

**Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt  
für Land- und Forstwirtschaft  
Berlin-Dahlem**



**Aspekte des Anbaus  
herbizidresistenter Kulturpflanzen**

Von

**Dr. Antje Dietz  
Dr. Peter Niemann  
Prof. Dr. Gerhard Wenzel  
Dr. Gerd Heidler  
Dr. Thomas Eggers**

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft  
Institut für Biochemie und Pflanzenvirologie, Braunschweig  
Institut für Unkrautforschung, Braunschweig  
Institut für Resistenzgenetik, Grünbach  
Fachgruppe Biologische Mittelprüfung, Braunschweig  
Institut für Unkrautforschung, Braunschweig

Heft 286

Berlin 1993

*Herausgegeben  
von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft  
Berlin-Dahlem*

Kommissionsverlag Paul Parey, Berlin und Hamburg  
Seelbuschring 9-17, D-1000 Berlin 42

ISSN 0067-5849

ISBN 3-489-28600-6

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Aspekte des Anbaus herbizidresistenter Kulturpflanzen** / hrsg. von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem. Von Antje Dietz... – Berlin; Hamburg : Parey [in Komm.], 1993

(Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem; H. 286)

ISBN 3-489-28600-6

NE: Dietz, Antje; Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft < Berlin; Braunschweig > :

Mitteilungen aus der ...

Die Drucklegung dieses Heftes erfolgte mit Unterstützung der Gemeinschaft der Förderer und Freunde der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft e. V.

© Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrages, der Entnahme von Abbildungen, der Funk- sendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungs- pflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

1993 Kommissionsverlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, Seelbuschring 9-17, D-1000 Berlin 42  
Printed in Germany by Arno Brynda, 1000 Berlin 62

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG.....	7
2. AUSGANGSLAGE.....	11
2.1 Stand der pflanzlichen Produktionstechnik.....	11
2.2 Stand der Unkrautbekämpfung.....	14
2.3 Ökologische Wirkungen der Unkrautbekämpfung.....	18
2.4 Traditionelle Herbizidforschung.....	24
2.5 Neue Ansätze in der Herbizidforschung.....	25
2.6 Wege der Züchtung auf Herbizidresistenz.....	26
2.7 Mechanismen der Herbizidresistenz.....	31
2.8 Chemische und biologische Eigenschaften ausgewählter Wirkstoffe.....	34
3. ZULASSUNGSFRAGEN.....	38
3.1 Komplementär an ein Herbizid gebundene Sorten.....	38
3.2 Komplementär an Sorten gebundene Herbizide.....	41
4. MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN DES ANBAUS HERBIZIDRESISTENTER SORTEN.....	48
4.1 Produktionstechnische Auswirkungen.....	48
4.2 Auswirkungen auf den Integrierten Landbau.....	51
4.3 Herbiologische Auswirkungen.....	54
4.4 Freisetzung transgener Kulturpflanzen.....	58
4.5 Auswirkungen auf Teile des Naturhaushalts.....	63
5. GESAMTBEWERTUNG.....	64
6. LITERATUR.....	67

## CONTENTS

<b>Aspects of growing herbicide-resistant crops</b>	Page
1. INTRODUCTION.....	7
2. PRESENT POSITION.....	11
2.1 State of plant production.....	11
2.2 State of weed control.....	14
2.3 Ecological effects of weed control.....	18
2.4 Traditional herbicide research.....	24
2.5 New approaches in herbicide research.....	25
2.6 Methods of breeding herbicide-resistant crops.....	26
2.7 Mechanisms of herbicide resistance.....	31
2.8 Chemical and biological characteristics of selected herbicides.....	34
3. ASPECTS OF REGISTRATION.....	38
3.1 Cultivars connected with a complementary herbicide.....	38
3.2 Herbicides for use in transgenic cultivars.....	41
4. POTENTIAL CONSEQUENCES OF GROWING HERBICIDE-RESISTANT CULTIVARS.....	48
4.1 Agronomic aspects.....	48
4.2 Impacts on integrated farming.....	51
4.3 Effects on weed management.....	54
4.4 Release of transgenic crops into the environment.....	58
4.5 Selected environmental effects.....	63
5. OVERALL ASSESSMENT.....	64
6. LITERATURE CITED.....	67

## ZUSAMMENFASSUNG

Durch Züchtung auf Herbizidresistenz - vorrangig auf gentechnischem Wege - soll die Behandlung bestimmter Kulturpflanzensorten mit solchen Herbiziden ermöglicht werden, die bisher in dieser Kultur wegen fehlender Verträglichkeit nicht einsetzbar waren. Im vorliegenden Beitrag, der sich schwerpunktmäßig mit dem möglichen Anbau von Zuckerrübensorten mit einer Resistenz gegen die Herbizidwirkstoffe Glufosinat und Glyphosat befaßt, wird zunächst die Ausgangssituation dargestellt: gegenwärtiger Stand der pflanzlichen Produktionstechnik, insbesondere der Unkrautbekämpfung; ökologische Wirkungen der Unkrautbekämpfung; traditionelle und mögliche neue Wege der Herbizidforschung; Züchtungsverfahren und Mechanismen der Herbizidresistenz; chemische und biologische Eigenschaften von Glufosinat und Glyphosat.

In einem weiteren Kapitel wird auf Zulassungsfragen bei herbizidresistenten Sorten und bei komplementär an diese Sorten gebundenen Herbiziden eingegangen.

Mögliche Auswirkungen des Anbaus herbizidresistenter Sorten werden für die Bereiche Produktionstechnik, integrierter Landbau, Herbiologie und Umwelt dargestellt und diskutiert.

In einer Gesamtbewertung wird der Züchtungsansatz in der Herbizidforschung - unter Abwägung der aus dem Anbau herbizidresistenter Sorten resultierenden Chancen und Risiken - als eine graduelle Weiterentwicklung der bisherigen chemischen Unkrautbekämpfung angesehen. Besondere herbologische und ökotoxikologische Risiken könnten sich ergeben, wenn Komplementärangebote (Sorte-Herbizid-Kombination) marktbeherrschend würden und zu einseitigem Herbizideinsatz führten. Im konkreten Anwendungsfall Zuckerrüben jedoch würde dieses Risiko durch den Zwang zum Fruchtwechsel in Verbindung mit kontingentiertem Anbau wesentlich eingegrenzt.

## SUMMARY

The aim of breeding for herbicide resistance - being achieved mainly by methods of gene technology - is to allow the treatment of crop cultivars with herbicides which so far could not be used for this crop due to lacking tolerance. We have analysed the cultivation of herbicide resistant crops, thereby focusing on sugar-beet cultivars with resistance to glufosinate and glyphosate. First, the present situation is depicted with respect to plant production including weed control, ecological effects of weed control, research on herbicides, breeding for and mechanisms of herbicide resistance, chemical and biological properties of glufosinate and glyphosate.

Further, aspects of the registration of herbicide resistant cultivars and of complementary herbicides will be discussed.

Possible consequences of growing herbicide-resistant cultivars are depicted and discussed in respect to cultivation technique, integrated farming, weed control and the environment.

Based on the evaluation of the chances and risks of the cultivation of herbicide resistant crops, an overall assessment is made. Breeding for herbicide resistance is viewed as a gradual advancement of chemical weed control. Particular effects on weed management and the environment could arise from the market domination and the biased use of complementary herbicides. In the case of sugar beet cultivation this risk is minimized considerably by compulsory crop rotations and by the quota system.

## 1. EINLEITUNG

Etwa die Hälfte aller in Deutschland eingesetzten Pflanzenschutzmittel sind Herbizide, mit denen heute in den landwirtschaftlichen Kulturen die meisten Unkrautprobleme gelöst werden können. Auf Grund des sich ändernden Unkrautspektrums war es aber bisher erforderlich, die Wirkstoffpalette für eine bestimmte Kultur laufend durch Neuentwicklungen zu ergänzen. Die Erzeugung herbizidresistenter Pflanzen auf gentechnischem Wege macht es nun möglich, bisher empfindliche Kulturpflanzen einem bereits vorhandenen Wirkstoff anzupassen. Zum Für und Wider dieser neuen Möglichkeiten wird im folgenden in Ergänzung zu früheren Arbeiten (NIEMANN, 1989; WENZEL, 1989) Stellung genommen.

Vorab seien einige Begriffe, die im Kontext mit der hier zu behandelnden speziellen Fragestellung nicht immer einheitlich gebraucht werden, kurz definiert:

Herbizide sind Stoffe, die dazu bestimmt sind, Pflanzen abzutöten oder in ihrem Wachstum zu beeinträchtigen. Bei selektiven Herbiziden handelt es sich um Pflanzenschutzmittel, mit denen unerwünschte Pflanzen (Unkräuter) in Kulturpflanzenbeständen bekämpft werden können. Der Selektivität kommt eine zentrale Bedeutung bei der chemischen Unkrautbekämpfung zu. Durch diese Eigenschaft der Mittel wird eine Wirksamkeit gegen bestimmte Unkrautarten bei gleichzeitiger Verträglichkeit für die Kulturpflanze gewährleistet. Die Selektivität ist allerdings selten absolut, so daß schädliche Auswirkungen einer Herbizidbehandlung auf die Kulturpflanze wie Blattverätzungen und -deformationen bis hin zu Pflanzen- und Ertragsverlusten nicht völlig auszuschließen sind. Derartige Wirkungen werden als Phytotoxizität bezeichnet, während unter Empfindlichkeit die Reaktion der Unkräuter auf Herbizide verstanden wird.

Die Hersteller von Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen versuchen, durch Screening aus einer Vielzahl von chemischen Verbindungen für bedeutende Anwendungsgebiete (Indikationen) selektive Aktivsubstanzen zu finden. Sie gehen dabei von den natürlichen Eigenschaften der Pflanzenarten (Empfindlichkeit und Verträglichkeit) aus.

Neben den selektiven Herbiziden gibt es nichtselektive. Sie sind auf Kulturland nur unter der Voraussetzung einsetzbar, daß die Kulturpflanze nicht oder nur an unempfindlichen Teilen getroffen wird: u.a. vor dem Auflaufen, nach der Ernte, unter Obstbäumen, zwischen Rebzeilen. Derartige Mittel werden wegen ihres breiten Wirkungsspektrums auch als Totalherbizide bezeichnet. Dabei darf aber nicht übersehen werden, daß sie grundsätzlich nicht gegen sämtliche Pflanzenarten und auch nicht in jedem Fall total im Sinne von nachhaltig wirken. Die Grenze zwischen Selektivität und Nichtselektivität eines Wirkstoffs ist fließend. Hier spielen Wirkstoffcharakteristika, Pflanzenart und Anwendungsbedingungen (Dosierung, Applikationstechnik u. dgl.) eine Rolle.

Selektive Herbizide verfügen über ein unterschiedlich breites Wirkungsspektrum. Werden nur wenige Unkrautarten erfaßt, z.B. einige monokotyle, spricht man von spezifischer Wirkung. Mittel mit einem breiten Wirkungsspektrum werden in der Praxis häufig als Breitbandherbizide bezeichnet. Sie wirken aber keineswegs gegen die gesamte Unkrautflora. Zur Erhöhung des Wirkungsspektrums werden oft mehrere Wirkstoffe in einem Präparat verwendet (Kombinationspräparate). Ein umfassendes Wirkungsspektrum läßt sich auch durch die Mischung mehrerer Mittel (Tankmischung) erzielen.

Jede Bekämpfungsmaßnahme übt einen Selektionsdruck auf die Unkrautflora aus. Mit zunehmender Spezifität, Einseitigkeit und Intensität der Bekämpfungsmaßnahmen wächst die Wahrscheinlichkeit von inter- und intraspezifischen Selektionen. Die selektierten Arten oder Biotypen sind dann mit den bisher üblichen Behandlungen nicht mehr hinreichend zu bekämpfen, sie können zu Problemunkräutern werden. Gegen sie muß eine neue Bekämpfungsstrategie entwickelt werden.

Eine Herbizidresistenz liegt vor, wenn als Folge des Einsatzes eines Herbizids Biotypen von Unkrautarten selektiert worden sind, die mit der üblicherweise wirksamen Aufwandmenge dieses Herbizids nicht mehr bekämpfbar sind (LEBARON und GRESSEL, 1982). Neben dem Begriff der Herbizidresistenz gibt es den der (natürlichen) Herbizidtoleranz. Er ist insbesondere in der angelsächsischen Literatur



verbreitet und bezeichnet eine vergleichsweise geringe Empfindlichkeit einer Population. Im Englischen wird Toleranz sowohl auf Unkräuter (weed tolerance) als auch auf Kulturpflanzen (crop tolerance) angewandt. Im Deutschen spricht man hingegen statt von Toleranz bei Unkräutern besser von Unempfindlichkeit und bei Kulturpflanzen von Verträglichkeit. Eine auf züchterischem Wege erzeugte (künstliche) Verträglichkeit von Kulturpflanzen gegenüber einem Herbizid ist demnach als Herbizidresistenz zu bezeichnen, weil sie das Ergebnis der bewußten Veränderung eines Genotyps ist (DUKE et al., 1991). Funktionell besteht ein Unterschied zwischen der Züchtung auf Herbizidresistenz, die erst den Einsatz bestimmter Pflanzenschutzmittel in Kulturpflanzenbeständen ermöglichen soll, und der Züchtung auf Resistenz gegen Schadorganismen, wodurch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln eher reduziert werden soll.

Das Kernziel der Züchtung auf Herbizidresistenz ist es, eine gewünschte Selektivität mit dem Ziel zu erzeugen, in bestimmten Kulturpflanzen den Einsatz eines Herbizids zu ermöglichen, das bisher wegen fehlender Verträglichkeit in dieser Kultur nicht angewandt werden konnte. Es erfolgt also die Anpassung eines bereits vorhandenen Wirkstoffs an eine Kultur. Im traditionellen Screening wird dagegen sowohl nach Wirksamkeit als auch nach Verträglichkeit gesucht. Das Ergebnis ist praktisch das gleiche: Auch beim Züchtungsansatz steht am Ende der Entwicklung ein funktional selektives Herbizid. Nach MARSHALL (1987) handelt es sich dabei immer um eine Herbizidverträglichkeit "de novo", das heißt um eine neue Kulturpflanze-Herbizid-Kombination. Das entsprechende Herbizid wird als Komplementärherbizid bezeichnet. Andeutungen in der Literatur (MAZUR und FALCO, 1989; DUKE et al., 1991) lassen den Schluß zu, daß darüber hinaus zumindest in Einzelfällen auch versucht wird, eine bereits bestehende natürliche Selektivität durch züchterische Maßnahmen weiter zu verbessern, um dadurch das Phytotoxizitätsrisiko zu mindern.

Je nach Interessenlage (Saatguthersteller, Wirkstoffproduzent, Anwender) werden an eine Züchtung auf Herbizidresistenz unterschiedliche Erwartungen geknüpft:

- Sicherung bzw. Vergrößerung von Marktanteilen

- komplementäre Bindung von Saatgut und Herbizid  
(Komplementärangebot)
- schnellere Verbreitung umweltverträglicherer Wirkstoffe
- Minderung des Phytotoxizitätsrisikos
- Ausweitung und Flexibilisierung der Anwendungstermine von Herbiziden
- einfachere Handhabung der chemischen Unkrautbekämpfung für den Anwender
- Reduzierung der Behandlungshäufigkeit
- anteilige Senkung der Entwicklungskosten von Herbiziden
- Kostensenkung für den Anwender.

Wir gehen bei unseren Überlegungen schwerpunktmäßig von einem konkreten Anwendungsfall aus, der sich gegenwärtig abzeichnet: Der Einsatz von Herbiziden mit den Wirkstoffen Glyphosat bzw. Glufosinat im Zuckerrübenanbau in Deutschland. Glyphosat- und Glufosinat-resistente Kulturpflanzen werden, wie aus Tab. 1 hervorgeht, bereits seit mehreren Jahren in Freilandexperimenten getestet. Soweit statistische Angaben gemacht werden, beziehen sie sich auf das Gebiet der westlichen (alten) Bundesländer.

Tab. 1:

Beispiele für Freisetzungsexperimente mit Glyphosat- und Glufosinat-resistenten Pflanzen

Resistenz gegen	Kultur	Zeit	Land
Glyphosat	Tabak	1987-1989	USA
	Tomate	1988-1989	USA
	Baumwolle	seit 1989	USA
	Sojabohne	seit 1989	USA
	Zuckerrübe	seit 1990	Dänemark
	Raps	seit 1991	Belgien
Glufosinat	Tabak	1987-1990	Belgien, Frankreich
	Kartoffel	seit 1987	Belgien, Großbritannien
	Tomate	seit 1988	Spanien

Luzerne	seit 1988	Belgien, USA, Kanada
Raps	seit 1988	Belgien, Frankreich
Zuckerrübe	seit 1989	Belgien, Frankreich
Sojabohne	seit 1990	USA
Mais	seit 1990	USA
	seit 1991	Belgien, Niederlande, Frankreich, Großbritannien

---

## 2. AUSGANGSLAGE

### 2.1 Stand der pflanzlichen Produktionstechnik

In Industrieländern ist die Landwirtschaft in die arbeitsteilige Wirtschaftsweise eingebunden. Sie nutzt den technischen Fortschritt, indem sie angebotene Betriebsmittel einsetzt, und sie hat ihrerseits ihre Produkte am Markt abzusetzen. Dabei sind die Verbraucherwünsche zu respektieren. Auf vielen agrarischen Teilmärkten ist der Wettbewerb allerdings durch administrative Regelungen (Marktordnungen, Mengenbegrenzungen) eingeschränkt. Infolge wachsender Produktionsüberschüsse geben die Erzeugerpreise nach. Um ein Marktgleichgewicht zu erreichen, strebt die Europäische Wirtschafts-Gemeinschaft u.a. Produktionssenkungen durch weitere Preissenkungen an. Auch von der zu erwartenden weiteren Liberalisierung des Welthandels im Rahmen des Allgemeinen Zoll- und Handelsabkommens (GATT) wird ein Druck auf die Agrarpreise erwartet.

Der Einzelbetrieb muß unter diesen ökonomischen Rahmenbedingungen versuchen, sein Arbeitseinkommen zu maximieren. Das Ergebnis ist eine angepaßte Produktionsstruktur. Sie ist gekennzeichnet durch eine Spezialisierung auf marktfähige Produkte, eine hohe Produktionsintensität, einen geringen Handarbeitsaufwand und zunehmende Flächenausstattung. So dominiert in Marktfruchtbetrieben flächenmäßig Getreide und in Veredlungsbetrieben Mais. In Extremfällen

werden in Ackerbaubetrieben nur zwei Kulturen angebaut: Zuckerrüben und Winterweizen. Eine Übersicht zur bundesweiten Anbaustruktur gibt Tab. 2. Innerhalb des Getreides dominiert der Winterweizen mit 1,6 Mio. ha (Tab. 3), und innerhalb dieser Getreideart haben wiederum nur wenige Sorten - bedingt durch ihre Qualitäts- und Ertragsmerkmale - eine hohe Anbaupräferenz.

Tab. 2:

Flächenanteile der wichtigsten Fruchtartengruppen 1990 in Mio. ha (alte Bundesländer)

Getreide	4,471 (61,3 %)
Futterpflanzen	1,173 (16,1 %), davon 0,894 Mio. ha Silo-Mais
Hackfrüchte	0,674 (9,3 %), davon 0,406 Mio. ha Zuckerrübe
Handelsgewächse	0,641 (8,8 %), davon 0,558 Mio. ha Winterraps
Hülsenfrüchte	0,049 (0,7 %)
Gemüse	0,066 (0,9 %)
Brache	0,215 (2,9 %)
7,288 Ackerland insgesamt	

Quelle: Stat. Jahrb. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1991

Tab. 3:

Aufteilung der Getreidefläche 1990 (alte Bundesländer)

Winterweizen	1,622 Mio. ha (36,3 %)
Wintergerste	1,085 Mio. ha (24,3 %)
Sommergerste	0,608 Mio. ha (13,5 %)
Winterroggen	0,413 Mio. ha (9,2 %)
Hafer	0,339 Mio. ha (7,6 %)

Quelle: Stat. Jahrb. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1991

An den Ertragssteigerungen der Vergangenheit hat der Züchtungsfortschritt einen wesentlichen Anteil, neben der Optimierung von Düngung, Pflanzenschutz und Anbautechnik (Abb. 1).

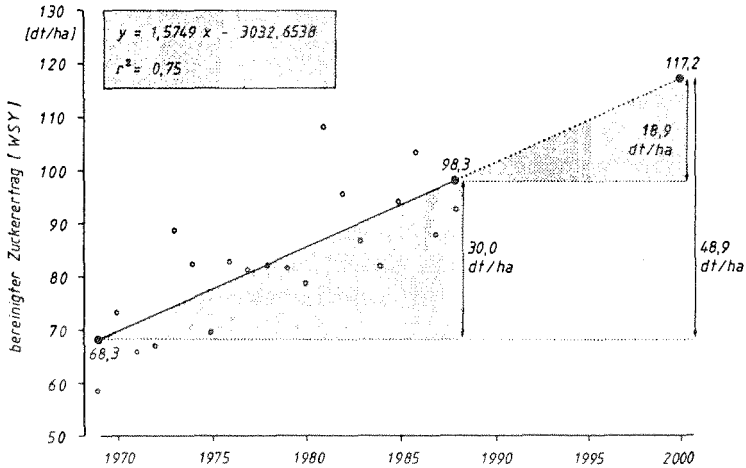


Abb. 1:

Bereinigter Zuckerertrag in der Wertprüfung des Bundessortenamtes von 1969 bis 1988 sowie weiterer Verlauf der linearen Regressionsgeraden bis zum Jahr 2000 (aus MÄRLÄNDER, 1991).

Die monetären Aufwendungen für den chemischen Pflanzenschutz im Ackerbau haben sich nach einer betriebswirtschaftlichen Analyse in Bayern im Jahrzehnt von 1976/77 bis 1985/86 etwa verdoppelt. Der Anstieg der Kosten war in erster Linie auf den steigenden Einsatz von Fungiziden zurückzuführen (RUPPERT und HÖSEL, 1987).

Die künftige Entwicklung der Pflanzenproduktion wird entscheidend von den agrarpolitischen Rahmenbedingungen abhängen. Sinkende Produktpreise werden den Strukturwandel beschleunigen und die Spezialisierung weiter fördern. Eine Entlastung der einseitigen Anbaustruktur könnte unter Umständen von alternativen Produkten (nachwachsende Rohstoffe) oder Verwertungsalternativen (Biotreibstoff) ausgehen, sofern sie preislich konkurrenzfähig werden. Administrative Eingriffe in Form von Auflagen zur Umweltentlastung (u.a. Gewässerrandstreifen, Wasserschutzgebiete, Gülleverordnung) und finanziellen Anreizen zur Flächenstillegung und Extensivierung sind Einflußgrößen mit wachsendem Gewicht. Nach HABER (1990) ist die technische und wirtschaftliche Entwicklung der Landwirtschaft

aber nicht grundsätzlich in Frage zu stellen. Vielmehr sei der Flächenanspruch der intensiven Landwirtschaft regional und lokal zu begrenzen. Innerhalb der intensiven Landwirtschaft seien künftig alle Möglichkeiten der Technik auszuschöpfen, um die Belastungen und Schädigungen der ländlichen Umwelt so gering wie möglich zu halten.

## 2.2 Stand der Unkrautbekämpfung

Unkräuter zählen in Mitteleuropa zu den bedeutendsten Schadorganismen in der Pflanzenproduktion. Ihre Bekämpfung ist aus ökonomischen Gründen angezeigt, wenn die Dichte eine Schwelle überschreitet, ab der die Schadwirkung gleich oder größer ist als die Kosten der Bekämpfung (Schadensschwelle). In konkurrenzschwachen Reihenkulturen (Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln) ist dies in den frühen Entwicklungsstadien praktisch ausnahmslos der Fall, während in Kulturen mit höherer Bestandsdichte (insbesondere Getreide) eine regelmäßige direkte Unkrautbekämpfung nicht in jedem Fall erforderlich ist. An die Produktionstechnik angepaßte Unkrautarten mit einem hohen Schadenspotential erreichen aber auch in Getreide die Schadensschwelle. Herausragendes Beispiel ist das Kletten-Labkraut (*Galium aparine*). Auf Grund dieser Zusammenhänge ergibt sich insgesamt eine recht hohe Behandlungsintensität der Ackerfläche mit Herbiziden: Fast jedes Feld wird einmal im Jahr behandelt. Unter Einbeziehung der Mehrfachbehandlungen in Reihenkulturen liegt die durchschnittliche Behandlungshäufigkeit bei 100 % (HILDEBRANDT und HILLE, 1988). Direkte mechanische Bekämpfungsmaßnahmen konzentrieren sich auf den Zwischenreihenbereich in "Hackfrüchten", daneben gewinnen Ganzflächenbehandlungen mit Egge und Striegel auch in Getreide für besondere Produktionsrichtungen wieder an Bedeutung.

Wirkstoffe und Verfahren der chemischen Unkrautbekämpfung unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung mit dem Ziel der Verbesserung von Wirksamkeit, Verträglichkeit und Wirtschaftlichkeit sowie der Minimierung unerwünschter Nebenwirkungen. Im Hinblick auf den möglichen Anwendungsfall der Gentechnik, die Erzeugung herbizidresistenter Zuckerrübensorten, soll hier die gegenwärtige chemische Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben detaillierter dar-

gestellt werden. Vorausgeschickt sei, daß sich die Anbautechnik von Zuckerrüben durch eine sehr enge Verzahnung von Teilkomponenten der Agrotechnik auszeichnet: Monogermsaatgut, Präzisionsaat, chemische Unkrautbekämpfung und vollmechanisierte Ernte bilden eine in Jahrzehnten gewachsene, nahezu untrennbare Einheit. Nach WINNER (1991) würde der Wegfall der chemischen Unkrautbekämpfung unter den gegenwärtig herrschenden ökonomischen Rahmenbedingungen viele Landwirte dazu veranlassen, den Rübenbau einzustellen.

Die chemische Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben erfolgt heute überwiegend im Nachauflaufverfahren, nachdem sie ursprünglich im Vorsaat- und Voraufverfahren vorgenommen wurde. Die jüngste Entwicklung führte zum Splitting-Verfahren. Dabei werden Teilmengen des Aufwands unabhängig vom Stadium der Zuckerrüben beginnend mit dem Auflaufen der Unkräuter im Abstand von 7 bis 14 Tagen gegen die jungen, empfindlichen Unkräuter appliziert. Mit diesem Verfahren werden sowohl eine hohe Wirksamkeit als auch eine gute Verträglichkeit erreicht. Insgesamt sind 2 bis 3 Behandlungen in der Vegetationsperiode erforderlich. Die Gesamtkosten sind abhängig von Art und Dichte des Unkrautbesatzes sowie den Anwendungsbedingungen (Boden, Witterung, Unkrautentwicklung). Im Mittel kann von ca. 400,00 DM/ha Präparatekosten ausgegangen werden.

Die Spanne der möglichen Anwendungstermine reicht von der Vorsaatbehandlung bis zum Streichverfahren gegen Schosserrüben. Durch Bandbehandlung, bei der nur der Bereich der Rübenreihe auf einer Breite von ca. 15 cm behandelt wird, und mechanische Bekämpfung im Zwischenreihenbereich reduziert sich die ausgebrachte Herbizidmenge gegenüber einer Flächenbehandlung auf ca. 1/3. Insgesamt sind gegenwärtig zahlreiche Mittel mit 20 verschiedenen Wirkstoffen zur Anwendung in Zuckerrüben zugelassen (Tab. 4). Dazu zählen auch die nichtselektiven Wirkstoffe Glufosinat, Glyphosat und Paraquat für spezielle Indikationen (Direktsaat, Mulchsaat, Streichverfahren).

Tab. 4: Herbizid-Wirkstoffe zur Anwendung in Zuckerrüben  
Stand der Zulassung: August 1992

Wirkstoff	Präparat (Beispiel)	Hauptwirkung gegen	
		Dikotyle	Monokotyle
Chloridazon	Pyramin WG	+	
Clopyralid	Lontrel 100	+	
Cycloaot	Ro-Neet		+
Cycloxydim	Focus Ultra		+
Desmedipham	Betanal-Progress *	+	
Diclofop	Illoxan		+
Ethofumesat	Tramat 500	+	
Fenoxaprop-P	Depon Super		+
Fluazifop	Fusilade		+
Fluazifop-P	Fusilade 2000		+
Glufosinat	Basta	+	+
Glyphosat	Roundup	+	+
Haloxyfop	Gallant		+
Metamitron	Goltix WG	+	
Metolachlor	Betoran P *		+
Paraquat	Gramoxone 100	+	+
Phenmedipham	Betosip	+	
Quizalofop	Targa		+
Sethoxydim	Fervinal Plus		+
Triallat	Avadex 480		+

\* Präparat enthält weitere Wirkstoffe

Kombinationspräparate und/oder Tankmischungen sind üblich, um ein breiteres Wirkungsspektrum zu erzielen. Dabei läßt sich das Mischungsverhältnis optimal der Unkrautflora anpassen (Tab. 5). Darüber hinaus kann flexibel auf den Einzelfall (jahresspezifische Unkrautflora, Entwicklungsstadien, Witterung) reagiert werden. Schließlich kann durch Zusatzstoffe, die die Wirkstoffpenetration in die Pflanze erhöhen sollen, der Herbizidaufwand gesenkt werden. Zu den Kernproblemen der chemischen Unkrautbekämpfung zählen nach wie vor Wirkungslücken und die Verträglichkeit. Aktuelle Problemunkräuter in Zuckerrüben sind u.a. Einjähriges Bingelkraut (*Mer-*



*curialis annua*), Winden-Knöterich (*Fallopia convolvulus*), Kletten-Labkraut, Zurückgebogener Amarant (*Amaranthus retroflexus*) und Hundspetersilie (*Aethusa cynapium*).

Tab. 5:

Beispiele von Tankmischungen für das Splitting-Verfahren gegen annuelle dikotyle Unkräuter in Zuckerrüben (Mengen in l bzw. kg/ha)

1. Behandlung	2. Behandlung	3. Behandlung
A. Leitunkräuter: Vogel-Sternmiere, Kamille-Arten, Taubnessel-Arten, Weißer Gänsefuß u.a.		
1,0 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress	1,0 Betanal Progress
1,0 Goltix WG	1,0 Goltix WG	1,0 Goltix WG
B. Leitunkraut: Kletten-Labkraut		
1,5 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress
1,0 Goltix WG	1,0 Goltix WG	1,0 Goltix WG
	0,3 Trammat 500	1,5 Paraffin-Öl
C. Leitunkräuter: Einjähriges Bingelkraut, Knöterich-Arten		
2,0 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress
0,5 Goltix WG	1,0 Goltix WG	1,5 Goltix WG
	1,0 Paraffin-Öl	2,0 Paraffin-Öl
D. Leitunkräuter: Hundspetersilie, Gefleckter Schierling		
2,0 Betanal Progress	2,5 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress
2,0 Goltix WG	2,0 Goltix WG	2,0 Goltix WG
0,5 Paraffin-Öl	1,0 Paraffin-Öl	2,0 Paraffin-Öl
E. Leitunkraut: Dreiteiliger Zweizahn		
2,0 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress	1,5 Betanal Progress
1,0 Goltix WG	1,0 Goltix WG	1,0 Goltix WG
0,5 Paraffin-Öl	1,0 Paraffin-Öl	2,0 Paraffin-Öl

Quelle: Pflanzenschutz-Empfehlungen für das Jahr 1992, Landwirtschaftskammer Hannover

Beim Mulchsaatverfahren, das heißt Rübensaam in eine Mulchschicht aus abgefrorenen bzw. chemisch abgetöteten Zwischenfrüchten, wird grundsätzlich nach dem gleichen Behandlungskonzept vorgegangen. Schwierigkeiten kann dabei die sog. Altverunkrautung bereiten. Das sind winterannuelle Unkräuter und Ausfallgetreide, die mit den Zwischenfrüchten im Herbst aufgelaufen, aber nicht wie diese abgefroren sind. Sie haben zur Rübensaam bereits ein fortgeschrittenes Entwicklungsstadium erreicht und können chemisch teils nur durch Tankmischungen von Produkten mit den Wirkstoffen Glyphosat und Metamitron bzw. Glyphosat und Ethofumesat bekämpft werden. Hierzu zählen Kamille-Arten (*Matricaria* spp., *Anthemis* spp.), Acker-Stiefmütterchen (*Viola arvensis*), Acker-Vergißmeinnicht (*Myosotis arvensis*), Kletten-Labkraut und Vogel-Sternmiere (*Stellaria media*). Eine mechanische Bekämpfung vor der Saam ist grundsätzlich denkbar; sie reduziert jedoch auf erosionsgefährdeten Standorten den besonderen Nutzen der Mulchsaam.

### 2.3 Ökologische Wirkungen der Unkrautbekämpfung

#### - Wirkung der Unkrautbekämpfung auf die Ackerflora

Wertet man die Rote Liste der in der Bundesrepublik Deutschland ausgestorbenen, verschollenen und gefährdeten Farn- und Blütenpflanzen hinsichtlich der Ackerwildpflanzen aus (EGGERS 1984b), so sieht man, daß etwa ein Drittel dieser Arten, d. h. 90 der ungefähr 250 Acker-Unkrautarten dort verzeichnet sind. Mehr als die Hälfte davon ist Getreide-Unkrautgesellschaften zuzuordnen, ein Viertel Hackfrucht-Unkrautgesellschaften, wobei oft die gesamte charakteristische Artenkombination einer Vegetationseinheit (z. B. der Basiphilen Haftdolden-Gesellschaften, der Adonisröschen-Kalkäcker oder der Lein-Äcker) betroffen ist. Darin wird deutlich, daß Arten besonderer Kulturen oder solche am Rande ihres Verbreitungsareals, wo sie nur noch auf für sie extremen Standorten auftreten, besonders gefährdet sind (HOLZNER 1973).

Jede Änderung eines ökologischen Faktors wird hier entscheidend wirksam. Die Maßnahmen der mechanischen Bekämpfung des Unkrauts

haben seit eh und je die Verunkrautung der Felder beeinflußt. So förderten die Weiterentwicklung der Bodenbearbeitung und die Mechanisierung der Unkrautbekämpfung das Auftreten einjähriger Unkrautarten, während bestimmte ausdauernde Arten, vor allem Zwiebel-Geophyten, infolge dieser Intensivierung deutlich zurückgegangen sind. Dies gilt auch für die chemische Unkrautbekämpfung, zumal wenn sie mit breitwirksamen Mitteln erfolgt.

Inwieweit die chemische Unkrautbekämpfung am Rückgang der Ackerwildpflanzen eindeutig beteiligt ist, läßt sich wegen der Überlagerung der Wirkungen verschiedener ökologischer Standortfaktoren nicht sagen. So nimmt es nicht Wunder, wenn der eine Autor hier von 30 Arten, also etwa 10 % spricht (WEBER 1979), der andere bei einer Analyse der Rückgangsursachen von 63 gefährdeter Ackerwildkräuter jedoch nur für gut 20 Arten den Rückgang in der chemischen Unkrautbekämpfung sieht, teils sogar nur sekundär (MEISEL 1985). In solchen widersprüchlichen Aussagen kommt die Problematik einer Beurteilung des Einflusses der chemischen Unkrautbekämpfung auf die Unkrautflora zum Ausdruck. Immerhin fehlt aber selbst bei einer durchschnittlichen Keimungsrate von weniger als 10 % durch die immer wiederkehrende Verhinderung der Blüten- und damit der Samenbildung der Samennachschub vor allem für seltenere Arten, und dies bewirkt einen starken Rückgang der Samenvorräte im Boden (MEISEL 1985), bis sie so klein geworden sind, daß die Populationen ganz zusammenbrechen.

Obwohl "es unbestritten ist, daß zahlreiche der heute als gefährdet geltenden Arten bereits vor 1950 als Folge der direkten und indirekten Bekämpfungsmaßnahmen sowie durch Umstellung der Nutzungsweise zurückgegangen sind, ist aber in den vergangenen 20 bis 25 Jahren die großflächige und regelmäßige Herbizidanwendung die Hauptgefährdungsursache der noch verbliebenen, heute gefährdeten Ackerwildkräuter gewesen" (MEISEL 1985).

- Selektion von Ackerwildpflanzen durch chemische Unkrautbekämpfung

Auf Grund der selektierenden Wirkung der Herbizide auf die Ackerunkraut-Arten kommt es zu Veränderungen der Segetalvegetation. Die Wirkung eines anhaltenden Herbizideinsatzes auf die Unkrautvegetation ist wiederholt umfangreich dargestellt worden (z. B. EGGERS 1984a). Veränderungen der Segetalvegetation und langfristige, in Jahrzehnten ablaufende positive oder negative Selektionen einzelner Arten durch kontinuierlichen Einsatz bestimmter Herbizide lassen sich vor allem durch langjährige Beobachtungen und Erfahrungen in der landwirtschaftlichen Praxis und durch biologische Schlußfolgerungen aus dem populationsdynamischen Verhalten der betroffenen Arten erkennen. Die Anfänge der chemischen Unkrautbekämpfung in den 40er und 50er Jahren, vor allem mit Wuchsstoff-Herbiziden, haben im wesentlichen dikotyle Arten zurückgedrängt, während grasartige Unkräuter - auch durch Änderungen der Fruchtfolge mitbedingt - zu einer vorher nicht gekannten Verunkrautung gelangten. Mit dem Aufkommen der Bodenherbizide in den 60er und 70er Jahren, vor allem aus den Wirkstoffgruppen der Triazine und der Harnstoff-Derivate, erfolgte die flächenmäßige Selektion von Kletten-Labkraut, das für die meisten Kulturpflanzen als ernst zu nehmender Konkurrent auftritt und dem Landwirt bei der Pflege der Kulturbestände und bei der Beerntung erhebliche Schwierigkeiten bereitet.

Bei der Selektion von Unkräutern durch Herbizide sind interspezifische und intraspezifische Ausleseprozesse zu unterscheiden. Interspezifisch werden unempfindliche Arten durch Lücken im Wirkungsspektrum der Herbizide selektiert. Sie werden zunächst als Verschiebungen in der Dominanzstruktur erkennbar und führen dann zur Ausschaltung einzelner Arten und Kompensation der Verunkrautung durch bestimmte andere Arten. Die intraspezifische Selektion beruht auf unempfindlichen Linien innerhalb an sich empfindlicher Arten. Schon 1979 hat STRYCKERS eine Liste von 20 Arten zusammengestellt, bei denen innerartliche Unterschiede in der Empfindlichkeit gegenüber Herbiziden festgestellt wurden. Die Liste ließe sich inzwischen sowohl nach Arten als auch nach Autoren und Herbizidwirkstoffen nahezu beliebig erweitern, denn die Selektionspro-

bleme nehmen um so mehr zu, wie der Ackerbau intensiviert sowie die Frucht- und Herbizidfolgen einseitiger werden.

Als wichtige Bedingungen für die "Resistent-Werdung" von Unkrautarten gegen bestimmte Herbizide sind zu nennen:

- Anbau von Monokulturen wie z. B. Mais, aber auch Getreide insgesamt betrachtet, oder Dauerkulturen (z. B. Wein, Obst),
- physiologische Rassen der Unkrautarten mit teilweiser oder vollständiger Unempfindlichkeit gegen bestimmte Herbizide;
- ständig wiederholte Anwendung von Herbiziden mit bestimmten Wirkstoffen,
- im Boden langlebige Wirkstoffe, also Wirkstoffe mit einer hohen Persistenz (HEIDLER 1992). Die Vermeidung des ständigen Einsatzes solcher Wirkstoffe, wie z. B. nicht rasch abbauender Sulfonylharnstoffe, gehört zur Strategie der Verhinderung des Auftretens herbizidresistenter Unkrautarten.

Um gemäß den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis unerwünschten Selektionen entgegenzuwirken, ist ein regelmäßiger Wirkstoffwechsel oder die Kombination verschiedener Wirkstoffe in einem Mittel oder als Tankmischung erforderlich. Oder aber es sollten die Bekämpfungsverfahren geändert werden, also beispielsweise auch Möglichkeiten der mechanischen Bekämpfung wieder mehr genutzt werden (AMMON und ENGELI 1976, AMMON et al. 1976, FEYERABEND und KUNKEL 1983). Hinsichtlich der anhaltenden Anwendung desselben Wirkstoffs kann nur der Rat von HOLLIDAY et al. (1976) wiederholt werden, daß für eine wirkungsvolle Unkrautbekämpfung und zur Vermeidung von Selektionsproblemen ein Prinzip maßgebend ist, nämlich der Wechsel: Wechsel der Kulturen in der Fruchtfolge, Wechsel der pflanzenbaulichen Maßnahmen durch flexible Handhabung der Bodenbearbeitung sowie Wechsel der chemischen Unkrautbekämpfungsmittel und damit der Herbizid-Wirkstoffe.

- Ökologische Wirkung der Unkrautbekämpfung auf die Ackerfauna

Die ökologische Wirkung der Unkrautbekämpfung liegt vordergründig in der Verhinderung des Aufwuchses oder in der Beseitigung von Phytomasse, also im Versiegen der primären Nahrungsquelle für

heterotrophe Organismen. Die Beseitigung bestimmter Arten wird die darauf spezialisierten Konsumenten (Tab. 6) treffen, wobei "ein Ausfall der verschiedenen Pflanzenarten durchaus unterschiedliche 'Laufmascheneffekte' in bezug auf das 'Mitreißen' von Tierarten in den nachfolgenden Nahrungsstufen haben kann" (HEYDEMANN 1983). Die ökologische Bedeutung einer Unkrautart als Wirtspflanze für Tiere kann also je nach deren Spezialisierung sehr verschieden sein. Es kommen auch Pflanzenarten in Äckern vor, von denen nur wenige phytophage Tierarten leben, wie beispielsweise der Acker-Gauchheil (*Anagallis arvensis*) mit 6 Tierarten, die Saat-Wucherblume (*Chrysanthemum segetum*) mit 4 Tierarten oder die Garten-Wolfsmilch (*Euphorbia peplus*) mit 3 Tierarten.

Tab. 6:

Bedeutung einzelner Pflanzenarten der Äcker für phytophage Tierarten (ausgedrückt an der Zahl der an ihnen lebenden spezialisierten Tierarten) (nach HEYDEMANN 1983)

Pflanzenarten der Äcker	an den Pflanzenarten lebende Tierarten
- Gemeine Quecke - <i>Agropyron repens</i>	81 Arten
- Acker-Kratzdistel - <i>Cirsium arvense</i>	80 Arten
- Kreuzkraut-Arten - <i>Senecio spp.</i>	76 Arten
- Einjähriges Rispengras - <i>Poa annua</i>	41 Arten
- Gänsefuß-Arten - <i>Chenopodium spp.</i>	51 Arten
- Vogel-Knöterich- <i>Polygonum aviculare</i>	40 Arten
- Hornkraut-Arten - <i>Cerastium spp.</i>	37 Arten
- Vogel-Sternmiere - <i>Stellaria media</i>	36 Arten

Bei einer Unkrautbekämpfung mit einem hohen Wirkungsgrad, unabhängig davon, ob sie mechanisch oder chemisch erfolgt, wird in weiten Bereichen der heutigen Agrarlandschaft blütenbesuchenden Insekten ein erheblicher Teil ihrer Nahrungsbasis vorenthalten (HAAS 1982, HEYDEMANN 1983). Eine Unkrautbekämpfung mit breitwirksamen Mitteln wird dieses ökologische Problem verschärfen. Davon ist nicht nur die Fülle der indifferenten Insekten betroffen, sondern auch Schwebfliegen (*Syrphidae*) und andere Nützlinge, deren Imagines für ihre Entwicklung und damit Fortpflanzung Nektar und Pollen benötigen. Die Bedeutung an Pflanzenarten reicher Feldraine und zu diesem Ziel herbizidfrei gehaltener Feldränder für die Nützlingsförderung ist erst in Ansätzen erkennbar, muß aber ökologisch hoch veranschlagt werden (WELLING und KOKTA 1988). Auch Vertebraten

sind von allen Formen der Intensivierung des Ackerbaus betroffen. In welchem Maße z. B. Populationen des Rebhuhns (*Perdix perdix*) durch Ackerschonstreifen in Getreidefeldern gefördert werden können, haben Untersuchungen in England ergeben (POTTS 1986). Hiermit wurde umgekehrt deutlich, daß infolge des Fehlens der sich in Kulturpflanzenbeständen früh entwickelnden Unkräuter und der daran lebenden Insekten sekundär ein für den Bruterfolg entscheidender Mangel an Eiweißnahrung für die Rebhuhn-Küken vorliegt.

- Einfluß der Unkrautbekämpfung auf Stoffausträge

Wildwachsende Pflanzenarten in Ackerbaukulturen können zur Minderung von Bodenerosion, dem Abtrag von Bodenpartikeln durch Wasser oder Wind, und Auswaschung von Pflanzennährstoffen und Pflanzenschutzmitteln beitragen. Durch zunehmende Umwandlung von Grünland in Ackerland entstehen Ackerflächen, die über eine mehr oder weniger lange Zeit des Jahres keine geschlossene Pflanzendecke tragen. In Verbindung mit der Vergrößerung der Ackerschläge im Zuge der Flurneuordnung und der Beseitigung von Gehölzen, Hecken und Gräben hat die Bodenerosion mit ihrem nicht wieder gutzumachenden Bodenverlust zu einer Minderung der Bodenfruchtbarkeit geführt (DIEZ 1990).

Beispielsweise kann die erosionsschützende Wirkung eines Unkrautbestandes genutzt werden, wenn die Bekämpfungsmaßnahmen zeitlich so spät wie möglich durchgeführt werden. In der Praxis heißt das, möglichst auf Vorsaats- oder Vorauflauf-Anwendungen zugunsten von Nachauflauf-Behandlungen zu verzichten. Im Interesse des Erosionsschutzes sollten daher bei der Unkrautbekämpfung Kompromisse geschlossen werden.

Gleiches gilt für den Austrag von Nährstoffen. Auch hier können Unkräuter, insbesondere in den vegetationsarmen Herbst- und Wintermonaten, dazu beitragen, den oberflächlichen Abtrag, aber auch die Einwaschung in tiefere Bodenschichten bis hin zum Grundwasser zu vermindern.

## 2.4 Traditionelle Herbizidforschung

Seit Jahrzehnten werden herbizide Wirkstoffe im Screening-Verfahren gesucht. Zusätzlich findet im Umfeld bereits bekannter Wirkstoffe eine gezielte Synthese statt. Als Testorganismen dienen die Kulturpflanzen mit weltweiter Bedeutung und die Problemunkräuter größerer Anbauregionen. Die gefundenen selektiven Wirkstoffe werden formuliert und unter Freilandbedingungen bis zur Marktreife entwickelt. Neben Wirksamkeit und Verträglichkeit sind toxikologische und ökotoxikologische Unbedenklichkeit die entscheidenden Zielgrößen. Auf Grund erhöhter Anforderungen insbesondere im ökotoxikologischen Bereich steigen die Forschungs- und Entwicklungskosten für Pflanzenschutzmittel generell stark an mit der Folge, daß die Anzahl der jährlich neuentwickelten Präparate abnimmt. Auch für ältere Wirkstoffe gelten bei einer anstehenden Entscheidung über eine erneute Zulassung die höheren Anforderungen. Werden diese nicht erfüllt, ist eine weitere Zulassung für Mittel mit diesen Wirkstoffen nicht zu erwarten. Das hat insgesamt dazu geführt, daß die Zahl der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland abgenommen hat und daß in zunehmendem Maße für Anwendungsgebiete mit geringem Marktvolumen keine zugelassenen Mittel zur Verfügung stehen (Lückenindikationen).

Neuere herbizide Wirkstoffe z. B. aus der Gruppe der Sulfonylharnstoffe haben z. T. ein breites Wirkungsspektrum, ihre Wirkorte sind spezifische Stoffwechselprozesse in Pflanzen und Mikroorganismen, ihr Wirkungspotential ist hoch (= niedrige Dosierung), sie werden überwiegend im Nachauflaufverfahren angewandt, und ihre toxikologischen und ökotoxikologischen Kennwerte sind in der Regel günstig.

Verglichen mit der Zahl der selektiven Herbizide ist die der im Ackerbau zugelassenen nichtselektiven sehr gering. Diese wenigen haben allerdings weltweit ein großes Marktvolumen. Sie können auf Nichtkulturland und bei Beachtung bestimmter Anwendungsmodalitäten auch auf Kulturland eingesetzt werden. Beispiele sind Paraquat und Glyphosat.



Neben dem Screening hat in der Herbizidforschung die Verbesserung der Anwendungsmodalitäten bewährter Wirkstoffe eine große Bedeutung. So kann durch Umformulierungen die Handhabung und evtl. auch die Wirksamkeit verbessert werden. Mit dem weiten Feld der Wirkstoffmischungen soll das Wirkungsspektrum erweitert werden. Durch Verwendung von Safenern wird die Verträglichkeit verbessert. Mit wiederholten Teildosierungen (Splitting) wird angestrebt, die Anwendung auch in solchen Kulturpflanzenstadien zu ermöglichen, die früher als relativ unverträglich galten, insbesondere die Phase des Auflaufens. Diese Flexibilisierung der Anwendungstermine kann zu einer Reduzierung des Herbizidaufwands führen, da jetzt die sensitiven Stadien der Unkräuter bei der Terminwahl in den Vordergrund gestellt werden können. Daneben versucht die Praxis in Verbindung mit der Beratung meist regionenspezifisch durch Tankmischungen und mit wirkungserhöhenden Zusätzen zur Spritzflüssigkeit die Effizienz der Behandlungen weiter zu erhöhen.

## 2.5 Neue Ansätze in der Herbizidforschung

Während im traditionellen Screening auf Selektivität die Ziele Wirksamkeit und Verträglichkeit zugleich verfolgt werden müssen, bietet sich über den Weg der Züchtung auf Herbizidresistenz die Möglichkeit an, einen bereits gefundenen Wirkstoff in bisher unverträglichen Kulturen einsetzbar zu machen. Für diesen Zweck kann eine breite Palette von Züchtungstechniken herangezogen werden, unter denen die Gentechnik eine dominierende Stellung einnimmt. Protoplastenfusion, Mutationszüchtung und Kreuzung sind dagegen von untergeordneter Bedeutung. Die aktuellen Ansätze konzentrieren sich auf Wirkstoffe mit günstigen herbologischen, toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften. Neben den nichtselektiven Wirkstoffen Glufosinat und Glyphosat handelt es sich hier um Vertreter aus der Gruppe der Sulfonylharnstoffe und der Imidazolinone (DUKE et al. 1991), wobei letztere überwiegend schon als selektive Herbizide in Getreide bzw. Soja angewandt werden. Sie sollen darüber hinaus in weiteren Kulturen wie Baumwolle und Mais einsetzbar gemacht werden.

Die oben genannten Wirkstoffe zeichnen sich durch ein breites Wirkungsspektrum aus und werden überwiegend im Nachauflaufverfahren eingesetzt. Sie haben eine geringe Warmblütertoxizität und zeigen ein relativ günstiges Umweltverhalten. Im Gegensatz zu völlig neuen Wirkstoffen sind ihre Eigenschaften aus teils langjährigem, weltweitem Einsatz in verschiedenen Indikationen vergleichsweise gut bekannt. Die Innovation besteht hier darin, daß durch den Züchtungsansatz der Anwendungsumfang erweitert werden soll. Dieses Konzept setzt zunächst einmal das Vorhandensein von Wirkstoffen voraus, die wiederum nur im Screening-Verfahren gefunden werden können. Somit wird es auch weiterhin ein Screening - zumindest auf Wirksamkeit - geben müssen, um eine breite Ausgangsbasis für den Züchtungsansatz zu haben. Möglicherweise wird aber auch die Suche nach selektiven Wirkstoffen ihren bisherigen Stellenwert kaum verlieren, weil damit für den Hersteller grundsätzlich die Möglichkeit besteht, ein Herbizid praktisch ohne Sorteneinschränkungen in einer Kultur weltweit zu vermarkten. Nicht zuletzt verbreitert eine Vielzahl selektiver Wirkstoffe die Basis für den Züchtungsansatz und trägt damit zur Minderung ökologischer und ökotoxikologischer Risiken bei.

## 2.6 Wege der Züchtung auf Herbizidresistenz

Die Erzeugung von herbizidresistenten Kulturpflanzen wird hauptsächlich durch zellbiologische und gentechnische Methoden möglich. Dadurch kann eine gewünschte, molekularbiologisch charakterisierte Eigenschaft in relativ kurzer Zeit gezielt in eine Pflanzenpopulation eingeführt werden - ohne den Verlust anderer Merkmale oder die Notwendigkeit eines langjährigen Rückkreuzungsprozesses. Darüber hinaus erlauben diese Techniken die Übertragung von Genen über Artgrenzen hinweg.

Nachfolgend sollen die Methoden kurz beschrieben werden, die bisher zur Herstellung herbizidresistenter Pflanzen verwendet wurden. Wichtigste Voraussetzung für zellbiologische und gentechnische Manipulationen ist die erfolgreiche Regeneration von Pflanzen aus Gewebekulturen. Sie ist mittlerweile eine Routinemethode für eine große Zahl dikotyler Kulturpflanzen. Die agronomisch bedeutenden

monokotylen Getreidepflanzen erfordern dagegen spezielle Bedingungen wie etwa die Verwendung embryonaler Gewebe als Ausgangsmaterial für die Regeneration.

- *In-vitro*-Mutantenselektion und somaklonale Variation

Diese Verfahren stellen eine Erweiterung der klassischen Pflanzenzüchtung dar. In Pflanzenzellkulturen werden durch chemische oder physikalische Mutagene Mutanten erzeugt, die nachfolgend durch einen Selektionsdruck - im Falle der Erzeugung von Herbizidresistenz die Zugabe des Herbizids - selektiert werden können. Ebenso ist in geringerem Ausmaß auch ohne Mutagene eine Isolierung von spontanen Mutanten aus pflanzlichen Zellkulturen möglich. Dieses Phänomen, als somaklonale Variation bezeichnet (LARKIN und SCOWCROFT, 1981), tritt als Folge der längeren Kultivierung undifferenzierter Zellen auf.

Die selektierten und isolierten Zellen, die die Resistenzeigenschaft enthalten, werden anschließend zu ganzen Pflanzen regeneriert. Obwohl auf diese Weise Zelllinien gefunden wurden, die gegen Herbizide resistent waren und die auch zu ganzen Pflanzen regeneriert wurden, fand dieser Ansatz bisher keine praktische Bedeutung. Solche herbizidresistenten Mutanten waren aber in einigen Fällen die Voraussetzung für die Isolierung resistenter Target-Proteine (s. Mechanismen der Herbizidresistenz).

- Protoplastenfusion

Pflanzliche Protoplasten (zellwandlose Zellen) sind unter bestimmten chemischen oder physikalischen Bedingungen fusionierbar (GALUN und AVIV, 1983). Während theoretisch die Verschmelzung zwischen Zellen unterschiedlichster Pflanzengattungen möglich ist, sind solche heterologen Fusionsprodukte nur schwer regenerierbar und führen selten zu fertilen Pflanzen.

Zwei spezielle Verfahren der Protoplastenfusion sind von besonderer praktischer Bedeutung für die Erzeugung von Herbizidresistenz:

- a) die asymmetrische Protoplastenfusion, bei der das Genom der Donorprotoplasten durch starke Röntgenstrahlung fragmentiert wird. Bei der Fusion mit unbestrahlten Empfängerprotoplasten werden Fragmente des Donorgenoms in das Akzeptorgenom eingebaut. Durch Selektion auf einem herbizidhaltigen Medium können diejenigen Hybridprotoplasten selektiert werden, die unter anderem ein Gen für die Resistenz gegen das entsprechende Herbizid erhalten haben.
- b) die Herstellung von "Cybriden" mit dem Ziel, an Zellorganellen gekoppelte Herbizidresistenz in bestimmte Pflanzensorten zu übertragen. Ähnlich wie bei der asymmetrischen Protoplastenfusion werden die Zellkerne der Organelldonoren zunächst durch Röntgenstrahlen inaktiviert oder durch Zentrifugation entfernt. Die so vorbehandelten Protoplasten, Cytoplasten genannt, werden mit den Protoplasten der herbizidsensitiven Kerndonoren fusioniert. Die Hybriden enthalten das Kerngenom der gewünschten, ursprünglich sensitiven Sorte sowie eine Mischung resistenter und sensitiver Organellen. Die Identifizierung der Cybriden erfolgt anhand der Resistenz gegen das Komplementärherbizid. Ein Beispiel für die Anwendung der Cybrid-Technik ist die Erzeugung von Metribuzin-resistentem 00-Winterraps (THOMZIK und HAIN, 1990).

- Gentransfer mittels *Agrobacterium tumefaciens*

Das Bodenbakterium *Agrobacterium tumefaciens* infiziert eine Reihe dikotyler Pflanzen und überträgt dabei einen bestimmten Teil (die sogenannte T-DNA) seines Tumor-induzierenden (Ti)-Plasmids auf die Pflanze. Die bakterielle T-DNA wird ins Pflanzengenom eingebaut, was zu physiologischen Veränderungen der Pflanze führt. Einerseits werden in den transformierten Zellen Opine gebildet, die von *A.-tumefaciens*-Bakterien (Agrobakterien) als Nährstoffe verwertet werden können. Charakteristisch für einen *A.-tumefaciens*-Befall ist andererseits ein an der Infektionsstelle einsetzendes undifferenziertes Wachstum, das zur Bildung von Wurzelhalsgallen führt und für das die auf der T-DNA lokalisierten Auxin- und Cytokinin-gene verantwortlich sind.

Das Prinzip, definiertes genetisches Material von *Agrobacterium tumefaciens* auf Pflanzenzellen zu übertragen, läßt sich gentechnisch nutzen, da für den DNA-Transfer nur die Begrenzungen der T-

DNA wichtig sind (WANG et al., 1984). Zwischen diesen Begrenzungen können beliebige DNA-Sequenzen liegen. Die für das Tumorstadium verantwortlichen Auxin- und Cytokiningene können entfernt und durch andere, agronomisch interessante Gene ersetzt werden. Zwischen die T-DNA-Begrenzungen wird außerdem ein selektierbares Marker-Gen, z.B. ein Gen für Resistenz gegen das pflanzentoxische Antibiotikum Kanamycin, eingebaut.

Bei der gentechnischen Manipulation im Labor werden Pflanzenteile - meist Blätter - mechanisch verwundet, mit Agrobakterien infiziert und anschließend auf einem Pflanzenregenerationsmedium ausgelegt, das ein zur Selektion dienendes Antibiotikum oder Herbizid enthält. Auf diesem Selektionsmedium können nur aus den transformierten Zellen der Blattstücke neue Pflanzen regeneriert werden.

- Direkter DNA-Transfer mit Hilfe von PEG oder Elektroporation

DNA kann auch direkt auf Pflanzenzellen übertragen werden (POTRYKUS et al., 1985). Dazu werden Protoplasten zusammen mit der DNA in einer geeigneten Lösung inkubiert. Durch die gleichzeitige Behandlung mit Elektroschocks oder Polyethylenglycol (PEG) werden die Zellmembranen durchlässig gemacht, so daß die DNA in die Zellen eindringen kann.

Der Vorteil der direkten Transformation ist die Anwendbarkeit auf alle protoplastierbaren und regenerierbaren Pflanzenarten - unabhängig vom Wirtschaftsbereich von *Agrobacterium tumefaciens*. Die Regeneration ganzer Pflanzen aus Protoplasten ist jedoch ein zeitaufwendiger Prozeß und zudem besonders bei Monokotylen sehr schwierig. Durch die Wahl einer geeigneten Gewebekultur gelang es jedoch, mit Hilfe der PEG-Methode fertilen Glufosinat-resistenten Mais zu erzeugen (DONN et al., 1990).

- Ballistische Methoden zur DNA-Übertragung

Eine Methode zum direkten DNA-Transfer in intakte Pflanzenzellen und -gewebe wurde in den letzten Jahren entwickelt. Die DNA wird dabei an winzig kleine Gold- oder Wolframpartikel gebunden, die

anschließend mittels einer sogenannten Partikelkanone mit hoher Geschwindigkeit auf die zu transformierende Gewebekultur geschossen werden (KLEIN et al., 1987). Das beschossene Gewebe - bei Mais und Weizen haben sich embryonale Suspensionskulturen bewährt - wird anschließend unter Selektionsdruck zu ganzen Pflanzen regeneriert. Mit dieser Transformationstechnik wurden unter anderem fertile Glufosinat-resistente Maispflanzen (GORDON-KAMM et al., 1990) sowie stabil transformierter Weizen mit Resistenz gegen Glyphosat (VASIL et al., 1991) erhalten.

Nach der Transformation einer ersten, einfach bearbeitbaren Sorte durch direkten oder Agrobakterien-vermittelten Gentransfer erfolgt die weitere Übertragung des Resistenzgens auf andere Sorten in der Regel wieder durch klassische Züchtungskreuzung. Ins Pflanzengenom eingebaute Fremdgene werden entsprechend den MENDEL'schen Regeln an die nächste Generation weitergegeben.

#### - Expression fremder Gene in Pflanzen

Voraussetzung für die erfolgreiche Expression von Fremdgenen in Pflanzen ist das Vorhandensein pflanzlicher Regulationssequenzen. Diese können *in vitro* an das zu exprimierende, aus beliebigen Organismen stammende Gen gekoppelt werden. Die am häufigsten verwendete pflanzenspezifische Regulationssequenz ist der 35S-Promotor des Blumenkohlmosaik-Virus, der zu einer starken Expression nachgeschalteter Gene in allen Pflanzengeweben führt (ODELL et al., 1985). Daneben gibt es auch Regulationssignale, die Gene nur in bestimmten Geweben oder zu bestimmten Zeiten zur Expression bringen. Die bisher erzeugten und im Freiland getesteten herbizidresistenten transgenen Pflanzen enthalten in der Regel den konstitutiven 35S-Promotor.

Neben der Stärke und Spezifität des Promotors bestimmen noch andere Faktoren die Expressionshöhe in transformierten Pflanzen. Oft wird beim Gentransfer mehr als eine Kopie des zu übertragenden Gens ins Genom der Pflanzenzelle eingebaut. Doch selbst bei transgenen Pflanzen mit derselben Kopienzahl wird eine große Variabilität der Genexpression zwischen verschiedenen Transformanten gefun-

den. Dieses Phänomen wird als "Positionseffekt" bezeichnet (ECKES et al., 1986). Auf Grund dieser Variabilität der Genexpression müssen aus den Pflanzen aus einem Transformationsexperiment immer diejenigen ausgewählt werden, die das erwünschte Expressionsmuster zeigen. Auch Umweltfaktoren sowie der physiologische und der Entwicklungszustand der Pflanze können die Expression eingeführter Gene beeinflussen (MEYER et al., 1991).

## 2.7 Mechanismen der Herbizidresistenz

Drei Grundmechanismen, bei Pflanzen Resistenz gegen ein Herbizid zu erzeugen, gibt es:

1. Überexpression des Target-Proteins,
2. Einführung eines resistenten Target-Proteins,
3. Detoxifizierung des Herbizids.

### - Überexpression des Target-Proteins

Bei der Untersuchung von Gewebekulturen auf Herbizidverträglichkeit wurden Zelllinien gefunden, die tolerant gegen ein Herbizid waren, indem sie das betroffene Target-Enzym in großer Menge produzierten (SHAH et al., 1986). Die resistenten Zelllinien waren durch ansteigende Herbizidkonzentrationen schrittweise selektiert worden. Bei genauerer Analyse zeigte sich, daß die Ursache für die Überexpression des Target-Enzyms in einer Amplifikation des entsprechenden Gens lag. In ersten Versuchen, Herbizidresistenz auf gentechnischem Wege zu erzeugen, wurden Gene aus resistenten Zelllinien isoliert und hinter starke regulatorische Signale gekoppelt. Diese künstlichen Genkonstruktionen wurden mit Hilfe geeigneter Vektorsysteme wieder in Pflanzen eingeführt. Auf Grund des starken Regulatorsignals (35S-Promotor aus Blumenkohlmosaik-Virus) wurde das Target-Protein auch hier verstärkt produziert - ähnlich wie in den Zelllinien, wo die Überexpression auf einer Genamplifikation beruhte (SHAH et al., 1986). Das Resistenzniveau gegenüber Herbiziden, das die so erzeugten Pflanzen besaßen, war jedoch nur sehr niedrig und reichte in Einzelfällen nicht aus, um besonders empfindliche Gewebe zu schützen (KISHORE und SHAH, 1988).

- Einführung eines resistenten Target-Proteins

Um eine verbesserte Resistenz gegen einzelne Herbizide zu erzielen, suchte man nach veränderten Target-Enzymen, die auf Grund einer oder mehrerer Mutationen ihre Empfindlichkeit gegenüber dem Herbizid verloren hatten. Quellen für mutierte Gene waren entweder Mikroorganismen (COMAI et al., 1985), herbizidresistente Pflanzenlinien (LEE et al., 1988) oder aber empfindliche Pflanzen, deren Target-Protein-Gen *in vitro* gezielt verändert wurde (PADGETTE et al., 1988). Wie auch im Fall der Resistenz durch Überexpression wurden die mutierten Gene an ein starkes regulatorisches Element gekoppelt und mit Hilfe von Vektorsystemen in verschiedene Pflanzenarten eingeführt. Abhängig von der Kulturpflanzenart wurde durch diese Strategie ein mehr oder weniger hohes Resistenzniveau erzielt.

- Detoxifizierung des Herbizids

In einigen Fällen geht die erfolgreichste Strategie der Resistenz-erzeugung über die Detoxifizierung des Herbizids. So wurde etwa für Glufosinat ein bakterielles Enzym gefunden, das die Substanz detoxifiziert und damit unwirksam macht (STRAUCH et al., 1988). Das zugehörige Gen, das für eine substratspezifische Acetyltransferase codiert, wurde isoliert und an pflanzliche Regulatorsignale gekoppelt. In verschiedene Pflanzen eingeführt, schützt dieses Gen das Target-Protein Glutamin-Synthetase vor der Wirkung des Herbizids Glufosinat (DE BLOCK et al., 1987). In ähnlicher Weise wurde auch Resistenz gegen das Herbizid Bromoxynil erzielt (STALKER et al., 1988). Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer Herbizidapplikation mit dem Wirkstoff Glufosinat bei Tabakpflanzen, die das erwähnte Acetyltransferase-Gen tragen, sowie bei nicht veränderten Kontrollpflanzen.





Abb. 2:

Ergebnis einer Herbizidapplikation bei Tabakpflanzen im Gewächshaus; 12 Tage nach Behandlung gentechnisch veränderter herbizid-resistenter Pflanzen (oben) und nicht veränderter Kontrollpflanzen (unten) mit einer 5 l/ha entsprechenden Aufwandmenge Basta (Glufosinat).

Neben der Einführung herbizidspezifischer bakterieller Detoxifizierungswege gibt es auch die Möglichkeit, in Pflanzen natürlich vorkommende Entgiftungssysteme zu verwenden. In Mais etwa beruht die Verträglichkeit gegenüber den Triazinen auf dem Vorhandensein großer Mengen des Konjugat-bildenden Enzyms Glutathion-S-Transferase (MOZER et al., 1983). Das zugehörige Gen konnte isoliert werden und vermittelte transgenen Tabakpflanzen eine geringe Resistenz gegenüber Atrazin (HELMER, 1986).

Tab. 7 gibt einen Überblick über die Mechanismen und den Grad der für die einzelnen Wirkstoffe erzielten Resistenz.

## 2.8 Chemische und biologische Eigenschaften ausgewählter Wirkstoffe

### - Glufosinat (Mittel Basta u.a.)

Glufosinat gehört zur Gruppe der Ammonium-Derivate und ist eine organische Phosphorverbindung.

Glufosinat ist ein nichtselektiver herbizider Wirkstoff, der von der Pflanze über das Blatt und andere grüne Pflanzenteile aufgenommen wird. In der Pflanze findet nach bisheriger Erkenntnis eine Translokation des Wirkstoffes nur in sehr geringem Umfang statt. Über die Wurzel wird aus dem Boden kein Wirkstoff aufgenommen. Der Wirkstoff besitzt Kontaktwirkung und somit keine Dauerwirkung.

In der Pflanzenzelle behindert Glufosinat durch Hemmung der Glutamin-Synthetase die Ammoniumentgiftung. Dadurch kommt es im Blattgewebe zu einem Anstieg des Ammoniakgehaltes und einer Schädigung der Zellmembranen. Bereits nach 8 bis 24 Stunden kommt es zu Störungen im Photosyntheseprozess und danach zum Absterben betroffener Zellen und Gewebe und letztlich der ganzen Pflanze. Erste Welkeerscheinungen treten nach 2 bis 5 Tagen auf. Die Wirkung wird in starkem Maße von Umweltfaktoren beeinflusst. Temperaturen unter 10 °C, aber auch Trockenstress reduzieren Wirkungsgeschwindigkeit und Wirkungsgrad, weil unter diesen Bedingungen auch die Stoffwechselaktivitäten der Pflanzen eingeschränkt sind. Um eine ausreichende Wirkstoffaufnahme zu gewährleisten, sollte in den ersten 6 Stunden nach der Anwendung von Basta kein Niederschlag fallen.

Das Wirkungsspektrum umfaßt zahlreiche mono- und dikotyle Arten, sowohl einjährige als auch zum Teil ausdauernde Unkräuter. Auf Grund der minimalen systemischen Wirkung werden ausdauernde Arten aber kaum nachhaltig geschädigt. Einige Rübenunkräuter werden zudem nicht oder nur mit erhöhten Aufwandmengen erfaßt. Hierzu zählen Amaranth, Kleine Brennessel (*Urtica urens*), Acker-Stiefmütterchen, Wasser-Knöterich (*Polygonum amphibium*), Trespe-Arten (*Bromus*

Tab. 7: Mechanismen der gentechnischen Resistenzzeugung bei einzelnen Herbiziden

Herbizid	Target	Mechanismus	Herkunft des Gens	Grad der Resistenz	Literatur
Glyphosat	5-Enolpyruvat-shikimat-3-phosphat-synthetase (EPSPS)	1. Überexpression	Resistente Petunien-Zelllinie	nicht ausreichend	SHAH et al., 1986
		2. Resistentes Target-Protein	a) Salmonella b) Petunie (Gen in vitro mutiert)	gut, wenn an Chloroplasten-Transitsignal gekoppelt gut	COMAI et al., 1985 PADGETTE et al., 1988
Glufosinat	Glutamin-Synthetase	1. Überexpression	Resistente Luzernen-Zelllinie	nicht ausreichend	DONN et al., 1984
		2. Detoxifizierung durch Acetylierung von PPT	Streptomyces	sehr gut	DE BLOCK et al., 1987
Sulfonylharnstoffe	Acetolactat-Synthetase	Resistentes Target-Protein	Resistente Tabak-Linie	gut in Tabak; sonst abhängig von der Pflanzenart	LEE et al., 1988
Bromoxynil	Redoxstoffe des photosynthetischen Elektronentransfers	Detoxifizierung durch Bromoxynil-spezifische Nitrilase	Klebsiella ozaenae	gut	STALKER et al., 1988
Atrazin	QB-Protein von Photosystem II	1. Resistentes Target-Protein	Resistente Linie von Amaranthus hybridus	erhöht	CHEUNG et al., 1988
		2. Detoxifizierung durch Glutathion-S-Transferase	Mais	erhöht	HELMER, 1986

spp.), Weidelgras-Arten (*Lolium* spp.), Gemeine Quecke (*Agropyron repens*), Ausfallgetreide und Ausfallraps (HOECHST, 1991). Diese und eventuell weitere Arten könnten langfristig selektiert werden. Inwieweit dem durch Tankmischungen und/oder Folgebehandlungen mit selektiven Herbiziden begegnet werden kann, muß im Einzelfall geprüft werden. Darüber hinaus können Additive zur Spritzflüssigkeit die Wirksamkeit verbessern und die Wirkungssicherheit erhöhen.

Bei der Zulassung von Basta ist unter anderem die Anwendung gegen aus Samen auflaufende Unkräuter in Zuckerrüben zur Mulch- und Direktsaat vorgesehen. Praxiserfahrungen liegen mit der Unterblatt-Applikation vor.

Über das Auftreten Glufosinat-resistenter Unkräuter wurde bisher nicht berichtet.

Der Wirkstoff Glufosinat ist im Boden mit Halbwertzeiten von ca. 1 Woche gering stabil und neigt nicht zur Versickerung. In reinem Wasser ist Glufosinat chemisch stabil, auch gegenüber Licht. Eine nennenswerte Verdunstung von Oberflächen kann auf Grund der molekular-strukturellen Merkmale ausgeschlossen werden. Die Warmblüttoxizität ist gering, so daß eine Einstufung zur Kennzeichnung nach der Gefahrstoff-Verordnung entfällt. Kanzerogene, mutagene und embryotoxische Wirkungen sind nicht bekannt. Basta ist nicht bienengefährlich und weist gegenüber Wasserorganismen eine geringe Toxizität auf. Bei bestimmungsgemäßer Anwendung werden Bodenmikroorganismen nicht beeinträchtigt.

- Glyphosat (Mittel Roundup, Swing u.a.)

Glyphosat gehört zur Gruppe der Ammonium-Derivate und ist eine organische Phosphorverbindung.

Glyphosat ist ein nichtselektiver herbizider Wirkstoff, der über Blätter und oberirdische Sprosse aufgenommen wird. Mit Hilfe des Assimilatstromes wird er über die gesamte Pflanze, vor allem basipetal transloziert. Die systemische Wirkung gewährleistet, daß der Wirkstoff auch in die unterirdischen Pflanzenteile wie Rhizome und

Wurzeln gelangt. Eine Aufnahme des Wirkstoffes durch die Wurzel ist durch die Inaktivierung von Glyphosat im Boden in der Regel auszuschließen.

Die toxikologische Selektivität von Glyphosat beruht auf einer Blockierung der Biosynthese der essentiellen aromatischen Aminosäuren in der Pflanze. Erste Welkeerscheinungen treten bei einjährigen Pflanzen nach ca. 4 Tagen und bei mehrjährigen Arten nach 7 bis 10 Tagen auf. Blattsymptome sind meist 7 bis 14 Tage nach der Applikation feststellbar, während das vollständige Absterben der Pflanzen bis zu 30 Tagen dauert. Eine höhere Stoffwechselaktivität, gefördert durch Licht und Temperatur, bedeutet eine bessere Verteilung von Glyphosat in der Pflanze und damit erhöhte herbizide Wirkung und gesteigerte Wirkungsgeschwindigkeit. Die optimalen Temperaturen liegen je nach Pflanzenart zwischen 10 und 20 °C. Hohe Luftfeuchtigkeit beeinflusst die Beschaffenheit der Blattoberfläche und fördert damit die Aufnahme des Wirkstoffes. Die Wirkstoffaufnahme durch die Pflanze erfolgt langsamer als bei Glufosinat und wird bis 48 Stunden nach der Anwendung fortgesetzt. Um eine ausreichende Wirkung zu erreichen, sollte es 6 bis 8 Stunden nach der Applikation nicht regnen.

Das Wirkungsspektrum erstreckt sich auf zahlreiche mono- und dikotyle Arten, wobei wegen der systemischen Wirkung die Anwendungen gegen ausdauernde Arten von besonderer Bedeutung sind. Die Wirkstoffaufnahme und damit die Wirksamkeit ist positiv mit der Blattfläche korreliert. Nach den Produktinformationen (BASF, 1989) bestehen Wirkungslücken bzw. -schwächen u.a. gegen Kleine Brennesel, Winden-Knöterich, Acker-Schachtelhalm (*Equisetum arvense*), Wasser-Knöterich und Acker-Winde (*Convolvulus arvensis*). Aus praktischen Erfahrungen mit der Mulchsaat von Zuckerrüben ist weiterhin bekannt, daß die Wirksamkeit gegen ältere Unkrautstadien von Kamille-Arten, Acker-Stiefmütterchen, Acker-Vergißmeinnicht, Vogel-Sternmiere und Kletten-Labkraut unzureichend ist. Als Lösung bieten sich Tankmischungen mit wirkungserhöhenden Zusatzstoffen (z.B. schwefelsaures Ammoniak) und / oder selektiven Herbiziden (z.B. mit dem Wirkstoff Ethofumesat) an. Auch Spritzfolgen, bestehend aus einer Vorsaatbehandlung mit Glyphosat-haltigen Herbiziden und einer Vorauflaufbehandlung mit Ethofumesat- bzw. Metamitron-

haltigen Präparaten, sind denkbar. Inwieweit bei Tankmischungen antagonistische Wirkungen auftreten können (HERBICIDE HANDBOOK, 1989), bedarf noch systematischer Prüfungen. Das gleiche gilt für den Zusatz von Netzmitteln.

Bei der Zulassung von Glyphosat-haltigen Mitteln sind u.a. die Anwendungen zur Mulch- oder Direktsaat im Vorsaatterverfahren bzw. die Einzelpflanzenbehandlung im Streichverfahren gegen Unkraut- / Schosserrüben und Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*) in Futter- und Zuckerrüben ausgewiesen.

Bei Acker-Winde wurden Biotypen mit unterschiedlicher Empfindlichkeit gegen Glyphosat gefunden (DEGENNARO und WELLER, 1984). Offensichtlich ist es bisher aber noch nicht zur Selektion resistenter Unkräuter unter praktischen Bedingungen in größerem Ausmaß gekommen (PUTWAIN und COLLIN, 1989).

Der Wirkstoff Glyphosat ist im Boden mit Halbwertzeiten von 3 bis 4 Wochen mäßig stabil und neigt nicht zur Versickerung. Der Wirkstoff ist hydrolysestabil. Glyphosat kann als schwerflüchtig bezeichnet werden. Die Toxizität gegenüber Warmblütern ist gering; es besteht keine Einstufung zur Kennzeichnung nach der Gefahrstoff-Verordnung. Hinweise auf eine karzinogene, mutagene oder teratogene Wirkung sind nicht gegeben. Glyphosat-haltige Mittel sind schwach giftig für Fische und Fischnährtiere. Roundup ist nicht bienengefährlich. Weder Wachstum noch Zusammensetzung der Mikroorganismen im Boden werden bei der Anwendung von Glyphosat beeinflusst bzw. verändert.

### 3. ZULASSUNGSFRAGEN

#### 3.1 Komplementär an ein Herbizid gebundene Sorten

Nach dem Gentechnikgesetz (GenTG) vom 20. Juni 1990 (ANONYM 1990b) ist ein gentechnisch veränderter Organismus (GVO) definiert als "ein Organismus, dessen genetisches Material in einer Weise verändert worden ist, wie sie unter natürlichen Bedingungen durch Kreuzen oder natürliche Rekombination nicht vorkommt". Neben di-

rekten und *Agrobacterium-tumefaciens*-vermittelten Gentransferverfahren zählen auch bestimmte Zellfusionstechniken zu den Methoden der Herstellung gentechnisch veränderter Pflanzen.

Das gezielte Ausbringen von GVO in die Umwelt ist als Freisetzung definiert, wohingegen ein Inverkehrbringen die Abgabe von Produkten, die gentechnisch veränderte Organismen enthalten oder aus solchen bestehen, an Dritte beinhaltet. Eine Genehmigung für Freisetzung und Inverkehrbringen ist dann zu erteilen, wenn "nach dem Stand der Wissenschaften im Verhältnis zum Zweck der Freisetzung / des Inverkehrbringens unvertretbare schädliche Einwirkungen auf Leben und Gesundheit von Menschen, Tieren, Pflanzen sowie die sonstige Umwelt in ihrem Wirkungsgefüge und Sachgüter nicht zu erwarten sind" (§ 16 (1) u. (2) GenTG). Grundlage für die Beurteilung eines Antrages auf Freisetzung oder Inverkehrbringen sind Daten über die gentechnische Veränderung, den Organismus sowie sein Verhalten in der Umwelt. Soll ein gentechnisch veränderter Organismus zu gewerblichen Zwecken in Verkehr gebracht werden, so sind zusätzlich auch Angaben über Einsatzbedingungen und Einsatzbereich für die Beurteilung relevant.

Das Gentechnikgesetz sieht in bestimmten Fällen Ausnahmen vor. So stehen einer Genehmigung des Inverkehrbringens durch das Bundesgesundheitsamt Genehmigungen gleich, die von Behörden anderer Mitgliedsstaaten der EG nach gleichwertigen Verfahren erteilt worden sind (§ 14 (5) GenTG). Der Richtlinie 90/220/EWG des Rates der EG vom 23. April 1990 (ANONYM 1990a) entsprechend darf ein gentechnisch veränderter Organismus für eine Marktfreigabe nur dann in Betracht kommen, wenn er zuvor "in Feldversuchen in Ökosystemen, die von seiner Anwendung betroffen sein könnten, ausreichend praktisch erprobt wurde". Auch kann ein Mitgliedsstaat Einsatz und Verkauf eines zugelassenen Produktes in seinem Gebiet vorübergehend einschränken oder verbieten, wenn das Produkt eine Gefahr für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt darstellt.

Die Bundesregierung kann nach Anhörung der Zentralen Kommission für Biologische Sicherheit (ZKBS) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates bestimmen, daß in einem gleichwertigen Verfahren erteilte Genehmigungen der Genehmigung durch das Bundes-

gesundheitsamt gleichstehen (§ 14 (5) GenTG). Nach dem gegenwärtigen Stand ist jedoch nicht davon auszugehen, daß die Zulassung einer neuen Pflanzensorte durch das Bundessortenamt ein den Kriterien des GenTG gleichwertiges Verfahren darstellt. Molekularbiologische Prüfungen zum Nachweis des eingeführten Gens und seiner Genprodukte sind bei der Sortenzulassung nicht vorgesehen. Mögliche phänotypische Veränderungen wie Biomasse- und Ertragsreduktionen sowie der Gehalt an bestimmten charakteristischen Inhaltsstoffen werden dagegen im Zuge der Sortenzulassung erfaßt. Ernteinbußen wurden etwa im Falle von Atrazin-resistentem Raps, der durch herkömmliche Züchtung hergestellt wurde, gefunden (FORCELLA, 1987). Derartige Effekte sind in Feldversuchen zu testen. Bei gentechnisch veränderten Pflanzen, in die neuartige Stoffwechselwege eingeführt wurden, muß unter Berücksichtigung der Eigenschaften der entsprechenden Enzyme geprüft werden, ob toxische oder allergene Produkte entstehen können.

Bei gentechnisch erzeugter Herbizidresistenz ergibt sich nach dem Saatgutverkehrsgesetz eine zusätzliche Problematik. Der landeskulturelle Wert einer Sorte ist dann gegeben, wenn sie gegenüber vergleichbaren Sorten eine deutliche Verbesserung für den Pflanzenbau oder für die Verwertung des Ernteguts erwarten läßt. Daraus ergibt sich die Frage, ob der landeskulturelle Wert nicht mehr gegeben ist, wenn die Zulassung des Herbizids endet.

Die Genehmigung für eine Freisetzung oder ein Inverkehrbringen kann auch die Nachkommen und das Vermehrungsmaterial des gentechnisch veränderten Organismus umfassen. Die Verwendung von Vermehrungsmaterial für die Weiterzüchtung (Einkreuzung des Herbizidresistenzgens in andere Sorten) ist jedoch im Falle von patentierten Genen voraussichtlich auf den Lizenzinhaber beschränkt. Dies steht im Gegensatz zum herkömmlichen Sortenschutz, der vorsieht, daß die Verwendung von Vermehrungsmaterial einer geschützten Sorte für die Züchtung einer neuen Sorte nicht der Zustimmung des Sortenschutzinhabers bedarf. Bei gentechnisch erzeugten herbizidresistenten Pflanzen ist daher möglicherweise eine Einschränkung der Sortenvielfalt und eine Monopolisierung des Saatgutmarktes zu erwarten.



Das Gentechnikgesetz (§ 14 (1)) sieht vor, daß die Genehmigung für ein Inverkehrbringen gentechnisch veränderter Organismen auf bestimmte Verwendungen beschränkt werden kann. Im Falle herbizid-resistenter Pflanzen ist hier theoretisch eine Regulierungsmöglichkeit gegeben, um eventuellen ökologischen Risiken einer gehäuftten Anwendung desselben Wirkstoffs vorzubeugen.

### 3.2 Komplementär an Sorten gebundene Herbizide

#### - Prüfung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln allgemein

Die rechtliche Grundlage für die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln, also auch Herbiziden, ergibt sich aus dem Pflanzenschutzgesetz (PflSchG) vom 15. Sept. 1986 (ANONYM 1986). Danach dürfen Pflanzenschutzmittel nur eingeführt oder gewerbsmäßig vertrieben werden, wenn sie von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) im Einvernehmen mit dem Bundesgesundheitsamt (BGA) und dem Umweltbundesamt (UBA) zugelassen sind. Das Gesetz regelt z. Z. nur die Einfuhr und den gewerbsmäßigen Vertrieb, nicht aber die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Diese erfolgt derzeit lediglich durch flankierende gesetzliche Maßnahmen, wie Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung, Pflanzenschutz-Höchstmengenverordnung, Wasserhaushaltsgesetz usw. Zukünftig wird es jedoch nach Umsetzung der EG-Richtlinie 91/414 EWG über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (ANONYM 1991) ab 15. Juli 1993 eine Indikationszulassung geben, das heißt, daß Pflanzenschutzmittel nur in den zugelassenen Anwendungen appliziert werden dürfen.

Die Zulassung für ein Pflanzenschutzmittel wird erteilt, wenn die Voraussetzungen hierfür erfüllt sind (ANONYM 1986):

- Das Pflanzenschutzmittel muß hinreichend wirksam sein.
- Der Gesundheitsschutz gegenüber Mensch und Tier beim Verkehr mit gefährlichen Stoffen muß gewährleistet sein.
- Bei bestimmungsgemäßer und sachgerechter Anwendung oder als Folge einer solchen Anwendung darf das Mittel keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch, Tier und auf das Grundwasser haben und keine sonstigen Auswirkungen, insbesondere

auf den Naturhaushalt, die nach dem Stande der wissenschaftlichen Erkenntnisse nicht vertretbar sind.

Der Zulassung eines Pflanzenschutzmittels geht in aller Regel ein Verfahren voraus, bei dem im wesentlichen folgende Aspekte geprüft werden:

1. physikalisch-chemische Eigenschaften,
2. Anwendungsgebiete mit Wirksamkeit und Phytotoxizität,
3. Unterlagen zur Analytik,
4. Rückstandsverhalten in/auf Pflanzen und Erntegut,
5. Gesundheit von Mensch und Tier,
6. Verbleib in Boden, Wasser und Luft,
7. Auswirkungen auf den Naturhaushalt.

#### Chemisch-physikalische Eigenschaften

Ausgangspunkt ist hier vor allem die Art der wirksamen Bestandteile sowie der Beistoffe eines Pflanzenschutzmittels, ferner der Reinheitsgrad bzw. die Art und Menge der Verunreinigungen und Isomere des technischen Wirkstoffes. Darüber hinaus sind Unterlagen zur Löslichkeit, Dampfdruck, Dichte, n-Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient und hydrolytische Stabilität sowie Daten zur Lagerfähigkeit und Restebeseitigung zu erbringen. Ihre Kenntnis kann bereits Anhaltspunkte für eine Beurteilung und Einstufung des Pflanzenschutzmittels geben oder eine erste Prognose zum Umweltverhalten ermöglichen und ist somit eine wichtige Voraussetzung für die meisten nachfolgenden Untersuchungen.

#### Anwendungsgebiet mit Wirksamkeit und Phytotoxizität

Die zweifelsfreie Kenntnis der tatsächlich erforderlichen Anwendungsbedingungen ist die Voraussetzung für einen sachgerechten und bestimmungsgemäßen Einsatz. Daraus resultiert der zu erbringende Nachweis der hinreichenden Wirksamkeit. Ein nicht oder nicht genügend wirksames Pflanzenschutzmittel würde eine unnötige Belastung der Umwelt darstellen. Außerdem sollen die Mittel nicht phytotoxisch sein.

### Unterlagen zur Analytik

Voraussetzung für den Nachweis und die Bestimmung der Wirkstoffrückstände und relevanten Abbau- und Reaktionsprodukte ist eine sichere Analysenmethode. Sie muß die verschiedenen Bereiche wie Wasser, Boden und insbesondere Pflanzen und Pflanzenerzeugnisse, einschließlich Erntegut und Verarbeitungsprodukte umfassen. Darüber hinaus soll sie mit vertretbarem Aufwand und allgemein gebräuchlichen Geräten die Kontrolle der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung und Pflanzenschutzmittel-Höchstmengenverordnung ermöglichen.

### Rückstandsverhalten in Pflanzen und Pflanzenerzeugnissen

Pflanzenschutzmittel unterliegen nach ihrer Anwendung Abbau- und Umwandlungsprozessen. Sie können zudem vom Regen abgewaschen und durch das Wachstum der Pflanzen verdünnt werden. Jedoch ist davon auszugehen, daß Restmengen der Pflanzenschutzmittel und ihrer Abbauprodukte in den Erzeugnissen zurückbleiben können. Daher werden Untersuchungen zum Metabolismus und Rückstandsverhalten der Wirkstoffe sowie gesundheitlich bedenklicher Abbauprodukte in der Pflanze im Rahmen des Zulassungsverfahrens große Aufmerksamkeit gewidmet. Die Ergebnisse von Rückstandsversuchen werden zur Festsetzung von Höchstmengen herangezogen, die in die Pflanzenschutzmittel-Höchstmengenverordnung eingehen.

### Gesundheit von Mensch und Tier

Das Ziel der toxikologischen Prüfung ist zum einen der Anwender- und zum anderen der Verbraucherschutz. Hiermit muß gewährleistet sein, daß bei bestimmungsgemäßer und sachgerechter Anwendung der Pflanzenschutzmittel sowie bei guter fachlicher Praxis zum einen keine Gefahren für den Anwender ausgehen und zum anderen die in den Pflanzenerzeugnissen möglicherweise verbleibenden Rückstände für die Gesundheit von Mensch und Tier unschädlich sind. Die Prüfung der toxikologischen Eigenschaften hinsichtlich des gesundheitlichen Risikos erfolgt im Bundesgesundheitsamt auf der Grundlage von Tierversuchen. Mit dem Einvernehmen dieser Behörde werden Auflagen für die Kennzeichnung des Mittels verknüpft, die bei der Zulassung umzusetzen sind.

### Verbleib in Boden, Wasser und Luft

Bei fast allen Pflanzenschutzmaßnahmen werden Böden, u. U. auch Gewässer und Luft mehr oder weniger stark kontaminiert. Daraus erwächst die Notwendigkeit, daß dem Verhalten der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe im Boden eine besondere Beachtung geschenkt wird. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens sind Untersuchungen zum Abbauverhalten der Mittel, einschließlich der Abbau- und Reaktionsprodukte, sowie zum Versickerungsverhalten im Boden erforderlich. Anhand der gewonnenen Daten lassen sich dann wiederum die Belastung des Bodens selbst, die von Folgekulturen sowie die Gefährdung des Grundwassers abschätzen.

Durch Abtrift, Abschwemmung und Drainung können Pflanzenschutzmittel in Gewässer gelangen. Um die daraus folgenden Auswirkungen auf Gewässerorganismen und / oder eine mögliche Trinkwassergewinnung beurteilen zu können, muß das Verhalten des Wirkstoffes im Wasser aufgeklärt werden.

Wenn sich ein Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff in nennenswerter Menge verflüchtigt, muß geklärt werden, wie stabil diese Substanz in der Luft ist, um z. B. das Risiko weiträumiger Verfrachtung abschätzen zu können.

### Auswirkungen auf den Naturhaushalt

Der Begriff Naturhaushalt umfaßt das Zusammenwirken von Boden, Wasser und Luft (= abiotische Faktoren) sowie der darin lebenden Pflanzen und Tiere (= biotische Faktoren). Dieses Wirkungsgefüge ist nicht oder nur schwer meßbar und daher auch schwierig zu prüfen, unabhängig davon, ob eine Pflanzenschutzmittel-Anwendung stattgefunden hat oder nicht. Gegenwärtig können lediglich einzelne Glieder in einer Wirkungskette, einfache Modellökosysteme oder Stoffwechsellleistungen untersucht werden. Prüfbereiche im Rahmen des Naturhaushaltes sind derzeit:

- Bodenmikroflora
- Bodenfauna (Regenwürmer)
- Honigbiene
- Gewässerorganismen
- freilebende, terrestrische Wirbeltiere.

Aus der Summe von Einzeluntersuchungen werden Abschätzungen und Bewertungen vorgenommen, die zu Prognosemöglichkeiten hinsichtlich der Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme führen.

Alle aus den Prüfungsunterlagen gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Zulassung eines Mittels ein und werden in Form von begleitenden gesetzlichen Regelungen (z. B. Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung) und Zulassungsvorschriften (Kennzeichnungsaufgaben) verdeutlicht.

- Besonderheiten der Prüfung und Zulassung von Herbiziden für die Anwendung an gentechnisch veränderten Pflanzen.

Ausgehend von der Annahme, daß evtl. in Frage kommende Herbizid-Wirkstoffe bereits in zugelassenen Mitteln enthalten sind und erst in einem zweiten Schritt zur Zulassung für die Anwendung an herbizidresistenten Pflanzen angemeldet werden, haben diese Mittel mit dem betreffenden Wirkstoff das Zulassungsverfahren bereits einmal durchlaufen. Damit ist zunächst sichergestellt, daß die vorgenannten Prüfbereiche im Rahmen des Zulassungsverfahrens geprüft und beurteilt wurden. Abgesehen von dem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse, die einer ständigen Entwicklung unterliegen, sind dadurch wesentliche Aspekte bereits untersucht und berücksichtigt. Lediglich bei der Kulturpflanze könnten im Hinblick auf Wirksamkeit und Stoffwechsel, Rückstandsverhalten und im weitesten Sinne Analytik neue Sachverhalte vorliegen, die einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden müssen.

#### Wirksamkeit

Schon heute werden im Zulassungsverfahren bei der Wirksamkeit, und hierbei vor allem bei der Beurteilung der Phytotoxizität, Sorteneigenschaften bestimmter Kulturpflanzenarten geprüft, die nach herkömmlichen Züchtungsverfahren erstellt worden sind. So gibt es eine Reihe von Herbiziden, die eine unterschiedliche Sortenverträglichkeit aufweisen. Das Spektrum reicht von phytotoxisch bis verträglich. Das hat zur Folge, daß diese Mittel nur in bestimmten Sorten angewendet werden können. Bei der Zulassung wird das durch Anwendungsbedingungen in Form von Kennzeichnungsaufgaben berücksichtigt.

Im Hinblick auf gentechnisch veränderte, herbizidresistente Kulturpflanzen muß zunächst davon ausgegangen werden, daß durch die Anwendung eines Mittels mit dem betreffenden Wirkstoff ein Einfluß

auf die Wirkungsweise erfolgt. Aufnahme, Transport, Stoffwechsel und / oder Metabolisierung des Wirkstoffes können gegenüber bisherigen Kenntnissen verändert sein. Was jedoch die Wirksamkeit betrifft, und vor allem die Verträglichkeit gegenüber der Kulturpflanze, ist davon auszugehen, daß im Rahmen des Zulassungsverfahrens durch eine eingehende Prüfung der im PflSchG vorgegebenen hinreichenden Wirkung Genüge getan wird.

Eine Unkrautresistenz hätte für die Zulassung eines Herbizids zur Folge, daß die Voraussetzungen des § 15 Abs. 1 PflSchG nicht erfüllt sind. Mit dem Wegfall der hinreichenden Wirksamkeit ist der Nutzen nicht gegeben und somit eine Zulassung nicht mehr vertretbar. Die Zulassung des Mittels müßte für bereits bestehende Anwendungen widerrufen und dürfte für neu beantragte nicht erteilt werden.

#### Rückstandsverhalten in Pflanzen

Laut PflSchG dürfen zugelassene Pflanzenschutzmittel bei bestimmungsgemäßer und sachgerechter Anwendung oder als Folge einer solchen Anwendung keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier und auf Grundwasser haben. Vom Antragsteller ist daher nachzuweisen, daß keine Gefahr für die genannten Schutzgüter besteht. Das betrifft auch Pflanzenschutzmittel zur Behandlung herbizidresistenter Pflanzen, die eine andere Aufnahme und einen anderen Transport des Wirkstoffes sowie ein verändertes Metabolisierungs- und somit auch ein anderes Rückstandsverhalten haben können als nicht herbizidresistente Pflanzen derselben Art. Insbesondere können andere Metabolite beim Abbau in der Pflanze auftreten.

Ein weiterer Gesichtspunkt hierbei ist, daß auf Grund der besonders guten Verträglichkeit dieser Kulturpflanzenart gegenüber einem bereits zugelassenen Herbizid andere und häufigere Applikationstermine im Zulassungsverfahren beantragt werden können. Beispielsweise ist es denkbar, daß die Herbizidanwendung zu einem späteren Termin als normalerweise üblich, also in einem fortgeschrittenen Kulturpflanzenstadium erfolgen soll. Das hätte zur Folge, daß die Zeitspanne bis zur Ernte kürzer ist und somit ein kleinerer Zeitraum für den Abbau des Wirkstoffes in Pflanzen und Boden zur Verfügung steht. Um das abschätzen und beurteilen zu

können, sind Untersuchungen zum Abbauverhalten, einschließlich Metabolisierungsstudien, auch für herbizidresistente Pflanzenarten gleichermaßen wie schon bisher für herkömmliche im Zulassungsverfahren erforderlich.

Auf Grund dieser Untersuchungen wird die mögliche Gesamtbelastung der Erntegüter sowie ihrer Verarbeitungsprodukte beurteilt. Basierend auf den Ergebnissen von Tierversuchen und den dabei ermittelten Schwellenwerten werden Grenzwerte für die Rückstände von Pflanzenschutzmitteln und, soweit erforderlich, auch für die Rückstände der Metabolite in und auf Lebensmitteln festgesetzt. Um die Einhaltung dieser Höchstmengen durch den Pflanzenschutzmittel-Anwender zu gewährleisten, erfolgt die Festlegung von Wartezeiten als dem zwischen Pflanzenschutzmittel-Anwendung und Erntezeitpunkt einzuhaltenden Mindestzeitraum. Es entspricht der gegenwärtigen Praxis, daß diese Wartezeiten bei der Zulassung durch Auflagen und / oder Anwendungsbestimmungen berücksichtigt werden.

#### Analytik

Wie bereits ausgeführt, können bei herbizidresistenten Pflanzen veränderte Stoffwechselfvorgänge auftreten. Um das Verhalten der Wirkstoffe sowie relevanter Abbauprodukte in den Pflanzen nachvollziehen zu können, müssen geeignete Analysemethoden zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß alle Pflanzenschutzmittel und somit auch Herbizide, die vertrieben werden sollen, geprüft und zugelassen sein müssen. Bei der Zulassung werden Anwendungsgebiete vorgesehen. Diese gliedern sich nach Anwendungsvoraussetzungen und Kulturpflanzenarten. Dabei werden auch Kulturpflanzenarten berücksichtigt. Dadurch ist gewährleistet, daß auch gentechnisch veränderte Pflanzenarten, also ganz bestimmte neue Sorten, bei der Prüfung erfaßt und beurteilt werden. Die hierbei möglicherweise besonders zu betrachtenden Prüfgebiete Wirkungsweise, Wirksamkeit und Rückstandsverhalten in der Kulturpflanze und ggf. die analytischen Nachweisverfahren können im Rahmen der derzeitigen Prüfanforderungen für Pflanzenschutzmittel, entsprechend dem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse, geprüft und beurteilt werden.

Neue Anforderungen an Prüfmethode und -verfahren erscheinen derzeit nicht erforderlich.

#### 4. MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN DES ANBAUS HERBIZIDRESISTENTER SORTEN

##### 4.1 Produktionstechnische Auswirkungen

Die Bestimmungsgründe für eine bestimmte Produktionstechnik sind vielfältig und komplex, sie sind regelkreisartig miteinander verbunden (DIERCKS, 1986). Eine isolierte Betrachtung sektoraler Innovationen ist daher nicht möglich. Hinzu kommt in dem hier zu betrachtenden speziellen Fall der Herbizidresistenz bei Zuckerrüben, daß es sich zwar um eine bereits realisierbare Technik handelt, die aber kurzfristig - allein wegen der noch zu durchlaufenden Zulassungsverfahren - noch nicht wirksam werden kann. Im Zeitraum bis zur vollen Marktreife des Konzeptes können sich wesentliche Einflußgrößen verändern. Ein Komplementärangebot muß also eher mit dem produktionstechnischen Standard nach der Jahrtausendwende als mit dem heutigen kompatibel sein (LUNDIN, 1989). Konkret heißt das, man muß sich auf Sorten und Herbizide festlegen, die noch mit dem heute kaum abschätzbaren Standard in 10 Jahren konkurrieren können.

Mit dem Züchtungsansatz wird im Prinzip erreicht, daß für die Indikation "Unkrautbekämpfung bei der Zuckerrübe" ein zusätzliches (selektives) Herbizid zur Verfügung steht. Gegenüber bereits vorhandenen selektiven Herbiziden würde es sich durch den Wegfall des Phytotoxizitätsrisikos und ein vergleichsweise breites Wirkungsspektrum auszeichnen. Vor dem Hintergrund der historischen Entwicklung der chemischen Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben sollte diese Innovation jedoch nicht überbewertet werden. Gravierende produktionstechnische Folgen gingen allein von der erstmaligen Substitution der Handarbeit durch selektive Herbizide vor Jahrzehnten aus. Auch nachfolgende graduelle Verbesserungen wie der Übergang zu Nachauflaufbehandlungen, das Splitting, die selektive Bekämpfung von Gemeiner Quecke bzw. Acker-Kratzdistel oder der ständige Selektivitätszuwachs dürften in ihrer Gesamtheit einen



vermutlich höheren produktionstechnischen Nutzen gehabt haben als die Einführung einer Resistenz gegen ein Herbizid.

Inwieweit es zu Wechselwirkungen zwischen Komplementärangeboten und anderen möglichen produktionstechnischen Entwicklungen kommen kann, entzieht sich der genauen Beurteilung, da diese Entwicklungen selbst im einzelnen nicht voll zu übersehen sind. Prognosen sind auch insofern schwierig, weil solche Entwicklungen zu einem nicht unerheblichen Teil von den Kosten sowie der Experimentierfreudigkeit der Praxis abhängen.

Konkret vollzieht sich gegenwärtig ein Rückgang der Stickstoffdüngung mit dem Ziel der Verbesserung der technologischen Qualität der Zuckerrübe und aus ökologischen Gründen (WINNER, 1991). Von einer geringeren Nährstoffzufuhr kann tendenziell eine Abschwächung der Unkrautkonkurrenz ausgehen, insbesondere wenn zusätzlich die Nährstoffe im Bereich der Rübenreihen plaziert werden und damit für die Masse der Unkräuter schwerer zugänglich sind. Die Reihendüngung in Zuckerrüben ist technisch gelöst und wird in einigen Ländern bereits praktiziert. Die sich daraus möglicherweise ergebenden Konsequenzen für die Unkrautbekämpfung würden aber generell sein, das heißt, es käme nicht zu spezifischen Wechselwirkungen mit Komplementärangeboten.

Produktionstechnische Auswirkungen können auch Vor- und Nachkulturen der Zuckerrübe betreffen. So würden durch Komplementärherbizide ohne Residualwirkung bestehende Nachbaurisiken entfallen. Beispielsweise ist es gegenwärtig vielfach erforderlich, durch Pflügen vor der Nachfrucht Winterweizen das von dem Wirkstoff Ethofumesat ausgehende Nachbaurisiko auszuschließen.

Ein produktionstechnisches Novum der jüngsten Vergangenheit war die Einführung der Mulchsaat von Zuckerrüben vorwiegend zum Schutz vor Erosion, Nährstoffauswaschung und Bodenverdichtung. Die chemische Unkrautbekämpfung erfolgt - bis auf die Beseitigung der Altverunkrautung - mit selektiven Herbiziden. Gegen die Altverunkrautung muß Glyphosat wegen der fehlenden Selektivität im Vorsaatsverfahren eingesetzt werden. Dabei ist die Wirksamkeit durch Tankmischung bzw. Nachbehandlung mit weiteren (selektiven) Herbi-

ziden zu verbessern. Mit der Verfügbarkeit von Glyphosat-resistenten Sorten wäre der Herbizideinsatz zwar flexibler zu gestalten, die Wirkungslücken blieben aber bestehen. Es ist auch nicht zu erwarten, daß es allein auf Grund einer Glyphosat-Resistenz zu einer Ausweitung der Mulchsaat z.B. auf nicht erosionsgefährdete Lagen käme. In diesen Lagen ist flaches Grubbern zur Beseitigung der Altverunkrautung möglich.

Der Umfang des Zuckerrübenbaus und die innerbetrieblichen Fruchtfolgen werden sich auf Grund der Einführung einer Herbizidresistenz wahrscheinlich nicht verändern. Für diese Vermutung spricht,

- daß es sich bei der Herbizidresistenz nur um eine graduelle Innovation handelt (s.o.);
- daß selbst bei einer Verbilligung der Unkrautbekämpfung durch den Züchtungsansatz die übrigen Determinanten des Rübenanbaus unverändert wirksam sind. Eine vermutete Kostensenkung von bis zu 50 % durch den Züchtungsansatz (SCHULZ et al., 1990) dürfte zumindest im Rübenbau in dieser Größenordnung aus herbologischen Gründen kaum zu erwarten sein (s. übernächstes Kapitel).
- daß der Anbau von Zuckerrüben in der EWG durch Mengenkontingente geregelt ist. Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, daß die Zuckererträge/ha infolge des allgemeinen Züchtungsfortschritts voraussichtlich weiter steigen werden (Abb. 1), ist eher mit einem Rückgang des Zuckerrübenanbaus zu rechnen;
- daß innerbetrieblich der Anbauumfang durch das Nematodenrisiko begrenzt wird;
- daß in der Vergangenheit graduelle herbologische Innovationen den Anbauumfang von Zuckerrüben kaum beeinflußt haben. Der Rübenbau ist vielmehr ein Beispiel dafür, daß - wegen der Mengenkontingentierung - sich die Anbaufläche einer Kultur trotz optimaler Problemlösungen im produktionstechnischen Bereich in den letzten 10 Jahren nur wenig veränderte (Tab. 8).

Tab. 8:  
 Entwicklung der Anbaufläche von Zuckerrüben  
 (alte Bundesländer)

1951/55	235.000 ha
1961/65	299.000 ha
1971/75	339.000 ha.
1980	395.000 ha
1990	410.000 ha

Insgesamt ergibt sich somit die Einschätzung, daß die sich abzeichnenden Veränderungen im Bereich der chemischen Unkrautbekämpfung nicht so gravierend sein werden, daß dadurch die Produktionstechnik des Zuckerrübenbaus wesentlich beeinflusst würde. Die Produktionsstruktur (Anbaufläche und deren räumliche Verteilung) dürfte ganz unbeeinflusst bleiben. Inwieweit Komplementärangebote die freie Sortenwahl, die bei Zuckerrüben hinsichtlich Reifegruppen und Krankheitsresistenz für den Einzelbetrieb von Bedeutung sein kann, einschränken, hängt von der Verbreitung einer Herbizidresistenz im Sortenspektrum ab. Für andere Kulturen, z.B. für Getreide, kann sich eine hiervon abweichende Wertung ergeben.

#### 4.2 Auswirkungen auf den Integrierten Landbau

Praktischer Pflanzenbau ist die Kunst des Landwirts, das Grundlagenwissen vieler Teildisziplinen mit aktuellen Planungsdaten und standörtlicher Erfahrung in einem System der Landbewirtschaftung zu integrieren. Dieses System ist dynamisch und bedarf der permanenten Anpassung an die sich räumlich und zeitlich ändernden Rahmenbedingungen. Der Pflanzenschutz einschließlich der Unkrautbekämpfung ist unerläßlicher Bestandteil des Systems. Dies kommt deutlich in der Definition von HEITEFUSS (1987) zum Ausdruck: "Der Integrierte Landbau umfaßt standort- und umweltgerechte Systeme der Pflanzenproduktion, in denen unter Beachtung ökologischer und ökonomischer Anforderungen alle geeigneten Verfahren des Acker- und Pflanzenbaus, der Pflanzenernährung und des Pflanzenschutzes

in möglichst guter Abstimmung aufeinander unter Nutzung sowohl des biologisch-technischen Fortschritts als auch natürlicher Begrenzungsfaktoren eingesetzt werden, um langfristig sichere Erträge und betriebswirtschaftlichen Erfolg zu gewährleisten."

Einige Aspekte dieser Definition, wie umweltgerechte Systeme, ökologische Anforderungen in möglichst guter Abstimmung aufeinander und Nutzung natürlicher Begrenzungsfaktoren, sollen Anlaß sein, die Funktionen von Unkräutern in Agroökosystemen zu skizzieren und danach zu fragen, inwieweit diese Funktionen durch den Anbau herbizidresistenter Sorten beeinflußt werden könnten. Als Funktionen von Unkräutern in Agroökosystemen werden häufig genannt (u.a. KOCH und WALTER, 1985):

- Schutz vor Bodenerosion,
- Förderung von Bodenstruktur und -gare,
- Einflüsse auf den Nährstoffhaushalt (u.a. Minderung der Nitratauswaschung),
- Lebensraum für Nützlinge und indifferente Tierarten,
- Neben- und Zwischenwirte für Krankheiten und Schädlinge der Kulturpflanzen,
- Minderung des Monokulturcharakters,
- Verbesserung der Tragfähigkeit des Bodens.

Diese Funktionen sind im Hinblick auf die Produktion von Pflanzen sowohl positiv als auch negativ zu bewerten. In den meisten Fällen fehlt es aber noch an quantitativen Belegen. Zudem sind die Wirkungen sehr umweltabhängig und damit variabel, was ihre Nutzung im Produktionsprozeß erschwert. Nach KOCH und WALTER (1985) dürften die Effekte insgesamt auch nur gering sein. Maximale Wirkungen können erwartet werden, wenn Unkräuter in hoher Dichte möglichst lange ungestört wachsen. Dem stehen jedoch ökonomische Grenzen entgegen. So kann in Zuckerrüben ein Unkrautbesatz nur bis etwa 4 Wochen nach dem Auflaufen toleriert werden. Ab der 8. Woche ist dann wieder eine schwache Restverunkrautung tolerierbar. Um ökologische Vorstellungen mit ökonomischen Zwängen soweit wie möglich in Einklang zu bringen, ist daher anzustreben, die Unkrautbekämpfung so spät wie möglich und nur bis zu einer tolerierbaren Dichte vorzunehmen. Ein Komplementärangebot würde diese Zielsetzung - was den zeitlichen Aspekt anbelangt - erfüllen können; bezüglich einer

Restverunkrautung aber wohl kaum in der Weise, daß in jedem Fall unmittelbar nach der Behandlung ein tolerierbarer Besatz verbliebe. Allerdings könnte sich dieser Besatz wegen der fehlenden Residualwirkung aus Spätaufläufern rekrutieren, die vom geschlossenen Rübenbestand im Wachstum begrenzt werden. Insofern wäre auch diese Forderung zumindest teilweise realisierbar. Ebenso stünde der Anlage von Ackerschonstreifen zur Nützlingsförderung nichts im Wege.

Neben solchen grundsätzlichen Forderungen für eine umweltgerechte Pflanzenproduktion gibt es im Detail einen Katalog von anerkannten Regeln, die unter dem Sammelbegriff "Gute fachliche Praxis" zusammengefaßt werden. Für den Bereich Pflanzenschutz liegt hierzu eine Übersicht von RESCHKE et al. (1987) vor. Nachfolgend sollen daraus die wichtigsten Regeln im Hinblick auf mögliche Zielkonflikte mit dem Anbau herbizidresistenter Sorten im einzelnen betrachtet werden. Dabei werden sowohl spezifisch herbologische als auch übergeordnete phytomedizinische Gesichtspunkte bei der Bewertung berücksichtigt:

- Einhaltung der Gebrauchsanleitung bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln: realisierbare Grundregel;
- Förderung der Pflanzengesundheit (herbologisch: der Konkurrenzkraft der Kulturpflanze) durch acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen: realisierbar;
- Einhaltung "gesunder" Fruchtfolgen: pflanzenbaulich grundsätzlich realisierbar, aber Zielkonflikte mit übergeordneten ökonomischen Rahmenbedingungen möglich;
- Anbau wenig anfälliger Sorten: Zielkonflikte möglich, wenn Herbizidresistenz und Krankheitsresistenz nicht in einer Sorte vereint sind, wenn Sortenmischungen aus phytopathologischen Gründen bei Getreide angebaut werden sollen und wenn eine standortgerechte Sortenwahl wegen weniger marktbeherrschender Komplementärangebote eingeschränkt ist;
- phytomedizinisch günstige Bodenbearbeitung und Saattechnik: realisierbar;
- phytomedizinisch günstige Bestandesführung (u.a. Düngung und Wachstumsreglereinsatz): realisierbar;
- Bevorzugung nichtchemischer Pflanzenschutzmaßnahmen: grundsätzlich realisierbar, z.B. vorbeugende mechanische

- Unkrautbekämpfung nach Ernte der Vorfrucht;
- Berücksichtigung der wirtschaftlichen Schadensschwelle: realisierbar;
  - Dichteermittlung vor gezielter Bekämpfung: realisierbar;
  - Aufwandmenge so gering wie möglich wählen: realisierbar;
  - Unkräuter nach Möglichkeit im empfindlichen Stadium bekämpfen: grundsätzlich realisierbar, Zielkonflikt besteht aber mit der ökologischen Forderung nach möglichst später Bekämpfung;
  - Teilflächenbehandlungen vornehmen: realisierbar;
  - Punkt- oder Bandbehandlung nutzen: realisierbar;
  - Additive zur Senkung der Aufwandmenge nutzen: realisierbar;
  - mindertoxische, nützlingsschonende, bienenungefährliche Pflanzenschutzmittel ohne Wasserschutzgebietsauflage bevorzugen: realisierbare Grundregel;
  - selektive (herbologisch: spezifische) Pflanzenschutzmittel bevorzugen: Zielkonflikt mit dem Bestreben, breitwirksame Herbizide beim Züchtungsansatz zu verwenden;
  - Tankmischungen grundsätzlich nur mit zugelassenen Einzelkomponenten: realisierbar;
  - Wirkstoffwechsel und -mischungen zur Resistenzprophylaxe: langfristige Realisierbarkeit fraglich, wenn es infolge des Züchtungsansatzes zu einseitigeren Strukturen auf dem Herbizidmarkt kommen sollte.

Die meisten der aufgeführten Regeln lassen sich beim Anbau herbizidresistenter Sorten grundsätzlich in gleicher Weise realisieren wie bisher mit selektiven Herbiziden. Falls Komplementärangebote jedoch marktbeherrschend würden und dadurch langfristig die Anzahl der verfügbaren Wirkstoffe abnehmen sollte, ließen sich einige wichtige Regeln einer guten fachlichen Praxis nicht mehr einhalten.

#### 4.3 Herbologische Auswirkungen

Die chemische Unkrautbekämpfung nimmt eine Schlüsselstellung innerhalb der Anbautechnik von Zuckerrüben ein. Nicht zuletzt wegen dieser herausragenden Bedeutung hat sie in dieser Kultur einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Innovationen müssen sich an diesem

Standard orientieren. Aus dem Anbau herbizidresistenter Zuckerrübensorten könnten sich folgende herbologische Auswirkungen ergeben:

- Das Phytotoxizitätsrisiko würde sich verringern.
- Die Behandlungstermine würden noch flexibler, wobei die Neuerung in der späteren Anwendung läge. Bisher mußten die Behandlungen mit selektiven Wirkstoffen in sehr frühen Stadien erfolgen, da die Wirksamkeit mit zunehmender Unkrautentwicklung nachließ. Der Flexibilisierung sind allerdings Grenzen gesetzt durch den zeitlichen Beginn der Unkrautkonkurrenz, die zunehmende Abschirmung der Unkräuter durch die Rübenblätter und die Einhaltung der Wartezeit.
- Die zeitliche Optimierung der Bekämpfung könnte eine Reduzierung der Zahl der Behandlungen zur Folge haben. Eine Einengung auf nur eine Behandlung (SCHULZ et al., 1990) dürfte allerdings unrealistisch sein. 2 (maximal 3) Behandlungen gegen ein breites Unkrautpektrum aus mono- und dikotylen sowie annuellen und ausdauernden Arten scheinen aber mit Wirkstoffen ohne Residualwirkung erreichbar zu sein (CLAUSEN, 1989; WEVERS und MISONNE, 1989).
- Kurzfristig käme es zu einer Ausweitung der Wirkstoffdiversität mit günstigen Perspektiven für einen gezielten Wirkstoffwechsel.
- Langfristig könnte die Wirkstoffdiversität abnehmen. Dies ist im Hinblick auf das Risiko der Resistenzbildung bei Unkräutern grundsätzlich negativ zu bewerten, da die Möglichkeiten des Wirkstoffwechsels und der Wirkstoffmischungen eingeengt würden. In diesem Zusammenhang sind allerdings die Wirkstoffe differenziert zu bewerten. Hinsichtlich Glufosinat und Glyphosat ist eine Resistenzbildung weniger wahrscheinlich als z.B. bei Sulfonylharnstoffen und Imidazolinonen (LEBARON und MCFARLAND, 1990; HOLT und LEBARON, 1990; SCHULZ et al., 1990). Hinzu kommt, daß im Falle von herbizidresistenten Zuckerrüben aus Fruchtfolgegründen ein Wirkstoffwechsel zwangsläufig erfolgen muß und damit das Risiko der Selektion herbizidresistenter Biotypen rein statistisch ohnehin geringer ist als bei Monokulturen. Es sei denn, bei weiteren Kulturen der Rotation ist gegen dasselbe Herbizid eine Resistenz erzeugt worden.
- Langfristig ist es nicht auszuschließen, daß auch beim Einsatz breitwirksamer Komplementärherbizide Problemunkräuter selektiert

werden können. Richtung und Ausmaß dieser Selektion sind gegenwärtig noch nicht voll zu übersehen. Allein die Tatsache, daß Glufosinat und Glyphosat Wirkungslücken bzw. -schwächen aufweisen, macht Selektionen aber wahrscheinlich. Daß es zur Selektion spezifischer Rübenunkräuter in Fruchtfolgen auch unter Einbeziehung von Getreide kommen kann, wenn die Rübenherbizide Wirkungsschwächen haben und die entsprechenden populationsdynamischen Voraussetzungen gegeben sind, belegt das Beispiel Einjähriges Bingelkraut (HOFSTETTER, 1986).

- Bisher waren selektive Herbizide für Zuckerrüben in der Regel auch in Futterrüben einsetzbar. Dieser Teilmarkt ist zwar relativ gering (1990 55.000 ha gegenüber 410.000 ha Zuckerrüben), aber eine Lückenindikation ist nicht auszuschließen, wenn als Folge von marktbeherrschenden Komplementärangeboten in Zuckerrüben das Angebot an selektiven Rübenherbiziden erheblich abnehme.
- Schosser von Zuckerrüben können gegenwärtig im Streichverfahren mit Glyphosat bekämpft werden. Diese Indikation würde bei Glyphosat-restistenten Sorten wegfallen. Damit würde sich grundsätzlich das Problem der "Unkrautrüben" verschärfen. Dies sind Zuckerrüben, die aus im Boden überlagerten Samen in Zuckerrübenbeständen auflaufen.
- Wirkungsschwächen der bisherigen selektiven Herbizide in Zuckerrüben, z.B. gegen Einjähriges Bingelkraut oder Hundspetersilie, könnten über einen Züchtungsansatz evtl. behoben werden. Ob der Züchtungsansatz darüber hinaus geeignet ist, das Problem der Lückenindikationen generell zu lösen, wie es in den USA für möglich gehalten wird (DUKE et al., 1991), erscheint fraglich, da marginale Märkte in Deutschland absolut erheblich kleiner sind als in den USA.
- Das gegenwärtige herbologische Problem der Mulchsaat ist die chemische Bekämpfung der Altverunkrautung. Es ist nicht erkennbar, daß sich dieses Problem bei Vorliegen einer Resistenz gegen Glyphosat wesentlich vermindern würde, da bei Mitteln mit dem Wirkstoff Glyphosat bereits jetzt diese Indikation (im Vorsaatverfahren) bei der Zulassung vorgesehen ist und Versuche mit Glufosinat im Nachsaatverfahren zeigten, daß auch mit diesem Wirkstoff das Problem der Altverunkrautung nicht befriedigend zu lösen ist (KORTE, 1989).



- Zur Erzielung eines umfassenden Wirkungsspektrums und zur Reduzierung der Aufwandmenge wird die Praxis die derzeit in Rede stehenden Komplementärherbizide vermutlich mit selektiven Herbiziden in Tankmischungen einsetzen und / oder Additive verwenden. Dabei kann ein selektives Herbizid mit Residualwirkung dazu beitragen, daß sich die Zahl der Behandlungen auf 2 verringert. Da hier noch Fragen hinsichtlich Kompatibilität, Stadienempfindlichkeit, Wirkungsspektren etc. abschließend zu klären sind, ist noch mit längerer anwendungsorientierter Entwicklungsarbeit zu rechnen.
- Es ist auch denkbar, daß ein umfassendes Wirkungsspektrum durch die Behandlung mit mehr als einem bisher nichtselektiven Wirkstoff erreicht wird, sofern die entsprechenden Resistenzen in einer Sorte verankert werden können.

Insgesamt ist festzustellen, daß die herbologischen Auswirkungen beim Anbau Glufosinat- bzw. Glyphosat-resistenter Zuckerrübensorten weitgehend zu übersehen sind, da die Innovation kaum qualitativen Charakter hat und da beide Wirkstoffe aus langjährigen anderen Indikationen bekannt sind. Eine grundsätzliche Lösung herbologischer Fragen, insbesondere des Selektionsproblems, ist von dem Ansatz nicht zu erwarten. Hierzu bedarf es einer verstärkten Forschung nach Alternativen zur chemischen Unkrautbekämpfung und der Entwicklung systemarerer Konzepte unter besonderer Berücksichtigung populationsdynamischer Zusammenhänge.

Um die herbologischen Risiken zu begrenzen, die sich aus dem Anbau herbizidresistenter Sorten ergeben könnten, ist die Erfüllung folgender Forderungen wünschenswert:

- Der Züchtungsansatz sollte sich auf eine breite Wirkstoffpalette gründen.
- In den transgenen Sorten sollten selektive Herbizide noch einsetzbar sein, so wie bisher z.B. in Chlortoluron-verträglichen Winterweizensorten sämtliche anderen Weizenherbizide einsetzbar sind.
- Das Angebot an selektiven Herbiziden sollte möglichst in vollem Umfang erhalten bleiben, um den Anbau jeder Sorte an jedem Standort zu gewährleisten und um Tankmischungen zu ermöglichen.
- Im Idealfall sollten die für den Züchtungsansatz vorgesehenen

Wirkstoffe schon aus anderen Indikationen bekannt sein.

#### 4.4 Freisetzung transgener Kulturpflanzen

Durch konventionelle Züchtungskreuzung wird das Genom von Kulturpflanzen seit über tausend Jahren verändert und optimiert. In diesem Zeitraum traten keine über das akzeptierbare Maß hinausgehenden unerwarteten Effekte auf. Gentechnische Manipulationen unterscheiden sich von züchterischen Genomveränderungen, indem sie Artengrenzen überschreiten. Gleichzeitig ist der übertragene Genabschnitt - im Gegensatz zur Kreuzung - genau bekannt und charakterisiert, was die Vorhersage möglicher unerwünschter Eigenschaften des Organismus erleichtert.

Mögliche Risiken des Anbaus gentechnisch erzeugter herbizidresistenter Pflanzen sind in folgenden Bereichen denkbar:

1. Durch die eingeführten Gene und durch den Gewebekulturzyklus verursachte phänotypische Veränderungen,
2. Stabilität der eingeführten Herbizidresistenz,
3. Verwilderung der Kulturpflanze,
4. Übertragung der Resistenz auf Wildpflanzen und Bakterien.

##### - Phänotypische Veränderungen

Durch die Einführung neuer Gene findet ein Eingriff in den Stoffwechsel einer Pflanze statt, der einerseits eine direkte Wirkung des Genprodukts, andererseits aber auch sekundäre Effekte zur Folge haben kann. Darin unterscheiden sich gentechnisch veränderte Pflanzen nicht grundsätzlich von züchterischen Produkten, bei denen hin und wieder unerwünschte Eigenschaften auftreten (HAUPTLI et al., 1985). Durch die Einführung einer Herbizidresistenz bedingte mögliche Biomasse- und Ertragsreduktionen werden während der Sortenzulassung getestet. Auch die Analyse auf mögliche human-toxische Inhaltsstoffe sollte im Zulassungsverfahren erfolgen. Weitere Unwägbarkeiten transgener herbizidresistenter Pflanzen könnten sich aus der Produktion und Ausscheidung von Inhaltsstoffen ergeben, die für bestimmte Pflanzen, Tiere oder Mikroorganis-

men schädlich sind und die so zu Verschiebungen im Agrarökosystem führen könnten. Neben ökologischen Vorlaufforschungen sollte daher auch während und nach der Freisetzung ein Monitoring stattfinden, um Verhalten und Wechselwirkungen der Pflanzen im Ökosystem zu verfolgen.

- Stabilität der eingeführten Herbizidresistenz

Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung eines komplementären Herbizids in einer Kultur ist deren fortdauernde Resistenz. Daraus ergibt sich das Problem, Resistenzgene einzuführen, die über viele Generationen und während verschiedener Stadien des Pflanzenwachstums stabil exprimiert werden. Das Beispiel der gentechnisch veränderten Petunien, die ein Farbstoffsynthese-Gen aus Mais erhalten hatten, macht deutlich, daß bei einigen transgenen Pflanzen sowohl während des Lebenszyklus der Pflanze als auch in den Nachkommen die Aktivität des eingeführten Gens verlorengehen kann (LINN et al., 1990). Molekulare Ereignisse wie etwa DNA-Methylierung können für solche Aktivitätsverluste verantwortlich sein. Im Fall von gentechnisch erzeugter Herbizidresistenz können zeitweise Aktivitätsverluste des Resistenzgens ein Risiko für die Landwirtschaft darstellen. Über mehrere Generationen sich erstreckende Feldtests unter variierenden Umweltbedingungen sind daher nötig, bevor eine herbizidresistente Pflanze auf den Markt kommen kann.

- Verwilderung der Kulturpflanze

Aus Erfahrungen mit der Einführung fremder Tier- und Pflanzenarten in neue Habitats weiß man, daß ungenügende Kenntnis über die biologischen Eigenschaften eines Organismus zu weitreichenden negativen Konsequenzen für die Umwelt führen kann (WILLIAMS, 1980). Gentechnisch veränderte Pflanzen in der landwirtschaftlichen Produktion werden dagegen nur dort eingesetzt werden, wo auch ihre Elternorganismen bereits ohne Probleme zur Anwendung kommen. Dennoch wäre es denkbar, daß sich die neue, gentechnisch erzeugte Pflanzensorte durch erhöhte Persistenz und Unkrauteigenschaften auszeichnet. Unkrautpflanzen besitzen eine Reihe charakteristi-

scher Eigenschaften, die teilweise auch Eigenschaften von Kulturpflanzen sind (KEELER, 1989). Daß durch die Einführung eines einzelnen, beispielsweise für Herbizidresistenz codierenden Gens aus einer Nutzpflanze ein Problemunkraut wird, ist in der Regel äußerst unwahrscheinlich, weil eine Vielzahl von Voraussetzungen erfüllt sein muß (KEELER, 1989), ist aber im Einzelfall durch Analyse der unkrautrelevanten Merkmale und durch evolutionäre Betrachtungen zu prüfen und zu bewerten. Experimentelle Daten zum Einfluß gentechnischer Modifikationen auf Ausbreitungs- und Persistenzeigenschaften sollen durch das zur Zeit in Großbritannien durchgeführte PROSAMO-Projekt (Planned Release of Selected and Modified Organisms) geliefert werden.

Molekulare Daten darüber, wodurch sich eine Wildpflanze und die daraus entwickelte Kulturpflanze unterscheiden, liegen in detaillierter Form für Teosinte und Mais vor (DOEBLEY, 1990). Obwohl die beiden Pflanzen in ihrem Habitus deutlich verschieden sind, sind sie genetisch so nah verwandt, daß eine Kreuzung zu fertilen Nachkommen führt. Nur wenige der Gene, die mit morphologischen Unterschieden assoziiert werden konnten, reichen hier aus, um bei zwischenartlicher Übertragung dramatische phänotypische Veränderungen zu bewirken. Selbst in diesem Fall einer relativ schnellen Evolution müßten jedoch neben den Genen, die den auffallendsten Effekt auf die Morphologie der Pflanzen haben, noch viele zusätzliche Gene verändert werden, um aus Mais wieder Teosinte mit seinen Unkrauteigenschaften entstehen zu lassen.

Die Einführung einer Herbizidresistenz ist insofern ein Sonderfall, als der in Fruchtfolgen auftretende Aufwuchs einer herbizidresistenten Sorte mit dem entsprechenden Herbizid nicht zu bekämpfen ist. Dies gilt aber ebenso für Resistenzen, die durch konventionelle Züchtung erreicht wurden, und könnte durch sorgfältige Planung des Einsatzes von Sorten und Herbiziden kontrolliert werden. Es soll in diesem Zusammenhang noch auf das mögliche gleichzeitige Vorkommen von Resistenzen gegen mehrere Wirkstoffe hingewiesen werden. Dieser Fall könnte eintreten, wenn 2 Sorten einer Kulturpflanzenart mit unterschiedlichen Herbizidresistenzen in benachbarten Arealen angebaut werden und zur Kreuzung kommen. Bei Zuckerrüben ist dies praktisch ausgeschlossen, da die Pflanzen

üblicherweise nicht zur Blüte kommen. Eine Ausnahme bilden hier lediglich die vorzeitig blühenden Schosser. Die erschwerte Bekämpfung unerwünschter Pflanzen mit multipler Herbizidresistenz wäre in diesem Fall das eigentliche Problem.

- Übertragung der Resistenz auf Wildpflanzen und Bakterien

Eine unerwünschte Ausbreitung gentechnisch eingeführter Eigenschaften auf Wildpflanzen oder Bakterien ist im wesentlichen auf zwei Wegen möglich: 1. durch Kreuzung mit verwandten Wildpflanzen, 2. durch Agrobakterien, die zur gentechnischen Manipulation verwendet wurden und die möglicherweise in der transgenen Pflanze resident sind.

Wichtigste Voraussetzung für die Bildung von Hybriden zwischen Wild- und Kulturpflanze ist das gemeinsame Vorkommen im gleichen Habitat. Daraus folgt, daß etwa beim Mais, der keine Wildverwandten in Europa hat, ein wesentlich geringeres Ausbreitungsrisiko für Gene besteht als bei Raps (*Brassica napus*), dessen *Brassica*-Verwandten in Deutschland als Unkraut auftreten (HANF, 1984). Weitere Faktoren, die bei der erfolgreichen Kreuzung zwischen verwandten Pflanzenarten eine Rolle spielen, sind das Ploidie-Niveau, der Blühzeitpunkt sowie die genetische Kompatibilität. Sind alle diese Hürden genommen, muß ein Gen, um permanent in die Wildpflanze eingekreuzt zu werden, durch Introgression über mehrere Generationen wiederholt in den genetischen Hintergrund der Wildpflanze gelangen (ANDERSON, 1949). Nur solche Gene können sich via Introgression in Wildpflanzen-Populationen behaupten, die die Fitness nicht reduzieren. Unter natürlichen Bedingungen (Wildhabitat) führen Kulturpflanzen-Eigenschaften in der Regel zu einer Verminderung der Fitness von Hybriden. Im Falle von Herbizidresistenzgenen ist ein selektiver Vorteil immer dann gegeben, wenn das entsprechende Herbizid kontinuierlich zur Anwendung kommt (GRESSEL, 1984).

Soll eine herbizidresistente, wenig domestizierte Kulturpflanze in einer geographischen Region, in der kreuzbare Wildpflanzen vorkommen, freigesetzt werden, müssen Isolationsmaßnahmen getroffen wer-

den. Eine Option ist die räumliche Isolierung. Dieser sollten maximale Pollenflug-Distanzen zugrundeliegen, die für die meisten Kulturpflanzen näherungsweise bekannt sind (LEVIN und KERSTER, 1974, GEORGE, 1985). In einzelnen Fällen können bestimmte Anbau-Praktiken, wie etwa die Wahl des Saatzeitpunkts, Auskreuzungen verhindern. Durch männlich sterile Genotypen oder die gentechnische Einführung von Pollen-Letalität sind Kultur- und Wildpflanze ebenfalls reproduktiv isolierbar.

Die Agrobakterien-Transformation zeichnet sich dadurch aus, daß der T-DNA-Anteil des Vektor-Plasmids stabil ins Pflanzen-Genom integriert wird. Die zur Transformation verwendeten Agrobakterien werden durch ein im Regenerationsmedium enthaltenes Antibiotikum abgetötet. Sollte dies nicht vollständig gelingen, so besteht das Risiko, daß die Agrobakterien in der Pflanze resident bleiben. Ein Transport von *Agrobacterium tumefaciens* innerhalb des Leitbahnsystems wurde für in der Natur vorkommende Agrobakterien-Infektionen wiederholt gezeigt (LEHOCZKY, 1971). Aus transgenen Pflanzen konnten die zur Transformation eingesetzten Agrobakterien noch mehrere Monate nach der Transformation isoliert werden (VAN DER HOEVEN et al., 1991). Daß die Bakterien auch auf die aus Samen gezogenen Nachkommen übertragen werden, wurde bisher nicht gefunden. Auch wenn es sich bei den zur Transformation verwendeten Bakterien nicht um tumor erzeugende Stämme handelt, bliebe die Möglichkeit des Transfers des Herbizidresistenzgens auf andere Bodenbakterien (horizontaler Gentransfer). Bei gleichzeitigem Selektionsdruck durch einen Herbizidwirkstoff in hoher Konzentration, der auch das Wachstum von Bakterien beeinflussen kann (wie etwa Glufosinat, BARTSCH und TEBBE, 1989) könnte sich das Resistenzgen nach einem Transfer in einzelnen Bakterienpopulationen etablieren. Veränderungen der Zusammensetzung der Bodenmikroflora könnten die Folge sein. In diesem Zusammenhang sollte allerdings bedacht werden, daß Herbizidresistenzgene häufig aus Mikroorganismen des Bodens stammen (u.a. STALKER et al., 1988) und der Transfer dieser Gene auf andere Bodenbakterien dann ohnehin in der Natur stattfinden kann.

#### 4.5 Auswirkungen auf Teile des Naturhaushalts

In der Vergangenheit hat sich gezeigt, daß die verbreitete und großflächige Anwendung eines Herbizids zu unerwünschten Auswirkungen führen kann. Ein besonders charakteristisches Beispiel dafür war die Anwendung Atrazin-haltiger Herbizide in Mais: Restverunkrautung mit wenigen, schwerbekämpfbaren Unkräutern; Selektion resistenter Unkrautpopulationen; Einschränkungen des Nachbaus von Folgekulturen; Kontamination des Oberflächen- und Grundwassers. Wegen wiederholter Überschreitung des Grenzwerts der Trinkwasser-Verordnung (ANONYM 1990c) wurde im März 1991 die Anwendung Atrazin-haltiger Herbizide in Deutschland verboten (ANONYM 1988/91). Grundsätzlich sind ähnliche Auswirkungen bei einseitiger Verwendung eines jeden Wirkstoffs nicht auszuschließen. Es sollte daher vorsorglich bedacht werden, daß bei häufigem Einsatz weniger Komplementärherbizide in womöglich mehreren transgenen Kulturen ähnliche Risiken entstehen können.

Ein weiterer Aspekt bei häufigerer Anwendung von chemischen Unkrautbekämpfungsmitteln ist die Kontamination der Luft. Nach der Applikation von Pflanzenschutzmitteln kann ein Teil der Wirkstoffe durch Verdunstung in die Atmosphäre gelangen. Dort liegen sie gasförmig oder partikelgebunden vor. Untersuchungen des Niederschlagswassers belegen, daß sie mit diesem wieder auf die Erdoberfläche zurückgeführt werden können (OBERWALDER et al. 1991, SIEBERS et al. 1991). Auf Grund der sehr geringen Konzentration in der Luft sowie im Niederschlagswasser erscheinen derzeit negative Auswirkungen auf Organismen aber unwahrscheinlich. Selbst im Hinblick auf eine vermehrte Anwendung von einigen wenigen Herbizidwirkstoffen, d. h. von größeren Mengen ein und desselben Wirkstoffs auf einer erweiterten Anwendungsfläche, ist sogar bei Vorliegen von weniger günstigen physikalisch-chemischen Eigenschaften nach derzeitigem Kenntnisstand davon auszugehen, daß diese Herbizidwirkstoffe mit ihrer relativ geringen Toxizität zu keinen negativen Auswirkungen auf den Naturhaushalt führen.

In Anbetracht des bereits erreichten hohen Wirkungsgrades der chemischen Unkrautbekämpfung im Rübenbau kann von der Möglichkeit des Anbaus herbizidresistenter Sorten in Verbindung mit breitwirksamen

Herbiziden keine weitere Verschlechterung für die Unkrautflora erwartet werden. Zusätzliche oder neue negative Auswirkungen auf die Unkrautflora und indirekte Wirkungen auf die von ihr abhängige Ackerfauna sind nicht erkennbar. Die Entwicklung der Herbizidresistenz bei Kulturpflanzen scheint gegenwärtig dahin zu gehen, daß die hierfür geeigneten Herbizidwirkstoffe auf Grund der guten Selektivität und der damit verlängerten Anwendungsspanne vorzugsweise zu späteren Anwendungsterminen appliziert werden. Das würde möglichem Bodenabtrag und Stoffaustrag entgegenwirken.

## 5. GESAMTBEWERTUNG

Aus der Tatsache, daß Herbizidresistenz heute technisch realisierbar ist, sollte nicht voreilig der Schluß gezogen werden, daß sie sich durchsetzt (DUKE et al. 1991). Es ist vielmehr auch denkbar, daß die traditionelle Herbizidforschung mit unveränderter Zielsetzung fortgeführt wird, um dann in Einzelfällen über den jetzt möglichen Züchtungsansatz das Kulturpflanzenpektrum eines Wirkstoffs zu erweitern.

Insgesamt gesehen deutet sich somit mit dem Züchtungsansatz allenfalls eine graduelle Veränderung der Herbizidforschung an, aber keine prinzipielle. Ob andere Forschungsansätze, an denen auch intensiv gearbeitet wird, die Herbizidforschung nachhaltig beeinflussen werden, läßt sich noch nicht beurteilen. Genannt seien in diesem Zusammenhang die Arbeiten mit Mykoherbiziden (TEMPLETON et al. 1986) und "natürlichen" Herbiziden aus Pflanzen (u.a. RETH und HURLE, 1986; TOWERS und ARNASON, 1988).

Die Züchtung auf Herbizidresistenz eröffnet allerdings neue Perspektiven für die chemische Unkrautbekämpfung. Die bisherigen Bewertungen im Vorfeld der Einführung reichen von positiver Erwartungshaltung bis zu völliger Ablehnung. An deren Stelle sollten mehr kritische und sachbezogene Auseinandersetzungen mit den Nutzen und Risiken der sich bietenden neuen Möglichkeiten treten. Generalisierungen sind nicht möglich, sondern Bewertungen haben vielmehr immer am Einzelfall anzusetzen. In der Literatur und in den Zulassungsgremien wird darüber hinaus überwiegend die Auffas-



sung vertreten, daß im Zentrum der Bewertung das Produkt stehen sollte und nicht die Methode seiner Herstellung, das heißt, beurteilt wird die Herbizidresistenz als solche und nicht der züchterische Weg der Erzeugung dieses Merkmals.

Wie bei jeder Neuerung kommt es auch bei der Herbizidresistenz entscheidend darauf an, wie der Mensch mit dieser neuen Möglichkeit umgeht. Dies sei am Beispiel des Maisanbaus verdeutlicht, der seinen Siegeszug nicht zuletzt der Verfügbarkeit eines kostengünstigen, breit wirksamen und sehr verträglichen Herbizidwirkstoffs verdankt. Die Verantwortung für die eingetretenen Umweltprobleme infolge einseitigen Maisanbaus (Bodenerosion, Nitrat- und Atrazinbelastung des Grundwassers) "trägt (aber) nicht der Mais, sondern allein der Mensch, der mit dieser Pflanze in Unkenntnis der standortspezifischen Erfordernisse nicht sachgerecht umgeht" (KEES und LUTZ, 1991).

Bei der Herbizidresistenz werden Risiken vor allen Dingen darin gesehen, daß wenige Wirkstoffe häufig und in erheblichem Umfang eingesetzt werden können. Im konkreten Fall der Herbizidresistenz in Zuckerrüben sind diese Risiken minimal, da der Anwendungsumfang räumlich und zeitlich begrenzt ist. Die Zuckerrübenfläche und die innerbetriebliche Fruchtfolge werden stärker von übergeordneten Determinanten bestimmt als von veränderten Möglichkeiten der chemischen Unkrautbekämpfung, selbst wenn diese einen Preisvorteil bieten sollten. Für den Fall aber, daß für Glufosinat und / oder Glyphosat weitere Anwendungsgebiete erschlossen würden (z.B. Mais und Kartoffeln), erhielte der quantitative Aspekt mehr Gewicht. Ob daraus Risiken erwachsen, hängt vom tatsächlichen Anwendungsumfang ab, das heißt von der Akzeptanz durch die Praxis. Mit einem Nachzulassungsmonitoring könnte die Entwicklung durch die Zulassungsbehörden beobachtet werden. Darüber hinaus muß es aber auch im Interesse der Anbieter liegen, nachteiligen Entwicklungen, z.B. Resistenzbildungen bei Unkräutern, durch ein gesteuertes Angebot vorzubeugen.

Grundsätzlich kann aber das langfristige Risiko einer Einengung des Angebots auf wenige herbizide Wirkstoffe und evtl. auch wenige Sorten einer Kulturart nicht ausgeschlossen werden, da für den

Züchtungsansatz "gute" Herbizide und Sorten Präferenz haben werden. Dies zeigt sich bereits jetzt daran, daß der Wirkstoff Glyphosat, der weltweit zu den umsatzstärksten zählt, im Zusammenhang mit diesem Züchtungsansatz mit am häufigsten genannt wird. Damit wächst die Abhängigkeit der Landwirtschaft von wenigen externen Betriebsmitteln.

Daraus leitet sich die Forderung ab, das Suchen nach neuen herbiziden Wirkstoffen, sowohl selektiven als auch nichtselektiven, gerade wegen der Möglichkeiten der Resistenzzüchtung, nicht zu vernachlässigen, um eine sich ständig erneuernde breite Wirkstoffpalette zu behalten, die auch als Ausgangsbasis für die Resistenzzüchtung genutzt werden kann. Insofern ist das Screening - neben der Suche nach Alternativen zur chemischen Unkrautbekämpfung - wichtiger als die Erzeugung von Herbizidresistenz. Ob es im Endeffekt zweckmäßiger ist, ein Screening nur auf Wirksamkeit mit anschließender Resistenzzüchtung zu betreiben oder weiterhin auf Wirksamkeit und Verträglichkeit simultan zu screenen (mit der zusätzlichen Option der Resistenzzüchtung), kann nur anbieterindividuell beurteilt und entschieden werden.

Die Zulassungshörden haben Komplementärangebote auf der Grundlage der geltenden gesetzlichen Bestimmungen zu prüfen und unter Abwägung von Risiken und Nutzen nach dem jeweiligen Stande der wissenschaftlichen Erkenntnis über Zulassungsanträge zu entscheiden. Um Risiken zu minimieren, haben sie die Möglichkeit, die Zulassung mit Auflagen zu versehen. Im Herbizidbereich würden dabei grundsätzlich die gleichen Kriterien angewandt wie bei herkömmlichen Indikationen mit selektiven Herbiziden. Beim Komplementärangebot dürfte der wesentliche Unterschied in der höheren Verträglichkeit liegen.

Grundforderungen, die sich für die Zulassung gentechnisch erzeugter herbizidresistenter Pflanzen nach dem Gentechnikgesetz ergeben, sind Genstabilität, eine ausreichende schrittweise Erprobung in Klimakammer- und Freisetzungsexperimenten (step-by-step) und der Ausschluß eines Toxizitätsrisikos durch neue Metabolite. Die Zulassungsbehörde kann im Genehmigungsbescheid besondere Bedingun-

gen für die Anwendung sowie Maßnahmen zur Kontrolle des weiteren Verhaltens der herbizidresistenten Pflanzen festlegen.

Der Züchtungsansatz verstetigt im Prinzip die chemische Unkrautbekämpfung, wenngleich gesehen werden muß, daß durch diesen Ansatz nichtchemische Verfahren im Rahmen des Möglichen keineswegs ausgeschlossen werden. Dennoch ist zu fragen, inwieweit die neue Technik mit den aktuellen politischen Forderungen nach einer Minimierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln zu vereinbaren ist. Diese Frage läßt sich nicht pauschal für sämtliche Kulturen beantworten. Für den Rübenbau ist festzustellen, daß in dieser Kultur aus ökonomischen Gründen derzeit auf den Herbizideinsatz nicht verzichtet werden kann (WINNER, 1991). Eine Begrenzung auf das produktionstechnische Minimum ist in Form der Bandbehandlung auch in Zukunft möglich.

Auch in anderen Kulturen ist ein völliger Ersatz der Herbizide durch nichtchemische Verfahren unter den gegenwärtigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nur in sehr geringem Maße möglich. Dies schließt nicht aus, daß sektoral weitere Minimierungen durch konsequente Einhaltung der Regeln der guten fachlichen Praxis erwartet werden können. Ob darüber hinaus mögliche Alternativen zur chemischen Unkrautbekämpfung größere Bedeutung erlangen werden, hängt nicht zuletzt von der Intensität ab, mit der diese erforscht werden.

## 6. LITERATUR

- AMMON, H. U., und P. ENGELI, 1976: Integrierter Einsatz verschiedener Bekämpfungsmöglichkeiten gegen Unkräuter im Mais. Mitt. Schweizer. Landwirtschaft 24, 22-24.
- AMMON, H. U., R. GROB, und E. IRLA, 1976: Die Hirsearten, bisherige Bekämpfungsmöglichkeiten und Versuche mit neuen Hackgeräten. Mitt. Schweizer. Landwirtschaft 24, 1-21.
- ANDERSON, E., 1949: Introgressive Hybridization. Wiley, New York.
- ANONYM, 1986: Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz - PflSchG) vom 15. September 1986. Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 1505-1518.
- ANONYM 1988: Verordnung über Anwendungsverbote für Pflanzenschutzmittel (Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung) vom 27. Juli

1988 (geändert 22. März 1991). Bundesgesetzblatt, Teil I, 1196-1202 (796-798).

- ANONYM, 1990a: Richtlinie des Rates vom 23. April 1990 über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt (90/220/EWG). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 117/15-27.
- ANONYM, 1990b: Gesetz zur Regelung von Fragen der Gentechnik (GenTG), Bundesgesetzblatt Teil I, S. 1080-1095.
- ANONYM, 1990c: Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung - TrinkwV) vom 5. Dezember 1990. Bundesgesetzblatt, Teil I, 2612-2629.
- ANONYM, 1991: Richtlinie des Rates vom 15. Juli 1991 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (91/414/EWG). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 34, L 230/1-32.
- BARTSCH, K., and C. TEBBE, 1989: Initial steps in the degradation of phosphinotricin (glufosinate) by soil bacteria. Appl. Environ. Microbiol. 55, 711-716.
- BASF, 1989: Pflanzenschutzmittel, Blatt- und Spurennährstoff-Dünger '90. Ludwigshafen.
- CHEUNG, A.Y., L. BOGORAD, M. VAN MONTAGU, and J. SCHELL, 1988: Relocating a gene for herbicide tolerance: a chloroplast gene is converted into a nuclear gene. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 85, 391-395.
- CLAUSEN, I.B., 1989: Breeding for herbicide resistance - seed company considerations. Proc. Brit. Crop Protect. Conf.-Weeds, 279-284.
- COMAI, L., D. FACCIOTTI, W.R. HIATT, G. THOMPSON, R.E. ROSE, and D.M. STALKER, 1985: Expression in plants of a mutant *aroA* gene from *Salmonella typhimurium* confers tolerance to glyphosate. Nature 317, 741-744.
- DE BLOCK, M., J. BOTTERMAN, M. VANDEWIELE, J. DOCKX, C. THOEN, V. GOSSELE, N. RAO MOVVA, C. THOMPSON, M. VAN MONTAGU, and J. LEEMANS, 1987: Engineering herbicide resistance in plants by expression of a detoxifying enzyme. EMBO J. 6, 2513-2518.
- DEGENNARO, F.P., and S.C. WELLER, 1984: Differential susceptibility of field bindweed (*Convolvulus arvensis*) biotypes to glyphosate. Weed Sci. 32, 472-476.
- DIERCKS, R., 1986: Alternativen im Landbau. 2. Auflage. E. Ulmer, Stuttgart.
- DIEZ, Th., 1990: Erosionsschäden vermeiden. Bonn: Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AID), Nr. 1108, 32 S.
- DOEBLEY, J., A. STEC, J. WENDEL, and M. EDWARDS, 1990: Genetic and morphological analysis of a maize-teosinte F<sub>2</sub> population: Im-

- plications for the origin of maize. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 87, 9888-9892.
- DONN, G., E. TISCHER, J.A. SMITH, and H.M. GOODMAN, 1984: Herbicide-resistant alfalfa cells: an example of gene amplification in plants. J. Mol. Appl. Genet. 2, 621-635.
- DONN, G., M. NILGES, and S. MOROCZ, 1990: Stable transformation of maize with a chimaeric modified PAT-gene from *Streptomyces viridochromogenes*; Abstract VIIth International Congress on Plant Tissue and Cell Culture.
- DUKE, S.O., A.L. CHRISTY, F.D. HESS, and J.S. HOLT, 1991: Herbicide-resistant crops. Comments from CAST Nr. 1991-1.
- ECKES, P., S. ROSAHL, J. SCHELL, and L. WILLMITZER, 1986: Isolation and characterization of a light inducible, organ-specific gene from potato and analysis of its expression after tagging and transfer into tobacco and potato shoots. Mol. Gen. Genet. 205, 14-22.
- EGGERS, Th., 1984a: Wandel der Unkrautvegetation der Äcker. Schweiz. Landw. Fo. 23, 47-61.
- EGGERS, Th., 1984b: Some remarks on endangered weed species in Germany. COLUMA/EWRS 7th International Symposium on Weed Biology, Ecology and Systematics, Paris, 395-402.
- FEYERABEND, G., und G. KUNKEL, 1983: Unkrautbekämpfung in Futterkulturen. Nachrichtenbl. Pflanzenschutz DDR 37, 102-104.
- FORCELLA, F., 1987: Herbicide-resistant crops: yield penalties and weed thresholds for oilseed rape (*Brassica napus* L.). Weed Res. 27, 31-34.
- GALUN, E., and D. AVIV, 1983: Cytoplasmic hybridization: genetic and breeding applications. In: D.A. EVANDS, W.R. SHARP, P.V. AMMIRATO, Y. YAMADA (eds.) Handbook of Plant Cell Culture, Vol 1: Techniques for Propagation and Breeding. MacMillan, New York. 358-392.
- GEORGE, R.A.T., 1985: Vegetable Seed Production. Longman, New York.
- GORDON-KAMM, W.J. et al., 1990: Transformation of maize cells and regeneration of fertile transgenic plants. Plant Cell 2, 603-618.
- GRESSEL, J., 1984: Evolution of herbicide-resistant weeds. In: Origins and Development of Adaptation. Pitman Books, London (Ciba Foundation Symposium) 73-93.
- HAAS, H., 1982: Ökologiske aspekter ved kemisk ukrudtsbekæmpelse. In: HAARLÖV, N. (Hrsg.): Miljøforvaltning. København: DSR-forlag, 279-325.
- HABER, W., 1990: Ökologische Aspekte der Pflanzenproduktion: Intensivwirtschaft. In: G. HAUG, G. SCHUHMANN und G. FISCHBECK: Pflanzenproduktion im Wandel. VCH, Weinheim, 481-498.

- HANF, M., 1984: Ackerunkräuter Europas mit ihren Keimlingen und Samen. BLV Verlagsgesellschaft, München.
- HAUPTLI, H., N. NEWELL, and R.M. GOODMAN, 1985: Genetically engineered plants: environmental issues. *Bio/Technology* 3, 437-442.
- HEIDLER, G., 1992: Sulfonylharnstoffe, eine bedeutende Herbizid-Wirkstoffgruppe. *Pflanzenschutz-Praxis* (im Druck).
- HEITEFUSS, R., 1987: Pflanzenschutz - Grundlagen der praktischen Phytomedizin. 2. Auflage. G. Thieme, Stuttgart.
- HELMER, G., 1986: Genetic engineering of atrazine tolerance in plants. Presented at: Intl. Symp. Pest. Biotechnol., Michigan State Univ., Aug. 17-19.
- HERBICIDE HANDBOOK, 1989, Sixth Ed., Weed Science Society of America, Champaign.
- HEYDEMANN, B., 1983: Die Beurteilung von Zielkonflikten zwischen Landwirtschaft, Landschaftspflege und Naturschutz aus der Sicht der Landespflege und des Naturschutzes. Schriftenreihe für ländliche Sozialfragen, Heft 88, 51-78.
- HILDEBRANDT, A., und M. HILLE, 1988: Wie oft und wieviel wird im Ackerbau gespritzt? *Gesunde Pflanzen* 40, 429-433.
- HOECHST, 1991: Pflanzenschutzmittel und Spezialdünger 1991/92. Hattersheim am Main.
- HOFSTETTER, W., 1986: Untersuchungen zur Schadwirkung und zur Populationsdynamik von Einjährigem Bingelkraut (*Mercurialis annua*). Diss. Univ. Gießen.
- HOLLIDAY, R. J., PUTWAIN, P. D., DAFNI, A., 1976: The evolution of herbicide resistance in weeds and its implications for the farmer. *British Crop Protection Conference - Weeds*, 937-946.
- HOLT, J.S., and H.M. LEBARON, 1990: Significance and distribution of herbicide resistance. *Weed Technol.* 4, 141-149.
- HOLZNER, W., 1973: Forschungsergebnisse der modernen Ökologie in ihrer Bedeutung für Biologie und Bekämpfung der Unkräuter. *Bodenkultur* (Wien) 24, 61-74.
- KEELER, K.H., 1989: Can genetically engineered crops become weeds? *Bio/Technology* 7, 1134-1139.
- KEES, H. und A. LUTZ, 1991: Was Sie statt Atrazin einsetzen können. *Pflanzenschutz-Praxis* (2), 18-21.
- KISHORE, G.M., and D.M. SHAH, 1988: Amino acid inhibitors as herbicides. *Ann. Rev. Biochem.* 57, 627-663.
- KLEIN, T.M., E.D. WOLF, R. WU, and J.C. SANFORD, 1987: High-velocity microprojectiles for delivering nucleic acids into living cells. *Nature* 327, 70-73.

- KOCH, W., und H. WALTER, 1985: Die Unkrautbekämpfung im integrierten Pflanzenschutz in den Tropen. Giessener Beiträge zur Entwicklungsforschung, Reihe I, 12, 103-124.
- KORTE, K., 1989: Auswirkungen der konservierenden Bodenbearbeitung auf Unkrautentwicklung und Unkrautbekämpfung sowie den Ertrag bei Zuckerrübe und Mais. Diss. Univ. Göttingen.
- LARKIN, P.J., and W.R. SCOWCROFT, 1981: Somaclonal variation - a novel source of variability from cell cultures for plant improvement. Theor. Appl. Genet. 60, 197-214.
- LEBARON, H.M., and J. GRESSEL (Eds.), 1982: Herbicide Resistance in Plants. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- LEBARON, H.M., and J. MCFARLAND, 1990: Herbicide resistance in weeds and crops. Amer. Chem. Soc. Symp. Ser. 421, 336-352.
- LEE, K.Y., J. TOWNSEND, J. TEPPERMAN, M. BLACK, C.-F. CHUI, B. MAZUR, P. DUNSMUIR, and J. BEDBROOK, 1988: The molecular basis of sulfonylurea herbicide resistance in higher plants. EMBO J. 7, 1241-1248.
- LEHOCZKY, J., 1971: Further evidences concerning the systemic spreading of *Agrobacterium tumefaciens* in the vascular system of grapevines. Vitis 10, 215-221.
- LEVIN, D.A., and H.W. KERSTER, 1974: Gene flow in seed plants. Evol. Biol. 7, 139-220.
- LINN, F., I. HEIDMANN, H. SAEDLER, and P. MEYER, 1990: Epigenetic changes in the expression of the maize A1 gene in *Petunia hybrida*: Role of numbers of integrated gene copies and state of methylation. Mol. Gen. Genet. 222, 329-336.
- LUNDIN, P., 1989: Is breeding for pesticide resistance worth while? Proc. 30th Swed. Crop Protect. Conf., 1-6.
- MÄRLÄNDER, B., 1991: Zur Organisation der Beratung für den Zuckerrübenanbau in Deutschland. Feldwirtschaft 32, 398-399.
- MARSHALL, G., 1987: Implications of herbicide-tolerant cultivars and herbicide-resistant weeds for weed control management. Proc. Brit. Crop Protect. Conf.-Weeds, 489-498.
- MAZUR, B.J., and S.C. FALCO, 1989: The development of herbicide resistant crops. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 40, 441-470.
- MEISEL, K., 1985: Gefährdete Ackerwildkräuter - historisch gesehen. - Natur und Landschaft 60. 1985, 62-66.
- MEYER, P., I. HEIDMANN, H. MEYER zu ALTENSCHILDESCHE und H. SAEDLER, 1991: Stabilität der Genexpression in transgenen Petunien. BioEngineering 4, 18-22.

- MOZER, T.J., D.C. TIEMEIER, and E.G. JAWORSKI, 1983: Purification and characterization of corn glutathione-S-transferase. *Biochem.* 22, 1068.
- NIEMANN, P., 1989: Herbizidresistenz als Zuchtziel - Anmerkungen zu Nutzen, Risiken und Perspektiven. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. (Braunschweig)* 41, 36-44.
- OBERWALDER, Ch., H. GIESSL, L. IRION, J. KIRCHHOFF und K. HURLE, 1991: Pflanzenschutzmittel im Niederschlagswasser. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 43, 185-191.
- ODELL, J.T., F. NAGY, and N.-H. CHUA, 1985: Identification of sequences required for activity of the cauliflower mosaic virus 35S promotor. *Nature* 313, 810-812.
- PADGETTE, S.R., G. DELLA-CIOPPA, D.M. SHAH, R.T. FRALEY, and G.M. KISHORE, 1988: Selective herbicide resistance through protein engineering. In: *Cell Culture and Somatic Cell Genetics of Plants*, eds. J. SCHELL, I. VASIL, Vol. 6. New York: Academic.
- POTRYKUS, I., R.D. SHILLITO, M.W. SAUL, and J. PASZKOWSKI, 1985: Direct gene transfer. State of the art and future potential. *Plant Mol. Biol. Rep.* 3, 117-128.
- POTTS, R., 1986: The partridge - pesticides, predation and conservation. London: Collins, 274 S.
- PUTWAIN, P.D., and H.A. COLLIN, 1989: Mechanisms involved in the evolution of herbicide resistance in weeds. In: DODGE, A.D. (Ed.): *Herbicides and Plant Metabolism*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, 211-238.
- RESCHKE, M., H. BÖTGER und F.O. RIPKE, 1987: "Gute fachliche Praxis" im Pflanzenschutz. *Gesunde Pflanzen* 39, 497-509.
- RETH, M., und K. HURLE, 1986: Phytotoxische Wirkungen von Extrakten aus Samen verschiedener Unkrautarten. *Mededel. Rijksfac. Landbouwwetenschap. Gent* 51/2a, 333-343.
- RUPPERT, W., und W. HÖSEL, 1987: Die Entwicklung der chemischen Pflanzenschutzkosten in Bayern von 1976/77 bis 1985/86. *Gesunde Pflanzen* 39, 430-442.
- SCHULZ, A., F. WENGENMAYER, and H.M. GOODMAN, 1990: Genetic engineering of herbicide resistance in higher plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 9, 1-15.
- SHAH, D.M., R.B. HORSCH, H.J. KLEE, G.M. KISHORE, J.A. WINTER, N.E. TUMER, C.M. HIRONAKA, P.R. SANDERS, C.S. GASSER, S. AY-KENT, N.R. SIEGEL, S.G. ROGERS, and R.T. FRALEY, 1986: Engineering herbicide tolerance in transgenic plants. *Science* 233, 478-481.
- SIEBERS, J., GOTTSCHILD, D., und NOLTING, H.-G., 1991: Untersuchungen ausgewählter Pflanzenschutzmittel und polyaromatischer Kohlenwasserstoffe in Niederschlägen Südostniedersach-



- sens - erste Ergebnisse aus den Jahren 1990/91. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 43, 191-200.
- STALKER, D.M., K.E. MC BRIDE, and L.D. MALYI, 1988: Herbicide resistance in transgenic plants expressing a bacterial detoxification gene. *Science* 242, 419-422.
- STRAUCH, E., W. WOHLLEBEN, and A. PÜHLER, 1988: Cloning of a phosphotricin N-acetyltransferase gene from *Streptomyces viridochromogenes* Tü494 and its expression in *Streptomyces lividans* and *Escherichia coli*. *Gene* 63, 65-74.
- TEMPLETON, G.E., R.J. SMITH, and D.O. TE BEEST, 1986: Progress and potential of weed control with mycoherbicides. *Rev. Weed Sci.* 2, 1-14.
- THOMZIK, J.E., und R. HAIN, 1990: Einführung einer Metribuzin-Resistenz in deutschen Winterraps mit 00-Qualität. *Pflanzensch. Nachr. Bayer* 43, 61-87.
- TOWERS, G.H.N., and J.T. ARNASON, 1988: Photodynamic herbicides. *Weed Technol.* 2, 545-549.
- VAN DER HOEVEN, C., A. DIETZ und J. LANDSMANN, 1991: Latente Agrobakterien in transgenen Pflanzen nachgewiesen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 43, 249-251.
- VASIL, V., S.M. BROWN, D. RE, M.E. FROMM, and I.K. VASIL, 1991: Stably transformed callus lines from microprojectile bombardment of cell suspension cultures of wheat. *Bio/Technol.* 9, 743-747.
- WANG, K., L. HERRERA-ESTRELLA, M. VAN MONTAGU, and P. ZAMBRYSKI, 1984: Right 25 bp terminus sequences of the nopaline T-DNA is essential for and determines direction of DNA transfer from *Agrobacterium* to the plant genome. *Cell* 38, 35-41.
- WEBER, H. E., 1979: Zur Quantifizierung der Belastungsfaktoren für die natürliche Umwelt, dargestellt am Beispiel der Florenverarmung im Landkreis Osnabrück. *Natur und Landschaft* 54, 298-302.
- WELLING, M., und Ch. KOKTA., 1988: Untersuchungen zur Entomofauna von Felddrainen und Felldrändern in Hinblick auf Nützlingsförderung und Artenschutz. *Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent.* 6, 373-377.
- WENZEL, G., 1989: Herbizidresistenz: Intensive Forschung, zögernde Gesetzgebung. *Pflanzenschutz-Praxis* (3), 30-32.
- WEVERS, J., und J.F. MISONNE, 1989: Herbizidresistenz bei Zuckerrüben - mit welchen Mitteln? *Pflanzenschutz-Praxis* (4), 23-25.
- WILLIAMS, M.C., 1980: Purposefully introduced plants that have become noxious or poisonous weeds. *Weed Sci.* 28, 300-305.
- WINNER, C., 1991: Zuckerrübenanbau unter dem Aspekt des Umweltschutzes. *Ber. Ldw.* 69, 121-149.