folgenden Kapiteln die abundanzregulierenden und ökonomischen Auswirkungen des Anbaus nematodenresistenter Kruziferen als Zwischenfrüchte und zur Begrünung von Stilllegungsflächen sowie die des Anbaus nematodenresistenter Zuckerrüben in zwei- bis vierjährigen Fruchtfolgen untersucht und miteinander verglichen.

5.6.1 Aktives Nematodenmanagement in zweijährigen Rotationen

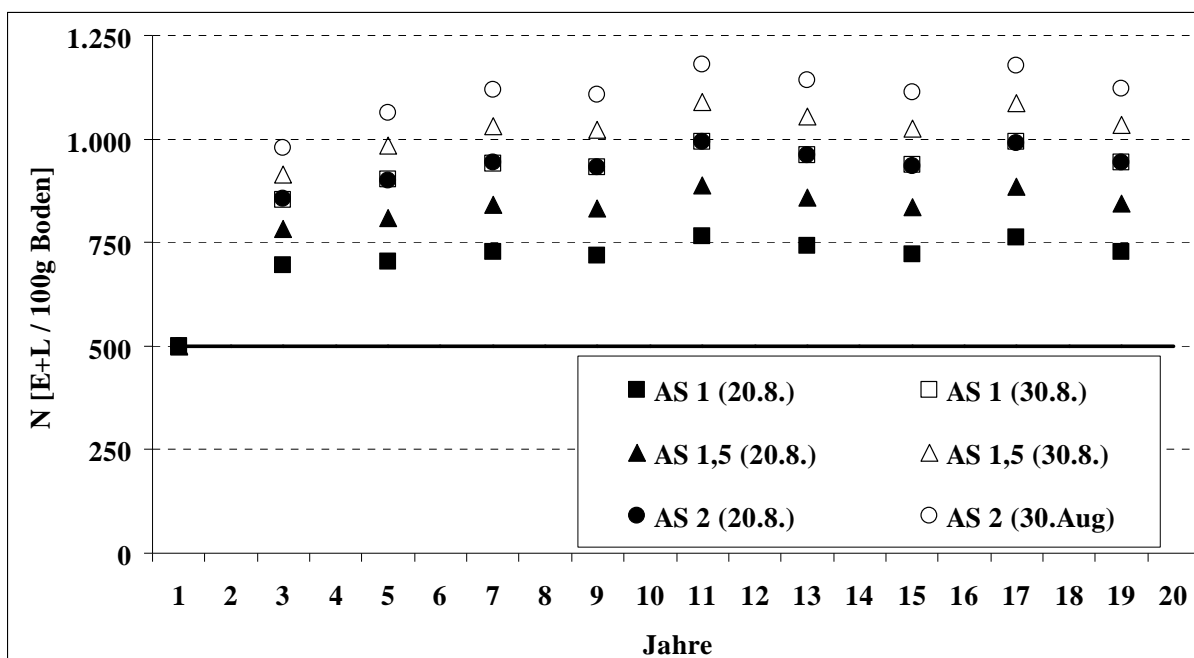
5.6.1.1 Anbau nematodenresistenter Zwischenfrüchte

Erfolgt der Anbau von Zuckerrüben im gesamten Betrieb oder -wahrscheinlicher- auf einigen Parzellen in zweijähriger Rotation, ist die Fruchtfolge in der Regel Zuckerrüben – Winterwei-

zen. Der Zwischenfruchtanbau kann in dieser Fruchtfolge nur nach dem sehr spät räumenden Rügenweizen erfolgen, so dass mit einem Auflaufen der Zwischenfrucht nicht vor dem 20. August zu rechnen und der Bekämpfungswirkungsgrad deutlich reduziert ist. Es ist daher zu untersuchen, ob der Anbau nematodenresistenter Kruziferen der Anfälligkeitsstufen 1, „1,5“ und 2 mit Auflaufzeitpunkt 20. August (ca. 62% Bekämpfungswirkungsgrad) oder 30. August (ca. 50% Wirkungsgrad) die Populationsdichte unter die Schadschwelle zu drücken vermag und ob die Kosten des Zwischenfruchtanbaus durch höhere Erträge der folgenden Zuckerrüben gedeckt werden, so dass ein höherer kumulierter Gesamtdeckungsbeitrag (GDB) des Simulationszeitraums entsteht. Eine Betrachtung späterer Auflaufzeitpunkte der Zwischenfrüchte erübrigt sich, wie die folgenden Berechnungen zeigen werden.

In Abbildung 78 sind die Simulationsergebnisse der mittleren P_i -Werte in der Fruchtfolge ZR-RW+ZWF über den Simulationszeitraum dargestellt. Im Vergleich zur fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichte einer zweijährigen Rotation ohne Zwischenfruchtanbau (siehe Abbildung 74) können die Befallsdichten zu Zuckerrüben durch den Zwischenfruchtanbau gesenkt werden, allerdings liegen die P_i -Werte weiterhin oberhalb der Schadschwelle. Wie nicht anders zu erwarten, sinkt der Bekämpfungserfolg mit zunehmender Anfälligkeitsstufe und späterem Aussaat- bzw. Auflauftermin, erkennbar an den zunehmenden fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten. Diese beträgt unter günstigsten Bedingungen, d.h. AS 1 und früher Auflauf am 20. August, mit 727 Eier und Larven nur rund die Hälfte der FVD der zweijährigen Rotation ohne Zwischenfrüchte. Im ungünstigsten Fall (AS 2, Auflauf 30. August) werden im Mittel 1.122 Eier und Larven zu Zuckerrüben erreicht, eine Reduktion um ca. 28%. Die Unterschiede zwischen den spezifischen Verseuchungsdichten der Fruchtfolgen mit Zwischenfruchtanbau und der Ausgangsfruchtfolge ohne Zwischenfrüchte sind zum Niveau von 1% signifikant.

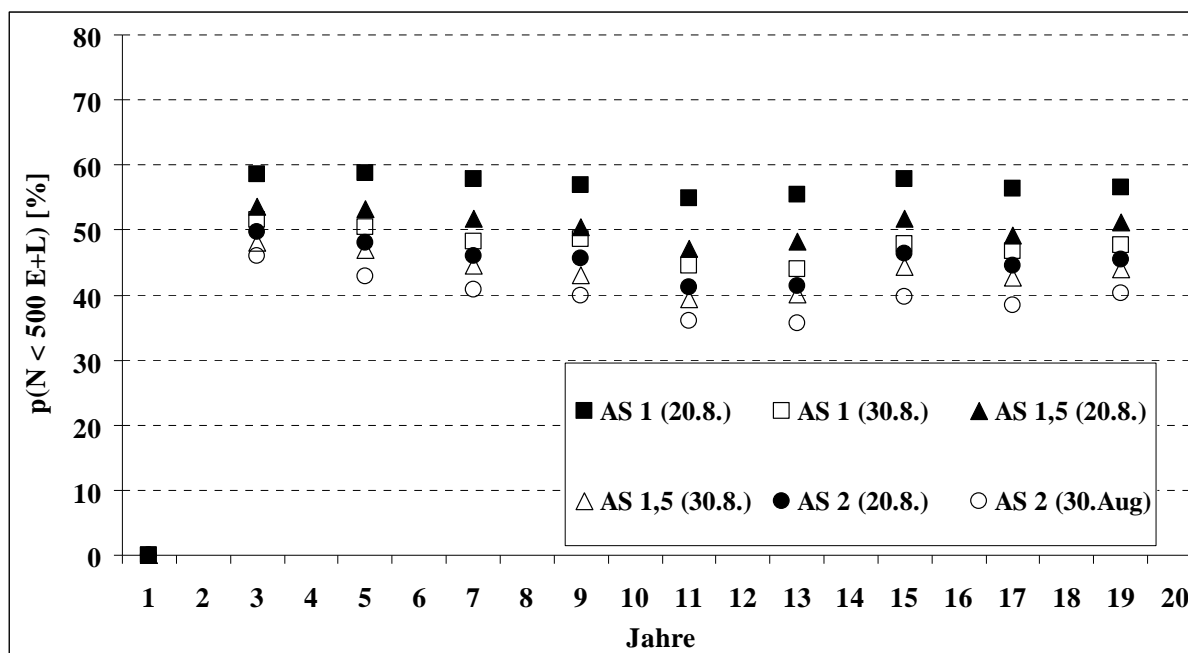
Abbildung 78: Mittlere P_i -Werte der Zwischenfruchtszenarien



Quelle: Eigene Berechnungen, Ergebnistabelle in Anhang 69

Die streuungsbedingten Wahrscheinlichkeiten, zum folgenden Zuckerrübenanbau die Schadschwelle zu unterschreiten, sind in Abbildung 79 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich unter für diese Fruchtfolge günstigen Bedingungen für die Nematodenbekämpfung die Wahrscheinlichkeit, P_i -Werte unter 500 Eier und Larven zu erreichen, gegenüber der Fruchtfolge ohne Zwischenfruchtanbau nahezu verdoppelt (siehe Anhang 69) und am Ende der Betrachtung 56,6% beträgt. Im ungünstigsten Fall kann die Wahrscheinlichkeit noch auf ca. 40% gesteigert werden.

Abbildung 79: Schadschwellenunterschreitung je nach Zwischenfruchtszenario



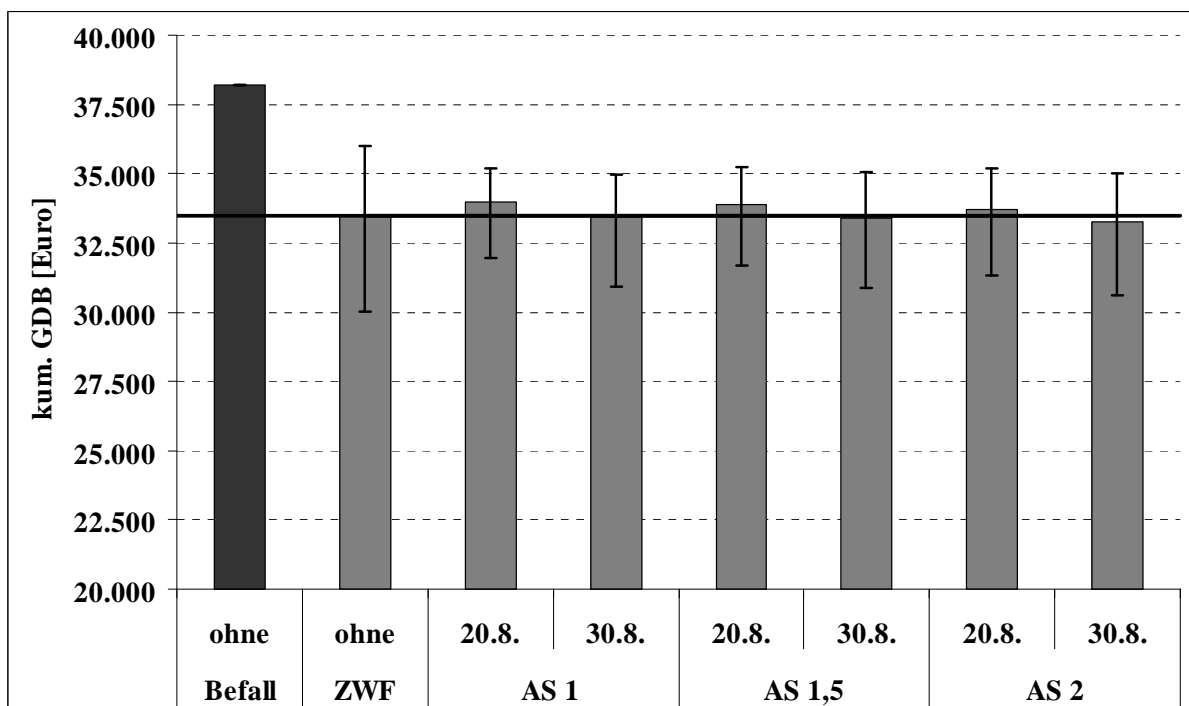
Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 69

Diesen Leistungen der nematodenresistenten Zwischenfrüchte stehen deren Kosten gegenüber, die gemäß Anhang 57 abhängig von der Anfälligkeitsstufe, aber unabhängig vom Aussaattermin 182,50 - 215 Euro/ha betragen. Zur Bewertung der ökonomischen Vorzüglichkeit des Zwischenfruchtanbaus werden die Gesamtdeckungsbeiträge der betrachteten Szenarien zur Vermeidung von „Randeffekten“ nur bis zum letztmaligen Zuckerrübenanbau im Jahr 19 kumuliert, so dass nur vollständige Rotationen betrachtet werden. Bei Einbeziehung der Jahre nach den letzten Zuckerrüben wären ansonsten Fruchtfolgen mit Nematodenmanagement systematisch gegenüber solchen ohne benachteiligt. Bei den hier betrachteten Szenarien stünden den Kosten der im 20. Jahr angebaute Zwischenfrüchte keine Leistungen mehr gegenüber.

In Abbildung 80 sind die Erwartungswerte und 90%-Intervalle der kumulierten Gesamtdeckungsbeiträge dargestellt. Ohne Nematodenbefall erzielte die Fruchtfolge ZR-RW einen Gesamtdeckungsbeitrag in Höhe von ca. 38.180 Euro, der unter den getroffenen Annahmen deterministisch ist. Alleine durch den Befall mit *H. schachtii* sinkt der Gesamtdeckungsbeitrag im Mittel um 4.700 Euro (-12,3%) bzw. bei zehnmaligem Zuckerrübenanbau innerhalb des Simulationszeitraums um 470 Euro/ha Zuckerrübe, wenn keinerlei Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Hinzu kommt eine deutliche Streuung mit 90% der Realisationen zwischen 30.034 Euro (-21,3%) und 36.020 Euro (-5,6%). Die Gesamtdeckungsbeiträge der Rotationen mit verschiedenen Zwischenfruchtszenarien unterscheiden sich untereinander und gegenüber

der Fruchtfolge ohne Zwischenfruchtanbau nur gering. Es zeigt sich aber, dass der Einfluss des Auflauftermins größer ist als der der Anfälligkeitsstufe. So liegen die Erwartungswerte des Gesamtdeckungsbeitrags der Rotationen mit frühem Auflaufdatum (20.8.) über dem Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge ohne Zwischenfrüchte. Bis auf das Szenario mit Kruziferen der Anfälligkeitsstufe 2 sind die Unterschiede signifikant bei 5% Toleranzniveau nach dem paarweise durchgeführten U-Test. Alle Szenarien, in denen die Zwischenfrüchte erst bis zum 30.8. auflaufen, weisen dagegen zum Niveau von 1% signifikant niedrigere Gesamtdeckungsbeiträge gegenüber der Fruchtfolge ohne Gegenmaßnahmen auf.

Abbildung 80: Gesamtdeckungsbeiträge der Zwischenfruchtszenarien



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 70

In einer zweijährigen Fruchtfolge aus Rüben und Weizen können nematodenresistente Zwischenfrüchte demnach kaum zu einer erwünschten Steigerung des kumulierten Gesamtdeckungsbeitrags beitragen, ein durchaus nicht unrealistischer später Auflauf Ende August senkt sogar den Erwartungswert der Zielgröße. Ein risikoneutraler Entscheidungsträger verzichtete daher auf den Zwischenfruchtanbau, wenn deren Auflauf nicht bis zum Ende der zweiten Augustdekade sichergestellt ist. Andererseits zeigen die Simulationsergebnisse, dass die abundanzregulierende Wirkung des Zwischenfruchtanbaus die Streuung des Gesamtdeckungsbeitrags deutlich einschränkt. Auch das 95%-Percentil wird gesenkt, da die Kosten des Zwischenfruchtanbaus wirkungsunabhängig anfallen.

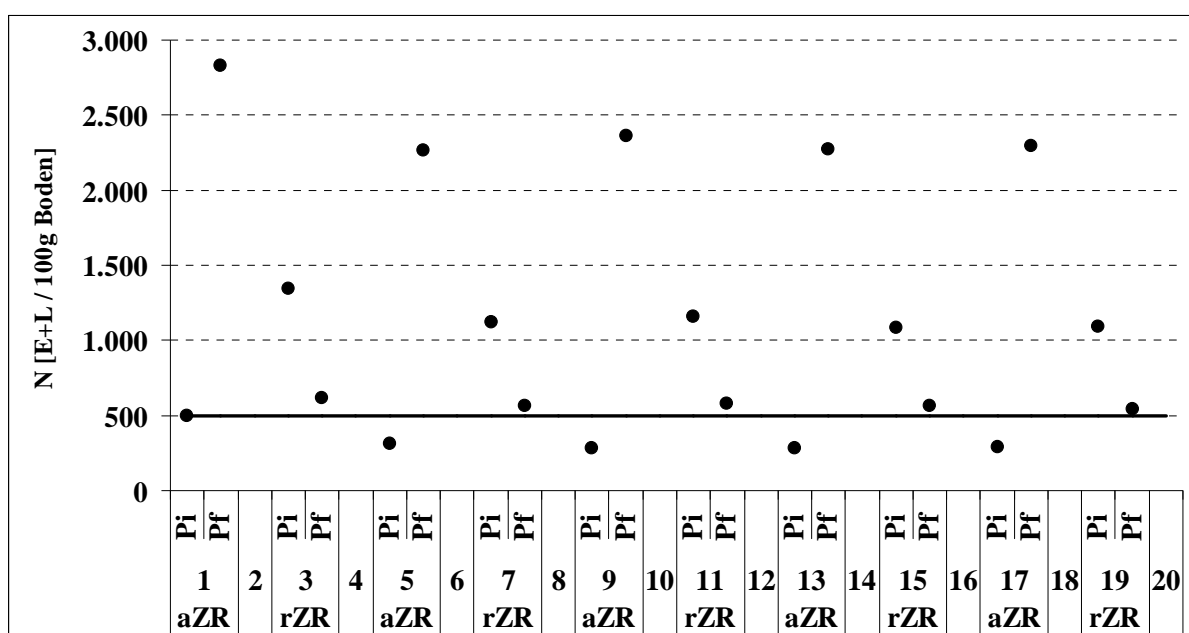
5.6.1.2 Anbau nematodenresistenter Zuckerrüben

Der ausschließliche Anbau resistenter Zuckerrüben ist nicht nur unnötig, weil durch die befallssenkende Wirkung dieser Sorten und der anschließenden Nichtwirtspflanze die Populationsdichte des Nematoden zum folgenden Zuckerrübenanbau deutlich gesenkt wird und wieder leistungsfähigere anfällige Sorten zum Einsatz kommen können. Er ist auch aufgrund der Gefahr der Pathotypenbildung beim Schaderreger abzulehnen (siehe Kapitel 3.2.5). Daher

wird an dieser Stelle nur der Anbau anfälliger und resistenter Zuckerrübensorten im Wechsel betrachtet, d.h. die Fruchtfolge aZR-RW-rZR (Resistenzmanagement).

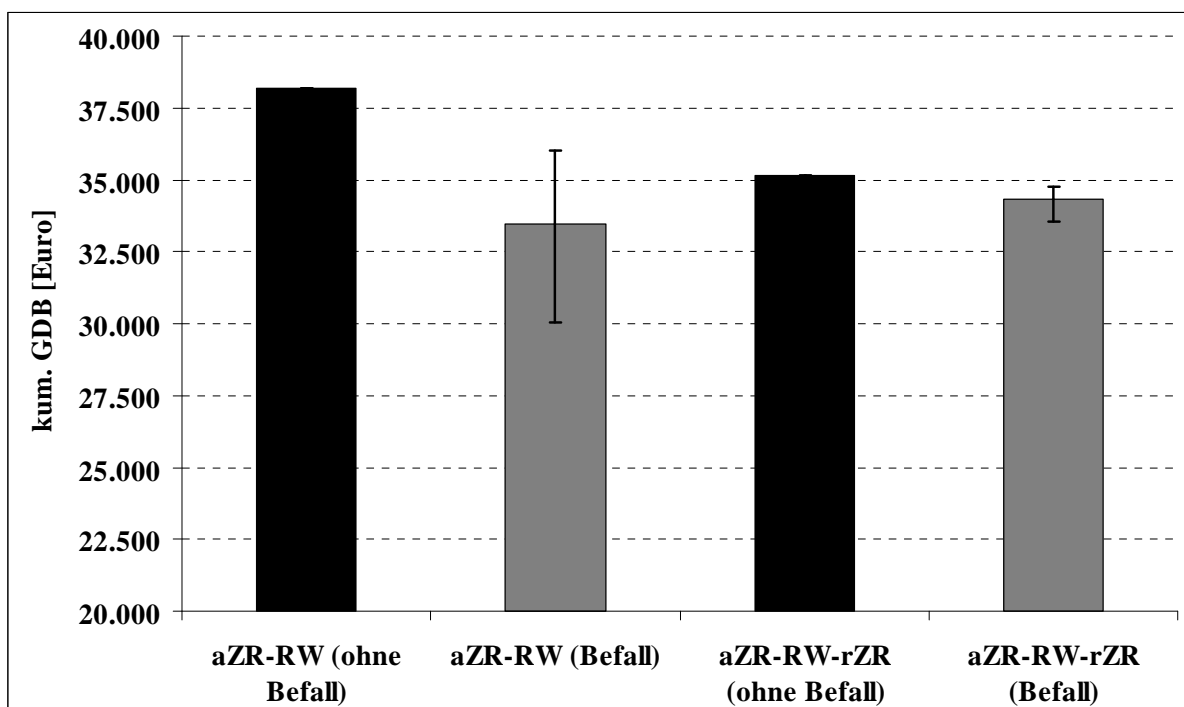
Abbildung 81 zeigt die Erwartungswerte der P_i - und P_f -Werte dieser Fruchtfolge, um die unterschiedlichen Auswirkungen der Zuckerrüben auf die Schaderregerpopulation zu demonstrieren. Während sich der Ausgangsbefall zu resistenten Zuckerrüben im Mittel bei ca. 1.100 Eier und Larven einpendelt, sind zur Aussaat der anfälligen Zuckerrüben P_i -Werte von ca. 290 Eier und Larven zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit, dass zu anfälligen Zuckerrüben die Schadschwelle unterschritten wird, beträgt daher ca. 86% (siehe Anhang 71). Die abundanzregulierende Wirkung der nematodenresistenten Zuckerrüben übertrifft somit die der wirkungsgradbeschränkten Zwischenfrüchte bei zweijähriger Fruchtfolge.

Abbildung 81: Mittlere P_i - und P_f -Werte bei Resistenzmanagement



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 71

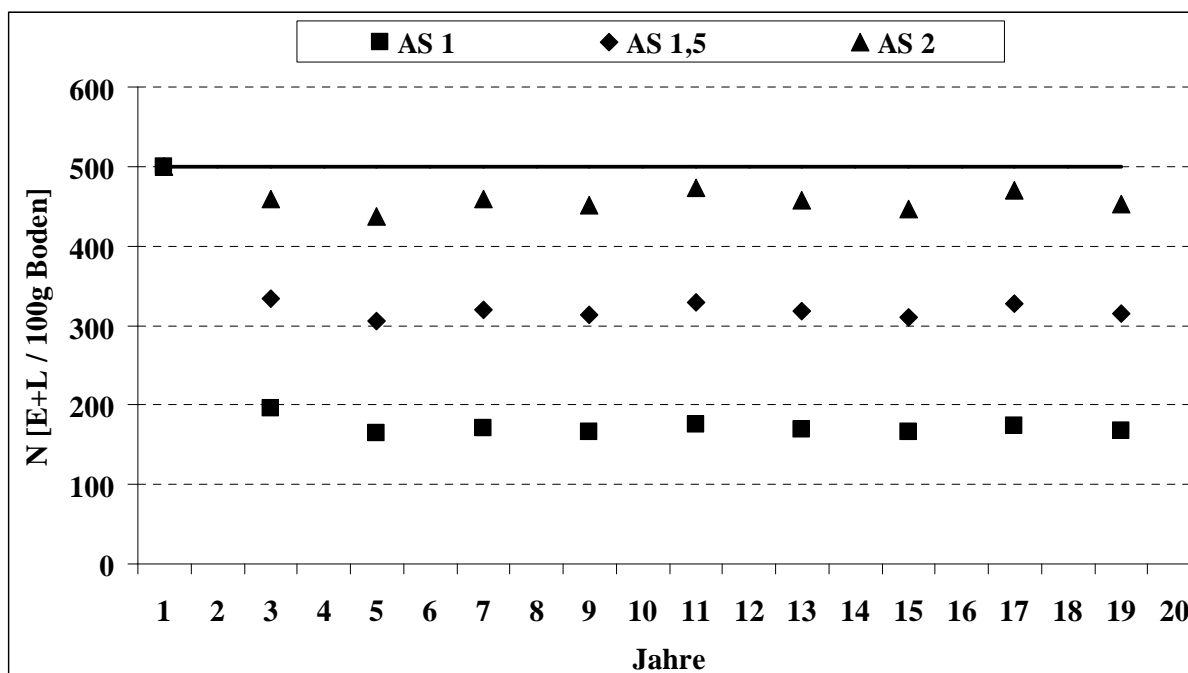
Die ökonomischen Auswirkungen des Anbaus resistenter Zuckerrüben beruhen auf deren Minderertrag bei geringem Nematodenbefall, schlechterer innerer Qualität, weitgehender Ertragstoleranz sowie auf der gesteigerten Ertragsleistung der nachfolgenden anfälligen Sorten. Aus Abbildung 82 wird ersichtlich, dass ohne vorhandenen Nematodenbefall der Anbau nematodenresistenter Zuckerrübensorten mit einer deutlichen Erfolgsminderung verbunden ist, da der Gesamtdeckungsbeitrag mit 35.132 Euro 8% unter dem der Standardfruchtfolge liegt. Unter Befall ergibt sich dagegen ein Gesamtdeckungsbeitrag der Fruchtfolge mit resistenten Zuckerrüben in Höhe von 34.326 Euro, der lediglich 2,3% unter dem ohne Befall liegt und gleichzeitig den mittleren Deckungsbeitrag der Ausgangsfruchtfolge unter Befall um 846 Euro oder 2,5% übersteigt (siehe Anhang 72). Der Unterschied zwischen den Fruchtfolgen mit und ohne resistente Zuckerrüben unter Befall ist zum Niveau von 1% signifikant. Auch gegenüber der zweijährigen Fruchtfolge mit resistenten Zwischenfrüchten der Note 1 und Auf- lauf am 20. August ergibt sich eine signifikante Differenz des mittleren Gesamtdeckungsbeitrags von 339 Euro oder +1,0%. Gleichzeitig ist mit dem Anbau der resistenten Zuckerrüben eine deutliche Verringerung der Streuung des Gesamtdeckungsbeitrags verbunden.

Abbildung 82: Gesamtdeckungsbeitrag bei Resistenzmanagement im Vergleich

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 72

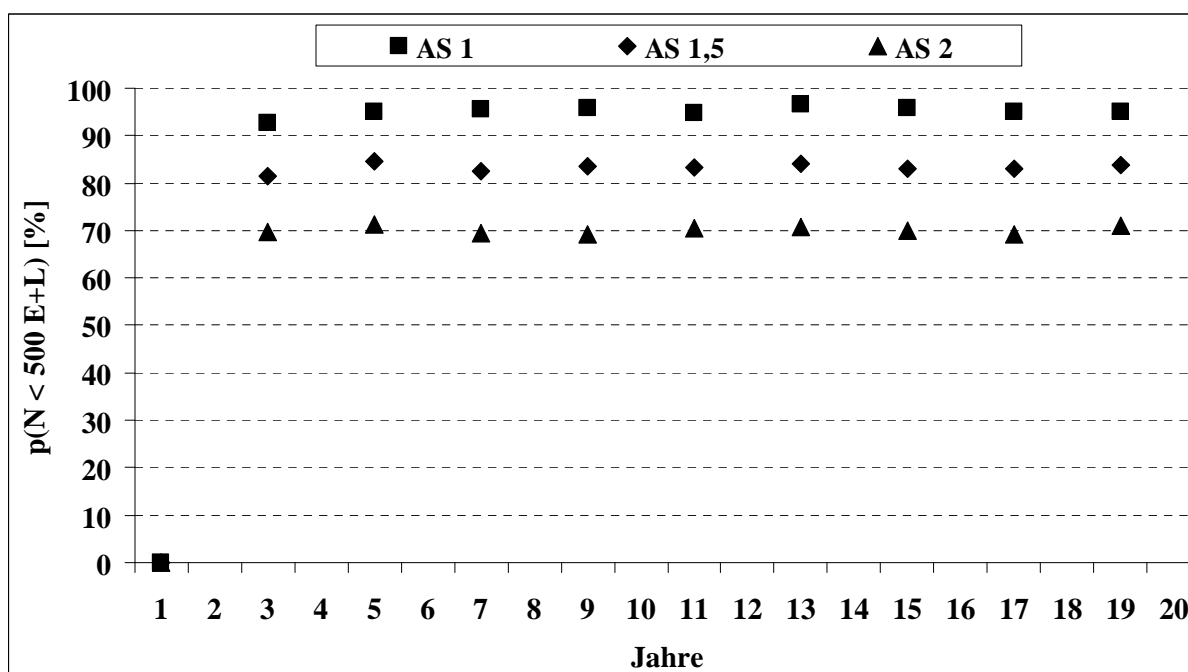
5.6.1.3 Anbau nematodenresistenter Kruziferen auf Flächenstilllegung

Als Konsequenz aus dem mit geringen Bekämpfungswirkungsgraden verbundenen Zwischenfruchtanbau nach Rübenweizen und aufgrund der Tatsache, dass ohnehin Flächen stillgelegt werden müssen, wird an dieser Stelle die zweijährige Rotation mit der Fruchtfolge ZR-rFSL untersucht. Die Flächenstilllegung wird mit einer nematodenresistenten Kruzifere unterschiedlicher Anfälligkeitsstufen begrünt. Der hohe Bekämpfungswirkungsgrad führt gegenüber den Zwischenfruchtszenarien zu signifikant niedrigen fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten (siehe Abbildung 83) zwischen 170 und 450 Eier und Larven. Ohne den wirkungsgradsenkenden Einfluss der Auflaufzeit wie beim Zwischenfruchtanbau zeigen sich die großen Unterschiede zwischen den abundanzregulierenden Wirkungen resistenter Kruziferen unterschiedlicher Anfälligkeitsstufen. Während mit Kruziferen der Anfälligkeitsstufe 1 die Populationsdichte des Rübennematoden bis nahezu an die Nachweisgrenze gesenkt werden kann und die Schadschwelle in 95% der Fälle unterschritten wird (Abbildung 84), vermag eine Kruzifere der Anfälligkeitsstufe 2 die Population im Mittel nur knapp, aber unter Berücksichtigung der Streuung immerhin noch in 71% der Fälle, unter die Schadschwelle zu senken.

Abbildung 83: Mittlere P_i -Werte der Stilllegungsszenarien

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 73

Abbildung 84: Schadschwellenunterschreitung je nach Stilllegungsszenario

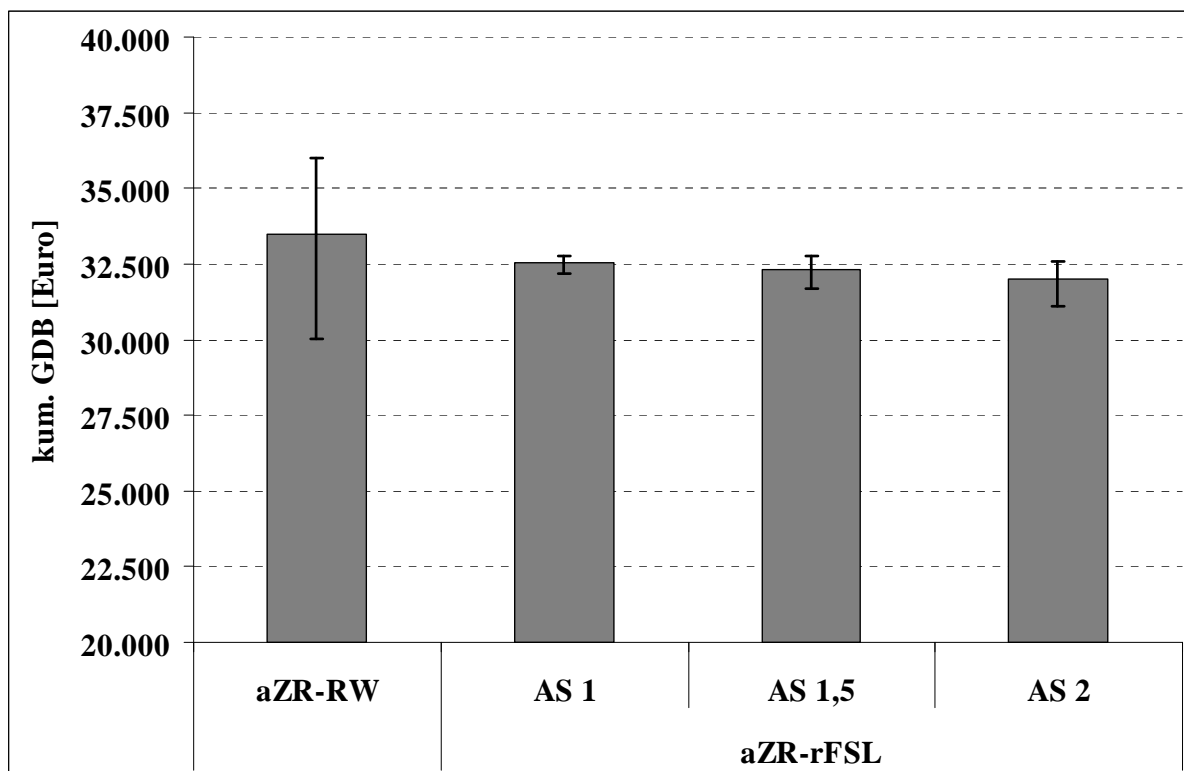


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 73

Zugunsten des Nematodenmanagements mit Flächenstilllegung entfällt der Anbau des ertragreichen Rügenweizens. Abbildung 85 und Anhang 74 zeigen, dass diese Opportunitätskosten im Mittel nicht durch höhere Deckungsbeiträge der Zuckerrüben in der Fruchtfolge ausgeglichen werden können. Der Erwartungswert des bis zum letzten Zuckerrübenanbau im Jahr 19 kumulierten Gesamtdeckungsbeitrags der Rotationen mit Flächenstilllegung liegt 2,8% (AS 1) bis 4,4% (AS 2) unter dem der zweijährigen Standardfruchtfolge bei Befall. Die Stilllegungs-

szenarien unterscheiden sich untereinander nur gering, aber paarweise signifikant bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit. Der streuungsmindernde Effekt des Nematodenmanagements ist bei der hoch wirksamen Flächenstilllegungsvariante sehr deutlich erkennbar und umso geringer, je mehr die Bekämpfungsbedingungen (hier: Anfälligkeitsstufe) vom Optimum abweichen.

Abbildung 85: Gesamtdeckungsbeiträge der Stilllegungsszenarien



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 74

Die Aussagen bezüglich der Deckungsbeitragsdifferenzen gelten nur für den Fall, dass die Flächenstilllegung mit resistenten Kruzifern unter rein nematologischen Aspekten über das Mindestmaß ausgedehnt oder in die Fruchtfolge aufgenommen wird und dabei das Getreide zurückdrängt, das z.B. als Energieweizen auch eine alternative Nutzungsform der Flächenstilllegung darstellt (siehe Kapitel 3.2.3.2). Ist eine Flächenstilllegung mit Klee-Gras-Begrünung ohnehin in die betrachtete Fruchtfolge integriert, betragen die Opportunitätskosten des aktiven Nematodenmanagements lediglich maximal 20 Euro, die sich aus der Differenz der Saatgutkosten für die Begrünung ergeben (siehe Anhang 57). Die nicht abgebildete Fruchtfolge aZR-FSL (ohne Nematodenbekämpfung) erzielt einen Gesamtdeckungsbeitrag in Höhe von 28.687 Euro, so dass die Nutzung der Flächenstilllegung zum Nematodenmanagement durch die Reduktion der Befallsdichten auf jeden Fall zu einer signifikanten Gesamtdeckungsbeitragssteigerung führt.

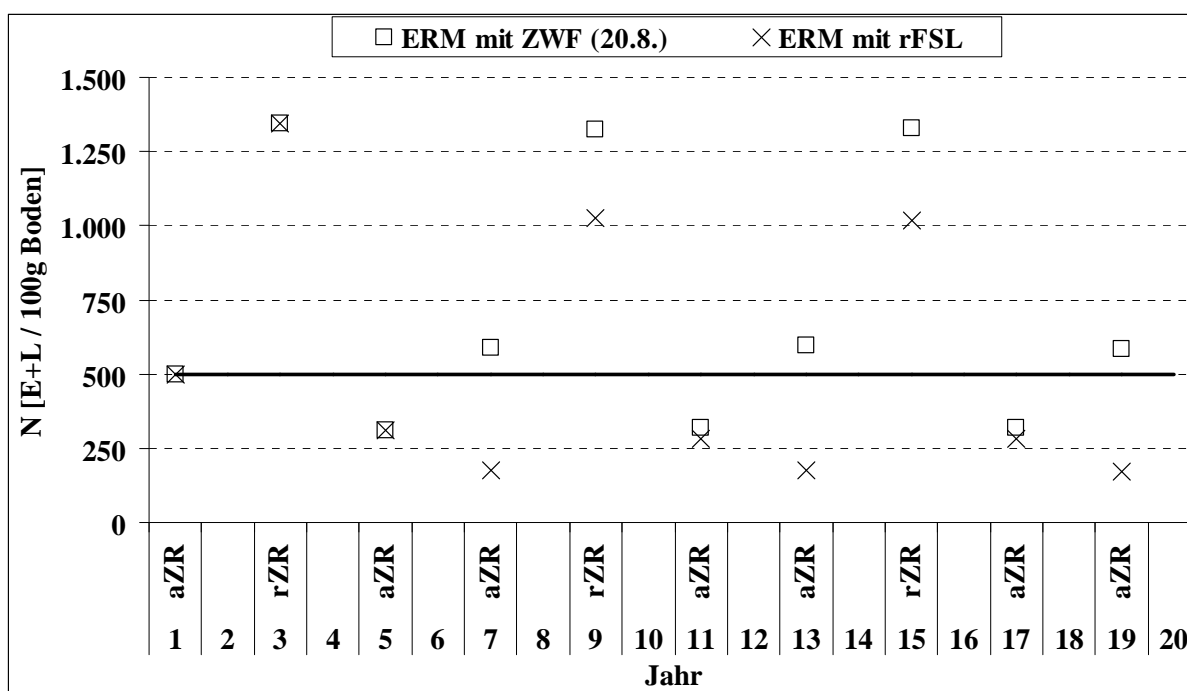
5.6.1.4 Erweitertes Resistenzmanagement

In der zweijährigen Rotation führte der Anbau nematodenresistenter und anfälliger Zuckerrüben im Wechsel, das Resistenzmanagement, bisher zum höchsten mittleren Gesamtdeckungsbeitrag, bedeutet allerdings den Anbau resistenter Zuckerrüben einmal in vier Jahren. Um den Selektionsdruck auf Resistenzbrecher weiter zu reduzieren, bietet sich eine kombinierte Ne-

matodenbekämpfung mit resistenten Zuckerrüben und Kruziferen als Zwischenfrüchte oder auf Flächenstilllegung im Wechsel an (erweitertes Resistenzmanagement, ERM). Im Folgenden werden daher die Fruchtfolgen aZR-RW-rZR-RW-aZR-RW+ZWF und aZR-RW-rZR-RW-aZR-rFSL betrachtet, in denen der Anbau resistenter Zuckerrüben auf einmal in sechs Jahren ausgedehnt ist. Die resistenten Kruziferen haben die Anfälligkeitsstufe 1 und laufen, als Zwischenfrüchte angebaut, früh bis zum 20. oder spät bis zum 30. August auf. Durch den Wechsel kommen die betrachteten Managementmaßnahmen resistente Zuckerrübe, resistente Zwischenfrucht bzw. Flächenstilllegung im 20jährigen Simulationszeitraum nur jeweils dreimal zum Einsatz.

Die beiden der Übersicht halber betrachteten Fruchtfolgen mit früh auflaufender Zwischenfrucht und Flächenstilllegung unterscheiden sich in den ersten fünf Jahren nicht, wie auch in Abbildung 86 und Anhang 75 zu sehen ist. Anschließend senkt die Stilllegungsbegrünung die Ausgangsverseuchung zu anfälligen Zuckerrüben in den Jahren 7, 13 und 19 mit P_i -Werten von ca. 170 Eiern und Larven wie zu erwarten deutlich unter die Schadschwelle. Die resistente Zwischenfrucht dagegen vermag die Ausgangsverseuchung zu den Zuckerrüben in den Jahren 7, 13 und 19 nur auf ca. 585 Eier und Larven zu senken. Die Ergebnisse des späteren Auflauftermins liegen nahezu auf gleicher Höhe und sind nicht in der Abbildung dargestellt. Die P_i -Werte der anfälligen Zuckerrüben nach resistenten Zuckerrüben in den Jahren 5, 11 und 17 liegen mit ca. 320 Eiern und Larven unterhalb der Schadschwelle.

Abbildung 86: Mittlere P_i -Werte des erweiterten Resistenzmanagements

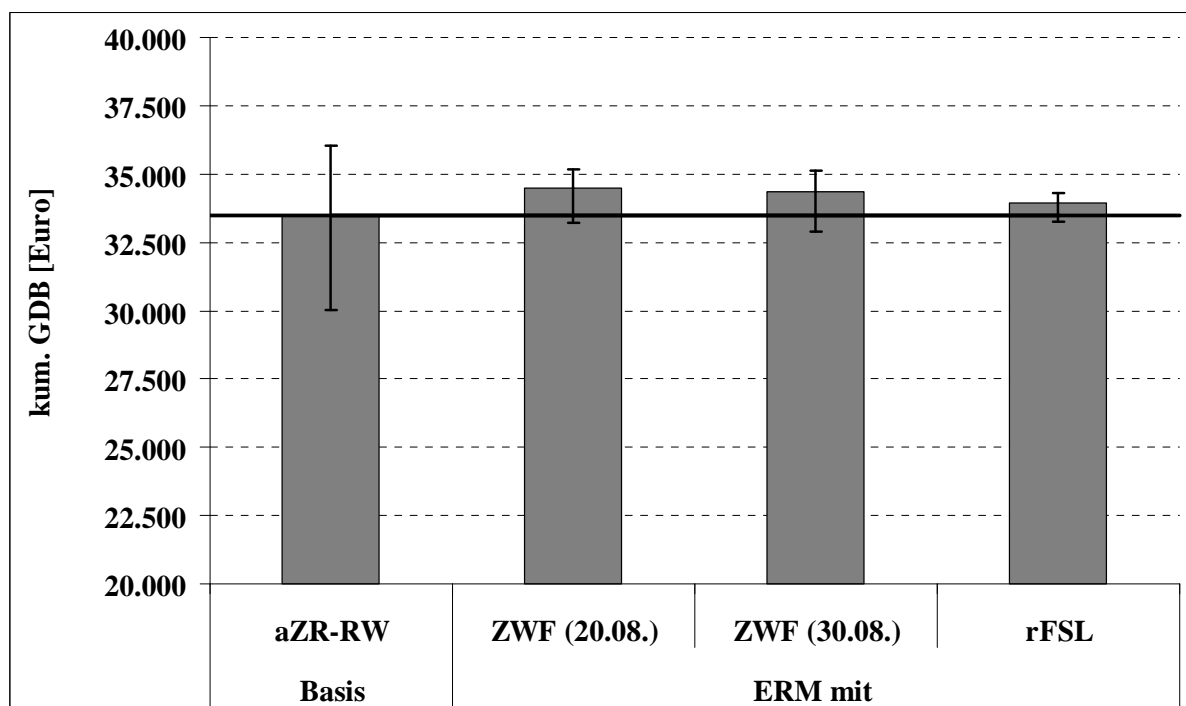


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 75

Mit dem erweiterten Resistenzmanagement können signifikant höhere mittlere Gesamtdeckungsbeiträge erzielt werden als mit der Ausgangsfruchtfolge aus anfälligen Zuckerrüben und Rübenweizen (Abbildung 87). Mit 34.490 Euro erreicht die Fruchtfolge mit resistenten Zuckerrüben und Zwischenfrüchten den bisher höchsten Gesamtdeckungsbeitrag, wenn der Auflauf der Zwischenfrucht bis zum 20. August sichergestellt werden kann. Läuft die Zwi-

schenfrucht aufgrund der späträumenden Vorfrucht Rübenweizen erst bis zum 30. August auf, wird mit 34.360 Euro ein Ergebnis erzielt, das sich bei 5% Irrtumswahrscheinlichkeit nicht signifikant von dem bei frühem Auflauf erzielten unterscheidet. Die Verwendung der Flächenstilllegung im Rahmen des ERM führt ebenfalls noch zu einem Gesamtdeckungsbeitrag oberhalb dessen der Ausgangsfruchtfolge und reduziert die Ergebnisstreuung aufgrund der effektiven Befallssenkung am deutlichsten.

Abbildung 87: Gesamtdeckungsbeiträge der Resistenzmanagementszenarien

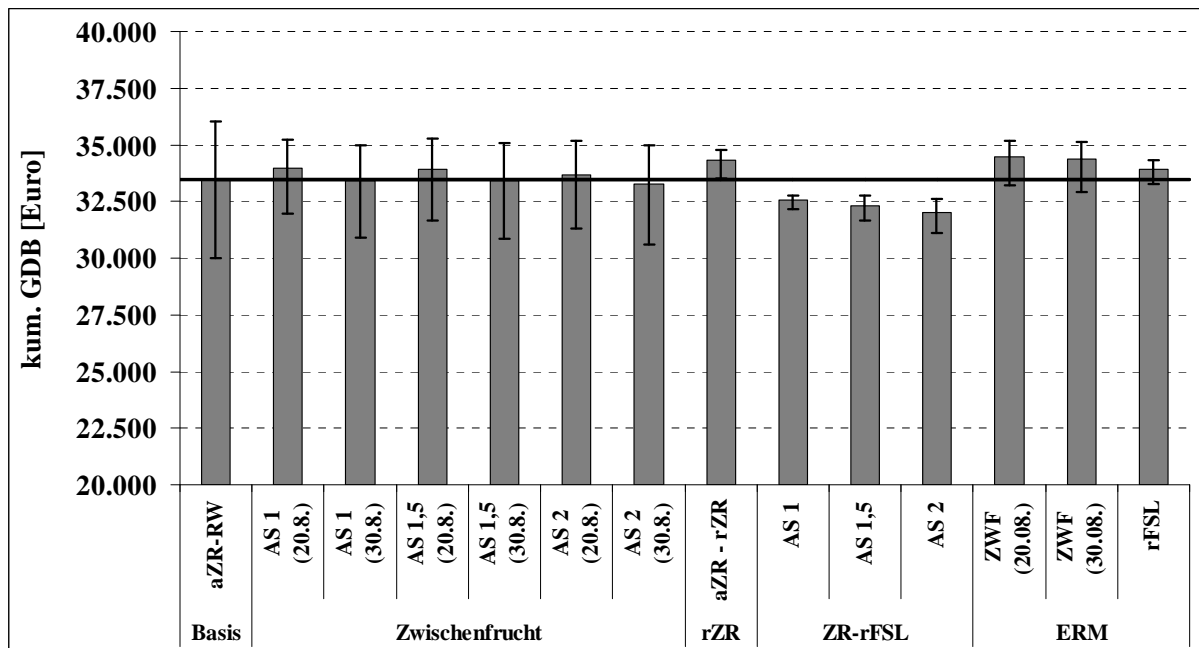


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 76

5.6.1.5 Zusammenfassende Bewertung

Nach Vorstellung der im Rahmen einer zweijährigen Rotation möglichen aktiven Managementmaßnahmen wird an dieser Stelle eine vergleichende Bewertung der kumulierten Gesamtdeckungsbeiträge aller betrachteten Maßnahmen vorgenommen. Dies ist möglich, weil bei einem Simulationshorizont von 19 Jahren alle Szenarien mit dem Anbau von anfälligen Zuckerrüben beginnen und auch enden. In der folgenden Abbildung 88 sind die mittleren Gesamtdeckungsbeiträge sowie die 90%-Intervalle abgebildet. Referenzfruchtfolge ist die zweijährige Rotation ohne aktives Nematodenmanagement, d.h. die Fruchtfolge aZR-RW. Es wird ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Maßnahmen mit Ausnahme der deutlich abfallenden Fruchtfolge aus Zuckerrüben und Flächenstilllegung gering sind. Der risikoneutrale Entscheidungsträger orientiert sich am höchsten Erwartungswert und bildet die in Übersicht 18 dargestellte Präferenzfolge. Das erweiterte Resistenzmanagement ist am vorzüglichsten, solange das Auflaufen der Zwischenfrüchte bis zum 30. August sichergestellt werden kann. Sollte dies nicht gewährleistet werden können oder passt der Zwischenfruchtanbau nicht in die betrieblichen Arbeitsabläufe im Herbst, ist der Anbau resistenter Zuckerrübensorten im Wechsel mit Standardsorten zu wählen, allerdings verbunden mit einer höheren Gefahr der Pathotypenbildung nach einigen Rotationsdurchläufen.

Abbildung 88: Gesamtdeckungsbeiträge im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung

Die nach dem Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrags absteigend sortierte Übersicht 18 verdeutlicht, dass bei vorgegebener zweijähriger Rotation alle Nematodenmanagementstrategien die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte gegenüber der Fruchtfolge ohne Nematodenmanagement deutlich senken. Dies führt zu der Überlegung, fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichten und Gesamtdeckungsbeiträge der dazugehörigen Szenarien in Relation zu setzen. Mit Hilfe dieser so genannten relativen Managementkosten (Gleichung 52) kann die Effizienz der abundanzregulierenden Wirkung der einzelnen Managementmaßnahmen auf der Basis Deckungsbeitragsdifferenz (Euro) je Veränderung der fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichte (Eier und Larven) verglichen werden.

$$\text{relative Managementkosten} = \frac{GDB_{\text{Basis}} - GDB_{\text{Szenario}}}{FVD_{\text{Basis}} - FVD_{\text{Szenario}}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{Eier und Larven}} \right] \quad (52)$$

Übersicht 18: Ranking der Maßnahmen bei zweijähriger Rotation

Szenario	E(GDB) [Euro]	Stabw.(GDB) [Euro]	FVD [E+L]	Kosten [Euro/E+L]
ERM (ZWF 20.8.)	34.491	639	320 / 585*	-0,82 / -1,05
ERM (ZWF 30.8.)	34.360	707	330 / 717*	-0,72 / -1,06
aZR-RW-rZR	34.326	457	289	-0,67
ZWF (AS 1, 20.8.)	33.987	1.016	727	-0,62
ERM (rFSL)	33.925	388	280/171*	-0,35 / -0,32
ZWF (AS „1,5“, 20.8.)	33.897	1.106	842	-0,59
ZWF (AS 2, 20.8.)	33.693	1.181	943	-0,35
aZR-RW	33.480	1.883	1.550	-
ZWF (AS 1, 30.8.)	33.421	1.248	943	0,10
ZWF (AS „1,5“, 30.8.)	33.407	1.313	1.034	0,14
ZWF (AS 2, 30.8.)	33.242	1.372	1.122	0,56
ZR-rFSL (AS 1)	32.540	195	167	0,68
ZR-rFSL (AS 1,5)	32.336	341	314	0,93
ZR-rFSL (AS 2)	32.001	473	452	1,35

* zu Zuckerrüben nach rZR / zu Zuckerrüben nach ZWF bzw. rFSL

Quelle: Eigene Berechnungen

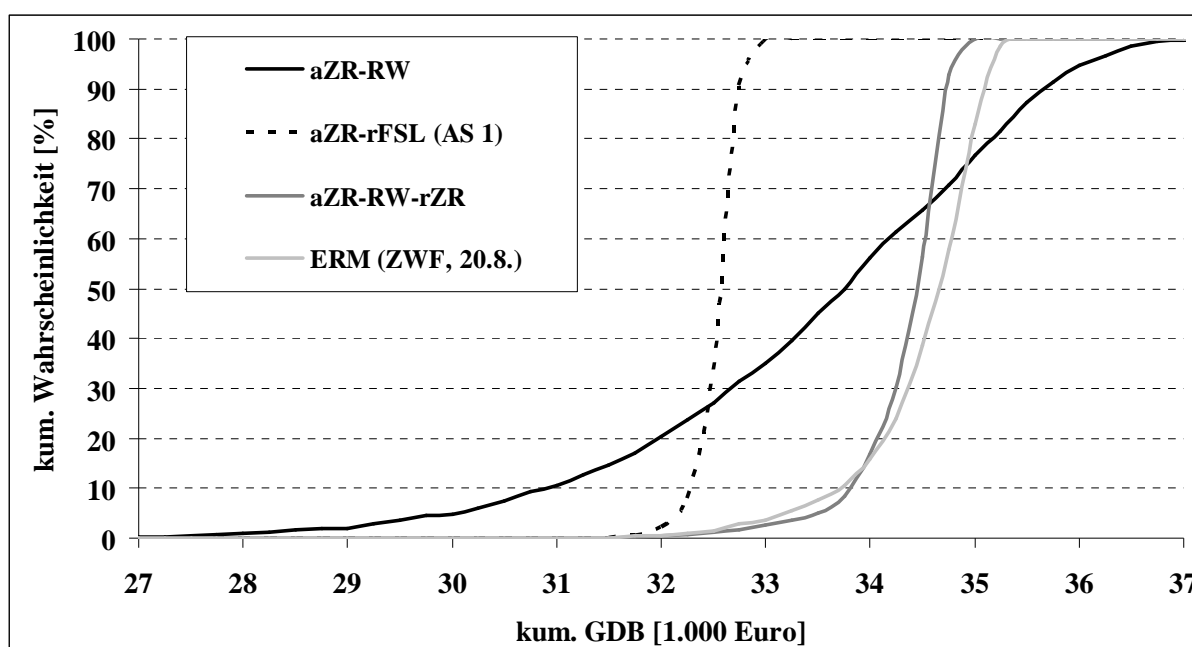
Gemäß Gleichung 52 sind die Szenarien mit höherem Gesamtdeckungsbeitrag als die Basisfruchtfolge mit negativen relativen Managementkosten verbunden. Eine Auswertung der relativen Managementkosten führt zu den gleichen Erkenntnissen wie die der absoluten Deckungsbeiträge. Bei zweijähriger Rotation sind

1. resistente Zuckerrüben im Wechsel angebaut mit anfälligen Zuckerrüben effizienter bei der Populationsregulation des Nematoden als nach Rübenweizen frühestmöglich auflaufende Zwischenfrüchte der Anfälligkeitsstufe 1, da mit resistenten Zuckerrüben eine Deckungsbeitragssteigerung von 0,67 Euro je ein „Ei und Larve“ reduzierter fruchtfolgespezifischer Verseuchungsdichte erzielt werden kann, mit der Zwischenfrucht dagegen nur 0,62 Euro.
2. resistente Kruziferen als Zwischenfrüchte (Kosten maximal 0,56 Euro/E+L) effizienter als zur Begrünung extra eingeführter bzw. ausgeweiteter Flächenstilllegung (Kosten minimal 0,68 Euro/E+L).
3. frühe Auflauftermine der Zwischenfrüchte c.p. effizienter als späte und
4. hochresistente Kruziferen c.p. ökonomisch effizienter als weniger resistente.

Jede der betrachteten Managementmaßnahmen ist in der Lage, die nematodenbedingte Streuung des Gesamtdeckungsbeitrags gegenüber der Basisfruchtfolge wesentlich zu reduzieren.

Dies zeigt sich in den kleineren 90%-Intervallen und Standardabweichungen der Gesamtdeckungsbeiträge der Szenarien mit Nematodenmanagement. Zur weiteren Differenzierung werden in Abbildung 89 die Verteilungsfunktionen der Gesamtdeckungsbeiträge der herausragenden Maßnahmen abgebildet. Gemäß des Entscheidungsprinzips der stochastischen Dominanz sind die Maßnahmen Resistenzmanagement (Fruchtfolge aZR-RW-rZR) und erweitertes Resistenzmanagement mit Zwischenfrüchten stochastisch dominant 1. Grades gegenüber der Fruchtfolge aZR-rFSL (AS 1) und daher unabhängig von der Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers zu präferieren. Sie sind des Weiteren stochastisch dominant 2. Grades gegenüber der Basisfruchtfolge ohne Nematodenmanagement und werden von risikoaversen Entscheidern bevorzugt. Die Resistenzmanagementfruchtfolge aZR-RW-rZR ist nicht stochastisch dominant 2. Grades gegenüber der Fruchtfolge des erweiterten Resistenzmanagements. Diese Aussage gilt auch bezüglich des nicht in Abbildung 89 dargestellten erweiterten Resistenzmanagements mit Auflauf der Zwischenfrucht bis zum 30. August.

Abbildung 89: Verteilungsfunktionen einiger Gesamtdeckungsbeiträge



Quelle: Eigene Darstellung

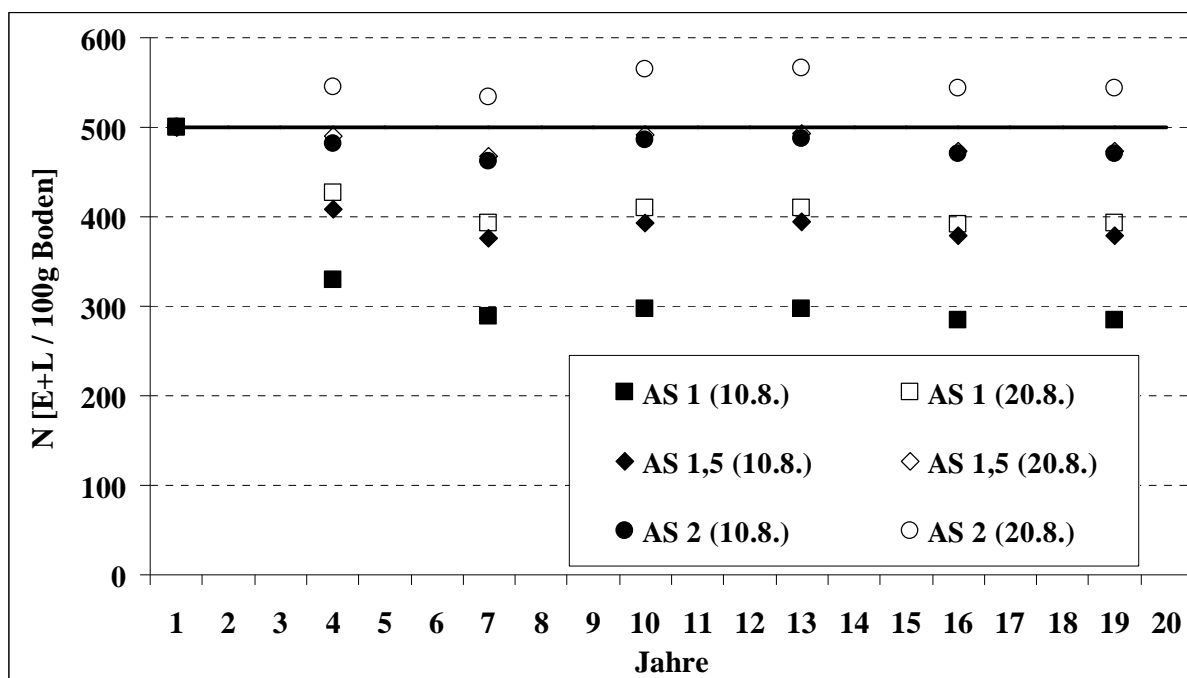
5.6.2 Aktives Nematodenmanagement in dreijährigen Rotationen

Erfolgt der Anbau von Zuckerrüben in dreijährigen Rotationen, wird die Fruchtfolge ZR-RW-StW als Standardfruchtfolge angesehen, da seit Beginn der 1980er Jahre die Wintergerste sukzessive durch (Stoppel-)Weizen ersetzt wurde (siehe Abbildung 1). Diese dreijährige Rotation unterscheidet sich aus nematologischer Sicht nicht von der klassischen rheinischen Fruchtfolge ZR-WW-WG, wohl aber unter ökonomischen Aspekten. So weist Stoppelweizen gegenüber der Wintergerste einen höheren Deckungsbeitrag auf. Die Differenz beträgt beim DB II 42,50 Euro/ha gemäß Anhang 57 auf dem guten Produktionsstandort, so dass sich zwischen den Fruchtfolgen bei einem 20jährigen Simulationszeitraum, in dem Stoppelweizen oder Wintergerste sechsmal angebaut werden können, eine Differenz beim kumulierten Gesamtdeckungsbeitrag von $6 \cdot 42,50 = 255$ Euro ergibt.

5.6.2.1 Anbau nematodenresistenter Zwischenfrüchte

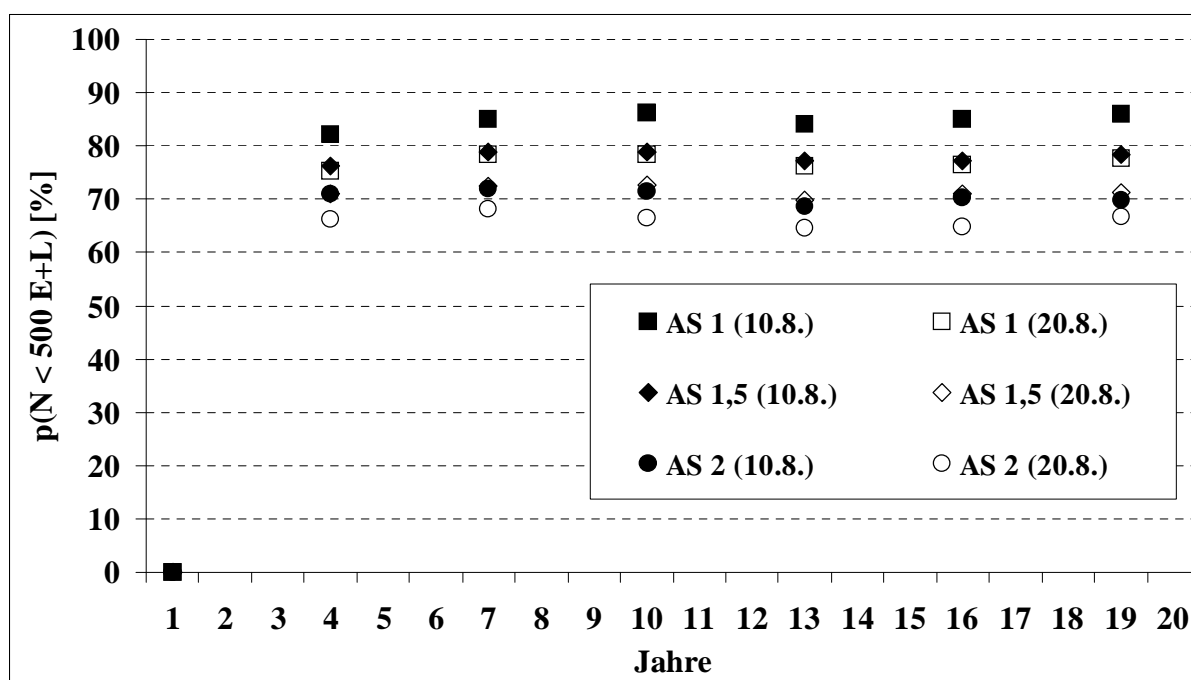
In der dreijährigen Rotation mit Stoppelweizen erfolgt der Zwischenfruchtanbau im Rahmen dieser Simulationsexperimente im Anschluss an den Stoppelweizen, d.h. unmittelbar vor den Zuckerrüben. Dies ermöglicht ein früheres Auflaufen der nematodenresistenten Zwischenfrüchte nach dem früher als Rübenweizen räumenden Stoppelweizen und damit c.p. einen höheren Bekämpfungswirkungsgrad, sowie die Mulchsaat der Zuckerrüben im folgenden Jahr. Als früher Auflauftermin der Zwischenfrüchte wird der 10.8. angenommen und als später Termin der 20. August. Die Bekämpfungswirkungsgrade betragen gemäß Anhang 4 ca. 75% in der ersten und ca. 62% in der zweiten Augustdekade.

Gegenüber der dreijährigen Fruchtfolge ohne Nematodenbekämpfung, deren fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte mit 864 Eier und Larven oberhalb der Fruchtfolge liegt, kann der Ausgangsbefall zu Zuckerrüben durch den Zwischenfruchtanbau unter günstigsten Bedingungen (Anfälligkeitsstufe 1, Auflauf bis zum Ende der 1. Augustdekade) signifikant auf 284 Eier und Larven gesenkt (Abbildung 90) und die Wahrscheinlichkeit, P_i -Werte unterhalb der Schadschwelle zu realisieren, von ca. 50% auf 86% erhöht werden (Abbildung 91). Lediglich bei der ungünstigsten Konstellation aus Anfälligkeitsstufe 2 und Auflauf am 20.8. liegt die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte mit 544 Eier und Larven weiterhin oberhalb der Schadschwelle, wobei allerdings die Wahrscheinlichkeit der Schadschwellenunterschreitung 67% beträgt. Weiterhin ist zu erkennen, dass ein hoher Bekämpfungswirkungsgrad durch frühe Zwischenfruchtbestellung die geringere theoretische Reduktionsleistung einer schlechteren Anfälligkeitsstufe tendenziell zu kompensieren vermag. So führt z.B. eine zum 10.8. auflaufende Zwischenfrucht der Anfälligkeitsstufe „1,5“ mit 378 Eiern und Larven zu einer geringeren fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichte als die Fruchtfolge mit einer Zwischenfrucht der AS 1, die erst zum 20.8. aufläuft (392 Eier und Larven). Allerdings ist dieser Unterschied zum Niveau von 5% Irrtumswahrscheinlichkeit nicht signifikant. Desgleichen gilt für den Vergleich der Fruchtfolgen mit „AS 1,5 (20.8.)“ vs. „AS 2 (10.8.)“.

Abbildung 90: Mittlere P_i -Werte mit Zwischenfrüchten nach Stoppelweizen

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 77

Abbildung 91: Schadschwellenunterschreitung mit Zwischenfrüchten nach StW

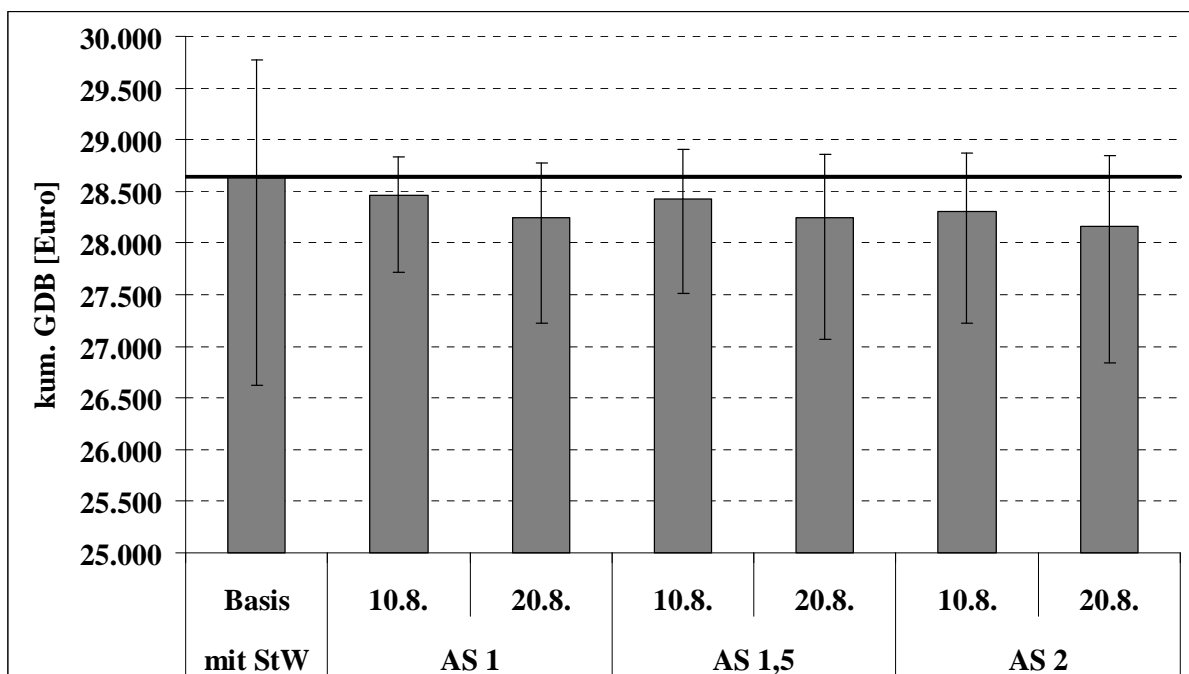


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 77

Durch den Nematodenbefall ist der Erwartungswert des bis zum letzten Zuckerrübenanbau im Jahr 19 kumulierten Gesamtdeckungsbeitrags der Basisfruchtfolge von 30.488 Euro um 1.845 Euro oder 6,0% auf 28.643 Euro gesunken bei gleichzeitiger Zunahme der Ergebnisvolatilität (siehe Abbildung 92). Im 20jährigen Simulationszeitraum werden bei dreijähriger Rotation siebenmal Zuckerrüben angebaut, die nematodenbedingte Erfolgsminderung beträgt demnach

im Mittel 263 Euro/ha Zuckerrübe (zum Vergleich: 470 Euro/ha bei zweijähriger Rotation, siehe Kapitel 5.6.1.1). Abbildung 92 zeigt, dass selbst durch den Anbau einer höchstresistenten Kruzifere als Zwischenfrucht mit frühem Auflauftermin der Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrags geringfügig, aber nach U-Test bei 1% Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant, unter dem Gesamtdeckungsbeitrag der Basisfruchtfolge ohne Nematodenbekämpfung liegt. Die zusätzlichen Kosten des Zwischenfruchtanbaus können demnach im Mittel nicht durch gesteigerte Leistungen der Zuckerrüben kompensiert werden. Zum Niveau von 5% nicht signifikant sind dagegen die Ergebnisunterschiede zwischen der Fruchtfolge „AS 1,5 (20.8.)“ und „AS 2 (10.8.)“. Der risikoneutrale Entscheidungsträger verzichtet demnach bei dreijähriger Rotation mit Stoppelweizen auf Nematodenmanagement mittels resistenten Zwischenfrüchten, auch wenn, wie nicht anders zu erwarten war, die Streuung des Gesamtdeckungsbeitrags durch das Nematodenmanagement deutlich eingeschränkt wird.

Abbildung 92: GDB der Zwischenfruchtszenarien mit Stoppelweizen

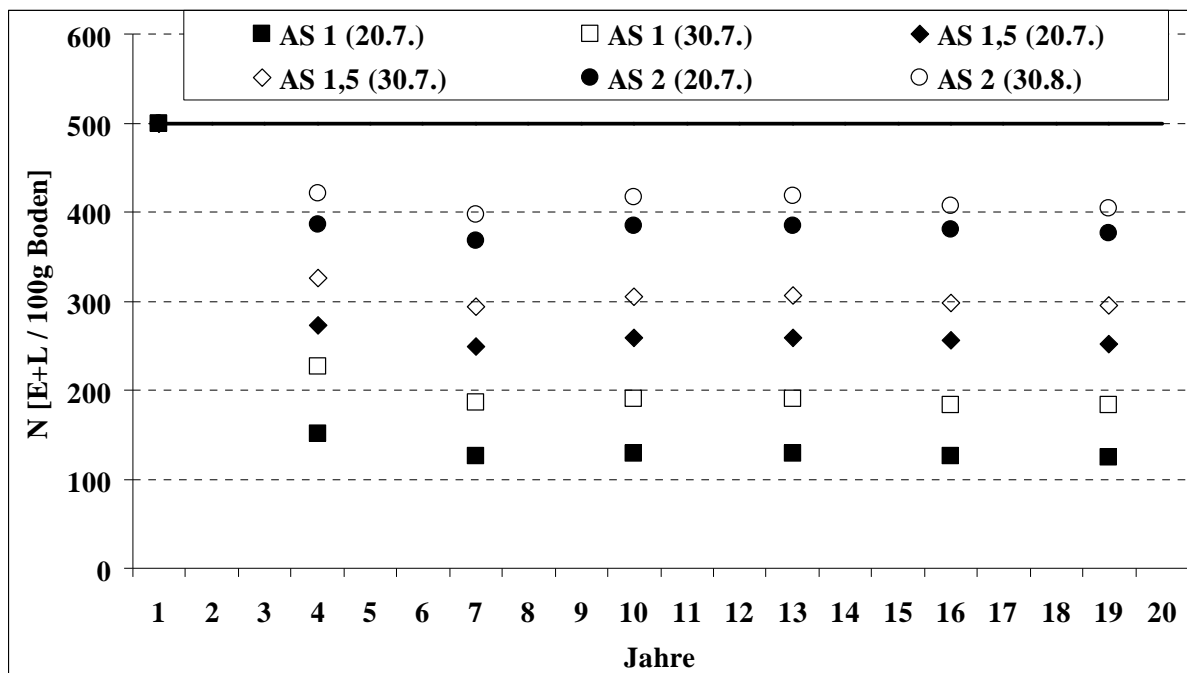


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 78

Alternativ zur dreijährigen Fruchtfolge mit Stoppelweizen wird im Folgenden die dreijährige Fruchtfolge mit Wintergerste als zweite Halmfrucht betrachtet. Nach Wintergerste angebaut, können Zwischenfrüchte entweder früh bis zum 20. Juli auflaufen und damit mit 100% Wirkungsgrad wie beim hauptfruchtmäßigen Anbau zur Begrünung der Flächenstilllegung, oder spät bis 30. Juli bei immerhin noch ca. 89%igem Wirkungsgrad (siehe Anhang 4). Beide Auflauftermine sind mit höheren Bekämpfungswirkungsgraden als nach dem Stoppelweizen verbunden, was sich deutlich in den geringeren fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten und höheren Wahrscheinlichkeiten der Schadschwellenunterschreitung zeigt (siehe Abbildung 93 und Abbildung 94). Die spezifische Verseuchungsdichte zu Zuckerrüben können in der dreijährigen Fruchtfolge bei Verwendung resistenter Sorten der Anfälligkeitsstufe 1 bis auf 125 Eier und Larven gesenkt werden, d.h. mit nahezu 98%iger Sicherheit unterhalb der Schadschwelle. Selbst mit Zwischenfrüchten der Anfälligkeitsstufe 2, die bis zum 30. Juli auflaufen, kann noch eine Reduktion auf 404 Eier und Larven erzielt und die Schadschwelle in

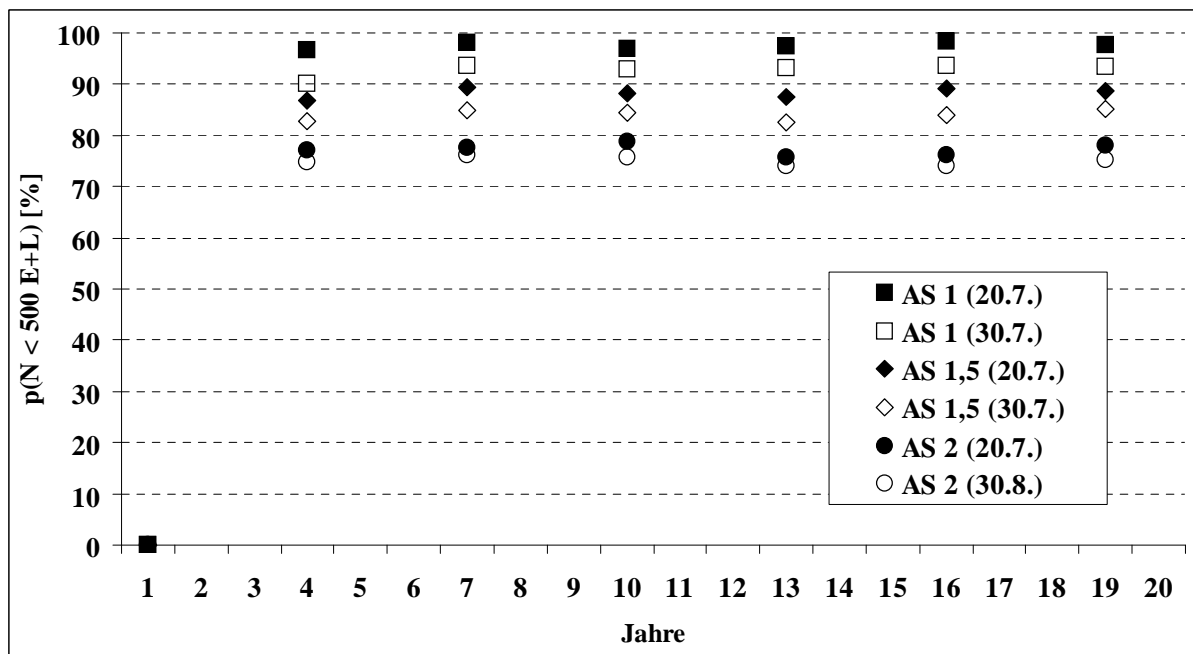
drei von vier Fällen unterschritten werden. Da zwischen den Auflaufdekaden der Zwischenfrüchte nur ein vergleichsweise geringer Wirkungsgradunterschied besteht, kann im Gegensatz zu den Auflaufterminen im August an dieser Stelle ein früherer Auflauf nicht eine schlechtere Resistenznote kompensieren. Dadurch ordnen sich die spezifischen Verseuchungsdichten in Abbildung 93 nach Anfälligkeitsstufe und nach Auflauftermin sortiert an.

Abbildung 93: Mittlere P_i -Werte mit Zwischenfrüchten nach Wintergerste



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 79

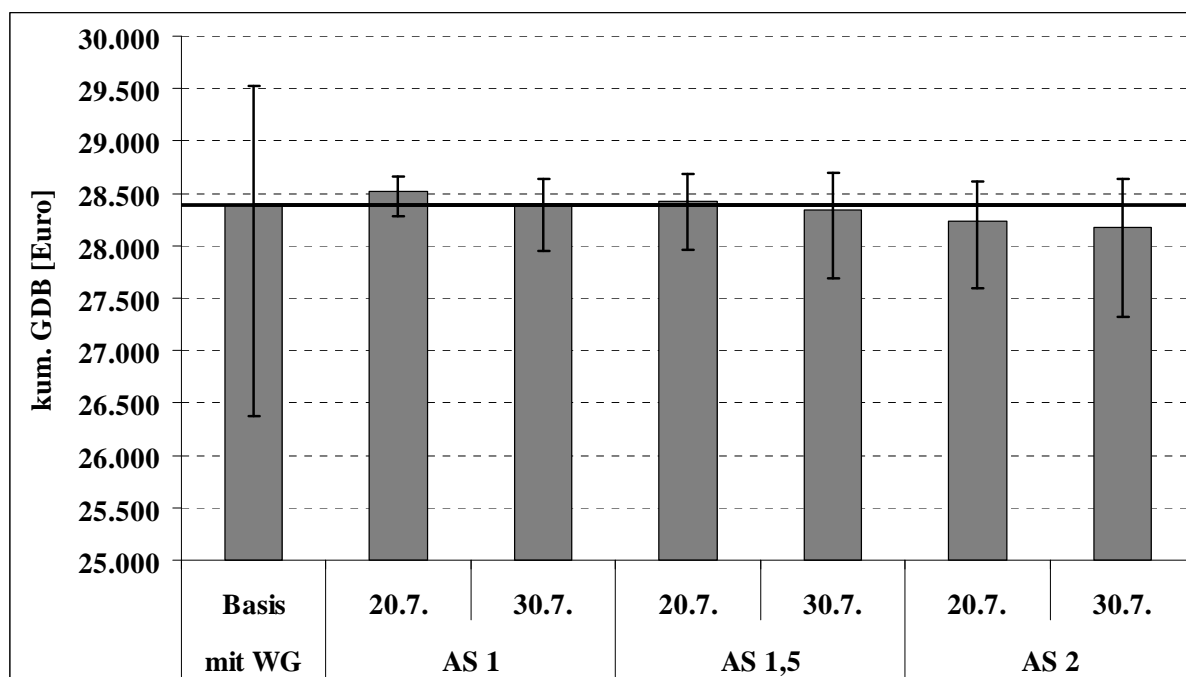
Abbildung 94: Schadschwellenunterschreitung mit Zwischenfrüchten nach WG



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 79

Bei Verzicht auf Stoppelweizen zugunsten Wintergerste ist die Deckungsbeitragsdifferenz zwischen den beiden Früchten als Opportunitätskosten des Nematodenmanagements zu betrachten, wenn der Wintergerstenanbau ausschließlich unter nematologischen Gesichtspunkten (früheres Räumen, höherer Bekämpfungswirkungsgrad der Zwischenfrucht) erfolgt. Diese zusätzlich zum Zwischenfruchtanbau anfallenden Kosten stehen den gesteigerten Deckungsbeiträgen der Zuckerrüben gegenüber. Abbildung 95 und Anhang 80 verdeutlichen, dass durch den Anbau von Zwischenfrüchten der Anfälligkeitsstufe 1 nach Wintergerste unabhängig vom Auflaufzeitpunkt und bei Anfälligkeitsstufe „1,5“ bei frühem Auflauf die Nematodenpopulation derart gut reguliert wird, dass höhere Gesamtdeckungsbeiträge mit deutlich geringerer Streuung erzielt werden. Diese Unterschiede sind zum Niveau von 1% signifikant. Nur bei weniger resistenten Kruziferen und spätem Auflauf werden die entstandenen Kosten nicht mehr durch höhere Leistungen der Zuckerrüben gedeckt, der Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrags sinkt unter den der Ausgangsfruchtfolge. Der Ergebnisunterschied zwischen früh und spät auflaufender Zwischenfrucht der Anfälligkeitsstufe 2 ist signifikant zum Niveau von 5%. Der risikoneutrale Entscheidungsträger präferierte demnach das Nematodenmanagement mit Zwischenfrüchten der höchsten Anfälligkeitsstufe, solange deren Auflaufen bis zum 30.7. sichergestellt werden kann.

Abbildung 95: GDB der Zwischenfruchtszenarien mit Wintergerste



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 80

Um entscheiden zu können, welche zweite Halmfrucht in einer dreijährigen Fruchtfolge angebaut und welche Zwischenfruchtstrategie gefahren werden sollte, sind in Übersicht 19 alle Zwischenfruchtszenarien nach dem Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrags absteigend sortiert aufgelistet. Ein sich strikt an den Erwartungswerten orientierender Entscheidungsträger wird bei dreijähriger Rotation Stoppelweizen als zweite Halmfrucht auswählen und auf ein Nematodenmanagement mittels Zwischenfruchtanbau verzichten. An zweiter Stelle folgt die Fruchtfolge mit Wintergerste und nachfolgender früh auflaufender Zwischenfrucht der Anfälligkeitsstufe 1. Der Abstand beim Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrags ist mit

118 Euro oder 0,4% gering, aber zum Niveau von 1% signifikant aufgrund der an der Standardabweichung erkennbaren deutlich geringeren Streuung der Ergebnisgröße. Die Differenz zwischen den Erwartungswerten der zweitplatzierten Fruchtfolge mit Wintergerste und Zwischenfrucht und der drittplatzierten Fruchtfolge mit Stoppelweizen und einer 1er Zwischenfrucht, deren Auflaufen bis zum Ende der ersten Augustdekade zu gewährleisten ist, ist nicht signifikant. Die Aussage, bei nicht sicherzustellendem frühem Auflauf der Zwischenfrucht nach Wintergerste auf Stoppelweizen mit anschließender Zwischenfrucht auszuweichen, kann daher nicht statistisch abgesichert werden. Ist nach Stoppelweizen ein früher Auflauf der Zwischenfrüchte bis zum 10.8. nicht umsetzbar, wie für das dritt- und das viertplatzierte Szenario notwendig, fiel die Wahl wiederum auf den Anbau von Wintergerste mit anschließender Zwischenfrucht der Anfälligkeitsstufe 1,5 oder 1, wobei letztere lediglich bis zum 30.7. auf-laufen müsste.

Übersicht 19: Ranking der Zwischenfruchtszenarien bei dreijähriger Fruchtfolge

2.Halm-frucht	AS der ZWF	Auflauf-termin	E (GDB) [Euro]	Stabw.(GDB) [Euro]	FVD [E+L]	Kosten [Euro/E+L]
StW	ohne	-	28.643	1.004	864	-
WG	1	20.7.	28.525	121	125	-0,18/0,16
StW	1	10.8.	28.456	367	284	0,32
StW	„1,5“	10.8.	28.427	453	378	0,45
WG	„1,5“	20.7.	28.427	226	252	-0,06/0,35
WG	1	30.7.	28.403	221	183	-0,02/0,35
WG	ohne	-	28.388	1.004	864	-
WG	„1,5“	30.7.	28.336	319	295	0,09/0,54
StW	2	10.8.	28.300	531	469	0,87
StW	„1,5“	20.8.	28.248	582	473	1,01
StW	1	20.8.	28.247	515	392	0,84
WG	2	20.7.	28.233	326	375	0,32/0,84
WG	2	30.7.	28.173	411	404	0,47/1,02
StW	2	20.8.	28.162	636	544	1,50

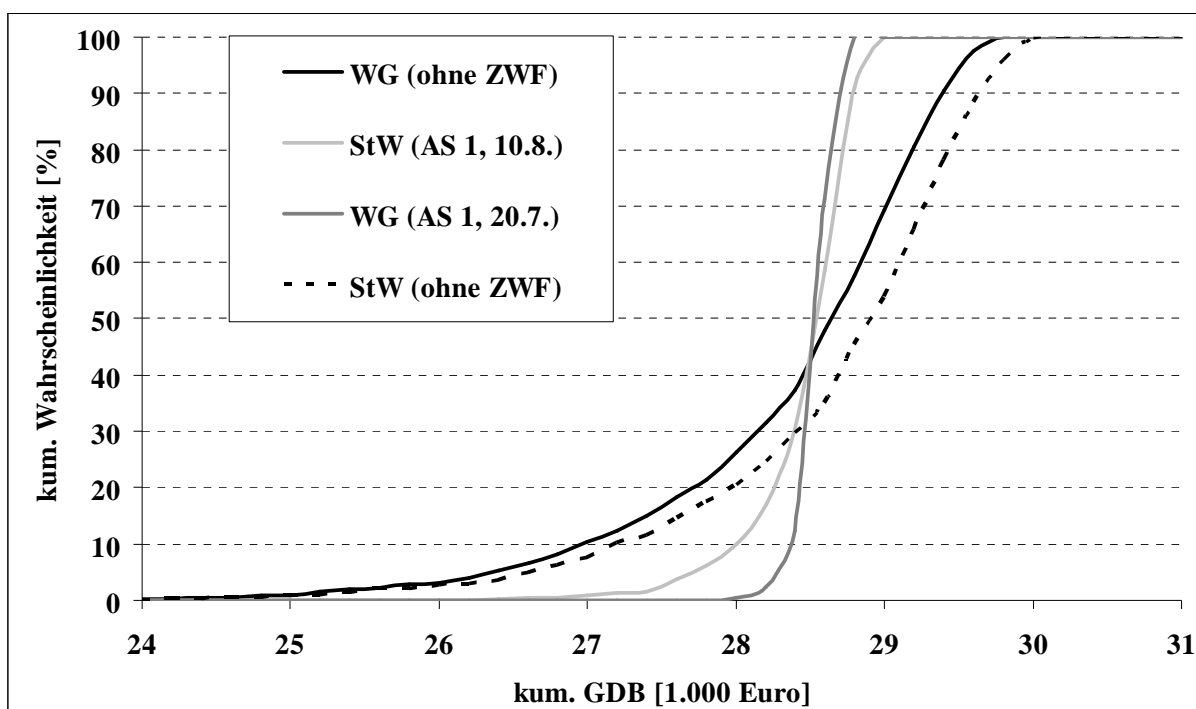
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhand der ebenfalls in Übersicht 19 gelisteten relativen Managementkosten (siehe Gleichung 52) ist zu erkennen, dass die Effizienz des Nematodenmanagements mittels Zwischenfruchtanbau in dreijähriger Rotation wesentlich geringer ist als bei zweijähriger. So betragen die niedrigsten relativen Managementkosten -0,18 Euro/E+L, während bei zweijähriger Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten -0,62 Euro/E+L erreicht werden (siehe Übersicht 18). Dies gilt nur für den Fall, dass als Referenz die rheinische Fruchtfolge mit Wintergerste ohnehin Standardfruchtfolge ist. Sind die mit dem Wintergerstenanbau verbundenen Opportunitätskos-

ten einzubeziehen, muss die Populationsreduktionsleistung an der Differenz zwischen dem Gesamtdeckungsbeitrag des Zwischenfruchtszenarios nach Wintergerste und dem Gesamtdeckungsbeitrag der Basisfruchtfolge mit Stoppelweizen relativiert werden. Dadurch verteuert sich das Nematodenmanagement mit Zwischenfrüchten nach Wintergerste erheblich, ersichtlich am 2. Wert in der Spalte „Kosten“.

Die in Übersicht 19 ersichtlichen Unterschiede zwischen den Erwartungswerten der Gesamtdeckungsbeiträge der Szenarien sind sehr gering, die Unterschiede bei der Standardabweichung dagegen vor allem zwischen den Szenarien ohne und mit Zwischenfruchtanbau sehr groß. Dies ist auch bei Betrachtung der Verteilungsfunktionen der Basisfruchtfolgen und der zwei Fruchtfolgen mit Zwischenfrüchten mit den höchsten Erwartungswerten des Gesamtdeckungsbeitrags zu erkennen (Abbildung 96). Die Ausgangsfruchtfolge mit Stoppelweizen ist gegenüber der rheinischen Ausgangsfruchtfolge stochastisch dominant 1. Grades, und die beiden Fruchtfolgen mit Zwischenfrüchten sind stochastisch dominant 2. Grades gegenüber der rheinischen Fruchtfolge ohne Zwischenfrucht. Darüber hinaus erweist sich die Fruchtfolge mit Wintergerste und früh auflaufender Zwischenfrucht als stochastisch dominant 2. Grades gegenüber der Stoppelweizenfruchtfolge mit früher Zwischenfrucht und würde von risikoaversen Entscheidern bevorzugt.

Abbildung 96: Verteilungsfunktionen der GDB ausgesuchter Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung

Die Berücksichtigung der in diesem Modellansatz nicht betrachteten nichtnematologischen Effekte des Wirkungskomplexes Zwischenfruchtanbau (siehe Anhang 5) könnte die knappe Vorzüglichkeit der Fruchtfolge mit Stoppelweizen ohne Nematodenmanagement gegenüber der Fruchtfolge mit Wintergerste und Nematodenmanagement durch Zwischenfruchtanbau wett machen. Auch bereits geringe Änderungen der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers

in Richtung Risikoaversion führten aufgrund der deutlichen Verminderung der Ergebnisstreuung zu einem Anbau von Zwischenfrüchten möglichst früh nach der Vorfrucht.

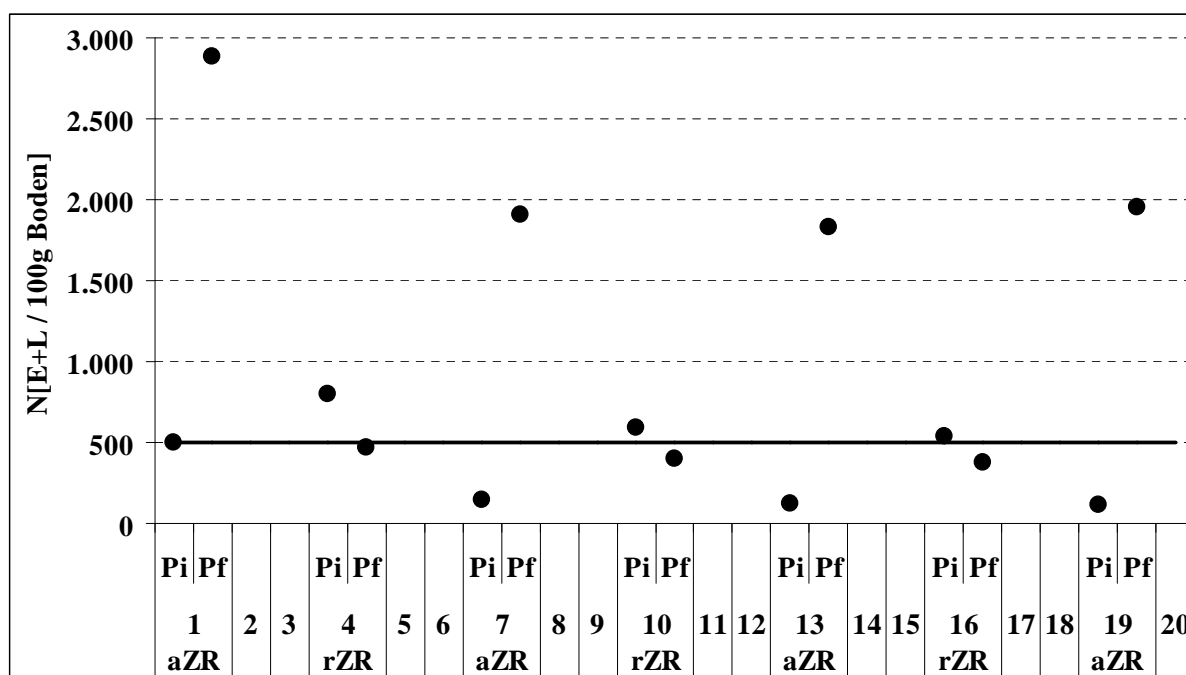
Für den Anbau der Wintergerste als zweite Halmfrucht sprechen neben dem nematologischen Aspekt der frühen Räumung zugunsten eines höheren Bekämpfungswirkungsgrades der nachfolgenden Zwischenfrüchte folgende, im Rahmen dieser Arbeit nicht monetär erfasste Punkte:

1. Mit Wintergerste in der Fruchtfolge können je nach Auslastungsgrad von Maschinen und Arbeitskräften durch die verlängerte Zeitspanne bei der Getreidesaat und -ernte und der Kappung von Arbeitsspitzen Schlagkraft und damit Kosten gespart oder die vorhandenen Maschinen überbetrieblich besser ausgelastet werden.
2. Gerstenstroh verrottet besser und bereitet weniger Probleme bei der Folgefrucht Zuckerrübe, insbesondere bei Strohmulch.
3. Die in vielen Anbaugebieten verstärkt auftretende Vorsommertrockenheit führt eher bei Weizen, der sich in der Kornfüllungsphase befindet, zu Ertragsdepressionen als bei Wintergerste.

5.6.2.2 Anbau nematodenresistenter Zuckerrüben

Der abwechselnde Anbau anfälliger und nematodenresistenter Zuckerrüben (Resistenzmanagement) führt zu einer mittleren Verseuchungsdichte zu anfälligen Zuckerrüben von nur noch 117 Eiern und Larven je 100g Boden. Die Wahrscheinlichkeit, P_i -Werte unterhalb der Schadschwelle zu realisieren, beträgt ca. 97% (Abbildung 97). Dieses Ergebnis entspricht ungefähr der abundanzregulierenden Wirkung einer Zwischenfrucht der Anfälligkeitsstufe 1 bei Auf-
lauf in der 2. Julidekade (siehe Anhang 79).

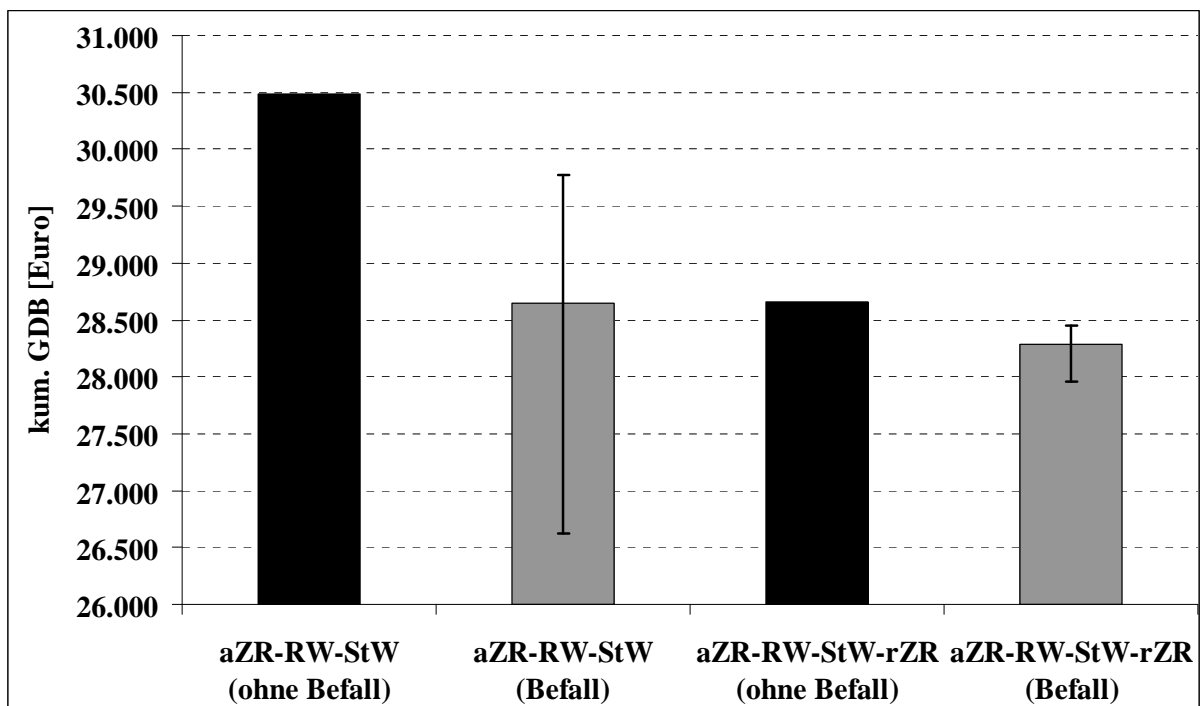
Abbildung 97: Mittlere P_i - und P_f -Werte bei aZR und rZR in dreijähriger Fruchtfolge



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 81

Bei Anbau resistenter Zuckerrüben in jeder zweiten der dreijährigen Rotation mit Stoppelweizen als zweiter Halmfrucht sinkt der Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrags im Befallszenario lediglich um 373 Euro oder 1,3% auf 28.285 Euro gegenüber gleicher Fruchtfolge ohne Nematodenbefall (Abbildung 98 und Anhang 82) und liegt damit um 358 Euro bei 1% Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant unter der Ausgangsfruchtfolge mit Stoppelweizen bei Befall. In der zweijährigen Fruchtfolge konnte dagegen mit resistenten Zuckerrüben noch eine Leistungssteigerung erreicht werden (siehe Abbildung 82). In dreijähriger Rotation ist der natürliche Populationsrückgang in den zwei Nichtwirtschaftsjahren nach anfälligen Zuckerrüben so groß, dass zu resistenten Zuckerrüben nur noch etwas über 500 Eier und Larven zu finden sind und der Vorteil der Toleranz der resistenten Zuckerrüben ihre leistungsmindernden Nachteile nicht zu kompensieren vermag. Mit einem Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrags in Höhe von 28.285 Euro reiht sich das Nematodenmanagement mit resistenten Zuckerrüben in Übersicht 19 im unteren Drittel ein, unterhalb der Standardfruchtfolge mit Wintergerste ohne Nematodenmanagement. Die relativen Managementkosten liegen mit 0,48 Euro/E+L oberhalb derer hochresistenter und früh auflaufender Zwischenfrüchte.

Abbildung 98: Gesamtdeckungsbeitrag bei resistenten Zuckerrüben im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 82

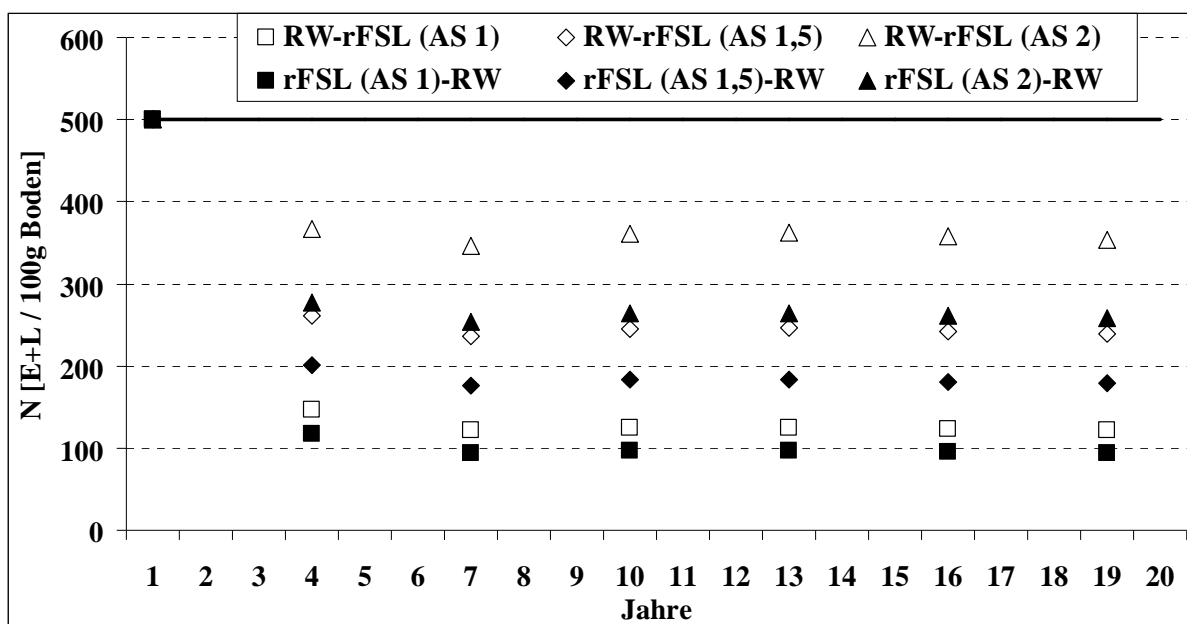
5.6.2.3 Anbau nematodenresistenter Kruziferen auf Flächenstilllegung

Im Vergleich zur zweijährigen Rotation besteht bei dreijähriger Rotation die Möglichkeit, die Positionierung der Flächenstilllegung mit nematodenresistenten Kruziferen (rFSL) zu variieren. Die Stilllegung kann unmittelbar nach den Zuckerrüben folgen oder unmittelbar vor diese gestellt werden. Die Positionierung hat keinen Einfluss auf den Bekämpfungswirkungsgrad, der in beiden Fällen 100% beträgt, und beeinflusst auch nicht die Ertragsfähigkeit der verbleibenden Halmfrucht. Diese ist in beiden Fällen Winterweizen nach Blattfrucht (abgekürzt RW) mit einem Deckungsbeitrag in Höhe von 387,50 Euro/ha. Die zu betrachtenden Fruchtfolgen sind demnach ZR-RW-rFSL und ZR-rFSL-RW. Quintessenz der in Kapitel 3.2.3.5 geführten

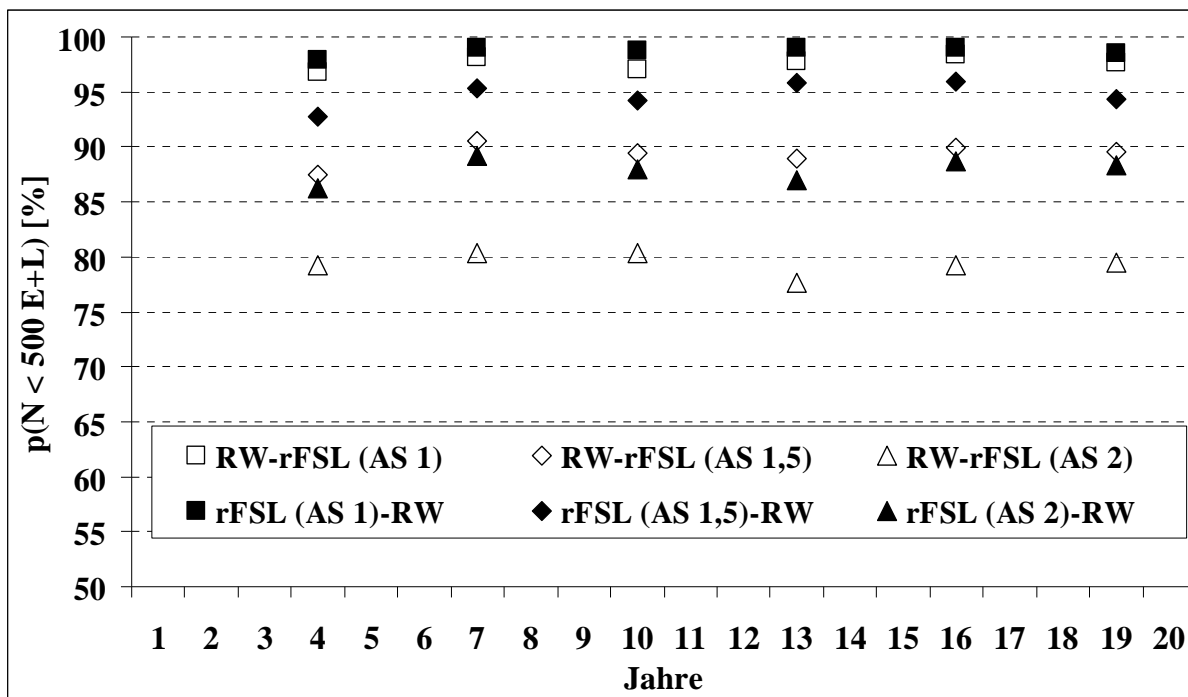
Diskussion über die optimale Positionierung nematodenresistenter Kruzifere innerhalb der Fruchtfolge war, dass nicht nur aus nematologischen Gründen das aktive Nematodenmanagement unmittelbar nach erfolgtem Zuckerrübenanbau durchgeführt werden sollte.

In Abbildung 99 sowie Anhang 83 sind die Befallshöhen zur Saat der Zuckerrüben dargestellt. Diese können deutlich gegenüber der Ausgangsfruchtfolge gesenkt werden, wobei wie bereits in der zweijährigen Fruchtfolge (siehe Abbildung 83) der Populationsrückgang umso deutlicher ausfällt, je ausgeprägter die Resistenzeigenschaften der Kruzifere sind. Wird die Flächenstilllegung unmittelbar nach Zuckerrüben eingeplant, ist der Bekämpfungserfolg größer und der Ausgangsbefall zu Zuckerrüben signifikant niedriger, da die abundanzregulierende Wirkung der resistenten Kruzifere bei hohen Befalldichten im Jahr nach Zuckerrüben größer ist als bei den geringeren Befalldichten im Jahr vor den Zuckerrüben. So erreicht eine resistente Kruzifere der Anfälligkeitsstufe 1, die im Jahr nach dem Zuckerrübenanbau zur Begrünung von Flächenstilllegung verwendet wird, eine fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte von 93 Eier und Larven. In 99% der Fälle ist sichergestellt, dass die Schadschwelle zu den in zwei Jahren folgenden Zuckerrüben nicht überschritten wird (Abbildung 100). Im Jahr vor Zuckerrüben angebaut, beträgt die FVD 121 Eier und Larven und die Schadschwelle wird in 98% der Fälle unterschritten.

Abbildung 99: Mittlere P_i -Werte der Stilllegungsszenarien in dreijähriger Fruchtfolge

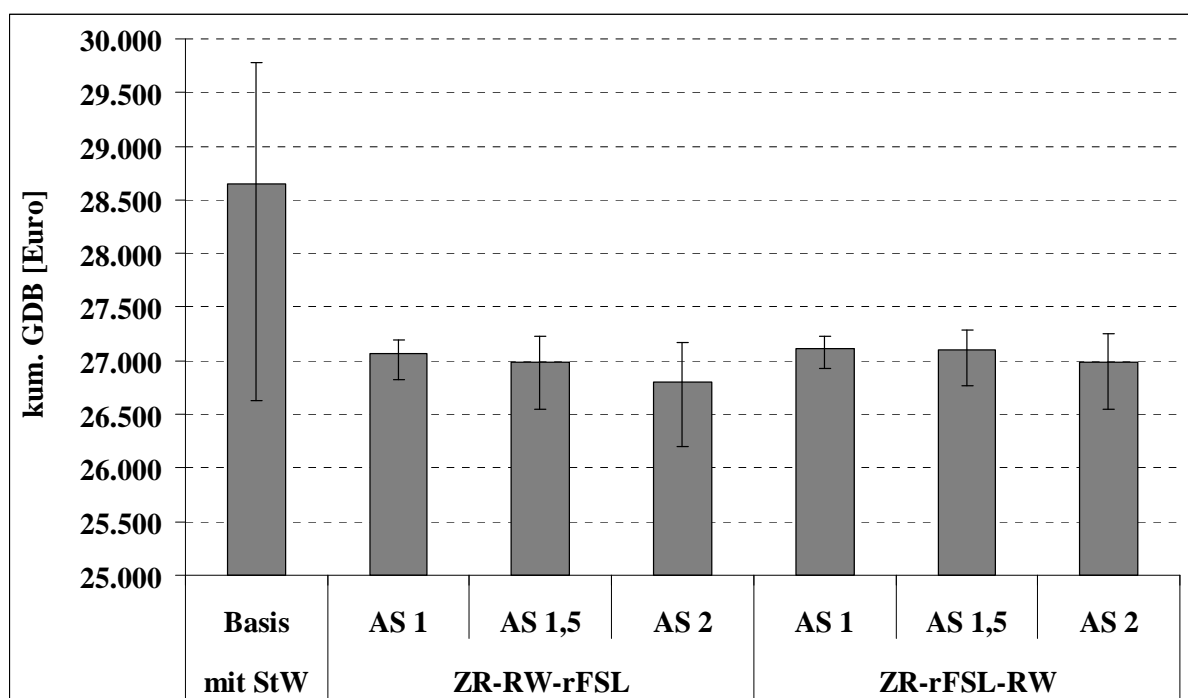


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 83

Abbildung 100: Schadschwellenunterschreitung je nach Stilllegungsszenario

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 83

Bei Betrachtung der kumulierten Gesamtdeckungsbeiträge bis zum letztmaligen Rübenanbau im 19. Jahr (Abbildung 101) fällt im Vergleich zu den Stilllegungsszenarien bei zweijähriger Rotation (Abbildung 85) auf, dass die Stilllegungsszenarien bei dreijähriger Rotation mit -1.500 bis -1.800 Euro Differenz wesentlich deutlicher der Basisfruchtfolge nachstehen. Hintergrund ist der im Vergleich wesentlich höhere natürliche Populationsrückgang, der wie bereits bei der Verwendung nematodenresistenter Zuckerrüben in der dreijährigen Fruchtfolge dafür verantwortlich ist, dass die abundanzregulierende Wirkung nematodenresistenter Kruziferen als Stilllegungs begrünung teilweise „ins Leere läuft“, d.h. nicht in dem Maße in Mehrerträge bei den anschließenden Zuckerrüben umgesetzt werden kann, wie zur Deckung der geringeren Deckungsbeitrags der Stilllegung gegenüber dem Stoppelweizen notwendig wäre. Daher sind die relativen Bekämpfungskosten mit 1,98 Euro/E+L (Fruchtfolge ZR-rFSL (AS 1)-RW) bis 3,60 Euro/E+L (Fruchtfolge ZR-RW-rFSL (AS 2)) bisher die höchsten bei dreijähriger Fruchtfolge. Der anhand der fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichte ersichtliche nematologische Vorteil des unmittelbar nach Zuckerrüben erfolgenden Nematodenmanagement spiegelt sich in Abbildung 101 auch in einem ökonomischen Vorteil wider. Die Gesamtdeckungsbeiträge der Fruchtfolge ZR-rFSL-RW sind c.p. bei 1% Irrtumswahrscheinlichkeit höher als die der Fruchtfolge ZR-RW-rFSL.

Abbildung 101: GDB der Stilllegungsszenarien bei dreijähriger Fruchtfolge

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 84

Die Aussagen bezüglich der Deckungsbeitragsdifferenz zwischen (Stoppel-)weizen und Flächenstilllegung haben nur dann Gültigkeit, wenn die Flächenstilllegung mit resistenten Kruzifern unter rein nematologischen Aspekten über das Mindestmaß ausgedehnt oder in die Fruchtfolge aufgenommen wird und dabei das Getreide zurückdrängt. Ist die Flächenstilllegung ohnehin in die betrachtete Fruchtfolge integriert und stünde die aktive Begrünung mit einer nematodenresistenten Kruzifere lediglich der alternativen Begrünung mit einer Klee-Grasmischung gegenüber, entstünden lediglich maximal 20 Euro/ha Opportunitätskosten des Nematodenmanagements, die sich aus der Differenz der Saatgutkosten ergeben (siehe Anhang 57). Die nicht abgebildete Fruchtfolge aZR-RW-FSL (ohne Nematodenbekämpfung) erzielt einen Gesamtdeckungsbeitrag in Höhe von 25.748 Euro, so dass die Nutzung der Flächenstilllegung zur Nematodenbekämpfung (Fruchtfolge aZR-RW-rFSL (AS 1)) unter Befall einen um 1.313 Euro höheren Gesamtdeckungsbeitrag erzielt und sich die relativen Managementkosten auf -1,77 Euro/E+L belaufen. Unter diesen Gesichtspunkten ist die Nutzung der Flächenstilllegung eine außerordentlich effiziente Maßnahme des Nematodenmanagements.

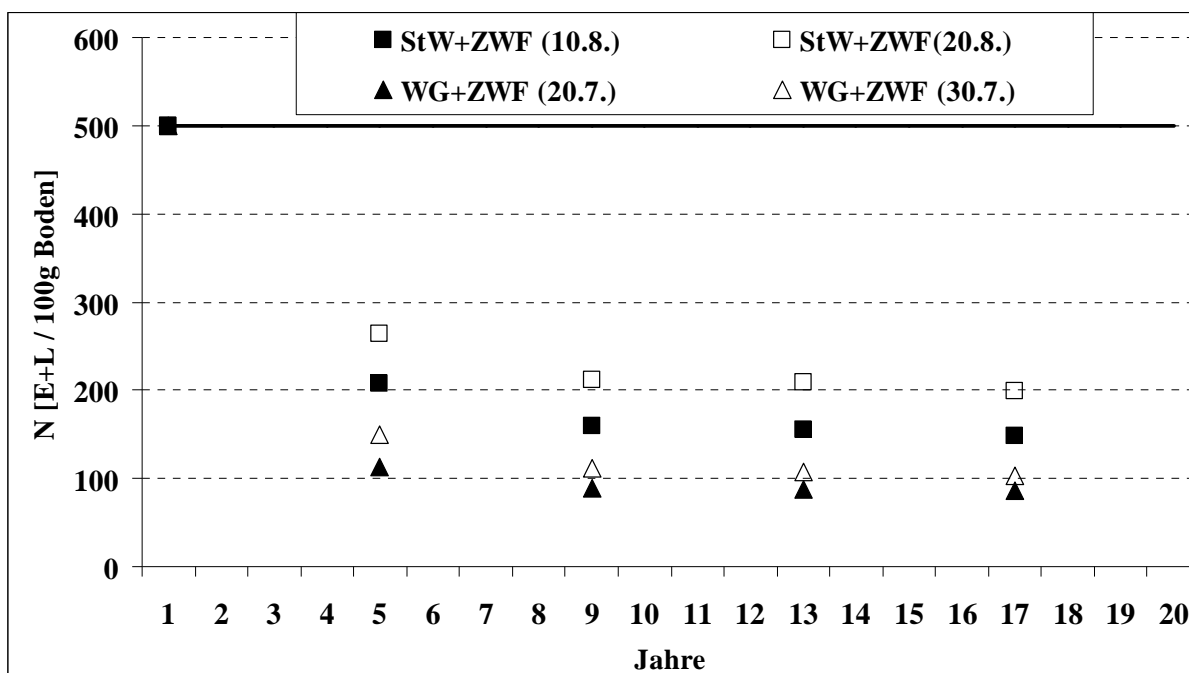
5.6.3 Aktives Nematodenmanagement in vierjährigen Rotationen

Erfolgt der Anbau von Zuckerrüben mit dreijähriger Anbaupause (25% Zuckerrüben in der Fruchtfolge), wird wie bei der dreijährigen Rotation eine Fruchtfolge mit Stoppelweizen (ZR-RW-StW-StW) als Standardfruchtfolge angesehen. Alternativ wird auch die Fruchtfolge mit Stoppelweizen und Wintergerste betrachtet, wobei die Wintergerste dem Stoppelweizen folgt (ZR-RW-StW-WG). Bei Kumulation des Gesamtdeckungsbeitrags bis zum letztmaligen Zuckerrübenanbau in Jahr 17 weist die Stoppelweizen-Fruchtfolge einen um $4 \cdot (337,50 - 295,00) = 170$ Euro höheren Gesamtdeckungsbeitrag auf.

Bereits bei Betrachtung der dreijährigen Fruchtfolge im vorangegangenen Kapitel wurde deutlich, dass ein risikoneutraler Entscheidungsträger auf jegliches Nematodenmanagement verzichtet, während ein risikoabgeneigter Entscheider Wintergerste in die Fruchtfolge aufnähme und eine hochresistente Zwischenfrucht anbaute. Bei vierjähriger Fruchtfolge beträgt die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte bereits ohne jegliches aktives Nematodenmanagement 453 Eier und Larven und liegt mit ca. 74%iger Wahrscheinlichkeit unterhalb der Schadschwelle (siehe Anhang 67). Die Managementmaßnahmen Zwischenfruchtanbau und Anbau resistenter Zuckerrüben im Wechsel mit anfälligen Zuckerrüben werden an dieser Stelle gemeinsam betrachtet.

Die folgenden Zwischenfruchtszenarien sind ausschließlich auf höchstresistente Zwischenfrüchte beschränkt, die unmittelbar vor den Zuckerrüben, d.h. nach dem zweiten Stoppelweizen bzw. nach der Wintergerste angebaut werden. Voruntersuchungen ergaben, dass Zwischenfrüchte der Anfälligkeitsstufen „1,5“ und 2 bei wirkungsgradreduziertem Anbau nach Stoppelweizen nicht mehr in der Lage sind, die Befallsdichten des Nematoden in vierjähriger Fruchtfolge zu senken. Zwischenfrüchte der Anfälligkeitsstufe 1 können dagegen die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte signifikant unter die der Basisfruchtfolgen senken. Die fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten betragen zwischen 85 Eier und Larven bei Zwischenfrucht nach Wintergerste und Auflauf am 20.7. und 198 Eier und Larven bei Zwischenfrucht nach Stoppelweizen und Auflauf bis 20.8. (siehe Abbildung 102). Durch den Anbau nematodenresistenter Zuckerrüben in jeder zweiten Rotation reduziert sich der Ausgangsbefall zu anfälligen Rüben mit 46 Eier und Larven nahezu auf Null und die Wahrscheinlichkeit, die Schadschwelle zu unterschreiten beträgt 99,8% (siehe Anhang 85).

Abbildung 102: Mittlere P_i -Werte der ZWF-Szenarien bei vierjähriger Fruchtfolge

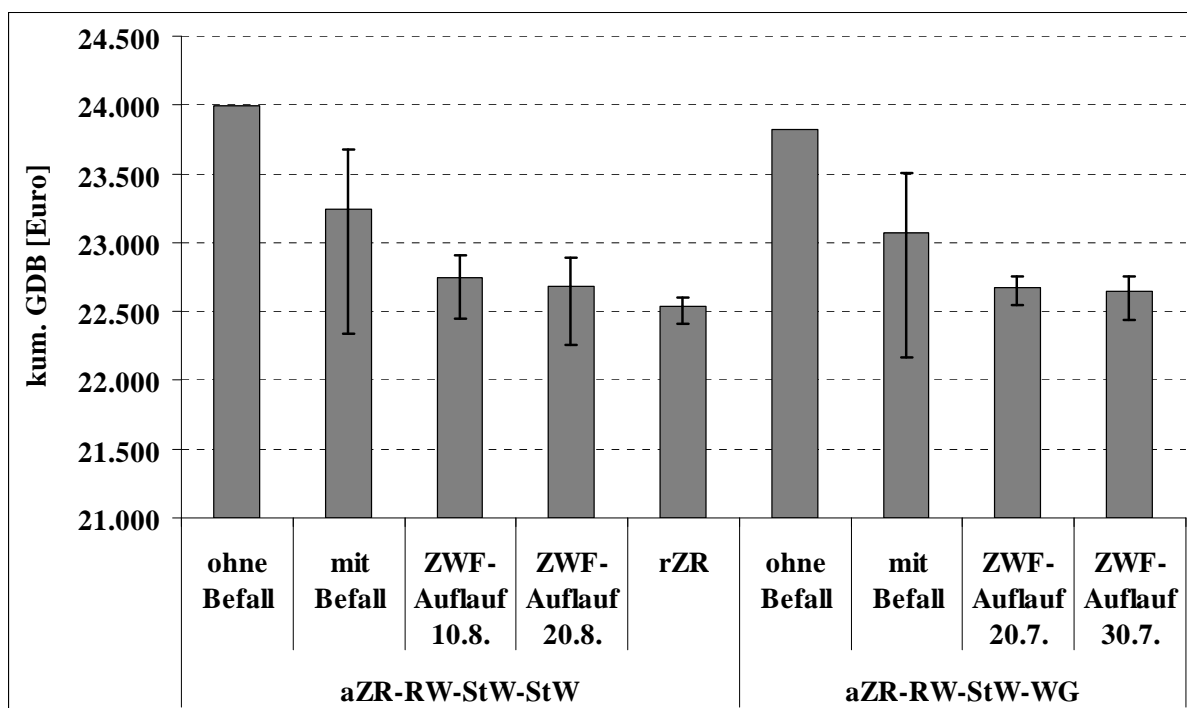


Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 85

Durch den Befall mit *H.schachtii* sinkt der Erwartungswert des Gesamtdeckungsbeitrag der Basisfruchtfolgen gemäß Abbildung 103 jeweils um 751 Euro oder 150 Euro/ha Zuckerrüben

bei fünfmaligem Zuckerrübenanbau (zum Vergleich: zweijährige Fruchtfolge: -470 Euro/ha, dreijährige Rotation: -263 Euro/ha). Eine Steigerungen des mittleren Gesamtdeckungsbeitrags ist mit den betrachteten Maßnahmen des Nematodenmanagements nicht erzielbar, dieser sinkt sogar deutlich. Die Differenzen zwischen den einzelnen Szenarien sind signifikant zum Niveau von 1%.

Abbildung 103: Gesamtdeckungsbeiträge der Szenarien bei vierjähriger Fruchtfolge



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 86

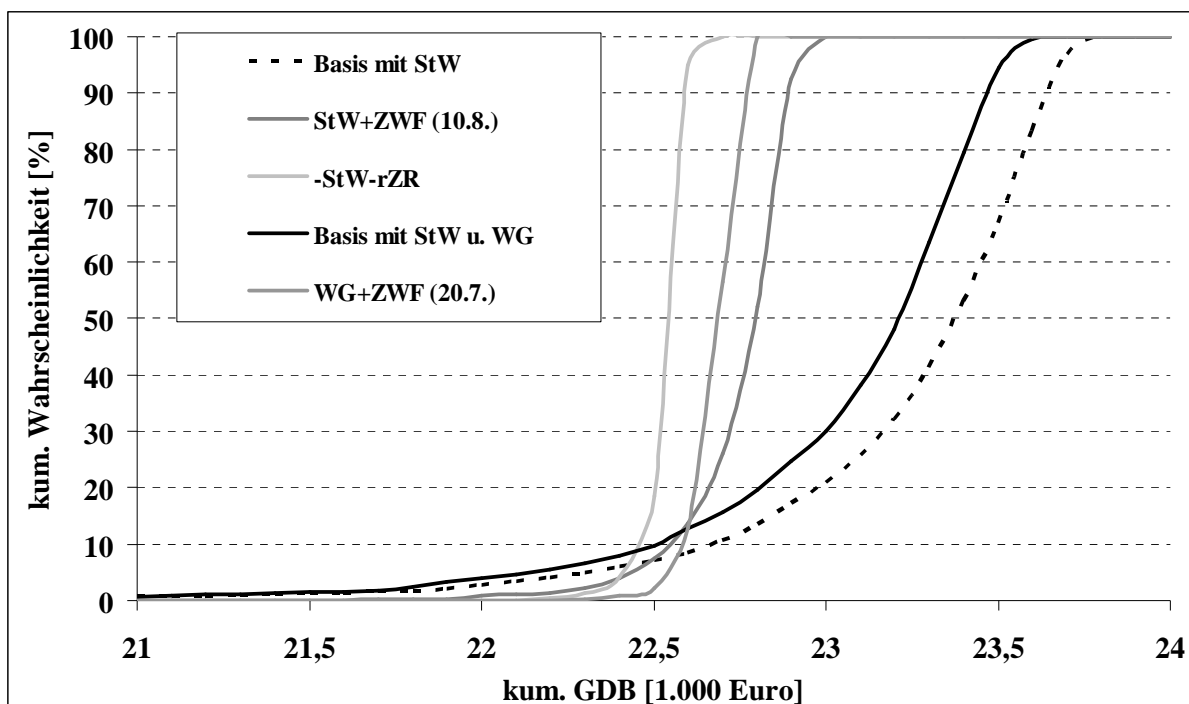
Nach Erwartungswert absteigend sortiert sind die betrachteten Szenarien in Übersicht 20 gelistet. Der risikoneutrale Entscheider wird bei vierjähriger Rotation keine aktiven populationsregulierenden Maßnahmen ergreifen, sondern je nach persönlichen Präferenzen die vierjährige Rotation ausschließlich mit Weizen als Halmfrucht oder mit Weizen und Gerste als Halmfrüchte wählen. Erst mit zunehmender Risikoaversion gewinnt der Zwischenfruchtanbau nach Stoppelweizen an Vorzüglichkeit. Die relativen Managementkosten sind im Vergleich zu den zuvor betrachteten Rotationslängen sehr hoch. Es zeigt sich aber, dass die Managementkosten des Zwischenfruchtanbaus nach Wintergerste auch unter Einbeziehung der Opportunitätskosten des Wintergerstenanbaus (2. Wert in Spalte „Kosten“) geringer sind als die des Zwischenfruchtanbaus nach Stoppelweizen und des Anbaus resistenter Zuckerrübensorten in jeder zweiten Rotation. Frühestmöglicher Zwischenfruchtanbau ist demnach bei vierjähriger Rotation am effizientesten.

Übersicht 20: Ranking der Maßnahmen bei vierjähriger Fruchtfolge

2.Halmfrucht	Szenario	E (GDB) [Euro]	Stabw.(GDB) [Euro]	FVD [E+L]	Kosten [Euro/E+L]
StW	Basis	23.239	462	453	-
WG	Basis	23.069	462	453	-
StW	ZWF, 10.8.	22.749	167	148	1,61
StW	ZWF, 20.8.	22.681	225	135	2,19
WG	ZWF, 20.7.	22.675	70	85	1,07/1,53
WG	ZWF, 30.7.	22.645	108	103	1,21/1,70
StW	rZR	22.539	65	46	1,72

Quelle: Eigene Berechnungen

Die aus Abbildung 104 ersichtliche Streuung der kumulierten Gesamtdeckungsbeiträge der betrachteten Szenarien ohne Nematodenmanagement ist im Vergleich zu den kürzeren Rotationen (siehe Abbildung 89 und Abbildung 96) wesentlich geringer. Die Basisfruchtfolge ausschließlich mit Weizen ist stochastisch dominant 1. Grades gegenüber der Basisfruchtfolge mit Wintergerste. Ebenfalls stochastisch dominant 1. Grades und damit von jedem Entscheidungsträger unabhängig von der Risikopräferenz bevorzugt ist die Fruchtfolge mit Wintergerste und anschließender Zwischenfrucht gegenüber der Fruchtfolge mit resistenten Zuckerrüben. Stochastische Dominanz 2. Grades liegt in keinem der betrachteten Fälle vor, so dass keinerlei Aussagen für risikoaverse Entscheidungsträger getroffen werden können.

Abbildung 104: Verteilungsfunktionen der GDB bei vierjähriger Rotation

Quelle: Eigene Darstellung

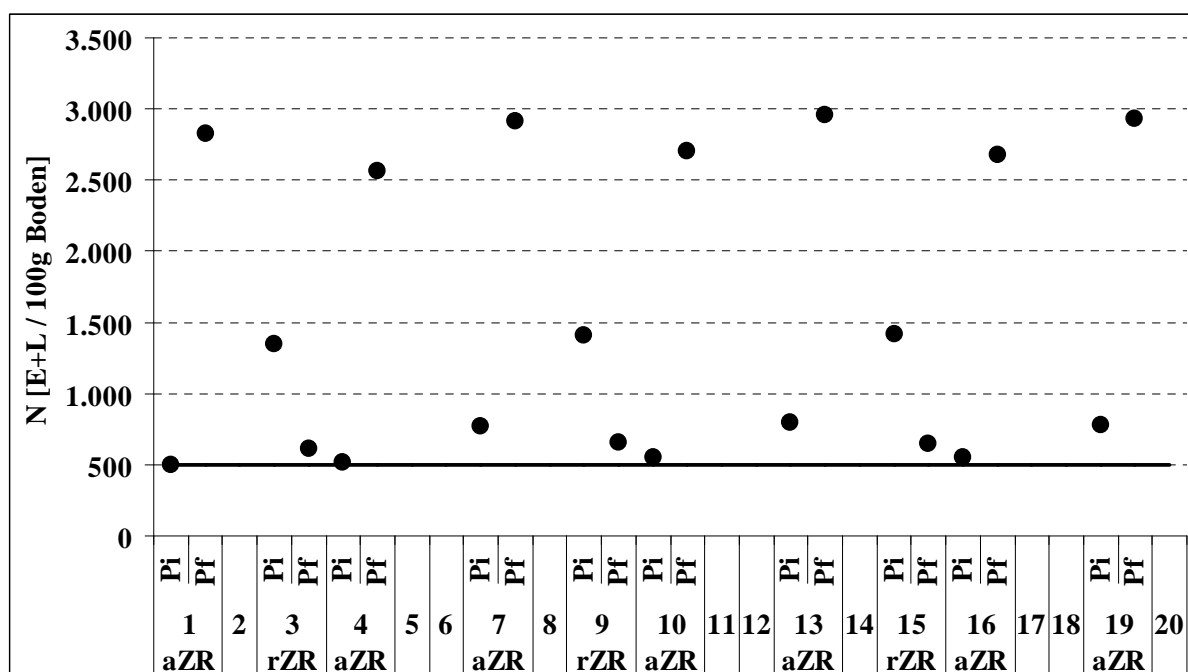
5.6.4 Simulationsexperimente mit unregelmäßigen Fruchtfolgen

In diesem Kapitel werden Fruchtfolgen betrachtet, in denen Zuckerrüben mit ungleichmäßigen Anbaupausen bzw. Zuckerrüben und Raps gemeinsam angebaut werden.

5.6.4.1 Sechsjährige Rotation mit 50% Rübenanteil

Anstatt in zweijähriger Rotation anfällige und resistente Zuckerrüben im Wechsel anzubauen und Resistenzbrechern Vorschub zu leisten, könnte ein zur Erfüllung des Lieferrechts notwendiger Anteil von 50% Zuckerrüben realisiert werden, indem der Zuckerrübenanbau „geblockt“ wird, d.h. nematodenresistente und -anfällige Zuckerrüben für zwei Jahre aufeinander folgen. Anschließend wird eine zweijährige Anbaupause eingehalten, bis wieder anfällige Zuckerrüben folgen. Der Abstand zwischen resistenten Zuckerrüben beträgt fünf Jahre wie beim erweiterten Resistenzmanagement in zweijähriger Rotation (siehe Kapitel 5.6.1.4), wodurch der Selektionsdruck auf Resistenzbrecher vermindert wird. Eine solche sechsjährige Fruchtfolge ist aZR-RW-rZR-aZR-RW-StW. Abbildung 105 zeigt, dass es weder den resistenten Zuckerrüben gelingt, die Befallsdichte zu den folgenden anfälligen Zuckerrüben unterhalb der Schadschwelle zu senken, noch die zweijährige Anbaupause vor den folgenden anfälligen Zuckerrüben dafür reicht. So beträgt der Erwartungswert der Befallsdichte zu Zuckerrüben im Jahr nach resistenten Sorten ca. 550 Eier und Larven (Wahrscheinlichkeit der Schadschwellenunterschreitung ca. 69%), während in der zweijährigen Fruchtfolge mit resistenten Zuckerrüben in jeder zweiten Rotation vor den anfälligen Zuckerrüben durch das zusätzlich vgeschaltete Nichtwirtschaftsjahr regelmäßig Befallsdichten von ca. 290 Eier und Larven erreicht werden (siehe Abbildung 81). Zu Zuckerrüben nach zweijähriger Anbaupause ist der Erwartungswert der P_i -Werte in der betrachteten Fruchtfolge mit 777 Eier und Larven (Wahrscheinlichkeit für $N < 500$ Eier und Larven ca. 55%) dagegen geringer als die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte der dreijährigen Rotation in Höhe von 864 Eier und Larven.

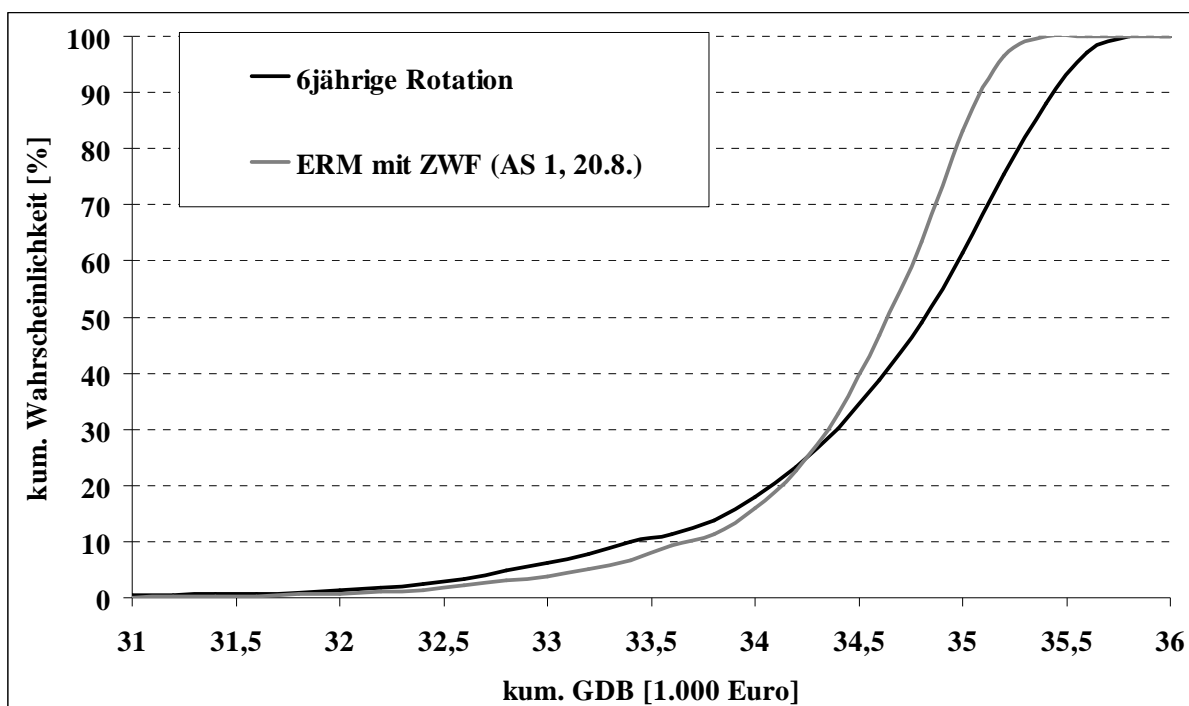
Abbildung 105: Mittlere P_i -Werte bei sechsjähriger Rotation mit 50% Zuckerrüben



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 87

Der Anbau der unter geringem Ausgangsbefall weniger leistungsfähigen resistenten Zuckerrüben erfolgt in der betrachteten Fruchtfolge lediglich dreimal bei 20jährigem Simulationshorizont, während bei zweijähriger Rotation mit wechselndem Anbau anfälliger und resistenter Zuckerrüben fünfmal resistente Sorten eingesetzt werden. Auch verzichtet die betrachtete unregelmäßige Fruchtfolge auf den Einsatz von Zwischenfrüchten wie z.B. im Rahmen des erweiterten Resistenzmanagements bei der zweijährigen Rotation. Die sechsjährige Rotation mit 50% Zuckerrübenanteil erreicht daher mit einem bis zum letztmaligen Zuckerrübenanbau im 19. Jahr kumulierten Gesamtdeckungsbeitrag in Höhe von 34.604 Euro eine bei 1% Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant höhere Zielgröße als die in Übersicht 18 aufgeführten Szenarien bei zweijähriger Fruchtfolge. Der risikoneutrale Entscheidungsträger präferierte daher diese unregelmäßige Fruchtfolge allen anderen Nematodenmanagementszenarien bei 50% Zuckerrüben in der Fruchtfolge. Über die Vorzüglichkeit für einen risikoaversen Entscheider können keine Aussagen getroffen werden, da der höhere Erwartungswert einher geht mit einer ebenfalls höheren Standardabweichung als beim bisherigen Favoriten, dem erweiterten Resistenzmanagement mit frühen Zwischenfrüchten (siehe Anhang 88). Stochastische Dominanz 2. Grades ist nicht gegeben (Abbildung 106).

Abbildung 106: Verteilungsfunktionen zweier Szenarien mit 50% Zuckerrüben



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 88

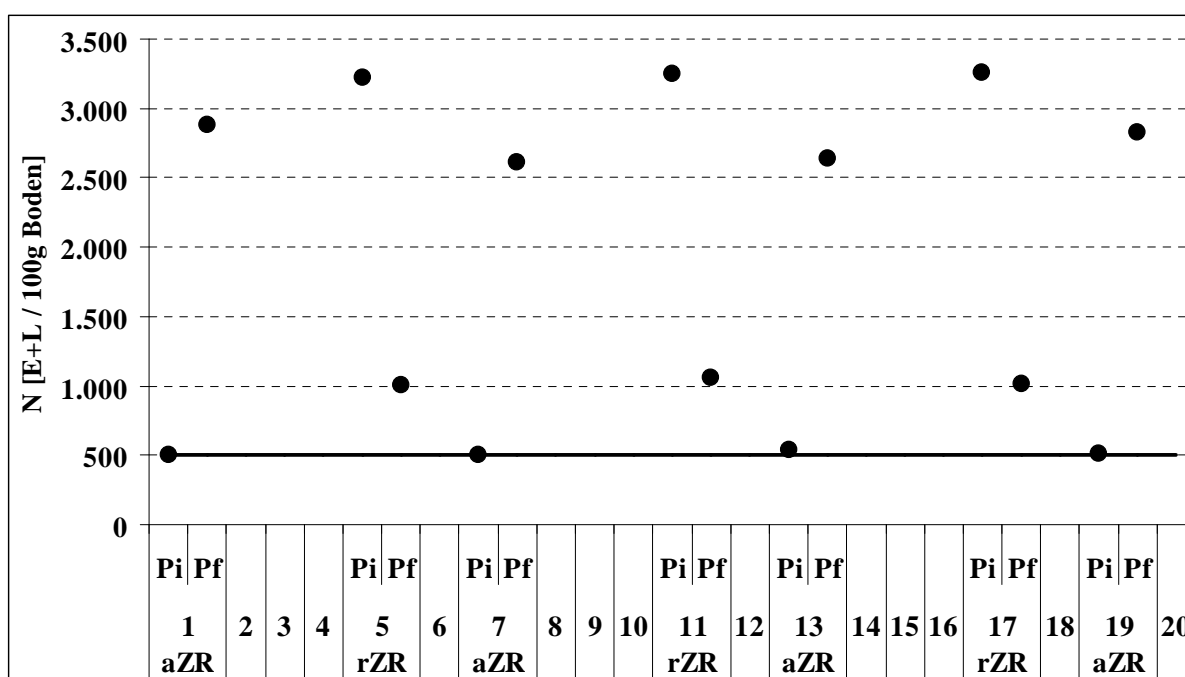
Unter phytosanitären Gesichtspunkten ist die unregelmäßige Fruchtfolge mit aufeinander folgendem Zuckerrübenanbau nicht optimal. Die Gefahr von Ertragsdepressionen aufgrund zunehmenden Befalls mit *D.dipsaci* sowie virösen und pilzlichen Schaderregern steigt.

5.6.4.2 Sechsjährige Rotation mit 33% Rübenanteil und Raps

Zur Integration der Wirtspflanze Raps in eine bestehende Zuckerrübenfruchtfolge könnte folgende sechsjährige Rotation verwendet werden, in der (weiterhin) ein Zuckerrübenanteil von 33% gewährleistet ist. In der Rotation aZR-RW-WG-Ra-rZR-RW folgen dem Raps nemato-

denresistente Zuckerrüben, deren abundanzregulierende Wirkung den Anbau anfälliger Zuckerrüben nach einem Jahr Anbaupause ermöglicht. Unmittelbar vor dem Raps steht Wintergerste, deren frühes Räumen eine ordentliche Stoppelbearbeitung und rechtzeitige Rapssaat ermöglicht. Rapssaat nach frühreifen Weizensorten sollte im Rheinland allerdings ebenfalls ohne weiteres möglich sein. Unter dem Raps kommt es zu einer deutlichen Nematodenvermehrung, die zu P_i -Werten zu den folgenden resistenten Zuckerrüben von ca. 3.260 Eier und Larven führt (siehe Abbildung 107). Diese Befallsdichten können von den resistenten Zuckerrüben deutlich auf $P_f =$ ca. 1.000 Eier und Larven gesenkt werden, aber trotzdem wird die Schadschwelle zu den anfälligen Zuckerrüben mit 513 Eiern und Larven überschritten.

Abbildung 107: Mittlere P_i -Werte bei sechsjähriger Rotation mit ZR und Raps



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 89

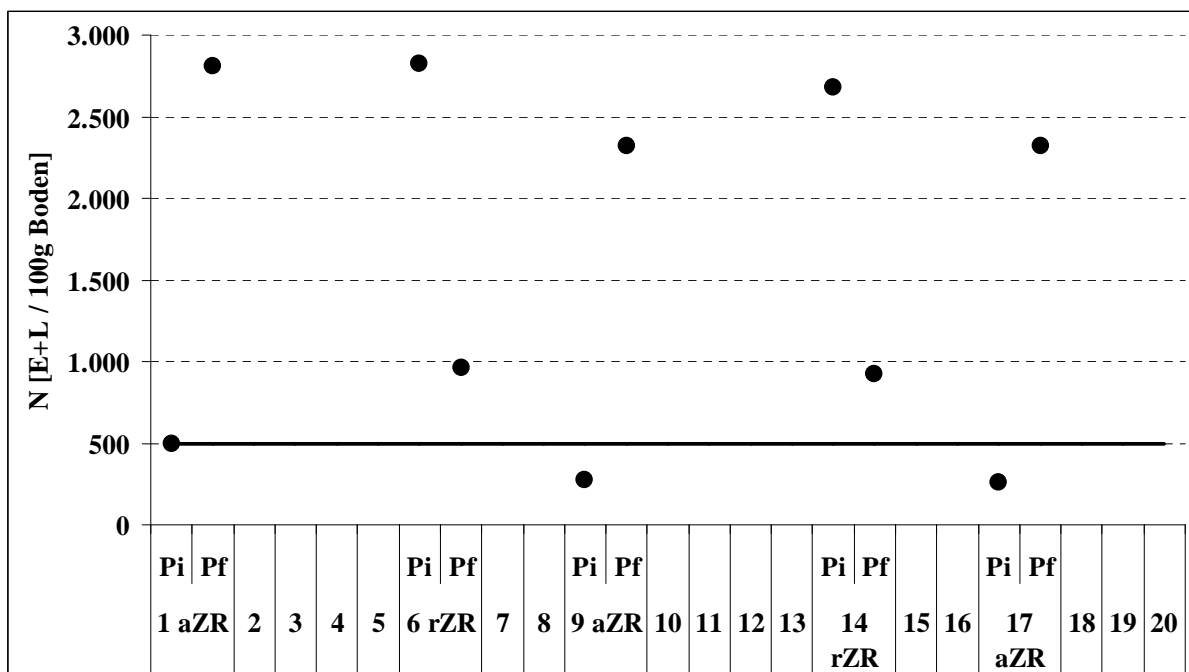
Sowohl die hohen Ausgangsbefallsdichten zu resistenten Zuckerrüben als auch die zu anfälligen Zuckerrüben führen zu hohen Ertragsdepressionen, die durch die Aufnahme der mit 450 Euro/ha leistungsstarken Frucht Raps in die Fruchtfolge nicht ausgeglichen werden können. Mit 27.769 Euro bei 585 Euro Standardabweichung ist diese Fruchtfolge den in Kapitel 5.6.2 vorgestellten Strategien mit 33% Zuckerrübenanteil unterlegen. Wie ein weiteres, hier nicht aufgeführtes Simulationsexperiment zeigt, gilt dies auch für die alternative Fruchtfolge aZR-RW-WG-Ra-RW-rZR, in der die resistenten Zuckerrüben im zweiten Jahr nach dem Raps angebaut werden. Den dadurch geringeren P_i -Werten zu resistenten Zuckerrüben stehen allerdings höhere P_i -Werte der nun unmittelbar danach folgenden anfälligen Zuckerrüben gegenüber, so dass sich beide Fruchtfolgen beim kumulierten Gesamtdeckungsbeitrag nicht signifikant unterscheiden. Raps ist daher aus nematologischer Sicht nicht ohne weiteres in eine Fruchtfolge mit 33% Zuckerrübenanteil integrierbar, wenn eine Vermehrung von *H.schachtii* z.B. unter dem Ausfallraps nicht wirkungsvoll verhindert werden kann. Ist dies jedoch sichergestellt oder kommen zukünftig verfügbare nematodenresistente Rapshybriden zum Einsatz, steht der Aufnahme von Raps in eine Zuckerrübenfruchtfolge aus nematologischer Sicht nichts im Wege. In einer gemeinsamen Raps- und Zuckerrübenfruchtfolge ist allerdings auf-

grund vermehrten Auflaufens von Unkrautras mit einem erhöhten Herbizidaufwand in den Zuckerrüben zu rechnen. Positiv zu bewerten sind die guten Vorfruchtbedingungen, die der Raps folgendem Getreide bietet, die sich in einem höheren Deckungsbeitrag der Folgefrucht wieder finden können, sowie die Auflockerung der Fruchtfolge und arbeitswirtschaftliche Entzerrung durch den Rapsanbau.

5.6.4.3 Achtjährige Rotation mit 25% Rübenanteil und Raps

Als Beispiel für eine achtjährige Fruchtfolge mit Raps, die wie eine vierjährige Rotation einen Zuckerrübenanteil von 25% beinhaltet, dient die Rotation aZR-RW-StW-WG-Ra-rZR-RW-StW. Da längere Anbaupausen als in der sechsjährigen Fruchtfolge mit 33% Zuckerrübenanteil für den natürlichen Populationsrückgang zur Verfügung stehen, ist das Befallsniveau insgesamt niedriger als in der zuvor betrachteten Fruchtfolge (siehe Abbildung 108).

Abbildung 108: Mittlere P_i -Werte bei achtjähriger Rotation mit ZR und Raps



Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnistabelle in Anhang 90

Wie in der sechsjährigen Fruchtfolge mit Raps liegt das Befallsniveau durch die Einführung des zweiten Wirts zu resistenten Zuckerrüben und durch die nur zweijährige Anbaupause bis zu den anfälligen Zuckerrüben auch zu diesen weit oberhalb des Befallsniveaus bei vierjähriger Fruchtfolge mit resistenten und anfälligen Zuckerrüben im Wechsel (siehe Kapitel 5.6.3). Daher ist der bis zum 17. Jahr kumulierte Gesamtdeckungsbeitrag mit 22.330 Euro signifikant geringer als bei dieser. Selbst bei lediglich 25% Zuckerrübenanteil in der Fruchtfolge überwiegen demnach die nematologisch bedingten Nachteile des Rapsanbaus dessen hier nicht erfasste Vorteile. Raps und Zuckerrüben sollten daher in getrennten Fruchtfolgen angebaut werden, solange keine nematodenresistenten Rapshybriden zur Verfügung stehen oder eine rigorose Vernichtung des Ausfallrapses nicht sicherzustellen ist.

5.7 Überlegungen zur Länge des Simulationszeitraums

Die Festlegung der Länge des Betrachtungszeitraums bei Simulationsexperimenten ist abhängig von den nachzubildenden Systemen. Gerade bei der Betrachtung biologischer Systeme sind langfristige Betrachtungen notwendig (vgl. ESSER, 1992, S. 18). Die zuvor durchgeführten Simulationsexperimente haben gezeigt, dass dies insbesondere im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements gilt, da sich die abundanzregulierenden Wirkungen der einzelnen Managementmaßnahmen durch Beeinflussung der Befallsdichte in der betrachteten Periode auch auf die Populationsdynamik in den folgenden Perioden auswirken (Carry-over-Effekt) und damit die folgenden Anbau- und Managemententscheidungen beeinflussen. Hinzu kommt, dass verschiedene Managementstrategien u.U. erst nach Durchlaufen mehrerer Rotationen abundanzdynamisch oder ökonomisch von einander unterschieden werden können. Der Betrachtungszeitraum darf daher nicht zu kurz gewählt werden, da ansonsten aufgrund mangelnder Berücksichtigung der Folgekosten (siehe Kapitel 3.1.1) keine abschließenden vergleichenden Bewertungen einzelner Maßnahmen bzw. der Strategie möglich sind und somit dem Nachhaltigkeitsgedanken des INM nicht entsprochen wird.

Andererseits ist ein langfristiger Betrachtungshorizont nicht unproblematisch, da z.B. die wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen nicht über einen längeren Zeitraum vorhergesagt und ohne weiteres als unveränderlich angesehen werden können. Wegen dieser „strategischen Ungewissheit“ müssen bei Modellen mit längerfristigen Simulationszeiträumen a priori Annahmen über die politische Systemumwelt getroffen werden, i.d.R. die Fortführung des status quo. Dies gilt im Rahmen der zuvor durchgeführten Simulationsexperimente für die reformierte und ab dem Jahr 2005 geltende Gemeinsame Agrarpolitik der EU, deren Ausgestaltung bis über das Jahr 2013 hinaus als gegeben angesehen wird. Desgleichen wird die im Jahr 2013 erreichte Höhe der Ackerprämie (siehe Übersicht 10) für die Folgejahre unterstellt.

Die Reform der Zuckermarktordnung der EU steht unmittelbar bevor, da die zurzeit gültige Marktordnung am Ende des Zuckerwirtschaftsjahres 2005/2006, d.h. am 30. Juni 2006, ausläuft. Da die endgültige Ausgestaltung der Reform erst Ende November 2005 feststeht (siehe Kapitel 7), werden die Simulationsexperimente unter den Vorgaben der bestehenden Zuckermarktordnung durchgeführt.

Selbst innerhalb einer sich nicht verändernden agrarpolitischen Systemumwelt sind Produktpreise und Produktionskosten ebenso wenig mit Sicherheit mittel- bis langfristig prognostizierbar wie die naturalen Erträge. Die a priori Annahme konstanter Kosten im Zuckerrübenanbau und Deckungsbeiträge bei den alternativen Produktionsverfahren ist daher ebenso zulässig wie die Extrapolation von bisher beobachtbaren Trends.

ESSER (1992, S. 19) löst dieses Problem bei seinem Modell zur Bewertung von Fruchtfolgen durch Vorgabe zweier unterschiedlich langer Simulationszeiträume. Für die finanziellen Systeme wählt er einen Betrachtungszeitraum von fünf Jahren, der damit der Länge einer Fruchtfolgerotation entspricht. Für die Nachbildung von Fruchtfolgeeinflüssen auf pflanzenbauliche und ökologische Systeme betrachtet ESSER einen mit 30 Jahren sehr viel längeren Zeitraum, um Anpassungseffekte aufgrund von Fruchtfolgeveränderungen erfassen zu können. Eine solche Trennung zwischen nematologischem und ökonomischem Zeithorizont wird wegen der Carry-over-Effekte als nicht problemgerecht erachtet.

5.8 Zusammenfassender Überblick

In diesem Kapitel wurden Simulationsexperimente zur Demonstration abundanzdynamischer und ökonomischer Unterschiede verschiedener Fruchtfolgen, Rotationslängen und Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements mit dem bio-ökonomischen Systemmodell durchgeführt. In der Literatur finden sich Beispiele für Modelle, die, aufbauend auf unterschiedlich komplexen Modellen zur Nachbildung der Abundanzdynamik des Nematoden und der Befall-Schadens-Relation, durch vom Anwender vorzunehmende Alternativrechnungen als Entscheidungsunterstützungssysteme eingesetzt werden können, oder durch einen geeigneten Algorithmus als Optimierungsmodelle dienen.

Schwerpunkt des Kapitels sind die Simulationsexperimente mit einem Betrachtungshorizont von bis zu 20 Jahren. In diesem langfristigen Simulationszeitraum können die Folgekosten der einzelnen Maßnahmen erfasst und die relativen Vorzughkeiten bestimmt werden. Als wichtigstes Resultat aus den Simulationsexperimenten kann festgehalten werden, dass Nematodenmanagement in engen (zweijährigen) Fruchtfolgen erfolgssteigernd und in jedem Fall erfolgsstabilisierend, d.h. risikomindernd, wirkt und daher in erster Linie für risikoaverse Entscheidungsträger zu empfehlen ist. Fruchtfolgen, in denen Zuckerrüben lediglich alle vier Jahre angebaut werden, können aus nematologischer Sicht als „Gesundungsfruchtfolgen“ bezeichnet werden. Die Kombination von Raps und Zuckerrüben in einer Fruchtfolge bleibt aus nematologischer Sicht problematisch, solange keine nematodenresistenten Rapsorten zur Verfügung stehen. Eine rigorose Bekämpfung des Ausfallrapses ist zwingend notwendig. Weitere phytosanitäre oder arbeitswirtschaftliche Überlegungen, die neben im Rahmen des Modellansatzes nicht monetär erfasst werden, werden an geeigneter Stelle diskutiert und sollten mit in die zu fallenden Entscheidungen einfließen.

Bei den in diesem Kapitel durchgeführten Bewertungen der relativen Vorzughkeiten unterschiedlicher Maßnahmen des Nematodenmanagements ist stets zu beachten, dass im hier gewählten Modellansatz die Leistungsfähigkeit resistenter Kruziferen als Zwischenfrüchte oder zur Begrünung der Flächenstilllegung lediglich auf ihre abundanzregulierende Wirkung reduziert wird. Weitere positive Effekte aus dem Wirkungskomplex Zwischenfruchtanbau sind nicht Gegenstand der Betrachtung, so dass diese Managementmaßnahmen z.B. gegenüber dem Anbau resistenter Zuckerrüben tendenziell benachteiligt werden. Andererseits sind resistente Kruziferen im Vorteil, da ihre abundanzregulierende Wirkung aus unter Laborbedingungen ermittelten Reduktionsleistungen abgeleitet wird, die i.d.R. nicht in vollem Umfang unter Feldbedingungen zu realisieren ist. Die abundanzregulierende Wirkung der resistenten Zuckerrüben beruht dagegen auf Feldversuchen.

6 Erweiterung des Entscheidungsunterstützungssystems

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das bio-ökonomische Entscheidungsunterstützungssystem *INM-Consult* für das Integrierte Nematodenmanagement entwickelt und im Rahmen von Simulationsexperimenten eingesetzt. In diesem Kapitel werden die möglichen Erweiterungen diskutiert, die aus den Simulationsexperimenten abgeleitet werden können.

6.1 Ansatzpunkte für Erweiterungen

Ansatzpunkt für eine Erweiterung des Modellansatzes ist die gesamtbetriebliche Betrachtung. Nur so können alle mit dem Zuckerrübenanbau, der Fruchtfolge und dem Nematodenbefall verbundenen und interdependenten Effekte erfasst werden. Darüber hinaus werden Überlegungen über eine schlagspezifische Ausrichtung der Entscheidungsunterstützung diskutiert.

6.1.1 Gesamtbetriebliche Betrachtung

Der Ackerbau eines landwirtschaftlichen Betriebs erfolgt im Rahmen der als Systemparameter gegebenen Kapazitäten wie Betriebsfläche und Rübenlieferrecht. Die landwirtschaftliche Produktion weist einen ausgesprochenen Verbundcharakter auf, sie ist geprägt von Interdependenzen zwischen den Produktionsverfahren. So haben Entscheidungen bezüglich der Anbaufläche der Zuckerrüben wegen des gemeinsamen Produktionsfaktors Boden auch stets einen Einfluss auf den Anbauumfang mindestens eines alternativen Produktionsverfahrens. Konstante Anbauverhältnisse, wie die Betrachtung eines einzelnen Hektars impliziert, sind demnach nicht praxisgerecht.

Desgleichen gilt für die exogene Vorgabe eines konstanten Mischpreises für Zuckerrüben, dem ein konstanter Grad der Quotenerfüllung zu Grunde liegt. Eine Veränderung der Anbaufläche der Zuckerrübe ist stets verbunden mit einer Veränderung der Rübenerntemenge, des Quotenerfüllungsgrades und damit des erzielbaren Auszahlungspreises (siehe Kapitel 4.5.1.3). Letzterer ist daher eine dynamische Größe, die modellendogen zu errechnen ist. Der gleiche Effekt tritt auf, wenn sich der Rübenertrag oder durch Vortrag von C-Zucker das verfügbare Lieferrecht eines Jahres ändert.

Ohne gesamtbetriebliche Betrachtung kann nicht erfasst werden, dass ausgehend von einem geringen Nematodenbefall bei engen Fruchtfolgen (kurzen Rotationslängen) ohne Nematodenmanagement ein Teufelskreis einsetzt, der aus sich gegenseitig bedingenden Ertragsdepressionen und Ausdehnungen der Zuckerrübenfläche auf Kosten alternativer Produktionsverfahren besteht (siehe Kapitel 3.2.1.1). Ebenso kann nicht abgebildet werden, dass z.B. eine erfolgreiche Senkung der Befallsdichte des Nematoden durch eine Maßnahme und den daher zu erwartenden geringeren Ertragsdepressionen bei den folgenden Zuckerrüben zu einer Senkung des Anbauumfangs dieser Zuckerrüben gegenüber der vorangegangenen Rotation führen muss, wenn zur Vermeidung der Produktion von C-Rüben die Gesamterntemenge nicht ansteigen soll. Ohne gesamtbetrieblichen Kontext und endogen ermittelten Auszahlungspreis führt das Nematodenmanagement in diesem Fall zu Mehrerträgen der Zuckerrüben, die mit dem fixen Mischpreis bewertet werden (siehe Kapitel 5). Situationspezifischer wäre allerdings eine Bewertung mit dem A-, B-, C1- oder C2-Preis in Abhängigkeit vom bisherigen Grad der

Quotenausschöpfung und dem Umfang einer Reduktion des Anbauumfangs. Ist die Rübenanbaufläche so bemessen, dass unter Nematodenbefall eine Quotenausschöpfung von 130% erreicht wird (Erfüllung von A- und B-Quote), sind Mehrerträge dieser Zuckerrübenfläche infolge eines erfolgreichen Nematodenmanagements mit dem C1- und ggf. dem C2-Preis zu bewerten. Den Kosten der Managementmaßnahme stehen in diesem Fall geringe monetäre Leistungen als bei der Bewertung mit einem Mischpreis gegenüber. Beträgt die Quotenausschöpfung ohne Nematodenmanagement dagegen nur 100%, d.h. wird nur das A-Lieferrecht erfüllt, sind Ertragssteigerungen bis zu einer Quotenausschöpfung von 130% mit dem höheren B-Preis zu bewerten, so dass die Wirtschaftlichkeit des Nematodenmanagements steigt.

Aufgrund der Asymmetrie der Rübenpreise führen die Maßnahmen des Integrierten Nematodenmanagements mit ihrem in Kapitel 5 nachgewiesenen ertragsvolatilitätsmindernden Effekt c.p. zu höheren realisierten Rübendurchschnittspreisen gegenüber einem Zuckerrübenanbau ohne Nematodenmanagement. Die Bewertung mit einem fixen Mischpreis bedeutet daher eine systematische Benachteiligung des Integrierten Nematodenmanagements. Ohne gesamtbetrieblichen Kontext und modellendogene Rübenpreisberechnung können die Auswirkungen der Maßnahmen des Integrierten Nematodenmanagements auf den Erfüllungsgrad des betrieblichen Lieferrechts und den Zuckerrübenpreis demnach nicht betriebs- und situationsspezifisch abgebildet und die Maßnahmen nicht bewertet werden. Die Simulationsexperimente in Kapitel 5 haben gezeigt, dass Nematodenmanagement für risikoneutrale Entscheidungsträger nicht in jedem Fall ökonomisch gerechtfertigt ist. Darüber hinaus ist unstrittig, dass Integriertes Nematodenmanagement mit dem Ziel der Ertragssteigerung über das betriebliche Rübenlieferrecht hinaus bzw. zur Sicherung einer Produktion von nicht zum Vortrag verwendeter C1- und von C2-Rüben wirtschaftlich nicht sinnvoll sein kann aufgrund der negativen Deckungsbeiträge dieser Rüben (siehe Kapitel 4.5.2.1).

Nicht ohne gesamtbetrieblichen Kontext implementiert werden kann der Wunsch oder die Forderung insbesondere risikoaverser Entscheidungsträger, bei Betrachtung und vergleichender Bewertung von Maßnahmen des Integrierten Nematodenmanagements einen Mindestgrad der Lieferrechtserfüllung oder eine Begrenzung der Wahrscheinlichkeit der Unterschreitung eines Mindesterfüllungsgrades als Nebenbedingung zu berücksichtigen. Aufgrund der Stabilisierung der Ernteerträge durch das Nematodenmanagement ist die Planung der Anbaufläche für Zuckerrüben allerdings mit wesentlich weniger Unsicherheit verbunden als ohne abundanzregulierende Maßnahmen.

Aufgrund der zuvor dargestellten Interdependenzen spiegelt die im bisherigen Ansatz implizierte *ceteris-paribus*-Annahme die reale Entscheidungssituation nicht ausreichend exakt wieder. Vielmehr müssen stets mehrere Parameter simultan betrachtet und für unterschiedliche Szenarien verändert werden. Als Konsequenz dieser Bewertung ist festzuhalten, dass ein dynamischer Planungsansatz zu entwickeln ist, der alle Carry-over-Effekte berücksichtigen kann, die die Abundanzdynamik des Nematoden sowie Änderungen daran durch einzelne Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements mit sich bringen. Desgleichen gilt für die Verbundeffekte dieser Maßnahmen, deren Erfassung dazu führen kann, dass sich die relative Vorzüglichkeit verschiedener Maßnahmen gegenüber einem Ansatz ohne Berücksichtigung gesamtbetrieblicher Effekte verändert.

6.1.2 Schlagspezifische Ausrichtung

Für ein Herunterbrechen der Entscheidungsunterstützung im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements bis auf die Schlagebene sprechen folgende Gründe:

1. Die Anbauplanung erfolgt in der Praxis auf der Ebene des Einzelschlags, wenn auch unter gesamtbetrieblichen Restriktionen (Nebenbedingungen) wie z.B. Erfüllung des Zuckerrübenlieferrechts und Einhaltung der Stilllegungsverpflichtung. Nur in Ausnahmefällen werden Ackerstücke in Parzellen unterschiedlichen Anbaus unterteilt.
2. Die einzelnen Schläge eines Betriebs können sich in ihrer Anbauwürdigkeit für Zuckerrüben und andere Feldfrüchte unterscheiden.
3. Es kann nicht von einer betrieblichen bzw. betriebseinheitlichen Verseuchung mit *H.schachtii* ausgegangen werden. Wie Kapitel 3.1.2 zeigt, ist selbst der Ackerschlag ein recht grobes Raster zur Abbildung der Befallsdichten.

Ein einfaches Beispiel verdeutlicht, dass die Vorgabe einer („Betriebs“-)Fruchtfolge, wie in den Simulationsexperimenten geschehen, oder von Anbauanteilen der Fruchtarten nur im Idealfall ausreichend ist, die Fruchtfolge auf den Schlägen eines Betriebs abzubilden, und dass statt eines Betriebsflächen- ein Schlagmanagement nötig ist. Als Beispiel diene ein Betrieb, bestehend aus neun gleich großen Ackerschlägen. Die Vorgabe eines Anbauanteils der Zuckerrübe von 33% ist für diesen Betrieb nur dann gleichbedeutend mit einer dreijährigen Fruchtfolge auf jedem einzelnen Schlag, wenn alle Schläge gleichermaßen für den Zuckerrübenanbau nutzbar sind und genutzt werden. Dieser Idealfall ist in Übersicht 21 dargestellt. Der Anbau von Zuckerrüben erfolgt auf den grau markierten Feldern.

Übersicht 21: Dreijährige Fruchtfolge, Idealfall

Schlag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ZR-Anteil (Betrieb)
Jahr 1										33%
Jahr 2										33%
Jahr 3										33%
Jahr 4										33%
Jahr 5										33%
Jahr 6										33%
Jahr 7										33%
Jahr 8										33%
Jahr 9										33%
ZR-Anteil (Schlag)	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	

Quelle: Eigene Darstellung

Wird ein Schlag wegen schlechteren Bodens, einer ungünstigen Lage oder Form vom Zuckerrübenanbau ausgeschlossen (Schlag 9, Übersicht 22) und auf einem weiteren Rübenanbau nur alle fünf Jahre zugelassen (Schlag 8, ebd.), kann eine dreijährige Fruchtfolge auf den verbleibenden Schlägen nicht mehr eingehalten werden. Zuckerrüben müssen in jedem zweiten Jahr angebaut werden. Der Anteil der Zuckerrüben an der Betriebsfläche bleibt dagegen zunächst bei 33% und vermittelt den Eindruck einer dreijährigen Rotation. Durch den häufigeren Anbau der Wirtspflanze verschärft sich die Nematodenproblematik im Laufe der Jahre und die Zuckerrübenenerträge sinken. Zur Erfüllung des betrieblichen Lieferrechts reagiert der Landwirt darauf mit einer Ausdehnung des Zuckerrübenanbaus ab dem achten Jahr über 33% hinaus (Übersicht 22), und der zuvor beschriebene Teufelskreis beginnt.

Übersicht 22: Dreijährige Fruchtfolge, Problemfall

Schlag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ZR-Anteil (Betrieb)
Jahr 1	■									33%
Jahr 2				■						33%
Jahr 3	■						■			33%
Jahr 4		■								33%
Jahr 5					■					33%
Jahr 6	■									33%
Jahr 7				■						33%
Jahr 8	■						■	■		38%
Jahr 9		■			■					38%
ZR-Anteil (Schlag)	44%	44%	44%	44%	38%	38%	33%	22%	0%	

Quelle: Eigene Darstellung

Alle Fruchtfolgeentscheidungen und Managementmaßnahmen im Rahmen des INM müssen daher einzelschlagspezifisch ausgerichtet werden. Gleichzeitig müssen sie, wie im Abschnitt zuvor gezeigt, gesamtbetrieblich aufeinander abgestimmt sein. Ein solcher Planungsansatz entspricht nicht nur dem Grundgedanken des nematodenkontrollierten Zuckerrübenanbaus nach BEHRINGER (siehe Kapitel 3.2.2.2), sondern impliziert einen nematodenkontrollierten Ackerbau. Übersicht 23 zeigt eine Planungsmatrix, mit deren Hilfe geplant werden kann, welche Fruchtart bzw. Maßnahme zum Nematodenmanagement auf welchem Schlag zum Einsatz zu kommen hat, damit sowohl die schlag- als auch die gesamtbetrieblichen Restriktionen stets eingehalten werden.

Übersicht 23: Planungsmatrix des nematodenkontrollierten Ackerbaus

	Jahr 1	Jahr 2	...	Jahr m	Schlagspezifische Restriktionen (z.B. Fruchtfolge)
Schlag 1					Ja/Nein
Schlag 2					Ja/Nein
⋮					Ja/Nein
Schlag n					Ja/Nein
Gesamtbetriebliche Restriktionen (z.B. Lieferrecht)	Ja/Nein	Ja/Nein	...	Ja/Nein	

Quelle: Eigene Darstellung

6.2 Wahl eines problemadäquaten Planungs- und Optimierungsansatzes

Ziel des Planungs- und Optimierungsansatzes ist die Anbau- und Fruchtfolgeplanung für einen landwirtschaftlichen Betrieb unter Einbeziehung der Maßnahmen zum Nematodenmanagement. Der Planungsansatz soll es dem Entscheidungsträger ermöglichen, diese nicht nur einzeln zu bewerten und in diskreten Alternativrechnungen miteinander zu vergleichen, wie in den Simulationsexperimenten in Kapitel 5 geschehen. Vielmehr muss der Planungsansatz in der Lage sein, die Kombination der einzelnen Maßnahmen zu Maßnahmenbündeln innerhalb eines Anbaujahres und die Abstimmung ihrer Abfolge im Zeitverlauf zu ermöglichen. Aus einzelnen Maßnahmen sind betriebs- und situationsspezifische Managementstrategien im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements zu entwickeln unter Einbeziehung gesamtbetrieblicher Vorgaben bezüglich des Umfangs der Betriebsfläche und des betrieblichen Lieferrechts für die Zuckerrüben.

6.2.1 Umfang des Planungsproblems

Abgesehen von der Entscheidung für oder gegen den Anbau nematodenresistenter Kruziferen als Zwischenfrüchte oder zur Begrünung der Flächenstilllegung, entspricht es nicht der Zielstellung des Integrierten Nematodenmanagements, das optimale Produktionsprogramm zu bestimmen. Neben Zuckerrüben werden daher lediglich die in Anhang 57 vorgestellten Produktionsverfahren für den Planungsansatz betrachtet.

ALIO (1993, S. 29) definiert den „Entscheidungsraum Fruchtfolge“ des Produktionssystems Zuckerrübe durch die Problembereiche

1. Anbauhäufigkeit der Zuckerrübe, womit die regelmäßige Wiederkehr der Zuckerrübe auf dem gleichen Feld und damit die Länge der Anbaupause beschrieben wird,
2. Fragen der zeitlichen Aufeinanderfolge der einzelnen Fruchtarten auf dem gleichen Feld und Einreihung der Zuckerrübe in die Fruchtfolge sowie

3. Anbauverhältnis der Zuckerrübe in der Fruchtfolge, d.h. Anteil der Zuckerrübe in einem Jahr an der Ackerfläche.

Daraus wird ersichtlich, dass Anbau- und Fruchtfolgeplanung eines landwirtschaftlichen Betriebs stets miteinander gekoppelt sind. Wie bereits in Kapitel 3.2.2 erwähnt, ist nach STONE ET AL. (1992, S. 60) die sorgfältige Auswahl eines Fruchtfolge- oder Anbauplans stets der erste Schritt zu jeder betrieblichen Lösung der ökologisch-ökonomischen Probleme, mit denen ein Landwirt konfrontiert ist. Die Anbau- bzw. Fruchtfolgeplanung ist allerdings aufgrund sich teilweise widersprechender Ziele, die mit dieser Planung erreicht werden sollen, ein komplexes betriebliches Problem:

1. Für den Anbau gewisser Früchte gibt es exogen vorgegebene Untergrenzen, z.B. bei der Flächenstilllegung und bei Futterpflanzen.
2. Die Fruchtfolge unterliegt strengen (nicht nur nematologischen) phytosanitären Beschränkungen.
3. Die chronologische Passfähigkeit zweier aufeinander folgender Hauptfruchtarten (Fruchtfolgepaar) oder der Hauptfrucht und einer folgenden Zwischenfrucht muss beachtet werden. Diese umfasst sowohl Terminüberschneidungen als auch zu lange Brachezeiten.
4. Gesetzliche Auflagen müssen eingehalten werden, z.B. im Rahmen von Cross-Compliance (siehe Kapitel 4.5.1.1) oder bei Teilnahme an diversen Förderprogrammen
5. Arbeitswirtschaftliche Anforderungen sind zu berücksichtigen, damit die notwendigen Arbeitsabläufe termingerecht durchgeführt werden können.
6. Die persönlichen Präferenzen des Entscheidungsträgers sind zu beachten, sowie nicht zuletzt dessen Zielsystem.

Durch Reduktion der Ziele der Anbau- und Fruchtfolgeplanung auf wesentliche Aspekte kann die Komplexität des Planungsproblems wesentlich vereinfacht werden. So sind Restriktionen, die sich aus der innerbetrieblichen Verwendung von Feldfrüchten ergeben, vernachlässigbar, wenn wie im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements ausschließlich der Ackerbau betrachtet und Tierhaltung nicht berücksichtigt wird.

6.2.2 Fruchtfolgeplanung

Fruchtfolgeplanung ist die mehrperiodische Festlegung einer Fruchtfolge auf einem Feld. Dafür stehen verschiedene kontrolltheoretische Planungskonzepte zur Verfügung.

6.2.2.1 Steuerung

Beim Steuerungsansatz (open-loop-control, vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 271) wird die Fruchtfolge in t_0 für den gesamten Betrachtungszeitraum geplant und in den folgenden Jahren wie geplant umgesetzt, d.h. es gibt als einzigen Planungs- und Entscheidungszeitpunkt für die Festlegung der Fruchtfolge lediglich den Beginn des Betrachtungszeitraums. Dies entspricht der in Kapitel 5 dargestellten Vorgehensweise.

6.2.2.2 Flexible Planung

Wird zum Zeitpunkt t_0 eine einmalige und umfangreiche Planung vorgenommen und werden für alle denkbaren Systemumweltkonstellationen Eventualpläne erarbeitet, spricht man von flexibler Planung (vgl. STEFFEN UND BORN, 1987, S. 279). Im Gegensatz zur Steuerung ist dadurch eine Korrektur der in t_0 getroffenen Entscheidungen möglich. Die Möglichkeit zu Entscheidungskorrekturen besteht im vorliegenden Fall immer dann, wenn über die Aussaat der Früchte neu entschieden werden kann. So kann für t_1 eine bestimmte Fruchtfolge realisiert werden, die jedoch nach Ablauf dieser Periode aufgrund sich ändernder Systemumweltbedingungen variiert wird. Die Planung für diese sich ändernden Bedingungen wurde jedoch bereits zum Zeitpunkt t_0 durchgeführt. Im Unterschied zum Steuerungsansatz stimmt hierbei der Planungs- und Entscheidungszeitpunkt nicht überein: Es wird nur einmal geplant, aber mehrmals entschieden (ESSER, 1992, S. 23).

6.2.2.3 Regelung

Ein Regleransatz (close-loop-control, vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 271) entsteht durch die Verbindung der Planung mit der Kontrolle (Soll-Ist-Vergleich). Regelung ist die wiederholte Planung, Kontrolle, Korrektur und Entscheidung zu verschiedenen Zeitpunkten, eine Folge flexibler Planungen (vgl. ESSER, 1992, S. 23). ESSER (1992, S. 24ff.) stellt den Aufbau eines möglichen Regleransatzes für die Planung von Fruchtfolgen vor: Angenommen, es ergibt sich als Ergebnis der Fruchtfolgeplanung in t_0 bei gegebenen Inputvariablen und unter der Annahme, dass die voraus geschätzte Systemumwelt für den Betrachtungszeitraum zutrifft, die rheinische Fruchtfolge Zuckerrüben – Winterweizen – Wintergerste (ZR-WW-WG) mit einem Deckungsbeitrag für die Einzelfrucht sowie für die Gesamtfolge. Dieser Deckungsbeitrag wird als Soll-Größe für den Soll-Ist-Vergleich herangezogen. Als Stellgröße fließt die Information über die anzubauende Fruchtfolge in das reale System des Betriebes ein. Hier wirkt die reale Systemumwelt des ersten Jahres auf die anzubauende Frucht Zuckerrüben und erbringt nach Ablauf der Vegetation den Ist-Wert, der in den Soll-Ist-Vergleich einmündet. Ergeben sich keine Abweichungen, wird die Empfehlung „Weitermachen wie in t_0 geplant“ ausgesprochen (vgl. ESSER, 1992, S. 24).

Treten aufgrund geänderter Inputvariablen, Umweltbedingungen oder Parameter des Zielsystems nicht tolerierbare Abweichungen auf, kann in t_1 eine neue Planung der Fruchtfolge unter Berücksichtigung dieser Änderungen erfolgen. So kann eine Verbesserung des Informationssystems ergeben, dass im dritten Jahr anstatt Wintergerste Ackerbohnen (AB) anzubauen sind. Diese Folge wird wiederum realisiert und bringt die Ist-Größe zum Zeitpunkt t_2 , die mit der in t_1 berechneten Sollgröße verglichen wird. Bei Übereinstimmung heißt die Empfehlung „Weitermachen wie in t_1 geplant“, ansonsten muss der gesamte Regelprozess wie zum Zeitpunkt t_1 erneut ablaufen (vgl. ESSER, 1992, S. 26).

6.2.3 Anbauplanung

Unter Anbauplanung wird die jährlich wiederkehrende Planung verstanden, die neben der Auswahl der anzubauenden Ackerfrüchte die Festlegung des Anbauumfangs der ausgewählten Fruchtarten umfasst. Da die Zusammenstellung des Produktionsprogramms nicht Gegenstand des Integrierten Nematodenmanagements ist, verbleibt die Bestimmung der Anbauumfänge. Diese erfolgt bei Zuckerrüben anbauenden Betrieben i.d.R. streng hierarchisch: Zunächst erfolgt die Festlegung des Anbauumfangs der wirtschaftlich herausragenden Zuckerrü-

ben, anschließend werden Umfang und Nutzungsart der Flächenstilllegung abgeleitet. Je nach persönlicher Präferenz des Entscheidungsträgers und Fruchtfolgerestriktionen dienen die verbleibenden Alternativfrüchte, i.d.R. Getreide, der Auffüllung der verbleibenden Flächen (Residualplanung). Im Folgenden wird daher zunächst die Anbauplanung der Zuckerrüben und anschließend die der Anbaualternativen abgehandelt.

6.2.3.1 Anbauplanung für Zuckerrüben nach Erfüllungsgrad des Lieferrechts

Wie bereits in Kapitel 3.2.1.1 dargestellt, stellt die Erfüllung des betrieblichen Lieferrechts eine zentrale Größe im Zuckerrübenanbau dar, insbesondere weil A-, B- und für den C-Rüben-Vortrag genutzte C1-Rüben überdurchschnittlich hohe, nicht vorgetragene C1-Rüben und C2-Rüben dagegen negative Deckungsbeiträge aufweisen (siehe Kapitel 4.5.2.1). Der Anbauumfang der Zuckerrüben wird in der landwirtschaftlichen Praxis daher oftmals nach Erfüllung des Lieferrechts ausgerichtet. Je nachdem, ob die Inanspruchnahme des Vortrags von C1-Rüben von vornherein eingeplant ist oder nicht, wird ein Erfüllungsgrad von 130% (Erfüllung der A- und der B-Quote) oder 140% (Erfüllung der A-, B- und C1-Quote) bezogen auf das A-Lieferrecht angestrebt. Im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements kann aber auch beispielsweise ein geplanter Grad der Lieferrechtserfüllung von 100%, d.h. ein temporärer Verzicht auf den Anbau von B-Rüben, betrachtet werden. Die Anbaufläche und damit der Flächenanteil der Zuckerrüben errechnet sich bei deterministischer Planung, d.h. bei Annahme vollkommener Information über die Ertragsparameter, mittels Division des betrieblichen Lieferrechts durch den zu erwartenden Rübenanbauertrag. Als Beispiel diene ein landwirtschaftlicher Betrieb, der über ein A-Lieferrecht von 1.000 t und ein B-Lieferrecht von 300 t bei 16% Zuckergehalt verfügt. Die Höhe der C1-„Quote“ beträgt demnach 100 t. Übersicht 24 zeigt die vom Ertragsdynamikmodell errechneten Ertragsparameter anfälliger Zuckerrüben ohne Nematodenbefall an den drei Produktionsorten²⁷. Je höher der erzielte Zuckergehalt, desto stärker werden die verfügbaren Lieferrechte gekürzt (siehe Kapitel 4.5.1.3).

Übersicht 24: Parameter für die Anbauplanung der Zuckerrüben

	Produktionsort		
	<u>Gut</u>	<u>Mittel</u>	<u>Schlecht</u>
RE (dt/ha)	733,00	660,00	586,00
ZG (%)	17,52	16,65	15,77
A-Quote (t)	900,52	955,09	1.016,94
B-Quote (t)	270,16	286,53	305,08
C1-„Quote“ (t)	90,05	95,55	101,69

Quelle: Eigene Berechnungen

²⁷ Simulationseinstellungen siehe Kapitel 5.2.

In Übersicht 25 sind die für den angestrebten Erfüllungsgrad notwendigen Anbauumfänge aufgeführt. Die Zunahme der notwendigen Anbaufläche mit abnehmender Güte des Produktionsorts ist sowohl auf das abnehmende Rübenerntsniveau als auch auf die Umrechnung des betrieblichen Lieferrechts zurückzuführen. Ein Verzicht auf den Anbau von B-Rüben, d.h. Erfüllungsgrad 100% statt 130%, reduzierte die Anbaufläche für Zuckerrüben im gewählten Beispiel um 23,1%, das Einplanen des Anbaus von C1-Rüben (140% statt 130% Erfüllungsgrad) erhöhte die Anbaufläche dagegen um 7,7%.

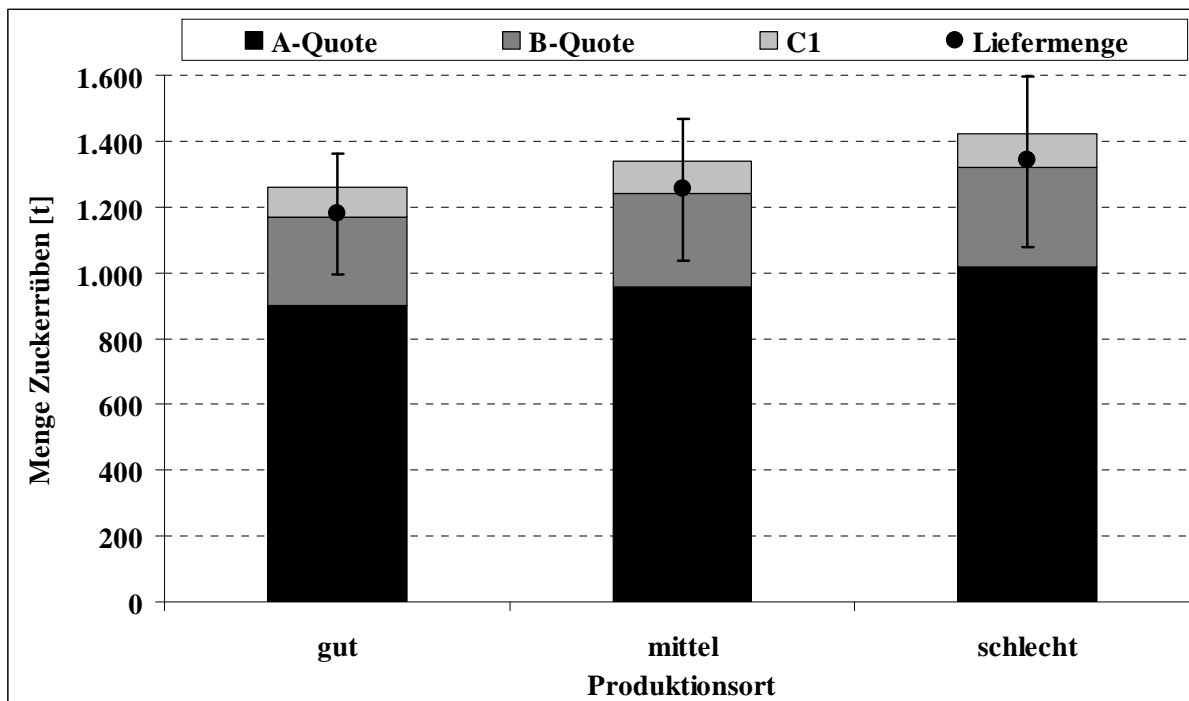
Übersicht 25: Anbauplanung der Zuckerrüben je nach Quotenerfüllungsgrad

Angaben in ha	Produktionsort		
Erfüllungsgrad	<u>Gut</u>	<u>Mittel</u>	<u>Schlecht</u>
100%	12,3	14,5	17,4
130%	16,0	18,8	22,6
140%	17,2	20,3	24,3

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Entscheidung, welcher Flächenanteil der Ackerfläche für den Zuckerrübenanbau verwendet werden soll, ist im Herbst des dem Rübenanbau vorangehenden Jahres, wenn die Aussaat der Winterungen ansteht, spätestens aber im Frühjahr des betrachteten Jahres zur Aussaat der alternativen Sommerungen, zu fällen, da für den Zuckerrübenanbau vorgesehene Ackerschläge vorgehalten werden müssen. Zum Zeitpunkt der Entscheidung liegen demnach keine sicheren Informationen über die den Ertrag beeinflussenden Faktoren und damit über die Ertragsparameter vor. Der stochastische Ansatz des Prognosemodells für den Zuckerrübenanbau ermöglicht die Berücksichtigung dieser Entscheidungssituation unter Unsicherheit, da er die Variabilität des Zuckerrübenanbaus abbilden kann.

Im Gegensatz zur deterministischen Planung kann nicht mehr von einer „Punktlandung“ bei der Quotenerfüllung ausgegangen werden, vielmehr sind streuende Gesamtliefermengen als Folge der Ertragschwankungen zu erwarten. Wird normalverteilter Rübenanbau mit dem in Übersicht 24 aufgeführten Modelloutput der deterministischen Simulation als Mittelwert und 73,3 dt/ha Standardabweichung unterstellt, können die in Übersicht 25 genannten Anbauumfänge für einen „mittleren“ Erfüllungsgrad von 130%, d.h. 16,0, 18,8 und 22,6 ha, für die stochastische Simulation verwendet werden. Abbildung 109 stellt die bei den o.g. Anbauumfängen erreichten mittleren Liefermengen, deren 90%-Intervalle sowie die verfügbaren betrieblichen Lieferrechte für die drei Produktionsorte dar. Wie zu erwarten war, wird das A- und B-Lieferrecht im Mittel erfüllt. Allerdings sind auch große Über- und Unterlieferungen möglich. So beträgt die Wahrscheinlichkeit, die A-Quote nicht zu erfüllen, zwar nur zwischen 0,7% (guter Standort) und 2,3% (schlechter Standort), aber die Wahrscheinlichkeit eines Erfüllungsgrades kleiner als 130% (Nichterfüllung des B-Kontingents) beträgt bereits 43-44%. Gleichzeitig werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 24,4-30,4% Erfüllungsgrade über 140% erzielt und C2-Rüben produziert.

Abbildung 109: Lieferrechtserfüllung bei stochastischem Rübenenertrag

Quelle: Eigene Darstellung

Mitbestimmend für die Festlegung des Anbauumfangs der Zuckerrüben unter Unsicherheit ist die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers. Risikoneutrale Entscheidungsträger werden, wie eben gezeigt, den Umfang der Anbaufläche so bestimmen, dass bei mittleren Rübenenerträgen (Erwartungswert des Rübenenertrags) der angestrebte Grad der Lieferrechtserfüllung erreicht wird. Risikoaverse Entscheidungsträger werden vor allem die Gefahr der Unterlieferung, die mit dem Erwartungswertansatz verbunden ist, als prohibitiv hoch einschätzen. Sie präferierten einen Ansatz, der die Anbaufläche so bemisst, dass die Wahrscheinlichkeit, einen Erfüllungsgrad unter 100% oder 130% zu realisieren, einen niedrigen Grenzwert nicht übersteigt oder gänzlich ausgeschlossen ist. Dies ließe sich bei Ertragsschwankungen nur durch eine deutliche Ausdehnung der Anbaufläche erreichen und die Wahrscheinlichkeit der Überlieferung stiege deutlich an. Es ist davon auszugehen, dass diese Strategie ökonomisch und aus nematologischer Sicht nicht sinnvoll ist.

6.2.3.2 Anbauplanung für Zuckerrüben nach deren Grenzdeckungsbeitrag

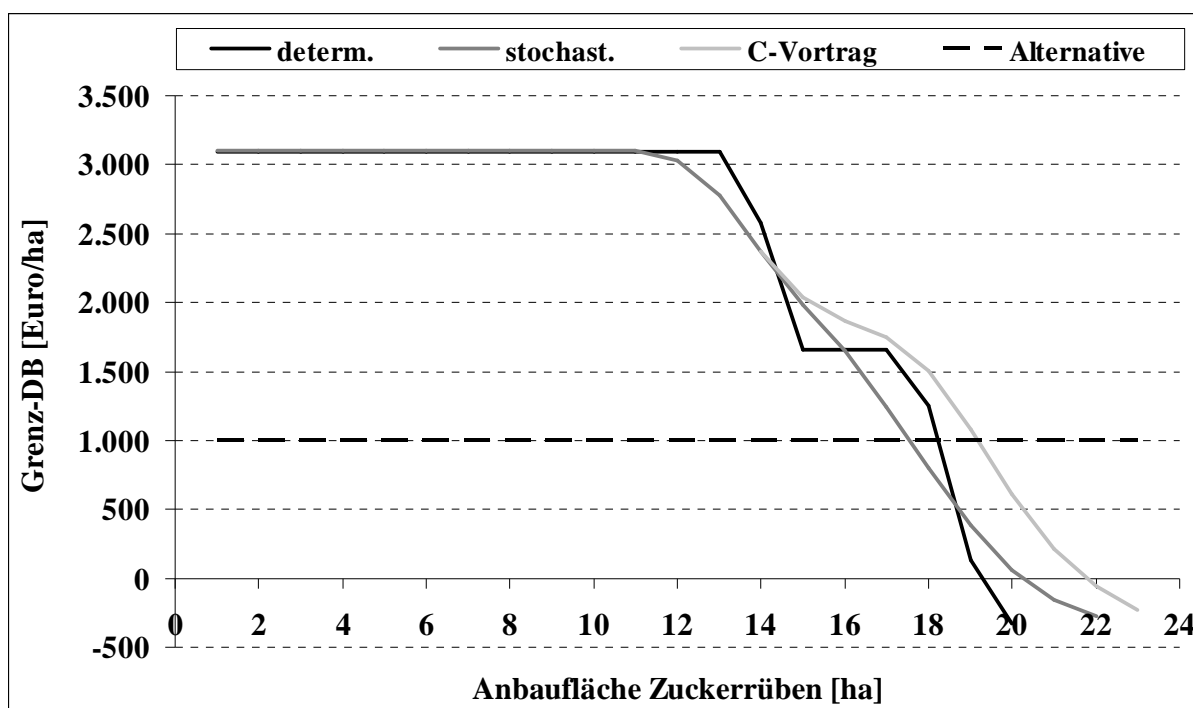
Unter betriebswirtschaftlichen Aspekten kann der Anbauumfang der Zuckerrüben nicht ohne Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der Anbaualternativen bestimmt werden. Der Gewinn maximierende Entscheidungsträger bemisst die Anbaufläche der Zuckerrüben so, dass der letzte angebaute Hektar Zuckerrüben noch einen Deckungsbeitrag (Grenzdeckungsbeitrag) erzielt, der nicht unter dem der Anbaualternative liegt (vgl. ISERMEYER, 1987, S. 50).

Zur Verdeutlichung diene folgendes Beispiel, in dem mit den in Anhang 91 aufgeführten Parametern der Grenzdeckungsbeitrag und die optimale Anbaufläche der Zuckerrüben berechnet ist. Die Auszahlungspreise enthalten lediglich den Grundpreis, die Schnitzelvergütung und die Umsatzsteuer. Die Deckungsbeiträge des Zuckerrübenanbaus sowie die als Differenzen zwi-

schen zwei aufeinander folgenden Anbauumfängen abzuleitenden Grenzdeckungsbeiträge sind für die Berechnung ohne Ertragsschwankungen in Anhang 92 aufgelistet.

Abbildung 110 stellt den Verlauf des Grenzdeckungsbeitrags der Zuckerrüben bei deterministischer Simulation dar. Der Grenzdeckungsbeitrag der ersten Hektare Zuckerrüben ist mit 3.088 Euro/ha wegen des hohen Auszahlungspreises für A-Rüben sehr hoch. Mit dem 14. Hektar werden im angeführten Beispiel die ersten B-Rüben produziert, der Grenzdeckungsbeitrag sinkt bis auf 1.659 Euro/ha. Mit dem 18. Hektar werden die ersten C1-Rüben produziert und mit dem 19. Hektar wird der Deckungsbeitrag negativ, obwohl noch keine C2-Rüben produziert werden. Soweit sollte der Zuckerrübenanbau aber gar nicht erst ausgedehnt werden, da bei einer Anbaufläche von 18 ha der Grenzdeckungsbeitrag mit 1.181 Euro/ha letztmalig über dem Deckungsbeitrag der betrachteten Alternative in Höhe von 1.000 Euro/ha liegt. Bei Verringerung der Schrittweite der iterativen Ausdehnung der Zuckerrübenfläche wäre das Ergebnis der Berechnungen, dass der optimale Anbauumfang genau das A- und B-Kontingent erfüllt (Erfüllungsgrad 130%). Dies ist bei 17,74 ha Zuckerrüben der Fall.

Abbildung 110: Grenzdeckungsbeiträge von Zuckerrüben



Quelle: Eigene Darstellung

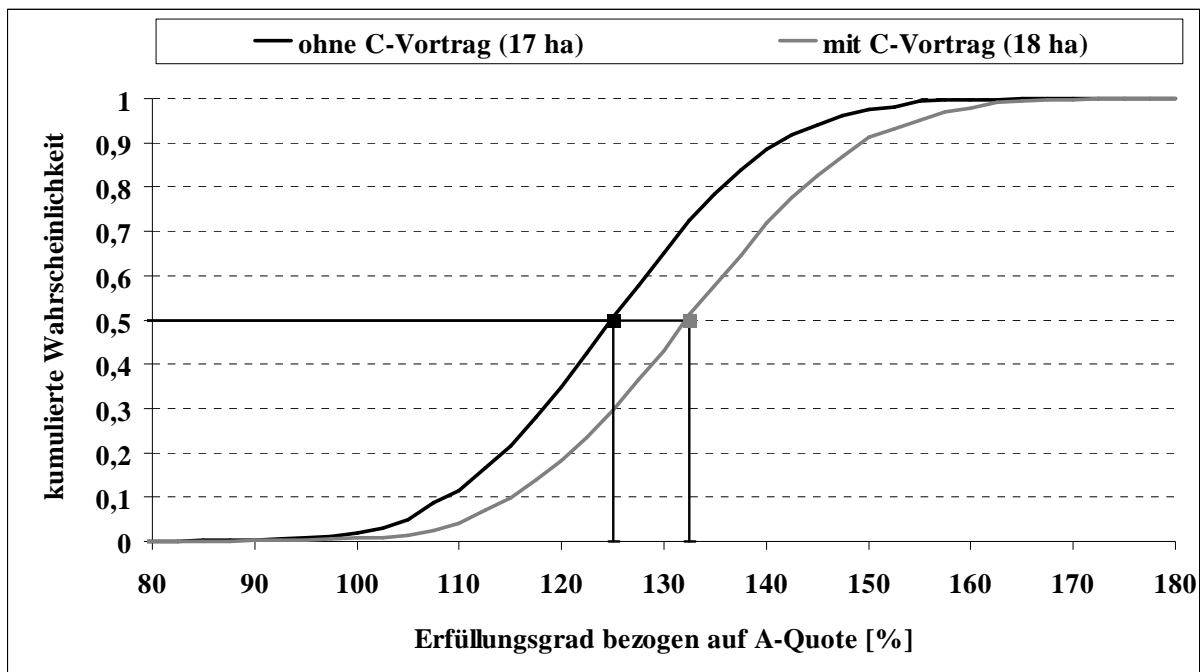
In Abbildung 110 sind darüber hinaus auch Verläufe mittlerer Grenzdeckungsbeiträge bei stochastischer Ertragssimulation dargestellt. Die Verteilungsparameter entsprechen dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Beispiel²⁸. Durch Berücksichtigung der Ertragsschwankungen der Zuckerrübe sinkt die optimale Anbaufläche auf 17 ha, da der 18. Hektar einen geringeren mittleren Grenzdeckungsbeitrag als die Alternativfrucht aufweist. Mit 17 ha Zuckerrüben kann das A- und B-Lieferrecht nicht mehr in allen Fällen erfüllt werden. Der

²⁸ Zum Planungszeitpunkt fehlen nicht nur gesicherte Informationen über die Ertragsparameter, sondern auch über die C-Rübenpreise (siehe Kapitel 4.5.1.3). Neben dem Ertragsrisiko besteht demnach auch ein für die Grenzdeckungsbeitragsrechnung relevantes Preisrisiko, das nicht berücksichtigt wird.

Grad der Lieferrechtserfüllung schwankt je nach erzieltm Ertrag zwischen 79,8% und 166% und beträgt im Mittel 125% (Abbildung 111). Nach dem Entscheidungskriterium Grenzdeckungsbeitrag kann demnach bei entsprechend ertragsstarker Alternativfrucht der Verzicht auf vollständige Erfüllung des B-Lieferrechts auch ohne Berücksichtigung des Integrierten Nematodenmanagements ökonomisch sinnvoll sein. Risikoaverse Entscheidungsträger könnten statt des mittleren Grenzdeckungsbeitrags (50%-Percentil) dessen 90%- oder 95%-Percentil betrachten, wodurch der optimale Anbauumfang anstiege und sich die Gefahr der Unterlieferung des betrieblichen Lieferrechts verringerte.

Zur Verdeutlichung der Auswirkungen des C-Rübenvortrags ist in Abbildung 110 der Verlauf des Grenzdeckungsbeitrags bei stochastischer Ertragssimulation sowie Inanspruchnahme des Vortrags abgebildet. Durch die wesentlich bessere Bezahlung der Vortragsrüben gegenüber den C1-Rüben steigt die optimale Zuckerrübenanbaufläche c.p. auf 18 ha und die mittlere Lieferrechtserfüllung auf 132% (siehe Abbildung 111).

Abbildung 111: Lieferrechtserfüllung bei Anbauplanung mit Grenzdeckungsbeitrag



Quelle: Eigene Darstellung

Bei Verwendung des Grenzdeckungsbeitrags als Planungsansatz ist zu beachten, dass sich die Vorzüglichkeit der Zuckerrüben erhöht, wenn berücksichtigt wird, dass der auf Rüben folgende Weizen gegenüber Stoppelweizen einen höheren Deckungsbeitrag aufweist. Für die Simulationsexperimente in Kapitel 5 wurde dafür eine Differenz von 50 Euro/ha angenommen (siehe Anhang 57). Eine Ausdehnung des Rübenanbaus bedeutet daher im Folgejahr einen höheren Anteil des Rübenweizens an der Weizenfläche. Betriebe, die das Rübenblatt zu Futterzwecken bergen, müssen darüber hinaus dessen Futterwert berücksichtigen.

Bei der Frage, welche Alternativfrucht für die Grenzdeckungsbeitragsrechnung heranzuziehen ist, sind nach KOLLIG (1993, S. 115) zwei Fälle zu unterscheiden: Bei einer geplanten Ausdehnung der Zuckerrübenfläche ist als alternative Verwendung der niedrigste Vergleichsde-

ckungsbeitrag der rübenfähigen Bodenfläche in Ansatz zu bringen, da rationales Verhalten bedingt, dass diese Fruchtart zuerst aus dem Produktionsprogramm fällt. Folglich ist bei einer Einschränkung der Rübenfläche der höchste Alternativdeckungsbeitrag maßgeblich.

6.2.3.3 Konsequenzen für die Anbauplanung der Zuckerrüben

In Übersicht 26 sind die durchschnittlichen Erfüllungsgrade des Lieferrechts der Betriebe des AK 1 der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen seit 1997 aufgeführt. Abgesehen vom Erntejahr 1998 überlieferten die Betriebe ihre Rübenkontingente in der Regel deutlich. Nicht nur die rheinischen Landwirte weisen solch eher risikoaverse Lieferrechtsstrategien auf.

Übersicht 26: Durchschnittliche Quotenerfüllung der Betriebe des AK 1

<u>Jahr</u>	<u>Erfüllungsgrad (relativ zur A-Quote)</u>
1997	130%
1998	127%
1999	>130%
2000	155%
2001	130%
2002	148%
2003	150%
2004	151%

Quelle: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, verschiedene Jahrgänge

Als Konsequenz dieser Betrachtungen sollte die Anbauplanung der Zuckerrüben nicht durch die Vorgabe eines einzigen Planungsansatzes eingeschränkt werden. Vielmehr sollte dem Entscheidungsträger zur Annäherung an die landwirtschaftliche Planungspraxis die Möglichkeit gegeben werden, aus mehreren Anbaustrategien auswählen zu können. Neben dem Grenzdeckungsbeitragsansatz müssen mindestens die Strategien „Mittlere Quotenerfüllung 130%“ und „Mittlere Quotenerfüllung 140%“ ermöglicht werden. Damit können auch die Auswirkungen eines zumindest temporären Verzichts auf den Anbau von B-Rüben zur Entlastung der Fruchtfolge betrachtet werden. Risikoaverse Entscheidungsträger präferierten Strategien, die einen Mindesterfüllungsgrad von 100%, 130% oder sogar 140% gewährleisten.

6.2.3.4 Anbauplanung der alternativen Produktionsverfahren

Nach Abschluss der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Anbauplanung für die Zuckerrüben erfolgt die Anbauplanung der Residuen. Diese beschränkt sich im Wesentlichen auf die Festlegung von Unter- und Obergrenzen für die Anbaumfänge.

Priorität bei der Anbauplanung der Alternativen zu den Zuckerrüben hat die Flächenstilllegung, da mit Ausnahme der Kleinerzeuger die Einhaltung des Mindestanbauumfangs Voraussetzung ist für den Erhalt der Direktbeihilfen und die Zahlungsansprüche bei Stilllegung stets vor allen anderen Zahlungsansprüchen aktiviert werden müssen (vgl. BMVEL, 2005, S. 52).

Der Entscheidungsträger kann über den Mindestumfang hinaus Flächen freiwillig stilllegen, d.h. eine Anbaubegrenzung für den Anbau nachwachsender Rohstoffe oder die Verwendung der stillgelegten Flächen für die Nematodenbekämpfung gibt es nicht.

Nach Festlegung des Anbauumfangs der Zuckerrüben und der Flächenstilllegung wird in der Mehrzahl der rheinischen Betriebe auf den verbleibenden Flächen der Anbau von Getreide eingeplant. Dabei handelt es sich vornehmlich um Winterweizen, der Wintergerste kommt dagegen nur noch eine geringe Bedeutung zu (siehe Abbildung 1). Phytosanitär begründete Anbaurestriktionen für das Getreide sollten bei der Planung berücksichtigt werden, was aber in der landwirtschaftlichen Praxis nicht immer der Fall ist. Vor allem der Winterweizen toleriert hohe Anbauanteile. Trotzdem sollte der Anbau dieser Frucht begrenzt werden, um ein Ausufern typischer Probleme getreidelastiger Fruchtfolgen (Halmbruch, Fusarien etc.) zu verhindern. Die Beschränkung des Zuckerrübenanbaus aus nematologischen Gründen erhöht automatisch den Anbauumfang des Getreides, wenn nicht auf alternative Blattfrüchte (Raps, Kohl, Kartoffeln) umgestellt wird. Nematologische Ziele und phytosanitäre Aspekte des Getreidebaus konkurrieren in diesem Fall miteinander. Auch bei Kartoffeln und Raps sind phytosanitäre Anbaurestriktionen zu beachten.

6.2.3.5 Anbauplanung unter Fruchtfolgerestriktionen

Wie in Kapitel 6.1 dargestellt, kann die jährliche Anbauplanung nicht völlig unabhängig von der mehrperiodischen Planung einer Fruchtfolge betrachtet werden. Fruchtfolgeaspekte können bei der Anbauplanung in Form einer Vorfrucht-Nachfruchtmatrix abgebildet werden. Mit diesem Instrument lässt sich ein Mindestmaß überjähriger Fruchtfolgerestriktionen in die jährliche Anbauplanung einfügen, ohne eine überjährige Fruchtfolge festzulegen, indem die Menge der *möglichen* Fruchtfolgepaare (Vorfrucht und Nachfrucht) auf die *zulässigen* Fruchtfolgepaare reduziert wird. Ein Fruchtfolgepaar ist unzulässig, wenn es gegen einen der in Kapitel 6.1 aufgeführten Fruchtfolgeaspekte verstößt. Zweck der Matrix ist es nicht, sinnvolle und nicht sinnvolle Fruchtfolgepaare zu differenzieren. Eine Vorfrucht-Nachfruchtmatrix repräsentiert daher das Wissen über die Fruchtfolge, das sich kaum algorithmisieren lässt (vgl. POTHS, 1992, S. 22), in Form von heuristischen Fruchtfolgeregeln. Diese können entweder vom Modellentwickler vorgegeben und/oder vom Entscheidungsträger definiert werden.

Die Vorfrucht-Nachfruchtmatrix ist bei n in Frage kommenden Fruchtarten quadratisch mit n Zeilen (Vorfrüchten) und n Spalten (Nachfrüchten), und es gibt $n \cdot n$ mögliche Fruchtfolgepaare. Symmetrisch ist die Matrix dagegen in aller Regel nicht, da eine Frucht, die eine zulässige Nachfrucht für eine andere Frucht ist, nicht zwangsläufig auch eine zulässige Vorfrucht für diese sein muss. In Übersicht 27 ist das Schema einer solchen Vorfrucht-Nachfruchtmatrix dargestellt. Eine 0 kennzeichnet ein unzulässiges Fruchtfolgepaar, eine 1 ein zulässiges.

Übersicht 27: Schema einer Vorfrucht-Nachfruchtmatrix

t \ t+1		<u>Nachfrucht</u>			
		Frucht 1	Frucht 2	...	Frucht n
<u>Vorfrucht</u>	Frucht 1	0	1		1
	Frucht 2	0	0		1
	⋮				
	Frucht n	1	1		0

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BUICK ET AL., 1992, S.43

Durch den beschriebenen Ausschluss unzulässiger Fruchtfolgepaare reduziert sich die Zahl zulässiger Kombinationen, wodurch sich zum einen die Akzeptanz der Planungsergebnisse beim Entscheidungsträger erhöht und zum anderen die Operationalität durch Verringerung des Umfangs des Planungsproblems verbessert. Zur Betrachtung von mehr als zwei aufeinander folgenden Jahren, d.h. zur Implementierung mittelfristiger Anbauregeln, müsste eine Vorfrucht-Vorfrucht-Nachfruchtmatrix entwickelt werden.

6.2.4 Literaturübersicht

EL-NAZAR (1985) führte eine Fallstudie zur Erarbeitung von Prozeduren für die Auswahl optimaler Fruchtfolgepläne durch. Die Studie konzentriert sich auf Höhe und Variabilität der Gewinne einzelner Fruchtfolgen in Abhängigkeit vom Wetter, den Pflanzenarten, Erntezeitpunkten und verschiedener Vorfruchteffekte. Dazu werden zwei auf linearer Programmierung (LP) beruhende Modelle entwickelt, ein risikofreies Modell, das unter der Annahme vollkommener Informationen über Preise, Erträge und Produktionskosten die profitabelsten Fruchtfolgepläne generiert, und ein Modell nach dem MOTAD-Ansatz (MOTAD = Minimum of total absolute deviations), das unter Annahme von Risikoaversion die nach dem Erwartungswert-Varianz-Kriterium effizientesten Pläne generiert. In mehreren Perioden aufeinander folgende Aktivitäten werden dabei zu einer Aktivität mit festen „internen“ Verhältnissen definiert, so dass die entwickelten Modelle statisch einperiodisch sind und dem kontrolltheoretischen Konzept der Steuerung folgen.

FELDSIM wurde an der Gesamthochschule Kassel als Hilfsmittel zur Umstellungsberatung auf ökologischen Landbau konzipiert. Das Programmsystem zur Planung und Simulation der Entwicklung mehrjähriger Fruchtfolgen in einem landwirtschaftlichen Betrieb kann maximal drei verschiedene bis zu siebengliedrige Fruchtfolgen planen. Eine betriebswirtschaftliche Bewertung wird dabei nicht durchgeführt (SCHULLER ET AL., 1988, S. 241). Für jede dieser Fruchtfolgen müssen die Fruchtfolgegesamtfläche, die Anzahl der beteiligten Glieder und Bodendaten angegeben werden. Alle an einer Fruchtfolge beteiligten Schläge werden als gleich groß angesetzt, um auf der Basis identischer Bodendaten nur einen Schlag über die gesamte Fruchtfolgedauer einer zeitaufwendigen Simulationsrechnung unterziehen zu müssen (ebd, S. 243). Im Anschluss an die Fruchtfolgeauswahl erfolgt ein Fruchtfolgeverträglichkeitstest mit Hilfe eines regelbasierten Expertensystems (Vorfrucht-Nachfruchtmatrix). Im Simulationsteil von FELDSIM werden das Wachstum der Pflanzen, die Stickstoffdynamik

und der Bodenwasserkreislauf innerhalb der angegebenen mehrjährigen Fruchtfolgen auf Basis von Regressionsmodellen berechnet.

MILNER ET AL. (1988) stellen ein regelbasiertes Expertensystem zur Entwicklung von Schlagfruchtfolgen namens CROPLOT vor, dessen Aufgabe es ist, geeignete Kulturen für gegebene Schläge zu bestimmen. Dazu wird eine vom Benutzer festgelegte Fruchtartenmenge nach pflanzenbaulichen und phytosanitären Kriterien bewertet, die vom Benutzer erfragt und vom Programm nach regelbasierten Ansätzen verarbeitet werden. Für die Ausgabe entsteht eine Tabelle, die die eingangs vom Benutzer festgelegten Fruchtarten auflistet und verbal von „verboten“ bis „sehr geeignet“ bewertet. Letztlich kann der Benutzer gemäß der Bewertung auswählen, welche der angezeigten Fruchtarten als Folgefrucht für den betreffenden Schlag in Frage kommt. Mit CROPLOT können somit lediglich Fruchtfolgepaare bestimmt werden, nicht aber eine vollständige Fruchtfolge. Zur höheren Effizienz von CROPLOT mit dem Ziel eines hohen Nettogeldertrages der zu empfehlenden Folgefrucht wird an einem linearen Optimierungsmodell gearbeitet.

Das Projekt „Fruchtfolge“ im Rahmen des Informationssystems Bodenführung (ISBO) wurde von OBENAUF ET AL. (1989) entwickelt und erfüllt die Aufgabenstellung Fruchtfolgeprüfung und -bewertung sowie schlagspezifische Anbauplanung und -bilanzierung in mehreren Programmkomplexen. Der erste Programmteil beinhaltet die Projektion einer Fruchtfolge durch den Modellanwender, der zugleich auch die Zuordnung zu den Schlägen vornimmt. Unterprogramme ermöglichen eine agrotechnische Bewertung der Fruchtfolge und die Empfehlung zum Anbau von Zwischenfrüchten. Im zweiten Schritt wird die projektierte Fruchtfolge in die Datei zu den Jahresdaten übernommen, wodurch sie für die weitere Bewertung und operative Änderungen zur Verfügung steht. Im dritten Schritt erfolgt die Bewertung bzw. Prüfung der Fruchtfolge anhand einer Vorfrucht-Nachfruchtmatrix. Im vierten Programmteil werden operative Änderungen zu den projektierten Fruchtfolgen ermöglicht. Die Änderungen betreffen die Fruchtarten, die Fruchtartflächen, die Zusatzinformationen zu den Fruchtarten (Anbauform, Sorte, etc.) und die Unterteilung der Schläge. Im letzten Schritt wird ein Anbauplan ausgegeben, wie er durch den Benutzer nach Bewertung, Prüfung und Bilanzierung bestätigt wurde. Nach POTHS (1992, S. 14) stellt diese agrotechnische, phytosanitäre und Zwischenfrucht integrierende Bewertung projektierte Fruchtfolgen einen weit ausgearbeiteten Modellansatz zur selbständigen Entwicklung von Fruchtfolgen dar.

Als ein System zur Unterstützung von Fruchtfolgeentscheidungen wurde SARA von POYOU-LASCASSIES ET AL. (1990) konzipiert. Mit dem regelbasierten Expertensystem soll nicht die optimale Fruchtfolge als Ganzes entworfen werden. Vielmehr werden dem Entscheidungsträger gezielte praxisrelevante Informationen angeboten, um ihn bei seinen jährlichen Entscheidungen zur Fortschreibung der Rotation auf der Basis von Ertrags-, Arbeits-, Flächendaten und der Prüfung grundsätzlicher Standortparameter wie Bodentyp und Vorfrucht zu unterstützen, in jedem Jahr die richtige Entscheidung zu treffen bzw. die getroffene Entscheidung prüfen und verifizieren zu können. Entscheidungsbasis bei diesem Modellansatz sind die vom Anwender zu bestimmende Fruchtart sowie die Standortdaten, nach denen eine Fruchtart-Schlag-Zuordnung ausgeführt werden kann. Die Beurteilung der Fruchtart erfolgt über den Grenzertrag, das Einkommensrisiko und den Arbeitsanspruch. In einem zweiten Schritt werden die Fruchtarten in Abhängigkeit zum Boden nach dem Ausschlussprinzip selektiert. Im nächsten Schritt gilt es, Mindestanbauflächen oder innerbetrieblichen Futterbedarf zu berücksichtigen. Der letzte Schritt ordnet schließlich die Fruchtarten schlagspezifisch zu. Dabei wer-

den zwar die oben geschilderten Aspekte beachtet, über die eigentliche Zuordnung entscheidet aber letztendlich der Modellanwender.

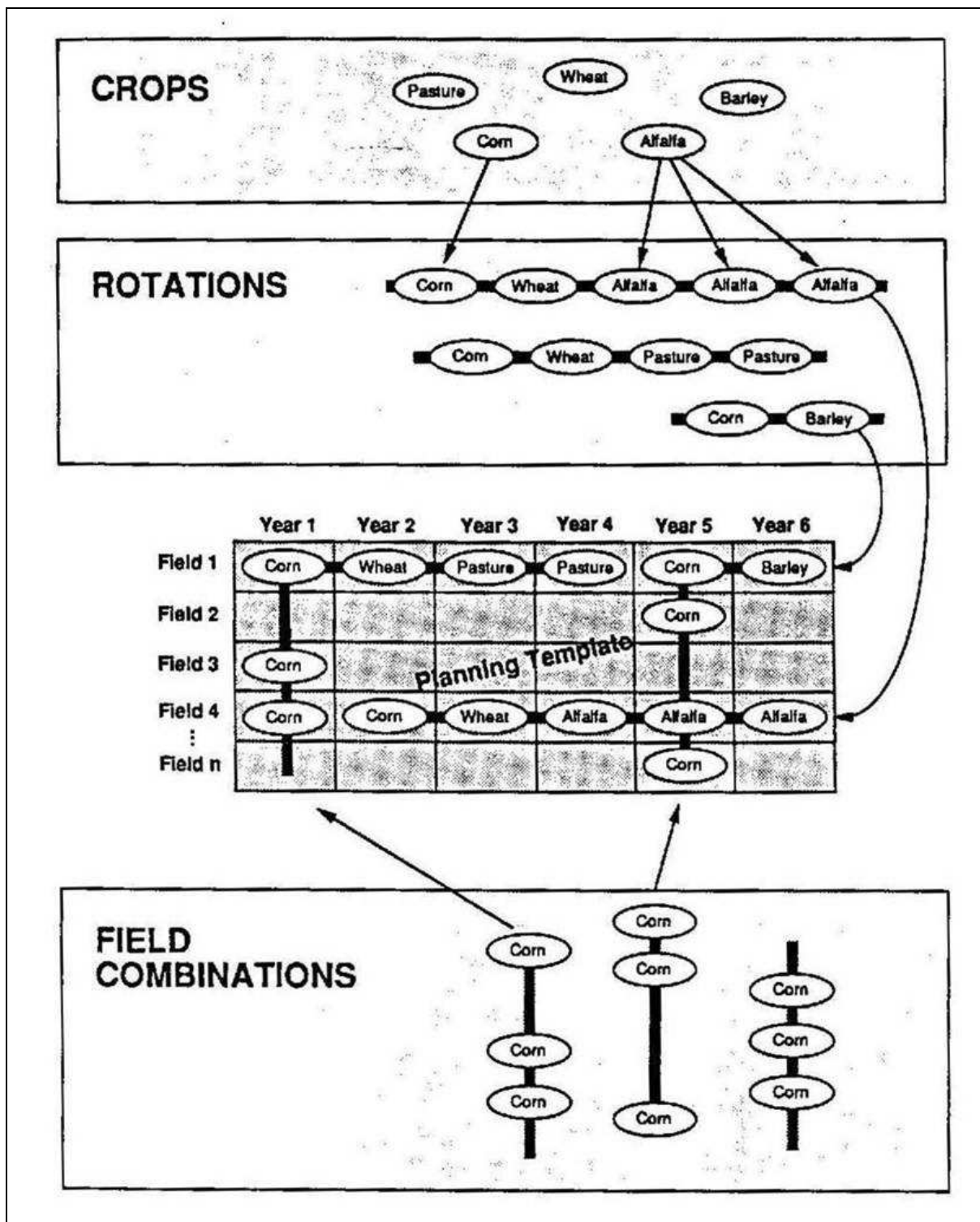
Das von ACKERMANN (1992) entwickelte Modell „Rotacalc“ ist ebenfalls kein Modell zur Planung einer geeigneten oder optimalen Fruchtfolge. Das dynamische und deterministische Simulationsmodell mit feldstückspezifischer Ausrichtung dient vielmehr der Entscheidungsunterstützung bei der Fruchtfolgestellung des Weizens. Dazu prognostiziert Rotacalc den zu erwartenden Befall wichtiger Fruchtfolgeschädlinge des Weizens, dessen Erträge mit Hilfe eines multifaktoriellen Regressionsmodells und den zu erwartenden durchschnittlichen Deckungsbeitrag je Hektar und Jahr der untersuchten Fruchtfolge. Regelbasierte Filterfunktionen wählen die standortgerechten Fruchtarten aus und überprüfen Anbauvorschläge des Anwenders. Die pflanzenbauliche Wissensbasis zur Schätzung und Quantifizierung der Modellfunktionen beruht auf Versuchsergebnissen, Expertenaussagen und plausiblen Annahmen. Der Zeithorizont des Modells ist mit 4-21 Jahren mittel- bis langfristig.

POTHS (1992) entwickelte FROTEX, das regelbasierte Fruchtarten-Rotations-Expertensystem zur Bewertung und Generierung von standortgemäßen Fruchtfolgen. Basis sind die als Parameter formulierten Ansprüche und Leistungen von 20 Hauptfruchtarten. Die Vorfrucht-Nachfruchtbewertung stützt sich auf terminliche, agrotechnische und phytosanitäre Parameter. Der ökonomische Bewertungsansatz enthält den mittleren Deckungsbeitrag der Fruchtfolge als Kenngröße. FROTEX ermittelt Schwachstellen in der bisherigen Fruchtfolge und leitet schlagspezifische Empfehlungen auf der Basis der betrieblichen Vorgaben ab. Die Verknüpfung von Fruchtarten zu Fruchtfolgen erfolgt bei FROTEX, indem zunächst aus der Menge möglicher Fruchtarten je nach Standorteignung und Wirtschaftsweise des Entscheidungsträgers (konventionell oder alternativ) unzulässige Fruchtarten ausgeschlossen werden und die übrig gebliebene Menge nach der Prioritätenliste des Entscheidungsträgers (Deckungsbeitrag, Stickstoffbilanz oder Erosionsschutzpotential) sortiert wird. Anschließend bildet eine Vorfrucht-Nachfruchtbewertung eine Rotationsordnung, in der zeitliche Überschneidungen ausgeschlossen und Anbaupausen eingehalten sind. Nachdem die reine Hauptfruchtfolge gebildet ist, werden Teilbrachen gegebenenfalls mit Zwischenfrüchten gefüllt. Nachdem der Rotationsanschluss der empfohlenen Fruchtfolge an die bestehende mittels der Vorfrucht-Nachfruchtbewertung angepasst wurde, erfolgt die Ermittlung der ökonomischen Fruchtfolgekennzahlen.

Das von STONE ET AL. (1992) sowie BUICK ET AL. (1992) vorgestellte Expertensystem CROPS (Crop ROTation Planning System) basiert auf einem gesamtbetrieblichen Steuerungsansatz für die schlagspezifische Fruchtfolgeplanung mit einem sechsjährigen Planungshorizont. Ziel des Modells ist die Generierung von Anbau- und Fruchtfolgeplänen, mit denen sowohl die ökonomischen Ansprüche des landwirtschaftlichen Betriebs als auch ökologische Ansprüche eingehalten werden können. CROPS ist daher kein Entscheidungsunterstützungssystem, da es dem Anwender nicht durch Analysen und dem Bereitstellen von Informationen hilft, einen Plan zu erstellen. Es ist vielmehr ein Planungssystem, das eigene Pläne generiert. CROPS erlaubt die hierarchische Unterteilung der für die Auswahl der Fruchtfolgen geltenden betriebs- und schlagspezifischen Restriktionen in Ausschluss- und Präferenzrestriktionen. Während Ausschlussbeschränkungen unveränderbar sind, kann der Modellanwender die Relevanz einiger Beschränkungen nach persönlichen Präferenzen variieren. Aufgabe des entwickelten Planungsalgorithmus ist es, die bereits von möglich auf zulässig reduzierte Anzahl von Fruchtfolgen und Feldkombinationen im gesamtbetrieblichen Kontext zu kombinieren (Abbildung

112). Unter den für diese Aufgabe untersuchten Planungsansätzen aus dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz erwies sich der „constraint-directed search (two-dimensional constraint propagation and most-constrained-first) and hierachical planning“-Ansatz als am geeignetsten, den großen Umfang des Kombinationsproblems aus Früchten, Fruchtfolgen und Feldstücken zu bewältigen (STONE ET AL., 1992, S. 62).

Abbildung 112: Das Planungsproblem in CROPS



Das Flussdiagramm in Anhang 93 zeigt den hierarchischen Aufbau des Planungsansatzes von CROPS mit den Ebenen Ackerfeld, Jahresplanung (Berücksichtigung gesamtbetrieblicher Restriktionen) und anschließender Zuweisung von Fruchtarten und Fruchtfolgen auf die einzelnen Felder.

DOLESCHEL (1993) formulierte mit „ERO“ ein Entscheidungsmodell, das in der Lage ist, für alle Schläge eines Betriebs diejenige Fruchtfolgealternative zu wählen, mit denen die schlagspezifische Erosionstoleranz unter Beachtung ökonomischer Aspekte eingehalten wird. Für diesen Zweck umfasst eine Fruchtfolge bei DOLESCHEL nicht nur die Abfolge von Fruchtarten, sondern auch die den einzelnen Fruchtarten zugeordneten Erosionsschutzmaßnahmen. Ziel der Fruchtfolgeplanung ist die Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags unter Berücksichtigung betriebsspezifischer Vorgaben wie Liefermengen und Futterbedarf. Als Lösungsalgorithmus für dieses mehrstufige diskrete Entscheidungsproblem entscheidet sich DOLESCHEL für ein Entscheidungsbaumverfahren mit begrenzter Enumeration, da sich die vollständige Enumeration schon bei vergleichsweise kleinem Umfang des Planungsproblems (geringe Anzahl Schläge und Fruchtarten) als inoperabel erwies und heuristische Verfahren nicht das Finden des Optimums gewährleisten und so nicht dem Modellanspruch gerecht werden.

HANK entwickelte 1994 ein Simulationsprogramm zur Quantifizierung der Auswirkungen extensiver Landnutzungsformen namens „FL7“. Die schlagspezifische Anbauplanung für die Ackerkulturen erfolgt mit Hilfe eines sequentiellen Lösungsansatzes. Dazu wird das mehrperiodische Kombinationsproblem durch eine Folge von einperiodischen Verfahren näherungsweise gelöst. Zu diesem Zweck entwickelte HANK (1994) ein heuristisches Suchverfahren, das vorrangig den nach Größe sortierten Schlägen sukzessive das zulässige Anbauverfahren mit dem höchsten Zielfunktionswert zuweist. Zusammen mit einem Futterbauprogramm, welches den Futteranbau ebenfalls mit Hilfe eines heuristischen Suchverfahrens optimiert, ergibt sich ein gesamtbetriebliches Modell, das die Auswirkungen unterschiedlicher Extensivierungsmaßnahmen auf produzierte Menge, Stickstoffüberhänge und Einkommen ermittelt.

Die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungsmodells zur Fruchtfolgeplanung ist für die Bereiche Stickstoffversorgung, Beikrautregulierung sowie Berücksichtigung phytosanitärer Restriktionen gerade zur Optimierung des ökologischen Landbaus sinnvoll (BACHINGER UND ZANDER, 2002, S. 88). Am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsfor-schung (ZALF) wurde daher das gesamtbetriebliche Mehrzieloptimierungsmodellsystem MODAM (Multi-Objective Decision support system for Agroecosystem Management) entwickelt. MODAM ist ein Entscheidungsunterstützungswerkzeug, mit dem die Auswirkungen von Entscheidungen unter verschiedenen Rahmenbedingungen auf die landwirtschaftliche Landnutzung und den sich daraus ergebenden ökonomischen Erfolgskennzahlen und ökologischen Auswirkungen simuliert werden können. Zur modellgestützten Generierung und Bewertung von Fruchtfolgen verwendet MODAM einen regelbasierten Ansatz, mit dem Wissen aus Feldversuchs-, Erhebungs- und Literaturdaten mit Expertenwissen verknüpft werden kann (MEYER-AURICH ET AL., 2004, S. 345). MODAM besteht aus hierarchisch verknüpften relationalen Datenbanken, in denen eine Vielzahl von Produktionstechniken der Landwirtschaft mit ihren technischen, ökologischen und ökonomischen Koeffizienten gespeichert ist. Die Verknüpfung von Produktionsverfahren in Modellbetrieben mit spezifischen betriebsinternen Restriktionen ermöglicht die Simulation strategischer Betriebsentscheidungen. Die Simulation erfolgt auf der Basis der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung (Steuerungsansatz). Die pflanzenbaulichen Aktivitäten sind als Anbauverfahren in Abhängigkeit von Vorfrucht-

gruppen und Anbauweise definiert, so dass im LP die Fruchtfolge optimiert werden kann. Nach Verknüpfung der Anbauverfahren zu Fruchtfolgen werden im Modell unter Verwendung von Ausschlusskriterien wie Stickstoffsaldo, Verunkrautungspotentiale und phytosanitäre Restriktionen pflanzenbaulich sinnvolle drei- bis achtfeldrige Fruchtfolgen generiert.

LIZ-Anbauplanung ist ein einfaches Online-Entscheidungsunterstützungssystem, mit dem der Entscheidungsträger die betriebliche Anbauplanung für ein Anbaujahr in zweierlei Hinsicht optimieren kann. Zunächst kann die optimale Anbaufläche von Zuckerrüben unter Berücksichtigung der A-Rübenliefermenge, eines eventuellen C1-Vortrags, der zu erwartenden Deklassierung, des zu erwartenden Ertrags und der angestrebten Liefermengenerfüllung errechnet werden (siehe Anhang 94). Dies entspricht dem in Kapitel 6.2.3.1 vorgestellten deterministischen Planungsansatz. Da der Zuckerrübenanbau nicht separat geplant und optimiert werden kann, ist anschließend eine gesamtbetriebliche Planung möglich. Zielgröße der Planung ist der Deckungsbeitrag im Gesamtbetrieb. Bei der Planung werden das Ertrags- und Preisniveau und der angestrebte Anbauumfang einzelner Anbaualternativen ebenso berücksichtigt wie die aktuell gewährten Flächenprämien und weitere für den Betrieb spezifische Bedingungen. Da neben dem Deckungsbeitrag der Zuckerrüben und der aus den Erntemengen abgeleiteten Quotenausschöpfung auch die Deckungsbeiträge der alternativen Kulturfrüchte ausgewiesen werden, kann der Entscheidungsträger durch diskrete Alternativrechnungen anhand der Zielgröße das günstigste Anbauflächenverhältnis von Zuckerrüben und den verschiedenen Anbaualternativen ermitteln. LIZ-Anbauplanung ist demnach ein statisches einperiodisches Anbauplanungsmodell, das abgesehen vom C-Rübenvortrag keine überjährigen Fruchtfolgeaspekte berücksichtigt, da im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Entscheidungsunterstützungssystemen kein biologisch-technisches Informationssystem vorhanden ist.

Ziel der einfachen Expertensysteme der Saaten-Union (Abbildung 50), des Pflanzenschutzdienstes der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Anhang 39) sowie des Bodengesundheitsdienstes der Südzucker AG (Anhang 40) ist nicht die Bestimmung optimaler Fruchtfolgen und/oder Anbauumfänge, da ihnen der dafür notwendige Simulations- oder Optimierungsalgorithmus fehlt. Basierend auf heuristischen Wenn-dann-Regeln werden von den Ergebnissen von Befallserhebungen ausgehend Empfehlungen zur Anbaupause der Zuckerrübe und zu sonstigen Gegenmaßnahmen vorgegeben.

6.2.5 Kritische Wertung bestehender Planungsansätze

H.schachtii ist ein klassischer Fruchtfolgeschädling und die in Kapitel 3.2 vorgestellten Managementmaßnahmen sind integrative Bestandteile der Anbau- und Fruchtfolgeplanung. Die Fruchtfolgeplanung sowie die längerfristige Einhaltung der geplanten Fruchtfolge weisen daher einen hohen Stellenwert im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements auf. Dies spricht für einen Planungsansatz, der dem kontrolltheoretischen Konzept der Steuerung folgt. Nicht nur die durchgeführten Simulationsexperimente entsprechen diesem Konzept, auch die in der vorangegangenen Literaturübersicht vorgestellten Planungsmodelle folgen dem Steuerungskonzept mit einem einzigen Planungs- und Entscheidungszeitpunkt zu Beginn des Planungszeitraums. Hauptgrund dafür ist, dass die Nachbildung von Regelansätzen innerhalb eines Modells methodisch sehr aufwendig ist (vgl. BERG ET AL., 1985, S. 208 sowie BLÖNNIGEN ET AL., 1990, S. 272ff.) und die Möglichkeiten zur Nachbildung des Betriebsleiters in seiner Funktion als Regler nur begrenzt sind (BAAKEN, 1992, S. 276). Vor allem die gesamtbetrieb-

liche Planung stellt aufgrund der zahlreichen Interdependenzen innerhalb des Systems ein komplexes mathematisches Problem dar, weswegen insbesondere im Bereich der strategischen Entscheidungen, dazu gehört die Fruchtfolgeplanung, zumeist das Steuerungskonzept bevorzugt wird (vgl. BERG ET AL., 1985, S. 208).

Es ist unmittelbar einsichtig, dass das Konzept der Steuerung, d.h. die Festlegung der Instrumentvariablen (hier: der Abfolge der Fruchtarten) für den gesamten Planungszeitraum zum aktuellen Entscheidungszeitpunkt, nur unter bestimmten Bedingungen eine sinnvolle Vorgehensweise darstellt, nämlich dann, wenn

1. das Entscheidungsproblem deterministisch ist, d.h. das System selbst sowie die Zeitpfade aller exogenen Variablen vollständig bekannt sind,
2. Anpassungen innerhalb des Planungszeitraumes nicht vorgenommen werden können
3. oder die Zustandsvariablen des Systems nicht beobachtbar sind (BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 272).

Diese Voraussetzungen liegen im vorliegenden Planungsproblem für das Integrierte Nematodenmanagement wie in den meisten betriebswirtschaftlichen Fragestellungen nicht vor (vgl. BERG ET AL., 1985, S. 208). Sowohl die Volatilität der Abundanzdynamik des Nematoden als auch der Zuckerrübenenerträge verursachen ein stochastisches Entscheidungsproblem, und Anpassung bzw. Managementmaßnahmen können theoretisch zu jedem Aussaatzeitpunkt der Haupt- und Zwischenfrüchte vorgenommen werden. Außerdem ist durch die in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Beprobungsmöglichkeiten die Beobachtbarkeit der Systemzustandsvariablen Populationsdichte im Simulationszeitraum (theoretisch, s.u.) wiederholt gegeben.

Im Regelungskonzept besteht die Möglichkeit, die ursprüngliche Politik (hier: die festgelegte Fruchtfolge) im Zeitablauf entsprechend den dann jeweils vorliegenden Informationen über die tatsächlichen Werte der exogenen und Zustandsvariablen zu revidieren (vgl. BERG UND KUHLMANN, 1993, S. 272), wenn zu den jeweiligen Entscheidungszeitpunkten aktuelle Informationen über diese Variablen vorliegen. Auch die Annahme einer im Betrachtungszeitraum konstanten Systemumwelt, die in aller Regel bei Modellen mit Steuerungsansatz getroffen wird (siehe Kapitel 5.7) und die die Akzeptanz insbesondere von strategisch ausgerichteten Modellen beeinträchtigt, ist nicht notwendig. In Bezug auf die Zielgröße des Planungsansatzes sollte ein Regelungsansatz daher der Steuerung überlegen sein.

Der Entwurf eines Regelungsansatzes zur Fruchtfolgeplanung von ESSER (1992, S. 24ff.) verdeutlicht, dass zur mehrjährigen Planung der Fruchtfolge und Integration der Maßnahmen des Integrierten Nematodenmanagements nach dem Konzept der Regelung die Populationsdichten des Nematoden sehr häufig - und im schlagspezifischen Ansatz auf jedem Schlag - ermittelt werden müssen: Mindestens einmal im Jahr zum Anbauzeitpunkt der Hauptfrucht, teilweise auch zweimal jährlich, z.B. vor Zuckerrüben oder nematodenresistenten Zwischenfrüchten als Planungsgröße und nach deren Anbau als Kontrollgröße zur Feststellung der Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Werten. Diese nahezu „laufende“ Zustandsbeobachtung ist in der landwirtschaftlichen Praxis im biologischen System Nematode im Gegensatz zu entomologischen Systemen nicht zu gewährleisten. Eine quantitative Erhebung der aktuellen Verseuchungsdichte des Nematoden wird in der landwirtschaftlichen Praxis nur im Anbaujahr der Zuckerrüben durchgeführt und selbst dann in aller Regel entweder nur der P_i -Wert via

Bodenbeprobung oder (aufgrund der geringeren Kosten und des geringeren Arbeitsaufwands wahrscheinlicher) nur der P_f -Wert mittels Schwadbeprobung ermittelt. Doppelte Befallserhebungen bei Zuckerrüben, Befallserhebungen unter Nichtwirtspflanzen sowie vor und nach Zwischenfrüchten sind zwar grundsätzlich möglich (siehe Anhang 2), finden aber in der landwirtschaftlichen Praxis aus den o.g. Gründen nicht statt. Dies bleibt der Wissenschaft zur Ermittlung der Vermehrungsraten unter anfälligen Zuckerrüben, der Reduktionsleistung resistenter Zuckerrüben oder Zwischenfrüchte oder der Abbaukinetik in einer Fruchtfolge vorbehalten. Ohne die wiederholte Erhebung des aktuellen Systemzustands zu den Entscheidungszeitpunkten ist ein Regleransatz hinfällig.

Für die jährliche Planung der Anbauumfänge der Feldfrüchte mit oder ohne Berücksichtigung von Fruchtfolgerestriktionen in Form einer Vorfrucht-Nachfrucht-Matrix spricht neben den Zweifeln an einer in der landwirtschaftlichen Praxis noch durchgeführten längerfristigen Fruchtfolgeplanung in erster Linie die Tatsache, dass die Anbaufläche der Zuckerrübe und in deren Folge die aller anderen angebauten Früchte bei Inanspruchnahme des C-Vortrags und aufgrund der jährlich variierenden Deklassierung der Lieferrechte (siehe Kapitel 4.5.1.3) eine jährlich neu zu berechnende Größe ist.

Das jährliche Optimieren der Anbaufläche ist allerdings im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements aus zwei Gründen nicht problemadäquat. Zum einen gilt wie für den Regelungsansatz bei der Fruchtfolgeplanung, dass es dem biologischen System Nematode an der für die jährliche Anbauoptimierung notwendigen Beobachtbarkeit des Systemzustands (jährliche schlagspezifische Befallserhebungen) mangelt. Zum anderen ist das Ziel einer jährlichen Anbauoptimierung, die Maximierung des Periodenerfolgs, nicht zwangsläufig konform mit dem Ziel des Integrierten Nematodenmanagements einer *nachhaltigen* Erfolgsmaximierung. Als Zielgröße des Entscheidungsunterstützungssystems wurde nicht ohne Grund der diskontierte, über den Simulationszeitraum kumulierte Gesamtdeckungsbeitrag festgelegt. Diese Gesamtbetrachtung eines mittel- bis längerfristigen Simulationszeitraums ist bei der Planung und Bewertung von biologisch-technischen Systemen immer dann notwendig, wenn Carry-over-Effekte und die von ihnen hervorgerufenen Folgekosten erfasst werden sollen. Im Falle des Integrierten Nematodenmanagements bestehen Carry-over-Effekte aufgrund der Populationsdynamik des Nematoden im Zusammenspiel mit dem Anbau von Wirts- oder Nichtwirtspflanzen sowie bei der Höhe der jährlich verfügbaren betrieblichen Lieferrechte bei C1-Rübenvortrag. Dass ein Ansatz, der lediglich die jährliche Optimierung des Anbaus zum Ziel hat, diese Effekte nicht berücksichtigen kann, zeigt sich beim Vergleich der Simulationsszenarien mit resistenten Zuckerrüben. Deren Anbau ist bei nur einjähriger Betrachtung erst bei sehr hohen Befalldichten dem Anbau von Standardsorten ökonomisch überlegen (siehe Kapitel 5.3). Unter Einbeziehung der Folgekosten stellt der Anbau resistenter Sorten z.B. bei zweijähriger Rotation aber eine ökonomisch sinnvolle Managementmaßnahme dar (siehe Kapitel 5.6.1.5). Aus diesen Gründen ist auch das in Kapitel 6.2.4 beschriebene sequentielle Lösungsverfahren von HANK (1994), das ein mehrperiodisches Optimierungsproblem durch eine Folge von einperiodischen Verfahren zumindest näherungsweise zu lösen versucht, im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements nicht problemadäquat.

Der Kerngedanke der jährlichen Anbauplanung, die Bestimmung der in Hinblick auf den Grenzdeckungsbeitrag oder das betriebliche Lieferrecht optimalen Zuckerrübenanbaufläche, ist für Zuckerrüben anbauende Landwirte allerdings von so zentraler Bedeutung, dass dies

zumindest in Form einer Nebenbedingung oder einer (Meta-)Strategie in einem geeigneten Planungsansatz für das Integrierte Nematodenmanagement implementiert werden muss.

Auch an der Verwendung von Vorfrucht-Nachfruchtmatrizen wird Kritik geübt. Sie repräsentieren zwar fundiertes Fruchtfolgewise, erlauben aber nicht die Darstellung der dynamischen Entwicklung über die gesamte Dauer der Rotation oder gar mehrerer Rotationen. Die im Einzelfall an sich korrekten Ergebnisse für die spezifischen Fruchtfolgepaare können nicht dynamisch für die Dauer einer Rotation gewichtet und berechnet werden (vgl. POTHS, 1992, S. 11). Auch die Implementierung längerfristiger Fruchtfolgerestriktionen ist mit diesem Instrument nur sehr aufwendig und begrenzt möglich.

Ziel der Fruchtfolge- und Anbauplanungsmodelle mit Optimierungsansatz ist es, mittels eines geeigneten Algorithmus in Hinblick auf eine Zielgröße optimale Anbaupläne zu generieren, d.h. Anbauumfänge zu bestimmen und vorgegebene Fruchtarten zu Fruchtfolgen zu kombinieren. Das eigentliche Planungsproblem besteht in der Koordination von Früchten bzw. Fruchtfolgen auf allen Feldern eines Betriebs über die Zeit (siehe Abbildung 112). Wird der Ackerschlag als eine Bewirtschaftungseinheit angesehen, liegt ein ganzzahliges kombinatorisches Optimierungsproblem vor (vgl. DOMSCHKE UND DREXL, 2002, S. 7). Der Umfang dieses Planungsproblems wird im Wesentlichen durch die Zahl der zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen bestimmt. Damit ist gemeint der Umfang der Kombinationsmöglichkeiten aus der Anzahl Schläge n und der Anzahl Anbauverfahren m , der sich ergibt zu m^n . Bei einem mehrperiodischen Planungsansatz über j Simulationsjahre vergrößert sich der Umfang des Planungsproblems auf $m^{(n \cdot j)}$. STONE ET AL. (1992, S. 61) weisen darauf hin, dass es bei einem landwirtschaftlichen Betrieb mit nur fünf Feldern und zehn möglichen zwei- oder vierjährigen Fruchtfolgen nahezu zwei Milliarden verschiedene vierjährige Anbaupläne gibt. Die Zahl der Kombinationsmöglichkeiten kann zwar durch Anbau- und Fruchtfolgerestriktionen oder Strategievorgaben eingeschränkt werden, aber eine Erweiterung um ein Feld oder ein Jahr kann schnell zu einer „kombinatorischen Explosion“ (DOMSCHKE UND DREXL, 2002, S. 117) führen. Selbst in Zeiten leistungsfähiger PC stellt sich daher die Frage nach der Operationalität, genauer gesagt nach der rechentechnischen Bewältigung der Planung. Die einfachste Methode zum Lösen eines solchen kombinatorischen Optimierungsproblems ist ihrer Struktur nach die vollständige Enumeration, auch als „vollkombinatorische Simulation“ (HESELBACH UND EISGRUBER, 1967, S. 20ff.) oder „brute force“-Suche (MÜLLER-MERBACH, 1969, S. 325) bezeichnet. Vollenumeration ist ein exaktes Verfahren zur Abarbeitung von Entscheidungsbäumen und umfasst das Überprüfen aller möglichen Entscheidungskombinationen auf Optimalität (vgl. DOMSCHKE UND DREXL, 2002, S. 116ff.). STONE ET AL. (1992, S. 61), DOLESCHEL (1993, S. 91f.) und HANK (1994, S. 112 und 116) haben aber gezeigt, dass die vollständige Enumeration aufgrund inoperabel langer Rechenzeiten als einsetzbares Verfahren ausscheidet, wenn die Dimensionen des Planungsproblems nicht ausreichend klein sind.

Als Alternative zur Vollenumeration gibt es das ebenfalls exakte, d.h. in endlich vielen Schritten eine optimale Lösung liefernde, branch-and-bound-Verfahren nach DAKIN (1965). Mit diesem auch als unvollständige oder begrenzte Enumeration (DOMSCHKE UND DREXL, 2002, S. 116) oder als „partiell-kombinatorische Simulation“ (HESELBACH UND EISGRUBER, 1967, S. 20ff.) bezeichneten Verfahren lassen sich nicht sinnvolle Lösungswege, die bei der vollständigen Enumeration in der vollen Länge beschrritten werden müssen, dort kappen (engl.: bound), wo erkennbar wird, dass bessere Lösungen existieren (Voraussetzung: eine gültige Lösung wurde bereits gefunden) oder ein Weg eine nicht zulässige Lösung ergibt (z.B. durch

Überschreiten einer Restriktion). An einer solchen Stelle erfolgt dann ein Verzweigen (engl.: branch) zu einem anderen Weg. Im Rahmen der Entscheidungsunterstützung für das Integrierte Nematodenmanagement ist es allerdings notwendig, für die vollständige Bewertung der Maßnahmen anhand des kumulierten Gesamtdeckungsbeitrags die carry-over-Effekte und Folgekosten vollständig zu erfassen. Daher kann kein Lösungsweg vorzeitig gekappt werden, sondern ist stets vollständig zu durchlaufen. Es gibt damit keinen Ansatzpunkt für das effizientere branch-and-bound-Verfahren.

Neben diesen methodischen Problemen ist zu beachten, dass insbesondere das Resultat einer numerisch exakten Optimierung beim Modellanwender bzw. Entscheidungsträger eine (Schein-)Genauigkeit des Modelloutputs bzw. der Lösung des Planungsproblems impliziert, die aufgrund der großen Unsicherheit in den biologischen Realsystemen nicht gerechtfertigt ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deutlich, dass dies insbesondere für das System des Nematoden gilt, dessen Befall räumlich unregelmäßig aggregiert, dessen Zustandsbeobachtbarkeit eingeschränkt und mit mehr oder weniger großen Messungenauigkeiten verbunden ist und dessen Abundanzdynamik ebenso wie die Befall-Schadens-Relation großen biotisch und abiotisch bedingten Unregelmäßigkeiten unterliegt.

Als Konsequenz aus den zuvor angestellten Betrachtungen lässt sich ein Verzicht auf einen optimierenden Planungsansatz für das Integrierte Nematodenmanagement ableiten. Vor diesem Hintergrund gewinnen einfache, auf heuristischen Regeln beruhende Expertensysteme wie die der Saaten-Union, des Pflanzenschutzdienstes und des Bodengesundheitsdienstes (siehe Kapitel 4.4.8.2), an Bedeutung. Folgende Überlegungen liegen daher einem für das Integrierte Nematodenmanagement adäquaten Planungsansatz zu Grunde:

1. Bei Verzicht auf das Finden eines vermeintlichen Optimums kann an die Stelle des Optimierens das „Was-wäre-wenn“-Prinzip der Entscheidungsunterstützungssysteme (siehe Kapitel 4.1.3) treten.
2. Weder die langfristige Fruchtfolgeplanung, noch die jährliche Anbauplanung sind problemadäquate Planungsansätze für das Integrierte Nematodenmanagement. Sorgfältige Fruchtfolgegestaltung und Anbauplanung sind aber die Grundlage zur Lösung der Nematodenproblematik. Die Literaturanalyse hat gezeigt, dass regelbasierte Ansätze für diese Planungsaufgabe weit verbreitet sind.
3. Aufgrund der außerordentlich großen Anzahl von theoretisch möglichen Fruchtartenkombinationsmöglichkeiten und Maßnahmen des Nematodenmanagements ist es ratsam, Fruchtfolgen mit oder ohne Managementmaßnahmen durch den Modellanwender festlegen zu lassen, anstatt sie durch einen Algorithmus zu generieren.
4. Die Planung des Anbauumfangs der Zuckerrübe und deren Einbindung in die Fruchtfolge sind für Rüben anbauende Landwirte von zentraler Bedeutung.
5. Planungsgrundlage für das Integrierte Nematodenmanagement werden zukünftig in erster Linie Befallserhebungen im Rahmen der Reinigungsschwadbeprobung sein, d.h. Messungen des P_f -Wertes nach erfolgtem Zuckerrübenanbau. Bodenbeprobungen zu den nächstfolgenden Zuckerrüben (P_i -Wertermittlungen) können -wenn überhaupt vorgenommen- der Verifikation dienen. In den Jahren zwischen den Zuckerrüben werden in der landwirtschaftlichen Praxis keine Befallserhebungen durchgeführt.

6.3 Einzelschlagspezifischen Ansatz

In diesem Kapitel werden Aspekte eines bis auf die Ebene des Einzelschlags heruntergebrochenen Entscheidungsunterstützungssystems diskutiert.

6.3.1 Realer Ackerschlag versus Einheitsparzelle

Beim Herunterbrechen des Planungsansatzes von der Ebene des Betriebs können grundsätzlich zwei Ansätze verfolgt werden. Entweder bildet das Modell real existierende landwirtschaftliche Betriebe mit ihrer unterschiedlichen Anzahl von Ackerschlägen unterschiedlicher Größe ab, oder es werden Einheitsparzellen kleiner Größe, z.B. ein Hektar, unterstellt.

Die in Kapitel 6.2.4 vorgestellten Modelle CROPS, ERO und FL7 können landwirtschaftliche Betriebe mit realen Ackerschlägen unterschiedlicher Größe abbilden. Vorteile dieser Vorgehensweise sind die betriebsindividuelle Abbildung und die direkte Verwendbarkeit der schlagspezifischen Ausgangsvariable, die wenn überhaupt auf dieser Ebene vorliegen. Als Nachteil ist das vor allem bei größeren Schlägen recht grobe Planungsraster anzusehen, wenn der Schlag als eine nicht weiter zu unterteilende Bewirtschaftungseinheit angesehen wird. Gerade die Anbauplanung für Zuckerrüben wird in der landwirtschaftlichen Praxis in Hinblick auf das betriebliche Lieferrecht auf den Hektar genau vorgenommen (siehe Kapitel 6.2.3) und führt je nach Anzahl und Größe der Ackerschläge zu Schlagunterteilungen in zwei oder mehrere Bewirtschaftungseinheiten. Die Berücksichtigung dieser Teilflächenproblematik führt in letzter Konsequenz zur weiteren Unterteilung der Schläge bis hin zu 1 ha großen Einheitsparzellen.

Die alternative Abbildung eines Modellbetriebs in Form einheitlicher 1 ha großer Parzellen abstrahiert zwar deutlich von der betrieblichen Realität, stellt aber ein hinreichend feines Raster für die Anbauplanung dar und vermeidet das Teilflächenproblem. Den Einheitsparzellen fehlt zwar das Differenzierungsmerkmal Größe, sie können allerdings weiterhin über das Ertragspotential und über den Ausgangsnematodenbefall unterschieden werden. Es entfällt die Notwendigkeit, die Schlagdaten existierender landwirtschaftlicher Betriebe zu erheben oder alternativ Schlaggrößenverteilungen aus Statistiken zu übernehmen.

Für Planungsansätze mit Optimierungsanspruch bzw. für Entscheidungsunterstützungssysteme, die dem Modellanwender alle Handlungsalternativen durch automatisierte Alternativrechnungen zur Verfügung stellen, ist die Frage, ob einige wenige real existierende Ackerschläge oder mehrere bzw. viele Einheitsparzellen zu betrachten sind, von großer Bedeutung für die Operationalität, genauer gesagt für die rechentechnische Bewältigung der kombinatorischen Optimierung (siehe Kapitel 6.2.5). Für den Planungsansatz der regelbasierten Rotationsplanung für das Integrierte Nematodenmanagement besteht dieses Kapazitätsproblem nicht. Es empfiehlt sich daher die Abbildung eines landwirtschaftlichen Betriebs auf der Basis von 1 ha-Einheitsparzellen.

6.3.2 Berechnung der Zuckerrübenenerträge im parzellenspezifischen Ansatz

Die Erweiterung zum parzellenspezifischen Ansatz erfordert eine Erweiterung des stochastischen Simulationsmodells zur Nachbildung der Ertragsdynamik der Zuckerrübe. Es ist nicht davon auszugehen, dass alle Schläge eines landwirtschaftlichen Betriebs in einer Thünen-

schen Ebene liegen, d.h. mit einem einzigen Produktionsort definiert werden können. Sie werden sich vielmehr in ihrem Ertragspotential unterscheiden. Obwohl nach DOLESCHEL (1993, S. 103) die Berücksichtigung dieser unterschiedlichen Ertragsfähigkeit der Böden auf den Schlägen eines Betriebs eine grundsätzliche Frage für die Realitätsnähe des Modells darstellt, sollte die Möglichkeit einer mehr oder weniger willkürlich vorzunehmenden Aufteilung der Parzellen auf die Produktionsorte durch den Modellanwender nicht realisiert werden. Vielmehr sind alle Parzellen einem der drei definierten Produktionsorte zuzuweisen, d.h. gleichermaßen „Ertragsregionen“ zu definieren. Nur so können mögliche Abhängigkeiten der relativen Vorzügen einzelner Maßnahmen des Nematodenmanagements oder von Managementstrategien von der Güte des Produktionsortes ermittelt werden.

6.3.3 Parzellenspezifische Ausgangsbefallsdichte

Die Angabe einer „Betriebsverseuchungsdichte“, wie in Kapitel 5 geschehen, impliziert im parzellenspezifischen Ansatz eine auf allen Parzellen des betrachteten Betriebs gleiche Ausgangsverseuchungsdichte. In diesem Fall divergierten die Populationsdichten bereits im zweiten Jahr, da auf einem Teil der Parzellen anfällige und/oder resistente Zuckerrüben angebaut werden müssen, auf einigen Flächenstilllegung erfolgen muss und die verbleibenden Parzellen i.d.R. mit Nichtwirtpflanzen bestellt werden. Eine parzelleneinheitliche Ausgangsverseuchungsdichte ist allerdings nicht realistisch. In der Ausgangsverseuchung spiegelt sich die gesamte nematologisch relevante „Historie“ der Parzelle wider, deren betriebsweite Einheitlichkeit kaum gewährleistet sein kann.

Im Ansatz mit vielen Einheitsparzellen können nicht wie bei einem schlagspezifischen Ansatz dem Modellanwender vorliegende, aus Boden- oder Schwadbeprobungen stammende Befallsangaben als Ausgangsverseuchungsdichten angesetzt werden. Alternativ bietet sich daher z.B. die Nachbildung der parzellenspezifischen Ausgangsverseuchung gemäß einer aus Abbildung 4 abgeleiteten empirischen Verteilung an. Szenarien für die Höhe des Ausgangsbefalls (niedrig bis hoch) und damit für die Schwere der Nematodenproblematik sind denkbar.

Die Erfahrungen mit dem raschen Einpendeln wirts- und fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichten (siehe Kapitel 2.2.3, 3.2.2.2 sowie 5.5.2.1) lassen darauf schließen, dass sich unabhängig von der Ausgangsverseuchung nach wenigen Jahren eine mittlere Verseuchungsdichte auf den einzelnen Parzellen einstellt, die lediglich abhängig ist von der Anbauhäufigkeit anfälliger oder nematodenresistenter Zuckerrüben auf den Schlägen. Diese wiederum ist direkt abhängig von der Höhe des betrieblichen Lieferrechts und der vom Entscheidungsträger vorgegebenen Strategie des Lieferrechtsmanagements, sowie der Frequenz des Anbaus resistenter Kreuziferen. Dies entspricht einer *strategiespezifischen Verseuchungsdichte* bzw. den von SEPPELT (1997, S. 97) benannten „optimalen Pfaden“ (siehe Abbildung 65).

6.4 Zusammenfassender Überblick

Dieses Kapitel beginnt mit dem Aufzeigen von Ansatzpunkten für Erweiterungen des Entscheidungsunterstützungssystems für das Integrierte Nematodenmanagement. Die Einschränkungen des bestehenden Ansatzes beruhen auf der fehlenden Berücksichtigung gesamtbetrieblicher Aspekte. Gute bzw. optimale Entscheidungen im Rahmen des INM können nur herbeigeführt werden, wenn das Entscheidungsunterstützungssystem den gesamten Ackerbau des

landwirtschaftlichen Unternehmens umfasst. Daher bietet sich die Erweiterung um einen gesamtbetrieblichen Planungsansatz an.

Zunächst werden die Planungsprobleme Fruchtfolge- und Anbauplanung beschrieben. Fruchtfolgeplanung, die mehrperiodische Festlegung einer Fruchtfolge auf einem Feld, kann nicht unabhängig von der Anbauplanung, der jährlich wiederkehrende Planung des Anbauumfangs der ausgewählten Fruchtarten, betrachtet werden. Für beide Planungsprobleme findet sich in der Literatur eine Vielzahl von Modellen, die entweder mittels eines geeigneten Algorithmus oder als regelbasiertes Expertensystem Fruchtfolge- und Anbauplanung ermöglichen. Jährliche Anbauplanung ist allerdings ebenso wie die Fruchtfolgeplanung nach dem kontrolltheoretischen Konzept der Regelung wegen des erforderlichen intensiven Monitorings der Schaderegerpopulation kein problemadäquater Planungsansatz für das Integrierte Nematodenmanagement. Hinzu kommt, dass eine jährliche Anbauplanung nicht dem Nachhaltigkeitsgedanken des Integrierten Nematodenmanagements gerecht werden kann. Darüber hinaus gibt es bei der Verwendung von Entscheidungsbaumverfahren zur Lösung des vorliegenden kombinatorischen Optimierungsproblems methodische Probleme. Das auch größere Planungsprobleme in vertretbarer Rechenzeit lösende exakte branch-and-bound-Verfahren ist aufgrund der zu erfassenden Carry-over-Effekte und Folgekosten nicht geeignet.

Für einen schlagspezifischen Ansatz werden ein Hektar große Einheitsparzellen anstatt real existierende Ackerschläge eines landwirtschaftlichen Betriebs empfohlen. Alle Parzellen sollten einem zuvor definierten Produktionsort angehören, um die Abhängigkeit der relativen Vorzüglichkeit einzelner Maßnahmen des Nematodenmanagements von der Güte des Produktionsortes ermitteln zu können. Neben der Annahme einer parzelleneinheitlichen Ausgangsverseuchung mit *H.schachtii* gibt es die Möglichkeit, die Ausgangsverseuchungsdichte aus einer empirischen Verteilung mehrerer Befallserhebungen abzuleiten und Befallsszenarien zu entwickeln.

7 Auswirkungen der Reform der EU-Zuckermarktordnung

Die Gültigkeit der zur Zeit der Entstehung dieser Arbeit maßgeblichen Zuckermarktordnung der EU endet mit dem Zuckerwirtschaftsjahr 2005/6, d.h. am 30. Juni 2006. Die am 24. November 2005 von den EU-Agrarministern beschlossene Reform (vgl. LIZ, 2005e) kann im Rahmen dieser Arbeit lediglich qualitativ berücksichtigt werden.

7.1 Die neue Zuckermarktordnung ab 2006

Die reformierte Zuckermarktordnung enthält den wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmen für den europäischen Zuckersektor ab dem Zuckerwirtschaftsjahr 2006/7 bis zum Jahr 2014/15. Die Kernpunkte der Reform der Zuckermarktordnung sind in Übersicht 28 aufgeführt.

Übersicht 28: Kernpunkte der Reform der Zuckermarktordnung

1. Die bisherigen A- und B-Quoten werden zu einer einzigen Produktionsquote zusammengefasst. Ab dem Zuckerwirtschaftsjahr 2010/11 sind je nach Höhe der EU-Zuckererzeugung Kürzungen möglich.
2. Der institutionelle Preis für Zucker wird schrittweise um 36% und der Mindestpreis für Zuckerrüben um insgesamt 39,7% gesenkt.
3. Landwirte, die im Zuckerwirtschaftsjahr 2006/7 Zuckerrüben anbauen, erhalten eine Ausgleichszahlung für 64,2% der Preissenkung in der Endstufe. Diese Beihilfe wird in die Betriebsprämienregelung einbezogen. Die Dauer dieser Ausgleichszahlung ist zeitlich nicht festgeschrieben.
4. Die neue Zuckermarktordnung ist einschließlich der Verlängerung des Quotensystems bis zum Wirtschaftsjahr 2014/15 gültig.
5. Der Interventionsmechanismus wird abgeschafft und der Interventionspreis durch einen Referenzpreis ersetzt.
6. Eine freiwillige Umstrukturierungsregelung mit vierjähriger Laufzeit für die Zuckerfabriken in der EU sieht eine degressive Zahlung vor, damit ein Anreiz für Fabrik-schließungen und Quotenverzicht besteht.
7. Eine Zusatzzahlung wird denjenigen Zuckerrübenbauern gewährt, deren Zuckerfabrik im Rahmen der Umstrukturierungsregelung geschlossen wurde.
8. Zuckerunternehmen aus Ländern mit C-Zucker-Produktion im Jahr 2004/5 können insgesamt eine Million Tonnen Quote aus einem Strukturfonds kaufen.
9. Beim Anbau von Zuckerrüben als Non-Food-Kultur sollen sowohl Stilllegungsprämien für die Flächen als auch die Energiepflanzenbeihilfe in Höhe von 45 EUR/ha gezahlt werden.

Quelle: LIZ, 2005e, verändert

7.2 Folgen für den Zuckerrübenanbau in Deutschland

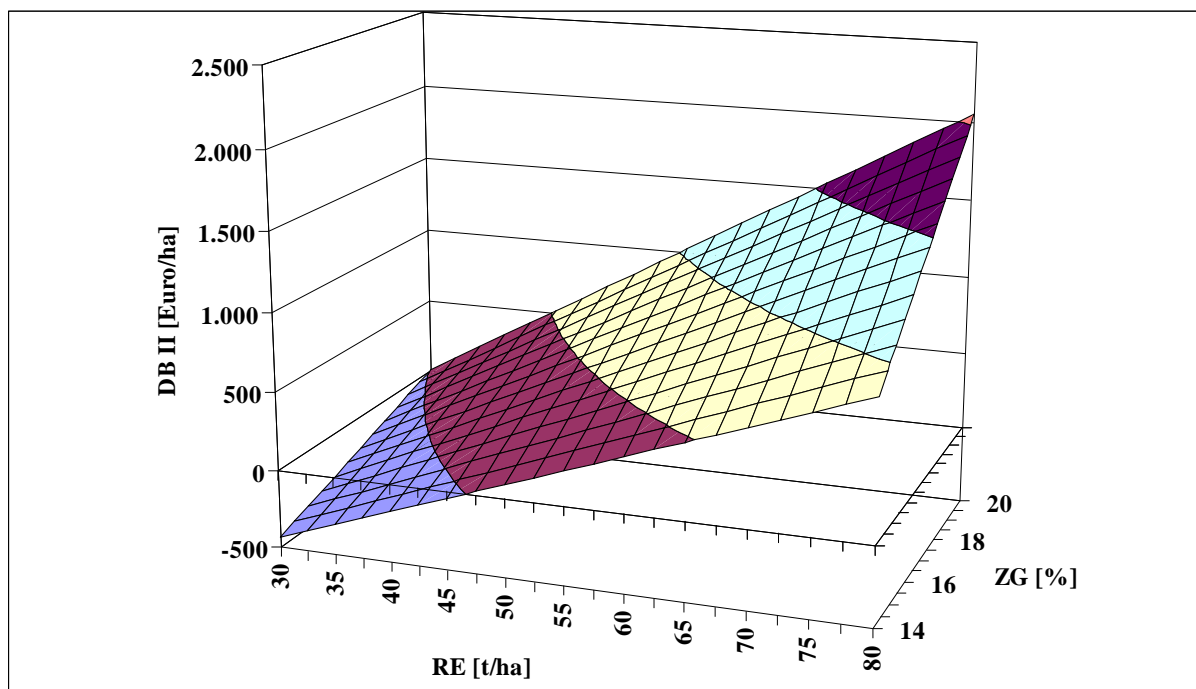
In der folgenden Übersicht 29 sind die Preissenkungen durch die Reform der Zuckermarktordnung gegenüber den zurzeit geltenden Zuckerrübenpreisen dargestellt. Da es ab dem kommenden Zuckerwirtschaftsjahr nur noch eine einheitliche Produktionsquote gibt, betragen die Preissenkungen in der Endstufe 43,7% gegenüber dem bisherigen A-Rübenpreis und 8,7% gegenüber dem bisherigen B-Preis.

Übersicht 29: Preissenkungen im Rahmen der Reform der Zuckermarktordnung

<u>Zuckerwirtschaftsjahr</u>	<u>Zuckerpreis (Euro/t)</u>	<u>Mindestpreis Zuckerrüben (Euro/t)</u>
2005/6	631,9	A-Rüben: 46,7 B-Rüben: 28,8
2006/7	505,5	32,9
2007/8	458,1	29,8
2008/9	410,7	27,8
ab 2009/10	404,4	26,3

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an LIZ, 2005e

Da der Mindestpreis der Zuckerrüben ab dem Wirtschaftsjahr 2009/10 ca. 9% unter dem bisherigen B-Preis liegen wird, ist zukünftig mit einem Deckungsbeitrag der Zuckerrüben zu rechnen, der unterhalb des Deckungsbeitrags der B-Rüben vor der Reform liegt. Dies verdeutlicht Abbildung 113 gegenüber Abbildung 62, in der die Deckungsbeiträge (DB II) von B-Rüben in Abhängigkeit von Rübenenertrag und Zuckergehalt dargestellt sind. Die Preissenkung führt dazu, dass unter der Annahme gleicher Kosten zukünftig bei 16% Zuckergehalt mindestens ein Rübenenertrag in Höhe von 400 dt/ha erreicht werden muss, um einen positiven Deckungsbeitrag zu erzielen und mindestens 575 dt/ha, um einen Deckungsbeitrag zu erreichen, der über 500 Euro/ha liegt. Bei höheren Erträgen und Zuckergehalten sind weiterhin Deckungsbeiträge über 1.000 Euro/ha realisierbar, so dass die relative Vorzüglichkeit der Zuckerrübe gegenüber Anbaualternativen wie Weizen oder Raps zwar deutlich sinkt, aber in Gunsträumen wie dem Rheinland grundsätzlich erhalten bleibt.

Abbildung 113: Deckungsbeitrag der Zuckerrüben nach Reform der ZMO

Quelle: Eigene Darstellung

Entscheidungsträger, die nicht an einer Anbauplanung für Zuckerrüben nach Lieferrechtserfüllung festhalten, sondern sich Gewinn maximierend verhaltend die Anbaufläche der Zuckerrüben nach deren Grenzdeckungsbeitrag errechnen, werden den Anbauumfang der Zuckerrüben aufgrund derer sinkenden Deckungsbeiträge verringern. Aus diesem Grund wird der Zuckerrübenanbau vor allem in Grenzertragsregionen zurückgehen und Lieferrechte freigesetzt werden, wenn die Möglichkeit besteht, mit Raps, Leguminosen oder Kartoffeln leistungsfähige Alternativen anzubauen. Dies dürfte z.B. auf fabrikferne Zuckerrübenanbaugelände Schleswig-Holsteins und im nördlichen Niedersachsen zutreffen. In Nordrhein-Westfalen könnte das Sinken der Wettbewerbsfähigkeit der Zuckerrübe vor allem außerhalb des Kerngebiets des rheinischen Zuckerrübenanbaus, der Köln-Aachener Bucht, zum vermehrten Anbau von Alternativen führen. In den Kerngebieten des deutschen Zuckerrübenanbaus, dem süd-östlichen Niedersachsen, Bayern (Franken) und dem Rheinland, sowie in unmittelbarer Nähe zu den rentabelsten Zuckerfabriken werden sich die Anbauverhältnisse allerdings nicht wesentlich ändern. Je nach Ausgestaltung eines landes- oder EU-weiten Lieferrechtsverkehrs könnte es sogar zu einer Konzentration des Zuckerrübenanbaus auf diese Kernregionen kommen. Darüber hinaus bietet der Zuckerrübenanbau Rationalisierungspotential, so dass zukünftig Kostensenkungen möglich sind und sich die Wettbewerbsfähigkeit dadurch verbessert bzw. weniger stark mindert.

Die in die Betriebsprämienregelung einbezogenen, d.h. entkoppelt gewährten Ausgleichszahlungen für Zuckerrüben anbauende Landwirte sind bezüglich der Frage nach dem zukünftigen Umfang und der optimalen speziellen Intensität des Zuckerrübenanbaus entscheidungsunabhängig und stellen lediglich eine liquiditätsrelevante Skalierungsgröße dar.

7.3 Folgen für das Integrierte Nematodenmanagement

Ändert sich in den Kerngebieten des Zuckerrübenanbaus die Anbauhäufigkeit der Zuckerrübe nicht wesentlich, ist davon auszugehen, dass die bestehende Befallssituation mit dem Schaderreger *H.schachtii* fortgeschrieben werden kann. Aus folgenden Gründen wird Integriertes Nematodenmanagement in diesen Kerngebieten weiterhin von großer Wichtigkeit sein:

1. Sinkende Produktpreise erhöhen den Kostendruck auf die Zuckerrübenanbauer. Ein effizientes Integriertes Krankheits- und Schädlingsmanagement ist daher notwendig.
2. Es wird zu einer Konzentration des Zuckerrübenanbaus auf die Gunsträume kommen. In diese Regionen könnten zusätzliche Quoten aus dem Strukturfond fließen.
3. Solange keine nematodenresistenten Rapsybriden zur Verfügung stehen, führt der vermehrte Anbau von Raps zusammen mit Zuckerrüben in einer Fruchtfolge tendenziell zu erhöhten Befalldichten.
4. Zur Steigerung der Fruchtfolgedeckungsbeiträge könnte sich der Trend der Verdrängung der Wintergerste durch Weizen fortsetzen, wodurch die Bekämpfungswirkungsgrade des Zwischenfruchtanbaus sinken.

Aus rein nematologischer Sicht spricht daher vieles dafür, dass Integriertes Nematodenmanagement weiterhin von großer Bedeutung sein wird. Hinzu kommt, dass mit der Erweiterung des Spektrums der Maßnahmen des Nematodenmanagements um nematodentolerante Zuckerrübensorten und neue Nematizide das Finden optimaler Strategien im Rahmen des Nematodenmanagements für die Entscheidungsträger eher komplizierter wird.

Allerdings hat die Reform der Zuckermarktordnung deutliche Auswirkungen auf die Ökonomie des Integrierten Nematodenmanagements. Für die Simulationsexperimente in Kapitel 5 wurde ein Mischpreis für Zuckerrüben in Höhe von 41,36 Euro/t zugrunde gelegt (siehe Kapitel 5.2). Ein Rübenpreis von 26,3 Euro/t bedeutet daher eine Senkung um über 36%, die unter den Annahmen für die Simulationsexperimente bei anfälligen Zuckerrüben ohne Nematodenbefall c.p. zu einem Deckungsbeitragsrückgang von 3.122 Euro/ha auf 1.640 Euro/ha (-52,5%) und bei resistenten Zuckerrüben von 2.512 Euro/ha auf 1.234 Euro/ha führt. Die Gesamtdeckungsbeiträge der gerechneten Szenarien werden demnach umso deutlicher sinken, je größer der Anbauanteil der Zuckerrüben an der Fruchtfolge ist. In gleichem Maße sinken auch die monetären Folgen nematodenbedingter Ertragsdepressionen und damit die Managementwürdigkeit des Schaderregers *H.schachtii* mit den in ihren Kosten unveränderten Maßnahmen. Die ökonomischen Bekämpfungsschwellen steigen ceteris paribus. Erhalten bleibt dagegen der streuungs- und damit risikomindernde Effekt des Nematodenmanagements, so dass dessen Vorzüglichkeit insbesondere für risikoaverse Landwirte weiterhin gegeben ist.

8 Bewertung und Ausblick

In diesem Kapitel wird die Leistungsfähigkeit des zuvor entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems *INM-Consult* für das Integrierte Nematodenmanagement bewertet und ein Ausblick auf die Möglichkeiten der inhaltlichen und technischen Fortentwicklung der Modellansätze gegeben.

8.1 Bewertung des vorhandenen Modells

Zielsetzung der Modellentwicklung war die Entwicklung eines eigenständig lauffähigen Computermodells, welches die biologisch-technischen und ökonomischen Prozesse rund um die interagierenden Systeme Feldfrüchte und *H.schachtii* in einem bio-ökonomischen Ansatz dynamisch und stochastisch nachbildet, um als Entscheidungsunterstützungssystem im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements zu dienen. Diese Zielsetzung wird von dem vorliegenden Programm *INM-Consult* erfüllt. Alle in den Anforderungen an den Leistungsumfang (siehe Kapitel 4.2) genannten Prozesse werden für rheinische Bedingungen mit der stand-alone-Anwendung stochastisch simuliert. Die mit *INM-Consult* durchgeführten Simulationsexperimente liefern Resultate und ermöglichen Schlussfolgerungen, die mit denen vorhandener Entscheidungsunterstützungssysteme vergleichbar sind: Bezugsgröße der Berechnungen ist der einzelne Hektar und betrachtet werden vom Modellanwender bzw. Entscheidungsträger vorgegebene Fruchtfolgen. Aufgrund des dynamischen und stochastischen Informationssystems ist das entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem allerdings aussagekräftiger als die deterministischen Modelle, die eine in den biologisch-technischen Realsystemen nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen und sich ausschließlich an risikoneutrale Entscheidungsträger wenden können.

Potentielle Anwender des Programms sind in erster Linie versierte Rüben anbauende Landwirte und das landwirtschaftliche Beratungswesen. Für beide Anwendergruppen bietet das Modell die Möglichkeit, für vorgegebene Fruchtfolgen mit und ohne Nematodenmanagement die Abundanzdynamik des Rübennematoden sowie die Entwicklung der Zuckerrübenenerträge und der kumulierten Deckungsbeiträge zu prognostizieren. Durch Alternativrechnungen können die zur Verfügung stehenden Managementmaßnahmen miteinander verglichen und die vorzüglichste ermittelt werden. Die stochastischen Modelle zur Simulation der Abundanzdynamik des Nematoden und der Ertragsdynamik der Zuckerrübe mit und ohne Nematodenbefall ermöglichen die Angabe der statistischen Momente des Modelloutputs, so dass auch risikoaverse Entscheidungsträger von den generierten Informationen profitieren.

Begrenzend wirkt auf das Modell die Verwendung eines Steuerungsansatzes, der eine vom Modellanwender vorgegebene Rotation einer (Betriebs-)Fruchtfolge im gesamten Simulationszeitraum fortführt. Das Fehlen eines gesamtbetrieblichen Ansatzes hat zur Folge, dass die Resultate des Entscheidungsunterstützungssystems und die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen als allgemeingültige Richtgrößen und Anhaltspunkte anzusehen sind, ohne den Anspruch der Betriebs- und Situationsspezifität erheben zu können.

8.2 Inhaltliche Fortentwicklung des vorhandenen Modells

Die inhaltliche Fortentwicklung des bio-ökonomischen Modellansatzes, d.h. der Ausbau der vorhandenen und die Erweiterung um neue Komponenten, wird durch den modularen Aufbau des Computerprogramms erleichtert. Wichtigster Punkt der Fortentwicklung ist die Implementierung der in Kapitel 6 vorgestellten Ansätze. Darüber hinaus sind die im Folgenden vorgestellten Erweiterungen denkbar.

8.2.1 Fortentwicklung des Populationsmodells

Das Modell zur Simulation der Populationsdynamik von *H.schachtii* ist bei Vorliegen einer geeigneten, d.h. mehrjährigen und möglichst spezifisch rheinischen Datenbasis für die Kalibrierung der Modellparameter um neue Managementtaktiken im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements zu erweitern. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Implementierung der abundanzregulierenden Wirkung neuer toleranter Zuckerrübensorten wie Pauletta der KWS Saat AG und der neuer Nematizide wie BioAct[®] WG und Nemathorin 10 G[®]. Für die Aufnahme nematodentoleranter Zuckerrübensorten bedarf es der Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Vermehrungsrate und Ausgangsbefallsdichte, wie im Rahmen dieser Arbeit für die Parameterkalibrierung bei nematodenanfälligen und -resistenten Zuckerrüben geschehen. Zur Implementierung der Nematizide bedarf es zunächst der Klärung der Frage, ob die befallsmindernde Wirkung dichteabhängig ist, und wenn ja, der Qualifizierung und Quantifizierung der Befall-Wirkungs-Beziehung. Die notwendige Datenbasis könnte sowohl vom Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde der Biologischen Bundesanstalt, als auch von den Herstellern bzw. Züchtern zur Verfügung gestellt werden.

In den vergangenen Jahren sind im Rheinland vermehrt Schäden durch das Rübenkopffälchen *D.dipsaci* aufgetreten. Die Einbeziehung der Abundanzdynamik dieses Schaderregers komplettierte das Integrierte Nematodenmanagement im Zuckerrübenanbau. Zunächst gilt es allerdings zu klären, ob sich die Populationsdynamik dieser Nematodenspezies unter Wirts- und Nichtwirtspflanzen mit dem im Rahmen dieser Arbeit gewählten kontinuierlichen Modellansatz mit einer Differentialgleichung auf der Basis von Potenzfunktionen überhaupt abbilden lässt. Sollte dies nicht der Fall sein, wäre ein separater Ansatz zur Simulation der Abundanz zu entwickeln, dessen Parameter mit geeigneten Versuchsergebnissen zu kalibrieren sind. Des Weiteren ist eine spezifische Befall-Schadens-Relation zu entwickeln.

8.2.2 Fortentwicklung des Ertragsdynamikmodells

Der entwickelte Modellansatz beschränkt sich auf die Abbildung der Interaktion zwischen der Zuckerrübe und *H.schachtii*. Allerdings werden pilzliche und viröse Schaderreger der Zuckerrübe ebenfalls durch unterschiedliche Fruchtfolgen oder Anbauabstände der Zuckerrüben beeinflusst. Durch Einbeziehung der Wirkungen dieser Schaderreger auf die Ertragsparameter der Zuckerrübe könnte der vorhandene Modellansatz zu einem Entscheidungsunterstützungssystem für ein Integriertes Krankheitsmanagement im Zuckerrübenanbau erweitert und so der Anbau von Zuckerrüben weiter optimiert werden.

8.2.3 Fortentwicklung des ökonomischen Moduls

Die erst Ende November 2005 beschlossene Ausgestaltung der reformierten EU-Zuckermarktordnung kann vergleichsweise einfach in das Modell implementiert werden. Dazu sind lediglich die Preis- und Lieferrechtsangaben im Eingabeblatt der Rahmendaten zu modifizieren. Die den Rübenanbauern gewährten Ausgleichszahlungen können zu den Betriebsprämien hinzuaddiert werden.

Die Simulationsexperimente in Kapitel 5 haben gezeigt, dass Nematodenmanagement sowohl den Erwartungswert als auch (insbesondere) die Streuung der ökonomischen Zielgröße beeinflusst und demnach die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung von Managementmaßnahmen und -strategien hat. An dieser Stelle böte sich die Erweiterung der im Rahmen dieser Arbeit unterstellten monofaktoriellen Zielfunktion des Entscheidungsträgers und ein Verzicht auf die Beschränkung dessen Risikopräferenz auf Risikoneutralität an. BLÖNNIGEN (1986), der das Zuckerrüben-Unkraut-System von THOER (1986) zugunsten der Berücksichtigung von Mehrfachzielen erweiterte, verwendete zur Abbildung der Präferenzen des Entscheidungsträgers die Ziel-Programmierung (goal programming) in Kombination mit standardisierten Risikonutzenfunktionen nach Bernoulli. Die Identifikation dieser Risikonutzenfunktion ist allerdings sehr aufwendig und muss z.B. über ein Dialogverfahren mit dem Entscheidungsträger näherungsweise erfolgen. Mit einem solchen Ansatz könnte untersucht werden, wie sich die relativen Vorzughigkeiten unterschiedlicher Managementmaßnahmen in Abhängigkeit von Art und Intensität der Ausprägung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers verändern.

8.3 Technische Fortentwicklung des vorhandenen Modells

Das entwickelte Computerprogramm *INM-Consult* ist als Desktop-Anwendung konzipiert. Borland Delphi® stellt alle notwendigen Tools zur Verfügung, um *INM-Consult* in eine plattformübergreifende Internet-Anwendung zu transformieren. Einmal auf einem geeigneten Server lokalisiert, kann das Entscheidungsunterstützungssystem einer Vielzahl von Nutzern zugänglich gemacht werden, wie dies z.B. bei den Online-Entscheidungshilfen des LIZ auf dessen Homepage bereits der Fall ist.

Unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung von Datenredundanz und Insellösungen ist die Einbindung insbesondere des schlagspezifischen Modellansatzes in vorhandene landwirtschaftliche Standardsoftware wie Schlagkarteien prinzipiell wünschenswert. Die Vielzahl der auf dem Markt verfügbaren Programme und das Fehlen von standardisierten Schnittstellen erschwert die Verwirklichung dieser Programmeigenschaft allerdings erheblich.

9 Zusammenfassung

Gerade in Hinblick auf die bevorstehenden Preiskürzungen durch die Reform der europäischen Zuckermarktordnung ist es entscheidend, den Zuckerrübenanbau so effizient wie möglich zu gestalten, wenn die Zuckerrübe weiterhin zur Einkommenserzielung der Ackerbaubetriebe beitragen soll. Integriertes Nematodenmanagement ist ein wesentlicher Bestandteil eines effizienten Zuckerrübenanbaus. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines rechnergestützten Entscheidungsunterstützungssystems, das als eigenständig lauffähiges Computerprogramm Zuckerrüben anbauende Landwirte und deren Berater in die Lage versetzt, durch Prognose der Auswirkungen der Handlungsalternativen die relativen Vorzughigkeiten der im Rahmen des Nematodenmanagements zur Verfügung stehenden Maßnahmen zu bewerten.

Das Rheinland, und hier insbesondere das Gebiet der Köln-Aachener Bucht, ist aufgrund der natürlichen Standortbedingungen ein Gunstraum für den Anbau von Zuckerrüben und eines der Kerngebiete des deutschen Zuckerrübenanbaus. Günstige klimatische Bedingungen und jahrzehntelange hohe Anbaudichten der Zuckerrübe haben das Rheinland allerdings auch zu einem Hauptbefallsgebiet mit dem wirtschaftlich bedeutendsten Fruchtfolgeschädling der Zuckerrübe, dem Rübenzystennematoden *Heterodera schachtii*, in Deutschland gemacht. Dieser polyphage Wurzelparasit vermehrt sich unter den anfälligen Wirtspflanzen wie Zuckerrüben und Raps in mehreren sich überlappenden Generationen sehr stark, während resistente Wirtspflanzen zu einem sehr deutlichen Populationsrückgang führen. Unter Nichtwirtspflanzen kommt es zu einem natürlichen Populationsrückgang, der 30-60% p.a. beträgt. Bei empfindlichen Wirtspflanzen verursacht *H.schachtii* dichteabhängige Ertragsdepressionen bis zu 55%, während tolerante Wirtspflanzen nicht oder kaum mit Ertragsdepressionen auf den Befall reagieren. Sowohl die Abundanzdynamik als auch die Höhe der Ertragsdepressionen sind von einer Reihe von biotischen und abiotischen Einflussfaktoren abhängig, zu deren wichtigsten die vorhandene Befallsdichte und die Bodentemperatur zählen.

Integriertes Nematodenmanagement ist die Anwendung der Prinzipien des Integrierten Pflanzenschutzes auf den Schaderreger Nematode. Dazu gehört die Anwendung des Schadschwellenkonzepts ebenso wie regelmäßige Befallserhebungen. Die Schadschwelle, d.h. die Populationsdichte des Schaderregers, bei deren Überschreitung signifikante Ertragsverluste zu erwarten sind, beträgt 500 Eier und Larven je 100g Boden. Im Vergleich zu entomologischen Schaderregern ist das biologische Monitoring bei Nematoden sehr beschränkt. Zur Erhebung der Befallsdichte stehen neben der Bodenprobe seit einigen Jahren Infrarotluftbildaufnahmen und Beprobungen des Abreinigungs-Erdschwads der Feldrandmieten der Zuckerrüben zur Verfügung. Die Bodenprobe zur Ermittlung des Ausgangsbefalls zu Zuckerrüben, dem P_i -Wert, ist aufwändig und teuer und daher in der Praxis nicht so verbreitet, wie es die Befallsituation im Rheinland erforderlich machte. Luftbildaufnahmen ermöglichen zwar einen guten Überblick über die räumliche Aggregation des Nematodenbefalls auf einzelnen Flächen während der Vegetationsperiode der Zuckerrübe, liefern aber noch keine Angaben über die Höhe der Befallsdichte. Erst die kostengünstige Möglichkeit der Beprobung des Erdschwads der Feldrandmiete führte im Rheinland zu einer breiteren Akzeptanz einer im Rahmen des Nematodenmanagements notwendigen regelmäßigen Beobachtung des Systemzustands. Je nach geplanter Fruchtfolge hat der Praktiker mehrere Jahre Zeit, anhand der Ergebnisse der Befallserhebung nach erfolgtem Zuckerrübenanbau, den P_f -Werten, geeignete Gegenmaßnahmen zum Schutz der folgenden Zuckerrüben einzuleiten.

Die vorhandenen Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements lassen sich in aktiv und passiv gruppieren. Passives Nematodenmanagement ist die Vermeidung oder Reduktion des Anbaus anfälliger Wirtspflanzen des Rübenematoden. Darunter fallen neben der Beschränkung des Anbauumfangs der Zuckerrüben eine möglichst kurze Vegetationsdauer derselben sowie der Verzicht auf den Anbau weiterer Wirtspflanzen wie Raps oder diverser Kohlsorten in der Zuckerrübenfruchtfolge. Das passive Nematodenmanagement setzt demnach ein langfristiges Fruchtfolgemanagement voraus, das allerdings in der landwirtschaftlichen Praxis immer mehr durch spontane Anbauentscheidungen nach den Gegebenheiten des Marktes abgelöst wurde. Hinzu kommt, dass passives Nematodenmanagement aufgrund der ausgeprägten Wirtschaftlichkeit des Zuckerrübenanbaus in aller Regel mit den ökonomischen Zielvorstellungen des Entscheidungsträgers kollidiert. So kann nicht davon ausgegangen werden, dass die bei einer Verringerung des Zuckerrübenanteils in der Fruchtfolge von 33% auf 25% zu erwartenden Mehrerträge der Zuckerrübe ausreichen, das betriebliche Lieferrecht weiterhin in gleichem Maße zu erfüllen.

Aktives Nematodenmanagement umfasst die Populationsregulation durch den Anbau resistenter Kruziferen oder resistenter Zuckerrübensorten. Ziel des aktiven Nematodenmanagements ist es, die Populationsdichte des Schaderregers stärker zu senken, als dies unter einer Nichtwirtspflanze der Fall ist. Als nematodenresistente Kruziferen stehen diverse Ölrettich- und Gelbsensorten unterschiedlicher Anfälligkeitsstufen zur Verfügung. Diese können als Zwischenfrüchte nach Getreide oder zur Begrünung der Flächenstilllegung angebaut werden. Der hauptfruchtartige Anbau auf Stilllegungsflächen ist aus nematologischer Sicht vorzuziehen, da im Frühjahr und Sommer die für den Bekämpfungserfolg notwendigen Bodentemperatursummen sicher erreicht werden. Eine Reduktion der Nematodenpopulation um mehr als 90% ist möglich. Im Gegensatz dazu sinkt der Bekämpfungswirkungsgrad beim Zwischenfruchtanbau, je später die Kruziferen auflaufen. Ölrettich ist dem Gelbsenf vorzuziehen, da er regelmäßig höhere Populationsreduktionen erreicht und dem Stock- und Stängelälchen *D. dipsaci* nicht als Wirt dient. Seit 1998 stehen nematodenresistente Zuckerrübensorten zur Verfügung, die ebenfalls zu einem deutlichen Populationsrückgang führen und weitgehend tolerant sind. Allerdings weisen diese Sorten ein geringeres Ertragspotential sowie schlechtere sekundäre Ertragsparameter auf, so dass ihr Anbau erst oberhalb höherer Befallsdichten ökonomisch gerechtfertigt ist. Um die Gefahr der Selektion resistenzbrechender Pathotypen beim Schaderreger zu senken, ist ein Resistenzmanagement erforderlich, in dem sowohl anfällige als auch resistente Zuckerrüben und resistente Zwischenfrüchte abwechselnd zum Einsatz kommen. Zukünftig stehen neu entwickelte Nematizide und leistungsstarke nematodentolerante Zuckerrübensorten zur Verfügung.

Die Konzeption und Entwicklung des bio-ökonomischen Entscheidungsunterstützungssystems mit biologisch-technischen Simulationsmodellen als Informationssystem bildet den Schwerpunkt dieser Arbeit. Das Lastenheft eines solchen Entscheidungsunterstützungssystems beinhaltet die standortspezifische, d.h. rheinische Bedingungen widerspiegelnde, Simulation und Prognose der Abundanzdynamik des Rübenematoden unter Wirts- und Nichtwirtspflanzen und unter dem Einfluss der Managementmaßnahmen sowie der Ertragsdynamik der Zuckerrübe mit und ohne Schaderregerbefall. Da es sich bei den biologisch-technischen Systemen um offene Systeme handelt, die dem Einfluss von Störgrößen aus der Systemumwelt unterliegen, sind die Modelle zu deren Nachbildung dynamisch und stochastisch zu gestalten.

Zur Abbildung der Abundanzdynamik des Nematoden wird ein zeitkontinuierlicher Black-Box-Modellansatz entwickelt, der alleine durch Variation der Modellparameter in der Lage ist, mit nur einer Differentialgleichung die Abundanzdynamik des Nematoden unter Wirts- und Nichtwirtspflanzen und unter dem Einfluss der Maßnahmen des Nematodenmanagements abzubilden und zu prognostizieren. Die Differentialgleichung basiert auf einem zeitdiskreten Ansatz mit Potenzregressionsfunktionen, mit dem am Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft funktionale Zusammenhänge zwischen P_i -Werten und P_f -Werten unter anfälligen und resistenten Wirtspflanzen hergestellt werden. Die Modellparameter für anfällige und resistente Zuckerrüben, Raps und resistente Kruziferen werden an Regressionsergebnissen der BBA kalibriert, denen mehrjährige Versuchsergebnisse aus dem Rheinland zugrunde liegen. Für den Anbau der resistenten Kruziferen als Zwischenfrüchte wird ein saatzeitpunktabhängiger Bekämpfungswirkungsgrad implementiert, der die mit späterem Auflauf sinkenden Bodentemperatursummen abbildet. Unter nematologisch als gleichwertig behandelten Nichtwirtspflanzen werden diskrete jährliche Abbauraten unterstellt und die Parameter des Populationsmodells für einen jährlichen Populationsrückgang von 30%-60% kalibriert.

Die Erweiterung des Modells zur Abundanzdynamik des Nematoden zu einem stochastischen Simulationsansatz erfolgt durch Generierung lognormalverteilter P_i - und P_f -Werte als Modelloutput wiederholter Simulationsläufe, die gegenüber den durch deterministische Simulation ermittelten Populationsdichten des Nematoden am Tag der Saat und der Ernte der Zuckerrübe erwartungstreu sind (Monte-Carlo-Simulation). Dies wird durch die Implementierung eines Störterms erreicht, der normalverteilt mit Mittelwert Null ist und als Standardabweichung die Stichprobenstandardabweichung der in den Versuchen der BBA ermittelten logarithmierten Verseuchungsdichten zu Zuckerrüben verwendet. Diese erwiesen sich als Lognormalverteilt und sind daher nach Logarithmierung normalverteilt. Durch Addition des Störterms zu den logarithmierten deterministischen Simulationsergebnissen entstehen nach der Potenzierung erwartungstreue lognormalverteilte Modelloutputgrößen. Die Logarithmierung und anschließende Potenzierung ist notwendig, um mit der wesentlich einfacher zu implementierenden Normalverteilung Lognormalverteilungen generieren zu können.

Für die Simulation der Ertragsdynamik anfälliger Zuckerrüben wird das von THOER (1986) entwickelte Modell zur Nachbildung von Zuckerrüben- und Unkrautwachstum verwendet, das die Entwicklung der Kompartimente Rübenblatt und Rübenkörper auf der Basis logistischer Wachstumsfunktionen und unter Berücksichtigung intraspezifischer Konkurrenz zeitkontinuierlich nachbildet. Allerdings werden die Einflüsse abiotischer Umweltparameter nicht wie bei THOER (ebd.) detailliert nachgebildet, sondern der Einfluss der Bodentemperatur und der Globalstrahlung auf die Wachstumsparameter des Blattes in einer Saisonfunktion aggregiert. Die für die Quantifizierung der Saisonfunktion notwendigen täglichen Witterungsdaten stammen von der Obstbauversuchsanlage der Universität Bonn in Klein-Altendorf und werden als repräsentativ für das Klima in der Köln-Aachener Bucht angesehen. Für die Kalibrierung der Parameter des Pflanzenwachstumsmodells werden empirische Datenreihen für die Rübenkörper- und Blattbiomasseentwicklungen über die gesamte Vegetationszeit benötigt. Für den Rübenmasseertrag anfälliger Zuckerrüben kann auf die bereits von ZENS (2002) ausgewerteten mehrjährigen Proberodungsergebnisse des Rheinischen Rübenbauer-Verbands und für die Entwicklung der Blattbiomasse auf Proberodungsergebnisse des Instituts für Zuckerrübenforschung in Göttingen zurückgegriffen werden. Die Berechnung der sekundären Ertragsparameter Zuckergehalt und Ausbeuteverluste, die nicht mit dem modifizierten Thoer-

schen Ansatz simuliert werden können, erfolgt mittels der von ZENS (2002) übernommenen Regressionspolynome. Die Ertragsparameter nematodenresistenter Zuckerrüben ergeben sich durch diskrete Ableitung aus den Modellergebnissen der Standardsorten. Die dazu benötigten Korrekturfaktoren stammen aus aktuellen Leistungsversuchen der Zuckerrübensorten. Um die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Standorte berücksichtigen zu können, werden die Produktionsorte gut, mittel und schlecht definiert, die sich bei den Ertragsparametern der Zuckerrübe voneinander unterscheiden. Analog zum stochastischen Ansatz im Populationsmodell liefert das Ertragsmodell einen stochastischen Rübenenertrag als Ergebnisgröße durch wiederholte Ziehungen aus einer für den Rübenenertrag unterstellten Normalverteilung mit dem deterministischen Simulationsoutput als Mittelwert und einer konstanten Standardabweichung in Höhe von 73,3 dt/ha. Dies entspricht einem Variationskoeffizienten von 10% auf dem guten Produktionsstandort und damit den Angaben in der Literatur für Ertragsschwankungen der Zuckerrübe im Zeitablauf.

Die Abbildung des Einflusses des Schaderregers auf die Ertragsdynamik der Zuckerrübe erfolgt mittels diskreter Befall-Ertragsverlust-Relationen, die unter Berücksichtigung des wichtigsten abiotischen Schadensparameters von der Saatzeit der Zuckerrüben abhängig gestaltet sind. Die Schadenshöhe beträgt 4% je 1.000 Eier und Larven je 100g Boden bei früherer Saat bis Ende März und 10% bei späterer Saat ab Anfang Mai. Zur Erweiterung des Befall-Schadens-Modells zu einem stochastischen Ansatz werden für die Schadensrelationen Dreiecksverteilungen unterstellt, so dass je nach Saatzeit der Zuckerrübe minimal 2% und maximal 12% Ertragsverluste je 1.000 Eier und Larven entstehen. Resistente Zuckerrüben weisen einen Erwartungswert von 1,3% (0-4%) Ertragsdepression je 1.000 Eier und Larven auf.

Ein bio-ökonomisches Modul generiert den monetären Modelloutput für die Entscheidungsunterstützung. Dazu wird zum einen der physische Output des Modells zur Simulation der Ertragsdynamik in eine monetäre Größe transformiert. Zum anderen werden die Kosten des Zuckerrübenanbaus erfasst und daraus in einer Teilkostenrechnung der Deckungsbeitrag dieser Frucht berechnet. Die Kosten der Maßnahmen des Nematodenmanagements sind ebenso wie die Deckungsbeiträge von acht alternativen Anbauverfahren vom Entscheidungsträger für die drei definierten Produktionsorte vorzugeben.

Das ökonomische Modul umfasst als politische Systemumwelt die reformierte Agrarpolitik der EU sowie die bis zum 30. Juni 2006 geltende Zuckermarktordnung der EU in der für das Rheinland maßgeblichen Ausgestaltung in Form von Lieferverträgen und Branchenvereinbarungen des Zuckererzeugers Pfeifer & Langen KG aus Köln. Das sozio-technische System des Entscheidungsträgers umfasst dessen Zielsystem und Risikopräferenz. Einzige Zielgröße des Entscheidungsträgers ist der über den Simulationszeitraum kumulierte diskontierte Gesamtdeckungsbeitrag. Dessen Maximierung wird dem Nachhaltigkeitsgedanken des Integrierten Nematodenmanagements gerecht, da bei längerfristigen Simulationen alle durch Carry-over-Effekte hervorgerufenen Folgekosten der einzelnen Managementmaßnahmen für die vergleichende Bewertung erfasst werden. Nematodenmanagement führt dann zu einem steigenden kumulierten Gesamtdeckungsbeitrag, wenn die Deckungsbeitragssteigerungen bei der Zuckerrübe, die durch die abundanzregulierende Wirkung des Nematodenmanagements bedingt sind, größer sind als die Kosten der betrachteten Maßnahme. Als Risikopräferenz des Entscheidungsträgers wird Risikoneutralität angenommen. Die stochastischen biologisch-technischen Modelle erlauben darüber hinaus auch die Anwendung des Entscheidungsprinzips der sto-

chastischen Dominanz, so dass auch Aussagen über die relativen Vorzughigkeiten verschiedener Maßnahmen für risikoaverse Entscheidungsträger abgeleitet werden können.

Für die Umsetzung des bio-ökonomischen Entscheidungsunterstützungssystems in ein eigenständig lauffähiges Computerprogramm wird die objektorientierte visuelle Programmierumgebung Borland Delphi[®] verwendet. *INM-Consult* zeichnet sich durch eine leicht erweiterbare modulare Programmstruktur und anwenderfreundliche Benutzeroberflächen aus. Der Modelloutput wird als Rohdaten und statistisch aufgearbeitet grafisch und tabellarisch präsentiert.

Die mit *INM-Consult* durchgeführten Simulationsexperimente zeigen die Leistungsfähigkeit des Entscheidungsunterstützungssystems. Das entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem bietet die Möglichkeit, für vorgegebene Fruchtfolgen mit und ohne Nematodenmanagement die Abundanzdynamik des Rübennematoden sowie die Entwicklung der Zuckerrübenerträge und der kumulierten Deckungsbeiträge ausgehend von einem gegebenen Ausgangsbefall zu simulieren. Durch Alternativrechnungen können so die zur Verfügung stehenden Managementmaßnahmen miteinander verglichen und die vorzüglichste ermittelt werden. Die stochastischen Ansätze des Informationssystems und die Einbeziehung der statistischen Momente des Modelloutputs in die Ergebnisausgabe verhindern im Gegensatz zu den in einer Literaturübersicht vorgestellten Ansätzen, dass das Entscheidungsunterstützungssystem dem Entscheidungsträger eine Genauigkeit vortäuscht, die in den nachgebildeten biologisch-technischen Systemen nicht vorhanden ist und ermöglichen auch Empfehlungen für risikoaverse Entscheidungsträger. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den über einen Horizont von bis zu 20 Jahren durchgeführten Simulationsexperimenten sind:

1. Bekämpfungsschwellen für nematodenresistente Zuckerrüben können nicht aus dem einperiodischen Vergleich der Deckungsbeiträge anfälliger und resistenter Zuckerrübensorten abgeleitet werden. Aufgrund der unterschiedlichen abundanzregulierenden Wirkung bedarf es unbedingt der Einbeziehung der Folgekosten dieser Managementmaßnahme, um Bekämpfungsschwellen für den Einsatz resistenter Sorten zu bestimmen.
2. Die Nematodenpopulation pendelt sich unabhängig von der Ausgangsverseuchung nach wenigen Rotationen auf eine für die betrachtete Fruchtfolge typische Verseuchungsdichte, die fruchtfolgespezifische Verseuchungsdichte (FVD), ein.
3. Die vornehmliche Leistung der Maßnahmen des Nematodenmanagements besteht in der Verringerung der Variabilität der ökonomischen Zielgröße (geringere Standardabweichung, kleineres 90%-Intervall). Nematodenmanagement empfiehlt sich daher in erster Linie als ein Instrument der Risikominderung.
4. Je früher resistente Kruziferen als Zwischenfrüchte auflaufen und je ausgeprägter die Nematodenresistenz ist, desto höher ist deren Effizienz (geringere Managementkosten in Euro Deckungsbeitragsdifferenz je Eier und Larven Differenz der FVD).
5. Die Nutzung der Stilllegungsflächen zum Anbau nematodenresistenter Kruziferen ist nur dann ökonomisch gerechtfertigt, wenn als Verwendungsalternative die Begrünung mit Klee und Gras angesehen wird. Gegenüber der alternativen Nutzung der Flächenstilllegung zum Anbau von (Energie-)Getreide oder NAWARO-Raps kommt es zu einer Verringerung der Gesamtdeckungsbeiträge.
6. In zweijährigen Fruchtfolgen (50% Zuckerrübenanteil) sinkt der Erwartungswert des Deckungsbeitrags der Zuckerrüben durch den Schaderregerbefall um 470 Euro/ha. Das Re-

sistenzmanagement mit und ohne Einbeziehung resistenter Zwischenfrüchte erweist sich als am vorzüglichsten. Aber auch der reine Zwischenfruchtanbau nach dem Getreide führt noch zu einer Steigerung des Gesamtdeckungsbeitrags, wenn ein frühest mögliches Auflaufen der Zwischenfrucht sichergestellt werden kann.

7. In der weit verbreiteten dreijährigen Fruchtfolge verursacht Nematodenbefall einen Rückgang des Deckungsbeitrags der Zuckerrüben in Höhe von ca. 260 Euro/ha. Nematodenmanagement kann zwar nicht zu einer Deckungsbeitragssteigerung führen, aber möglichst früher Zwischenfruchtanbau nach dem Stoppelweizen bzw. der Wintergerste wird von risikoaversen Entscheidungsträgern gegenüber einer Fruchtfolge ohne Nematodenmanagement präferiert.
8. Fruchtfolgen, in denen Zuckerrüben lediglich alle vier Jahre angebaut werden, können aus nematologischer Sicht als „Gesundungsfruchtfolgen“ bezeichnet werden. Die fruchtfolge-spezifische Verseuchungsdichte liegt mit ca. 450 Eier und Larven unterhalb der Schadschwelle. Nematodenbefall führt zu einer Verminderung des Deckungsbeitrags der Zuckerrüben um 150 Euro/ha. Nematodenmanagement senkt zwar die Volatilität der Zielgröße, aber es kann keine Empfehlung für risikoaverse Entscheidungsträger ausgesprochen werden.
9. Die Kombination von Raps und Zuckerrüben in einer Fruchtfolge bleibt aus nematologischer Sicht problematisch. Solange keine nematodenresistenten Rapsorten zur Verfügung stehen, ist eine rigorose Bekämpfung des Ausfallrapses zwingend notwendig.
10. Weitere phytosanitäre oder arbeitswirtschaftliche Überlegungen, die im Rahmen des Modellansatzes nicht monetär erfasst werden, sind in die zu fällenden Entscheidungen einzu beziehen. Dies gilt insbesondere für die nichtnematologischen Aspekte des Wirkungskomplexes des Zwischenfruchtanbaus und zur Klärung der Frage, ob Wintergerste dem Stoppelweizen vorzuziehen ist oder nicht.

Das Fehlen eines gesamtbetrieblichen Ansatzes hat zur Folge, dass die Resultate des Entscheidungsunterstützungssystems als nicht betriebs- und situationsspezifische Richtgrößen und Anhaltswerte anzusehen sind. Die Betrachtung einer Managementmaßnahme beschränkt sich auf eine vorgegebene Fruchtfolge und auf die Bezugsgröße ein Hektar. Dies impliziert ebenso wie ein konstanter Mischpreis für die Zuckerrüben *ceteris-paribus*-Bedingungen. Mit jeder Managementmaßnahme gehen aber Verbundeffekte einher wie eine Senkung der Anbaufläche der Zuckerrüben nach erfolgreicher Nematodenreduktion, die eine Veränderung der Erntemenge, damit des Lieferrechtserfüllungsgrades und damit des Auszahlungspreises für die Rüben zur Folge hat und gleichzeitig zu einer Ausdehnung der Anbaufläche einer alternativen Ackerfrucht führt. Aufgrund dieser Interdependenzen bedarf eine reale Entscheidungssituation der Aufgabe der *ceteris-paribus*-Annahme.

Wie ein einfaches Beispiel zeigt, ist die Vorgabe einer „Betriebsfruchtfolge“ nur im Idealfall in der Lage, die auf den Parzellen eines real existierenden Betriebs gefahrenen Fruchtfolgen zu repräsentieren. Statt eines Betriebsflächen- ist daher ein Schlagmanagement notwendig. Integriertes Nematodenmanagement muss demnach schlagspezifisch ausgerichtet und gleichzeitig gesamtbetrieblich abgestimmt sein. In diesem Fall ist in Anlehnung an BEHRINGER (1978) von einem nematodenkontrollierten Ackerbau zu sprechen.

Bei der diskutierten Erweiterungen des bestehenden Entscheidungsunterstützungssystems handelt es sich um einen gesamtbetrieblichen Planungsansatz für das Integrierte Nematodenmanagement. Da *H.schachtii* ein klassischer Fruchtfolgeschädling ist und die Managementmaßnahmen integrative Bestandteile der Anbau- und Fruchtfolgeplanung sind, weist die Fruchtfolgeplanung einen hohen Stellenwert im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements auf. Sorgfältige Fruchtfolgegestaltung und Anbauplanung gelten als erster Schritt zur Lösung der Nematodenproblematik bzw. stellen die Grundlage dar für weitere Strategien des Integrierten Nematodenmanagements. Jährliche Anbauplanung und Fruchtfolgeplanung nach dem kontrolltheoretischen Konzept der Regelung sind keine problemadäquaten Planungsansätze für das Integrierte Nematodenmanagement. In beiden Fällen bedarf es intensiver und wiederholter Beobachtungen des biologischen Realsystems Nematode, da in einem schlagspezifischen Ansatz schlagindividuell die aktuelle Befallssituation mit dem Schaderreger vor jedem Entscheidungszeitpunkt (Saat einer Haupt- oder Zwischenfrucht) zu ermitteln ist. Ein derart intensives biologisches Monitoring ist in der landwirtschaftlichen Praxis nicht umsetzbar. Dort beschränkt sich die Erhebung des Nematodenbefalls aus Kostengründen auf Jahre bzw. auf Parzellen mit gerade erfolgtem (Erdschwadbeprobung) oder geplante(m) (Bodenbeprobung) Zuckerrübenanbau.

Sind Früchte bzw. Fruchtfolgen und Maßnahmen des Nematodenmanagements auf allen Feldern eines Betriebs über die Zeit zu koordinieren, liegt ein ganzzahliges kombinatorisches Optimierungsproblem vor. Zu dessen Lösung stehen numerisch exakte Entscheidungsbaumverfahren zur Verfügung. Allerdings erweist sich die Vollenumeration aufgrund der Dimensionen des Planungsproblems, die leicht zu einer „kombinatorischen Explosion“ führen können, als inoperabel. Auch das effizientere branch-and-bound-Verfahren ist aufgrund der zu erfassenden Carry-over-Effekte der Managementmaßnahmen und den damit verbundenen Folgekosten nicht geeignet. Ähnlich deterministischer Modellergebnisse impliziert eine numerisch exakte Optimierung eine Genauigkeit der Lösung des Planungsproblems, die die zu Grunde liegenden biologischen Realsysteme nicht gerechtfertigen und die den Entscheidungsträger in falscher Sicherheit wiegt.

Für einen schlagspezifischen Modellansatz empfiehlt sich die Verwendung ein Hektar großer Einheitsparzellen eher als die Abbildung real existierender Ackerschläge unterschiedlicher Größe. In der realen Planungssituation findet vor allem bei größeren Schlägen ohnehin die Bildung von Bewirtschaftungsteilflächen statt, und ein Hektar große Einheitsparzellen stellen insbesondere für die Planung des Anbauumfangs der Zuckerrüben ein hinreichend genaues Planungsraster dar.

Im Gegensatz zu einem schlagspezifischen Ansatz können im Ansatz mit Einheitsparzellen keine dem Modellanwender vorliegenden, aus Boden- oder Schwadbeprobungen stammenden Befalldichten als Ausgangsverseuchungsdichten verwendet werden. Neben der Möglichkeit, eine parzelleneinheitliche Ausgangsverseuchung mit *H.schachtii* anzunehmen („Betriebsverseuchungsdichte“) besteht die Alternative, die Verseuchungssituation aus einer empirischen Verteilung abzuleiten.

Entscheidungsunterstützung im Rahmen des Integrierten Nematodenmanagements ist auch nach der Reform der Zuckermarktordnung mit deutlichen Preiseinschnitten notwendig, da sich der Zuckerrübenanbau auf Gunsträume wie das Rheinland konzentrieren wird und mit

Raps, neuen Nematiziden und nematodentoleranten Zuckerrüben neue Herausforderungen an das Integrierte Nematodenmanagement gestellt werden.

Das vorliegende Modellkonzept ist in der Lage, für risikoneutrale und -averse Entscheidungsträger als Entscheidungsunterstützungssystem für das Integrierte Nematodenmanagement zu dienen, indem es die ökonomischen Konsequenzen ihres Handelns aufzeigt und sie durch Alternativrechnungen in die Lage versetzt, verfügbare Managementmaßnahmen unter Berücksichtigung von Carry-over-Effekten und Folgekosten vergleichend zu bewerten.

Literaturverzeichnis

Monographien, Reihen, Zeitschriften

ACKERMANN, I. (1992): Rotacalc – ein Entscheidungsunterstützungsmodul zur Planung der standortspezifischen Fruchtfolgestellung des Weizens; in: FLECK, P. (Hrsg.): Agrarwissenschaften, Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen; zugleich: Universität Gießen, Dissertation

ALIO, M. (1993): Entscheidungsunterstützung zur Sortenwahl im Zuckerrübenanbau; in: FLECK, P. (Hrsg.): Agrarwissenschaften, Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen; zugleich: Universität Gießen, Dissertation

ARNDT, M. (2002): Einfluss von Fruchtfolge, chemischen und biologischen Bekämpfungsmaßnahmen auf die Befallsentwicklung von Rübennematoden (*Heterodera schachtii*) und den Zuckerrübenanbau; in: Gesunde Pflanzen, 54. Jahrgang, Nr. 3+4, S. 74-79

ARNDT, R. UND KRAUSE, W. (1988): Ergebnisse des Schaderregerauftretens von Wurzelbrand und *Heterodera schachtii* Schmidt, 1871, an Zuckerrüben im Fruchtfolgeversuch Klein Wanzleben; in: Fruchtfolgeforschung und Fruchtfolgegestaltung, Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik, Nr. 261, S. 161-166

ARNDT, R.; DUDA, A. UND FISCHER, W. (1992): Wie sicher ist die Nematodenbekämpfung durch Zwischenfruchtanbau im mitteldeutschen Löß-Schwarzerdegebiet?; in: Zuckerrübe, 41. Jahrgang., Nr. 1, S. 58-63

BAAKEN, H.-J. (1992): Betriebsführungsmodelle zur Unterstützung von operativen Entscheidungen in der Grünlandwirtschaft; Universität Bonn, Dissertation

BACHINGER, J. UND ZANDER, P. (2002): Modell zur Unterstützung strategischer und taktischer Fruchtfolgeplanung im ökologischen Landbau; in: MAIDL, F.X. UND DIEPENBROCK, W. (Hrsg.): Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Band 14, 45. Jahrestagung vom 26. bis 28. September 2002 in Berlin

BÄUMER, K. (1990): Gestaltung „integriert“ funktionierender Bodennutzungssysteme; in: DIERCKS, R. UND HEITFUSS, R. (Hrsg.): Integrierter Landbau – Systeme umweltbewußter Pflanzenproduktion: Grundlagen, Praxiserfahrungen, Entwicklungen, S. 60-68; BLV Verlag, München

BÄUMER, K. (1992): Allgemeiner Pflanzenbau, 3. Auflage, Ulmer-Verlag, Stuttgart

BALKE, T. (2001): Erfassung von Resistenz und Toleranz gegen den Rübennematoden (*Heterodera schachtii*) in Feldversuchen mit Zuckerrüben und Einfluss einer resistenten Sorte auf die Entwicklung des Nematoden sowie auf seine pilzlichen Eiparasiten; Universität Göttingen, Dissertation

BARKER, K.R. UND OLTHOF, T.H.A. (1976): Relationships between nematode population densities and crop responses; in: Annual review of Phytopathology, 14. Jahrgang, S. 327-353

- BARKER, K.R. UND CAMPBELL, C.L. (1981): Sampling nematode populations; in: ZUCKERMANN, B.M. UND ROHDE, R.A. (Hrsg.): Plant parasitic nematodes, Volume III, S. 451-474; Academic Press, New York
- BARKER, K.R. UND KOENNING, S. R. (1998): Developing sustainable systems for nematode management; in: Annual review of Phytopathology, 36. Jahrgang, S. 165-205
- BAUMER, M.; BEHRINGER, P.; GRAF, G.; DIERCKS, R. UND FISCHBECK, G. (1979): Untersuchungen zur Schätzung der physiologischen Schadensschwelle des Getreidezystenälchens (*Heterodera avenae* Woll.) bei Hafer und Sommerweizen; in: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 86. Jahrgang, Nr. 1, S. 25-38.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (Hrsg., 2001): Integrierter Pflanzenschutz – Nematoden im Feldgemüsebau; Merkblatt der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan
- BEEN, TH. UND SCHOMAKER, CH. (2003): Ein Decision Support System für Nematoden: NemaMod; in: Phytomedizin, Mitteilungen der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V., 33. Jahrgang, Nr. 2, S. 48-49
- BEHRINGER, P. (1978): Nematodenkontrollierter Rübenanbau – Feststellung des Ertragsausfalls sowie Entwicklung der Populationsdynamik; in: Deutsche Zuckerrübenzeitung, 14. Jahrgang, Nr. 1, S. 4-6
- BEHRINGER, P. (1990): Nematodenkontrollierter Hackfruchtbau; in: DIERCKS, R. UND HEITFUSS, R. (Hrsg.): Integrierter Landbau – Systeme umweltbewusster Pflanzenproduktion: Grundlagen, Praxiserfahrungen, Entwicklungen; S. 281-293; BLV Verlag, München
- BEHRINGER, P.; HEINICKE, D.; VON KRIES, A.; MÜLLER, J. UND SCHMIDT, J. (1984): Resistenz gegen Rüben nematoden bei Zwischenfrüchten; in: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 36. Jahrgang, Nr. 7, S. 125-126
- BEHRINGER, P. UND FÜRST, L. (1985a): Die Entwicklung des Rüben nematoden (*Heterodera schachtii*) in Abhängigkeit von Fruchtfolge Maßnahmen, Zwischenfrüchten und einem pflanzenverträglichen Nematizid; in: Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau: 30 Jahre Nematodenbekämpfung in Bayern, 20 Jahre Sachgebiet der Bayer. Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP), Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch, 62. Jahrgang, Sonderheft 3, S. 21-33
- BEHRINGER, P. UND FÜRST, L. (1985b): Biologische Bekämpfung des Rüben nematoden (*Heterodera schachtii*) mit resistenten Ölettich- und Senfsorten; in: Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau: 30 Jahre Nematodenbekämpfung in Bayern, 20 Jahre Sachgebiet der Bayer. Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP), Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch, 62. Jahrgang, Sonderheft 3, S. 35-38
- BELL, D. (1997): Eignung integrierter und biologischer Verfahren zur Bekämpfung von *Heterodera schachtii* Schmidt 1871 auf rekultivierten Böden aus Löß im Rheinland; Universität Bonn, Dissertation

- BERG, E.; HARSH, S.B. UND KUHLMANN, F. (1985): Kontrolltheoretische Konzepte als Grundlagen für die Entwicklung von Entscheidungshilfsmitteln; in: *Agrarwirtschaft*, 34. Jahrgang, Nr. 7, S. 206-212; Deutscher Fachverlag, Frankfurt
- BERG, E.; THOER, K. UND STEFFEN, G. (1988): Konzeption und Entwicklung bioökonomischer Modelle; in: *Agrarwirtschaft*, 37. Jahrgang, Nr. 1, S. 1-11; Deutscher Fachverlag, Frankfurt
- BERG, E. UND KUHLMANN, F. (1993): Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- BIEMOND, T.; GREVE, H.J.; SCHIPHOUWER, T. UND VERHAGE, A.J. (1989): PIETeR, semi green-box produktiemodel suikerbieten, Wageningen, WAU, Department of Farm Economics
- BINH, HA THI T. (1991): Untersuchungen zur biologischen Bekämpfung des Rübenzystenälchens, *Heterodera schachtii* Schmidt 1871, in Zuckerrübenfruchtfolgen durch Zwischenfrüchte und deren Einfluss auf den Rübenertrag; Universität Halle, Dissertation
- BIRD, G.W. (1981): Integrated nematode management for plant protection; in: ZUCKERMANN, B.M. UND RÖHDE, R.A. (Hrsg.): *Plant Parasitic Nematodes*, Volume III, S. 355-375; Academic Press, New York
- BIRD, G.W. (1987): Role of nematology in integrated pest management programs; in: VEECH, J.A. UND DICKSON, D.W. (Hrsg.): *Vistas on nematology: A commemoration of the 25th Anniversary of the Society of Nematologists*, Hyattsville, Md., S. 114-121; E.O. Painter Printing Co., De Leon Springs, Florida
- BISCHOFF, R. (1985): Einfluss von Fruchtfolge und organischer Düngung auf Nematodenbefall und Ertragsbildung; in: *Landwirtschaftliche Forschung*, 38. Jahrgang, Nr. 4, S. 350-358
- BLÖNNIGEN, P. (1986): Ein stochastisches Entscheidungsmodell zur chemischen Unkrautbekämpfung im Zuckerrübenanbau unter Berücksichtigung von Mehrfachzielen; Universität Bonn, Dissertation
- BLÖNNIGEN, P.; SCHMIDT, H.; DROSSERT-STELTGES, M. UND STEFFEN, G. (1990): Die Weiterentwicklung des Schadschwellenkonzeptes für die Unkrautbekämpfung in einer Fruchtfolge auf der Basis von Systemsimulationsmodellen; in: HEITFUSS, R. (Hrsg.): *DFG Forschungsbericht Integrierte Pflanzenproduktion*, S. 263-279
- BLOOM, N.E. (1997): Towards integrated nematode management: The potential for weeds common in Northern California to act as alternate hosts for *Heterodera schachtii*; University of California, Davis, Dissertation
- BOGUSLAWSKI, E. VON (1981): *Ackerbau - Grundlagen der Pflanzenproduktion*, DLG-Verlag, Frankfurt
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; MISHOE, J.W. UND BERGER, R.D. (1983): Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions; in: *Phytopathology*, 73. Jahrgang, Nr. 11, S. 1581-1596

BOSEL, H. (1994): Modellbildung und Simulation - Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme; ein Lehr- und Arbeitsbuch

BRANDES, W. UND ODENING, M. (1992): Investition, Finanzierung und Wachstum in der Landwirtschaft; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

BRUNOTTE, J.; TIGGES, U. UND LÜTKE ENTRUP, N. (1992): Die Bedeutung der Zwischenfrucht in der Zuckerrübenfruchtfolge; in: Zuckerrübe, 41. Jahrgang, Nr. 4, S. 224-229

BUCHNER, W. (1997): Biologische Nematodenbekämpfung: Was können hierbei Fruchtfolge und Bodenbearbeitung leisten?; in: LZ Rheinland Nr. 8, S. 8-9

BUICK, R.D.; STONE, N.D.; SCHECKLER, R.K. UND ROACH, J.W. (1992): CROPS: A whole-farm crop rotation planning system to implement sustainable agriculture; in: AI Applications in Natural Resources, Agriculture and Environment Science, 6. Jahrgang, Nr. 3, S. 29-50

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, BMVEL (Hrsg., 2002): Agenda 2000, Pflanzlicher Bereich und Agrarumweltmaßnahmen; Bonn

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, BMVEL (Hrsg., 2005): Meilensteine der Agrarpolitik – Umsetzung der europäischen Agrarreform in Deutschland; Berlin

BURT, O.R. UND FERRIS, H. (1996): Sequential decision rules for managing nematodes with crop rotations; in: Journal of Nematology, 28. Jahrgang, Nr. 4, S. 457-474

BUSENKELL, J. (2004): Beurteilung von Agrarumweltmaßnahmen in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz – Einzelbetriebliche Analyse der Programme im Ackerbau; Universität Bonn, Dissertation

CASWELL, E.P.; MACGUIDWIN, A.E.; MILNE, K.; NELSON, C.F.; THOMASON, I.J. UND BIRD, G.W. (1986): A simulation model of *Heterodera schachtii* infecting *Beta vulgaris*; in: Journal of Nematology, 18. Jahrgang, Nr. 4, S. 512-519

CHERWELL SCIENTIFIC (Hrsg., 1997): ModelMaker user manual, Version 3; Cherwell Scientific Publishing, Oxford

COENEN, H. (1980): Einfluss von Anbauintensität und Anbautechnik verschiedener Zwischenfruchtarten auf die Ertrags- und Qualitätsbildung bei Zuckerrüben unter Berücksichtigung unterschiedlicher Nematodenverseuchung; Universität Bonn, Dissertation

COOKE, D.A. (1984): The relationship between numbers of *Heterodera schachtii* and sugar beet yields on a mineral soil; in: Annuals of applied Biology, 104. Jahrgang, S. 121-129

COOKE, D.A. (1987): Beet cyst nematode (*Heterodera schachtii* Schmidt) and its control on sugar beet; in: RUSSEL, G.E. (Hrsg.): Agricultural Zoology Reviews, Volume 2, S. 135-184; Intercept Ltd, Newcastle-upon-Tyne

- COOKE, D.A. (1991): The effect of beet cyst nematode, *Heterodera schachtii*, on the yield of sugar beet in organic soils; in: *Annals of applied Biology*, 118. Jahrgang, S. 153-160
- COOKE, D.A. (1993): Nematode parasites of sugarbeet; in: EVANS, K.; TRUDGILL, D.L. UND WEBSTER, J.M. (Hrsg.): *Plant Parasitic Nematodes in Temperate Agriculture*, S. 133-169; CAB International, Wallingford
- COOKE, D.A. UND THOMASON, I.J. (1979): The relationship between population density of *Heterodera schachtii*, soil temperature and sugar beet yield; in: *Journal of Nematology*, 11. Jahrgang, Nr. 2, S. 124-128
- DAKIN, R.J. (1965): A tree-search algorithm for mixed integer programming problems; in: *Computer journal*, Nr. 8, S. 250-255
- DECKER, H. (1963): *Pflanzenparasitäre Nematoden und ihre Bekämpfung*; Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin
- DEITERMANN, H. (1983): *Populationsentwicklung und Bekämpfungsmöglichkeiten des Rübenzystenälchens Heterodera schachtii (Schmidt) bei ganzjähriger Bodenbeheizung*; Universität Bonn, Dissertation
- DOLESCHEL, P. (1993): *Fruchtfolgeoptimierung zur Einhaltung von Bodenabtragstoleranzen*; Universität München, Dissertation
- DOMSCHKE, W. UND DREXL, A. (2002): *Einführung in Operations-Research*, 5.Auflage; Springer Verlag, Berlin u.a.
- DOWE, A. UND DECKER, H. (1985): Unkräuter als Wirte zystenbildender Nematoden; in: *Nachrichtenblatt für den Pflanzenschutz in der DDR*, Nr. 39, S. 139-141
- DROSSERT-STELTGES, M. UND STEFFEN, G. (1994): Das Schadschwellenkonzept für die Unkrautbekämpfung. Eine Erweiterung durch Folgekostenbewertung; in: HEITEFUSS, R. (Hrsg.): *DFG Forschungsbericht Integrierte Pflanzenproduktion*, Band 2, S. 230-250; VCH, Weinheim u.a.
- DUDA, A. (1984): *Untersuchungen zum Auftreten und zur Populationsdynamik von Heterodera schachtii Schmidt 1871 sowie zur Ertragsbeeinflussung bei Zuckerrüben in Feldversuchen*; Universität Halle, Dissertation
- DUDA, A. UND FISCHER, W. (1988): Untersuchungen zum Auftreten von *Heterodera schachtii* Schmidt, 1871, in langjährigen Zuckerrübenfruchtfolgeversuchen Etzdorf und Andisleben; in: *Fruchtfolgeforschung und Fruchtfolgegestaltung*, Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik, Nr. 261, S. 157-160
- DUDA, A. UND FISCHER, W. (1990): Grundlage zur Entwicklung von rechnergestützten Modellen zur Populationsveränderung von *Heterodera schachtii* Schmidt, 1871 auf Löß-Standorten; in: *BIOLOGISCHE GESELLSCHAFT DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK (Hrsg.): 15. Vortragstagung zu aktuellen Problemen der Phytonematologie am 7.6.1990 in Rostock*, S. 36-42

- DUNCAN, L.W. UND MCSORLEY, R. (1987): Modeling nematode populations; in: VEECH, J.A. UND DICKSON, D.W. (Hrsg.): Vistas on nematology: A commemoration of the 25. Anniversary of the Society of Nematologists, Hyattsville, Md., S. 337-389; E.O. Painter Printing Co., De Leon Springs, Florida
- DUNCAN, L.W. UND NOLING, J.W. (1998): Agricultural Sustainability and Nematode Integrated Pest Management; in: Barker, K.R., PEDERSON, G.A. UND WINDHAM, G.L. (Hrsg.): Plant and Nematode Interactions; Agronomy, Nr. 36, S. 251-287; American Society of Agronomy u.a., Madison, Wisconsin
- EL-NAZAR, T.Y. (1985): Selecting optimum crop rotation; Universität Corvallis, Oregon, Dissertation
- ENGEL, K.H. UND STELTER, H. (1976): Ein Modell zur Erfassung der Populationsdynamik des Kartoffelnematoden *Heterodera rostochiensis* Woll., Rasse A; in: Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz, 12. Jahrgang, Nr. 4, S. 329-343
- ESSER, H. (1992): Die Entwicklung eines Informations- und Bewertungssystems für die Beurteilung von Fruchtfolgen bei Unsicherheit von Wetter und Markt; in: BRAUNSCHWEIG, K. (Hrsg.): Beiträge zu Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Band 13; zugleich: Universität Bonn, Dissertation
- FELDSAATEN FREUDENBERGER (Hrsg., 2005): Terranova – Der doppelresistente Ölrettich; Informationsbroschüre der Feldsaaten Freudenberg, Krefeld
- FERRIS, H. (1976): Development of a Computer-Simulation Model for a Plant-Nematode System; in: Journal of Nematology, 8. Jahrgang, Nr. 3, S. 255-263
- FERRIS, H. (1978a): Modification of a computer simulation model for a plant-nematode system; in: Journal of Nematology, 10. Jahrgang, Nr. 2, S. 198-201
- FERRIS, H. (1978b): Nematode economic thresholds: derivation, requirements and theoretical considerations; in: Journal of Nematology, 10. Jahrgang, Nr. 4, S. 341-350
- FERRIS, H. (1980): Nematology-Status and prospects: Practical implementation of quantitative approaches to nematology; in: Journal of Nematology, 12. Jahrgang, Nr.3, S. 164-170
- FERRIS, H. (1981): Mathematical approaches to the assessment of crop damage; in: ZUCKERMAN, B.M. UND ROHDE, R.A. (Hrsg.): Plant parasitic nematodes, Volume III, S. 405-420; Academic Press, New York
- FERRIS, H. (1984): Nematode damage functions: the problems of experimental and sampling error; in: Journal of Nematology, 16. Jahrgang, Nr. 1, S. 1-9
- FERRIS, H. (1985): Density-dependent Nematode Seasonal Multiplication Rates and Overwinter Survivorship: A Critical Point Model; in: Journal of Nematology, 17. Jahrgang, Nr. 2, S. 93-100.

- FERRIS, H. (1986): Nematode population dynamics and management; in: LEONARD, K.J. UND FRY, W.E. (Hrsg.): Plant disease epidemiology, Volume 1: Population dynamics and management, S. 180-204
- FERRIS, H. (1992): Nemaplex: A menu-driven tutorial in plant Nematology; in: Journal of Nematology, 24. Jahrgang, Nr. 4, S. 589
- FERRIS, H. UND NOLING, J.W. (1987): Analysis and prediction as a basis for management decisions; in: BROWN, R.H. UND KERRY, B.R. (Hrsg.): Principles and Practise of Nematode Control in Crops, S. 49-85; Academic Press, Sydney u.a.
- FICHTNER, E. (1985): Untersuchungen zur Ableitung einer Temperatursummen-Methode für die Überwachung von *Heterodera schachtii* Schmidt, 1871 in Zuckerrübenfruchtfolgen; in: Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz, 21. Jahrgang, Nr. 1, S. 31-40
- FICHTNER, E. (1986): Einfluss von Textur, Gehalt an organischer Substanz, Dichte und Luftgehalt des Bodens auf die Vermehrung von *Heterodera schachtii* Schmidt 1871 an Zuckerrüben; in: Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz, 22. Jahrgang, Nr. 4, S. 343-350
- FICHTNER, E.; GRABERT, D. UND FISCHER, W. (1979): Untersuchungen zur Schadwirkung von *Heterodera schachtii* Schmidt; in: Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz, 15. Jahrgang, Nr. 4, S. 264-273
- FICHTNER, E.; GRABERT, D. UND AUTORENKOLLEKTIV (1982): Schadwirkung, Populationsdynamik, Überwachung und Bekämpfung der Rüben nematoden; in: Fortschrittsberichte für die Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft, Band 20, Nr. 15, S. 1-45
- FICHTNER, E.; KÖPPEN, D. UND KÖRSCHENS, M. (1984): Beziehungen zwischen Zuckerrübenanteil in der Fruchtfolge, Ertrag und Populationsdynamik von *H. schachtii* Schm. auf dem Löß-Schwarzerde-Standort Bad Lauchstädt; in: Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 28. Jahrgang, Nr. 10, S. 617-623
- FISCHER, W. (1990a): Betrachtungen zur Anwendung von Modellen zur Quantifizierung der Beziehung Verseuchungsdichte des Bodens mit *Heterodera schachtii* Schmidt, 1871 und Zuckerrübenenertrag; in: BIOLOGISCHE GESELLSCHAFT DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK (Hrsg.): 15. Vortragstagung zu aktuellen Problemen der Phytonematologie am 7.6.1990 in Rostock, S. 26-35
- FISCHER, W. (1990b): Ackerbau contra Rüben nematoden in der DDR – Erfahrungen, Ergebnisse und Ausblicke; in: BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM (Hrsg.): 47. Deutsche Pflanzenschutztagung; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 266, S. 444; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg
- GARDNER, J. UND CASWELL-CHEN, E.P. (1993): Penetration, development and reproduction of *Heterodera schachtii* on *Fagopyrum esculentum*, *Phacelia tanacetifolia*, *Raphanus sativus*, *Sinapis alba* and *Brassica loeracea*; in: Journal of Nematology, 25. Jahrgang, Nr. 4, S. 695-702

- GARDNER, J. UND CASWELL-CHEN, E.P. (1997): Influence of cyst maturation on apparent population increases of *Heterodera schachtii* on root remnants; in: *Fundamental and applied nematology*, 20. Jahrgang, Nr. 3, S. 269-276
- GEIßL, W. (1987): Untersuchungen über Wirt-Parasit-Beziehungen zwischen Ackerunkräutern und *Heterodera schachtii* Schmidt sowie den Einfluß der Unkrautflora auf die Populationsdynamik des Rübennematoden in Zuckerrüben-Fruchtfolgen; Technische Universität München, Dissertation
- GIERTH, K (2005): Pflanzenmorphologische und -physiologische Untersuchungen zur Toleranz in der Wirt-Parasit-Interaktion *Beta vulgaris* - *Heterodera schachtii*; Universität Bonn, Dissertation
- GILLIGAN, C.A. (1990): Mathematical models of infection; in: LYNCH, J.M. (Hrsg.): *The Rhizosphere*, S. 207-238; Wiley-Verlag, Chichester u.a.
- GRIFFIN, G.D. (1981): The relationship of plant age, soil temperature and population density of *Heterodera schachtii* on the growth of sugarbeet; in: *Journal of Nematology*, 13. Jahrgang, Nr. 2, S. 184-190
- GRIFFIN, G.D. (1988): Factors affecting the Biology and Pathogenicity of *Heterodera schachtii* on Sugarbeet; in: *Journal of Nematology*, 20. Jahrgang, Nr. 3, S. 396-404
- GUTBERLET, V.; MÜLLER, J.; ROSE, T.; VORLOP, K.-D.; THIELKING, H. UND SIKORA, R.A. (2000): Versuche zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die biologische Bekämpfung pflanzenparasitärer Nematoden; in: *BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM* (Hrsg.): 52. Deutsche Pflanzenschutztagung; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 376, S. 301; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg
- HAASE, K. (2003): 100 Jahre Rheinischer Rübenbauer-Verband e.V., Bonn
- HAFEZ, S. L. UND SUNDARARAJ, P. (1998): Differential reaction and antagonistic potential of trap crop cultivars in the management strategy of sugar beet cyst nematode; in: *International journal of Nematology*, 8. Jahrgang, Nr. 2, S. 145-148
- HAFEZ, S. L. UND SUNDARARAJ, P. (1999): Exploitation of nematicidal efficacy of trap crops for the management of *Heterodera schachtii* under sugarbeet ecosystem; in: *International journal of nematology*, 9. Jahrgang, Nr. 1, S. 27-33
- HALLMANN, J. (2003): Biologische Bekämpfung pflanzenparasitärer Nematoden mit antagonistischen Bakterien; in: *BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM* (Hrsg.): Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 392; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg
- HAMBÜCHEN, W.A. (1990): Effekte anbautechnischer Maßnahmen auf Leistungsparameter einer dreifeldrigen Fruchtfolge mit Zuckerrüben und Winterweizen; Universität Bonn, Dissertation

- HANK, K. (1994): Einzelflächenoptimiertes Simulationsmodell zur Analyse der Auswirkungen ausgewählter Extensivierungsmaßnahmen; Technische Universität München, Dissertation
- HARTUNG, J.; ELPELT, B. UND KLÖSENER, K.-H. (1998): Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik; 11. Auflage, Oldenbourg Verlag, München
- HEIJBROEK, W. (1977): Mogelijkheden om de schade door het bietezytenaaltje te voorkomen; in: *Bedrijfsontwikkeling*, Nr. 8, S. 451-456
- HEIJBROEK, W. (1996): The influence of soil type, tillage and cultural measures on the effect of root knot and cyst nematodes on sugar-beet root growth; in: *Proceedings of the 59th IIRB Congress*, S. 239-252
- HEIJBROEK, W. UND WITHAGEN, L.M. (1997): Forecasting beet cyst nematode damage and effects of control measures using computer models; in: *Proceedings of the 60th IIRB Congress*, S. 215-228
- HEIJBROEK, W.; MUNNING, R.G. UND VAN SWAIJ, A.C.P.M. (2002): The effect of different infection levels of beet cyst nematodes (*Heterodera schachtii* Schm.) and beet necrotic yellow vein virus (BNYVV) on single and double resistant sugar beet cultivars; in: *Proceedings of the 65th IIRB Congress*, S. 225-238
- HEINEN-DEBRUS, A. (1985): Einfluss der Anbautechnik von Kruziferen-Zwischenfrüchten auf die Population des Rübenzystenälchens *Heterodera schachtii* sowie Ertrag und Qualität der Zuckerrübe; Universität Bonn, Dissertation
- HEINICKE, D. (1999): Bei starkem Befall Ölrettich anbauen; in: *Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung*, Nr. 28 vom 15.7.1999, S. 10-12
- HEINICKE, D. UND WARNECKE, H. (2000): Der Rüben nematode – *Heterodera schachtii*; in: *Zuckerrübe*, 49. Jahrgang, Nr. 4, S. 231-235
- HEINICKE, D. UND WARNECKE, H. (2001a): Brachebegrünung zum Resistenzmanagement; in: *Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung*, Nr. 16, vom 20.4.2001, S. 19-24
- HEINICKE, D. UND WARNECKE, H. (2001b): Einsatz nematodenresistenter Zuckerrübensorten; in: *Zuckerrübe*, 50. Jahrgang, Nr. 2, S. 92-93
- HEINICKE, D. UND WARNECKE, H. (2001c): Trotz resistenter Zuckerrüben Ölrettich und Senf nicht vernachlässigen; in: *Zuckerrübe*, 50. Jahrgang, Nr. 4, S. 246-249
- HEINRICHS, CHR. (2000): Problemlösung bei der Bekämpfung des Rüben nematoden *Heterodera schachtii* – Rheinische Erfahrungen mit nematodenresistenten Zuckerrüben; in: *Gesunde Pflanzen*, 52. Jahrgang, Nr. 2/3, S. 67-70
- HEINRICHS, CHR. (2002): Auf Schädlinge achten; in: *Pflanzenschutzplaner 2003*, Beilage der LZ Rheinland vom 16.12.2002, S. 36-40
- HEINRICHS, CHR. (2003a): Nematodenbekämpfung in Zuckerrüben ein „Alter Hut“?; in: *Zuckerrüben-Journal*, Nr. 2, S. 8-10

- HEINRICHS, CHR. (2003b): Beizen spart Spritzen; in: Pflanzenschutzplaner 2004, Beilage zur LZ Rheinland vom 18.12.2003, S. 37-40
- HENRICHSMEYER, W. UND WITZKE, H.P. (1991): Agrarpolitik, Band 1: Agrarökonomische Grundlagen; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- HESSELBACH, J. UND EISGRUBER, L.M. (1967): Betriebliche Entscheidungen mittels Simulation; Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- HEYLAND, K.-U. (1988): Systemwirkungen von Fruchtfolgen und Monokulturen auf dem Versuchsgut Dikopshof; in: Fruchtfolgeforschung und Fruchtfolgegestaltung, Tagungsbericht, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Nr. 261, S. 47-56
- HEYLAND, K.-U. UND HAMBÜCHEN, A. (1991): Die langfristige Abundanzdynamik von *Heterodera schachtii* (Schmidt) unter dem Einfluss produktionstechnischer Maßnahmen; in: Bodenkultur, 42. Jahrgang, Nr. 2, S. 157-175
- HOFFMANN, C. UND MÄRLÄNDER, B. (2001): Perspektiven des Ertragspotentials von Zuckerrüben – Einfluss von Witterung und Standort; in: SÜDZUCKER AG (Hrsg.): Fortschritte im Zuckerrübenanbau – Erfahrungen, Erkenntnisse, Visionen, S. 22-29
- HOFFMANN-HERGARTEN, S. (1994): Untersuchungen zum Einsatz von *Pseudomonas fluorescens* (Migula) gegen den Zystenematoden *Heterodera schachtii* Schmidt an Zuckerrüben unter Berücksichtigung von Einflußfaktoren bei der Saatgutapplikation; Universität Bonn, Dissertation
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W. UND BOOTE, K.J. (1991): Predicting growth and development of grain legumes with a generic model; in: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (Hrsg.): ASAE Paper, Nr. 91; St. Joseph, Michigan
- INFORMATION.MEDIEN.AGRAR E.V., i.m.a (Hrsg., 2005): Landwirtschaft in Deutschland
- INPRISE (Hrsg., 1998): Borland Delphi 4 für Windows 95 & Windows NT – Object Pascal Sprachreferenz; Inprise GmbH, Langen
- INSTITUT INTERNATIONAL DE RECHERCHE BETTERAVIÈRE, IIRB (Hrsg., 2003): Advances in Sugar Beet Research, Nr. 5: Sugar Beet Growth and Growth Modelling; Brüssel.
- ISERMAYER, H. (1987): Rübenanbau: Offene Fragen zur Quotensicherung; in: top agrar, Nr. 3, S. 50-51; Landbuchverlag, Münster
- JAMES, W.C. (1974): Assessment of plant diseases and losses; in: Annual review of Phytopathology, 12. Jahrgang, S. 27-48
- JONES, F.G.W. UND KEMPTON, R.A. (1978): Population dynamics, population models and integrated control; in: SOUTHEY, J.F. (Hrsg.): Plant Nematology, HM Stationary Office, London; S. 333-361
- JONES, F.G.W. UND PERRY, J.N. (1978): Modelling populations of cyst-nematodes (Nematoda: Heteroderidae); in: Journal of applied Ecology, Nr. 15, S. 349-371

- KÄMPF, R (1987): Fruchtfolge aktuell, 6.Auflage; Verlagsunion Agrar, Frankfurt am Main
- KÄMPF, R. UND PETZOLDT, K. (1980): Erfolgreicher Zuckerrübenbau, Verlagsunion Agrar
- KENTER, C. UND HOFFMANN, C. (2002): Ertragsbildung: Wie viel Blatt braucht die Rübe?; in: Zuckerrübe, 51. Jahrgang., Nr. 4, S. 206-209.
- KESSEL, R. UND KYNAST, N. (2003): Zwischenfruchtanbau – Baustein der Fruchtfolge; in: Zuckerrübe, 52. Jahrgang., Nr. 4, S. 184-185
- KESSEL, C.W. VON. (1987): Ungebrochene Wettbewerbskraft der Zuckerrübe innerhalb der Höchstquote – aber keine Fläche für C-Rüben; in: Zuckerrübe, 36. Jahrgang, Nr. 1, S. 10-18
- KLING, A. (1984): Ökonomische Beurteilung der Ertragsschwankungen ausgewählter Feldfrüchte; in: Berichte über Landwirtschaft, Band 62, S. 86-116; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg
- KNUTH, P. (2005): Rübenkopfälchen - Vergrößern Senf und Ölrettich die Probleme?; in: top agrar, Nr. 2, S. 48-51; Landbuchverlag, Münster
- KOCHS, H.J. (2000a): Nematodenmanagement in Zuckerrübenfruchtfolgen – Erfahrungen aus dem Rheinland; in: Zuckerindustrie, 125. Jahrgang, Nr. 9, S. 698-701
- KOCHS, H.J. (2000b): Mit neuem Konzept gegen Rüben-Nematoden; in: top agrar, Nr. 12, S. 40-43; Landbuchverlag, Münster
- KÖCKLER, D. (1997): Richtige Strategien gegen Nematoden; in: top agrar, Nr. 8, S. 58-61; Landbuchverlag, Münster
- KÖNIG-GOHLA, H. (2004): Boden auf dem Acker halten; in: Ratgeber Förderung 2004, Beilage zur LZ Rheinland vom 19.2.2004, S. 50-52
- KOLLIG, M. (1993): Entscheidungshilfen für den Zuckerrübenanbau - Entscheidungsunterstützungsmodule für den Zuckerrübenanbau mittels neuronaler Netze und regelbasierter Systeme; Agrarwirtschaft, Sonderheft 138; Agrimedia, Pinneberg-Waldenau; zugleich: Universität Gießen, Dissertation
- KRAUS, R. (1981): Wirkungen der Herbizide Avadex und Pyramin auf Schlupf, Entwicklung und Befallsverlauf des Rübenzystenälchens *Heterodera schachtii*; Universität Bonn, Dissertation
- KREMER-SCHILLINGS, W. (1981): Untersuchungen zur Wirkung von Zwischenfrüchten auf Ertrag und Qualität einer Fruchtfolge; Universität Bonn, Dissertation
- KRIEGER, J. (1989): Ergebnisse zur Aufklärung des Komplexes biologische Aktivität des Bodens, Fruchtfolgewardung und Ertragsbildung der Zuckerrübe in Dauerfeldversuchen; Universität Halle, Dissertation
- KUHLMANN, F. (1990): Ökonomische Ziele und Grenzen des konventionellen und des integrierten Landbaus; in: DIERCKS, R. UND HEITEFUSS, R. (Hrsg.): Integrierter Landbau – Systeme

umweltbewusster Pflanzenproduktion: Grundlagen, Praxiserfahrungen, Entwicklungen, S. 32-50; BLV Verlag, München

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT, KTBL (Hrsg., 2002): Betriebsplanung Landwirtschaft 2002/2003, 18. Auflage; Landwirtschaftsverlag, Münster

KURBEL, K.(1992): Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen: Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme; Springer Verlag, Berlin u.a.; 2. Auflage

LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg., verschiedene Jahrgänge): Arbeitskreis für Betriebsführung Köln-Aachener Bucht (AK I) - Auswertungen der Schlagkartei für Getreide - zusammenfassende Ergebnisse und Kommentare

LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg., verschiedene Jahrgänge): Arbeitskreis für Betriebsführung Köln-Aachener Bucht (AK I) - Auswertungen der Schlagkartei für Zuckerrüben - zusammenfassende Ergebnisse und Kommentare

LAUENSTEIN, G. (1991): Zur Entwicklung eines Systems der integrierten Bekämpfung der zystenbildenden Kartoffelnematoden *Globodera rostochiensis* (Wollenweber, 1923) und *G. pallida* (Stone, 1973) am Beispiel des Anbaugesbietes für Stärkekartoffeln in Weser-Ems; Universität Gießen, Habilitationsschrift

LEHRKE, U. (2000): Frühe Ernte schafft optimale Voraussetzungen für den Zwischenfruchtanbau; in: Zuckerrübe, 49. Jahrgang, Nr. 4, S. 204-207

LEHRKE, U. (2003): Rüben: Mit Zwischenfrüchten den Zuckerertrag ausreizen; in: top agrar, Nr. 6, S. 46-48; Landbuchverlag, Münster

LESLIE, P.H. (1945): On the use of matrices in certain population mathematics; in: Biometrika, Nr. 33, S. 183-212

LESLIE, P.H. (1948): Some further notes on the use of matrices in population mathematics; in: Biometrika, Nr. 35, S. 213-245

LISTE, H.-J. UND FISCHER, W. (1988): Untersuchungen zur Gestaltung von Zuckerrübenfruchtfolgen auf der Grundlage der Dauerversuche Etdorf und Andisleben; in: Fruchtfolgeforschung und Fruchtfolgegestaltung, Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik, Nr. 261, S. 135-140

LÜTH, P. (2004): Versuche zur Wirkung des biologischen Nematizides BioAct WG; in: Phytomedizin, Mitteilungen der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V., 34. Jahrgang, Nr. 4, S. 38

MÄRLÄNDER, B. (1991): Zuckerrüben - Produktionssteigerung bei Zuckerrüben als Ergebnis der Optimierung von Anbauverfahren und Sortenwahl sowie durch Züchtungsfortschritt; Versuch einer Analyse anhand langjähriger Feldversuche in Nordwestdeutschland; Ute Bernhard-Pätzold Verlag (Stadthagen); zugleich: Universität Göttingen, Habilitationsschrift

MAY, R.M. (1980): Modelle für zwei interagierende Populationen; in: MAY, R.M. (Hrsg.): Theoretische Ökologie, S. 47-65; Verlag Chemie, Weinheim

- MCSORLEY, R. (1992): Applied population modeling: fact or fiction?; in: GOMMERS, F.J. UND MAAS, P.W.TH. (Hrsg.): Nematology from molecule to ecosystem: proceedings Second International Nematology Congress, 11-21 August 1990, Veldhoven, The Netherlands, S. 170-181; Dekker und Huisman, Wildervank
- MCSORLEY, R. (1998): Population Dynamics; in: BARKER, K.R., PEDERSON, G.A. UND WINDHAM, G.L. (Hrsg.): Plant and Nematode Interactions, Agronomy, Nr. 36, S. 109-133; American Society of Agronomy u.a., Madison, Wisconsin
- MCSORLEY, R. UND FERRIS, J.M. (1979): Phex: A simulator of lesion nematodes in corn roots; in: Purdue University Agricultural Experiment Station, Research Bulletin 959
- MCSORLEY, R.; FERRIS, J.M.; FERRIS, V.R. (1982): Model synthesis and validation: primary consumers; in: FRECKMAN, D.W. (Hrsg.): Nematodes in soil ecosystems, S. 141-159; University of Texas Press, Austin
- MCSORLEY, R. UND PHILLIPS, M.S. (1993): Modelling Population Dynamics and Yield Losses and their Use in Nematode Management; in: EVANS, K.; TRUDGILL, D.L. UND WEBSTER, J.M. (Hrsg.): Plant Parasitic Nematodes in temperate Agriculture, S. 61-85; CAB International, Wallingford
- MCSORLEY, R. UND DUNCAN, L.W. (1995): Economic thresholds and nematode management; in: ANDREWS, J.H. UND TOMMERUP, I. (Hrsg.): Advances in plant nematology, Nr. 11, S. 147-171; Academic Press, New York
- MERKES, R. (2003): Produktionstechnik 2002 – Umweltschonung und Leistungssteigerung; in: Zuckerrübe, 52. Jahrgang, Nr. 6, S. 274-281
- MEUWISSEN, M.P.M. (2000): Insurance as a risk management tool for European agriculture; Universität Wageningen, Dissertation
- MEYER, W. (1994): Flächenstilllegung in Zuckerrübenfruchtfolgen; in: Zuckerrübe, 43. Jahrgang., Nr. 3, S. 180-182
- MEYER-AURICH, A.; SCHULER, J.; ZANDER, P. UND BACHINGER, J. (2004): Integration von Umweltzielen in die Betriebsoptimierung – Vergleich der Möglichkeiten und Grenzen ökologisch und konventionell wirtschaftender Betriebe am Beispiel des Versuchsbetriebes Klostergut Scheyern; in: DABBERT, S. ; GROBKOPF, W.; HEIDHUES, F. UND ZEDDIES, J. (Hrsg.): Perspektiven in der Landnutzung – Regionen, Landschaften, Betriebe – Entscheidungsträger und Instrumente; Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Band 39, S. 343-359
- MILFORD, G.F.J.; POCOCK, T.O. UND RILEY, J. (1985): An analysis of leaf growth in sugar beet; in: Annuals of applied biology, Nr. 106, S. 163-172
- MILNER, A.; AMIR, I. UND GILL, A. (1988): CROPLOT – gezielte Schlag- und Fruchtfolgeentscheidung; in: DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Wissensbasierte Systeme in der Landwirtschaft - Auf dem Weg zum Anwender; 2. Internationaler DLG-Computerkongress, Frankfurt am Main, S. 301-310

- MIRSCHER, W.; FÖRKE, H. UND FRANKO, U. (2002): Modulares dynamisches Wachstumsmodell für Zuckerrüben als integrativer Bestandteil von komplexen agrarökologischen Simulationsmodellen; in: GNAUCK, A. (Hrsg.): Systemtheorie und Modellierung von Ökosystemen, Umweltwissenschaften, Schriftenreihe der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechniken der BTU Cottbus, S. 136-156; Physica-Verlag, Heidelberg
- MOUHANNA, M.A.; RÖSSNER, J.; BASEDOW, TH. UND SCHLÖSSER, E. (2001): Interactions between the infestation of sugar beets by different Rizomania-viruses, and beet cyst nematodes (*Heterodera schachtii* Schmidt), shown with different cultivars; in: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 108. Jahrgang, Nr. 4, S. 392-398
- MÜLLER (1979): Über die jährliche Generationszahl von *Heterodera schachtii* unter Feldbedingungen an Zuckerrüben; in: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 31. Jahrgang, Nr. 6, S. 92-95
- MÜLLER, J. (1983a): Zur Problematik der quantitativen Erfassung von *H.schachtii* mit Hilfe von Bodenuntersuchungen. I. Ermittlung des Nematodenbesatzes in Mischproben; in: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 35. Jahrgang, Nr. 9, S. 132-136
- MÜLLER, J. (1983b): Zur Problematik der quantitativen Erfassung von *H.schachtii* mit Hilfe von Bodenuntersuchungen. II. Ermittlung des Nematodenbesatzes in Feldproben; in: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 35. Jahrgang, Nr. 10, S. 150-155
- MÜLLER, J. (1985): Versuche zur Bekämpfung von *Heterodera schachtii* mit resistentem Ölrettich (*Raphanus sativus* L.) als Zwischensaat in Zuckerrüben; in: Beiträge zur Nematodenforschung – Institut für Nematologie 25 Jahre in Münster-Gievenbeck; in: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 226, S. 94-103; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg
- MÜLLER, J. (1986): Integrated Control of the sugar beet cyst nematode; in: LAMBERTI, F. UND TAYLOR, C.E. (Hrsg.): Cyst Nematodes, S. 235-249; Academic Press, New York
- MÜLLER, J. (1989a): Der Einfluss von Larvenschlupf und Weibchenentwicklung bei *H.schachtii* auf die Resistenzbewertung kreuzblütiger Zwischenfrüchte; in: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 41. Jahrgang, Nr. 4, S. 56-59
- MÜLLER, J. (1989b): Zur Definition von Resistenz und anderer Fachbegriffe in der Nematologie; in: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 41. Jahrgang, Nr. 8/9, S. 137-139
- MÜLLER, J. (1990): Anforderungen an die Bodenuntersuchung auf den Rübenzystennematoden (*Heterodera schachtii*) im Hinblick auf die Schadensschwelle bei Zuckerrüben; in: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 97. Jahrgang, Nr. 3, S. 563-569
- MÜLLER, J. (1992): Detection of pathotypes by assessing the virulence of *Heterodera schachtii* populations; in: Nematologica, Nr. 38, S. 50-64
- MÜLLER, J. (1996): Untersuchungen zur Resistenz von *Heterodera schachtii* gegen Aldicarb; in: Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde: 50 Jahre Forschung am Standort Münster;

in: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 317, S. 152-159; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg

MÜLLER, J. (1999a): Bewertung der Resistenz gegen *Heterodera schachtii* bei Zuckerrüben; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 1998 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 224-225

MÜLLER, J. (1999b): The economic importance of *Heterodera schachtii* in Europe; in: *Helminthologia*, 36. Jahrgang, Nr. 3, S. 205-213

MÜLLER, J. (2000): Unterschiede in der Resistenz gegen *Heterodera schachtii* zwischen Zuckerrüben und Kruziferen; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 1999 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 227

MÜLLER, J. (2001): Ursachen für den teilweisen Verlust der Resistenz gegen *Heterodera schachtii* in Zuckerrübensorten; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 2000 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 226-227

MÜLLER, J. (2002): Toleranz von Zuckerrüben gegenüber *Heterodera schachtii*; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 2001 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 106-107

MÜLLER-MERBACH, H. (1969): Operations research - Methoden und Modelle der Optimalplanung; Vahlen Verlag, Berlin u.a.

MÜLLER, J. UND STEUDEL, W. (1983): Der Einfluss der Kulturdauer verschiedener Zwischenfrüchte auf die Abundanzdynamik von *Heterodera schachtii* Schmidt; in: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 35. Jahrgang, Nr. 7, S. 103-108

MÜLLER, J. UND RUMPENHORST, H.J. (2000): Rübenzystennematoden; in: Die Prüfung von Pflanzen auf ihre Widerstandsfähigkeit gegen Schadorganismen in der Biologischen Bundesanstalt, Teil 1: Prüfung von Kulturpflanzen auf Resistenz gegen pflanzenparasitäre Nematoden; in: Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 372; Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin

NOE, J.P. (1998): Crop- and Nematode-Management Systems; in: BARKER, K.R., PEDERSON, G.A. UND WINDHAM, G.L. (Hrsg.): Plant and Nematode Interactions; *Agronomy*, Nr. 36, S. 159-171; American Society of Agronomy u.a., Madison, Wisconsin

NOLING, J.W. (1987): Partitioning crop losses; in: VEECH, J.A. UND DICKSON, D.W. (Hrsg.): *Vistas on nematology: A commemoration of the 25th Anniversary of the Society of Nematologists*, Hyattsville, Md., S. 64-74; E.O. Painter Printing Co., De Leon Springs, Florida

NOLING, J.W. UND FERRIS, H. (1987): Nematode-degree days, a density-time model for relating epidemiology and crop losses in perennials; in: *Journal of Nematology*, 19. Jahrgang, Nr. 1, S. 108-118

NUSBAUM, C.J. UND FERRIS, H. (1973): The role of cropping systems in nematode population management; in: *Annual review of Phytopathology*, 11. Jahrgang, S. 423-440

- OBENAUF, U.; WEIRAUCH, M.; EISERMANN, R. UND RICHTER, R. (1989): Fruchtfolgegestaltung und jährliche Anbauplanung im Pflanzenproduktionsbetrieb mit Hilfe eines Computerprogramms im Rahmen des ISBO; in: Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik, Nr. 275, S. 223-232
- OOSTENBRINK, M. (1966): Major characteristics of the relation between nematodes and plants; in: Meded.Landbouwhogeschool Wageningen, 66. Jahrgang, Nr. 4
- PAGE, B. (1991): Diskrete Simulation - Eine Einführung mit Modula-2; Springer-Verlag, Berlin
- POHLMANN, J.M. (1993): Wissensbasierte Problemlösung – Problemlösungsstrategien in wissensbasierten Systemen zur Abbildung pflanzenbaulicher Produktionsvorgänge; in: Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Nr. 425; Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup; zugleich: Universität Bonn, Habilitationsschrift
- POTHS, S. (1992): Modellansatz zur Entwicklung und Simulation von Fruchtfolgen im integrierten Pflanzenbau; Kyrill und Method Verlag, München; zugleich: Universität Stuttgart-Hohenheim, Dissertation
- POYOU-LASCASSIS, P.; MANOU, C. UND PECCOUD, D. (1990): SARA – ein System zur Unterstützung von Fruchtfolgeentscheidungen; in: KUHLMANN, F. (Hrsg.): Integrierte und entscheidungsorientierte Datenverarbeitung in der Landwirtschaft – Erfolgreiche Anwendungen in der Praxis; 3. Internationaler Computerkongress; Frankfurt am Main, S. 76-89
- RABBINGE, R. UND BASTIAANS, L. (1989): Combination models, crop growth and pests and diseases; in: RABBINGE, R.; WARD, S. A. UND VAN LAAR, H.H. (Hrsg.): Simulation and system management in crop protection; Simulation Monographs, Nr. 32, Pudoc, Wageningen
- RASMUSSEN, S. (1990): Yield and price variability for various enterprises in Danish agriculture – An empirical analysis; Kopenhagen
- RICHTER, O. (1985): Simulation des Verhaltens ökologischer Systeme – Mathematische Methoden und Modelle; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- ROBERTS, P.A., THOMASON, I.J. UND MCKINNEY, H.E. (1981): Influence of Nonhosts, crucifers and fungal parasites on field populations of *Heterodera schachtii*; in: Journal of Nematology, 13. Jahrgang, Nr. 2, S. 164-171
- RÖMPLER, M. UND SIKORA, R.A. (1988): Die Bedeutung der Wirt-Parasit-Interaktion für die Populationsdynamik von *Heterodera schachtii*; in: BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM (Hrsg.): 46. Deutsche Pflanzenschutztagung; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 245, S. 440-441
- RÖVER, A. (1995): Ertragsbildung von Zuckerrüben in Abhängigkeit von Blattfläche und intraspezifischer Konkurrenz; INSTITUT FÜR ZUCKERRÜBENFORSCHUNG (Hrsg.): Aus dem In-

stitut für Zuckerrübenforschung, Göttingen, Nr. 2; Cuvillier-Verlag, Göttingen; zugleich: Universität Göttingen, Dissertation

ROUSE, D.I. (1988): Use of crop growth-models to predict the effects of disease; in: Annual review of Phytopathology, 26. Jahrgang, S. 183-201

SAATEN-UNION (1991): Biologische Nematodenbekämpfung, Schrift der Saaten-Union GmbH, Hannover

SCHACHT, H. (1859): Über einige Feinde der Rübenfelder; in: Zeitschrift des Vereins für die Rübenzuckerindustrie im Zollverein, Nr. 9, S. 175-179

SCHLANG, J. (1985): Resistenzverhalten verschiedener Ölrettichsorten gegenüber *Heterodera schachtii*; in: Gesunde Pflanzen, 37. Jahrgang, Nr. 5, S. 233-235

SCHLANG, J. (1994): Biologische Nematodenbekämpfung auf stillgelegten Flächen; in: LZ Rheinland, Nr. 6, S. 13-14

SCHLANG, J. (1995): Nematoden: Resistent gegen Ölrettich?; in: DLG-Mitteilungen Nr. 3, S. 48-49

SCHLANG, J. (1996): Flächenstilllegung mit resistenten Ölrettichsorten als neue Strategie zur biologischen Bekämpfung von *Heterodera schachtii*; in: BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM (Hrsg.): 50. Deutsche Pflanzenschutztagung; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 321, S. 374; Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin

SCHLANG, J. (1997): Neue Strategien zur biologischen Bekämpfung von *H. schachtii*; in: Proceedings of the 60th IIRB Congress, S. 229-242

SCHLANG, J. (1998a): Beziehung zwischen P_i -Wert und Vermehrungsrate von *Heterodera schachtii* an verschiedenen Ölrettichsorten in Abhängigkeit von der Anfälligkeitsstufe nach der Beschreibenden Sortenliste; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 1997 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 157-158

SCHLANG, J. (1998b): Nematodenprobleme: „Resistente Zuckerrüben als Chance?“; in: Zuckerrübe, 47. Jahrgang, Nr. 6, S. 310-313

SCHLANG, J. (1999a): Befall-Verlust-Relation beim Auftreten des Rübenzystennematoden im Zuckerrübenbau; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 1998 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 224

SCHLANG, J. (1999b): Hinweise zur Bekämpfung des Rübenzystennematoden; Veröffentlichung des Instituts für Nematologie und Wirbeltierkunde der BBA

SCHLANG, J. (2000a): Ein neues Probenentnahmeverfahren zur Ermittlung der Besatzdichte von *Heterodera schachtii*; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 1999 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 229

- SCHLANG, J. (2000b): Untersuchungen zur Toleranz im System Zuckerrübe *Heterodera schachtii*; in: BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM (Hrsg.): 52. Deutsche Pflanzenschutztagung; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 376, S. 299-300
- SCHLANG, J. (2002): Integrierte Bekämpfung des Rübenzystennematoden; in: Zuckerrübe, 51. Jahrgang, Nr. 4, S. 203-205
- SCHLANG, J. (2003): Die Rübenkopffäule der Zuckerrübe verursacht durch das Rübenkopffälchen *Ditylenchus dipsaci*; in: Phytomedizin, Mitteilungen der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V., 33. Jahrgang, Nr. 2, S. 56
- SCHLANG, J. (2004): Die Rübenkopffäule der Zuckerrübe, verursacht durch *Ditylenchus dipsaci*; in: KLINGAUF, F. (Hrsg.): Jahresbericht 2003 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, S. 109-110
- SCHLANG, J. (2005): Was leisten neue Rübensorten gegen Nematoden?; in: top agrar, Nr. 2, S. 52-53; Landbuchverlag, Münster
- SCHLATHÖLTER, M. (2001): Nematodenbekämpfung: Zwischenfrüchte gezielt einsetzen; in: praxisnah, Nr. 3; Schriftenreihe der Saaten-Union, Hannover; S. 14
- SCHLATHÖLTER, M. (2003): Nematodenbekämpfung auf höchstem Niveau; in: praxisnah, Nr. 2; Schriftenreihe der Saaten-Union, Hannover, S. 18
- SCHLEEF, K.H. (1999): Auswirkungen von Stickstoffminderungspolitiken – modellgestützte Abschätzung der betrieblichen Auswirkungen von Politiken zur Verringerung von Stickstoffüberschüssen in der Landwirtschaft; in: Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Nr. 482; Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup; zugleich: Universität Bonn, Dissertation
- SCHLINDWEIN, B. (2004): So wird die Prämie ab 2005 berechnet; in: Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen-Lippe, Nr. 9 vom 26.2.2004, S. 18-20
- SCHMIDT, A. (1871): Über den Rüben-Nematoden; in: Zeitschrift des Vereins für die Rübenzuckerindustrie im Zollverein, Nr. 21, S. 1-19.
- SCHMIDT, K. (1992): Zeitdiskrete Modelle zur Vorhersage der Populationsdynamik des Rübenzystennematoden *Heterodera schachtii* (Schmidt) in Abhängigkeit von der Fruchtfolge und des Temperaturmusters; Universität Bonn, Dissertation
- SCHMITZ, A.: Einsatz der Thermografie zur Erkennung von Nematodenbefall in Zuckerrüben; Universität Bonn, Dissertation in Vorbereitung
- SCHMITZ, A.; KIEWNICK, S.; SCHLANG, J.; SCHMIDT, K. UND SIKORA, R. A. (2003): Erfassung der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Rübenzystennematoden (*Heterodera schachtii*) in Zuckerrüben mit Hilfe von Fernerkundung; in: Phytomedizin, Mitteilungen der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V., 33. Jahrgang, Nr. 2, S. 52

- SCHMITZ, S. (2003): Kurzzeitlegerung von Zuckerrüben in Feldrandmieten; Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG, Band 409; zugleich: Universität Bonn, Dissertation
- SCHNEEWEISS, W.G. (1992): Zuverlässigkeitstechnik: von den Komponenten zum System; Datakontext-Verlag, Köln, 2. Auflage
- SCHULLER, U.; ZERGER, U. UND KRAMER, P. (1988): Das Fruchtfolgeberatungssystem FELD-SIM; in: REINER, L.; GEIDEL, H. UND MANGSTL, A. (Hrsg.): Agrarinformatik, Informationsverarbeitung Agrarwissenschaft, Band 15, Referate der 9. GIL-Jahrestagung in Münster September 1988, S. 241-256; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- SCHULTZ, A. UND MIRSCHEL, W. (1993): Verifikation und Validierung – Wie genau sind Simulationsmodelle in der Agrarökologie?; in: Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, Band 5: Referate der 14. GIL-Jahrestagung in Leipzig, S. 237-242; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- SEINHORST, J.W. (1965): The relation between nematode density and damage to plants; in: Nematologica, Nr. 11, S. 137-154
- SEINHORST, J.W. (1966): The relationships between population increase and population density in plant parasitic nematodes – I. Introduction and migratory nematodes; in: Nematologica, Nr. 12, S. 157-169
- SEINHORST, J.W. (1967a): The relationships between population increase and population density in plant parasitic nematodes – II. Sedentary nematodes; in: Nematologica, Nr. 13, S. 157-171
- SEINHORST, J.W. (1967b): The relationships between population increase and population density in plant parasitic nematodes – III. Definition of the terms host, host status and resistance; IV. The influence of external conditions on the regulation of population density; in: Nematologica, Nr. 13, S. 429-442
- SEINHORST, J.W. (1973): The relation between nematode density distribution in a field and loss in yield at different average nematode densities; in: Nematologica, Nr. 19, S. 421-427
- SEINHORST, J.W. (1986): Effects of nematode attack on the growth and yield of crop plants; in: LAMBERTI, F. UND TAYLOR, C.E. (Hrsg.): Cyst Nematodes; NATO ASI series A, S. 191-209; Plenum Press, New York u.a.
- SEPPELT, R. (1997): Strategien für eine nachhaltige Landwirtschaft – Anwendung der Kontrolltheorie auf langfristige bioökonomische Prozesse; in: HERRMANN, A. UND RICHTER, O. (Hrsg.): Landschaftsökologie und Umweltforschung; Nr. 26; zugleich: Universität Braunschweig, Dissertation
- SMIT, A.B. (1996): PIETeR: A field specific bio-economic model for decision support in sugar beet growing; Universität Wageningen, Dissertation
- SODTKE, R.M. (2003): Ein Entscheidungsunterstützungssystem für den Zwischenfruchtanbau - Konzeption, Entwicklung, Validierung; Universität Kiel, Dissertation

SÖNDGERATH, D. (1987): Eine Erweiterung des Lesliemodells für die Beschreibung populationsdynamischer Prozesse bei Spezies mit mehreren Entwicklungsstadien; Universität Dortmund, Dissertation

SPICKERMANN, G. (2003): Spatial Application of a Time-Discrete System to Forecast the Dynamic of a Population of *Heterodera schachtii* with a Geographic Information System (GIS); in: WERNER, A. UND JARFE, A. (Hrsg.): Program book of the joint conference of ECPA – ECPLF, S. 575-576

SPICKERMANN, G. UND PLÜMER, L. (2004): Räumliches Prognosemodell zur Vorhersage der Populationsdichte von Rübenzystemnematoden; in: BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM (Hrsg.): 54. Deutsche Pflanzenschutztagung; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 396, S. 295-296; Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin

SPIELHOFF, M. (2001): Einzelbetriebliche und sektorale Analysen zur Wettbewerbsfähigkeit der Schweinefleischproduktion – Szenarien und Simulationen; in: Berichte aus der Agrarökonomie, Shaker Verlag, Aachen; zugleich: Universität Bonn, Dissertation

SPITTERS, C.J.T.; VAN KEULEN, H. UND VAN KRAALINGEN, D.W.G (1989): A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87; in: RABBINGE, R; WARD, S. A. UND VAN LAAR, H.H. (Hrsg.): Simulation and system management in crop protection; Simulation Monographs, Nr. 32, Pudoc, Wageningen

STEFFEN, G. UND BERG, E (1985): Die Beurteilung von Chancen und Risiken integrierter Produktionsverfahren aus entscheidungstheoretischer Sicht; in: Integrierte Produktionsverfahren im Landbau; agrarspectrum, Schriftenreihe des Dachverbands Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung, Band 9, S. 83-100; BLV-Verlagsgesellschaft, München u.a.

STEFFEN, G. UND BORN, D. (1987): Betriebs- und Unternehmensführung in der Landwirtschaft, UTB, Ulmer, Stuttgart

STEUDEL, W. (1985): Ergebnisse zur Abundanzdynamik des Rüben nematoden (*Heterodera schachtii* Schmidt) und zum Ertrag von Zuckerrüben in einer zwanzigjährigen Monokultur auf dem Institutsversuchsfeld in Elsdorf/Rhld.; in: Beiträge zur Nematodenforschung: Institut für Nematologie 25 Jahre in Münster-Gievenbeck; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem; Nr. 226, S. 115-128; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg

STEUDEL, W. UND THIELEMANN, R. (1970): Weitere Untersuchungen zur Frage der Empfindlichkeit von Zuckerrüben gegen Rüben nematoden (*Heterodera schachtii* Schmidt); in: Zucker, 23. Jahrgang, Nr. 4, S. 106-109

STEUDEL, W. UND THIELEMANN, R. (1979): Über die Prognose von Schäden durch den Rüben nematoden (*Heterodera schachtii* Schmidt) bei Zuckerrüben mittels Untersuchung des Vorbefalls; in: Nachrichtenblatt des deutschen Pflanzenschutzdienstes, 31. Jahrgang, S. 179-181

STEUDEL, W.; THIELEMANN, R. UND HAUFE, W. (1978): Der Einfluss von Aldicarb auf die Vermehrung des Rübenzystenälchens (*Heterodera schachtii* Schmidt) auf den Ertrag von Zuckerrüben in der Köln-Aachener Bucht; in: *Nematologica*, Nr. 24, S. 361-375

STEUDEL, W.; THIELEMANN, R. UND HAUFE, W. (1981): Untersuchungen zur Populationsdynamik des Rübenzystenälchens (*Heterodera schachtii* Schmidt) in der Köln-Aachener Bucht; in: *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*, Nr. 199; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg

STEUDEL, W. UND MÜLLER, J. (1983): Untersuchungen und Modellrechnungen zum Einfluss pflanzenverträglicher Nematizide und nematodenresistenter Zwischenfrüchte auf die Abundanzdynamik der Zuckerrüben nematoden (*Heterodera schachtii*) in Zuckerrübenfruchtfolgen; in: *Zuckerindustrie*, 108. Jahrgang, Nr. 4, S. 365-369

STEUDEL, W.; SCHLANG, J. UND MÜLLER, J. (1985): Untersuchungen zum Einfluss einiger Zwischenfrüchte auf die Abundanzdynamik des Rüben nematoden (*Heterodera schachtii* Schmidt) in verschiedenen Bodentiefen; in: *Beiträge zur Nematodenforschung: Institut für Nematologie 25 Jahre in Münster-Gievenbeck*; *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem*; Nr. 226, S. 129-140; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg

STEUDEL, W., SCHLANG, J. UND MÜLLER, J. (1989): Untersuchungen zum Einfluss einiger Zwischenfrüchte auf die Abundanzdynamik des Rüben nematoden (*Heterodera schachtii* Schmidt) in einer Zuckerrüben-Getreide-Fruchtfolge; in: *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 41. Jahrgang, Nr. 12, S. 199-203;

STOCKFISCH, N.; KOCH, H.J. UND MÄRLÄNDER, B. (2002): Einfluss der Witterung auf die Trockenmassebildung von Zuckerrüben; in: *Pflanzenbauwissenschaften*, 6. Jahrgang, Nr. 2, S. 63-71

STONE, N.D.; BUICK, R.D.; ROACH, J.W.; SCHECKLER, R.K. UND RUPANI, R. (1992): The planning problem in agriculture: Farm-level crop rotation planning as an example; in: *AI Applications in Natural Resources, Agriculture and Environment Science*, 6. Jahrgang, Nr. 1, S. 59-75

THIELEMANN, R. UND STEUDEL, W. (1973): Neunjährige Erfahrungen mit Monokultur von Zuckerrüben auf mit *Heterodera schachtii* (Schmidt) verseuchtem Boden; in: *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 25. Jahrgang, S. 145-149

THOER, K. (1986): Simulationsmodell zur Nachbildung von Zuckerrüben- und Unkrautwachstum als Basis für die Beurteilung des Herbizideinsatzes; *Forschung und Beratung, Reihe B*, Nr. 32, Landwirtschaftsverlag, Münster; zugleich: Universität Bonn, Dissertation

THOMAS, E. (1990): Biologische Nematodenbekämpfung hat sich bewährt – Ergebnisse der Versuche mit nematodenresistenten Zwischenfrüchten 1981-1989; in: *Zuckerrübenjournal*, Nr. 2, S. 6-8

THOMAS, E. (1991): Der Einfluss resistenter Kreuziferen-Zwischenfrüchte auf Nematodenbesatz, Rübenertrag und -qualität; in: *Zuckerrübe*, 40. Jahrgang., Nr. 2, S. 118-122

- THOMAS, E. (1995): So wirken bei Flächenbegrünung Ölrettich und Senf auf die Rübenenerträge; in: LZ Rheinland, Nr. 18, S. 13-15
- THOMAS, E. (1996): Mit Ölrettich und Senf auf Nematodenfang; in: LZ Rheinland, Nr. 18, S. 15-16
- THOMASON, I.J. UND CASWELL, E.P. (1987): Principles of nematode control; in: BROWN, R.H. UND KERRY, B.R. (Hrsg.): Principles and Practice of Nematode Control in Crops, S. 87-130; Academic Press, Sydney u.a.
- TICHY, J. (2004): So läuft die Modulation; in: Ratgeber Förderung 2004, Beilage zur LZ Rheinland vom 19.2.2004, S. 48-50
- TRUGDILL, D.L. (1986): Yield losses caused by potato cyst nematodes: A review of the current position in Britain and prospects for improvements; in: Annuals of applied Biology, 108. Jahrgang, S. 181-198
- VANDENDRIESSCHE, H. (1995): Modelling growth and sugar accumulation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) for potential production conditions; Universität Leuven, Dissertation
- VANDENDRIESSCHE, H. UND VAN ITTERSUM, M.K. (1995): Crop models and decision support systems for yield forecasting and management of the sugar beet crop; in: European Journal of Agronomy, 4. Jahrgang, Nr. 3, S. 269-279
- VANDERPLANK, J.E. (1963): Plant diseases: epidemics and control; Academic Press, New York, London
- VAN DER WERF, W.; RABBINGE, R. UND HEIJBOEK, W. (1986): Spring invasion of *Heterodera schachtii* in sugar beet; a simulation study; in: Netherlands Journal of Plant Pathology, 92. Jahrgang, Nr. 1, S. 33-42
- VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T. UND DREES, E.M. (1982): A summary model for crop growth; in: PENNING DE VRIES, F.W.T. UND VAN LAAR, H.H. (Hrsg.): Simulation of plant growth and crop production; Simulation monographs, Wageningen, Pudoc, S. 87-97
- VERSUCHSSTELLE DES RHEINISCHEN RÜBENBAUER-VERBANDES E.V., RRV (Hrsg., 2005): Versuche 2004; Versuchsbericht
- WARD, S. A.; RABBINGE, R. UND DEN OUDEN, R. (1985): Construction and preliminary evaluation of a simulation model of the population dynamics of the potato cyst-nematode *Globodera pallida*; in: Netherlands Journal of Plant Pathology, 95. Jahrgang, Nr. 1, S. 27-44
- WARNECKE, H. (2000): Wird 2000 ein Rübennematodenjahr?; in: Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung, Nr. 27 vom 6.7.2000; S. 10-12
- WEISCHER, B. (1985): Entwicklungstendenzen bei der Abwehr von Nematodenschäden; in: BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT BERLIN-DAHLEM (Hrsg.): Beiträge zur Nematodenforschung; Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem, Nr. 226, S. 13-30; Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg

WESTPHAL, A. (1998): Soil suppressiveness against *Heterodera schachtii* in a California Field; University of California, Riverside, Dissertation

WHITEHEAD, A.G. (1998): Plant nematode control; CAB International, Wallingford

WINNER, C. (1982): Zuckerrübenanbau; DLG-Verlag, Frankfurt (Main)

WÜSTEN, H.; STEFFEN, G. UND BERG, E. (1981): Stand der Entwicklung des Schadschwellenkonzepts als entscheidungsorientiertes System; in: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 88. Jahrgang, Nr. 8/9, S. 465-491

ZENS, F. (2002): Entwicklung eines computergestützten Simulationsmodells zur Analyse der unternehmerischen Entscheidungen im Produktionsverfahren Zuckerrübenanbau; dissertation.de, Verlag im Internet; zugleich: Universität Bonn, Dissertation

ZERGER, C. UND HAAS, G. (2003): Ökologischer Landbau und Agrarstruktur in Nordrhein-Westfalen; in: Schriftenreihe des Instituts für Organischen Landbau der Universität Bonn, Nr. 21

Mündliche Auskünfte

HEINRICHS, CHR. (2000): Pflanzenschutzdienst der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Bonn; am 17.1.2000

HEINRICHS, CHR. (2004b): Pflanzenschutzdienst der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Bonn; am 5.3.2004

KREMER-SCHILLINGS, W. (2001): Pfeifer & Langen KG, Werk Elsdorf, Leiter Landwirtschaft, am 30.1.2001

SCHLANG, J. (2001): Biologische Bundesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde, Außenstelle Elsdorf, Elsdorf, am 16.11.2001

SCHLANG, J. (2003a): Biologische Bundesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde, Außenstelle Elsdorf, Elsdorf, am 14.3.2003

SCHLANG, J. (2003b): Biologische Bundesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde, Außenstelle Elsdorf, Elsdorf, am 27.6.2003

SCHLANG, J. (2004b): Biologische Bundesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Nematologie und Wirbeltierkunde, Außenstelle Elsdorf, Elsdorf, am 4.3.2004

SIMON, F. (2000): Anbauberater der KWS Saat AG auf dem KWS-Feldtag 2000 in Kirchherren, am 18.7.2000

STEUERWALD, M. (2003): Rheinischer Rübenbauerverband, Bonn, am 12.5.2003

Sonstige Quellen

BODENGEUNDHEITSDIENST GMBH (2004): Befallsstufen der Nematodenuntersuchung; im Internet unter <http://www.bodengesundheitsdienst.de/bisz/biszportal.nsf/contentByKey/JNIS-56FDTB-DE-p>

BÜRCKY, K. (2001): Anbauwürdigkeit nematodenresistenter Sorten; Skript zum Vortrag bei einem Kolloquium der Syngenta Seeds GmbH zum Thema „Nematodenresistente Zuckerrüben“ am 10. Oktober 2001 in Bad Salzuflen

FERRIS, H. (1999-2004): NEMAPLEX (Nematode-Plant Expert Information System); im Internet unter <http://plpnemweb.ucdavis.edu/nemaplex/nemaplex.htm>

FRENKING, H. (2005): Nemathorin, ein neu zugelassenes Nematizid zur Bekämpfung von Kartoffelnematoden; Vortrag auf der 33. Tagung des Arbeitskreises Nematologie der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V. am 13. und 14. April 2005 in Groß Strömkendorf; im Internet unter <http://www.phytomedizin.org/ak/07/Tagung2005/tagung2005.htm>

HEINRICHS, CHR. (2004a): Vortrag bei einer Tagung der AG Nematoden und der KWS Saat AG zum Thema „Strategien gegen Nematoden“ am 4.3.2004 in Düren

KWS (2000): Nematoden – Erkennen, Vermeiden, Bekämpfen; KWS-Ratgeber; KWS Saat AG, Einbeck; Diese Broschüre kann von der Homepage der KWS herunter geladen werden unter http://www.kws.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabcnmt

LENZ, R. (2000): Nematoden in Deutschland; Vortrag auf dem Feldtag der KWS Saat AG am 18.7.2000 in Kirchherten

LIZ (2002): Resistente Zuckerrübensorten; LIZ-Online unter <http://www.liz-online.de/gi/ps/tier/liz-resizr.htm>

LIZ (2003a): Erweitertes Angebot bei der Erdschwadbeprobung; LIZ-Online, Kurzmeldung am 16.9.2003 unter <http://www.liz-online.de/skripte/news.asp?Jahr=2003&intWerk=1>

LIZ (2003b): Starke Nematodenvermehrung 2003; LIZ-Online, Kurzmeldung am 9.10.2003 unter <http://www.liz-online.de/skripte/news.asp?Jahr=2003&intWerk=1>

LIZ (2003c): Späte Zwischenfrüchte oft besser als früh gesäte; LIZ-Online, Kurzmeldung am 20.10.2003 unter <http://www.liz-online.de/skripte/news.asp?Jahr=2003&intWerk=1>

LIZ (2004a): Rizomania-Monitoring, West; LIZ-Online, unter <http://www.liz-online.de/gi/ps/wurzel/rizwest.htm>

LIZ (2004b): Nematoden-Monitoring; LIZ-Online, unter <http://www.liz-online.de/gi/ps/tier/liz-nemamoni.htm>

LIZ (2004c): Non-Food-Raps in Zuckerrüben-Fruchtfolgen?; LIZ-Online, Kurzmeldung am 20.8.2004 unter <http://www.liz-online.de/skripte/news.asp?Jahr=2004&intWerk=1>

LIZ (2004d): Saatgut-Frühbestellung - Trends 2005; LIZ-Online, Kurzmeldung am 28.9.2004 unter <http://www.liz-online.de/skripte/news.asp?Jahr=2004&intWerk=1>

LIZ (2004e): LIZ-Sortinfo; Online-Anwendung unter <http://www.liz-online.de/gi/ss/liz-sortinfo.htm>

LIZ (2005a): Reserven im Pflanzenschutz bei Zuckerrüben; LIZ-Online, Kurzmeldung am 1.2.2005 unter <http://www.liz-online.de/skripte/news.asp?Jahr=2005&intWerk=1>

LIZ (2005b): LIZ-Anbauplanung; Online-Anwendung unter <http://www.liz-online.de/gi/bw/liz-anbauplan.htm>

LIZ (2005c): Rübenpreise und Deklassierung; LIZ-Online, unter <http://www.liz-online.de/gi/bw/preise.htm>

LIZ (2005d): Schnitzel-/Rübenmarkvergütung; LIZ-Online, unter <http://www.liz-online.de/gi/bw/schnitzel.htm>

LIZ (2005e): ZMO-Reform beschlossen!; LIZ-Online, Kurzmeldung am 25.11.2005 unter <http://www.liz-online.de/skripte/news4.asp>

LÜTH, P. (2005): Weitere Entwicklung des biologischen Nematizides BioAct WG; Vortrag auf der 33. Tagung des Arbeitskreises Nematologie der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V. am 13. und 14. April 2005 in Groß Strömkendorf; im Internet unter <http://www.phytomedizin.org/ak/07/Tagung2005/tagung2005.htm>

PFEIFER & LANGEN (Hrsg., 2000a): Rübenlieferungsvertrag 2000/2001 für das Werk Elsdorf

PFEIFER & LANGEN (Hrsg., 2000b): Branchenvereinbarung 2000/01

SPSS INC. (Hrsg., 1989-2003): SPSS Base, Online-Hilfe zu SPSS 12.0G für Windows

SÜDZUCKER (1999): Branchenvereinbarung für die Zuckerrübenlieferung 1999; Südzucker AG Mannheim/Ochsenfurt

Rechtsquellen

Verordnung Nr. 1009/67/EWG des Rates vom 18. Dezember 1967 über die gemeinsame Marktorganisation für Zucker; in: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. 308, 18.12.1967, S. 1-37

Verordnung (EWG) Nr. 65/82 der Kommission vom 13. Januar 1982 mit Durchführungsbestimmungen zur Übertragung von Zucker auf das folgende Wirtschaftsjahr; in: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 9, 25. Jahrgang, 14. Januar 1982, S. 14-16

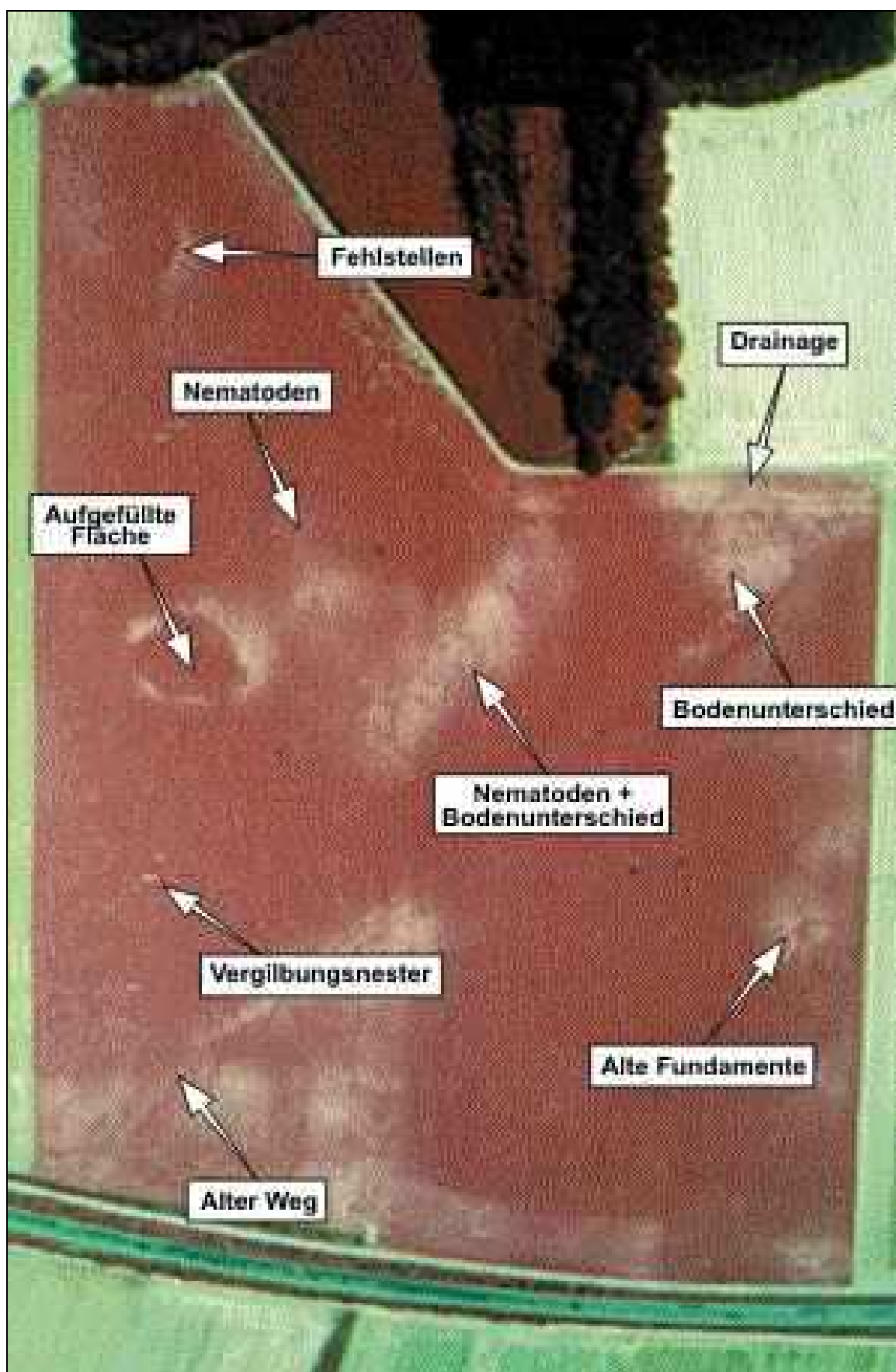
Verordnung (EG) Nr. 1260/2001 des Rates vom 19. Juni 2001 über die gemeinsame Marktorganisation für Zucker; in: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 178, 44. Jahrgang, 30. Juni 2001; S. 1-45

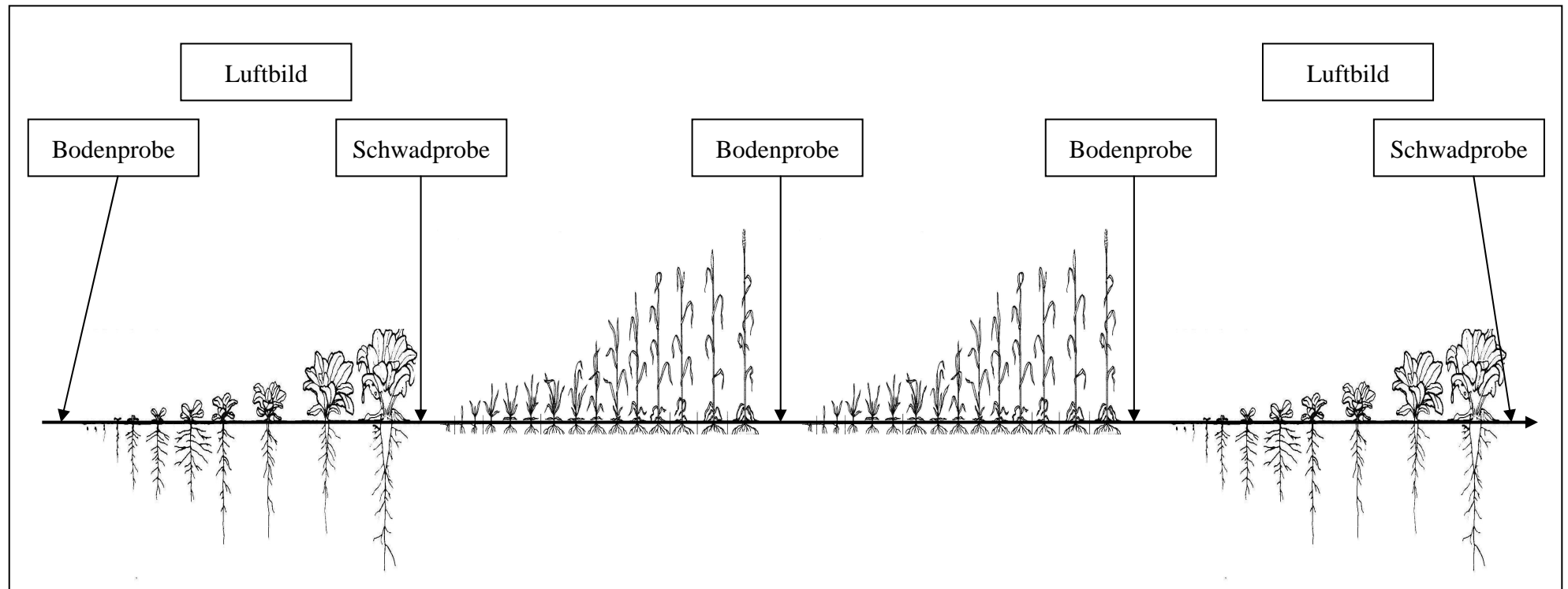
Anhang

Anhang 1:	Ungleichmäßige Nematodenverteilung in einem Feld.....	283
Anhang 2:	Zeitpunkte für Befallserhebungen in einer dreijährigen Fruchtfolge.....	284
Anhang 3:	Bodentemperatursummen am Standort Elsdorf/Rhld.	285
Anhang 4:	Wirksame Bodentemperatursumme nach Aussaat der Zwischenfrüchte.....	285
Anhang 5:	Wirkungskomplex Zwischenfruchtanbau	286
Anhang 6:	Fruchtfolgesystem zur Sicherung der Nematodenresistenz	287
Anhang 7:	Zwei Simulationsläufe des Modells NemaPlot.....	288
Anhang 8:	Parameterkalibrierung für anfällige Zuckerrüben, Modelllauf.....	289
Anhang 9:	Parameterkalibrierung für anfällige Zuckerrüben, Fehlerwerte.....	289
Anhang 10:	Zuckerrüben im Vergleich: anfällige Zuckerrüben.....	290
Anhang 11:	Zuckerrüben im Vergleich: resistente Zuckerrüben.....	290
Anhang 12:	Parameterkalibrierung für resistente Zuckerrüben, Modelllauf.....	291
Anhang 13:	Parameterkalibrierung für resistente Zuckerrüben, Fehlerwerte.....	291
Anhang 14:	Parameterkalibrierung für resistenten Örettich der AS 1, Modelllauf.....	292
Anhang 15:	Parameterkalibrierung für resistenten Örettich der AS 1, Fehlerwerte.....	292
Anhang 16:	Parameterkalibrierung für Winterraps, Modelllauf.....	293
Anhang 17:	Parameterkalibrierung für Winterraps, Fehlerwerte	293
Anhang 18:	Parameterkalibrierung für Abbaurate 30% p.a., Modelllauf.....	294
Anhang 19:	Parameterkalibrierung für Abbaurate 30% p.a., Fehlerwerte	294
Anhang 20:	Kalibrierte Parameter des Nematodenmodells.....	295
Anhang 21:	Verteilungen der Versuchsergebnisse der BBA, anfällige Rüben	296
Anhang 22:	Verteilungen der Versuchsergebnisse der BBA, resistente Rüben	297
Anhang 23:	Lognormalverteilung der Versuchsergebnisse der BBA, anfällige Rüben	298
Anhang 24:	Lognormalverteilung der Versuchsergebnisse der BBA, resistente Rüben...	299
Anhang 25:	Trendbereinigung der Versuchsergebnisse der BBA, anfällige Rüben	300
Anhang 26:	Trendbereinigung der Versuchsergebnisse der BBA, resistente Rüben	300
Anhang 27:	Wachstumsverlauf der Zuckerrüben im Modell von Thoer.....	301
Anhang 28:	Wachstumsverläufe bei zweimaliger Bekämpfung.....	301
Anhang 29:	Jahresgang der Globalstrahlung	302
Anhang 30:	Partialsaisonfigur Globalstrahlung.....	302
Anhang 31:	Kalibrierte Parameter des Zuckerrübenmodells.....	303
Anhang 32:	Verifikation des Zuckerrübenmodells, absolute Werte.....	304
Anhang 33:	Verifikation des Zuckerrübenmodells, relative Fehler	304
Anhang 34:	Modelloutput bei Ernte am 24. Oktober je nach Aussaatzeit	305
Anhang 35:	Modelloutput bei Ernte am 24. September je nach Aussaatzeit	305
Anhang 36:	Zuwachsraten des Rübenetrags im Vergleich.....	306
Anhang 37:	Zuwachsraten des Zuckerertrags im Vergleich.....	306
Anhang 38:	Nemaplex Managementsimulator	307
Anhang 39:	Diskreter Befall-Schadens-Ansatz des Pflanzenschutzdienstes.....	308
Anhang 40:	Diskreter Befall-Schadens-Ansatz des Bodengesundheitsdienstes.....	308
Anhang 41:	Nemaplex Kalkulator für die ökonomische Schadschwelle	309
Anhang 42:	Nemaplex Parameterschätzung für den Seinhorst-Ansatz	309

Anhang 43:	Schadensfunktion der AG Nematoden	310
Anhang 44:	Schadensfunktion der AG Nematoden, logarithmierte P_i -Werte.....	310
Anhang 45:	Verschiedene Schadensfunktionen im Vergleich.....	311
Anhang 46:	Entwicklung des Ertrags bei verschiedenen Schadensfunktionen.....	311
Anhang 47:	Ertragsverteilungen der Zuckerrüben im stochastischen Modellansatz	312
Anhang 48:	Ertragsverteilungen anfälliger Zuckerrüben je nach Produktionsort.....	312
Anhang 49:	Dichtefunktionen der Befall-Schadens-Relationen nach Aussaatzeitraum....	313
Anhang 50:	Erwartungswert, Minimum und Maximum der Ertragsdepressionen	313
Anhang 51:	Anpassung des betrieblichen Lieferrechts an den Zuckergehalt	314
Anhang 52:	Anpassung des Rübenpreises an den Zuckergehalt.....	315
Anhang 53:	Staffel zur Berechnung der Qualitätsprämie	316
Anhang 54:	Staffel zur Berechnung der Früh- und Spätlieferprämien	317
Anhang 55:	C1-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt.....	318
Anhang 56:	C2-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt.....	318
Anhang 57:	Wichtige Kennzahlen der alternativen Produktionsverfahren.....	319
Anhang 58:	INM-Consult, Rahmendateneingabe (Auszug)	320
Anhang 59:	INM-Consult, Eingabe der Simulationsparameter	320
Anhang 60:	INM-Consult, Beispiel für die tabellarische Ergebnisaufbereitung	321
Anhang 61:	INM-Consult, Beispiel für die grafische Ergebnisaufbereitung.....	321
Anhang 62:	Erträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben je nach P_i -Wert	322
Anhang 63:	DB anfälliger und resistenter Zuckerrüben je nach P_i -Wert.....	322
Anhang 64:	P_i -Werte verschiedener Szenarien in dreijähriger Rotation	323
Anhang 65:	DB der Zuckerrüben in Jahr 4 in dreijähriger Rotation.....	324
Anhang 66:	Simulationsexperimente mit verschiedenen Ausgangsbefallsdichten.....	325
Anhang 67:	P_i -Werte der Rotationsszenarien.....	326
Anhang 68:	Rübenenerträge der Rotationsszenarien	326
Anhang 69:	P_i -Werte der Zwischenfruchtszenarien in zweijähriger Fruchtfolge	327
Anhang 70:	GDB der Zwischenfruchtszenarien in zweijähriger Fruchtfolge.....	327
Anhang 71:	P_i -Werte bei Resistenzmanagement in zweijähriger Fruchtfolge.....	328
Anhang 72:	GDB bei Resistenzmanagement in zweijähriger Fruchtfolge	328
Anhang 73:	P_i -Werte der Stilllegungsszenarien in zweijähriger Fruchtfolge	329
Anhang 74:	GDB der Stilllegungsszenarien in zweijähriger Fruchtfolge.....	329
Anhang 75:	P_i -Werte der Szenarien des erweiterten Resistenzmanagements.....	330
Anhang 76:	GDB der Szenarien des erweiterten Resistenzmanagements	330
Anhang 77:	P_i -Werte der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Stoppelweizen	331
Anhang 78:	GDB der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Stoppelweizen	331
Anhang 79:	P_i -Werte der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Wintergerste	332
Anhang 80:	GDB der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Wintergerste	332
Anhang 81:	P_i -Werte anfälliger und resistenter Zuckerrüben in dreijähriger Fruchtfolge	333
Anhang 82:	GDB anfälliger und resistenter Zuckerrüben in dreijähriger Fruchtfolge	333
Anhang 83:	P_i -Werte der Stilllegungsszenarien in dreijähriger Fruchtfolge	334
Anhang 84:	GDB der Stilllegungsszenarien in dreijähriger Fruchtfolge	334
Anhang 85:	P_i -Werte der Szenarien in vierjähriger Fruchtfolge.....	335
Anhang 86:	GDB der Zwischenfruchtszenarien in vierjähriger Fruchtfolge	335

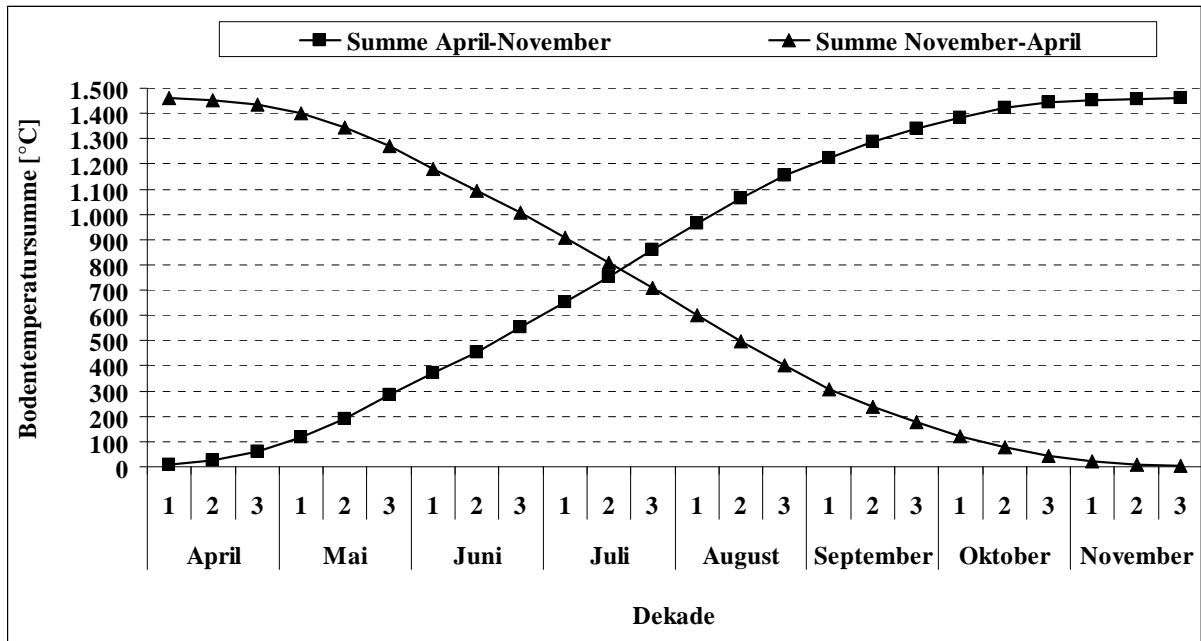
Anhang 87:	P_1 -Werte in sechsjähriger Fruchtfolge mit 50% Zuckerrüben.....	336
Anhang 88:	GDB der sechsjähriger Fruchtfolge mit 50% Zuckerrüben im Vergleich	336
Anhang 89:	P_1 -Werte in sechsjähriger Fruchtfolge mit 33% Zuckerrüben und Raps.....	337
Anhang 90:	P_1 -Werte in achtjähriger Fruchtfolge mit 25% Zuckerrüben und Raps.....	337
Anhang 91:	Parameter der Grenzdeckungsbeitragsrechnung.....	338
Anhang 92:	Ergebnisse der deterministischen Grenzdeckungsbeitragsrechnung	338
Anhang 93:	Flussdiagramm des Planungsansatzes von CROPS	339
Anhang 94:	LIZ-Anbauplanung.....	340

Anhang 1: Ungleichmäßige Nematodenverteilung in einem Feld

Anhang 2: Zeitpunkte für Befallserhebungen in einer dreijährigen Fruchtfolge

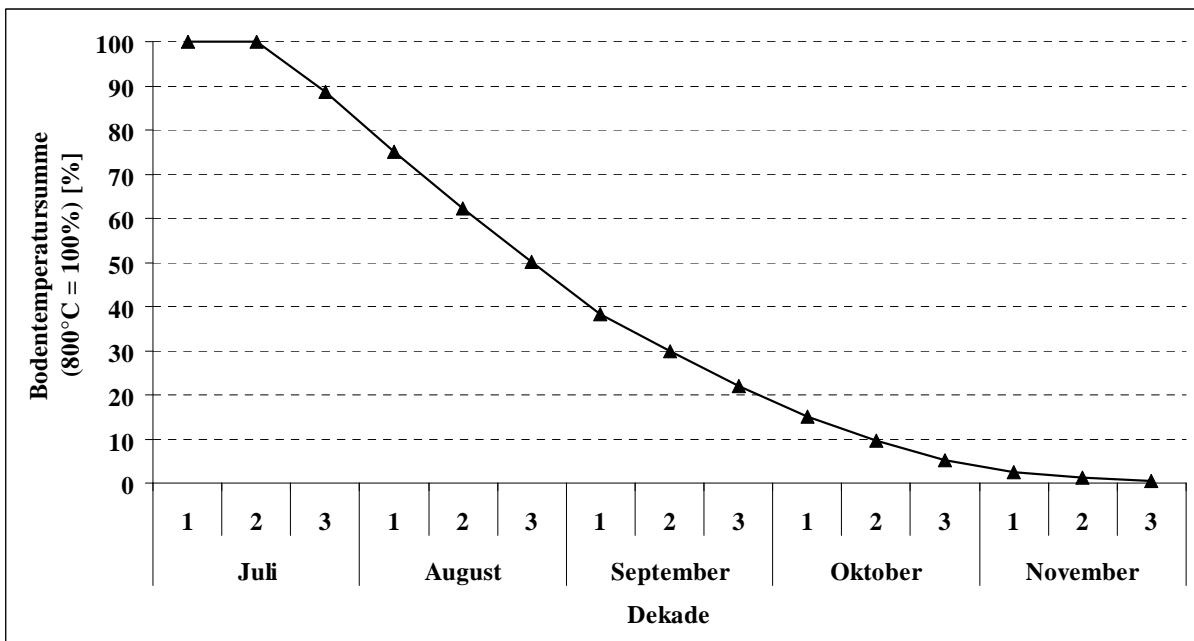
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHLANG, 1999b, S. 2

Anhang 3: Bodentemperatursummen am Standort Elsdorf/Rhld.



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHLANG, 1997, S. 237

Anhang 4: Wirksame Bodentemperatursumme nach Aussaat der Zwischenfrüchte



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHLANG, 1997, S. 238

Anhang 5: Wirkungskomplex Zwischenfruchtanbau**Positive Wirkungen des Zwischenfruchtanbaus:**

1. Verbesserung der Bodenstruktur:
 - a. Humusaufbau,
 - b. Erhöhung der Krümelstabilität und Infiltrabilität besonders schluffreicher Böden,
 - c. Verbesserung der Bearbeitbarkeit tonreicher Böden, Erhöhung des Porenvolumens, ggf. Verbesserung des Gasaustausches und der Wasserführung,
 - d. Beseitigung von Verdichtungen und Durchwurzelung des Unterbodens;
2. Schutz des Bodens und der Umwelt:
 - a. Verminderung des Nitratreintrages in das Grundwasser,
 - b. Verringerung der Wind- und Wassererosion und des Phosphoreintrages in Oberflächengewässer;
3. Verbesserung der Nährstoffversorgung der Hauptfrucht:
 - a. Vermeidung der Nährstoffauswaschung (N, Ca, K),
 - b. Nährstoffnachlieferung besonders von Stickstoff durch Mineralisation,
 - c. N₂-Bindung durch Leguminosen,
 - d. Mobilisierung von Phosphaten sowie Erhöhung der Wasser-, Sorptions- und Pufferkapazität auf sandigen Böden;
4. Unterdrückung unerwünschter Wild- und Kulturpflanzen;
5. Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit fruchtfolgespezifischer Schaderreger, Erhöhung der mikrobiellen Aktivität, Förderung von Antagonisten;

Negative Wirkungen des Zwischenfruchtanbaus:

1. Verminderung des Feldaufganges oder des Ertrages der folgenden Hauptfrucht infolge des Wasserverbrauchs der Zwischenfrucht;
2. Bildung organischer Säuren durch Gärung mit Hemmwirkung auf das Wurzelwachstum, Denitrifikation bei schlechter Einarbeitung großer Mengen unzersetzter, makroorganischer Substanz;
3. Qualitätsverschlechterung z.B. erhöhter Melassebildnergehalt bei Zuckerrüben durch nicht ausreichende Berücksichtigung der N-Mineralisation bzw. zeitlich verzögerte N-Mineralisation;
4. Vermehrung von Unkräutern durch lückige Bestände;
5. Erhöhung der Schadenswahrscheinlichkeit von Schaderregern durch Anbau von Wirtspflanzen bzw. Auflaufen von Wirtsunkräutern;

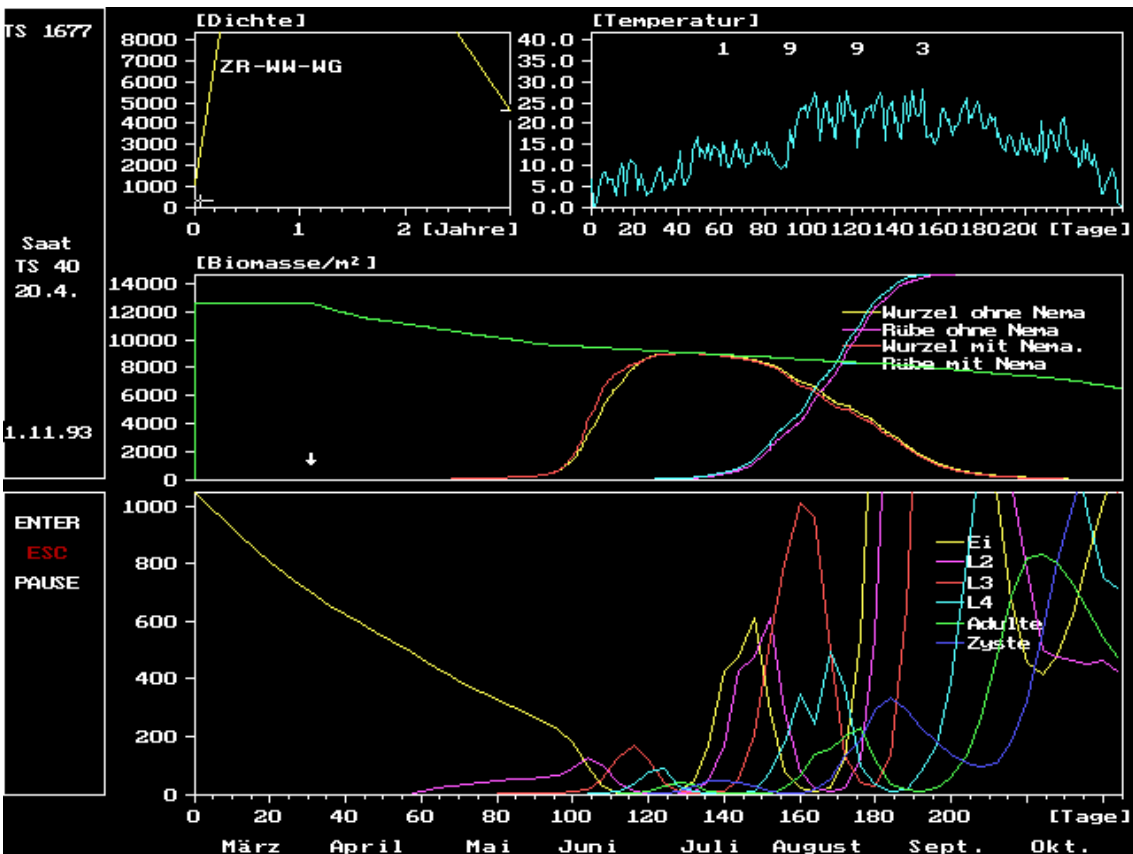
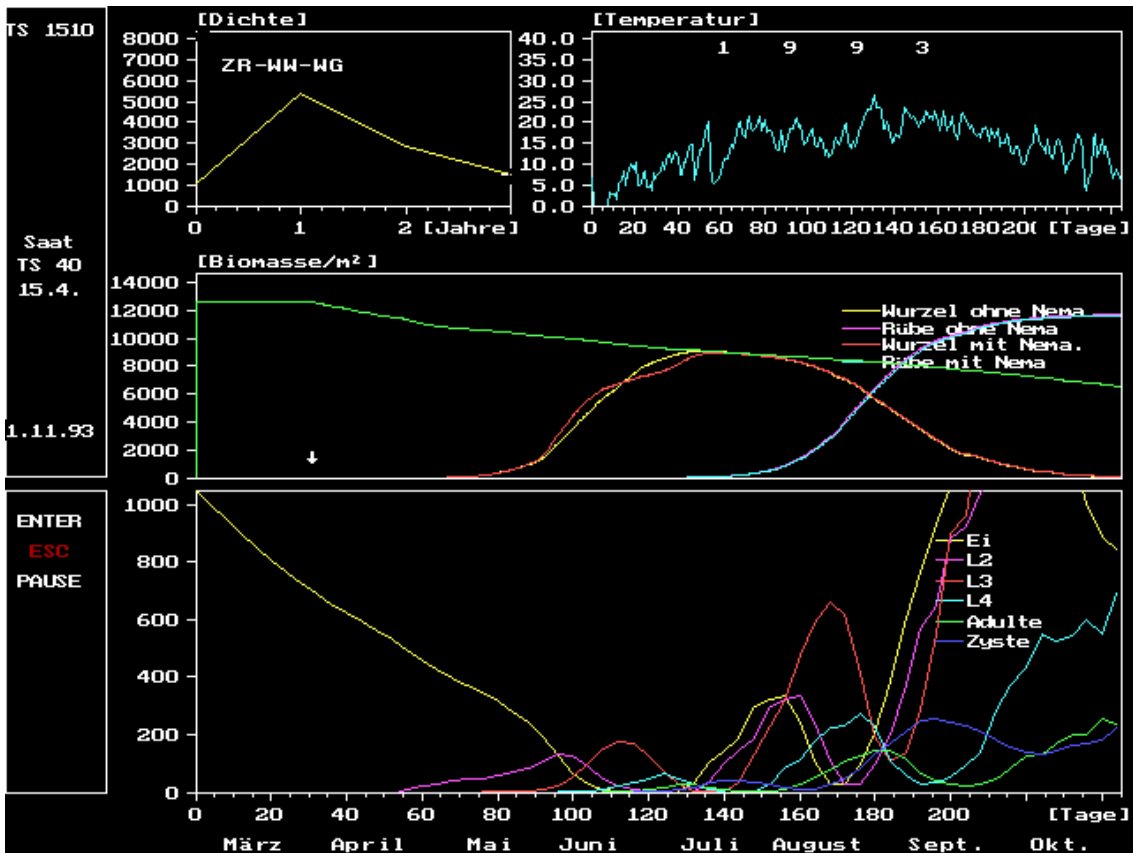
Quellen: COENEN, 1980; KREMER-SCHILLINGS, 1981 und BÄUMER, 1992

Anhang 6: Fruchtfolgesystem zur Sicherung der Nematodenresistenz

<u>Anbaujahr</u>	<u>Kulturpflanze</u>	<u>Anbauziel</u> (in Bezug auf <i>H. schachtii</i>)
1. Jahr	resistente Zuckerrübe	Sicherung der Ertragsleistung unter hohem Nematodenbefall (Toleranz); Reduktion der Populationsdichte (Resistenz)
2. Jahr	Wintergetreide	Natürlicher Rückgang der Populationsdichte
3. Jahr	Wintergetreide	Natürlicher Rückgang der Populationsdichte
4. Jahr	anfällige Zuckerrübe	Sicherung der Ertragsleistung, da niedrige Populationsdichte (P_i - Wert)
5. Jahr	Wintergetreide	Natürlicher Rückgang der Populationsdichte
6. Jahr	Wintergetreide + resistente Zwischenfrucht	Natürlicher Rückgang der Populationsdichte + Reduktion der Populationsdichte durch resistente Zwischenfrucht
7. Jahr	anfällige Zuckerrübe	Sicherung der Ertragsleistung, da niedrige Populationsdichte (P_i - Wert)
8. Jahr	Wintergetreide	Natürlicher Rückgang der Populationsdichte
9. Jahr	Wintergetreide	Natürlicher Rückgang der Populationsdichte
10. Jahr	resistente Zuckerrübe	Sicherung der Ertragsleistung unter hohem Nematodenbefall (Toleranz); Reduktion der Populationsdichte (Resistenz)

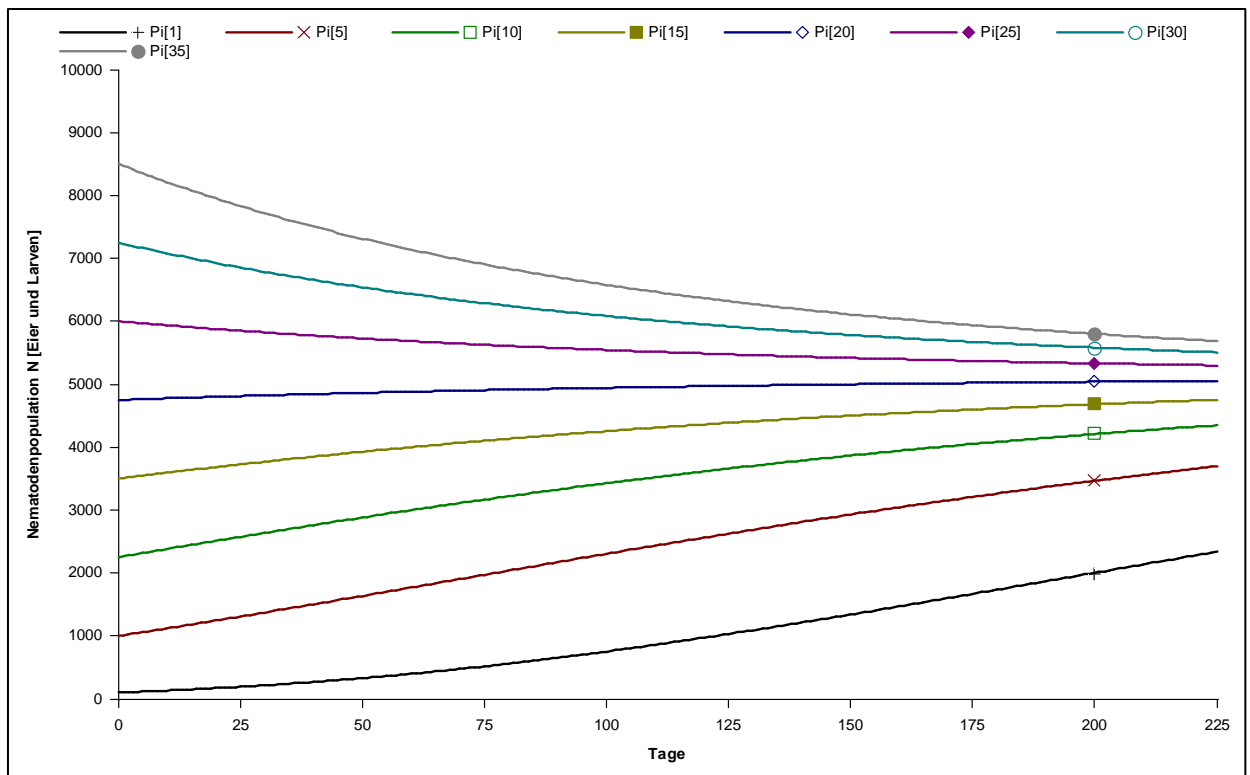
Quelle: BALKE, 2001, S. 68

Anhang 7: Zwei Simulationsläufe des Modells NemaPlot



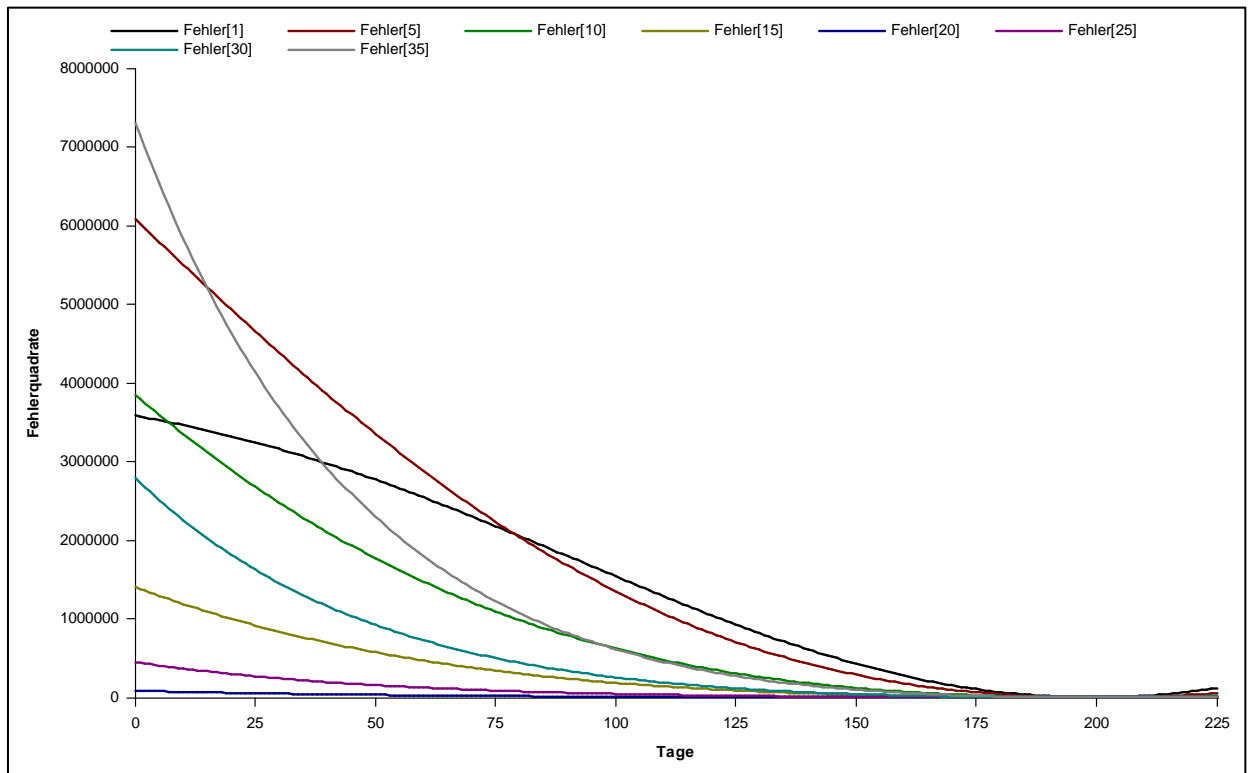
Quelle: Eigene Berechnungen mit NemaPlot (SCHMIDT, 1992)

Anhang 8: Parameterkalibrierung für anfällige Zuckerrüben, Modelllauf



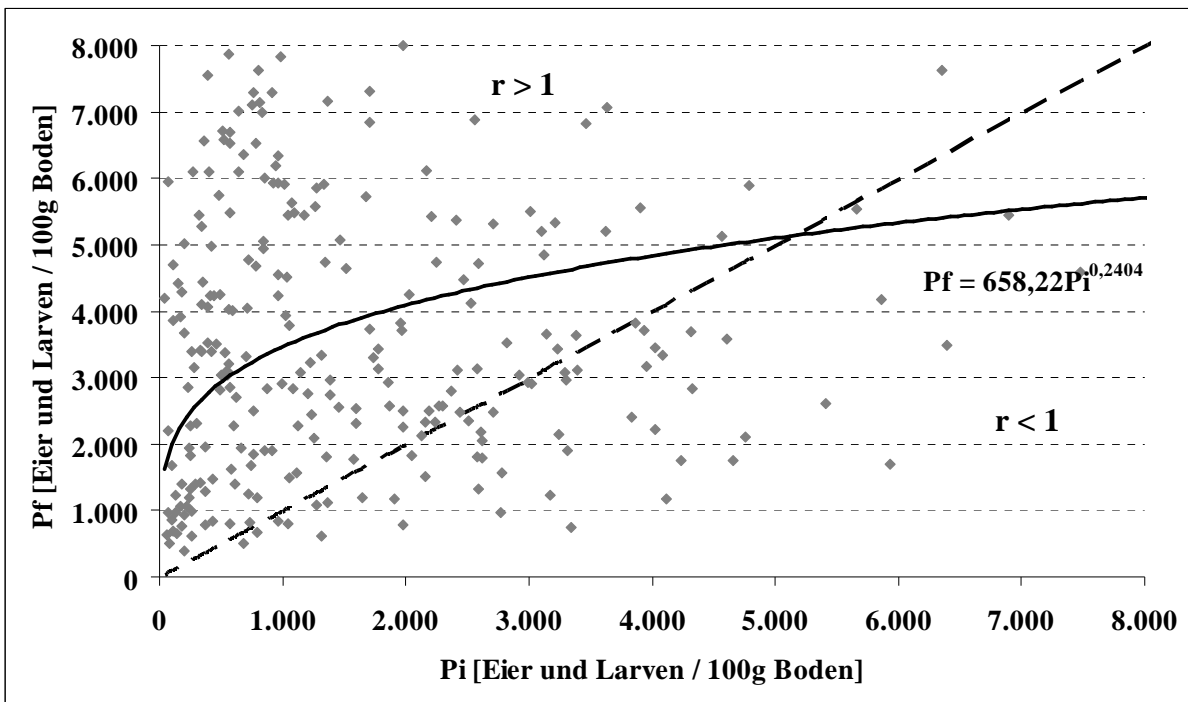
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 9: Parameterkalibrierung für anfällige Zuckerrüben, Fehlerwerte



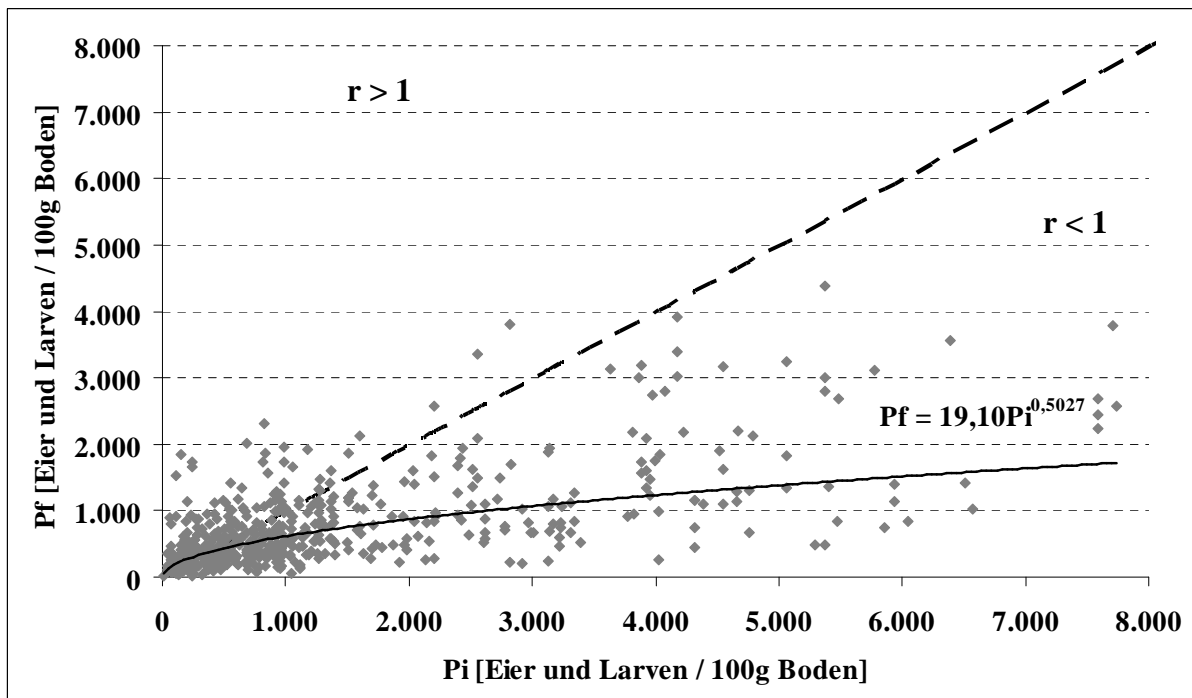
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 10: Zuckerrüben im Vergleich: anfällige Zuckerrüben



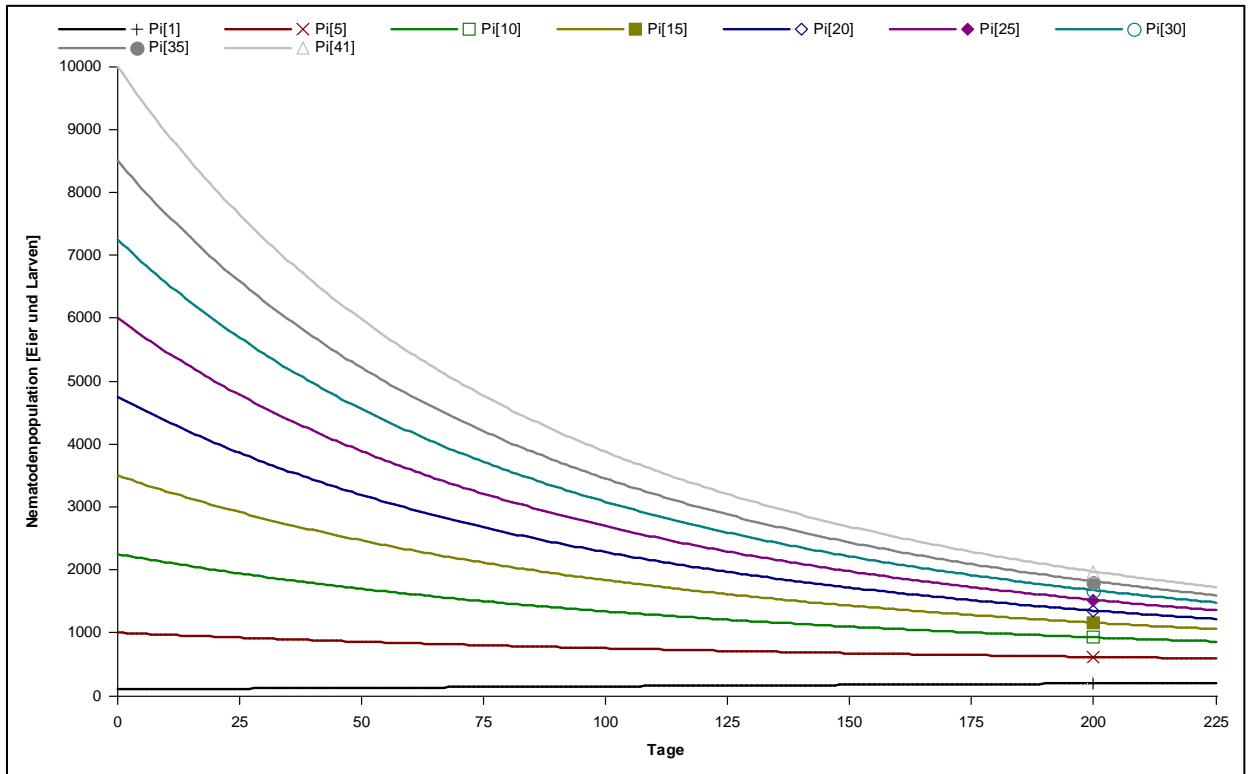
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHLANG, 2002, S. 204

Anhang 11: Zuckerrüben im Vergleich: resistente Zuckerrüben



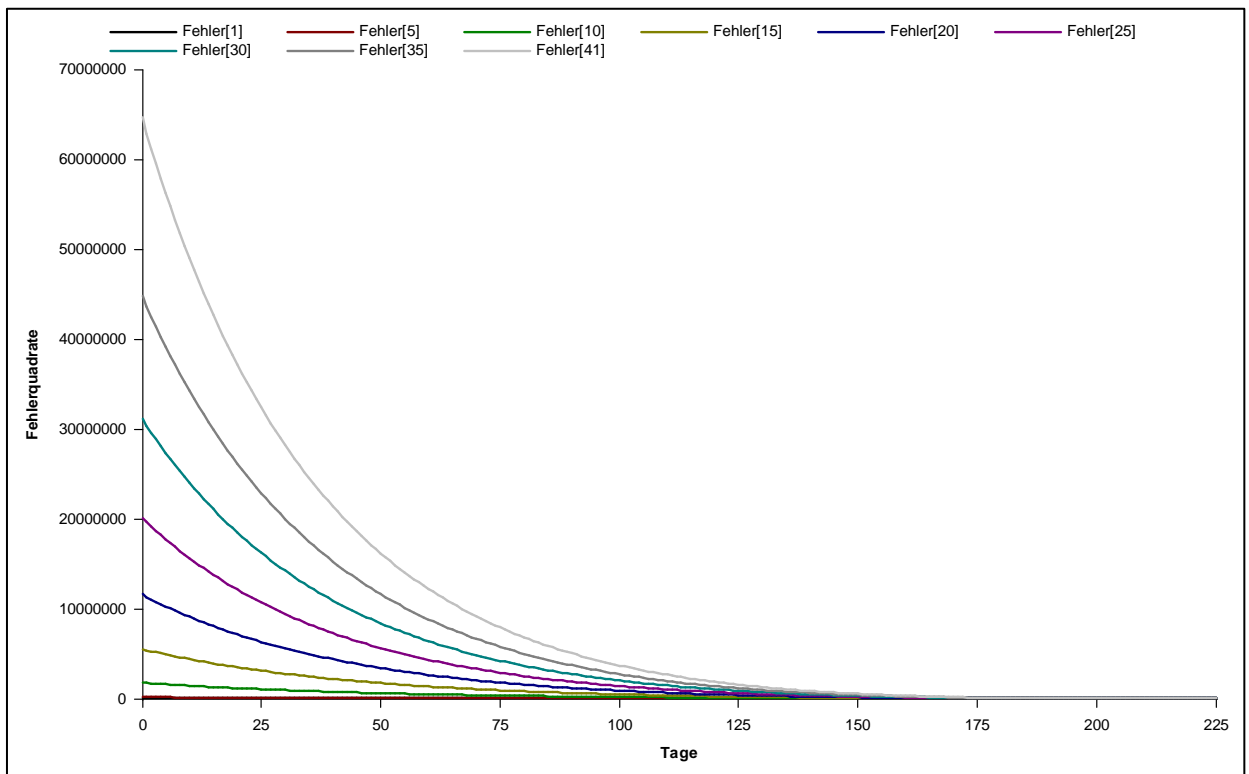
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SCHLANG, 2002, S. 204

Anhang 12: Parameterkalibrierung für resistente Zuckerrüben, Modelllauf



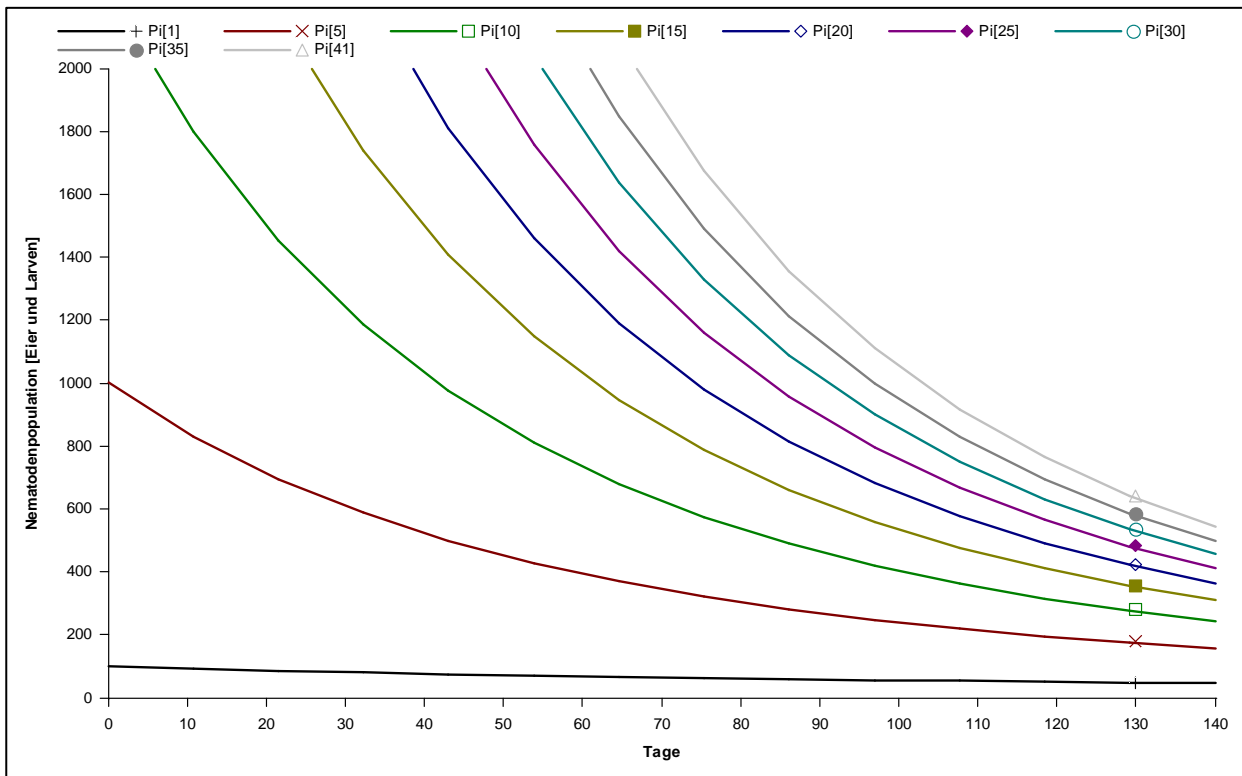
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 13: Parameterkalibrierung für resistente Zuckerrüben, Fehlerwerte



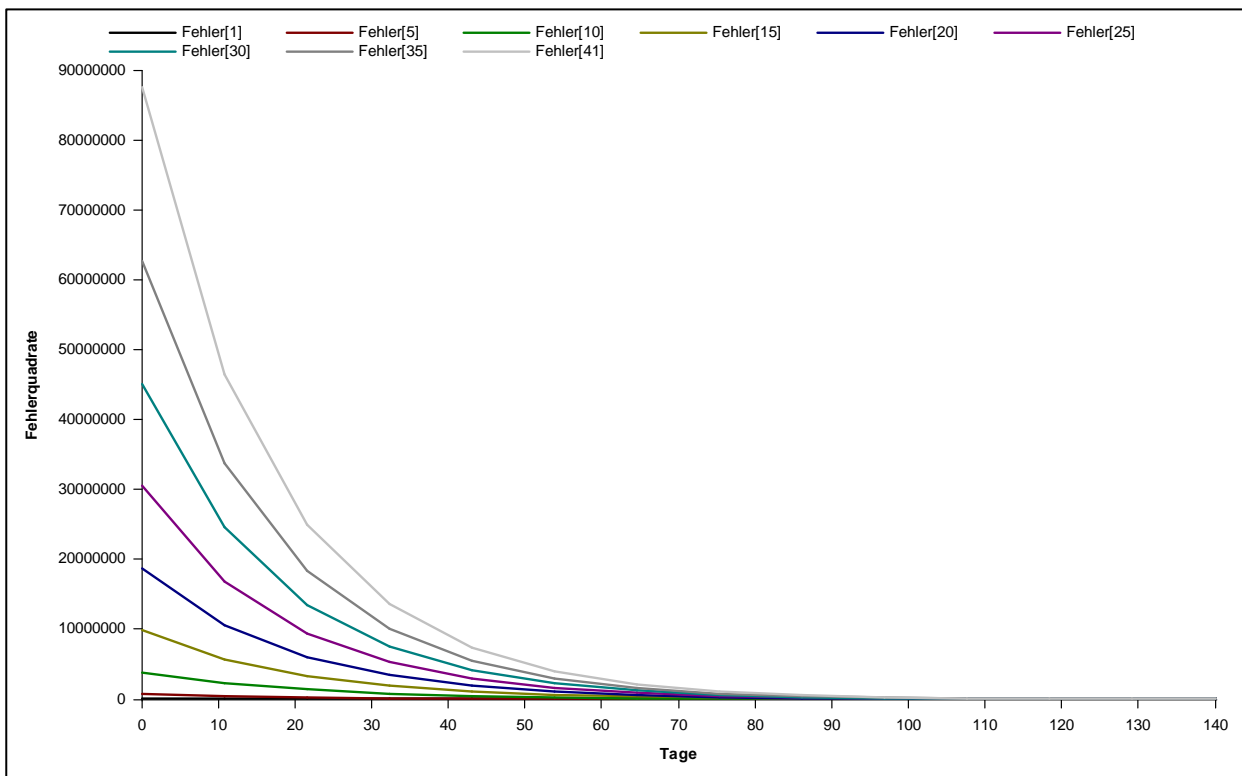
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 14: Parameterkalibrierung für resistenten Ölrettich der AS 1, Modelllauf



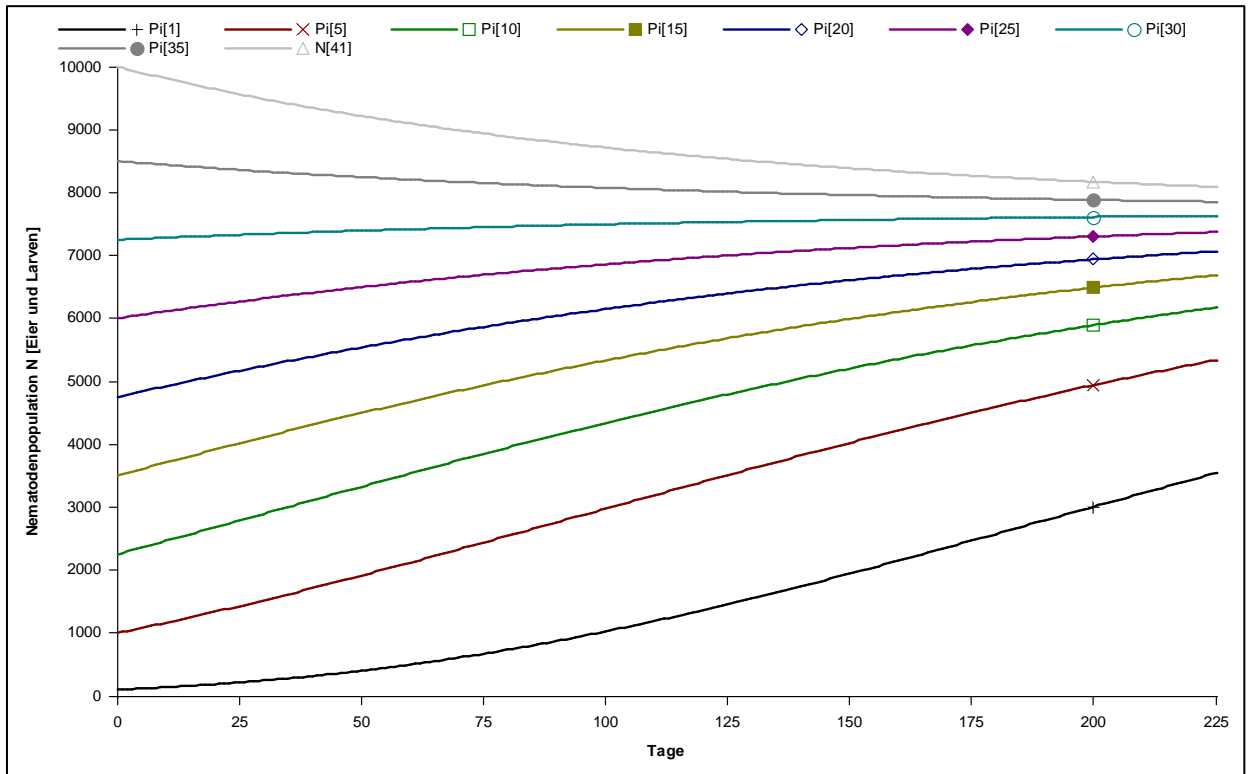
Quelle: Eigene Darstellung; Hinweis: Parameterkalibrierung für Aussaat bis 2.Julidekade

Anhang 15: Parameterkalibrierung für resistenten Ölrettich der AS 1, Fehlerwerte



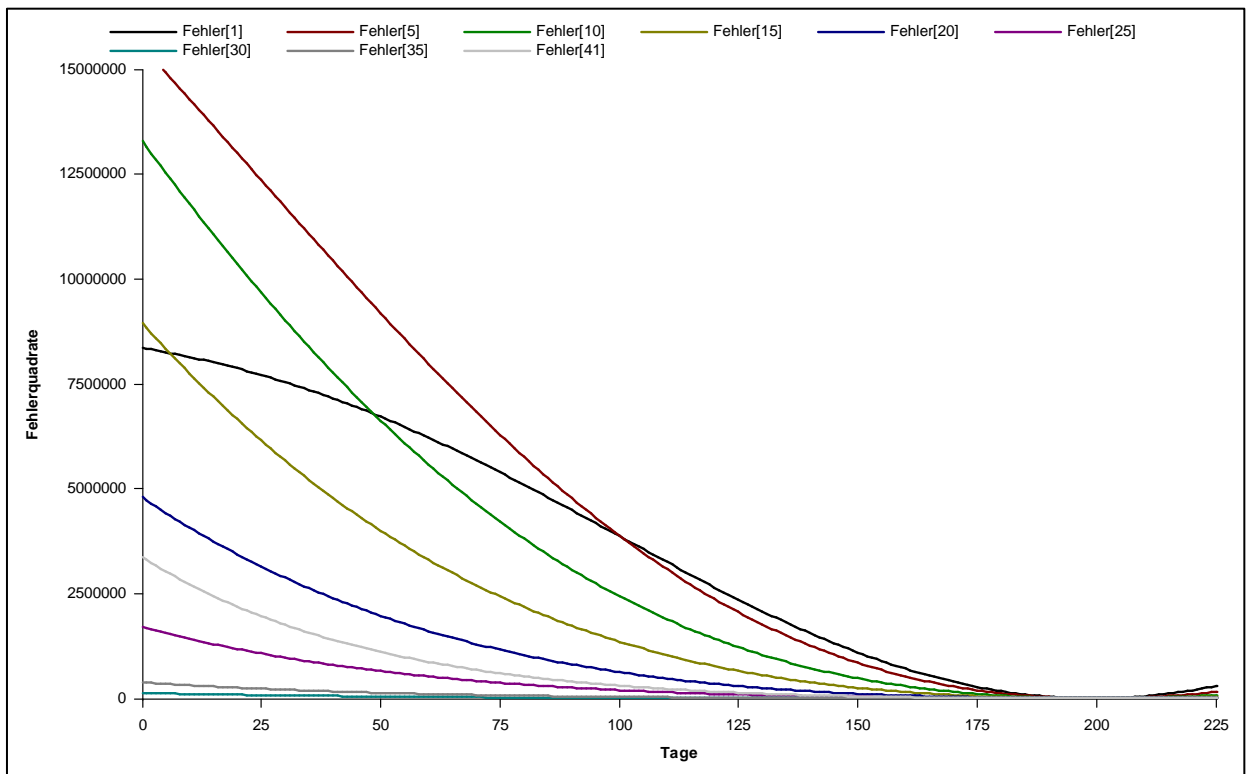
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 16: Parameterkalibrierung für Winterraps, Modellauf



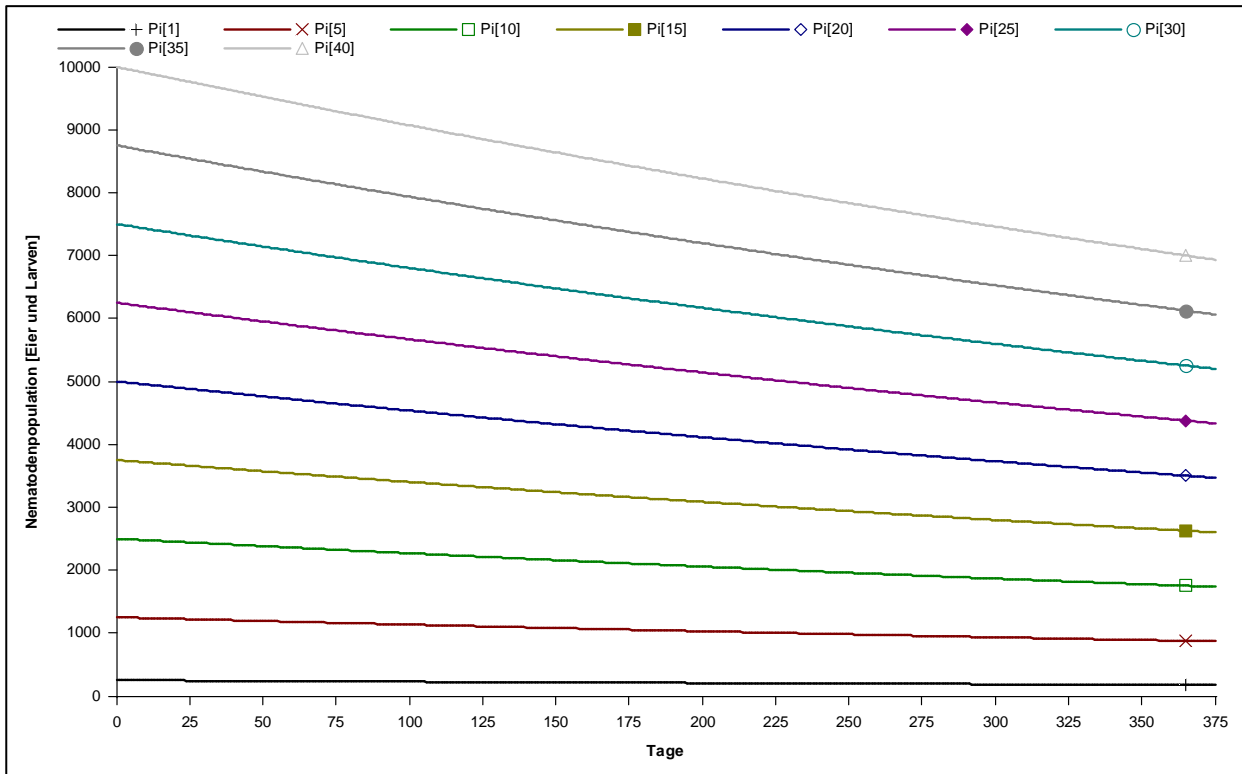
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 17: Parameterkalibrierung für Winterraps, Fehlerwerte



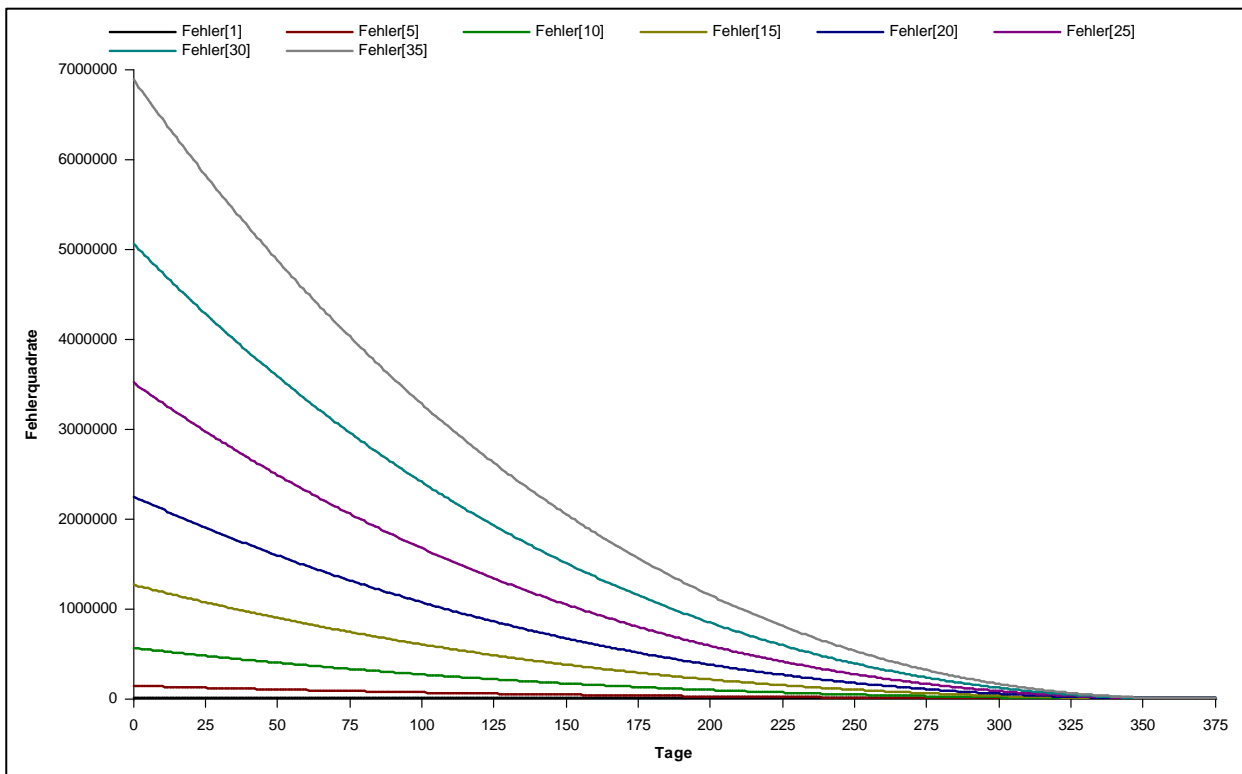
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 18: Parameterkalibrierung für Abbaurate 30% p.a., Modelllauf



Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 19: Parameterkalibrierung für Abbaurate 30% p.a., Fehlerwerte



Quelle: Eigene Darstellung

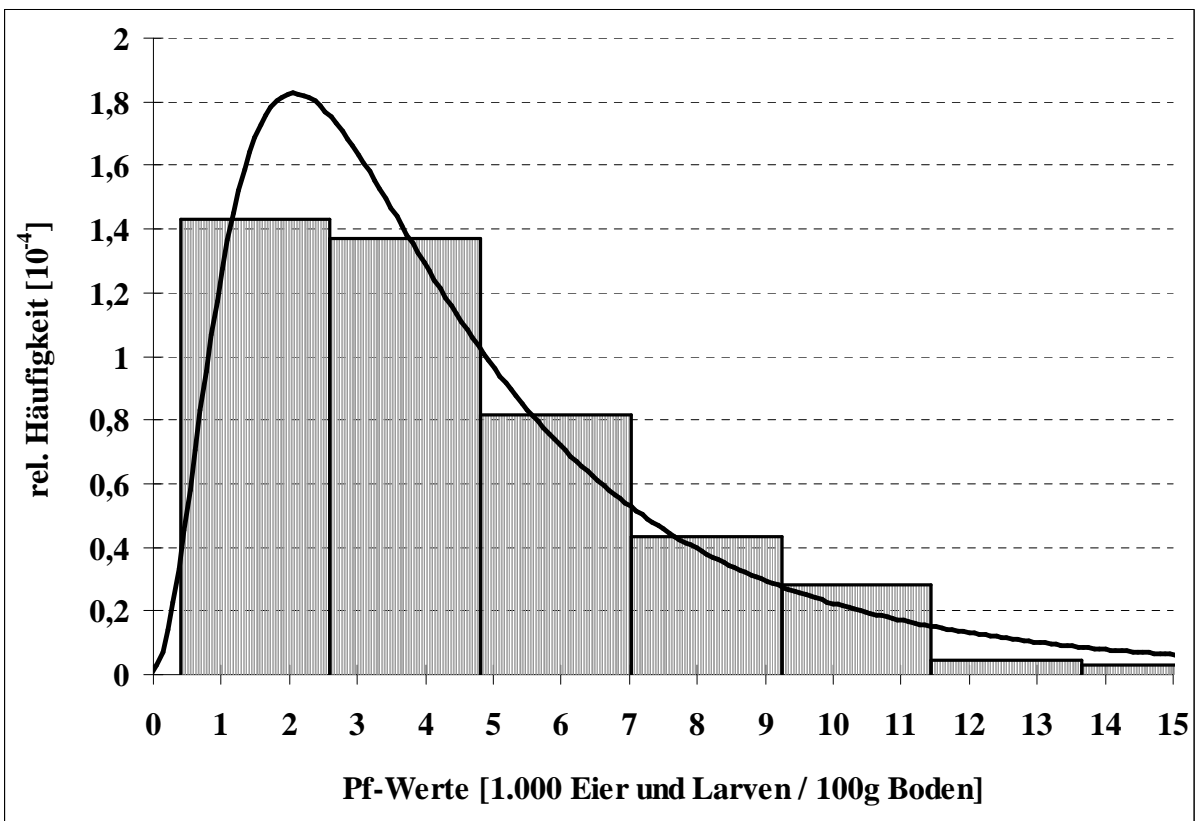
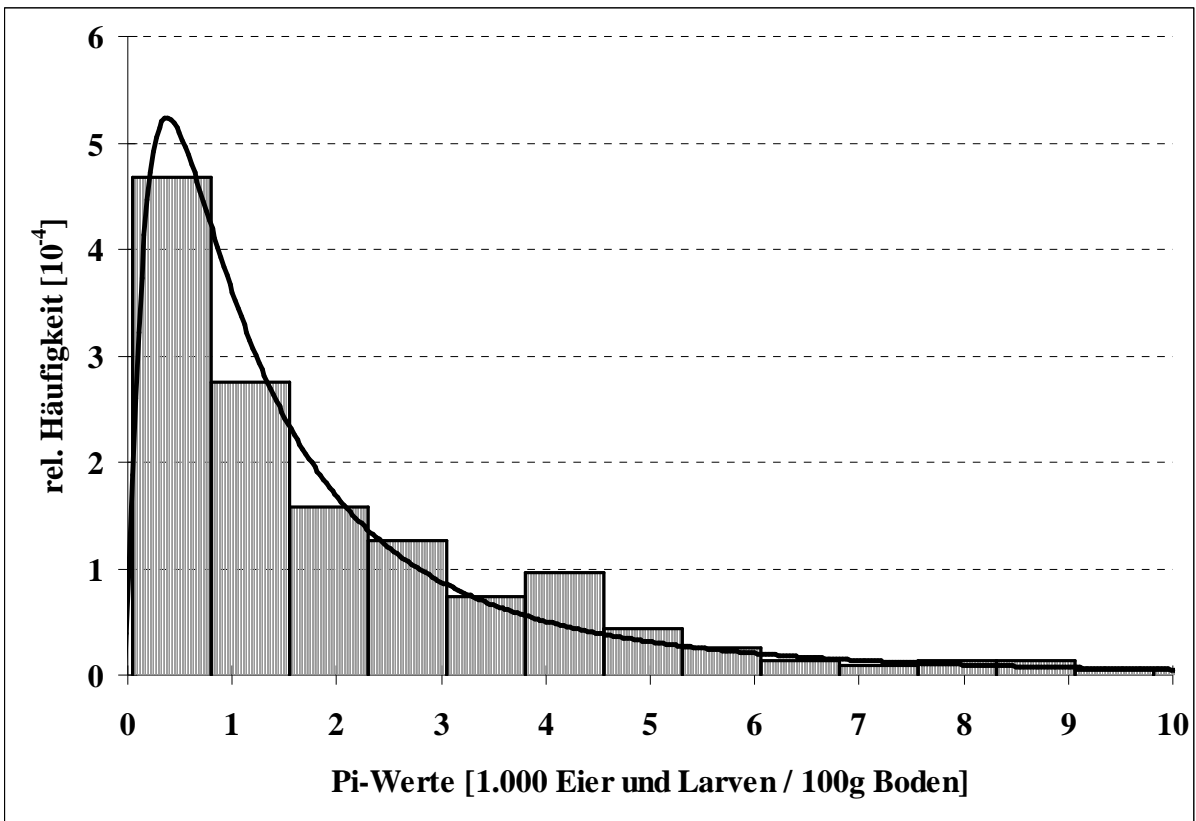
Anhang 20: Kalibrierte Parameter des Nematodenmodells

<u>Kulturfrucht</u>	<u>Modellparameter <i>a</i></u>	<u>Modellparameter <i>b</i></u>	<u>WVD (E+L/100g)</u>
Anfällige Zuckerrüben	1,0625759079	0,0071042756	5.133
Resistente Zuckerrüben	1,0204932151	0,0034231641	374
Resistente Kruziferen*:			
1. AS 1	1,0133483493	0,0044563845	20
2. AS „1,5“	1,0265542090	0,0055668708	112
3. AS 2	1,0344135079	0,0061668430	244
4. AS 3	1,0494512578	0,0073869918	694
Weitere anfällige Wirtspflanzen (z.B. Raps)	1,0701761758	0,0075769620	7.717
Nichtwirtspflanzen bzw. jährliche Abbauraten:			
1. 30% p.a.	0,9990227813	$3,8245440760 \cdot 10^{-16}$	
2. 40% p.a.	0,9986004389	$3,8258587829 \cdot 10^{-16}$	
3. 50% p.a.	0,9981009138	$3,8300699775 \cdot 10^{-16}$	
4. 60% p.a.	0,9974895446	$3,8408837153 \cdot 10^{-16}$	

* Parameter für die Begrünung der Flächenstilllegung bzw. Zwischenfruchtaussaat bis zur 2.Julidekade ($\eta=1,0$)

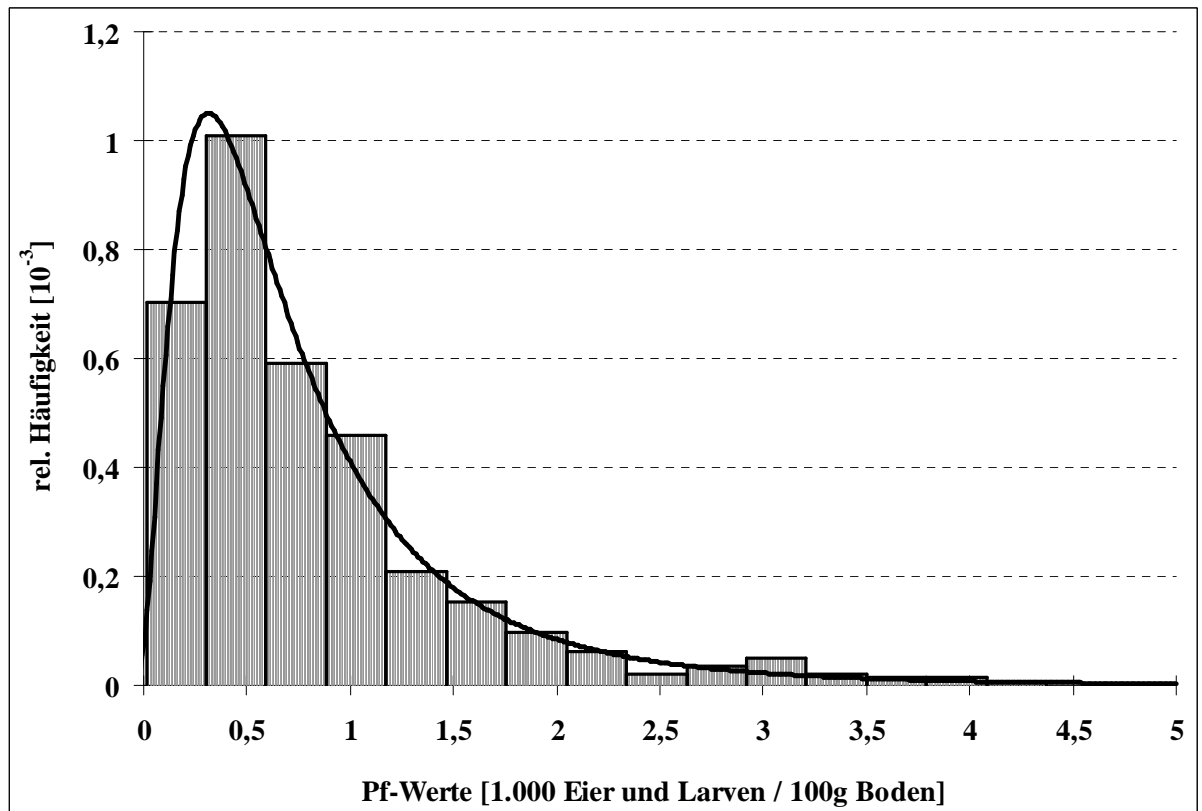
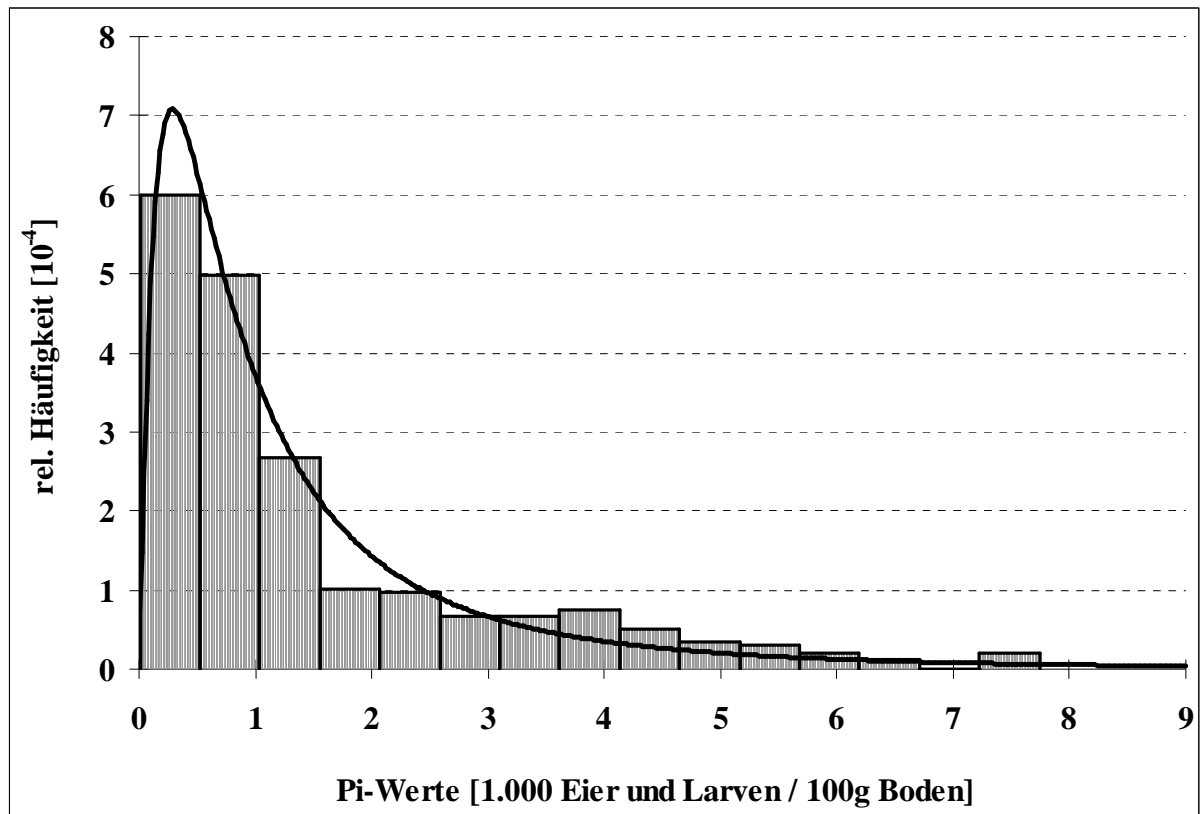
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 21: Verteilungen der Versuchsergebnisse der BBA, anfällige Rüben

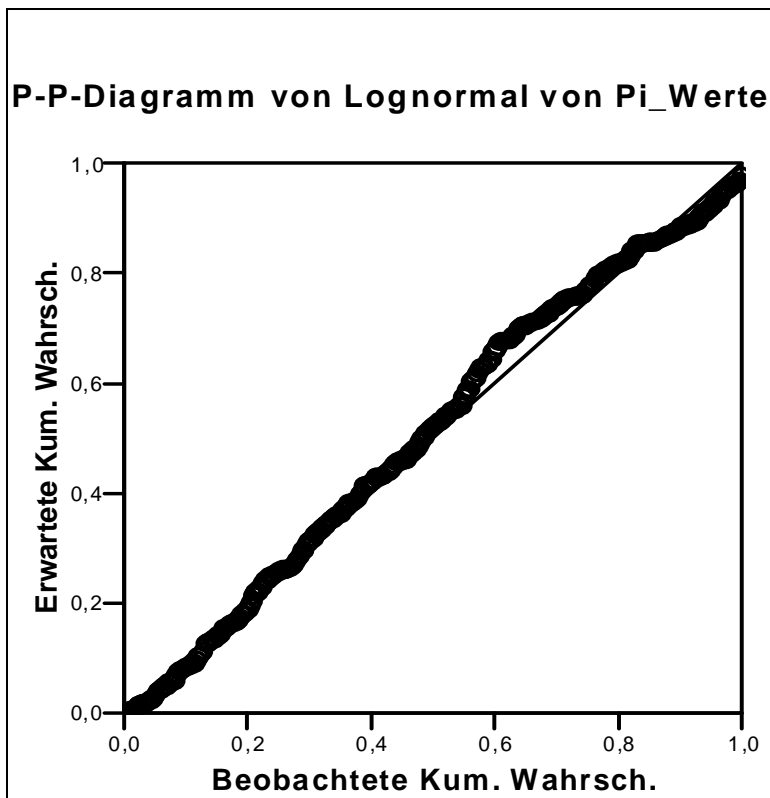
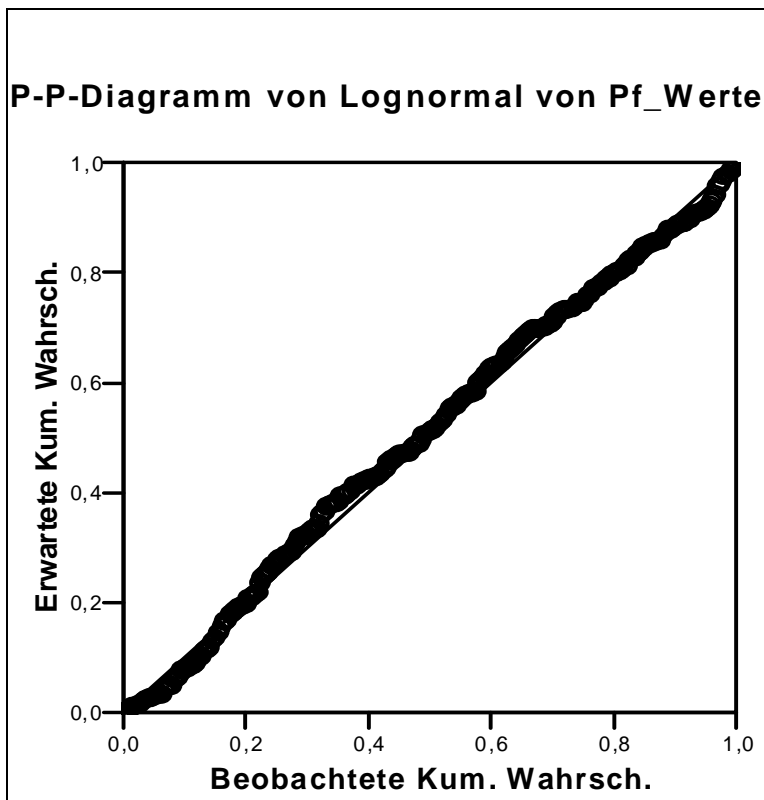


Quelle: Eigene Darstellung

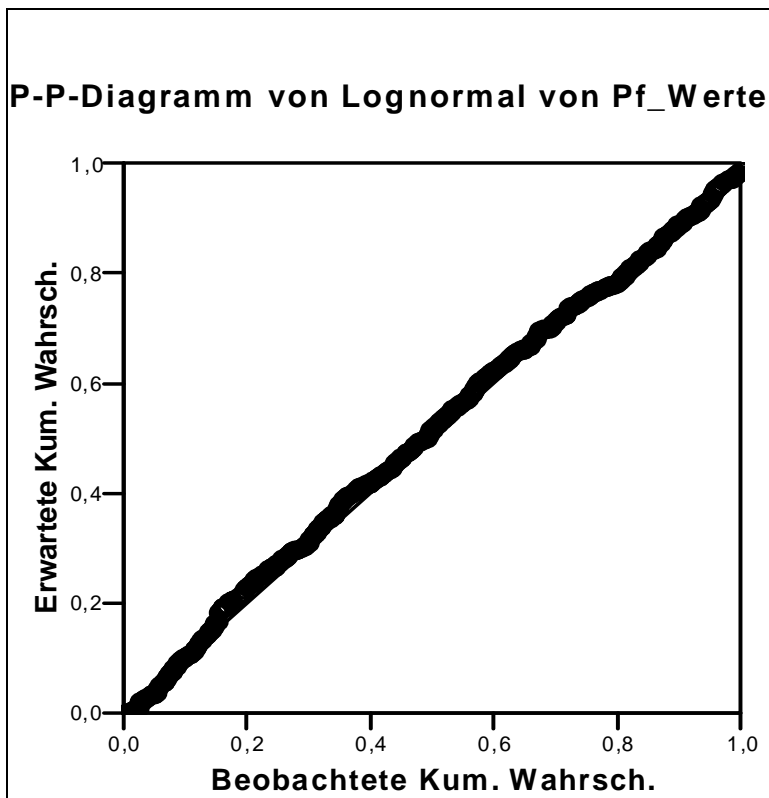
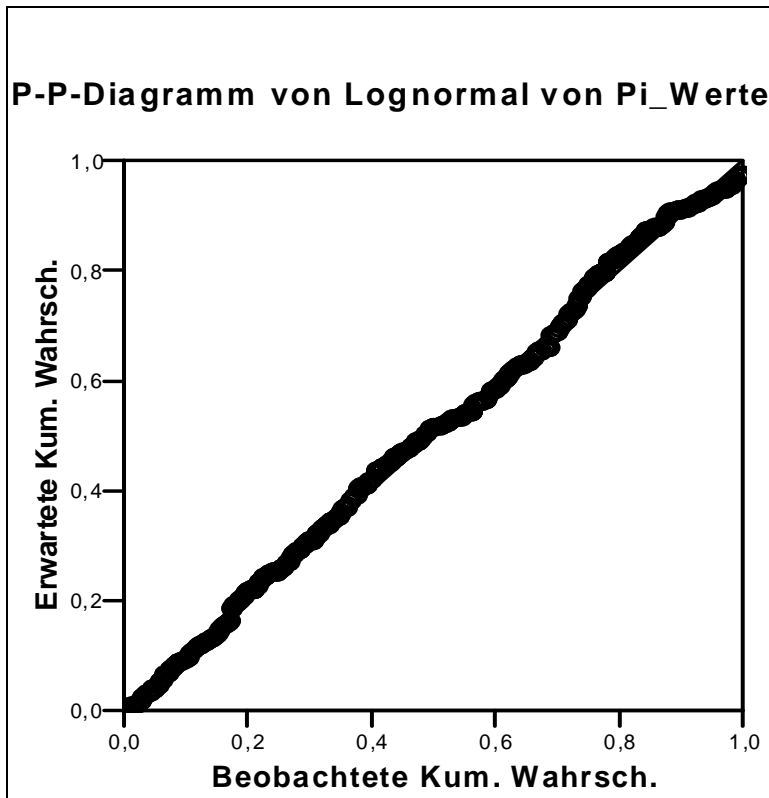
Anhang 22: Verteilungen der Versuchsergebnisse der BBA, resistente Rüben



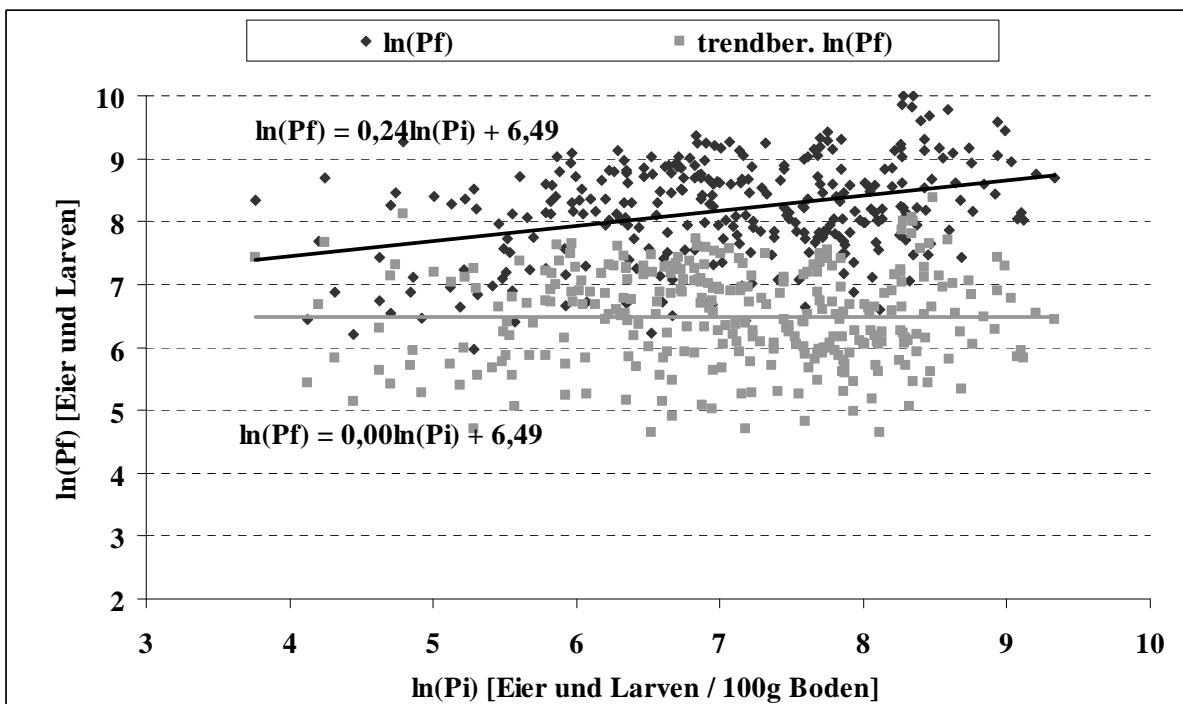
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 23: Lognormalverteilung der Versuchsergebnisse der BBA, anfällige Rüben

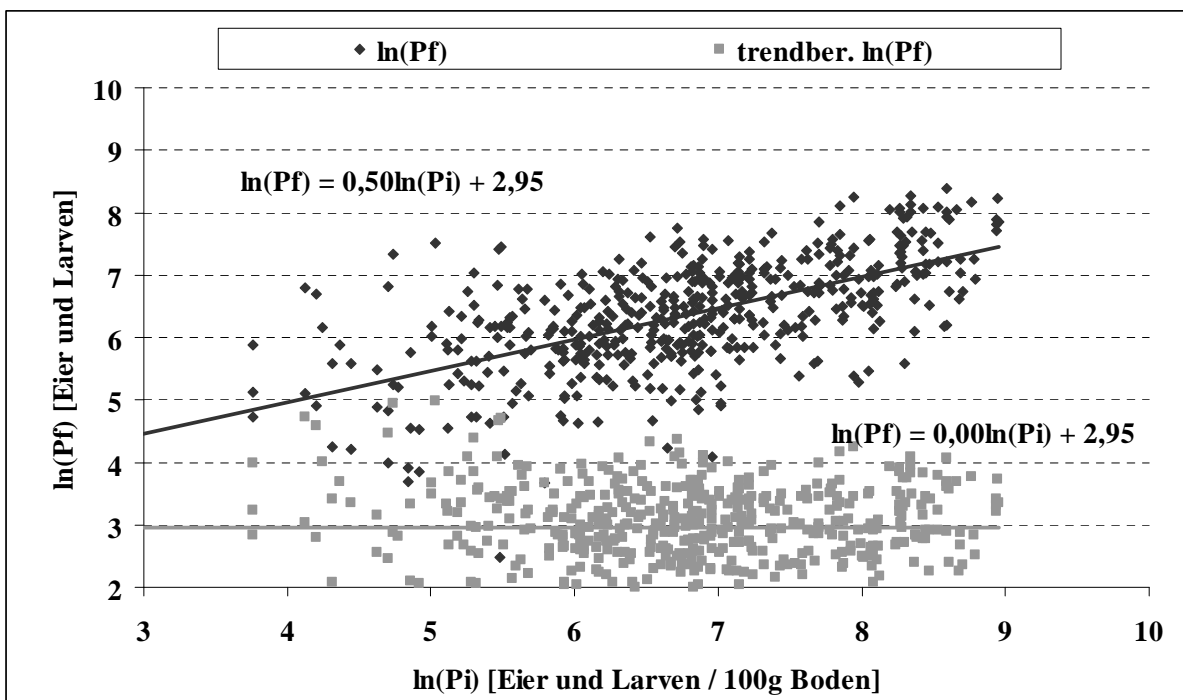
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 24: Lognormalverteilung der Versuchsergebnisse der BBA, resistente Rüben

Quelle: Eigene Darstellung

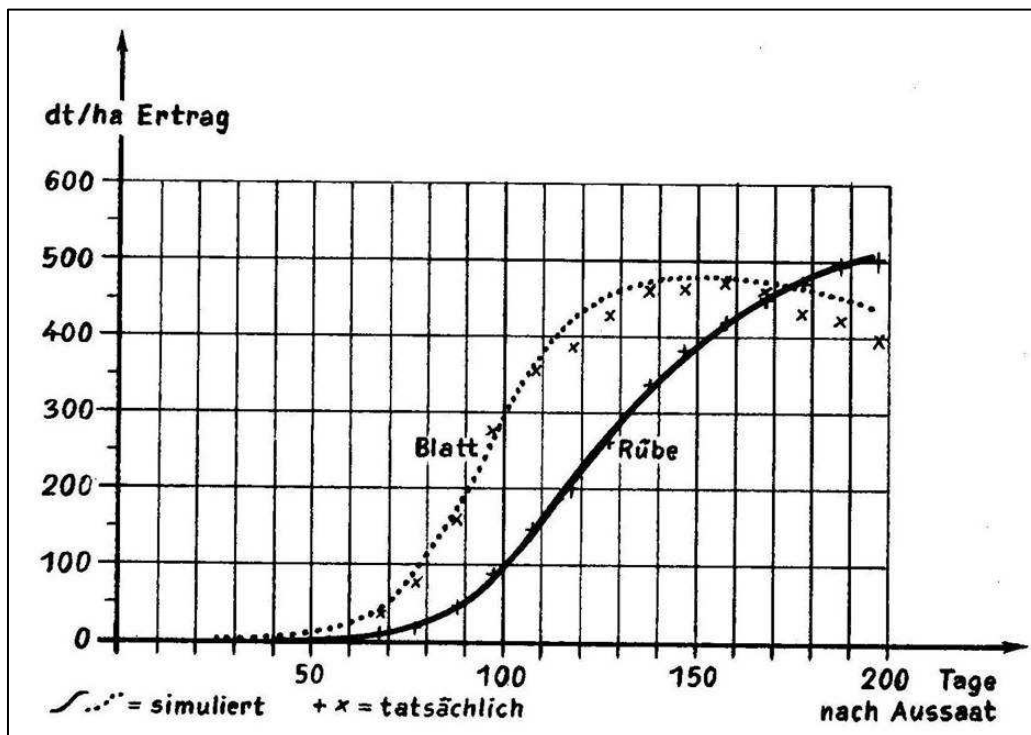
Anhang 25: Trendbereinigung der Versuchsergebnisse der BBA, anfällige Rüben

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 26: Trendbereinigung der Versuchsergebnisse der BBA, resistente Rüben

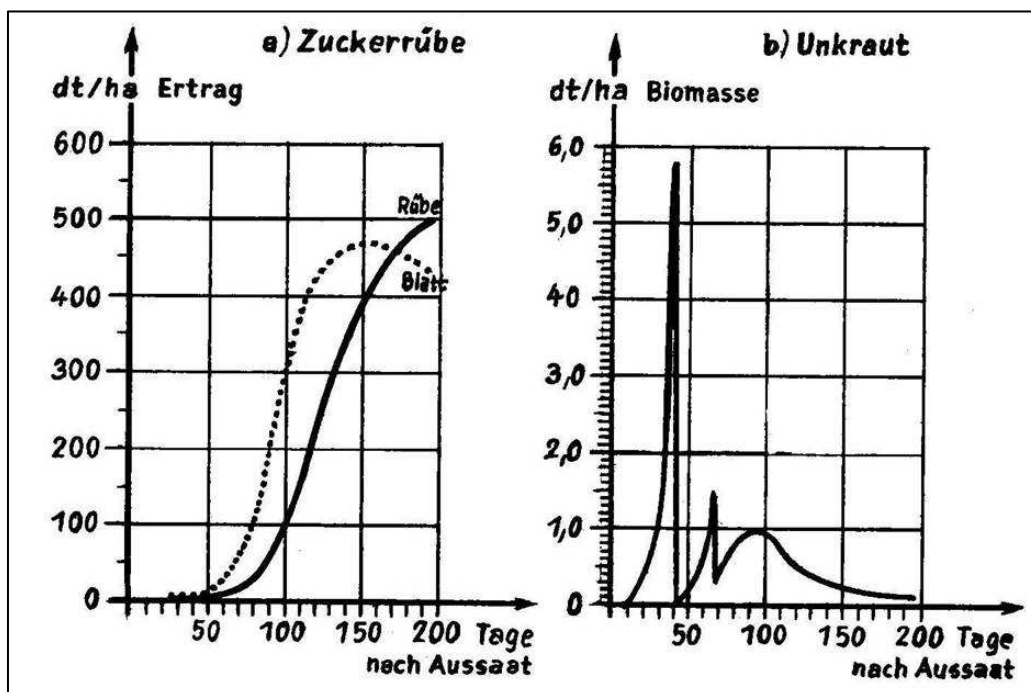
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 27: Wachstumsverlauf der Zuckerrüben im Modell von Thoer



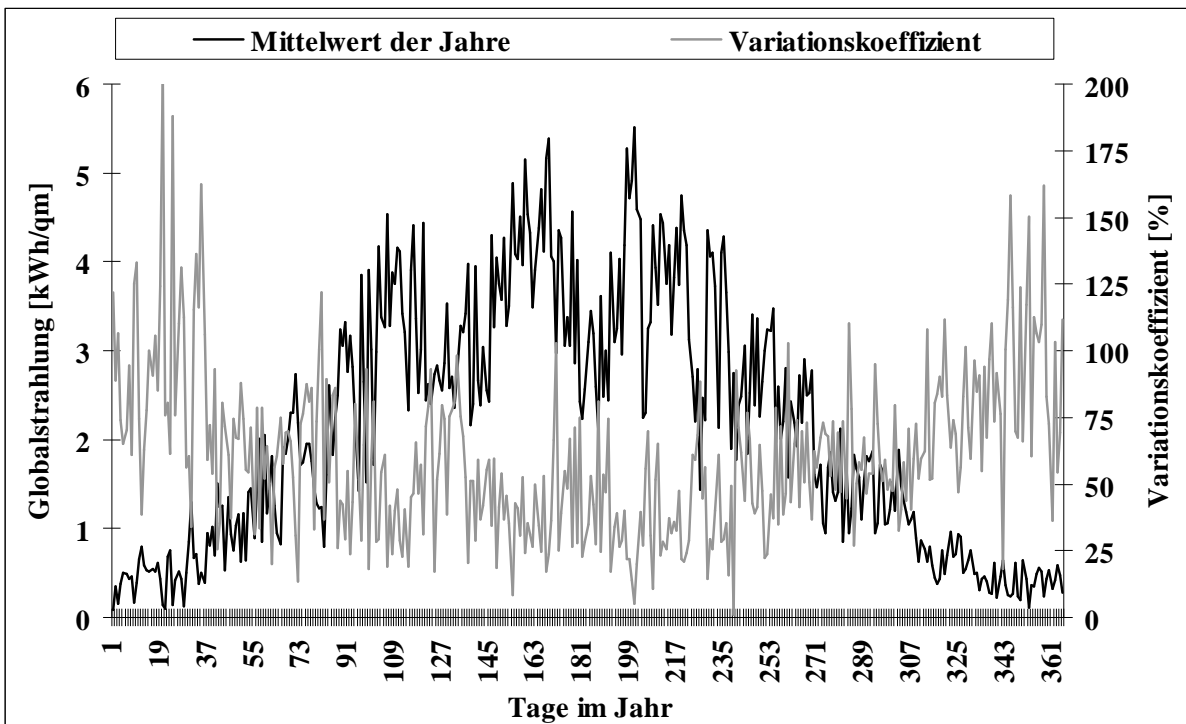
Quelle: THOER, 1986, S. 78

Anhang 28: Wachstumsverläufe bei zweimaliger Bekämpfung



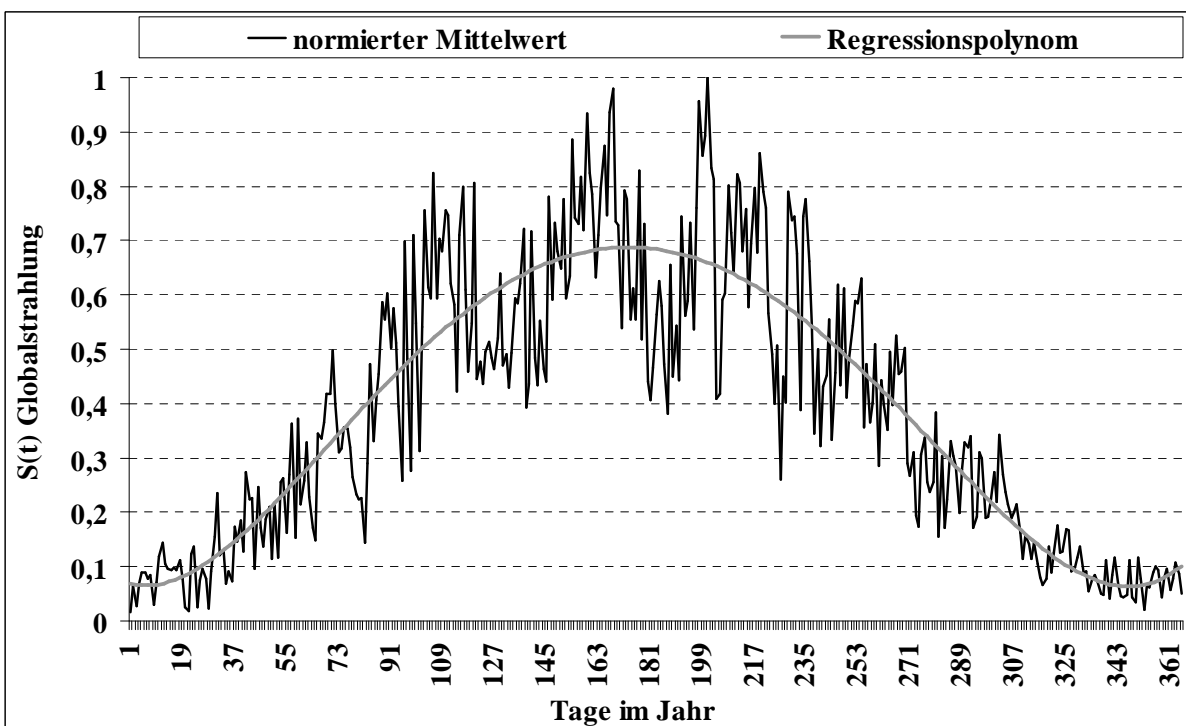
Quelle: THOER, 1986, S. 84

Anhang 29: Jahrgang der Globalstrahlung



Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang 30: Partialsaisonfigur Globalstrahlung



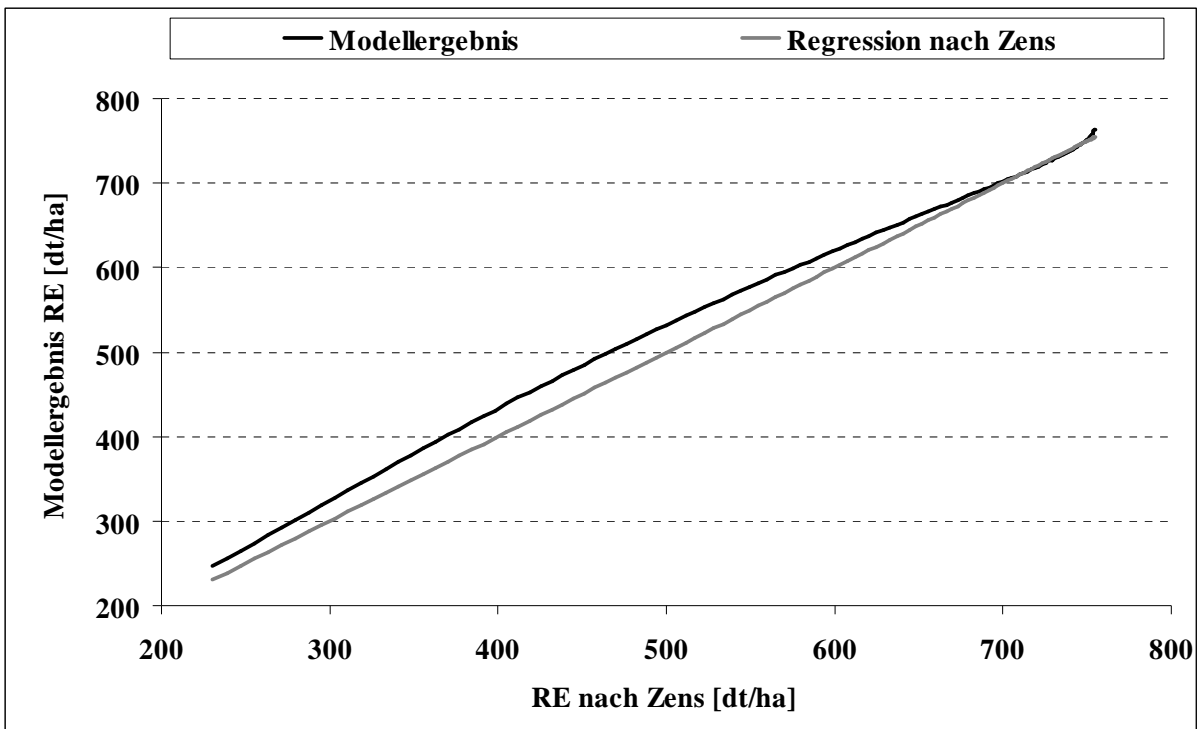
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang 31: Kalibrierte Parameter des Zuckerrübenmodells

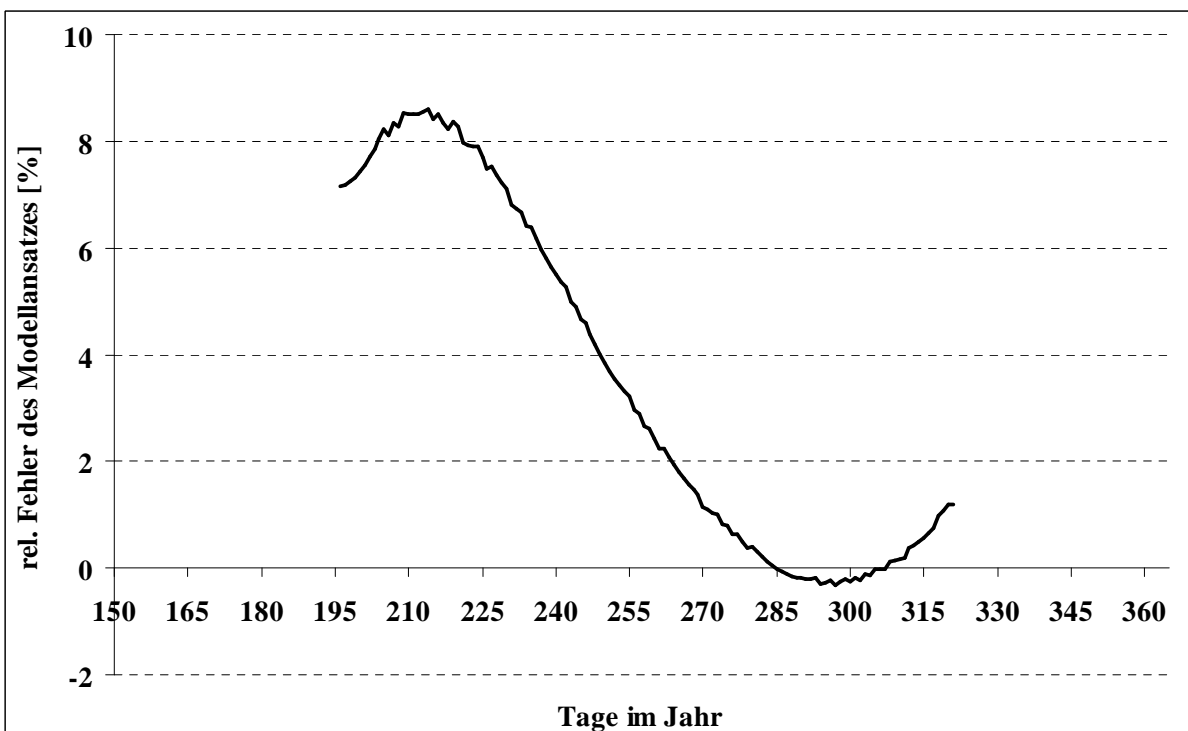
<u>Parameter</u>	<u>Variable</u>	<u>Einheit</u>	<u>Wert</u>
Startwert Biomasse Blatt	Y_Start	kg/Pflanze	0,002679
Maximale Zuwachsrates Blatt	g _Y	kg/Pflanze und Tag	0,110615
Eigenkonkurrenzfaktor Blatt	a _{YY}		0,194986
Abbaurates Blatt	w _Y	kg/Pflanze und Tag	0,008268
Maximales Einzelpflanzengewicht Blatt	K _Y	kg/Pflanze	1,616279
Maximale Zuwachsrates Rübe	g _R	kg/Pflanze und Tag	0,031685
Eigenkonkurrenzfaktor Rübe	a _{RR}		0,103695
Maximales Einzelpflanzengewicht Rübe	K _R	kg/Pflanze	1,875365
Bestandsdichte*	D _Y	Pflanzen/m ²	9,0
Auflaufdauer*	t _{Y_0}	Tage nach Saat	20
Vegetationsende*	t _{Ende}	Tag im Jahr	319

* Systemparameter, nicht kalibriert

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang 32: Verifikation des Zuckerrübenmodells, absolute Werte

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 33: Verifikation des Zuckerrübenmodells, relative Fehler

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 34: Modelloutput bei Ernte am 24. Oktober je nach Aussaatzeit

<u>Aussaat</u>	<u>RE (dt/ha)</u>	<u>ZG (%)</u>	<u>AV (%)</u>	<u>BZE (dt/ha)</u>	<u>BZE relativ</u>
10. Mrz	757,54	17,52	2,14	116,51	100,93
20. Mrz	750,59	17,52	2,14	115,44	100,00
30. Mrz	741,70	17,52	2,14	114,07	98,82
09. Apr	730,4	17,52	2,14	112,34	97,31
19. Apr	716,08	17,52	2,14	110,13	95,40
29. Apr	697,93	17,52	2,14	107,34	92,98
09. Mai	674,78	17,52	2,14	103,78	89,90

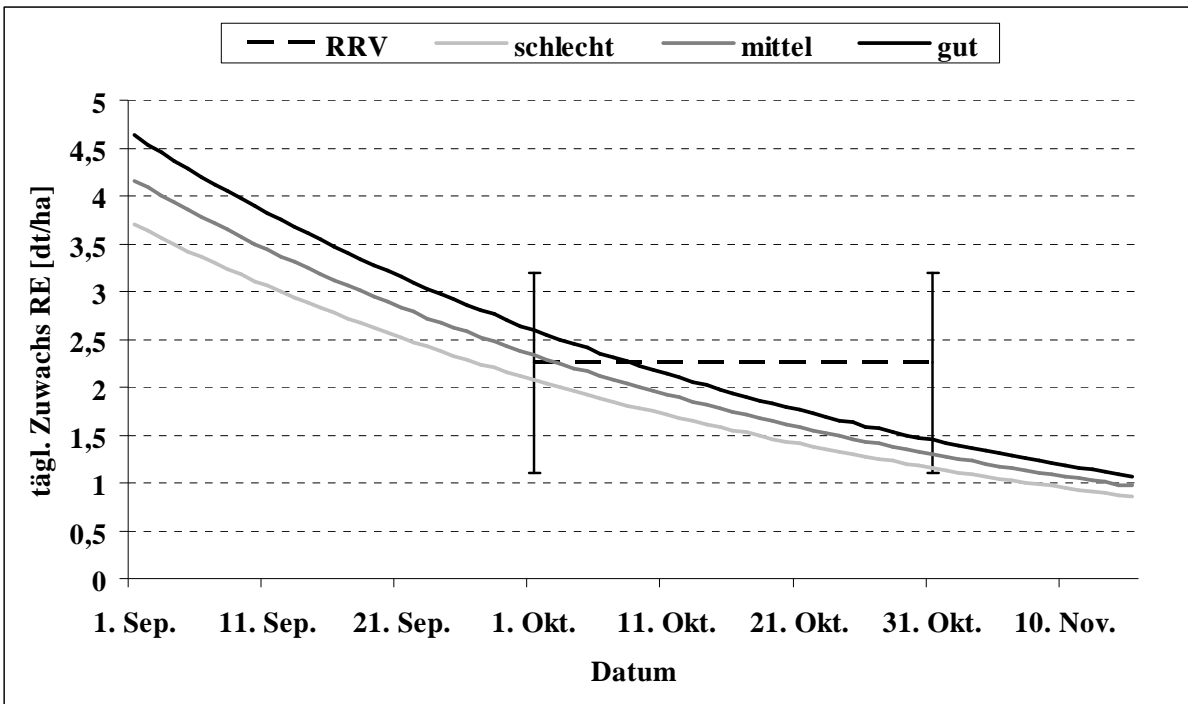
Quelle: Eigene Berechnungen, Abkürzungen siehe **Abschnitt 4.4.1**

Anhang 35: Modelloutput bei Ernte am 24. September je nach Aussaatzeit

<u>Aussaat</u>	<u>RE (dt/ha)</u>	<u>ZG (%)</u>	<u>AV (%)</u>	<u>BZE (dt/ha)</u>	<u>BZE relativ</u>
10. Mrz	699,19	16,85	2,16	102,71	101,87
20. Mrz	686,37	16,85	2,16	100,83	100,00
30. Mrz	669,95	16,85	2,16	98,42	97,61
09. Apr	649,10	16,85	2,16	95,35	94,57
19. Apr	622,71	16,85	2,16	91,48	90,73
29. Apr	589,28	16,85	2,16	86,57	85,85
09. Mai	546,81	16,85	2,16	80,33	79,67

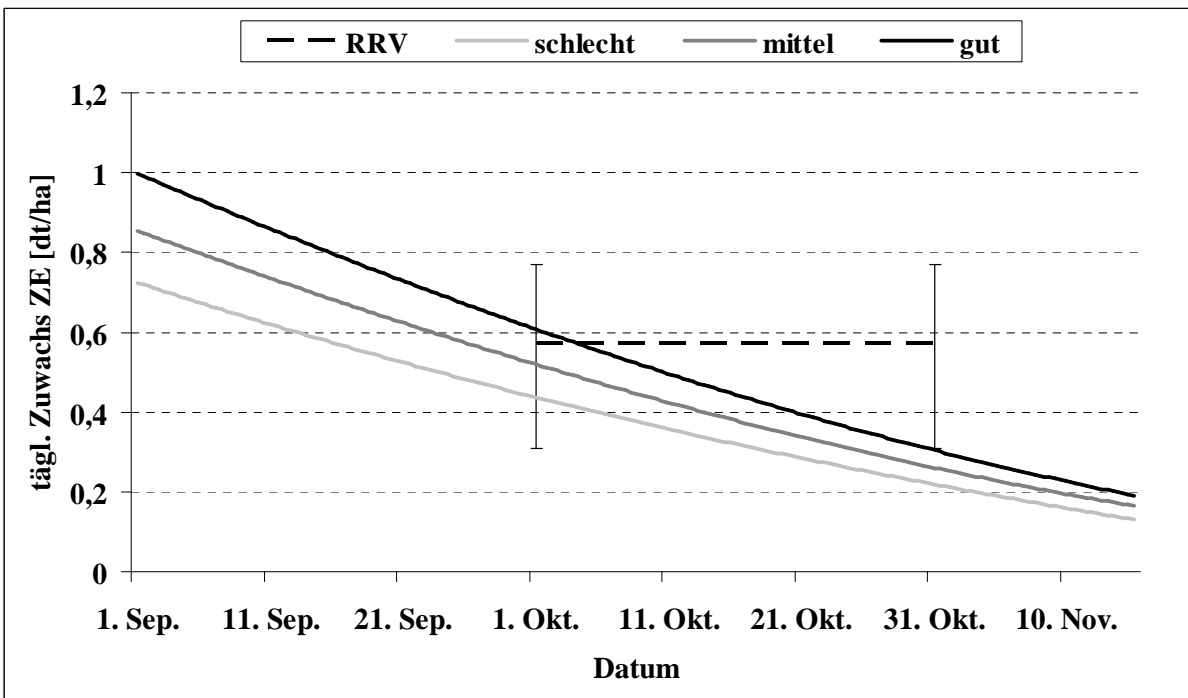
Quelle: Eigene Berechnungen, Abkürzungen siehe **Abschnitt 4.4.1**

Anhang 36: Zuwachsraten des Rübenenertrags im Vergleich



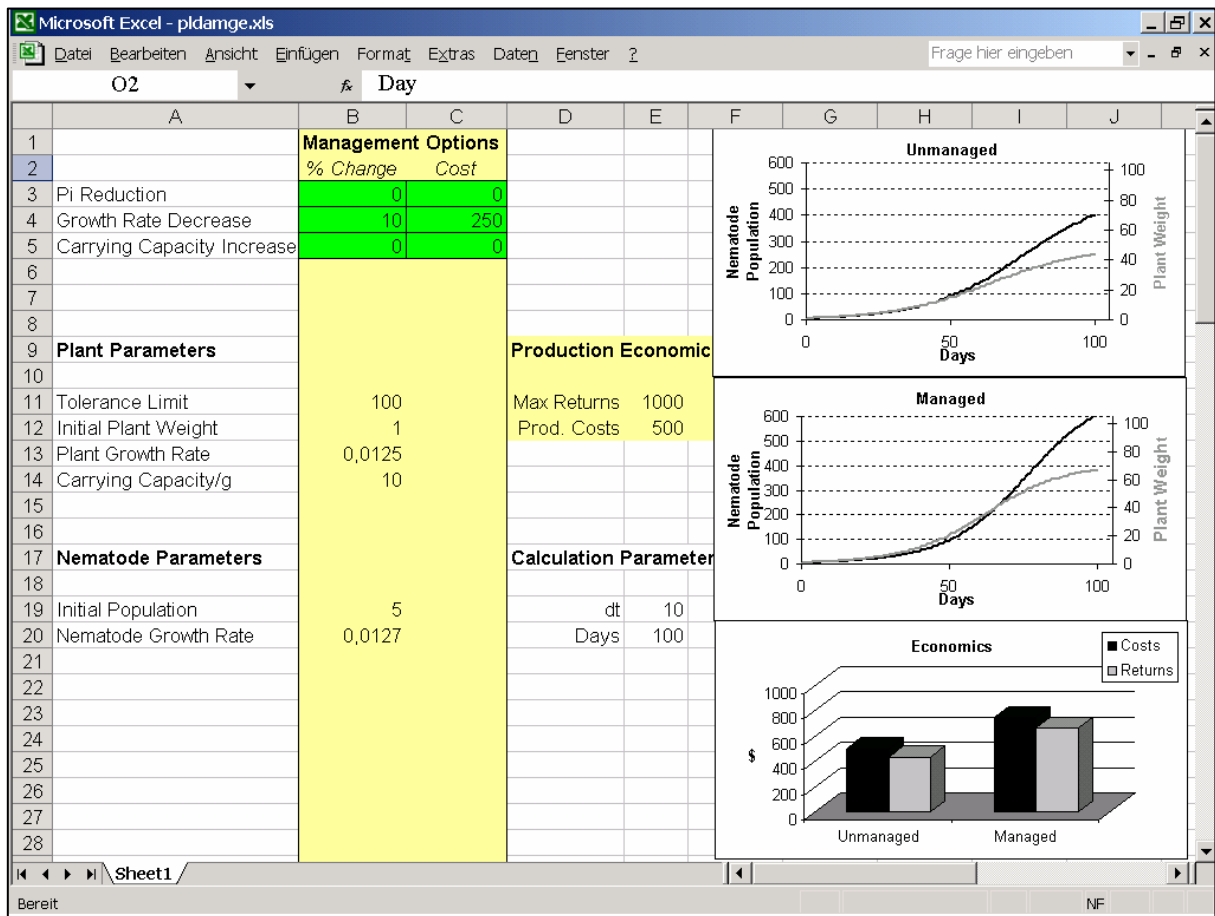
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 37: Zuwachsraten des Zuckerertrags im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 38: Nemaplex Managementsimulator



Quelle: FERRIS, 1999-2004

Anhang 39: Diskreter Befall-Schadens-Ansatz des Pflanzenschutzdienstes

<u>Befalls-grad</u>	<u>P_i -Wert (E+L/100g)</u>	<u>Infektionsgrad/ Schadbild</u>	<u>Ertragsverluste (%)</u>	<u>Strategie</u>
O	0	Kein Befall	0	
I	1-250	leicht	0	
II	251-500	leicht, erste Nester	1-5	Regelmäßige Befallskontrollen notwendig
III	501-1000	mäßig/mittel, deutliche Nester	6-15	Resistente Kreuziferen als Zwischenfrucht notwendig
IV	1001-2500	schwer, große Nester	16-30	Hochresistenter Ölrettich, Juliaussaat oder auf Brache, Anbau resistenter ZR-Sorten ratsam
V	>2500	sehr schwer, flächiger Befall	>30	Siehe IV und Fruchtfolge anpassen

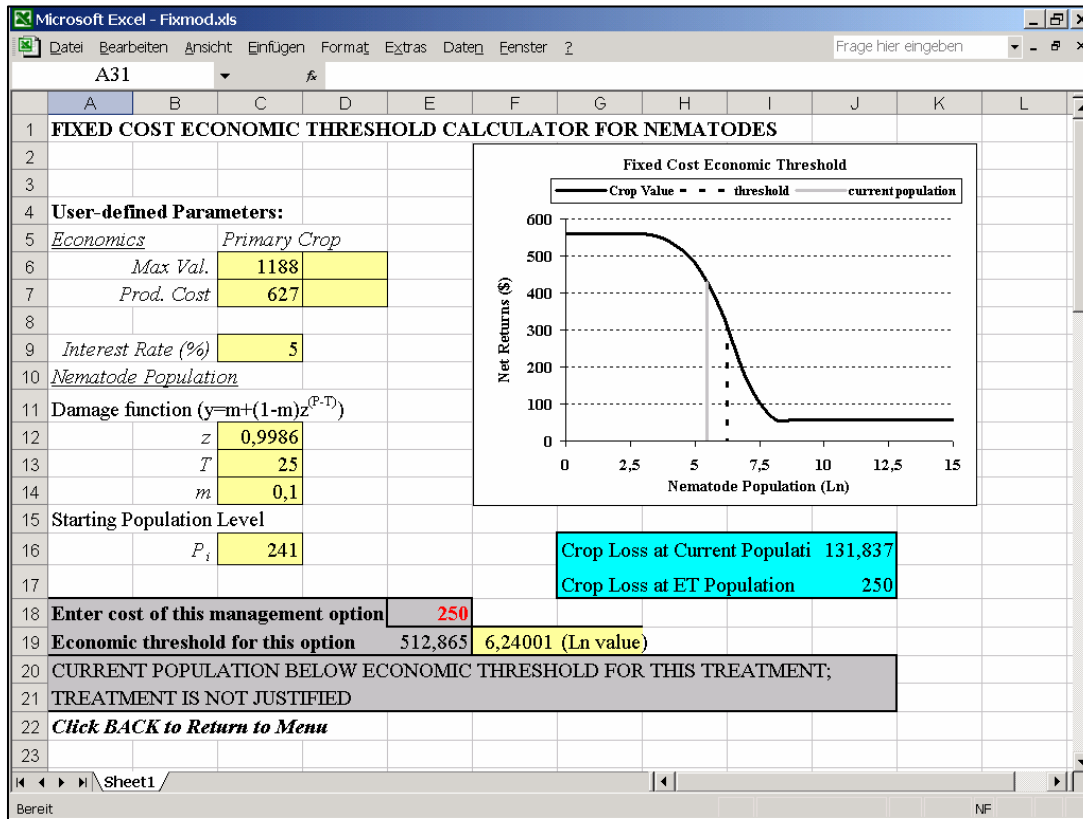
Quelle: HEINRICHS, 2002, S. 38

Anhang 40: Diskreter Befall-Schadens-Ansatz des Bodengesundheitsdienstes

<u>Befallsstufe: (Bio-Test-Verfahren):</u>	<u>Maßnahmen</u>
0 ohne Befall	Rübenanbau nach den Bestimmungen des Rübenlieferungsvertrages (höchstens alle 3 Jahre), als Vorbeugungsmaßnahme Anbau einer nematodenresistenten Zwischenfrucht
1 leichter Befall (1-10 Zysten)	3 Jahre keinen Rübenanbau, sonst Ertragsverluste bis zu 20 %; 3 jähriger Zuckerrübenanbau nur mit Anbau einer nematodenresistenten Zwischenfrucht
2 starker Befall (> 10 Zysten)	5 Jahre keinen Rübenanbau, sonst Ertragsverluste über 20 %; 4 jähriger Zuckerrübenanbau nur mit zweimaligem Anbau einer nematodenresistenten Zwischenfrucht

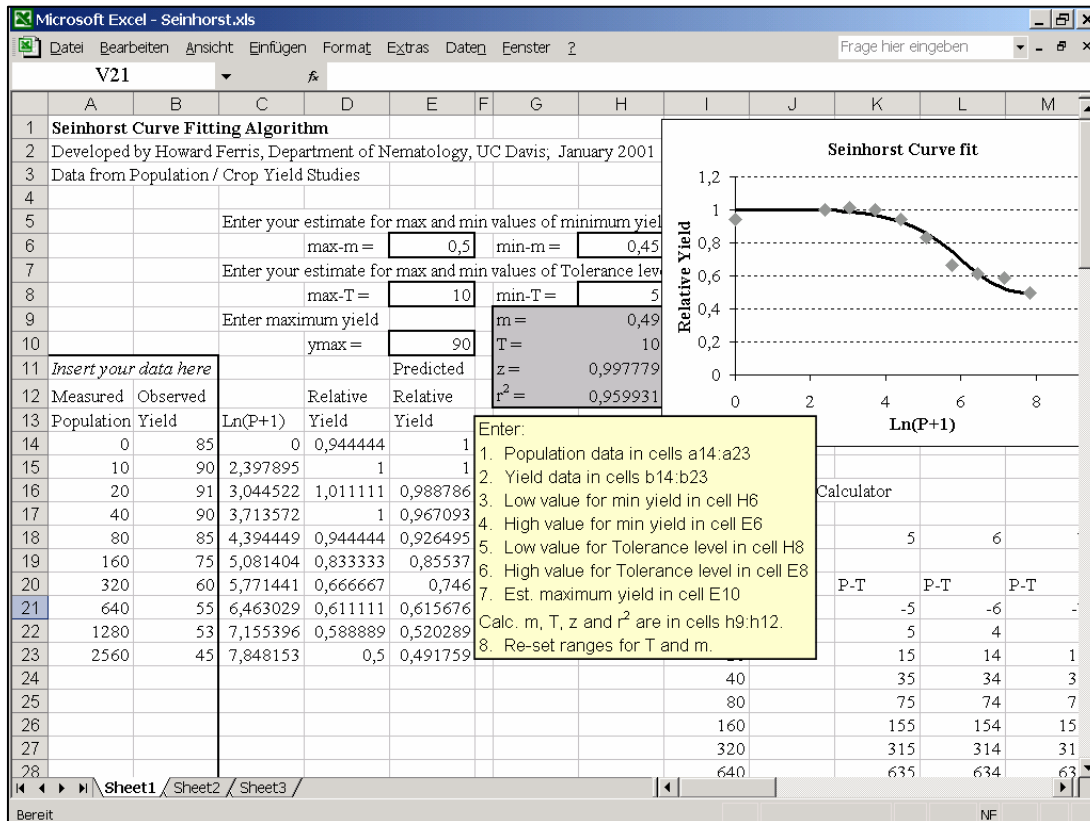
Quelle: BODENGEUNDHEITSDIENST, 2004

Anhang 41: Nemaplex Kalkulator für die ökonomische Schadschwelle

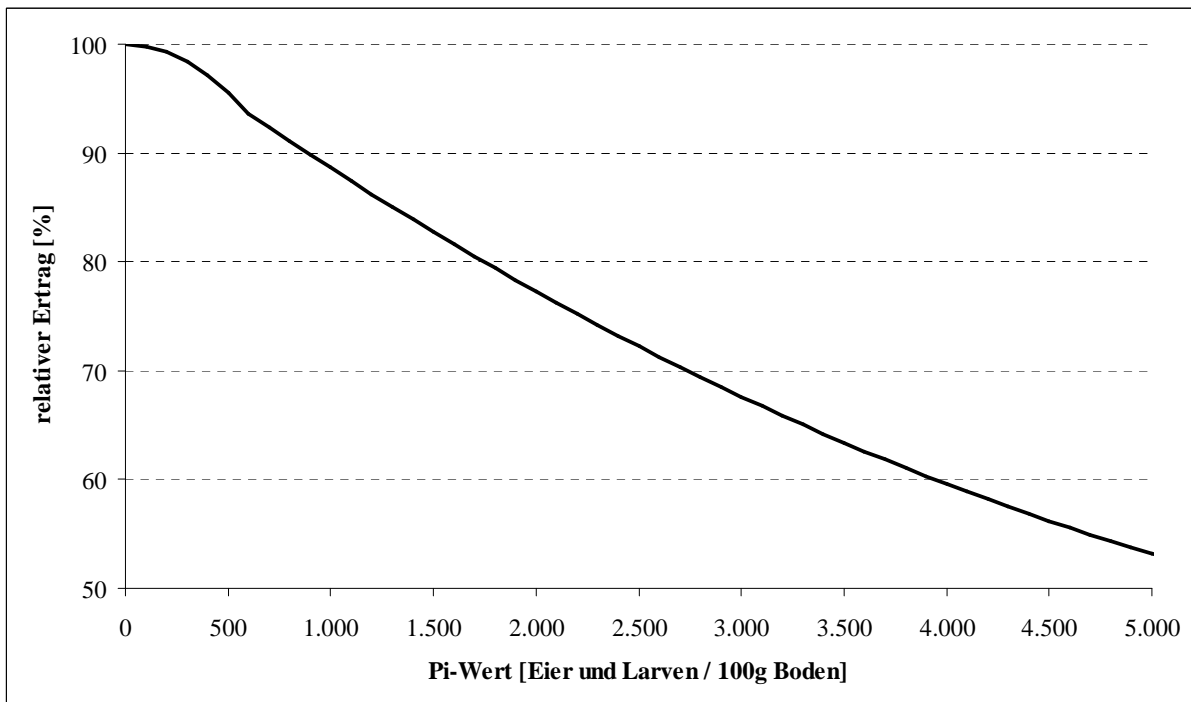


Quelle: FERRIS, 1999-2004

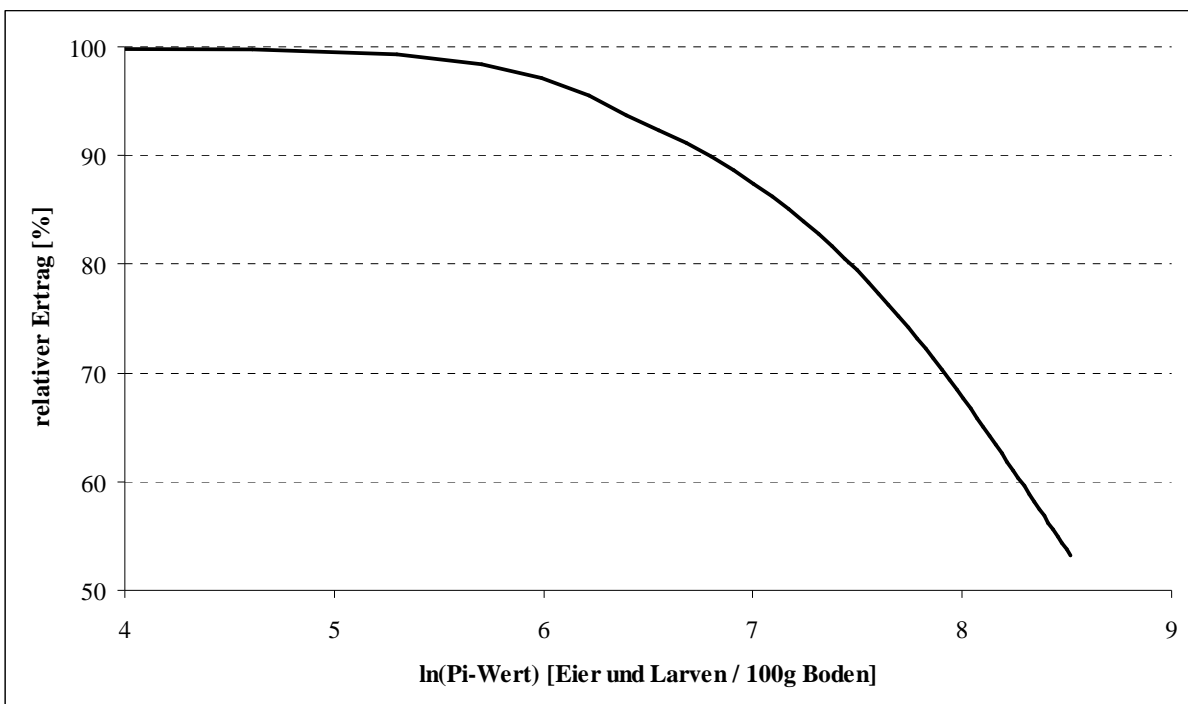
Anhang 42: Nemaplex Parameterschätzung für den Seinhorst-Ansatz



Quelle: FERRIS, 1999-2004

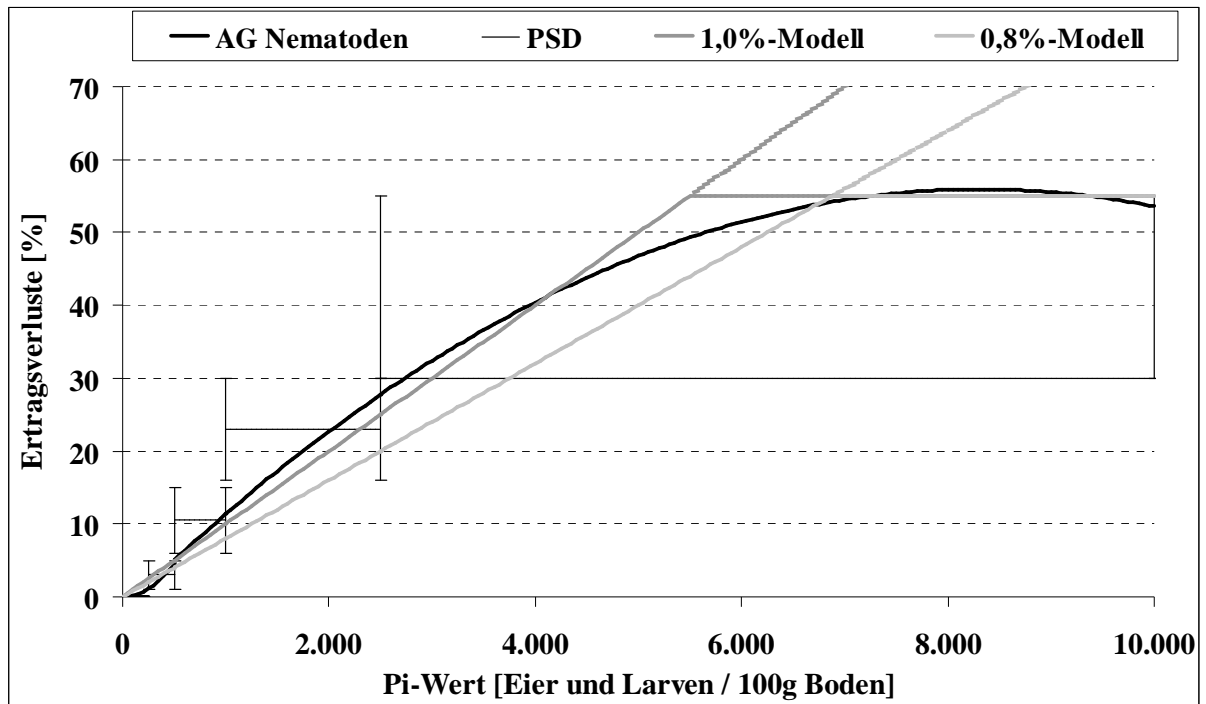
Anhang 43: Schadensfunktion der AG Nematoden

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 44: Schadensfunktion der AG Nematoden, logarithmierte P_i -Werte

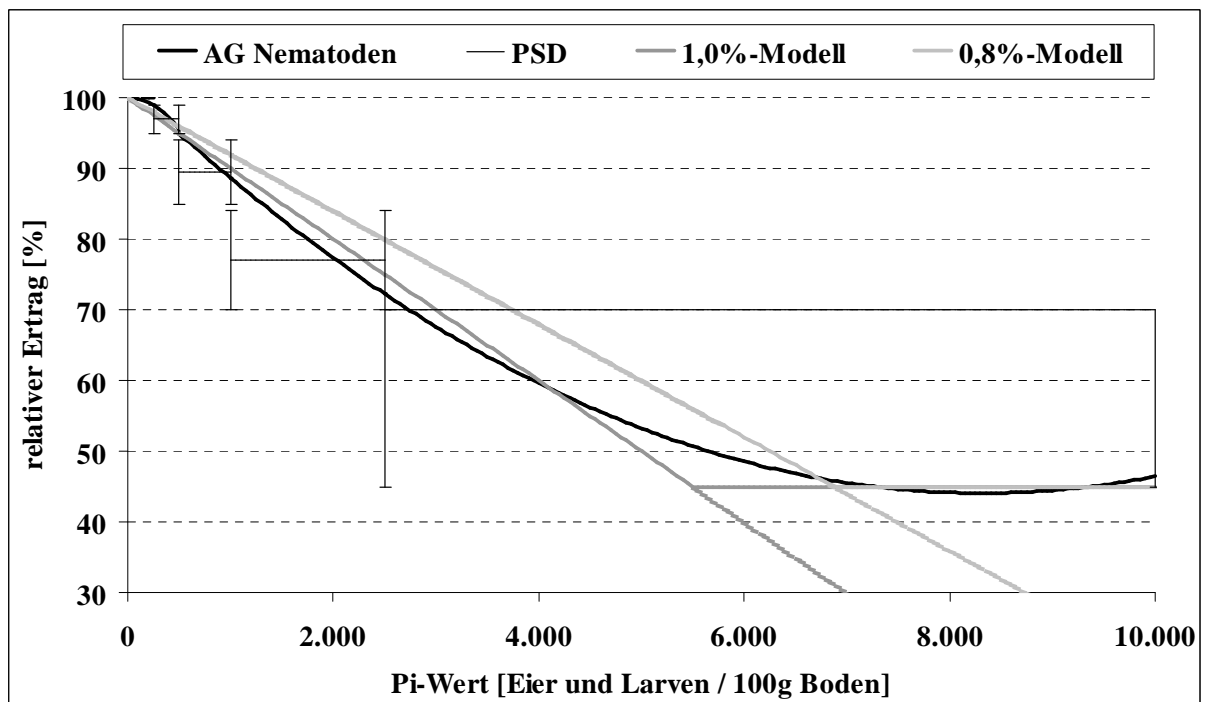
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 45: Verschiedene Schadensfunktionen im Vergleich



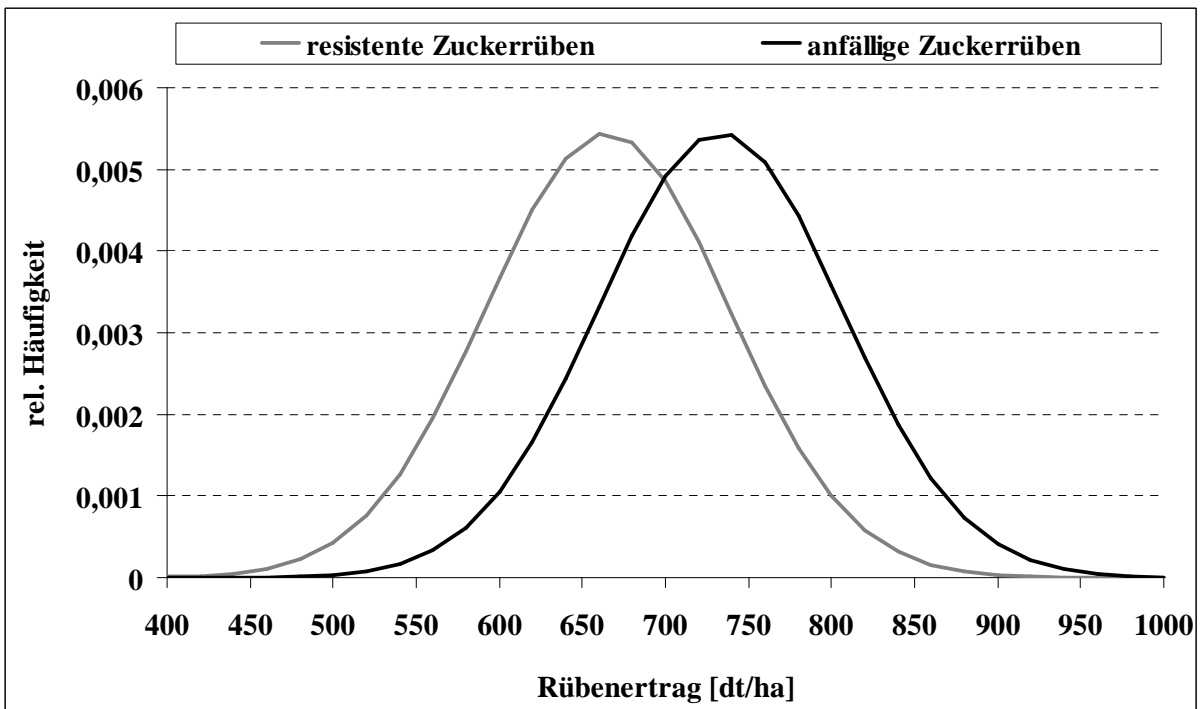
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 46: Entwicklung des Ertrags bei verschiedenen Schadensfunktionen



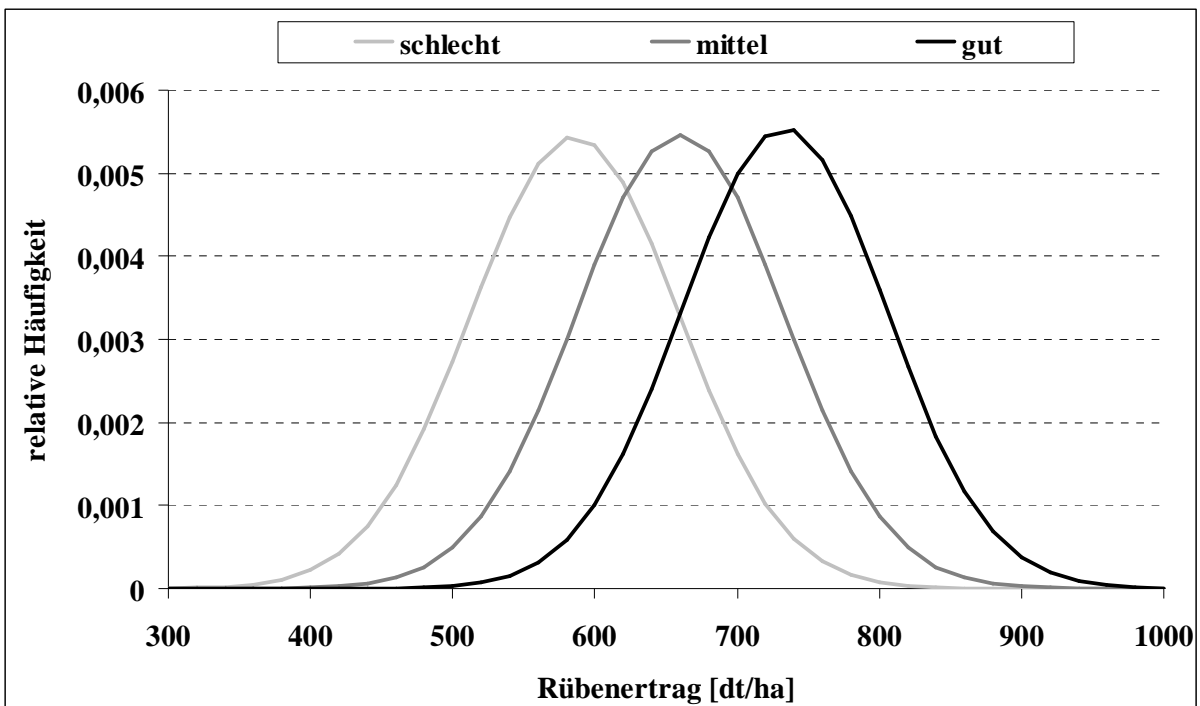
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 47: Ertragsverteilungen der Zuckerrüben im stochastischen Modellansatz



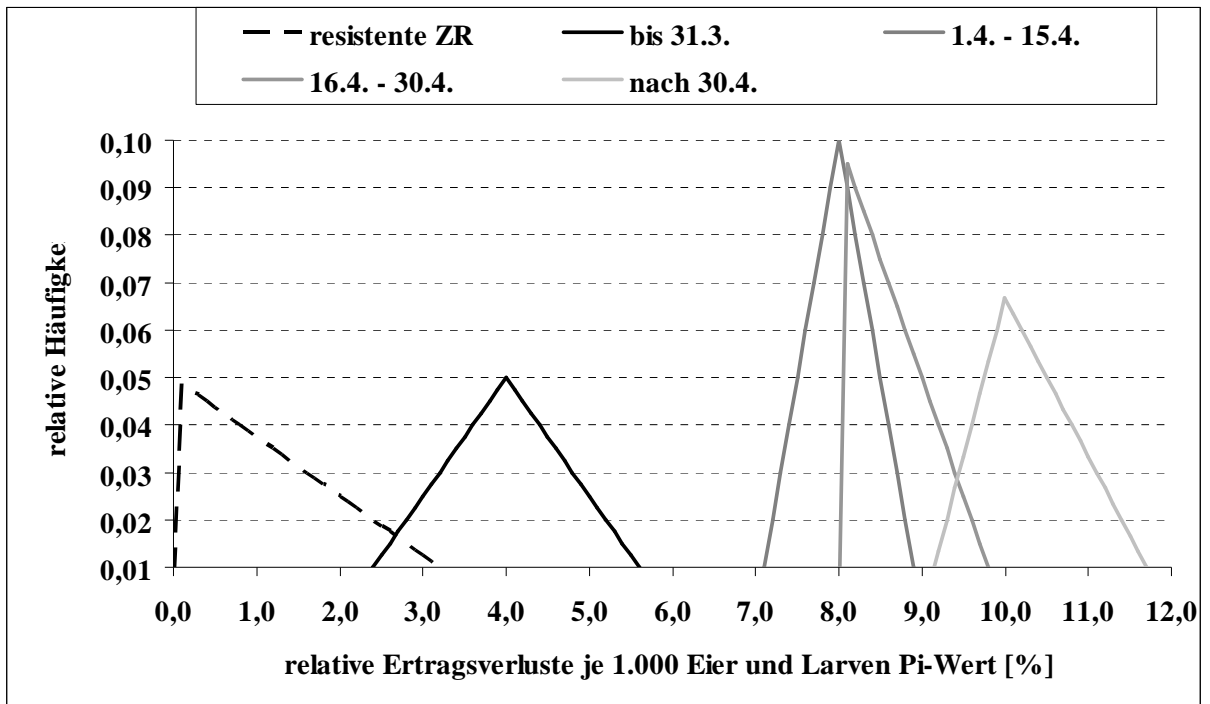
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 48: Ertragsverteilungen anfälliger Zuckerrüben je nach Produktionsort



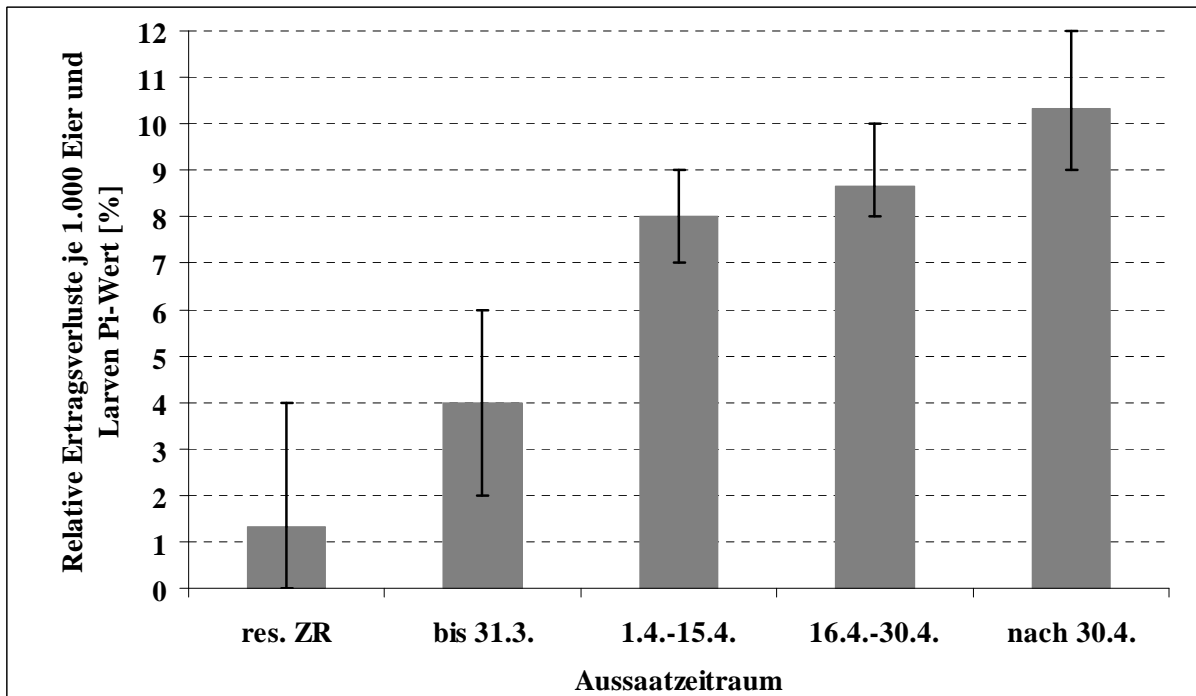
Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 49: Dichtefunktionen der Befall-Schadens-Relationen nach Aussaatzeitraum



Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 50: Erwartungswert, Minimum und Maximum der Ertragsdepressionen



Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 51: Anpassung des betrieblichen Lieferrechts an den Zuckergehalt

<u>ZG (%)</u>	<u>Quote, relativ</u>	<u>ZG (%)</u>	<u>Quote, relativ</u>
14,0	116,9	16,6	95,8
14,1	116,0	16,7	95,2
14,2	115,0	16,8	94,5
14,3	114,0	16,9	93,9
14,4	113,1	17,0	93,2
14,5	112,2	17,1	92,6
14,6	111,3	17,2	92,0
14,7	110,4	17,3	91,4
14,8	109,5	17,4	90,8
14,9	108,7	17,5	90,2
15,0	107,8	17,6	89,6
15,1	107,0	17,7	89,0
15,2	106,2	17,8	88,5
15,3	105,3	17,9	87,9
15,4	104,5	18,0	87,3
15,5	103,8	18,1	86,8
15,6	103,0	18,2	86,3
15,7	102,2	18,3	85,7
15,8	101,5	18,4	85,2
15,9	100,7	18,5	84,7
16,0	100,0	18,6	84,1
16,1	99,3	18,7	83,6
16,2	98,6	18,8	83,1
16,3	97,9	18,9	82,6
16,4	97,2	19,0	82,1
16,5	96,5		

Quelle: PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 1

Anhang 52: Anpassung des Rübenpreises an den Zuckergehalt

<u>ZG (%)</u>	<u>Preis, relativ</u>	<u>ZG (%)</u>	<u>Preis, relativ</u>
14,0	82,0	16,6	105,4
14,1	82,9	16,7	106,3
14,2	83,8	16,8	107,2
14,3	84,7	16,9	108,1
14,4	85,6	17,0	109,0
14,5	86,5	17,1	109,9
14,6	87,4	17,2	110,8
14,7	88,3	17,3	111,7
14,8	89,2	17,4	112,6
14,9	90,1	17,5	113,5
15,0	91,0	17,6	114,4
15,1	91,9	17,7	115,3
15,2	92,8	17,8	116,2
15,3	93,7	17,9	117,1
15,4	94,6	18,0	118,0
15,5	95,5	18,1	118,9
15,6	96,4	18,2	119,8
15,7	97,3	18,3	120,7
15,8	98,2	18,4	121,6
15,9	99,1	18,5	122,5
16,0	100,0	18,6	123,4
16,1	100,9	18,7	124,3
16,2	101,8	18,8	125,2
16,3	102,7	18,9	126,1
16,4	103,6	19,0	127,0
16,5	104,5		

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 2

Anhang 53: Staffel zur Berechnung der Qualitätsprämie

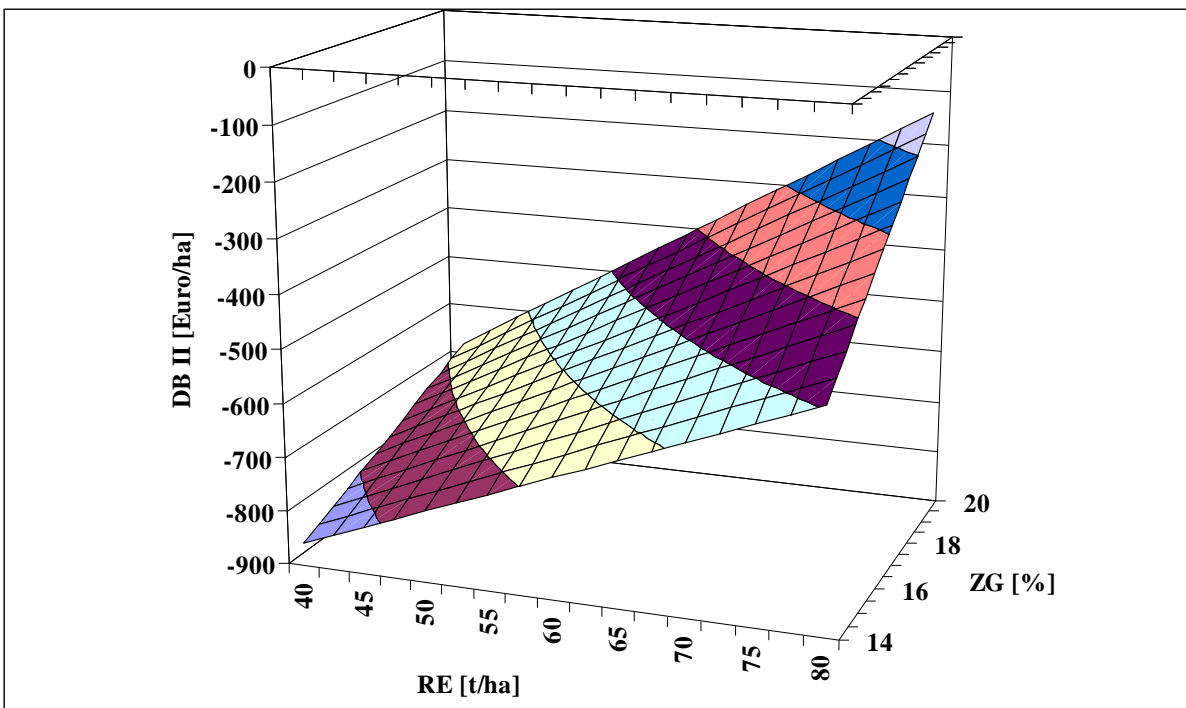
<u>AV (%)</u>	<u>Prämie (Euro/t)</u>
2,45	0,00
2,40	0,05
2,35	0,10
2,30	0,18
2,25	0,26
2,20	0,36
2,15	0,46
2,10	0,59
2,05	0,72
2,00	0,87
1,95	1,02
1,90	1,20
1,85	1,38
1,80	1,59
1,75	1,79
1,70	2,02
1,65	2,25
1,60	2,51
1,55	2,76
1,50	3,04

Quelle: PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 2

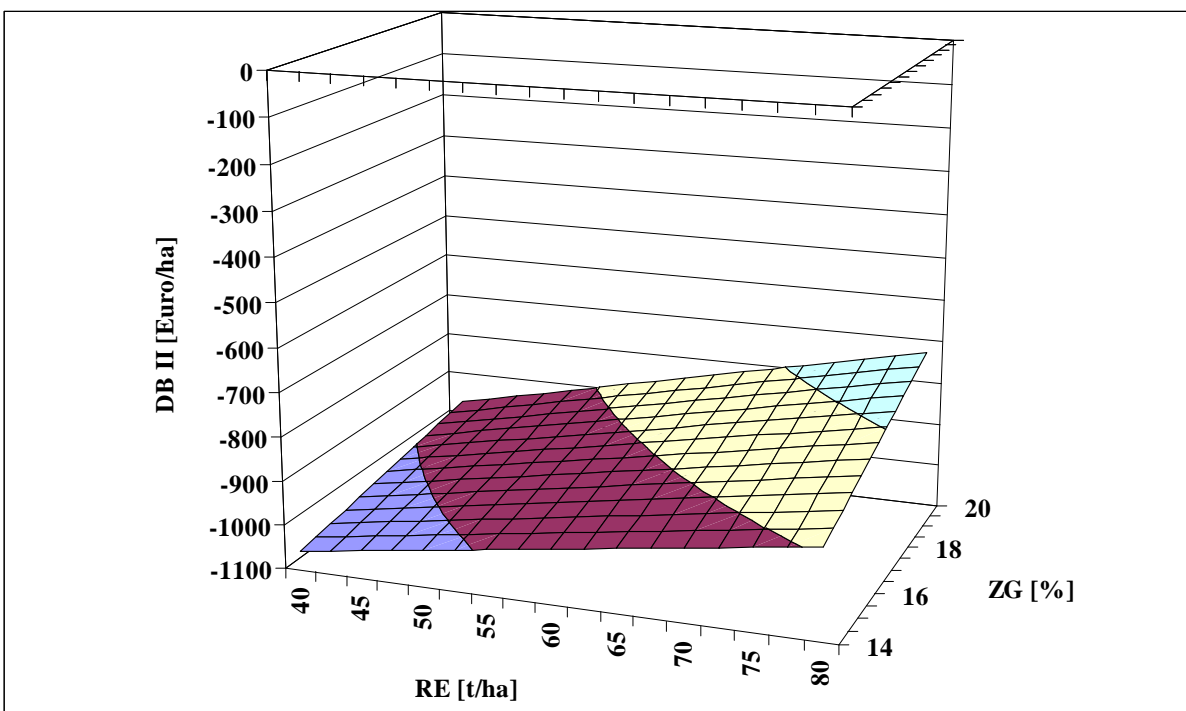
Anhang 54: Staffel zur Berechnung der Früh- und Spätlieferprämien

<u>Datum</u>	<u>Frühlieferprämie</u> <u>(Euro/t)</u>	<u>Datum</u>	<u>Spätlieferprämie</u> <u>(Euro/t)</u>
10.9.	6,14	1.12.	0,20
11.9.	5,73	2.12.	0,41
12.9.	5,32	3.12.	0,61
13.9.	4,91	4.12.	0,82
14.9.	4,50	5.12.	1,02
15.9.	4,09	6.12.	1,23
16.9.	3,68	7.12.	1,38
17.9.	3,27	8.12.	1,53
18.9.	2,86	9.12.	1,69
19.9.	2,45	10.12.	1,79
20.9.	2,05	1.12.	1,89
21.9.	1,64	12.12.	1,99
22.9.	1,23	13.12.	2,10
23.9.	0,82	14.12.	2,20
24.9.	0,41	15.12.	2,20
		16.12.	2,20
		17.12.	2,20
		18.12.	2,20
		19.12.	2,20
		20.12.	2,20
		21.12.	2,20
		22.12.	2,20
		23.12.	2,20
		24.12.	2,20

Quelle: PFEIFER & LANGEN, 2000b, S. 2, verändert

Anhang 55: C1-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 56: C2-Rüben-Deckungsbeitrag je nach Ertrag und Zuckergehalt

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 57: Wichtige Kennzahlen der alternativen Produktionsverfahren

<u>Produktions- verfahren</u>	<u>Abkür- zung</u>	<u>DB I (Euro/ha)</u>			<u>AKh/ ha</u>	<u>DB II (Euro/ha)¹</u>		
		<u>Gut</u>	<u>Mittel</u>	<u>Schlecht</u>		<u>Gut</u>	<u>Mittel</u>	<u>Schlecht</u>
Winterweizen nach Blattfrucht oder Stilllegung ²	RW	500	400	300	7,5	387,5	287,5	187,5
Winterweizen nach Halmfrucht ²	StW	450	360	270	7,5	337,5	247,5	157,5
Wintergerste	WG	400	320	240	7,0	295	215	135
Raps ²	Ra	600	480	360	10,0	450	330	210
Kartoffeln	Kart	2.500	2.000	1.500	40,0	1.900	1.400	900
Zwischenfrucht mit resistenten Kruziferen • AS 1 • AS „1,5“ • AS 2	ZWF		-170 -145 -137,5		3,0		-215 -190 -182,5	
Stilllegung mit Klee u. Gras	FSL		-100		3,0		-145	
FSL mit resisten- ten Kruziferen • AS 1 • AS „1,5“ • AS 2	rFSL		-120 -95 -87,5		3,0		-165 -140 -132,5	

¹ Ohne entkoppelte Prämie² Ohne Energiepflanzenbeihilfe

Quellen: Eigene Berechnungen, KTBL, 2002, LIZ, 2005b sowie Auswertungen der Schlagkartei für Getreide der Betriebe des AK 1 der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (verschiedene Jahrgänge)

Anhang 58: INM-Consult, Rahmendateneingabe (Auszug)

INM-Consult: Eingabe der Rahmendaten									
Daten									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Rahmendaten:	Eingabe							
2									
3	Allgemeine Angaben:								
4	Produktionsort	1	gut						
5	Ackerprämien	270	270	276	286	298	312	321	326
6	Simulationsdauer	20	Jahr(e)						
7	Umsatzsteuersatz	9	%						
8	Zinssatz (für Diskontierung)	0	%						
9									
10	Zuckerrübenanbau:								
11	Lieferrecht A (16% ZG)	1000	t						
12	Lieferrecht B (16% ZG)	300	t						
13	C1-Quote in % von A (16% ZG)	10	%						
14	A-Grundpreis (16% ZG)	41,36	Euro/t	Mischpreis für Simulationsexperimente					
15	B-Grundpreis (16% ZG)		Euro/t						
16	C1-Preis (16% ZG)		Euro/t						
17	C2-Preis (16% ZG)		Euro/t						
18	Lagerkostenanteil C-Rüben		Euro/t						
19	Vortrag C-Rüben?		j/n						
20	Anteil Vortrag von A	10	%						
21	A-Schnitzelpreis	3,45	Euro/t						
22	B-Schnitzelpreis		Euro/t						
23	C1-Schnitzelpreis		Euro/t						
24	C2-Schnitzelpreis		Euro/t						
25	var. ZR-Kosten ohne Saatgut	700	Euro/t						
26	ZR-Saatgutkosten, Standard	220	Euro/ha						
27	ZR-Saatgutkosten, Resistent	260	Euro/ha						
28	sonst. Kosten resistenter ZR-Sorten	0	Euro/ha						
29	Arbeitskosten	300	Euro/ha						
30									
31	Flächenstilllegung:								
32	min. Stilllegungssatz	8,05	%						

Quelle: INM-Consult

Anhang 59: INM-Consult, Eingabe der Simulationsparameter

INM-Consult 2.0: Simulationsparameter	
Rheinische FF mit 1er ZWF Name des Simulationsszenarios	
Simulationsart: <input checked="" type="radio"/> Stochastisch <input type="radio"/> Deterministisch	Abbaurrate unter Nichtwirten <input type="radio"/> 30% per annum <input checked="" type="radio"/> 40% per annum <input type="radio"/> 50% per annum <input type="radio"/> 60% per annum
Getreide+ZWF	ZR(anf.)-Getreide-Getr.+ZWF-
Pi-Startwert:	500 E+L/100g Boden Pi-Wert
Datum Probenahme	07. Apr
Saatzeitpunkt ZR:	07. Apr
Erntezeitpunkt ZR:	24. Okt
Lieferzeitpunkt ZR:	31. Okt
AS-Note res. Kreuzifere	1
Auflauf ZWF:	20. Jul
betrachteter Anbauumfang: 1,00 ha	
Aussaat: 97 .Tag des Jahres	=> Wachstumsdauer 200,0 Tage
Ernte: 297 .Tag des Jahres	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbrechen"/> <input type="button" value="Modell Reset"/>	

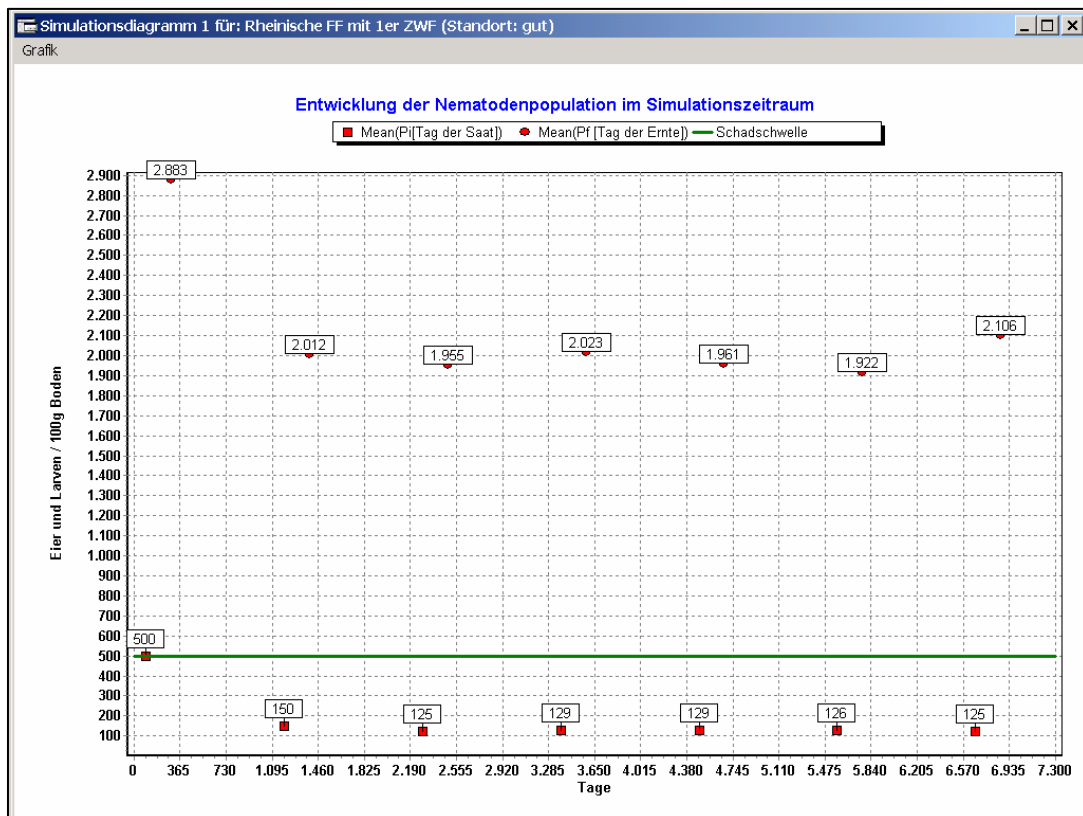
Quelle: INM-Consult

Anhang 60: INM-Consult, Beispiel für die tabellarische Ergebnisaufbereitung

Ergebnistabelle für: Rheinische FF mit 1er ZWF (Standort: gut)											
Ergebnistabelle Grafiken											
I1054											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Pi(Saat)	Pf(Ernte)					Pi(Saat)	Pf(Ernte)		
1000		500	4242,723					67,47904	1947,023		
1001		500	3480,198					212,5813	9530,953		
1002											
1003	Tag	97	297					1192	1392		
1004	Mittlw.(N)	500	2882,76					150,4843	2011,944		
1005	Stabw.(N)		2465,344					151,6885	1883,285		
1006	CV[%]		85,52025					100,8002	93,60523		
1007	Schiefe		3,360939					3,083006	3,693645		
1008	Kurtosis		25,88447					18,18058	27,63263		
1009	p(N<500E+L)[%]							96,7			
1010	Min(N)	500	201,2446					5,046071	151,7361		
1011	5%-Perzentil	500	605,7594					25,54355	421,1151		
1012	95%-Perzentil	500	7275,859					447,7567	5373,309		
1013	Max(N)	500	31307,74					1626,212	22463,73		
1014											
1015											
1016											
1017											
1018											
1019											
1020											
1021											
1022											
1023											
1024											
1025											
1026											
1027											
1028											
1029											

Quelle: INM-Consult

Anhang 61: INM-Consult, Beispiel für die grafische Ergebnisaufbereitung



Quelle: INM-Consult

Anhang 62: Erträge anfälliger und resistenter Zuckerrüben je nach P_i-Wert

	P_i-Wert	E (RE)	Stabw.(RE)	CV	5%- Percentil	95%- Percentil	E (BZE)
	E+L	dt/ha	dt/ha	%	dt/ha	dt/ha	dt/ha
aZR	0	733	0,0	0,0	733	733	112,7
	250	718	0,8	0,1	717	719	110,5
	500	704	1,5	0,2	701	706	108,2
	1.000	674	3,0	0,4	669	679	103,7
	1.500	645	4,5	0,7	638	653	99,2
	2.000	616	6,0	0,9	606	626	94,7
	2.500	586	7,5	1,3	574	599	90,2
rZR	0	667	0,0	0,0	667	667	97,0
	250	665	1,5	0,2	662	667	96,7
	500	663	3,1	0,4	657	667	96,4
	1.000	658	6,2	0,9	646	666	95,8
	1.500	654	9,3	1,4	636	666	95,1
	2.000	649	12,4	1,9	626	666	94,5
	2.500	645	15,5	2,4	616	665	93,9

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 63: DB anfälliger und resistenter Zuckerrüben je nach P_i-Wert

	P_i-Wert	E (DB)	Stabw.(DB)	CV	5%-Percentil	95%-Percentil
	E+L	Euro/ha	Euro/ha	%	Euro/ha	Euro/ha
aZR	0	3.122	0,0	0,0	3.122	3.122
	250	3.041	4,2	0,1	3.034	3.048
	500	2.959	8,3	0,3	2.945	2.973
	1.000	2.797	16,7	0,6	2.769	2.825
	1.500	2.634	25,0	0,9	2.592	2.676
	2.000	2.471	33,4	1,3	2.416	2.527
	2.500	2.309	41,7	1,8	2.239	2.379
rZR	0	2.512	0,0	0,0	2.512	2.512
	250	2.501	8,2	0,3	2.485	2.511
	500	2.489	16,4	0,7	2.458	2.510
	1.000	2.466	32,7	1,3	2.405	2.509
	1.500	2.443	49,1	2,0	2.351	2.507
	2.000	2.420	65,5	2,7	2.297	2.506
	2.500	2.397	81,9	3,4	2.243	2.504

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 64: Pi-Werte verschiedener Szenarien in dreijähriger Rotation

<u>P_{i1}</u> -Wert	<u>Szenario</u>	<u>E(P_{f1})</u>	<u>E(P_{i2})</u>	<u>Stabw.</u> <u>(P_{i2})</u>	<u>CV</u> <u>(P_{i2})</u>	<u>5%-</u> <u>Percentil</u>	<u>95%-</u> <u>Percentil</u>	<u>p(P_{i2}<500</u> <u>E+L)</u>
E+L		E+L	E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
250	o. ZWF	2.556	720	946	131,5	69	2.484	54,8
	20.7.		138	144	104,0	21	386	96,9
	30.8.		460	592	128,6	45	1.579	73,8
500	o. ZWF	3.019	849	1.117	131,5	81	2.930	49,5
	20.7.		151	157	104,0	23	423	96,2
	30.8.		539	694	128,6	53	1.852	67,8
1.000	o. ZWF	3.567	1.002	1.318	131,5	96	3.457	44,0
	20.7.		166	172	104,1	25	463	95,4
	30.8.		633	814	128,6	63	2.172	60,8
1.500	o. ZWF	3.932	1.104	1.451	131,5	106	3.809	40,4
	20.7.		175	182	104,0	27	489	95,2
	30.8.		695	894	128,6	69	2.385	55,8
2.000	o. ZWF	4.213.	1.182	1.555	131,5	113	4.079	37,9
	20.7.		182	189	104,0	28	508	94,7
	30.8.		742	955	128,6	73	2.548	53,2
2.500	o. ZWF	4.445	1.247	1.640	131,5	120	4.302	36,1
	20.7.		187	195	104,0	29	523	94,2
	30.8.		781	1.005	128,6	77	2.682	51,6

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 65: DB der Zuckerrüben in Jahr 4 in dreijähriger Rotation

<u>P_{ii}-Wert</u>	<u>Szenario</u>	<u>E(DB_{ZR})</u>	<u>Differenz</u>	<u>Stabw. (DB_{ZR})</u>	<u>CV (DB_{ZR})</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
E+L		Euro/ha	Euro/ha	Euro/ha	%	Euro/ha	Euro/ha
250	o. ZWF	2.903		299,4	10,3	2.338	3.115
	20.7.	3.092	+189	47,2	1,5	3.009	3.122
	30.8.	2.987	+84	194,1	6,5	2.620	3.120
500	o. ZWF	2.863		344,1	12,0	2.194	3.111
	20.7.	3.088	+225	51,8	1,7	2.997	3.121
	30.8.	2.961	+98	227,6	7,7	2.531	3.120
1.000	o. ZWF	2.818		383,9	13,6	2.024	3.106
	20.7.	3.083	+265	56,7	1,8	2.984	3.129
	30.8.	2.931	+113	263	8,9	2.426	3.117
1.500	o. ZWF	2.788		408,2	14,6	1.911	3.103
	20.7.	3.080	+292	59,8	1,9	2.975	3.122
	30.8.	2.911	+123	285,6	9,8	2.356	3.115
2.000	o. ZWF	2.766		426,4	15,4	1.824	3.101
	20.7.	3.078	+312	62,1	2,0	2.969	3.128
	30.8.	2.896	+130	303,1	10,5	2.303	3.113
2.500	o. ZWF	2.748		440,9	16,0	1.752	3.099
	20.7.	3.076	+328	63,9	2,1	2.964	3.122
	30.8.	2.884	+136	317,2	11,0	2.259	3.112

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang 66: Simulationsexperimente mit verschiedenen Ausgangsbefallsdichten

	Einheit	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}	P_{i5}	P_{i6}	P_{i7}
Jahr		1	4	7	10	13	16	19
E(N)	E+L	100	606	791	825	837	833	864
Stabw.(N)	E+L	0	888	1.204	1.071	1.131	1.316	1.146
CV (N)	%	0,0	146,5	152,2	129,8	135,1	158,0	132,6
p(N<500 E+L)	%	100	64,1	55,7	52,6	54,3	51,0	51,2
5%-Perzentil	E+L	100	61	83	75	80	71	86
95%-Perzentil	E+L	100	2.032	2.612	2.789	2.770	2.652	2.933
E(N)	E+L	500	889	867	843	842	834	864
Stabw.(N)	E+L	0	1.303	1.320	1.094	1.137	1.318	1.146
CV (N)	%	0,0	146,5	152,2	129,8	135,0	158,0	132,6
P(N<500 E+L)	%	0,0	50,1	51,9	50,4	53,2	51,1	50,5
5%-Perzentil	E+L	500	90	91	77	80	71	86
95%-Perzentil	E+L	500	2.983	2.863	2.851	2.784	2.655	2.933
E(N)	E+L	1.000	1.049	902	851	843	835	865
Stabw.(N)	E+L	0	1.538	1.373	1.105	1.140	1.318	1.146
CV (N)	%	0,0	146,5	152,2	129,8	135,0	158,0	132,6
p(N<500 E+L)	%	0,0	45,6	50,9	50,9	53,6	51,1	51,2
5%-Perzentil	E+L	1.000	106	95	78	81	71	86
95%-Perzentil	E+L	1.000	3.520	2.978	2.878	2.790	2.656	2.934
E(N)	E+L	2.000	1.238	938	859	845	835	865
Stabw.(N)	E+L	0,0	146,5	152,2	129,8	135,1	158,0	132,6
CV (N)	%	0	147	152	130	135	158	133
p(N<500 E+L)	%	0,0	39,2	48,3	50,1	53,6	51,0	51,1
5%-Perzentil	E+L	2.000	125	99	78	81	71	86
95%-Perzentil	E+L	2.000	4.153	3.098	2.905	2.797	2.658	2.934

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 67: P_i-Werte der Rotationsszenarien

<u>Rotationslänge</u>	<u>Anteil ZR an Rotation</u>	<u>E(FVD)</u>	<u>Stabw. (FVD)</u>	<u>CV (FVD)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
Jahre	%	E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
1	100	3.158	3.819	120,9	268	9.798	11,8
2	50	1.550	1.860	120,0	152	5.059	28,6
3	33	864	1.146	132,6	86	2.933	50,5
4	25	453	648	143,0	42	1.478	73,6
5	20	230	341	148,3	23	732	89,7

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 68: Rübenerträge der Rotationsszenarien

<u>Rotationslänge</u>	<u>Anteil ZR an Rotation</u>	<u>E(RE)</u>	<u>RE rel.</u>	<u>Stabw. (RE)</u>	<u>CV (RE)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
Jahre	%	dt/ha		dt/ha	%	dt/ha	dt/ha
1	100	574	84,3	12,9	22,2	329	717
2	50	639	93,8	9,9	15,4	377	723
3	33	681	100	6,6	9,6	561	728
4	25	707	103,8	3,6	5,0	645	731
5	20	719	105,6	1,6	2,2	690	732

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 69: P₁-Werte der Zwischenfruchtszenarien in zweijähriger Fruchtfolge

<u>AS der ZWF</u>	<u>Auflaufdatum ZWF</u>	<u>E(FVD)</u>	<u>Stabw. (FVD)</u>	<u>CV (FVD)</u>	<u>5%- Perzentil</u>	<u>95%- Perzentil</u>	<u>p(P₁<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
Ohne ZWF	-	1.550	1.860	120,0	152	5.059	28,6
AS 1	20.8.	727	1.041	143,2	75	2.332	56,6
	30.8.	943	1.376	145,9	94	3.056	47,6
AS „1,5“	20.8.	842	1.158	137,5	98	2.671	51,1
	30.8.	1.034	1.469	142,1	109	3.307	43,9
AS 2	20.8.	943	1.260	133,6	116	2.966	45,4
	30.8.	1.122	1.556	138,7	128	3.565	40,3

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 70: GDB der Zwischenfruchtszenarien in zweijähriger Fruchtfolge

<u>AS der ZWF</u>	<u>Auflaufdatum ZWF</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Perzentil</u>	<u>95%- Perzentil</u>
		Euro		Euro	%	Euro	Euro
Ohne Befall	-	38.181	114,0	0	0,0	38.181	31.181
Ohne ZWF	-	33.480	100	1.883	5,6	30.034	36.020
AS 1	20.8.	33.987	101,5	1.016	3,0	31.961	35.202
	30.8.	33.421	99,8	1.248	3,7	30.902	34.957
AS „1,5“	20.8.	33.897	101,2	1.106	3,3	31.673	35.258
	30.8.	33.407	99,8	1.313	3,9	30.868	35.057
AS 2	20.8.	33.693	100,6	1.181	3,5	31.321	35.173
	30.8.	33.242	99,3	1.372	4,1	30.626	34.999

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 71: P_i-Werte bei Resistenzmanagement in zweijähriger Fruchtfolge

<u>Jahr</u>	<u>Frucht</u>	<u>E(P_i)</u>	<u>Stabw.(P_i)</u>	<u>CV(P_i)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
1	aZR	500	0	0,0	500	500	0,0
3	rZR	1.344	1.725	128,3	126	4.477	34,2
5	aZR	309	654	211,6	20	1.108	86,3
7	rZR	1.124	1.626	144,7	92	3.943	43,7
9	aZR	279	441	158,2	18	1.007	86,8
11	rZR	1.156	1.677	145,0	113	3.779	39,7
13	aZR	280	472	168,5	24	914	86,6
15	rZR	1.086	1.510	139,0	103	3.422	43,9
17	aZR	289	468	161,7	18	1.050	86,4
19	rZR	1.093	1.662	152,1	104	3.526	43,2

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 72: GDB bei Resistenzmanagement in zweijähriger Fruchtfolge

<u>Befalls- situation</u>	<u>Fruchtfolge</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
		Euro		Euro	%	Euro	Euro
Ohne Befall	aZR-RW	38.181	100	0	0,0	38.181	38.181
	aZR-RW-rZR	35.132	92,0	0	0,0	35.132	35.132
Mit Befall	aZR-RW	33.480	87,7	1.883	5,6	30.034	36.020
	aZR-RW-rZR	34.326	89,9	457	1,3	33.533	34.771

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 73: P_i-Werte der Stilllegungsszenarien in zweijähriger Fruchtfolge

<u>AS der Kruzifere</u>	<u>E(FVD)</u>	<u>Stabw. (FVD)</u>	<u>CV (FVD)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
	E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
AS 1	167	179	107,3	30	501	95,0
AS „1,5“	314	323	102,9	59	931	83,7
AS 2	452	456	101,0	87	1.355	70,9

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 74: GDB der Stilllegungsszenarien in zweijähriger Fruchtfolge

<u>AS der Kruzifere</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
	Euro		Euro	%	Euro	Euro
aZR-RW	33.480	100	1.883	5,6	30.034	36.020
rFSL (AS 1)	32.540	97,2	194,8	0,6	32.170	32.781
rFSL (AS „1,5“)	32.335	96,6	341,3	1,1	31.680	32.764
rFSL (AS 2)	32.001	95,6	472,8	1,5	31.083	32.604

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 75: P_i-Werte der Szenarien des erweiterten Resistenzmanagements

<u>Fruchtfolge</u>		<u>E(P_i)</u>	<u>Stabw.(P_i)</u>	<u>CV (P_i)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>P(N<500 E+L)</u>
	Jahr	E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
aZR-RW-rZR-RW-aZR-RW+ZWF (20.8.)	1 (aZR)	500	0	0,0	500	500	0,0
	3 (rZR)	1.344	1.725	128,3	126	4.477	34,2
	5 (aZR)	309	654	211,6	20	1.108	86,3
	7 (aZR)	587	813	138,4	54	2.020	66,2
	9 (rZR)	1.323	1.808	136,7	121	4.433	36,3
	11 (aZR)	320	561	175,1	25	1.026	83,5
	13 (aZR)	595	964	161,9	66	1.720	65,0
	15 (rZR)	1.328	1.850	139,4	127	4.430	35,8
	17 (aZR)	320	516	161,3	20	1.136	84,0
19 (aZR)	585	845	144,6	62	1.853	64,4	
aZR-RW-rZR-RW-aZR-rFSL	1 (aZR)	500	0	0,0	500	500	0,0
	3 (rZR)	1.344	1.725	128,3	126	4.477	34,2
	5 (aZR)	309	654	211,6	20	1.108	86,3
	7 (aZR)	177	189	106,8	25	512	94,7
	9 (rZR)	1.025	1.382	134,8	95	3.425	44,6
	11 (aZR)	283	496	175,3	23	903	86,0
	13 (aZR)	174	195	112,5	32	462	96,3
	15 (rZR)	1.019	1.404	137,8	98	3.389	46,0
	17 (aZR)	281	450	159,9	17	1.019	86,9
19 (aZR)	171	185	107,8	30	504	94,7	

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 76: GDB der Szenarien des erweiterten Resistenzmanagements

<u>Fruchtfolge</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
	Euro		Euro	%	Euro	Euro
aZR-RW	33.480	100	1.883	5,6	30.034	36.020
ZWF, 20.8.	34.490	103,0	638	1,9	33.192	35.179
ZWF, 30.8.	34.360	102,6	706	2,1	32.892	35.133
rFSL	33.924	101,3	387	1,1	33.326	34.304

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 77: P_i-Werte der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Stoppelweizen

<u>AS der ZWF</u>	<u>Auflauf-datum ZWF</u>	<u>E(FVD)</u>	<u>Stabw. (FVD)</u>	<u>CV (FVD)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
Ohne ZWF	-	864	1.146	132,6	86	2.933	50,5
AS 1	10.8.	284	394	138,7	31	953	85,9
	20.8.	392	566	144,4	42	1.280	77,6
AS „1,5“	10.8.	378	493	130,4	45	1.253	78,4
	20.8.	473	651	137,6	53	1.601	71,2
AS 2	10.8.	469	584	124,5	61	1.470	69,9
	20.8.	544	725	133,3	64	1.833	66,8

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 78: GDB der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Stoppelweizen

<u>AS der ZWF</u>	<u>Auflauf-datum ZWF</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
		Euro		Euro	%	Euro	Euro
Ohne Befall	-	30.488	106,4	0	0,0	30.488	30.488
Ohne ZWF	-	28.643	100	1.004	3,5	26.623	29.775
AS 1	10.8.	28.456	99,3	367	1,3	27.715	28.836
	20.8.	28.246	98,6	515	1,8	27.219	28.773
AS „1,5“	10.8.	28.427	99,2	452	1,6	27.511	28.908
	20.8.	28.247	98,6	581	2,1	27.062	28.860
AS 2	10.8.	28.300	98,8	531	1,9	27.226	28.876
	20.8.	28.161	98,3	635	2,3	26.843	28.848

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 79: P_i-Werte der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Wintergerste

<u>AS der ZWF</u>	<u>Auflaufdatum ZWF</u>	<u>E(FVD)</u>	<u>Stabw. (FVD)</u>	<u>CV (FVD)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
Ohne ZWF	-	864	1.146	132,6	86	2.933	50,5
AS 1	20.7.	125	129	103,2	21	366	97,7
	30.7.	183	233	127,3	22	586	93,3
AS „1,5“	20.7.	252	248	98,4	44	731	88,7
	30.7.	295	345	116,9	41	900	85,2
AS 2	20.7.	375	361	96,3	66	1.075	78,0
	30.7.	404	449	111,1	62	1.194	75,2

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 80: GDB der ZWF-Szenarien in dreijähriger Fruchtfolge, Wintergerste

<u>AS der ZWF</u>	<u>Auflaufdatum ZWF</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
		Euro		Euro	%	Euro	Euro
Ohne Befall	-	30.233	106,5	0	0,0	30.233	30.2333
Ohne ZWF	-	28.388	100	1.004	3,5	26.368	29.520
AS 1	20.7.	28.524	100,5	121	0,4	28.277	28.664
	30.7.	28.402	100,1	220	0,8	27.952	28.639
AS „1,5“	20.7.	28.427	100,1	226	0,8	27.967	28.689
	30.7.	28.336	99,8	319	1,1	27.694	28.693
AS 2	20.7.	28.233	99,5	325	1,2	27.597	28.616
	30.7.	28.173	99,2	410	1,5	27.318	28.640

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 81: P_i-Werte anfälliger und resistenter Zuckerrüben in dreijähriger Fruchtfolge

Jahr	Frucht	E(P_i)	Stabw. (P_i)	CV (P_i)	5%- Percentil	95%- Percentil	p(P_i<500 E+L)
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
1	aZR	500	0	0,0	500	500	0,0
4	rZR	798	1.009	126,4	78	2.696	52,0
7	aZR	142	267	187,9	11	469	95,8
10	rZR	592	958	161,7	52	2.172	67,1
13	aZR	151	184	151,5	8	420	96,2
16	rZR	535	759	141,8	43	1.709	67,8
19	aZR	117	213	182,4	9	389	96,7

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 82: GDB anfälliger und resistenter Zuckerrüben in dreijähriger Fruchtfolge

Befalls- situation	Fruchtfolge	E(GDB)	GDB rel.	Stabw. (GDB)	CV (GDB)	5%- Percentil	95%- Percentil
		Euro		Euro	%	Euro	Euro
Ohne Befall	aZR-RW-StW	30.488	100	0	0,0	30.488	30.488
	aZR-RW- StW-rZR	28.658	94,0	0	0,0	28.658	28.658
Mit Befall	aZR-RW-StW	28.643	93,9	1.004	3,5	26.623	29.775
	aZR-RW- StW-rZR	28.285	92,8	181,4	0,6	27.963	28.446

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 83: P_i-Werte der Stilllegungsszenarien in dreijähriger Fruchtfolge

<u>Fruchtfolge</u>	<u>AS der Kruzifere</u>	<u>E(FVD)</u>	<u>Stabw. (FVD)</u>	<u>CV (FVD)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
ZR-RW- rFSL	AS 1	121	125	103,7	20	354	97,7
	AS „1,5“	239	236	98,9	42	694	89,5
	AS 2	353	342	96,8	63	1.014	79,5
ZR-rFSL- RW	AS 1	93	97	103,7	15	274	98,9
	AS „1,5“	178	176	98,9	31	516	94,4
	AS 2	258	249	96,8	46	741	88,3

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 84: GDB der Stilllegungsszenarien in dreijähriger Fruchtfolge

<u>Fruchtfolge</u>	<u>AS der Kruzifere</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
		Euro		Euro	%	Euro	Euro
Basis	aZR-RW- StW	28.643	100	1.004	3,5	26.623	29.775
ZR-RW- rFSL	AS 1	27.061	94,5	118	0,4	26.821	27.198
	AS „1,5“	26.981	94,2	216	0,8	26.542	27.231
	AS 2	26.806	93,6	308	1,2	26.202	27.167
ZR-rFSL- RW	AS 1	27.116	94,7	92	0,3	26.927	27.224
	AS „1,5“	27.101	94,6	162	0,6	26.768	27.290
	AS 2	26.991	94,2	226	0,8	26.544	27.254

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 85: P₁-Werte der Szenarien in vierjähriger Fruchtfolge

<u>Fruchtfolge</u>	<u>Auflauf- datum ZWF</u>	<u>E(FVD)</u>	<u>Stabw. (FVD)</u>	<u>CV (FVD)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P₁<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
ZR-RW- StW-StW	-	453	648	143,0	42	1.478	73,6
StW+ZWF (AS 1)	10.8.	148	196	132,4	15	481	95,9
	20.8.	198	268	135,3	20	656	91,2
-StW-rZR	-	46	67	145,7	3	179	99,8
WG+ZWF (AS 1)	20.7.	85	92	108,2	14	241	99,2
	30.7.	103	128	124,3	12	316	97,7

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 86: GDB der Zwischenfruchtszenarien in vierjähriger Fruchtfolge

<u>Fruchtfolge</u>	<u>Szenario</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
		Euro		Euro	%	Euro	Euro
ZR-RW-StW-StW	ohne Befall	23.990	103,2	0	0,0	23.990	23.990
	mit Befall	23.239	100	462	2,0	22.338	23.673
	+ZWF, 10.8.	22.749	97,9	166	0,7	22.443	22.905
	+ZWF, 20.8.	22.681	97,6	225	1,0	22.258	22.889
	-rZR	22.539	96,9	65	0,3	22.407	22.600
ZR-RW-StW-WG	ohne Befall	23.820	103,2	0	0,0	23.820	23.820
	mit Befall	23.069	100,0	462	2,0	22.168	23.503
	+ZWF, 20.7.	22.675	98,3	70	0,3	22.542	22.753
	+ZWF, 30.7.	22.644	98,2	108	0,5	22.441	22.752

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 87: P_i -Werte in sechsjähriger Fruchtfolge mit 50% Zuckerrüben

<u>Jahr</u>	<u>Frucht</u>	<u>E(P_i)</u>	<u>Stabw. (P_i)</u>	<u>CV (P_i)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
1	aZR	500	0	0,0	500	500	0,0
3	rZR	1.344	1.725	128,3	126	4.477	34,2
4	aZR	513	1.087	211,8	34	1.841	72,7
7	aZR	774	1.116	144,2	64	2.705	57,1
9	rZR	1.405	1.925	137,0	215	4.691	33,9
10	aZR	548	959	175,0	43	1.751	70,2
13	aZR	792	1.356	171,2	80	2.317	54,1
15	rZR	1.414	1.975	139,7	136	4.630	34,1
16	aZR	549	886	161,4	34	1.954	68,9
19	aZR	777	1.181	151,9	75	2.541	54,9

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 88: GDB der sechsjähriger Fruchtfolge mit 50% Zuckerrüben im Vergleich

<u>Fruchtfolge</u>	<u>E(GDB)</u>	<u>GDB rel.</u>	<u>Stabw. (GDB)</u>	<u>CV (GDB)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>
	Euro		Euro	%	Euro	Euro
6j., 50% ZR	34.604	100	841	2,4	32.841	35.549
2j., ERM	34.490	99,7	638	1,9	33.192	35.179

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 89: P_i -Werte in sechsjähriger Fruchtfolge mit 33% Zuckerrüben und Raps

<u>Jahr</u>	<u>Frucht</u>	<u>E(P_i)</u>	<u>Stabw. (P_i)</u>	<u>CV (P_i)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
1	aZR	500	0	0,0	500	500	0,0
5	rZR	3.223	2.976	92,3	692	8.428	2,3
7	aZR	498	836	167,8	44	1.572	71,8
11	aZR	3.246	2.880	88,7	678	9.182	1,6
13	rZR	535	825	154,2	46	1.779	69,2
17	aZR	3.259	3.135	96,2	625	8.062	1,7
19	aZR	513	775	151,0	44	1.878	70,1

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 90: P_i -Werte in achtjähriger Fruchtfolge mit 25% Zuckerrüben und Raps

<u>Jahr</u>	<u>Frucht</u>	<u>E(P_i)</u>	<u>Stabw. (P_i)</u>	<u>CV (P_i)</u>	<u>5%- Percentil</u>	<u>95%- Percentil</u>	<u>p(P_i<500 E+L)</u>
		E+L	E+L	%	E+L	E+L	%
1	aZR	500	0	0,0	500	500	0,0
6	rZR	2.827	2.580	91,3	582	7.416	2,9
9	aZR	274	386	140,9	24	987	87,1
14	rZR	2.677	2.153	80,4	601	6.657	3,6
17	rZR	260	342	131,5	25	891	86,2

Quelle: Eigene Berechnungen; verwendete Abkürzungen siehe Text

Anhang 91: Parameter der Grenzdeckungsbeitragsrechnung

<u>Parameter</u>	<u>Wert</u>
A-Lieferrecht (t)	1.000
B-Lieferrecht (t)	300
C1-Rüben (t)	100
Mittelwert Rübenenertrag (t/ha)	73,3
Standardabweichung Rübenenertrag (t/ha)	7,33
Zuckergehalt (%)	16,0
Auszahlungspreis A-Rüben (Euro/t)	54,70
Auszahlungspreis B-Rüben (Euro/t)	35,20
Auszahlungspreis C1-Rüben (Euro/t)	10,60
Auszahlungspreis C2-Rüben (Euro/t)	4,80
Auszahlungspreis Vortrags-Rüben (Euro/t)	49,24
Prop. Spezialkosten der Zuckerrüben (Euro/ha)	920
Deckungsbeitrag der Alternativfrucht (Euro/ha)	1.000

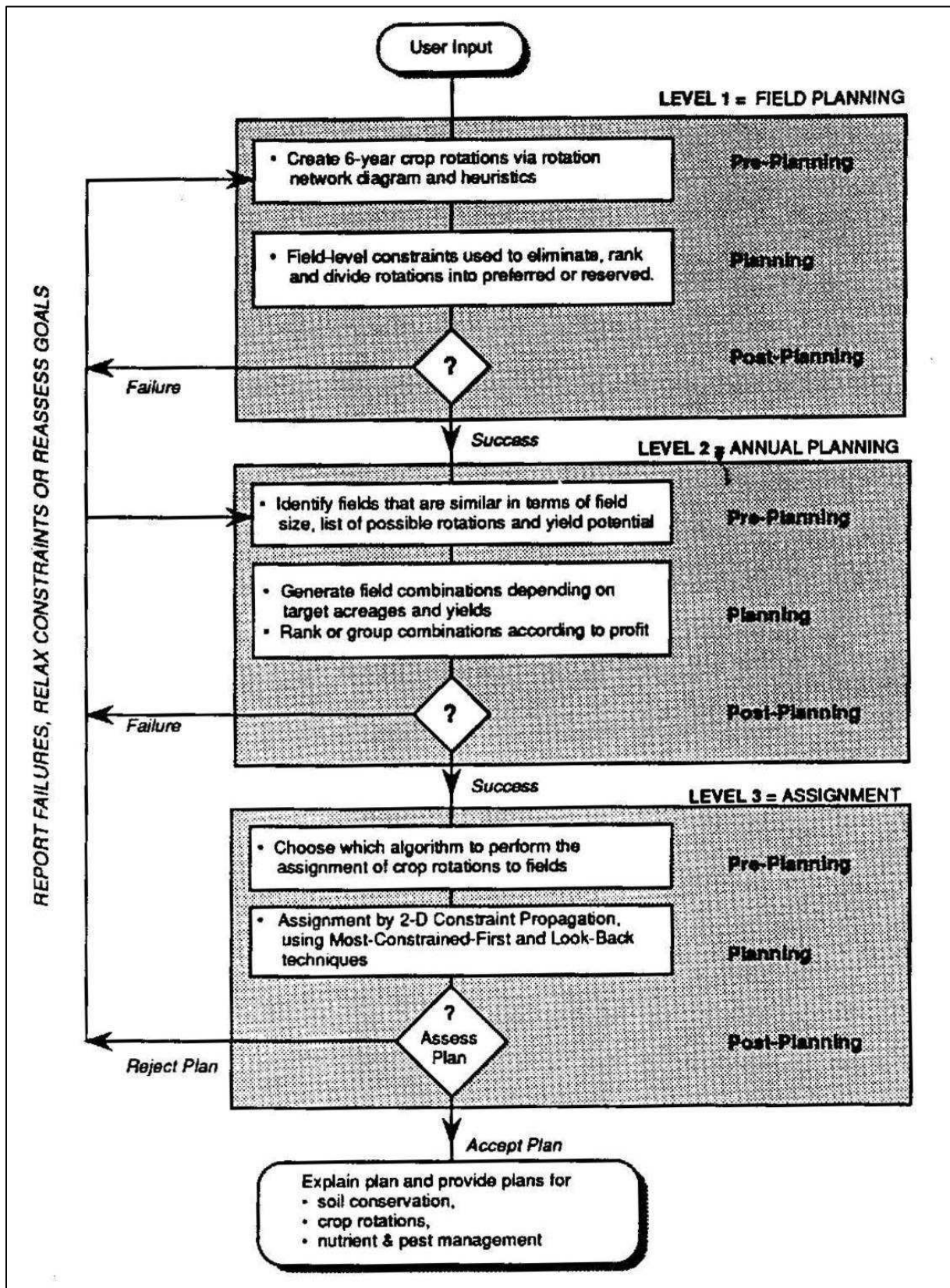
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang 92: Ergebnisse der deterministischen Grenzdeckungsbeitragsrechnung

<u>Zuckerrüben</u> <u>(ha)</u>	<u>Deckungsbeitrag</u> <u>(Euro)</u>	<u>Grenzdeckungsbeitrag</u> <u>(Euro/ha)</u>
1	3.088	3.088
2	6.176	3.088
⋮	⋮	⋮
13	40.149	3.088
14	42.727	2.577
15	44.387	1.659
16	46.047	1.659
17	47.707	1.659
18	48.888	1.181
19	48.740	-148
20	48.211	-528
21	47.640	-570
22	47.069	-570

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang 93: Flussdiagramm des Planungsansatzes von CROPS



Quelle: BUICK ET AL., 1992, S. 34

Anhang 94: LIZ-Anbauplanung

LIZ - Anbauplanung - Microsoft Internet Explorer

Version 2005-02-18

LIZ - Anbauplanung **Zuckerrübenfläche**

Eingabe [ZR mehrj.]

Ertragserwartung t/ha

Zuckergehalt %

Bezahlungssystem ZR

A-Liefermenge lt. Vertrag (b. 16% ZG) t

C-Vortrag aus Vorjahr (b. 16% ZG) t

Deklassierung erwartet f. Anbaujahr %

Rüben über A/B hinaus (in % der A-Rb) %

**Planung
Gesamtbetrieb**

Ergebnis

Zuckerrüben-Anbaufläche für A+B-Liefermenge **19,39 ha**

für A+B-Liefermenge + C-Rüben **20,89 ha**

LIZ - Anbauplanung - Microsoft Internet Explorer

Version 2005-02-18

LIZ - ANBAUPLANUNG **Gesamtbetrieb**

Eingabe [ZR mehrj] [ZR Rahmendaten] [Preise/Kosten]

Fruchtart **Zuckerrüben** Weizen Gerste Stilllegung < Kultur

Anbau als Nachw. Rohstoff o. Energiepflanze (ja) =

Flächenaufteilung geplante Rübenfl. 20.89 ha ha

Ertragserwartung t/ha

Zuckergehalt %

Bezahlung ZR bzw. Produktpreis inkl. MwSt Rheinland €/t

variable Prod.kosten €/ha

+/- Effekte (z.B. Vorfruchtwert ...) €/ha

A-Liefermenge lt. Vertrag (b. 16% ZG) t

C-Vortrag aus Vorjahr (b. 16% ZG) t

Deklassierung erwartet f. Anbaujahr %

Prämienrechte **Stilllegung** (ohne Top-up) ohne

Anzahl (= ha)

€/ha

Ergebnis

	Ackerbau	Zuckerrüben	Weizen	Gerste	Stilllegung
Deckungsbeitrag	100 ha	Erzeugung € 76.141	€/ha 2.236	505	380
	100,0	Prämien € 27.000			-200
		Gesamt € 103.141			

Rübenanbau

	ha	t	% von A	€/ha
A-Rüben (minus Vortrag)	14,92	895,1	100	2.603
B-Rüben	4,48	268,5	30	1.329
C1-Rüben	0,61	36,3	4	-106
C2-Rüben	0,00	0,0	0	

Quelle: LIZ, 2005b