(Aus dem Institut für Pflanzenbau der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Lehrstuhl für Speziellen Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung)

# Ein Modell der Unkrautpopulationsdynamik zur Optimierung der Unkrautbekämpfung unter Berücksichtigung des Anbauverfahrens von Wintergetreide und Zuckerrüben*

Von K.-U. Heyland und H.-P. Kaul

(Mit 3 Abbildungen)

## Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Quantifizierung des Einflusses spezieller Anbaumaßnahmen (Herbizideinsatzverfahren, Stickstoffdüngung zu Vegetationsbeginn, Nutzpflanzensaatstärke) auf die Unkrautpopulationsdynamik innerhalb einer Fruchtfolge mit Zuckerrüben und Wintergetreide. Zu diesem Zweck werden die Variablen eines deterministischen Differenzengleichungsmodells ermittelt. Mit Hilfe des verifizierten Modells werden sodann Simulationsstudien zur Optimierung des Nutzpflanzenanbauverfahrens im Hinblick auf eine Minimierung des Herbizideinsatzes durchgeführt.

Die Datengrundlage für die Parameterschätzung und Modellverifikation stellt ein langjähriger Anbauversuch innerhalb der Fruchtfolge dar, der in Winterweizen durch eine Versuchsanlage zur Ermittlung des Einflusses gestaffelter Herbizidaufwandmengen ergänzt wurde. Die Versuche wurden in den Anbaujahren 1987 bis 1989 beobachtet, wobei die Anbauverfahren aufgrund der Vorwirkungen des Versuches auf unterschiedlichen Unkrautdichten geprüft werden konnten.

Die Diskussion der Ergebnisse führt zu folgenden Aussagen:

1. Der Einsatz von Herbiziden ist in Abhängigkeit von Behandlungstermin und ausgebrachter Wirkstoffdosis, aber auch den jährlich wechselnden Einsatzbedingungen, mit unterschiedlichem Erfolg in der Lage, die Dichte der Unkrautpopulationen zu beschränken.
2. Während neben dem Herbizideinsatz auch Nutzpflanzensaatstärke und Stickstoffdüngung die Unkrautauflaufrate beeinflussen, wird die Entwicklungsrate lediglich vom Herbizideinsatzverfahren bestimmt, schließlich kann die Vermehrungsrate kaum noch vom Anbauverfahren verändert werden.
3. Ein einfaches Populationsdynamikmodell kann die Unkrautdynamik innerhalb der Fruchtfolge für das geprüfte Spektrum von Anbauverfahren im Bereich niedriger Unkrautdichten gut erklären.
4. Bei den geprüften Anbauverfahren kann allein die Herbizidausbringung im

* Die vorliegende Arbeit ist ein Auszug aus einer Dissertation von H.-P. Kaul (1992).

frühen Nachauflaufverfahren eine Stabilisierung des Unkrautsamenpotentials auf niedrigem Niveau bewirken. Andererseits führt der Verzicht auf Unkrautbekämpfung zu einem drastischen Populationswachstum.
5. Mit Hilfe der Computersimulation wird eine alternative Bekämpfungsstrategie im Vergleich zu den wirtschaftlichen Schadensschwellen erarbeitet, die auf der regelmäßigen Ausbringung von Herbiziden in gesenkten Aufwandmengen basiert.
6. Bestandesführungsmaßnahmen wie Saatstärke und Stickstoffdüngung können bei weniger erfolgreicher direkter Unkrautbekämpfung im Sinne des Integrierten Pflanzenbaues einen Beitrag zur Unkrautkontrolle leisten.

Schlüsselworte: mathematisches Modell, Unkrautpopulationsdynamik, Herbizideinsatz, Winterweizen, Zuckerrüben.

**A model of weed population dynamics used for the determination of optimal weed control strategies with regard to crop management of winter wheat and sugar beet**

Summary

The aim of this study is the quantitative estimation of the influence of crop management factors (herbicide application, nitrogen fertilization, crop density) on weed population dynamics in a rotation with sugar beet and winter wheat. The parameters of a deterministic difference equation model are estimated. After verification of the model simulation experiments are conducted to optimize the crop management strategies with regard to minimum herbicide input.

The data base for parameter estimation and model verification are results of a long time field experiment (since 1983) with corresponding management systems for all crops within the rotation. Specific data were taken in 1987 to 1989, thus testing the management systems on different weed densities that had been evolved until then. This was completed with a two year experiment in winter wheat testing reduced herbicide doses.

The results could be summarized:
1. Herbicides show different influences in reducing weed populations depending on date and dose of application as well as weather conditions of the specific year.
2. Weed emergence rate depends on herbicides, fertilization and crop density, while the development rate is only influenced by the date and dose of herbicide application. Finally the seed production per weed plant can hardly be changed by the checked crop management.
3. A simple model of population dynamics explains quite well the weed abundance over years for the tested range of management systems and initial low weed densities.
4. Among the tested management systems only early post emergence herbicide application guarantees substantial low weed seed banks, while one year without spraying herbicides leads to a dramatic population increase.
5. In using simulation experiments a new weed control strategy is developed that, in contrast to economic thresholds, is based on every year spraying of reduced herbicide doses.
6. Crop management factors, e. g. fertilization and crop density, could favourably be used to support weed suppression of less effective herbicide applications in integrated crop management systems.

Key-words: mathematical model, weed population dynamics, herbicide application, winter wheat, sugar beet.

## 1. Einleitung und Problemstellung

Die Unkrautbekämpfung in Nutzpflanzenbeständen hat in heutigen Anbauverfahren nicht mehr die Vernichtung aller auflaufenden Unkrautpflanzen zum Ziel. Vielmehr sollte nach HEITEFUSS et al. (1984) bei einer ordnungsgemäßen Landbewirtschaftung eine Bekämpfungsmaßnahme nur noch bei Überschreiten der wirtschaftlichen Schadensschwelle durchgeführt werden.

Anhand eines stark vereinfachten Populationsmodells, welches nur Auflauf- und Vermehrungsrate berücksichtigt, läßt sich zeigen, daß bei Verzicht auf Bekämpfungsmaßnahmen die hohe Vermehrungskapazität der Unkräuter ein explosionsartiges Anwachsen der Unkrautpopulation bedingt, während infolge der geringen Auflaufrate eine hohe Populationsdichte selbst bei Ausschalten weiterer Vermehrung nur sehr langsam reduziert werden kann, und eine gänzliche Ausrottung einer Art auf einem Schlag sehr schwierig zu realisieren ist (HEYLAND 1975). Weiterhin findet die aktuelle Situation auf dem einzelnen Schlag, charakterisiert durch die Art der Verunkrautung, den Zustand des Nutzpflanzenbestandes, die Witterung, den Boden und das gewählte Anbauverfahren, kaum Berücksichtigung bei der Bekämpfungsentscheidung nach dem Schadensschwellenkonzept (ZEDDIES 1986).

Beim Einsatz von Herbiziden wird, neben dem Verzicht auf den Einsatz im Einzelfall, als eine weitere Möglichkeit zur Kostensenkung in Verbindung mit einer Reduktion der Umweltbelastungen durch Wirkstoffemissionen die Senkung der Aufwandmengen unter die vom Hersteller empfohlene Dosis diskutiert. In diesem Bereich gehen die Kenntnisse und Erfahrungen der Praktiker heute weit über den Stand agrarwissenschaftlicher Forschung hinaus.

Grundsätzlich erfordert die Verbesserung von Verfahren zur Unkrautbekämpfung neben der Entwicklung neuer Methoden genauere Kenntnisse über den Lebenszyklus der zu bekämpfenden Arten. Im Laufe der vergangenen zehn Jahre gewinnt deshalb als eine neue Richtung herbologischer Forschung die Untersuchung populationsdynamischer Zusammenhänge bei Unkräutern zunehmend an Bedeutung. Die Ergebnisse solcher Arbeiten können unter Nutzung mathematischer Methoden und systemanalytischer Ansätze zu Modellen der Unkrautpopulationsdynamik verdichtet werden, die es erlauben, im „Computerexperiment" in sehr kurzer Zeit eine Vielzahl von Versuchsfragen zu beantworten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Identifizierung der Parameter für ein derartiges Modell der Unkrautpopulationsdynamik in einer Fruchtfolge mit Wintergetreide und Zuckerrüben unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen einer aktuellen Entscheidungssituation sowie die Nutzung dieses Modells zur Bewertung von Bekämpfungsalternativen.

## 2. Material und Methoden

Auf dem Versuchsgut Dikopshof des Instituts für Pflanzenbau der Universität Bonn wurden in den Früchten Zuckerrübe und Winterweizen einer dreifeldrigen Fruchtfolge mit Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste in den drei Vegetationsperioden 1986/87 bis 1988/89 Unkrautzählungen durchgeführt und Bodenproben zur Ermittlung des Unkrautsamenpotentials entnommen.

Die Versuchsanlage des Hauptversuches erfolgte bereits im Jahr 1982/83 auf allen Schlägen bzw. in allen Früchten der Fruchtfolge. Als Besonderheit des Versuches ist zu bemerken, daß in allen Früchten einander entsprechende Faktorstufenkombinationen jeweils auf derselben Parzelle realisiert wurden, sodaß die Akkumulation von Wirkungen über die Jahre nachvollziehbar ist. Neben diesem Hauptversuch wurde in den Vegetationsperioden 1987/88 und 1988/89 im Winterweizen ein vorwirkungsfreier Zusatzversuch zur Prüfung gestaffelter Herbizidaufwandmengen angelegt.

Tabelle 1

*Versuchsfrüchte Zuckerrüben (ZR), Winterweizen (WW) und Wintergerste (WG) in Haupt- und Zusatzversuch auf den drei Schlägen der Fruchtfolge in den Versuchs- und Beobachtungsjahren (unterstrichen)*
*Crops sugar beet (ZR), winter wheat (WW) and winter barley (WG) in main and additional trial on all three fields of the rotation, observation-years underlined*

| Erntejahr | Hauptversuch Schlag A | B | C | Zusatzversuch Schlag A | B |
|---|---|---|---|---|---|
| 1983 | WG | WW | ZR | | |
| 1984 | ZR | WG | WW | | |
| 1985 | WW | ZR | WG | | |
| 1986 | WG | WW | ZR | | |
| 1987 | ZR | WG | WW | | |
| 1988 | WW | ZR | WG | WW | |
| 1989 | WG | WW | ZR | | WW |

Tabelle 1 verdeutlicht die gesamte Versuchsanstellung. Die Beobachtungen für die vorliegende Arbeit erfolgten auf Schlag A 1987 in Rüben, 1987/88 im nachfolgenden Weizen; 1988 wurde auf Schlag B in Rüben untersucht, im Jahr 1988/89 im darauffolgenden Weizen. Eine einmalige Bestimmung des Unkrautsamenpotentials auf Schlag C im Jahr 1987 (nach der Winterweizenernte) erfolgte zwecks Erhebung eines unabhängigen Datensatzes zur Modellverifikation.

## 2.1 Standort und Witterung

Der Dikopshof liegt bei Wesseling, auf der Mittelterrasse des Rheins zwischen Köln und Bonn, in einer Höhe von 60 m über NN. Der Bodentyp ist eine Parabraunerde aus umgelagertem Löß; die Bodenart ist ein sandiger Lehm; die Bodenwertzahlen liegen bei 78 bis 83 Punkten. Der Versuchsstandort ist gekennzeichnet durch ein maritimes Klima mit kurzen, milden Wintern und langen, mäßig warmen Sommern. Die langjährige Durchschnittstemperatur beträgt 9,7 °C, die durchschnittliche Niederschlagshöhe 632 mm im Jahr.

Die Vegetationsperiode 1986/87 war gekennzeichnet durch einen strengen Winter mit unterdurchschnittlichen Temperaturen von Dezember bis März, gefolgt von einer verzögerten Entwicklung der Vegetation im Frühjahr 1987. Die Saat der Zuckerrüben in der letzten Aprildekade erfolgte bei überdurchschnittlich hohen Temperaturen und, nach ausgiebigen Niederschlägen im Februar und März, unter trockenen Bedingungen, anschließend war es im Mai und Juni wiederum relativ kühl, von Mai bis Juli fiel reichlich Regen. Insgesamt handelt es sich um ein Jahr ohne Witterungsextreme. Die Saat des Weizens im Versuchsjahr 1987/88, Anfang November 1987, war gefolgt von einem kurzen Kälteeinbruch. Der folgende Winter war ungewöhnlich warm, ab März waren die Temperaturen dann durchschnittlich, wobei die Rübensaat von einer warmen Schönwetterperiode Ende April begünstigt wurde. Im März regnete es ca. 140 mm, danach folgte eine ausgeprägte Trokkenperiode im Frühjahr, wie sie auf dem Versuchsstandort gelegentlich auftritt. Auch im weiteren Verlauf der Vegetation blieb es zu trocken. Das Versuchsjahr 1988/89 muß, wie bereits die vorhergehende Vegetationsperiode, als Trockenjahr angesprochen werden; die Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum waren allerdings drastischer, da während des ganzen Jahres überdurchschnittlich hohe Temperaturen herrschten. Ein Vegetationsstillstand über Winter trat nicht ein.

## 2.2 Versuchsanlage und -durchführung

Die Versuche waren als Blockanlage mit zwei Wiederholungen angelegt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden auf den zwei Schlägen A und B in den zwei Hauptfrüchten Zuckerrübe (ZR, Sorte: Primahill) und Winterweizen (WW, Sorte: Okapi) jeweils in zwei aufeinanderfolgenden Jahren (vgl. Tab. 1) folgende Faktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf die Unkrautpopulationsdynamik geprüft:

Saatstärke der Nutzpflanzen — in zwei Stufen

Zielsetzung war es, Bestände mit unterschiedlicher Konkurrenzkraft gegen Unkräuter zu etablieren. In Zuckerrüben wurden in einer Variante mit idealer Bestandesdichte (S+) acht Rübenpflanzen/m² angestrebt. Im Vergleich hierzu wurde ein lückiger Bestand (S−)

mit einer Zieldichte von 4,5 Pflanzen/m² geprüft, indem eine Mischung mit abgetötetem Saatgut zur Aussaat verwandt wurde. Die tatsächlichen Bestandesdichten zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2

*Zuckerrübenbestandesdichte (Pflanzen/m²) der beiden Saatstärkestufen 1987 (Schlag A) und 1988 (Schlag B)*
*Sugar beet plant density (1/m²) depending on seed rate and year (field)*

| Saatstärke | 1987 (A) | 1988 (B) |
|---|---|---|
| S− | 4,71 | 2,25 |
| S+ | 9,00 | 5,37 |

Die Winterweizensaatstärke wurde in der Variante S− nach der computergestützten Empfehlung des „Anbauverfahrens Bonn" (ABo) bemessen (Heyland 1980, Heyland und Kochs 1984) und betrug in beiden Jahren 350 keimfähige Körner/m². Die Variante S+ wurde 1987/88 mit einer hierzu um 30 % erhöhten Saatstärke ausgesät; 1988/89 wurde die Menge in S+ um 50 % gegenüber S− erhöht, um eine stärkere Differenzierung der Keimpflanzendichten des Weizens zu erreichen.

Stickstoffdüngung zu Vegetationsbeginn in drei Stufen

Zielsetzung war hier, den Einfluß des Stickstoffangebotes auf die Prozesse der Unkrautpopulationsdynamik zu prüfen. Die Stickstoffdüngung beider Nutzpflanzenarten wurde in der Stufe N2 nach Empfehlung des ABo bemessen. Daneben wurden in Rüben zwei Varianten mit einer im Vergleich zu dem vom ABo berechneten Stickstoffbedarf (1987: 121 kg N/ha, 1988: 140 kg N/ha) um 15 % erhöhten (N3) bzw. um 15 % gesenkten (N1) Stickstoffgabe versorgt. Die Ausbringung erfolgte zur Saat der Rüben, wobei Mengen über 100 kg N/ha in einer zweiten Teilgabe zum 4-Blatt-Stadium gegeben wurden. Im Winterweizen wurde abweichend von N2 (1988 und 1989: 40 kg N/ha) zu Vegetationsbeginn jeweils eine Variante mit um 25 kg/ha erhöhter (N3) bzw. gesenkter (N1) N-Menge realisiert. Insgesamt wurden zu Weizen in N2 1988 135 kg N/ha, 1989 165 kg N/ha gedüngt.

Termin des Herbizideinsatzes in drei Stufen

Unkrautbekämpfung zu verschiedenen Zeitpunkten sollte eine Variation in der Verunkrautung nach Dichte und Entwicklung bewirken. Aufgrund der vier- bis sechsjährigen Vorwirkungen durch gleiche Versuchsvarianten konnte im Hauptversuch bereits in der Ausgangsverunkrautung eine Differenzierung erwartet werden.

Die Herbizidaufwandmenge wurde bei den Zuckerrüben an die Unkrautentwicklung angepaßt. Im Versuchsglied H1 sollte Unkrautwachstum während der gesamten Vegetationsperiode weitgehend unterbunden werden. Deshalb erfolgte die Unkrautbekämpfung bereits im Vorauflauf und wurde durch eine zusätzliche Behandlung im Nachauflauf mit verhältnismäßig niedrigen Aufwandmengen ergänzt. Eine gewisse, jedoch nur kurzzeitige Unkrautentwicklung wurde in der praxisüblichen Variante H2 zugelassen, indem die Unkrautbekämpfung zu einem frühen Nachauflauftermin mehrfach in den Auflauf der Unkräuter hinein, ebenfalls jeweils mit geringen Wirkstoffdosen, durchgeführt wurde. Mehr Zeit zur Entwicklung stand den Unkrautpflanzen in der Variante H3 zur Verfügung. Hier wurde das Herbizid erst im 4- bis 6-Blatt-Stadium der Rüben appliziert, dann allerdings in relativ hohen Aufwandmengen. Tabelle 3 enthält die Daten des Herbizideinsatzes in Rüben.

Der Herbizideinsatz in Winterweizen wurde analog zu der Versuchsanlage in Zuckerrüben abgestuft. In der Variante H2 wurde allerdings praxisüblich nur eine Spritzung zu einem frühen Nachauflauftermin, etwa zum Vegetationsbeginn, durchgeführt. In der Variante H3 wurde das Herbizid zum spätest möglichen Termin, teilweise bereits nach Schoßbeginn des Weizens, appliziert. Im Jahr 1989 unterblieb im Hauptversuch die Unkrautbekämpfung in dieser Stufe völlig.

In dem Zusatzversuch in Winterweizen, der neben der bisherigen Versuchsanlage ohne Vorwirkungen neu angelegt wurde (vgl. Tab. 1), wurde zu den beiden Nachauflaufbehandlungsterminen H2 und H3 zusätzlich der Einfluß der

Herbizidaufwandmenge in fünf Stufen

untersucht. Zielsetzung dieser Versuchsanstellung war die exemplarische Quantifizierung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für Herbizide. Hierbei wurden neben der vollen Aufwandmenge nach Herstellerempfehlung (1,0) Versuchsglieder mit der 0,8fachen, 0,6fachen oder

0,4fachen Dosis behandelt, daneben blieb eine Kontrollvariante unbehandelt (0). Es wurden beide Saatstärken (S−, S+) in der N-Düngungsstufe N2 (ABo) geprüft. Tabelle 4 enthält die Daten des Herbizideinsatzes in Weizen.

Tabelle 3

*Daten des Herbizideinsatzes in Zuckerrüben 1987 (Schlag A) und 1988 (Schlag B)*
*Herbicide application data in sugar beet 1987 (field A) and 1988 (field B)*

| Variante | l/kg | Präparat | Wirkstoff | Datum | ZR-Stadium |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1987 (Schlag A) | | |
| H1 | 6,0 | PYRAMIN FL | Chloridazon | 24. 4. | VA |
| | 3,0<br>3,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | Phenmedipham<br>Ethofumesat | 2. 6. | 6-Blatt |
| | 2,0<br>2,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 10. 6.* | 8-Blatt |
| H2 | 3,0<br>1,5 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 7. 5. | Keimblatt |
| | 2,0<br>2,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 25. 5. | 4-Blatt |
| | 2,0<br>2,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 10. 6. | 8-Blatt |
| H3 | 3,0<br>3,0<br>3,0 | GOLTIX+<br>BETANAL+<br>TRAMAT | Metamitron | 2. 6. | 6-Blatt |
| | 2,0<br>2,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 10. 6.* | 8-Blatt |
| | | | 1988 (Schlag B) | | |
| H1 | 6,0 | PYRAMIN FL | | 25. 4. | VA |
| | 3,0<br>3,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 24. 5. | 4-Blatt |
| H2 | 3,0<br>1,5 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 9. 5. | Keimblatt |
| | 2,0<br>2,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 17. 5. | 2-Blatt |
| | 2,0<br>2,0 | BETANAL+<br>TRAMAT | | 30. 5. | 6-Blatt |
| H3 | 3,0<br>3,0<br>3,0 | GOLTIX+<br>BETANAL+<br>TRAMAT | | 24. 5. | 4-Blatt |

* Folgespritzung wegen starker Regenfälle nach Erstbehandlung

### 2.3 Modellformulierung und -quantifizierung

Um eine numerische Simulation der Abundanzdynamik vornehmen zu können, wird ein Differenzengleichungsmodell (1) annueller, samenvermehrter Unkrautpopulationen verwandt (nach RAUBER 1978, verändert), welches die Parameter Auflauf-, Entwicklungs- und Vermehrungsrate enthält.

$$Pot_{t+1} = -(Pot_t * a) + (Pot_t * a * e * v) \quad (1)$$

mit $Pot_t$ = Unkrautsamenpotential im Boden im Jahr t
a = Auflaufrate
e = Entwicklungsrate
v = Vermehrungsrate

Tabelle 4

*Daten des Herbizideinsatzes in Winterweizen 1988 (Schlag A) und 1989 (Schlag B)*
*Herbicide application data in winter wheat 1988 (field A) and 1989 (field B)*

| Variante | l/kg | Präparat | Wirkstoff | Datum | EC |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ia) Hauptversuch 1987/88 (Schlag A) | | | |
| H1 | 3,0 | IGRAN 500 | Terbutryn | 5. 11. 87 | 00 |
| | 2,5 | ARELON + | Isoproturon | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | Brom-, Ioxynil, MCPP | 26. 4. 88 | 30 |
| H2 | 2,5 | TOLKAN FLO + | Isoproturon | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | | 7. 4. 88 | 25 |
| H3 | 2,5 | ARELON + | | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | | 26. 4. 88 | 30 |
| | | Ib) Zusatzversuch 1987/88 (Aufwandmenge: 1,0) | | | |
| H2 | 2,0 | TOLKAN FLO + | | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | | 7. 4. 88 | 25 |
| H3 | 2,0 | ARELON + | | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | | 26. 4. 88 | 30 |
| | | IIa) Hauptversuch 1988/89 (Schlag B) | | | |
| H1 | 3,5 | IGRAN 500 | | 14. 11. 88 | 00 |
| | 2,0 | ARELON + | | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | | 24. 4. 89 | 30 |
| H2 | 2,0 | TOLKAN FLO + | | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | | 24. 4. 89 | 30 |
| H3 | | | unbehandelt | | |
| | | IIb) Zusatzversuch 1988/89 (Aufwandmenge: 1,0) | | | |
| H2 | 2,0 | ARELON + | | | |
| | 2,0 | OXYTRIL M | | 24. 4. 89 | 30 |
| H3 | 1,0 | STARANE 180 | Fluoroxypyr | 16. 5. 89 | 33 |

Zur Quantifizierung der Modellparameter wurde mit Hilfe eines Schätzrahmens von 0,1 m² Größe die Verunkrautung in den beiden Versuchsfrüchten an vier markierten Stellen in jeder Parzelle zu mehreren Terminen während der Vegetation erfaßt. Die Zählungen fanden jeweils vor dem Einsatz von Bekämpfungsmaßnahmen statt, um die bis dahin aufgelaufenen Unkrautpflanzen zu erheben sowie zur Erfassung überlebender und später keimender Individuen im weiteren Verlauf der Vegetation bis hin zur Ernte. Auf diese Weise ist es möglich, über die Boniturtermine hinweg für die gesamte Vegetationszeit an jeder Bonitursstelle die Zahl der dort aufgelaufenen sowie die Zahl zur Samenbildung gelangter Individuen zu ermitteln. Die Bestimmung des Unkrautsamenpotentials im Boden erfolgte mit der Kultivierungsmethode (Kropac 1966). Zu diesem Zweck wurden jeweils unmittelbar zur Saat von Zuckerrüben und Winterweizen, das heißt vor der Ausbringung des Vorauflaufherbizids in H1 sowie nach deren Ernte Bodenproben aus den Parzellen entnommen.

Aus den genannten Merkmalen konnten die Modellparameter für jedes Versuchsglied ermittelt werden. Die Auflaufrate wurde als Quotient aus der Keimpflanzenzahl (K) und dem Unkrautsamenpotential in der Schicht 0 bis 30 cm zur Saat der Nutzpflanzen ($Pot_{0-30\,cm}$ zur Saat) berechnet (2).

$$a\,(\%) = \frac{K}{Pot_{0-30\,cm}\ \text{zur Saat}} * 100 \qquad (2)$$

Der Quotient aus der Zahl samenbildender Pflanzen (S) und der Keimpflanzenzahl stellt die Entwicklungsrate dar (3).

$$e\,(\%) = \frac{S}{K} * 100 \qquad (3)$$

Die Vermehrungsrate wurde schließlich als Quotient aus den neugebildeten Samen in der obersten Bodenschicht ($Pot_{0-8\,cm}$ nach Ernte) und der Zahl samenbildender Pflanzen errechnet (4).

$$v = \frac{Pot_{0-8\,cm} \text{ nach Ernte}}{S} \tag{4}$$

Zunächst wurden die Kenngrößen des Populationsmodells für die gesondert erfaßten Unkrautarten mit hoher Stetigkeit sowie für die Summe aller Unkräuter berechnet. Die Prüfung der Verteilungsparameter dieser Zahlen ergab, daß eine Varianzanalyse zur Testung des Einflusses der Faktoren auf die Modellparameter lediglich für die Summe aller Unkräuter zulässig ist, während einzelne Unkrautarten nicht normalverteilt beobachtet wurden. Andererseits wiesen die Relativzahlen der Modellparameter eine Normalverteilung auf, so daß Varianzanalysen durchgeführt werden konnten. Diesen liegt das Modell einer Blockanlage zugrunde.

Für die gesicherten Effekte wurden anschließend Grenzdifferenzen nach dem t-Test zu einem Signifikanzniveau von 95 % berechnet, die als Maßstab zur Differenzierung der Mittelwerte in Abhängigkeit von den geprüften Anbaumaßnahmen dienten.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse in Zuckerrüben basieren auf zwei stark unterschiedlichen Jahren und decken somit die zu erwartende Witterungsvarianz ab. Die bereinigten Zuckererträge erreichen auf Schlag A (1987) 83 dt/ha im Normalbestand (S+) und 78 dt/ha im lückigen Bestand (S−), während auf Schlag B infolge der Trokkenheit nur 65 bzw. 40 dt/ha geerntet werden. In beiden Beobachtungsjahren in Winterweizen herrschten ungewöhnlich warme Sommer mit geringen Niederschlägen, während die Wasserversorgung auf Schlag A (1988) jedoch noch im Mittel aller Versuchsglieder für einen standortüblichen Ertrag von 83 dt/ha ausreicht, fällt im folgenden Jahr auf Schlag B der mittlere bereinigte Kornertrag auf 53 dt/ha ab.

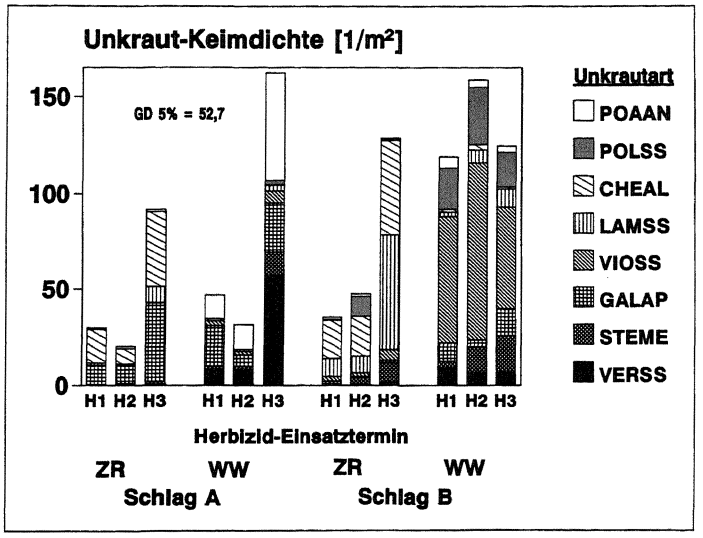
Die beobachtete Verunkrautung kann sowohl im Hinblick auf das Artenspektrum als auch das Auftreten von bis zu acht Arten als typisch für die beiden Versuchsfrüchte auf von Klima und Boden begünstigten Standorten, wie dem Dikopshof, mit langjährigem Herbizideinsatz in allen Früchten der Fruchtfolge angesprochen werden (Abb. 1).

Ungräser sind allerdings nur in Form der konkurrenzschwachen *Poa annua* stetig. Mit Ausnahme von Kamille treten alle samenvermehrten Problemunkräuter auf. Das Ausgangssamenpotential zur Saat der Zuckerrübe, welches als Nachwirkung einer mehrjährigen Versuchsanstellung entstanden ist, liegt auf niedrigem Dichteniveau (2500 bis 5000 keimfähige Samen/m²), die Anbauverfahren konnten in dieser Versuchsanlage in einer Umwelt auf verschiedenen Unkrautdichten getestet werden, was die Verallgemeinerungsfähigkeit der Ergebnisse erhöht.

Die geprüften Faktorstufenkombinationen bilden praxisübliche Anbauverfahren, wobei innerhalb praxisrelevanter Grenzen Variationen in Termin und Menge der aufgewendeten Betriebsmittel (Herbizide, Stickstoff) in unterschiedlich dichten Nutzpflanzenbeständen getestet wurden. Die eingesetzten Herbizide waren an die vorgefundene Verunkrautung und Witterung zum Spritzzeitpunkt angepaßt, sodaß eine Übertragbarkeit auf andere Einsatzverhältnisse und Wirkstoffe nur dann gegeben ist, wenn auch dort ein passendes Herbizid gewählt wird. Die Ergebnisse dürfen hingegen nicht mit den geprüften Wirkstoffen auf völlig andere Unkrautfloren, -Entwicklungsstadien und Witterungsbedingungen übertragen werden.

*Abb. 1: Unkraut-Keimpflanzendichte, artenweise aufgeschlüsselt, in Abhängigkeit von Schlag, Frucht und Herbizid-Einsatztermin (Mittel über 3 N-Düngungen, 2 Saatstärken, 2 Wiederholungen)*

*Emerging weed seedlings density of different species depending on field, crop and date of herbicide application (mean of 3 nitrogen fertilizer quantities, 2 crop densities, 2 rep.)*




| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Poa | annua | (POAAN) | Viola | arvensis | (VIOSS) |
| Polygonum | aviculare | (POLSS) | | tricolor | |
| | persicaria | | Galium | aparine | (GALAP) |
| | convolvulus | | Stellaria | media | (STEME) |
| Chenopodium | album | (CHEAL) | Veronica | hederifolia | (VERSS) |
| Lamium | amplexicaule | (LAMSS) | | persica | |
| | purpureum | | | | |

## 3.1 Quantifizierung der Modellparameter

Bei zusammenfassender Betrachtung der signifikanten Faktoreinflüsse auf die Unkrautpopulationsdichte zu verschiedenen Entwicklungsstadien ist zu beachten, daß der Hauptversuch aus einer mehrjährigen Versuchsanstellung resultiert, sodaß bereits das Ausgangssamenpotential bei Saat der Zuckerrüben auf beiden Schlägen sowie bei allen folgenden überprüften Unkrautentwicklungsstadien die Populationsdichte durch das Unkrautbekämpfungsverfahren variiert wird, wobei Interaktionen mit Schlag- bzw. Jahres- und Fruchteinflüssen bestehen (Abb. 1). Der Einfluß der Herbizidaufwandmenge, der auf vorwirkungsfreien Flächen geprüft wurde, ist für die Dichte samenbildender Pflanzen signifikant.

Auch die Höhe der Stickstoffdüngung verursacht nach mehrjähriger Versuchsdauer, entgegen den Ergebnissen von Hengst (1983), eine Variation der Ausgangsunkrautsamendichte, die in Wechselwirkung mit dem Herbizideinsatz steht (Hurle et al. 1988). Der Nährstoffeinfluß auf die Unkrautkeimpflanzendichte sowie die Dichte samenbildender Pflanzen variieren hingegen in Abhängigkeit von Schlag und Nutzpflanzenart. Die niedrigste Düngungsstufe verbesserte auf Schlag B unter ungünstigen Wachstumsbedingungen für die Nutzpflanzen, hierfür sprechen auch die eingangs erwähnten Ertragseergebnisse, insbesondere in Winterweizen, die Entwicklungsmöglichkeiten für Unkräuter. Die Saatstärke der Nutzpflanzen hat nur einen schwachen Einfluß auf die Unkraut-Keimpflanzendichte der jedoch keine nachhaltige Dichtevariation bewirkt.

Ursächlich für die beobachtete Variation der Unkrautdichte müssen signifikante Varianzen der Prozesse innerhalb der Populationsdynamik sein. Um die Populationsdynamik mit Hilfe des Modells (1) zutreffend nachzubilden, müssen

deshalb, gestützt auf die Varianzanalysenergebnisse der Modellparameter von den zwei Versuchsschlägen, Parameterwerte für die geprüften Anbauvarianten bestimmt werden, die zur Simulation in die Modellgleichung eingesetzt werden können. In der Literatur liegen nur sehr wenige Angaben zur Wirkung der geprüften Faktoren auf die Modellparameter vor, sodaß lediglich die Größenordnung der Parameterwerte auf Übereinstimmung mit anderen Autoren geprüft werden kann.

Die Auflaufrate wird in der vorliegenden Arbeit bezogen auf die Bodenschicht von 0 bis 30 cm berechnet, da die langfristige Beurteilung der potentiellen Verunkrautung das Samenpotential des gesamten bearbeiteten Horizontes berücksichtigen muß (Knab und Hurle 1986, Kaiser 1989). Die absolute Höhe der gefundenen Auflaufraten stimmt, bei einem Mittelwert über alle Varianten von 3,3 %, mit den in der Literatur beschriebenen Werten gut überein. So stellt Bräutigam (1990) in Abhängigkeit von der Grundbodenbearbeitung Unkrautauflaufraten zwischen 2 und 5 % fest.

Überraschend ist eine sehr niedrige Auflaufrate in Zuckerrüben auf Schlag A 1987, obwohl dieses Jahr durch hohe Niederschläge im Winter und Frühjahr gekennzeichnet war, während 1988 und insbesondere 1989, trotz zu trockener Bedingungen im Vergleich zum langjährigen Mittelwert, deutlich höhere Auflaufraten in Weizen und Rüben beobachtet wurden. Die Ergebnisse zum Samenpotential belegen, daß nicht ein besonders hoher Wert bei den Ausgangsdaten Ursache für den niedrigen Wert des Quotienten ist. Sauerborn et al. (1988) finden einen sehr niedrigen Wasserbedarf für die Keimung von *Chenopodium album*, einer Leitart auf beiden Schlägen in Zuckerrüben, der die hohe Auflaufrate auf Schlag B erklären kann. Daneben ist durch die bessere Entwicklung der Rüben auf Schlag A im Vergleich zum Trockenjahr 1988 auf Schlag B ein keimungshemmender Effekt auf die Unkrautsamen zu erwarten.

Holzmann (1987) findet keine signifikanten Unterschiede in der Auflaufrate von *Viola arvensis* zwischen unbehandelten und im Nachauflauf mit Herbiziden behandelten Wintergetreide- und Zuckerrübenbeständen. Bei den in der vorliegenden Arbeit geprüften Anbauverfahren tritt für die Gesamtheit aller Unkräuter neben nicht verallgemeinerbaren Wechselwirkungen mit Schlag- bzw. Jahreseffekten eine signifikante Interaktion Frucht * Herbizidtermin * Saatstärke auf. Die Saatstärkenstufen in der Variante H1 bei Zuckerrüben bzw. H3 bei Winterweizen weisen absicherbare Differenzen auf. Folglich müssen für diese Herbizideinsatztermine unterschiedliche Auflaufraten in Abhängigkeit von der Saatstärke angenommen werden. Die Auflaufraten des H3-Termines im Weizen auf Schlag A und B (unbehandelt) unterscheiden sich nicht, da nach EC 31 praktisch keine Unkrautpflanzen mehr auflaufen. Für eine nicht mit Herbiziden behandelte Variante im Winterweizen können also die Werte der Auflaufrate bei spätem Herbizideinsatz (H3) eingesetzt werden.

Weiterhin läßt sich aus der Wechselwirkung Herbizidtermin * N-Düngung über beide Früchte hinweg ein Einfluß der Stickstoffdüngergabe im Frühjahr ableiten. Dieser kann auf einer direkten Keimungsförderung durch Nitratsalze, aber auch auf einer Variation der Konkurrenzverhältnisse in frühen Wachstumsstadien zwischen Unkraut und Nutzpflanzenbeständen beruhen. Arten, die besonders durch Stickstoff in der Keimung gefördert werden, waren in den vorliegenden Versuchen mit großer Dichte vorhanden; dies trifft sowohl für *Chenopodium album* auf beiden Schlägen in Zuckerrüben als auch für *Veronica* spp. auf Schlag A und *Polygonum* spp. auf Schlag B in Winterweizen zu.

Die Mittelwerte weisen signifikante Differenzen zwischen Stickstoffstufen insbesondere bei später Nachauflaufbehandlung in H3 (N2 > N1 und N3) sowie in

der Vorauflaufvariante H1 (N1 > N2 und N3) auf. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten, die von einer auflaufförderndnden Wirkung der Stickstoffdüngung berichten, wie z. B. FAWCETT und SLIFE (1978) bei *Chenopodium album* in Zuckerrüben, läßt die gute Bodenqualität des Versuchsstandortes vermuten, daß im vorliegenden Fall die höheren N-Konzentrationen in den hoch gedüngten Varianten keine auflaufförderndnde Wirkung mehr verursachten.

RADEMACHER und OZOLINS (1952) stellen in Roggen eine Verminderung des negativen Einflusses steigender Nutzpflanzendichte auf den Unkrautauflauf durch Stickstoffdüngung fest, während die eigenen Ergebnisse keine derartige Wechselwirkung aufweisen und somit eine Addition der unkrautunterdrückenden Wirkungen von Saatmenge und N-Düngung nahelegen. Im vorliegenden Fall scheint ein relativer Konkurrenzvorteil gegenüber den Nutzpflanzen in der Jugendentwicklung der Unkräuter, eventuell auch eine Keimungsförderung von Lichtkeimern unter schwächer entwickelten Nutzpflanzenbeständen, der Grund für die höheren Auflaufraten in den mäßig gedüngten Varianten zu sein.

WILSON et al. (1985) können bei zufällig ausgewählten *Phaseolus*-Bohnenfeldern die Varianz der Auflaufdichte ausgewählter Unkrautarten zu ca. 50 % aus der Samendichte im Boden erklären. Auch in der vorliegenden Arbeit erklärt das gewählte Varianzanalysenmodell lediglich 62 % der Varianz der Auflaufrate durch die Einflüsse der geprüften Versuchsfaktoren. Erklärungsbeiträge in vergleichbarer Größenordnung sind durch die Berücksichtigung von Witterungsparametern, speziell Temperatur und Luftfeuchte, möglich, wie EVERSHEIM (1991) zeigt. Allerdings kann dieser Ansatz nur ex post angewandt werden. Grundsätzlich bleibt in Übereinstimmung mit der Literatur im Hinblick auf Simulationen der Unkrautkeimdichte festzuhalten, daß der Unkrautauflauf im Einzeljahr nur mit mittlerer Sicherheit prognostiziert werden kann (ZWERGER 1987, KAISER 1989).

Die Varianzanalysen des Parameters Entwicklungsrate erlauben keine Verallgemeinerung der Effekte von Herbizideinsatztermin und Frucht über die Versuchsjahre bzw. Schläge. Die Jahresvarianz der Beobachtungen läßt sich allerdings aus den Versuchsbedingungen teilweise erklären. Für die späte Nachauflaufbehandlung des Winterweizens kann nur der Wert aus dem ersten Versuchsjahr auf Schlag A berücksichtigt werden, da diese Variante ja im zweiten Jahr gar nicht behandelt wurde. Um die große Varianz des Merkmales speziell beim Verfahren H2 in beiden Früchten zu berücksichtigen, können bei Simulationen die Ergebnisse unter alternativer Verwendung der beiden Jahresmittelwerte gegenübergestellt werden.

Aus den Ergebnissen des Zusatzversuches folgt, daß eine Dosiswirkungskurve für die Entwicklungsrate sinnvoll nur für die frühe Nachauflaufspritzung (H2) ermittelt werden kann, während bei später Behandlung die Herbizidaufwandmenge kaum noch die Unkrautentwicklung beeinflußt, da die Unkräuter erst nach ihrer Samenbildung beseitigt werden. Durch Anpassung einer nichtlinearen Funktion des Weibull-Typs, wie sie für den sachlogischen Zusammenhang zwischen Herbiziddosis und Entwicklungsrate angezeigt erscheint (RICHTER 1985), wird der recht hohe Erklärungsbeitrag der einfachen linearen Regression von B = 0,69 nicht weiter erhöht, sodaß mit ausreichender Näherung die Gleichung (5) angenommen werden kann.

$$e\% = 53{,}9 - 49{,}8 * \text{Aufwandmenge } (B = 0{,}69) \qquad (5)$$

Als „Aufwandmenge" ist hier der Bruchteil der vom Hersteller empfohlenen Menge einzusetzen, der ausgebracht wurde. Aus dieser Funktion errechnet sich die Entwicklungsrate ohne Herbizideinsatz mit e = 53,9 %, die recht gut mit dem

Wert der unbehandelten Variante H3 im Winterweizen auf Schlag B (1989) von e = 57,1 % übereinstimmt. ZWERGER (1987) findet in unbehandelten Kontrollvarianten Entwicklungsraten zwischen 43 und 71 %.

Die absicherbaren Einflüsse von Herbizideinsatztermin und Stickstoffdüngung auf die Vermehrungsrate beruhen allein auf den extremen Verhältnissen im zweiten Zuckerrüben-Versuchsjahr. Hier bestätigt sich, daß in sehr lückigen Nutzpflanzenbeständen extrem samenreiche Unkrautpflanzen heranwachsen (FRIGO und FISCHBECK 1988, NIEMANN 1990). Die Konkurrenzsituation zwischen Rüben und Unkraut wurde durch die starke Trockenheit des Sommers 1988 zusätzlich zugunsten des Unkrautes beeinflußt, wie auch WERNER (1985) in Mais feststellte. Für die Unkräuter in Rüben wird als Erwartungswert für die Vermehrungsrate, unabhängig vom Anbauverfahren, das Mittel auf Schlag A (1987) angenommen.

Dieses liegt höher als die Werte in Winterweizen, wie auch HOLZMANN (1987) z. B. für *Viola arvensis* eine Vermehrungsrate von 989 Samen/Pfl. in Zuckerrüben gegenüber 278 Samen/Pfl. in Wintergerste feststellt. Die Signifikanz der Hauptwirkung Herbizidtermin bei alleiniger Verrechnung der Frucht Winterweizen aus dem Hauptversuch rechtfertigt die Differenzierung zwischen Vor- und Nachauflaufbehandlung im Weizen für dieses Merkmal. Der Mittelwert der Nachauflaufstufen wird auch für die Simulation von unbehandelten Weizenvarianten angesetzt.

Die von KOCH (1969) bei *Galinsoga* spp. gefundene Abnahme der Vermehrungsrate mit steigender Herbizidaufwandmenge ist in den vorliegenden Versuchen nicht nachzuweisen. Die Herbiziddosis reguliert offenbar die Unkrautdichte, hat aber keinen deutlichen Einfluß auf die Samenbildung der überlebenden Pflanzen. Es ist denkbar, daß ein negativer Herbizideinfluß auf die Pflanzen durch die verminderte Konkurrenz für die überlebenden Individuen nach einer Behandlung kompensiert wird.

Eine Erhöhung der Unkrautvermehrungsrate mit steigender Stickstoffdüngung, wie sie andere Autoren beschreiben (PULCHER-HÄUSSLING und HURLE 1986, FRANZ et al. 1990, ZWERGER 1990), tritt in den vorliegenden Versuchen ebenfalls nicht auf, obwohl die vorgefundene Unkrautflora mit diesen Arbeiten gut vergleichbar ist.

ZWERGER (1987) stellt einen Einfluß von Pflanzenbaumaßnahmen auf die Unkrautpopulationsdynamik hauptsächlich über eine Variation der Vermehrungsrate fest, wobei er keine Terminvarianten des Herbizideinsatzes prüfte und die N-Düngung deutlich abstufte. In den vorliegenden Versuchen mit zeitlich gestaffeltem Herbizideinsatz und geringen Unterschieden in der N-Versorgung, wie die kaum beeinflußte Ertragsbildung der Nutzpflanzen belegt, bietet die Auflaufrate größere Einflußmöglichkeiten, während die Beeinflussung der Vermehrungsrate gering bleibt. In beiden Fällen wird die Entwicklungsrate vor allem durch einen Herbizideinsatz variiert.

Tabelle 5 faßt die aus den eigenen Beobachtungen unter Berücksichtigung der Literatur identifizierten Modellparameter in Abhängigkeit von den geprüften Versuchsfaktoren zusammen. Es wird deutlich, daß die Einflußmöglichkeiten auf die Prozesse der Unkrautpopulationsdynamik durch Anbaumaßnahmen im Verlauf der Vegetation geringer werden. Während neben dem Herbizideinsatz auch Nutzpflanzensaatstärke und Stickstoffdüngung die Unkrautauflaufrate beeinflussen, wird die Entwicklungsrate lediglich vom Herbizideinsatzverfahren bestimmt, schließlich kann die Vermehrungsrate kaum noch verändert werden.

### 3.2 Verifizierung des Modells

Unter Verwendung der oben identifizierten Modellparameter wird im folgenden als Grundlage und notwendige Voraussetzung für spätere Simulationsexperimente (ZWERGER und HURLE 1988) eine Verifikation des Modells (1) der Unkrautpopulationsdynamik angestrebt. Es soll die Unkrautentwicklung auf einer nicht zur Parameterschätzung verwendeten Fläche, auf der vergleichbare Anbauverfahren durchgeführt wurden, mit Hilfe des Modells simuliert werden. Der Vergleich zwischen simulierten und empirisch ermittelten Werten liefert dann ein Maß für die Gültigkeit der Parameterschätzwerte (ZWERGER und HURLE 1988).

Tabelle 5

*Modellparameter Auflauf- (a), Entwicklungs- (e) und Vermehrungsrate (v) in Abhängigkeit von Faktoren des Anbauverfahrens von Winterweizen und Zuckerrüben*
*Weed emergence rate (a), development rate (e) and weed seed production per plant (v) depending on crop management factors of winter wheat and sugar beet*

| Faktoren des speziellen Anbauverfahrens | | | Frucht | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Zuckerrüben | | | Winterweizen | | |
| Herbizid-einsatztermin | Stickstoff-düngung | Saatstärke | a (%) | e (%) | v | a (%) | e (%) | v |
| | N1 | S− | 4,58 | | | 4,77 | | |
| | | S+ | 2,36 | | | 4,77 | | |
| H1 | | | | 33,1 | 156,6 | | 18,7 | 114,3 |
| | N2/3 | S− | 3,51 | | | 1,07 | | |
| | | S+ | 1,50 | | | 1,07 | | |
| H2* | N1/2/3 | S−/+ | 1,59 | ( 7,0)<br>20,7<br>(34,3) | 156,6 | 3,96 | ( 1,2)<br>12,9<br>(24,7) | 55,5 |
| | N1 | S− | 2,00 | | | 4,95 | | |
| | | S+ | 2,00 | | | 2,76 | | |
| H3 | N2 | S− | 4,31 | 10,2 | 156,6 | 7,60 | 32,5 | 55,5 |
| | | S+ | 4,31 | | | 2,83 | | |
| | N3 | S− | 2,00 | | | 4,95 | | |
| | | S+ | 2,00 | | | 2,76 | | |
| | N1 | S− | | — | | 4,95 | | |
| | | S+ | | — | | 2,76 | | |
| unbehandelt | N2 | S− | | — | | 7,60 | 53,9 | 55,5 |
| | | S+ | | — | | 2,83 | | |
| | N3 | S− | | — | | 4,95 | | |
| | | S+ | | — | | 2,76 | | |

* oberer Wert für e: Weizen Schlag A / Rüben Schlag B
unterer Wert für e: Weizen Schlag B / Rüben Schlag A

Zu diesem Zweck wurde im Jahr 1987 nach Ernte von Winterweizen das Samenpotential im bearbeiteten Horizont von 0 bis 30 cm auf dem dritten Schlag C der Versuchsrotation als unabhängiger Datensatz erhoben. Es zeigen sich signifikante Hauptwirkungen des Herbizideinsatztermines sowie der Stickstoffdüngermenge auf diesem Schlag, Saatstärkeneffekte treten nicht auf. Aufgrund dieser Ergebnisse werden die neun Mittelwerte der Wechselwirkung Herbizidtermin * N-Düngung als Zielgrößen für die Simulation ausgewählt.

Der Weizen, nach dessen Ernte die Samenpotentialbestimmung erfolgte, war die fünfte Versuchsfrucht im Rahmen der betrachteten Versuchsanlage auf Schlag C (vgl. Tab. 1). Da in Wintergerste keine Beobachtungen durchgeführt

wurden, werden für das Jahr 1985 auf Schlag C mit Wintergerste die Parameterwerte des Winterweizens eingesetzt. KAISER (1989) berichtet über etwas bessere Vermehrungsbedingungen für die dicotyle Gesamtverunkrautung in Wintergerste bei einer Versuchsanlage, die der vorliegenden sehr ähnlich ist. Insbesondere die Vermehrungsrate von *Galium aparine* war in Wintergerste höher, was aber teilweise durch eine geringere Entwicklungsrate wieder kompensiert wird. Insgesamt traten aber keine großen Unterschiede in der Unkrautpopulationsdynamik zwischen Winterweizen und -gerste auf.

Die in den fünf Jahren durchgeführten Maßnahmen werden einem der geprüften Anbauverfahren zugeordnet, wobei die Unkrautbekämpfungsverfahren ihrer Beschreibung nach in einigen Fällen nicht sicher einsortiert werden können. Hier muß zusätzlich auf vorhandene Unkrautbonituren aus diesen Jahren zurückgegriffen werden, um die Varianten entsprechend ihrer Ausgangs- und Restverunkrautung zu bewerten. Die Betrachtung dieser Unkrautbonituren ergibt weiterhin, daß eine Unkrautbekämpfung im frühen Nachauflauf, entsprechend dem Verfahren H2, in Wintergetreide stets sehr gut gewirkt hatte, so daß für die Simulation der niedrige Wert der Entwicklungsrate aus dem ersten Weizenversuchsjahr von $e = 1{,}2$ % angesetzt werden kann.

Schließlich muß zur Durchführung der Simulation noch ein Startwert für das Samenpotential zu Beginn der Versuchsreihe, vor Saat der Zuckerrüben 1983, festgelegt werden. Hierüber liegen keine direkten Versuchsergebnisse vor. In Anbetracht der sehr homogenen Bodenverhältnisse mit niedrigem Unkrautbesatz auf dem Dikopshof kann ein gleicher Ausgangswert auf allen Parzellen angenommen werden (HENGST 1983). Es erscheint gerechtfertigt, die mittlere Unkrautsamendichte von beiden Schlägen des vorwirkungsfreien Zusatzversuchs einzusetzen. Diese liegt bei rund 1600 keimfähigen Samen/m$^2$ in 0 bis 30 cm Bodentiefe.

Die Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Simulation des Unkrautsamenpotentials auf Schlag C nach fünf Jahren. Die empirisch ermittelten Werte sind gegen die Simulationsergebnisse abgetragen. Pflanzenbaulich betrachtet fällt auf, daß alle Varianten trotz jährlichen Herbizideinsatzes sowohl im Feld als auch bei der Simulation einen Anstieg im Samenpotential erfahren haben. Dies entspricht den Erfahrungen anderer Versuchsansteller (HURLE et al. 1988) und mag auch damit zusammenhängen, daß unter Versuchsbedingungen die Unkrautpopulationen jeweils vor der Bekämpfung erst gezählt werden müssen, was einen sehr frühen Herbizideinsatz mit entsprechend optimalen Ergebnissen verhindert.

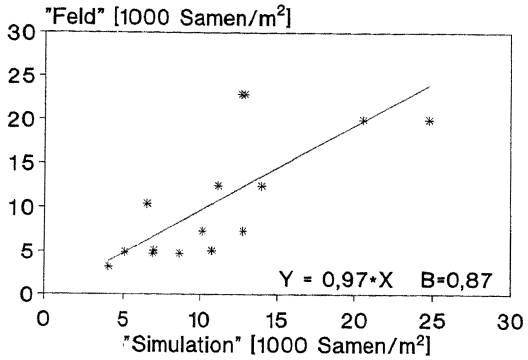
Die lineare Regression durch den Koordinatenursprung zwischen beiden Größen zeigt, daß die signifikante Streuung der im Feld gemessenen Unkrautsamendichten zu 87 % durch das Simulationsmodell erklärt werden kann, wobei auch die absolute Höhe der empirischen Daten angesichts einer Steigung der Funktion von 0,97 gut getroffen wird.

Der gewählte deterministische Modellansatz ermöglicht stets nur die Beschreibung einer „Durchschnittsentwicklung", sodaß eine gewisse Reststreuung unvermeidlich übrigbleibt (ZWERGER und HURLE 1990). RICHTER (1985) erscheint jedoch der erheblich höhere Aufwand für einen stochastischen Ansatz nicht problemgerecht.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß das einfache Populationsdynamikmodell und die aus dem Versuch ermittelten Parameter die Unkrautdynamik auf dem Dikopshof für das geprüfte Spektrum von Anbauverfahren gut erklären und somit für vergleichbare Rahmenbedingungen, das heißt bei ähnlichem Boden, Klima und Unkrautartenspektrum, im Bereich niedriger Unkrautdichten bis zu

*Abb. 2: Unkrautsamenpotential nach Ernte von Winterweizen 1987 auf Schlag C — empirisch ermittelte Daten („Feld") vs. Simulationsergebnisse („Simulation") sowie funktionaler Zusammenhang*

*Weed seedbank after harvest of winter wheat 1987 on field C — empirical data ("Feld") vs. simulation results ("Simulation") and functional relationship*




25.000 Samen/m² Simulationsexperimente mit diesem Modell durchgeführt werden können.

In Situationen mit deutlich höherer Verunkrautung kann jedoch auf den Einbau dichteabhängiger Rückkoppelungsbeziehungen nicht verzichtet werden, um im Simulationslauf ein unrealistisch hohes, exponentielles Populationswachstum der Unkräuter zu verhindern (Zwerger und Hurle 1990, Kaul 1992, Kaul und Heyland 1992).

### 3.3 Optimierung der Unkrautkontrolle mit Hilfe des Modells

In Zuckerrüben ist unter populationsdynamischen Gesichtspunkten eine vollständige Unkrautfreiheit anzustreben (Holzmann und Niemann 1988). Die Analyse des Einflusses der geprüften Anbaumaßnahmen auf die Unkrautpopulationsdynamik zeigt (vgl. Tab. 5), daß im Zuckerrübenanbau durch Nachauflaufherbizideinsatz ein drastischer Populationsanstieg verhindert werden kann. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit der neueren Entwicklung in praktischen Betrieben, Zuckerrüben mit reinen Nachauflaufspritzverfahren unkrautfrei zu halten.

Eine Unkrautbekämpfung auf Basis einer Vorauflaufspritzung, ergänzt um eine Nachbehandlung mit verhältnismäßig geringen Herbiziddosen, führt bei den vorliegenden Untersuchungen in Rüben demgegenüber zu unbefriedigenden Kontrollergebnissen, da der Bekämpfungserfolg hinsichtlich der Abtötung der Pflanzen vor Erreichen der Samenreife mit (1 − e =) 66 % sehr gering ausfällt. Noch vor zehn Jahren wurde dieses Verfahren als optimal angesehen, allerdings mit höherem Mittelaufwand und ohne Betrachtung der Unkrautvermehrung (Kochs et al. 1981). Im Winterweizen ist demgegenüber besonders der späte Nachauflaufbehandlungstermin (H3) durch eine geringe Effektivität des Herbizideinsatzes aus populationsdynamischer Sicht gekennzeichnet.

Bei allen diesen Bekämpfungsverfahren ist festzustellen, daß ein deutliches Ansteigen der Unkrautpopulationen erwartet werden muß. Mit solchen Strategien ist folglich eine betriebs- wie volkswirtschaftlich vernünftige chemische Unkrautbekämpfung nicht möglich, da man alljährlich eine volle Herbizidaufwandmenge auf die Flächen ausbringt und dennoch mit einem Unkrautdruck konfrontiert ist, der bei fehlender Bekämpfung im Einzeljahr, z. B. infolge mangelnder Befahrbarkeit des Ackers, starke Ertragseinbußen und Ernteerschwernisse sowie einen deutlichen Anstieg des Unkrautsamenpotentials erwarten läßt.

Holzmann und Niemann (1988) stellen anhand von Simulationsstudien mit *Viola arvensis*, Hofstetter (1986) mit *Mercurialis annua*, in einer Fruchtfolge aus Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste fest, daß nur bei Bekämp-

fungserfolgen von deutlich über 90 % (entspricht e < 10 %) die Populationen langfristig einen Gleichgewichtszustand besitzen. Die von GEROWITT et al. (1990) gefundene kontinuierliche Abnahme des Unkrautsamenpotentials bei alljährlichem Herbizideinsatz kann durch die eigenen Ergebnisse nicht bestätigt werden.

Den vorliegenden Untersuchungen zufolge ist lediglich der frühe Nachauflaufherbizideinsatz (H2) unter günstigen Einsatzbedingungen in der Lage, die Unkrautpopulationen auf dem niedrigen Niveau, wie es auf dem Dikopshof vorherrscht, zu stabilisieren. Nur dieses Verfahren stellt folglich einen ökonomisch wie ökologisch langfristig vertretbaren Einsatz chemischer Unkrautbekämpfungsmittel dar. KING et al. (1986) finden im Maisanbau bei Bewertung der Verfahren mit ökonomischen Kennwerten bis hin zum Deckungsbeitrag vergleichbare Resultate.

Die folgenden Überlegungen zur Optimierung von Anbauverfahren mit Hilfe des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Modells der Unkrautpopulationsdynamik im Hinblick auf eine effektive Unkrautkontrolle basieren deshalb auf einem frühen Nachauflaufherbizideinsatz.

### *3.3.1 Optimierung des Herbizideinsatzes*

Abbildung 3 zeigt eine Simulation der Unkrautentwicklung über drei Rotationen bei geringer Ausgangsdichte, beginnend in Zuckerrüben. Dargestellt sind die in der jeweiligen Hauptfrucht auflaufenden Unkrautpflanzen, die aus den Simulationsergebnissen des Samenpotentials im Boden durch Multiplikation mit der jeweils zutreffenden Unkrautauflaufrate errechnet wurden. Zur Orientierung über die absolute Verunkrautungsstärke ist die in Getreide allgemein anerkannte wirtschaftliche Schadensschwelle für eine Bekämpfungsentscheidung im Hinblick auf den Naturalertragsverlust im Einzeljahr bei 50 Pflanzen/m² eingezeichnet.

Es wird untersucht, wie sich eine Unkrautbekämpfung nach dem Prinzip der wirtschaftlichen Schadensschwelle in Winterweizen langfristig auswirken kann. In Zuckerrüben, wo bisher keine Schadensschwellen angewendet werden, wird hierbei stets eine Bekämpfung zum frühen Nachauflauftermin angenommen, während der Weizen in der Schadensschwellenvariante nur mit einem Herbizid gespritzt wird, falls mehr als 50 Unkrautpflanzen/m² im Frühjahr gezählt werden (HEITEFUSS et al. 1984). Für diesen Fall wird auch in Weizen der frühe Nachauflauftermin angesetzt. Als Vergleichsvariante ist die alljährliche Behandlung im frühen Nachauflauf dargestellt. Außerdem wird eine Strategie mit dauernder Herbizidapplikation, in Winterweizen allerdings mit gesenkter Aufwandmenge (0,8fache Dosis), verglichen.

Im zweiten Simulationsjahr, dem ersten Jahr mit Getreideanbau, ist die Schadensschwelle in Weizen mit 32 Unkrautpflanzen/m² bei Zählung zum frühen Nachauflauftermin unterschritten, folglich bleibt bei Beachtung der Schadensschwellen das Getreide hier unbehandelt. Im Vegetationsverlauf keimen unter dieser Voraussetzung weitere Unkrautpflanzen, so daß bereits im selben Jahr eine erhöhte Unkraut-Keimpflanzendichte errechnet wird.

Der Verzicht auf eine Bekämpfungsmaßnahme führt dazu, daß bereits im nachfolgenden Jahr und in allen folgenden Getreidefrüchten die Schadensschwelle immer wieder überschritten wird, obwohl jetzt stets eine Behandlung im frühen Nachauflauf erfolgt. Die Populationen wachsen also, wie von HEYLAND (1975) postuliert und auch empirisch bestätigt (HEYLAND et al. 1986, HOFSTETTER 1986, HOLZMANN 1987, HOLZMANN und NIEMANN 1988), explosionsartig an und können danach selbst bei optimalen Bekämpfungsergebnissen nur sehr langsam

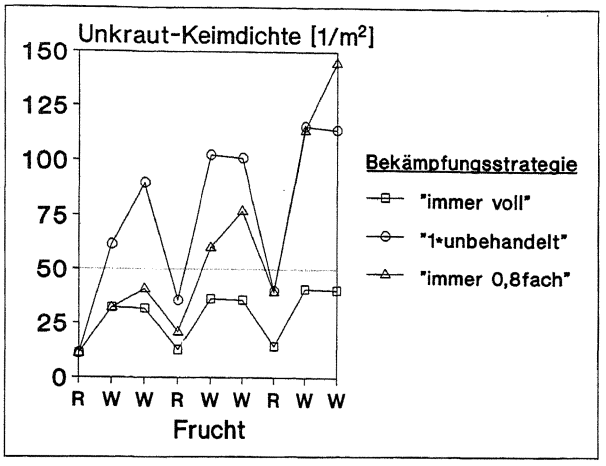



*Abb. 3: Simulation der Unkrautkeimpflanzendichte in Zuckerrüben (R) und Winterweizen (W) über drei Rotationen einer Fruchtfolge bei frühem Nachauflaufherbizideinsatz in beiden Früchten (immer voll) im Vergleich zur Bekämpfung nach wirtschaftlicher Schadensschwelle in Weizen (1 * unbehandelt) bzw. zum ständigen Einsatz der 0,8fachen Aufwandmenge in Weizen (immer 0,8fach)*

*Simulation of emerging weed seedlings in sugar beet (R) and winter wheat (W) over nine years with repeated early post emergence herbicide application in both crops (immer voll) compared to one time without spraying in wheat (1 * unbehandelt) and repeated application of reduced herbicide doses (immer 0,8fach)*

wieder reduziert werden. Andererseits gelingt es bei dauernder Bekämpfung zum günstigen Termin, die Populationen auf dem Niveau unterhalb der Schadensschwelle zu stabilisieren.

Das Schadensschwellenkonzept wird ausdrücklich bei niedrigen Samendichten empfohlen (Heitefuss et al. 1984, Kaiser 1989). Hagemeister und Heitefuss (1986) erwarten bei einmaligem Verzicht auf die Bekämpfung „keine drastische Vermehrung" des Unkrautes, weil der Unkrautsamenvorrat im Boden viel größer ist, als die in einem Jahr unterhalb der Schadensschwelle produzierte Samenmenge. Die eigenen Ergebnisse, wie auch Heyland et al. (1986) oder Holzmann (1987), zeigen hingegen, daß auf einem unkrautarmen Standort wie dem Dikopshof die Samenmenge im Boden in einem Jahr durchaus verdoppelt werden kann.

Bei dem Bekämpfungsverfahren mit gesenkter Aufwandmenge überschreitet die Verunkrautung nach vier Jahren erstmals die Schadensschwelle, und erst im vorletzten Jahr des neunjährigen Betrachtungszeitraumes wird das Verunkrautungsniveau der einmal unbehandelten Variante erreicht. Man hat dann in den Weizenjahren ebenfalls eine volle Herbiziddosis eingespart, wobei der Populationsanstieg deutlich verlangsamt abläuft und jederzeit gestoppt werden kann.

Orson (1990) berichtet über Versuchsergebnisse aus England, die empirisch belegen, daß die regelmäßige Anwendung reduzierter Herbizidanwendungen dem einmaligen Verzicht auf eine Behandlung, bei sonst voller Dosis, im Hinblick auf die Unkrautdichtezunahme und die Kostenbelastung des Betriebes überlegen ist. Pantone et al. (1988) weisen allerdings darauf hin, daß mit sinkender Herbiziddosis neben dem Absinken der mittleren Bekämpfungswirkung die Wirkungsvarianz im Hinblick auf die Unkrautbekämpfung ansteigt.

Die Erträge in den Varianten mit 0,8facher Aufwandmenge waren in den eigenen Versuchen, auch im Jahr 1988 auf Schlag A bei Unkrautdichten über 50 Pflanzen/m² immer statistisch gleich denjenigen mit vollem Herbizidaufwand,

sodaß im hier betrachteten Unkrautdichtebereich die Unkrautkonkurrenz im Anbaujahr keine Begrenzung für ein derartiges Verfahren darstellt, wie dies auch von PALLUTT und HOFMANN (1990) gefunden wurde.

### *3.3.2 Unterstützung der Unkrautkontrolle durch Bestandesführung*

Für den angestrebten frühen Herbizideinsatztermin im Nachauflauf wurde bereits dargelegt, daß die Interaktionen zwischen Nutzpflanzendichte und Unkrautpopulationsdynamik verhältnismäßig gering einzustufen sind. Dies liegt begründet in der frühen effektiven Beseitigung der Unkräuter durch Herbizide. Weiterhin zeigt sich hier kein Einfluß der Stickstoffdüngung auf Parameter der Unkrautpopulationsdynamik (vgl. 3.1).

Anhand der Arbeitsplanung von Ackerbaubetrieben ist jedoch ersichtlich, daß im landwirtschaftlichen Betrieb aufgrund begrenzter Arbeitskapazität oder infolge ungünstiger Witterungsumstände im Einzeljahr häufig auf einen späten Nachauflaufbekämpfungstermin oder generell auf ein Vorauflaufverfahren ausgewichen werden muß (HEYLAND und GOLDHAMMER 1983). In derartigen Fällen ist dann sehr wohl eine Unterstützung chemischer Unkrautbekämpfungsmaßnahmen durch eine geeignete Bestandesführung möglich.

Tabelle 6 zeigt für die beiden suboptimalen Bekämpfungstermine H1 und H3 die Veränderungsraten f der Unkrautpopulationsdichte in Abhängigkeit vom Anbauverfahren, die sich nach (6) errechnen und den kumulierten Effekt aus Auflauf-, Entwicklungs- und Vermehrungsrate darstellen. Dieser eine Wert charakterisiert somit die Gesamtwirkung eines Anbauverfahrens auf die Unkrautpopulationsdynamik.

$$f = 1 - a + (a * e * v) \qquad (6)$$

Die Veränderungsfaktoren zeigen, daß in Abhängigkeit vom gewählten Unkrautbekämpfungsverfahren im Weizen durch eine höhere Stickstoffdüngung oder mit einer erhöhten Saatstärke die Nutzpflanzenkonkurrenz gegenüber dem Unkraut gesteigert werden kann, sodaß anstelle einer Verdoppelung der Unkrautpopulationen in einem Anbaujahr nur die 1,2- bis 1,5fache Menge der Ausgangsverunkrautung resultiert.

Tabelle 6

*Veränderungsrate (f) der Unkrautpopulationen in Abhängigkeit von Herbizideinsatztermin und Bestandesführungsmaßnahmen bei Zuckerrüben und Winterweizen*
*Weed population variation rate (f) depending on the date of herbicide application and crop management factors of sugar beet and winter wheat*

| Herbizid-einsatztermin | Faktoren des Anbauverfahrens Stickstoff-düngung | Saatstärke | Frucht ZR f | Frucht WW f |
|---|---|---|---|---|
| H1 | N1 | S− | 3,33 | 1,97 |
| | | S+ | 2,20 | 1,97 |
| | N2 und N3 | S− | 2,78 | 1,22 |
| | | S+ | 1,76 | 1,22 |
| H3 | N1 | S− | 1,30 | 1,84 |
| | | S+ | 1,30 | 1,47 |
| | N2 | S− | 1,65 | 2,30 |
| | | S+ | 1,65 | 1,48 |
| | N3 | S− | 1,30 | 1,84 |
| | | S+ | 1,30 | 1,47 |

Es ist keine Förderung der Unkrautvermehrung durch eine höhere Stickstoffdüngung nachzuweisen, welche die geringere Auflaufrate kompensieren könnte. Nach anderen Quellen wäre als Folge der dort gefundenen Erhöhung der Unkrauttrockenmassebildung durch gesteigerte N-Düngung eine höhere Vermehrungsrate zu erwarten (HEITEFUSS et al. 1977, PULCHER-HÄUSSLING und HURLE 1986). Im vorliegenden Fall haben offenbar, wie auch von MERKELBACH (1990) gefunden, Beipflanzen und Winterweizen eine erhöhte Stickstoffgabe zu gleichen Anteilen genutzt. Es darf allerdings nicht vernachlässigt werden, daß dichtere, stärker gedüngte Winterweizenbestände durch pilzliche Krankheitserreger und Lager in ihrer Ertragsbildung gefährdet sind (SPRINGER und HEITEFUSS 1986).

In Zuckerrüben ist vor allem bei Vorauflaufherbizideinsatz auf das Erreichen der Zielbestandesdichte zu achten, da in lückigen Beständen deutlich mehr Unkräuter auflaufen, die dann zu sehr großen Einzelpflanzen heranwachsen können und zusätzlich eine erhöhte Vermehrungsrate aufweisen. Letzteres ist in den tabellierten f-Werten nicht berücksichtigt und würde die Differenz zwischen den Saatstärkenstufen zusätzlich erhöhen. Die Reaktionsmöglichkeiten des Landwirtes werden jedoch dadurch eingeschränkt, daß gerade Vorauflaufherbizide in Abhängigkeit von der Witterung, Spritztechnik und Qualität der Saatgutablage die keimenden Rübenpflanzen schädigen können, den Feldaufgang senken (EVERSHEIM 1991) und somit zu einer Verschärfung des Unkrautproblems beitragen können.

Eine erhöhte Stickstoffdüngung kann bei den Rüben nur in extremen Situationen die Unkrautvermehrung deutlich hemmen, und da außerdem die Rübenqualität durch erhöhte Düngergaben gefährdet wird, stellt die Düngung keinen produktionstechnisch nutzbaren Faktor zur Unterstützung der Unkrautkontrolle im Zuckerrübenanbau dar.

CHANCELLOR (1984) und andere Autoren schlagen eine Unkrautbekämpfungsstrategie vor, die die Erschöpfung des Samenvorrates im Boden durch Förderung der Unkrautkeimung bei gleichzeitigem Herbizideinsatz anstrebt. Tabelle 5 zeigt, daß durch anbautechnische Maßnahmen, auch ohne zusätzliche Bodenbearbeitung, sehr wohl der Unkrautauflauf erhöht werden kann. Die Veränderungsraten f der Populationen in Tabelle 6 belegen jedoch, daß die Entwicklungsraten trotz Herbizideinsatz eine solche Höhe erreichen, daß gesteigerte Samenverluste aus dem Unkrautsamenpotential durch Keimung in den geprüften Anbauverfahren durch eine erhöhte Samenbildung überkompensiert werden.

Entgegen den Ergebnissen von HINTZSCHE et al. (1990), die eine Erhöhung des Unkrautbesatzes mit steigendem Getreideanteil in der Fruchtfolge beobachten, führen die gefundenen Populationsparameter zu dem Schluß, daß in Winterweizen die Unkrautpopulationen mit Veränderungsraten zwischen f = 0,99 und 2,30 im Schnitt besser zu kontrollieren sind, als in Zuckerrüben mit f-Werten zwischen 1,16 und 3,33.

Hierbei ist eine Verschiebung im Artenspektrum nicht berücksichtigt, die jedoch bei einem Übergang von der Fruchtfolge, mit Wechsel zwischen Winterung und Sommerung sowie zwischen Getreide und „Hackfrucht", zur Wintergetreide-Monokultur angenommen werden muß, sodaß spezialisierte Arten, insbesondere Ungräser wie Ackerfuchsschwanz *(Alopecurus myosuroides)*, gefördert werden (OBENAUF 1990). Eine Nutzung der vorliegenden Daten zur langfristigen Simulation der Verunkrautung in einer völlig geänderten Folge der geprüften Früchte erscheint deshalb nicht zulässig.

Wie bereits von RAUBER (1978) vorgeschlagen, kann jedoch mit Hilfe des Simulationsmodells der Unkrautpopulationsdynamik die Unkrautentwicklung in

einer Fruchtfolge in Abhängigkeit von den speziellen Anbaumaßnahmen bei den einzelnen Kulturen über eine Reihe von Jahren dargestellt werden. Hierzu werden drei verhältnismäßig leicht zu ermittelnde Parameter benötigt. Durch Simulationsexperimente wird eine Verfahrensoptimierung ohne aufwendige Feldversuche möglich.

Die herausragende Bedeutung einer wirkungsvollen Unkrautbekämpfung in allen Kulturen einer Fruchtfolge für die Stabilisierung des Unkrautsamenpotentials auf niedrigem Niveau läßt sich in den durchgeführten Simulationsexperimenten nachweisen. Mit Hilfe der Computersimulation kann weiterhin eine alternative Bekämpfungsstrategie im Vergleich zu den heute allgemein von seiten der Beratung empfohlenen wirtschaftlichen Schadensschwellen erarbeitet werden, die auf der regelmäßigen Ausbringung von Herbiziden in gesenkten Aufwandmengen basiert. Anhand des Vergleiches von Modellparametern kann gezeigt werden, daß Bestandesführungsmaßnahmen wie Saatstärke und Stickstoffdüngung im Sinne des Integrierten Pflanzenbaues einen Beitrag zur Unkrautkontrolle leisten können.

## Literatur


BRÄUTIGAM, V., 1990: Einfluß langjährig reduzierter Bodenbearbeitung auf die Unkrautentwicklung und -bekämpfung. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XII, 219—227.

CHANCELLOR, R. J., 1984: The Role of Dormancy in Weed Control. Recherche agronomien Suisse *23*, 69—74.

EVERSHEIM, R., 1991: Entwicklung von Grundlagen zur Modellierung einer bedarfs- und termingerechten Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben. Diss. Landw. Fak., Bonn.

FAWCETT, R. S. und F. W. SLIFE, 1978: Effects of field applications of nitrate on weed seed germination and dormancy. Weed Science *26*, 594—596.

FRANZ, K., F. KAISER und B. GEROWITT, 1990: Wirkung unterschiedlich hoher Stickstoffdüngung auf Entwicklung und Samenproduktion ausgewählter Unkrautarten im Winterweizen. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XII, 127—135.

FRIGO, G. und G. FISCHBECK, 1988: Untersuchungen über den Einfluß differenzierter Unkrautbekämpfungsverfahren auf den Unkrautsamengehalt des Bodens. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft *245*, 195.

GEROWITT, B., H. BODENDÖRFER, F. KAISER und R. HEITEFUSS, 1990: Entwicklung der Population wichtiger Unkrautarten in der Fruchtfolge Rüben—Weizen—Gerste bei Berücksichtigung von Schadensschwellen im Getreide. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft *226*, 167.

HAGEMEISTER, H. und R. HEITEFUSS, 1986: Einfluß einer unterschiedlich intensiven Unkrautbekämpfung in Getreide auf den Samenvorrat im Boden und die Verunkrautung in Folgekulturen. Proc. EWRS Symp. Economic Weed Control, Stuttgart, 393—398.

HEITEFUSS, R., H. BODENDÖRFER und R. R. PAESCHKE, 1977: Einzel- und Kombinationswirkung von N-Formen, N-Mengen, CCC, Herbiziden und Fungiziden auf Unkraut, Pflanzenkrankheiten, Lager und Kornertrag von Weizen. Z. PflKrankh. PflSchutz *84*, 641—662.

HEITEFUSS, R., W. OTTO-HUNZE und E. BLUM, 1984: NKU — Pflanzenschutz im Ackerbau. Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten *303*, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.

HENGST, B., 1983: Der Einfluß der Düngung auf die Zusammensetzung der Unkrautflora, untersucht am Dauerdüngungsversuch Dikopshof. Diss. Landw. Fak., Bonn.

HEYLAND, K.-U., 1975: Über die Bedeutung des Herbizideinsatzes für die Entwicklung von Anbauverfahren. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH VII, 21—28.

HEYLAND, K.-U., 1980: Das Weizenanbauverfahren, dargestellt als auf der Basis der Einzelpflanzenentwicklung aufgebautes Flußdiagramm. Kali-Briefe *15*, 99—108.

HEYLAND, K.-U. und Th. GOLDHAMMER, 1983: Bedeutung des Wetterrisikos für die termingerechte Arbeitserledigung im Zusammenhang mit der Entwicklung von Anbauverfahren. Berichte über Landw. *61*, 89—108.

HEYLAND, K.-U., Th. GOLDHAMMER, P. H. SCHMITZ und E. SCHENKE, 1986: Auswirkungen von Unkrautbekämpfungsprogrammen über die Fruchtfolge. Proc. EWRS Symp. Economic Weed Control, Stuttgart, 293—300.

HEYLAND, K.-U. und H.-J. KOCHS, 1984: Computerberatung zur schlagspezifischen Vorausschätzung der Stickstoffverfügbarkeit für Weizen. Vorträge der 37. Hochschultagung, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 125—141.

HINTZSCHE, E., K. KARCH, G. FEYERABEND, B. HOFMANN und B. PALLUTT, 1990: Unkrautprobleme und Unkrautbekämpfung in der DDR. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XII, 43—55.
HOFSTETTER, W., 1986: Untersuchungen zur Schadwirkung und zur Populationsdynamik von Einjährigem Bingelkraut (*Mercurialis annua* L.). Diss. Fachbereich Agrarwiss., Gießen.
HOLZMANN, A., 1987: Zur Populationsdynamik und Schadwirkung des Acker-Stiefmütterchens (*Viola arvensis* Murr.) als Grundlagen einer wirtschaftlichen Bekämpfung. Diss. Fachbereich Gartenbau, Hannover.
HOLZMANN, A. und P. NIEMANN, 1988: Prognose der Verunkrautung mit *Viola arvensis* auf der Basis populationsdynamischer Parameter. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XI, 91—96.
HURLE, K., J. MAIER, A. AMANN, Th. WEISHAAR, B. MOZER und M. PULCHER-HÄUSSLING, 1988: Auswirkungen unterlassener Pflanzenschutz- und Düngungsmaßnahmen auf die Unkrautflora — Erste Ergebnisse aus einem mehrjährigen Versuchsprogramm. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XI, 175—187.
KAISER, F., 1989: Langfristige Beurteilung und Vorausschätzung der Unkrautdichte in der Fruchtfolge Rüben—Winterweizen—Wintergerste bei unterschiedlicher Bekämpfungshäufigkeit im Getreide unter Berücksichtigung von Schadensschwellen. Diss. Fachbereich Agrarwiss., Göttingen.
KAUL, H.-P., 1992: Möglichkeiten der Optimierung des Anbauverfahrens mit Hilfe eines Modells der Unkrautpopulationsdynamik unter Berücksichtigung spezieller Anbaumaßnahmen in einer Fruchtfolge mit Wintergetreide und Zuckerrüben. Diss. Landw. Fak., Bonn.
KAUL, H.-P. und K.-U. HEYLAND, 1992: Zum Einfluß von Unkraut- und Nutzpflanzendichte auf die Unkrautpopulationsdynamik bei variiertem Herbizideinsatz in Winterweizen. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XIII, 171—180.
KING, R. P., D. W. LYBECKER, E. E. SCHWEIZER and R. L. ZIMDAHL, 1986: Bioeconomic modeling to simulate weed control strategies for continuous corn *(Zea mays)*. Weed Science *34*, 972—979.
KNAB, W. und K. HURLE, 1986: Einfluß der Grundbodenbearbeitung auf die Verunkrautung — ein Beitrag zur Prognose der Verunkrautung. Proc. EWRS Symp. Economic Weed Control, Stuttgart, 309—316.
KOCH, W., 1969: Einfluß von Umweltfaktoren auf die Samenphase annueller Unkräuter, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Unkrautbekämpfung. Arbeiten der Univ. Hohenheim, Ulmer-Verlag, Stuttgart.
KOCHS, H. J., G. STEFFEN, K.-U. HEYLAND, W. BRINKMANN, U. RICKERT und J. SCHÖNE, 1981: Betriebswirtschaftliche Beurteilung verschiedener Unkrautbekämpfungsstrategien im Zuckerrübenbau. Berichte über Landw. *59*, 607—620.
KROPAC, Z., 1966: Estimation of weed seeds in arable soil. Pedobiologia *6*, 105—128.
MERKELBACH, H., 1990: Die Möglichkeiten des Einsatzes von Untersaaten zur Unkrautunterdrückung sowie Konkurrenzwirkungen von Unkraut und Untersaat auf die Ertragsbildung des Winterweizens. Diss. Landw. Fak., Bonn.
NIEMANN, P., 1990: Zur Häufigkeit von Bestandeslücken und deren Bedeutung für die Verunkrautung. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XII, 59—69.
OBENAUF, U., 1990: Ausgewogene Fruchtfolgen — wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Unkrautbekämpfung im Rahmen einer ökonomisch-ökologischen Landbewirtschaftung. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft *266*, 371.
ORSON, J. H., 1990: Population thresholds as an aid to weed control. Mono. Brit. Crop Prot. Council *45*, 41—48.
PALLUTT, B. und B. HOFMANN, 1990: Zur Wirkung ein- und zweimaliger Applikation reduzierter Aufwandmengen blattaufnehmbarer Herbizide in Wintergerste. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft *266*, 376.
PANTONE, D. J., L. C. LARSEN and W. A. WILLIAMS, 1988: Herbicide phytotoxicity model for assessing herbicide tolerance. J. Agronomy and Crop Science *160*, 54—59.
PULCHER-HÄUSSLING, M. und K. HURLE, 1986: Einfluß der N-Düngung auf die Konkurrenz zwischen Unkräutern und Winterweizen. Proc. EWRS Symp. Economic Weed Control, Stuttgart, 137—144.
RADEMACHER, B. und J. OZOLINS, 1952: Einfluß der Getreidekonkurrenz und des Nährstoffgehalts im Keimsubstrat auf Keimung und Jugendentwicklung verschiedener Unkräuter. Angewandte Botanik *26*, 69—93.
RAUBER, R., 1978: Möglichkeiten der Erarbeitung von Modellen zur Befallsprognose bei Unkräutern, dargelegt am Beispiel von Flughafer (*Avena fatua* L.) in Getreide. Diss. Landw. Fak., Hohenheim.
RICHTER, O., 1985: Simulation des Verhaltens ökologischer Systeme. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.

SAUERBORN, J., W. KOCH und J. KRAGE, 1988: Zum Einfluß von Licht, Temperatur, Ablagetiefe und Wasserstreß auf die Keimung ausgewählter Unkrautarten. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XI, 47—53.
SPRINGER, B. und R. HEITEFUSS, 1986: Einfluß von Herbiziden und Stickstoffdüngung auf Ertrag und Mehltaubefall von Winterweizen. Proc. EWRS Symp. Economic Weed Control, Stuttgart, 233—241.
WERNER, A., 1985: Die Nutzung zwischenpflanzlicher Konkurrenz in Form von Mischkultursystemen zur Biologischen Unkrautbekämpfung in Mais und der Einfluß der Beipflanzen auf die Ertragsbildung der Kulturpflanze. Diss. Landw. Fak., Bonn.
WILSON, R. G., E. D. KERR and L. A. NELSON, 1985: Potential for Using Weed Seed Content in the Soil to Predict Future Weed Problems. Weed Science *33*, 171—175.
ZEDDIES, J., 1986: Wirtschaftliche Bedeutung der Unkrautbekämpfung unter zukünftigen Rahmenbedingungen. Proc. EWRS Symp. Economic Weed Control, Stuttgart, 39—45.
ZWERGER, P., 1987: Einfluß der Fruchtfolge, der Pflanzenbau- und Pflanzenschutz-Intensität auf die Populationsdynamik von Unkräutern unter besonderer Berücksichtigung des Windenknöterichs (*Fallopia convolvulus* [L.] A. Löve). Diss. Landw. Fak., Hohenheim.
ZWERGER, P., 1990: Modelluntersuchungen zum Einfluß der Stickstoffdüngung auf die Samenproduktion und die Schadwirkung von *Fallopia convolvulus* (L.) A. Löve und drei Polygonumarten. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XII, 107—113.
ZWERGER, P. und K. HURLE, 1988: Simulationsstudien zum Einfluß von Fruchtfolge und Bekämpfungsmaßnahmen auf die Verunkrautung. Z. PflKrankh. PflSchutz, SH XI, 71—82.
ZWERGER, P. und K. HURLE, 1990: Untersuchungen zur Abbildungsgüte simulierter Befallsverläufe bei Unkräutern. Z. PflKrankh. PflSchutz *97*, 133—141.

(Manuskript eingelangt am 24. August 1992, angenommen am 10. Dezember 1992)

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Dr. h. c. Klaus-Ulrich HEYLAND, Institut für Pflanzenbau der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Lehrstuhl für Speziellen Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Katzenburgweg 5, D-W 5300 Bonn 1, und Dr. Hans-Peter KAUL, Institut für Pflanzenbau und Grünland der Universität Hohenheim, Fachgebiet Spezieller Pflanzenbau, Fruwirthstraße 23, D-W-7000 Stuttgart 70