

Herbizidtolerante Kulturpflanzen - Anwendungspotenziale und Perspektiven

Bernward Märländer¹ und Andreas von Tiedemann²

¹ Institut für Zuckerrübenforschung, Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen (maerlaender@ifz-goettingen.de)

² Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Allgemeine Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz, Georg-August-Universität, Grisebachstr. 6, 37077 Göttingen (atiedem@gwdg.de)

Einsatz von transgenen herbizidtoleranten Sorten

Die Herbizidtoleranz ist seit dem Beginn des kommerziellen Anbaus von gentechnisch veränderten Kulturpflanzen die Eigenschaft mit der größten wirtschaftlichen Bedeutung und weist im globalen Maßstab - unabhängig von der betrachteten Pflanzenart - die größten Zuwächse an Anbaufläche auf (Abb. 1). Transgene, herbizidtolerante Pflanzen wurden im Jahr 2005 weltweit auf einer Fläche von 63,7 Millionen Hektar angebaut, das entspricht 71% der mit gentechnisch veränderten Pflanzen bestellten Fläche (Tab. 1).

Tab. 1: Anbaufläche der wichtigsten gentechnisch veränderten, herbizidtoleranten Kulturpflanzen (weltweit, 2005)

| Feldfrucht | Anbaufläche [Mio ha] | % Anteil |
|----------------------------------|----------------------|----------|
| herbizidtolerante Sojabohne | 54,4 | 60 |
| herbizidtoleranter Mais | 3,4 | 4 |
| herbizidtoleranter Raps | 4,6 | 5 |
| herbizidtolerante Baumwolle | 1,3 | 2 |
| | (63,7) | (71) |
| Bt + herbizidtoleranter Mais | 6,5 | 7 |
| Bt + herbizidtolerante Baumwolle | 3,6 | 4 |
| | (10,1) | (11) |

Quelle: James, 2005

Hinzu kommen auf 10,1 Millionen Hektar (11%) Pflanzen mit der Kombination aus Herbizidtoleranz und Insektenresistenz („stacked genes“ oder „stacked traits“), gegenüber 16,2 Mio ha (18%) mit reinen Bt-Sorten.

Die überwiegend eingesetzte Herbizidtoleranz ist gegenüber den Wirkstoffen Glyphosat (System Roundup Ready, RR) oder Glufosinat (System LibertyLink, LL) wirksam. Hinzu kommen Pflanzen mit transgener Toleranz gegen Bromoxynil, Imidazolinon und Sulfonylharnstoff-Verbindungen, die aber nur eine geringe Bedeutung haben. Imidazolinon- und Sulfonylharnstoff-tolerante Pflanzen können auch mittels chemisch induzierter Mutation erzielt werden, wobei diese Ansätze die größere wirtschaftliche Bedeutung haben.

Die Glyphosat-tolerante Sojabohne ist mit 54,4 Millionen Hektar, d.h. einem Anteil von 60% an der weltweiten GVO-Anbaufläche, die global dominierende gentechnisch veränderte Kulturpflanze (Tab. 1) und wird zurzeit in 9 Ländern angebaut. Von 2004 auf 2005 stieg die Anbaufläche nochmals um 6 Millionen Hektar oder 12%.

Herbizidtoleranter Mais und Raps sowie herbizidtolerante Baumwolle wurden in der Summe auf einer Fläche von immerhin 9,3 Millionen Hektar (= 11% Flächenanteil) angebaut (Tab. 1). Bei Mais und Raps sind sowohl Glyphosat- als auch Glufosinat-tolerante Sorten verfügbar, während bei herbizidtoleranter Baumwolle derzeit im Wesentlichen Glyphosat-tolerante Sorten angebaut und vermarktet werden.

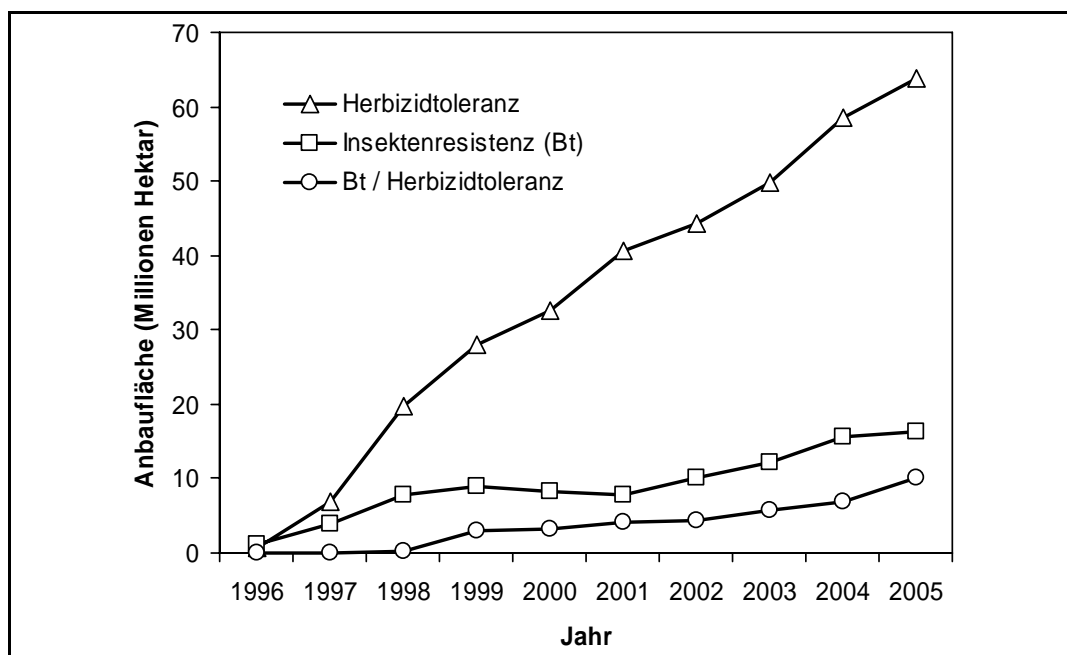


Abb. 1: Entwicklung der Anbaufläche von gentechnisch veränderten Pflanzen von 1996 bis 2005 - nach vermittelten Eigenschaften (James, 2005)

In der EU basieren 58 von 79 zum Inverkehrbringen als Lebens- und Futtermittel, zur Einfuhr und Verarbeitung oder zum Anbau beantragten oder genehmigten gentechnisch veränderten Pflanzen (oder Produkte aus diesen) auf herbizidtoleranten Pflanzen bzw. Pflanzen mit kombinierten Eigenschaften aus Herbizidtoleranz und Insektenresistenz oder männlicher Sterilität (Tab. 2).

Tab. 2: Anträge in der EU für den Anbau und die Zulassung als Lebens- und Futtermittel nach RL 2001/18/EG oder VO (EG) 1829/2003 (Pflanzen mit Herbizidtoleranz und Kombinationseigenschaften; Stand Juli 2006)

| Pflanzenart | Event | Unternehmen | Eigenschaft(en) |
|-------------|-------------------------|---|--|
| Baumwolle | MON 1445 | Monsanto | Herbizidtoleranz |
| Mais | 59122 x NK603 | Pioneer / Mycogen | Herbizidtoleranz, Insektenresistenz |
| Mais | 59122 x 1507 x NK603 | Pioneer / Mycogen | Herbizidtoleranz, Insektenresistenz |
| Mais | 1507 x 59122 | Dow / Pioneer | Herbizidtoleranz, Insektenresistenz |
| Mais | 59122 | Pioneer / Mycogen | Herbizidtoleranz, Insektenresistenz |
| Mais | 1507 x NK603 | Pioneer / Mycogen | Herbizidtoleranz, Insektenresistenz |
| Mais | NK603 x MON810 | Monsanto | Herbizidtoleranz, Insektenresistenz |
| Mais | NK603 | Monsanto | Herbizidtoleranz |
| Raps | T45 | Bayer CropScience | Herbizidtoleranz |
| Raps | Liberator phoe6 / Ac | Bayer CropScience | Herbizidtoleranz |
| Raps | GS40 / 90phoe6 / Ac | Bayer CropScience | Herbizidtoleranz |
| Soja | MON 40-3-2 | Monsanto | Herbizidtoleranz |
| Zuckerrübe | H7-1 | KWS / Monsanto | Herbizidtoleranz |
| Futterrübe | A5-15 | Danisco / DLF Tri- folium / Monsanto | Herbizidtoleranz |

Quelle: www.transgen.de

Für den Anbau in der EU ist Glufosinat-toleranter Mais genehmigt, der auf dem Event T25 beruht, aber zur Zeit nicht am Markt angeboten wird. Auch der Anbau und die Produktion von Hybridsaatgut für Raps ist genehmigt, der auf den Events „MS1 x RF1“ und „MS1 x RF2“ beruht (Glufosinat-tolerant und männlich steril), aber derzeit gleichfalls nicht angebaut wird.

In der EU liegen weitere Anträge für eine Genehmigung herbizidtoleranter Pflanzen zum Anbau und/oder zur Nutzung als Lebens- und Futtermittel vor (Tab. 2). Aktuell liegen demnach 14 Anträge, u.a. für Baumwolle (1), Mais (7), Raps (3), Sojabohne (1), Futter- (1) und Zuckerrübe (1) zur Entscheidung vor. Bei der Mehrzahl der Mais-Events - 6 von 7 – umfasst die Antragstellung die Kombination der Eigenschaften Herbizidtoleranz und Insektenresistenz.

In diesem Beitrag sollen einige wesentliche Kennzeichen und Wirkungen des Anbaus von HT-Sorten am Beispiel der in Europa wichtigen Nutzpflanzen Zuckerrübe, Mais und Raps summarisch dargestellt werden.

Mechanismen der transgenen Herbizidtoleranz

Die erste Übertragung eines Herbizidtoleranz (HT) vermittelnden Gens gelang der Firma Calgene 1994 im Auftrag von Monsanto an Tabak und Petunien. Bei der heute unter dem Handelsnamen ‚**Roundup Ready**‘ geführten Herbizidtoleranz wurde ein Gen für die EPSP-Synthase (5-enol-pyruvyl-3-shikimatphosphat) aus *E. coli* kloniert und mittels *Agrobacterium*-vermittelter Transformation in Pflanzenzellen übertragen. Die regenerierten Pflanzen wiesen vielfach höhere Enzymkonzentrationen auf und tolerierten dadurch hohe Konzentrationen des Herbizids **Glyphosat**. Glyphosat ist ein unselektives Herbizid mit günstigen ökotoxikologischen und toxikologischen Eigenschaften, welches die nur in Pflanzen vorkommende EPSPS hemmt. EPSPS ist essentiell für die Synthese aromatischer Aminosäuren. Seit dieser ersten erfolgreichen Übertragung von Herbizidtoleranz sind verschiedene Variationen von Roundup Ready auf den Markt gekommen. Besonders in Mais wird heute das *cp4 epsps* Gen aus *Agrobacterium tumefaciens* Stamm CP4 verwendet, welches für eine von Pflanzen leicht abweichende EPSPS codiert, die weniger empfindlich für Glyphosat ist. Um die Verträglichkeit und Anwendungssicherheit weiter zu verbessern, kann das *cp4 epsps* mit Genen kombiniert werden, die zusätzlich für den beschleunigten Abbau von Glyphosat in der Pflanze sorgen. Ein solcher Ansatz ist die Verwendung des Glyphosat-Oxidase-Gens *goxv247* aus dem Bodenbakterium *Ochrobactrum anthropi* in Raps (*Brassica napus* L.) oder aus *Achromobacter* sp. in Rübsen (*Brassica rapa* L.), welche den Abbau von Glyphosat zu Aminomethylphosphonsäure und Glyoxylat bewirkt. Glyphosattoleranz wird heute vor allem in Sojabohne, Mais, Baumwolle, Raps und Zuckerrübe eingesetzt.

Ein alternatives HT-System ist die mit ‚**LibertyLink**‘ realisierte Toleranz gegen **Glufosinat**. Glufosinat-Ammonium setzt in der Pflanze den unselektiven Herbizidwirkstoff L-Phosphinothricin (PPT) frei, welcher als Strukturanalogon zu Glutamat durch kompetitive Hemmung die pflanzliche Glutaminsynthetase inaktiviert.

Tab. 3: Wichtigste Typen von transgen oder konventionell erzeugter Herbizidtoleranz in Kulturpflanzen (Quellen: AGBIOS Database 2006 u.a.)

| Herbizid | Resistenztyp, Handelsname | Pflanzenart | Zulassung durch/ seit |
|--|---|--|------------------------------------|
| <i>Transgen erzeugte HT</i> | | | |
| Glyphosat | herbizidtolerante EPSP-Synthase aus <i>A. tumefaciens</i> („Roundup Ready“) | Raps, Rübsen, Baumwolle, Mais, Sojabohne, Zuckerrübe | Monsanto 1995 |
| Glufosinat | <i>pat</i> -Gen aus <i>Streptomyces viridochromogenes</i> od. <i>S. hygroscopicus</i> („LibertyLink“) | Raps, Rübsen, Baumwolle, Mais, Reis, Chicoree, Sojabohne, Zuckerrübe | Bayer (Aventis), 1995 |
| Bromoxynil, Ioxynil | <i>bxn</i> -Gen aus <i>Klebsiella pneumoniae</i> ; Nitrilase hydrolysiert Oxylinil | Raps Baumwolle | Aventis 1997 Calgene 1994 |
| Sulfonylharnstoffe (Triasulfuron, Metsulfuron) | Übertragung des S4-HrA-Gens für insensitive ALS | Baumwolle, Lein, Sojabohne | Dupont 1996 Univ Saskatoon 1996 |
| <i>Konventionell erzeugte HT</i> | | | |
| Sulfonylharnstoffe | Einkreuzung von chemisch induzierten HT-Mutanten | Baumwolle, Lein, Sojabohne | Dupont 1996 Univ Saskatoon 1996 |
| Imidazolinon | Selektion mutagenisierter Mikrosporen u. Einkreuzung in Sorten („Clearfield“) | Raps, Mais Weizen, Reis, Sonnenblume | Pioneer Hi-Bred 1995 BASF 2002 |

Dadurch kommt es im behandelten Pflanzengewebe zur lokalen Anreicherung des zellgiftigen Ammoniaks. Die herbizide Wirkung basiert neben der Ammoniakbildung auch auf der Hemmung von Photosynthese und Glutaminsynthese. Toleranz gegen Glufosinat wird durch Übertragung des *pat*-Gens aus dem Bodenbakterium *Streptomyces viridochromogenes* (oder *S. hygroscopicus*) erreicht, welches für eine PPT-Acetyltransferase (PAT) codiert, durch die PPT in der transgenen Pflanze acetyliert und

inaktiviert wird. Glufosinat-Toleranz findet in zahlreichen Kulturpflanzen Verwendung. Ein besonders in Raps verwendeter HT-Ansatz ist die **Bromoxynil-Toleranz**, basierend auf Übertragung des *bxn*-Gens aus *Klebsiella pneumoniae* subsp. *ozaenae*. Bromoxynil, sowie Ioxynil, gehören zu den Benzonitrilen, die die Hill-Reaktion am Photosystem II hemmen. Die herbizide Wirkung richtet sich selektiv gegen Dikotyle. Das *bxn*-Gen wird konstitutiv unter der Kontrolle eines 35S Promotors exprimiert und kodiert für eine Nitrilase, die den Herbizidwirkstoff in nicht-toxische Komponenten zerlegt. In Rapsöl von bromoxyniltoleranten Pflanzen ist keine Nitrilase nachweisbar.

HT gegenüber **Sulfonylharnstoffen** kann auf konventionellem oder transgenem Weg erreicht werden. Der erste Weg besteht in der konventionellen Einkreuzung von chemisch induzierten HT-Mutanten. Transgene HT gegen Sulfonylharnstoffe in Sojabohne oder Baumwolle wurde durch Transformation mit dem S4-HrA-Gen erreicht, welches aus einer Tabakmutante stammt und für eine um zwei Aminosäuren veränderte Acetolactat-Synthase (ALS) codiert, die insensitiv gegenüber ALS-Hemmern ist. ALS ist ein Schlüsselenzym bei der Synthese verzweigter Aminosäuren (Valin, Leucin, Isoleucin).

Ebenfalls auf konventionelle Weise wurde die HT gegenüber **Imidazolinon** erzeugt, die bereits seit 1992 in praktischer Anwendung ist und in verschiedenen Pflanzen genutzt wird (Tan et al. 2005). Sie basiert auf der Selektion von Herbizidtoleranz nach chemisch induzierter Mutation und deren Einkreuzung in die Nutzpflanze. Die unter dem Handelsnamen ‚Clearfield‘ verwendete HT ist wirksam gegen Imidazolinon, einem Hemmstoff der Acetohydroxyacid-Synthase (AHAS, auch Acetolactat-Synthase, ALS genannt), welche für die Synthese verzweigter Aminosäuren verantwortlich ist. Toleranz gegen Imidazolinon beruht auf einem mutierten Gen für AHAS, welches auf konventionelle Weise in die HT-Sorten eingekreuzt wird (Tab. 3).

Herbizidtoleranz bei Zuckerrüben

Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) reagieren auf Konkurrenz durch Unkraut mit erheblichen Ertragseinbußen. Im konventionellen Anbau erfolgt deshalb auf 100 % der Anbaufläche der Einsatz von Herbiziden. In 3 bis 5 Applikationen werden zumeist Mischungen verschiedener Wirkstoffe ausgebracht, da die herbizide Wirkung von einzelnen Wirkstoffen gegen spezifische Unkräuter unzureichend ist. Die Applikation erfolgt nahezu ausschließlich prophylaktisch beginnend ab dem Keimblattstadium. Eine höhere Wirkstoffmenge kann insbesondere witterungsbedingt zu vorübergehender Beeinträchtigung des Wachstums und daraus resultierend zu geringerem Ertrag führen.

Gentechnisch veränderte herbizidtolerante Zuckerrübensorten mit Toleranz gegen die Wirkstoffe Glufosinat und Glyphosat wurden ab 1998 für die **Wertprüfung** (Sortenleistung) in Deutschland angemeldet und die **Zulassung der Herbizide** beantragt. Die Zulassung für Roundup (Glyphosat) mit Indikation gentechnisch veränderte Zuckerrübe ist zwischenzeitlich mit max. 6 l pro ha erfolgt (Märlander, 2005). Parallel zur Zulassung wurden in einem bundesweiten Verbundprojekt umfangreiche Untersuchungen zur Applikation und herbiziden Wirkung sowie der Selektivität

(Ertragstoleranz) durchgeführt (Märländer und Bückmann, 1999). Diese Versuche einschließlich der Wertprüfung wurden ab 2000 infolge des Anbaumatoriums eingestellt und die Anmeldung für die Registrierung von Sorte und Herbizid der Glufosinat-Technologie von den Unternehmen zurückgezogen. Lediglich die Entwicklung spezifischer Anbausysteme mit Applikation von Roundup wurde in Einzelversuchen noch bis 2002 weitergeführt (Petersen und Röver, 2005).

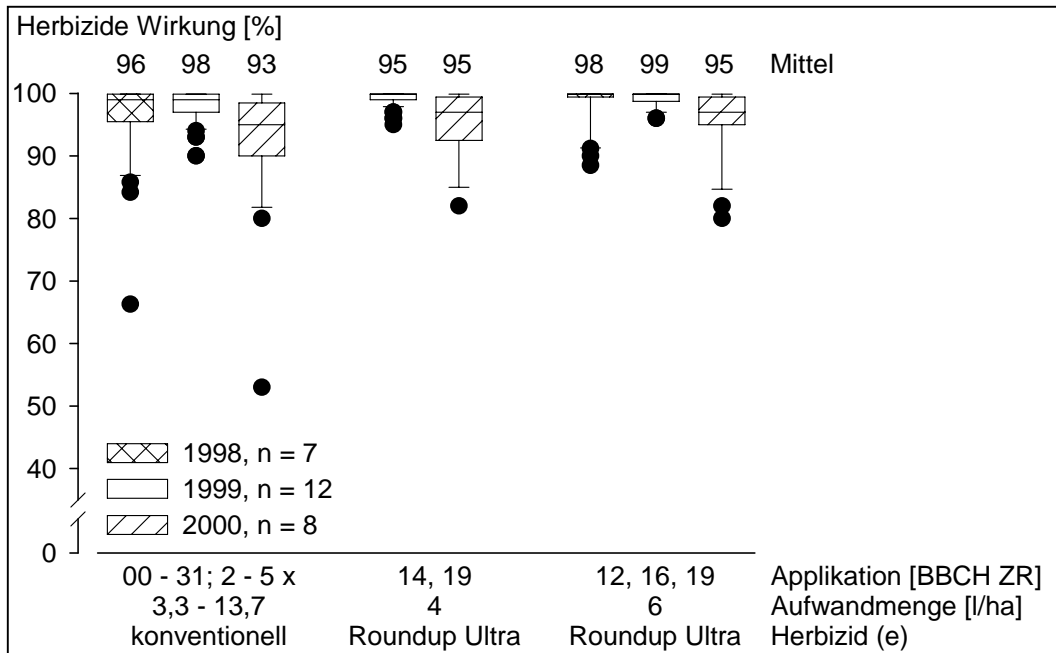


Abb. 2: Herbizide Wirkung von Roundup bei zweimaliger Applikation

Die **herbizide Wirkung** von Roundup ist bereits bei zweimaliger Applikation außerordentlich hoch und entspricht im Mittel etwa der konventioneller Herbizide (Abb. 2). Die Applikation kann jedoch erheblich später im 4 – 6 Blatt-Stadium (BBCH 14/16) mit insgesamt 4 bis 6 l pro ha (1,44 bis 2.16 l a. i.) beginnen. Die Wirkung ist gegen nahezu alle Unkrautarten vergleichbar hoch, sodass auch Problemunkräuter sicher reguliert werden. In Mulchsaat kann die Applikation von Roundup im Voraufbau zur Regulierung von Altverunkrautung einschließlich der Bekämpfung einer Verunkrautung mit Raps, Getreide und Kartoffeln entfallen und im Nachaufbau erfolgen.

Die Bekämpfung von Unkrautrüben, die mit konventionellen Herbiziden nicht möglich ist und nur durch hohen Aufwand an Handarbeit erfolgen kann, ist mit Roundup problemlos möglich. Konsequenterweise müssen bei Anbau von gentechnisch veränderten herbizidtoleranten Sorten Schosser ausnahmslos entfernt werden, um eine Einkreuzung der Toleranz in die Unkrautrübenpopulation zu verhindern. Die herbizide

Wirkung von Glufosinat entsprach etwa der von konventionellen Herbiziden mit ausgeprägter Wirkungsschwäche gegenüber spezifischen Problemunkräutern, wie z. B. *Cirsium arvense* (L.) Scop. (Dietsch, 2002). Die **Selektivität** von Roundup in gentechnisch veränderten Glyphosat-toleranten Sorten ist außerordentlich hoch. Selbst die Applikation einer mehrfach überhöhten Aufwandmenge führt nicht zu vermindertem Ertrag (Abb. 3).

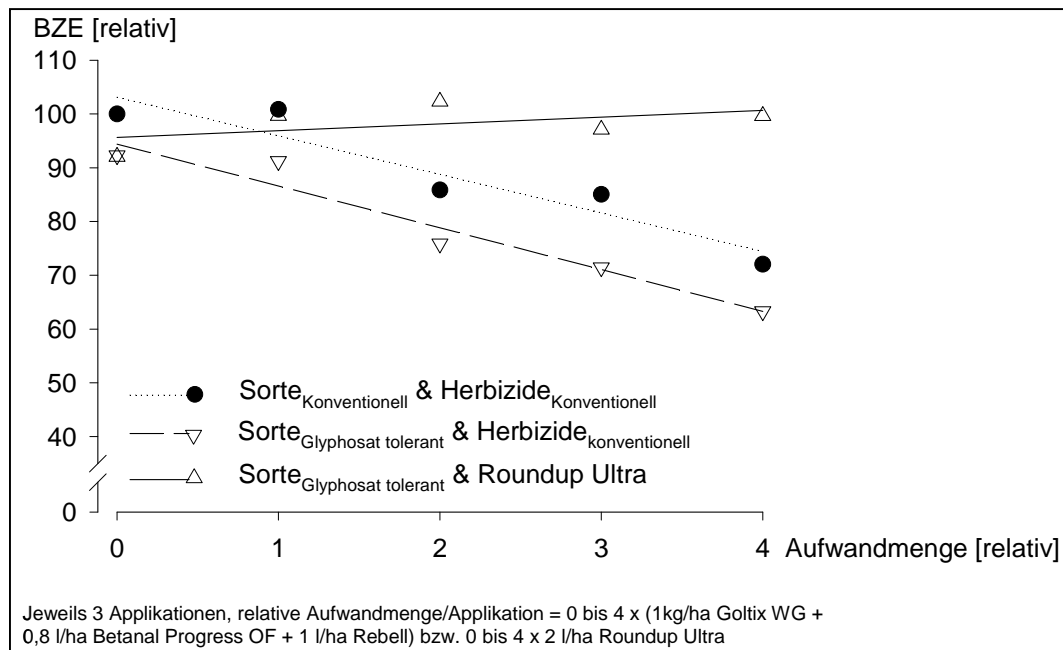


Abb. 3: Relativer Bereinigter Zuckerertrag (BZE) einer konventionellen und einer Glyphosat-toleranten Zuckerrübensorte in Abhängigkeit verschiedener Aufwandmengen an Herbiziden, Niedernjesa, 1998 (veränd. n. Beißner 2000)

Dagegen kann die Applikation konventioneller Herbizide bereits bei leicht überhöhter Aufwandmenge oder üblicher Aufwandmenge und Applikation nach höheren Niederschlägen oder hoher Einstrahlung zu merkbarem Ertragsverlust führen. In Applikationssystemen mit Roundup ist deshalb über die verbesserte Selektivität indirekt eine Erhöhung des Bereinigten Zuckerertrages um bis zu 5% möglich (Abb. 4). Der Effekt ist umso höher, je intensiver konventionelle Herbizide hätten eingesetzt werden müssen, um Problemunkräuter sicher zu regulieren (May, 2000). Die Selektivität von Glufosinat in gentechnisch veränderten Glufosinat-toleranten Sorten war besser als von konventionellen Herbiziden, entsprach jedoch nicht der „absoluten“ Selektivität von Glyphosat (Dietsch, 2002).

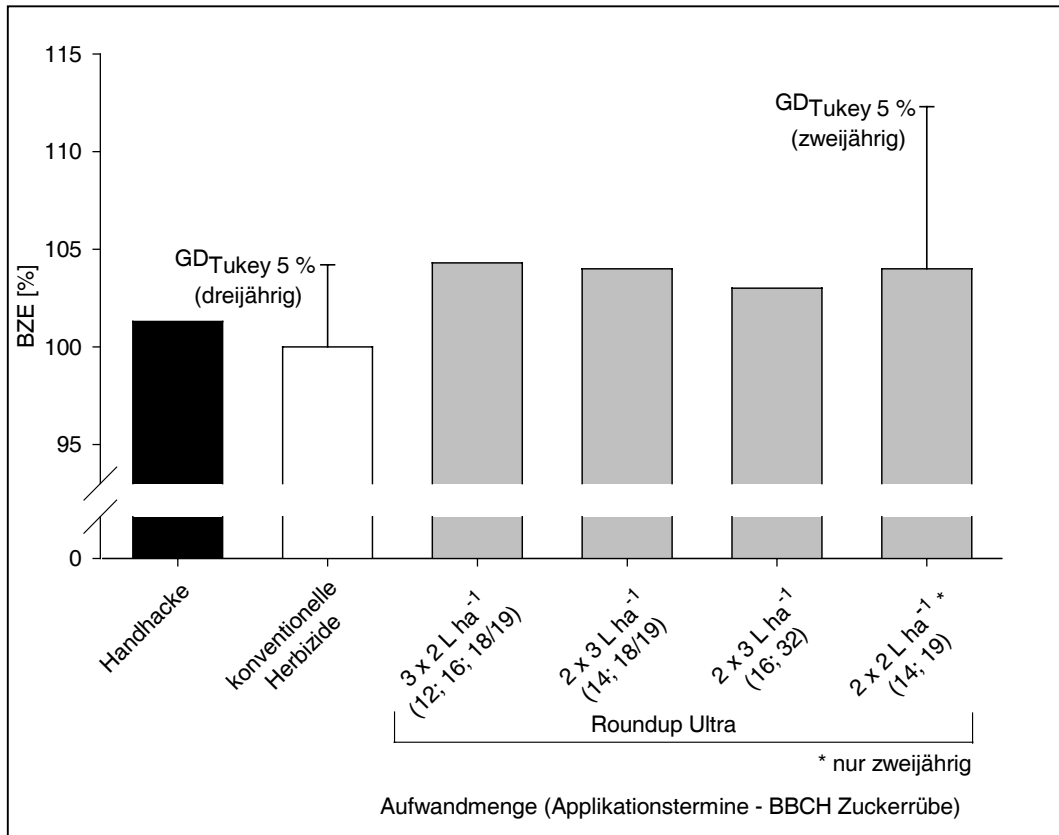


Abb. 4: Bereinigter Zuckerertrag (BZE) Glyphosat-toleranter Zuckerrüben in Abhängigkeit der Unkrautkontrollverfahren, Deutschland, 1998-2000, (n=24)

Die **Markteinführung** von gentechnisch veränderten Glyphosat-toleranten Sorten ist in den USA bereits weit fortgeschritten. Für gentechnisch veränderte Glyphosat-tolerante Zuckerrübensorten liegen in den USA alle erforderlichen Genehmigungen für Anbau, Verarbeitung und Nutzung als Futter- und Lebensmittel vor. Auch die Nutzung als Lebens- und Futtermittel in den Hauptexportländern (vor allem Kanada, Japan, Mexiko) wurde bereits genehmigt. Bereits in diesem Jahr wurde mit der Markteinführung in den USA begonnen. Bis 2008 ist die kommerzielle Markteinführung in allen Anbaugebieten der USA geplant. Die ersten Erfahrungen mit dem Einsatz der Technologie belegen deutlich die Vorteilhaftigkeit des Systems. Eine zweimalige Anwendung von Roundup zeigte eine sehr überzeugende Unkrautbekämpfung. Die Nachfrage der Landwirte ist groß, da diese Technologie die beschriebenen Vorteile besonders im Applikationszeitpunkt und in der Einfachheit des Systems auch in der Praxis aufweist. Die Kalkulation der **Kosten-Erlösdifferenz** für den Einsatz gentechnisch veränderter Sorten muss neben der Ertragsleistung der Sorte, indirekten Ertragseffekten über

verbesserte Selektivität, veränderten Kosten für Herbizid und Applikation auch höhere Kosten für die Sorte infolge der Erhebung einer Technologiegebühr berücksichtigen. Die Höhe der Technologiegebühr ist bisher unbekannt, wird jedoch auf Grund der hohen wirtschaftlichen Vorzüglichkeit des Einsatzes von Roundup nicht zu unterschätzen sein. Trotzdem kann für den Anbau in Deutschland ein Kostenvorteil von bis zu 200 € pro ha (Märländer 2005) angenommen werden, der sich für den Anbau in Mitteleuropa auf bis zu 180×10^6 € kumulieren würde (Gianessi et al., 2003).

Tab. 4: Simulierte Umweltwirkungen von Wirkstoffen konventioneller Herbizide und Glyphosat in Glyphosat-toleranten Zuckerrüben (Märländer et al. 2003, verändert nach Dietsch 2002)

| Applikation | Herbizid Dosis [g a.i. ha ⁻¹]* | | | | | | | |
|--|---|------------------|-------------------------|------------------|--|-----|-----|-----|
| Konventionell | 1778 - 5651 | | | | | | | |
| Glyphosat | 1440 - 2160 | | | | | | | |
| Simulierte Umweltwirkung (Modell SYNOPSIS 2) | | | | | | | | |
| | Boden [%]† | | Oberflächenwasser [%] † | | Chronisches biolog. Risiko† | | | |
| | A | PEC _L | A | PEC _L | e | d | a | f |
| Konventionell | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Glyphosat | 0 | 13-68 | 0 | 8-53 | 3-9 | 0 | 0 | 0-1 |
| Simulierte Umweltwirkung (Modell PELMO 3.20) | | | | | | | | |
| | Unterboden KumulierterWirkstoff-eintrag [g a.i. ha ⁻¹ (2 Jahre) ¹] | | | | Sickerwasser Wirkstoffkonzentration [µg a.i. l ⁻¹ ; 2. Jahr nach der Applikation] | | | |
| Konventionell | 6,0 x 10 ⁻⁸ – 1,9 x 10 ⁻¹ | | | | 0 – 5,8 x 10 ⁻² | | | |
| Glyphosat | 0 | | | | 0 | | | |
| * a.i. = aktiver Wirkstoff, † 100% bezieht sich auf den errechneten Höchstwert. A = Anlagerung an die Bodenmatrix, PEC _L = Long-term Predicted Environmental Concentration (vorhergesagte Umweltkonzentration in den oberen 2,5 cm des Bodens innerhalb von 2 Jahren nach Applikation, e = Regenwurm, d = Daphnie, a = Algen, f = Fische. | | | | | | | | |

Bei einer maximalen Aufwandmenge von Roundup von 6 l pro ha (2.14 kg a. i.) ergibt sich je nach Aufwand konventioneller Herbizide eine geringere Applikationsmenge von etwa 1 kg a. i. pro ha oder mehr. Von besonderer Bedeutung ist aber das positivere **ökotoxikologische Profil**. Mittels Simulation durch SYNOPSIS 2 und PELMO 3.20 ergaben sich für den virtuellen Einsatz von Roundup in 10 Betrieben in verschiedenen Anbaugebieten Deutschlands im Vergleich zu konventionellen Herbiziden deutliche günstigere Werte für das biologische Risiko und für den Austrag in das Grundwasser (Tab. 4). Ferner könnte sich in Mulchsaat bei Applikation von Roundup eine Unkrautpopulation vom Herbst bis zum 8 bis 10-Blattstadium entwickeln, die erhebliche positive Effekte auf die Biodiversität hätte (Dewar et al. 2000).

Herbizidtoleranz bei Mais und Raps

Während bei Raps auf einer Fläche von 4,6 Mio ha (2005) ausschließlich reine HT-Sorten im Anbau waren, kommt beim Mais zu den 3,4 Mio ha reinen HT-Sorten ein noch größerer Anteil kombinierter Sorten mit Bt-Expression von 6,5 Mio ha hinzu. Insektizidresistenz spielt demnach bei Mais die dominierende Rolle. Bei beiden Pflanzenarten wird Herbizidtoleranz hauptsächlich gegen Glyphosat oder Glufosinat eingesetzt. In der EU laufen mehrere entsprechende Antragsverfahren auf Zulassung (siehe oben).

Mais (*Zea mays* L.) ist die einzige in großem Umfang transformierte monokotyle Nutzpflanze. Die natürliche Unkrautunterdrückungsfähigkeit ist bei Mais aufgrund der schlanken, aufrechten Wuchsform und der späten Entwicklung besonders schlecht. Hinzu kommen verschiedene Problemunkräuter (besonders Hirse-Arten), die sich nach dem jahrelangen Einsatz selektiver Herbizide auf vielen Maisanbauflächen akkumuliert haben. Mais ist die am spätesten und am unzureichendsten bodenbedeckende Kulturpflanze, wenn sie in der üblichen Monokulturform angebaut wird. Damit ist Mais die problematischste Kultur in Bezug auf den Boden- und Erosionsschutz. Durch den Einsatz von unselektiven Herbiziden gekoppelt mit HT-Sorten ist hier erstmals eine maßgebliche Innovation möglich, die aufgrund des möglichen späten Einsatzes eine ganzjährige Bodenbedeckung mit Unkräutern bzw. einer Mulchschicht erlaubt. So genannte ‚farm scale evaluations (FSE)‘ in England haben gezeigt, dass sich insbesondere gegenüber der früher üblichen, frühen Anwendung von Atrazinen signifikante Vorteile für die Diversität bzw. Abundanz von Wildflora und Invertebratenfauna ergeben (Perry et al., 2004). Die von 2000 bis 2002 mit Mais, Zuckerrübe und Raps durchgeführten FSE ist eine der umfangreichsten in Europa bislang durchgeführten Studien zu Auswirkungen des Anbaus von HT-Sorten. Aus dem umfangreichen Datenmaterial haben sich keine unerwarteten oder unvermeidbaren, spezifisch Transgen-bedingten Auswirkungen auf das Ökosystem ableiten lassen (Andow, 2003; Champion et al., 2003; Squire et al., 2003).

Erfahrungen bei **Raps** (*Brassica napus* L.) mit HT-Sorten liegen vor allem aus Kanada vor, wo der Anbau bereits 1995 begann (Stringam et al., 2003). Aufgrund seiner einfachen Transformierbarkeit war Raps eine der ersten Kulturpflanzen mit transgener HT. Augenblicklich macht der Anteil HT-Sorten im Anbau dort etwa 60% aus. Neben Roundup Ready und LibertyLink sind auch Bomoxylinol-tolerante („Navigator“) und Imidazolinon-resistente („Clearfield“; konventionell erzeugt) Sorten im Anbau. Glufosinat-Toleranz ist in verschiedenen Hybridsorten mit transgen vermittelter männlicher Sterilität kombiniert. Die durch die Herbizidtoleranz erzielte Selektivität wird in allen Fällen als sehr zufrieden stellend eingeschätzt. Einer kanadischen Untersuchung von 1997-2000 zu Folge wiesen HT-Sorten im Anbau einen durchschnittlichen Mehrertrag von 7-13% auf, wobei auch die Öl- und Proteingehalte höher als bei den konventionellen Vergleichssorten waren (Stringam et al., 2003).

Beim Raps besteht in den Winterrapsanbaugebieten die Problematik des Bodenschutzes nicht. Allerdings dominiert weltweit der Sommerrapsanbau, so daß eine Mulchwirtschaft

in Kombination mit unselektiven Herbiziden auch hier erhebliche Vorteile bietet. Ähnlich wie beim Mais haben sich überdies im Raps verschiedene Unkrautarten etabliert, die mit konventionellen Herbiziden schwer bekämpfbar sind. Hierzu gehören vor allem kruzifere Arten wie Hirtentäschel und die Rauke-Arten. Hinsichtlich dieser Aspekte besitzt die HT-Technologie zweifellos Überlegenheit. Die Erfahrungen in den kanadischen Rapsanbaugebieten bestätigen dies. Aufgrund seiner Bestäubungsweise ist der Gentransfer auf kreuzbare Wildkräuter oder nicht-transgenen Raps besonders zu beachten. Studien zu Ausbreitungsraten und -distanzen liegen vor (Weekes et al., 2005). In Deutschland wird es den Anbau von HT-Sorten erst geben, wenn Genehmigungen zum Anbau vorliegen und die Festlegung plausibler Grenzwerte für den zulässigen Fremdbesatzanteil und angemessene Abstandsauflagen erfolgt sind.

Systemvergleiche hinsichtlich der Ertrags- bzw. Erlössituation beim Anbau von HT-Sorten gegenüber konventionellen Sorten werden dadurch erschwert, dass dabei Sorten mit unterschiedlichem genetischem Ertragshintergrund verglichen werden. Selbst beim Vergleich identischer Genotypen lassen sich die Effekte, die selektive Herbizide auf den Ertrag konventioneller Sorten haben, nicht herausrechnen. Schließlich ist auch der häufig in Studien gemachte Vergleich der Aufwandmengen selektiver Herbizide gegenüber Standardherbiziden unzulässig, da es sich dabei um Präparate handelt, die sich hinsichtlich ihrer ökotoxikologischen und toxikologischen Eigenschaften erheblich unterscheiden. Eine Betrachtung, wie viel Glyphosat oder Glufosinat anstelle von konventionellen Herbiziden eingesetzt werden muß, ist daher nicht sachgemäß. Grundsätzlich leiden solche Vergleichsbetrachtungen unter dem fehlerhaften Ansatz, sich nicht wirklich auf die Auswirkungen allein des speziellen Transgens zu beschränken, sondern Auswirkungen einzubeziehen, die in gleicher oder sogar noch stärkerer Weise auch durch den konventionellen Anbau gegeben sind. Ein Beispiel ist die Warnung vor dem Auftreten von Herbizidtoleranz bei einseitiger Anwendung von unselektiven Herbiziden. Dieser Einwand trifft grundsätzlich zu, stellt aber kein besonderes Problem der HT-Technologie dar. Ähnliches gilt für Effekte auf die Biodiversität. Problematisch ist schließlich auch die Bewertung ökosystemarer Effekte, ohne sie auf den (gewollten) höheren Wirkungsgrad unselektiver Herbizide zu beziehen.

Zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der HT-Technologie können daher nur Systemvergleiche unter Verwendung integraler Meßgrößen zielführend sein. Eine solche Meßgröße für die Wirtschaftlichkeit ist der spezialkostenfreie Erlös, den der Landwirt erzielen kann. Für ökologische Wirkungen eignen sich qualitativ differenzierende Indikatorsysteme wie SYNOPS, IPEST oder PELMO, wie sie exemplarisch für die Zuckerrübe oben dargestellt sind.

Zusammenfassend kann der Anbau von HT-Sorten in Kombination mit nicht-selektiven Herbiziden einen erheblichen Beitrag für einen innovativen Pflanzenschutz leisten, der deutliche (arbeits-)wirtschaftliche und ökologische Vorteile mit sich bringt. Die Erfahrungen vieler Jahre praktischen Anbaus auf mittlerweile über 70 Mio ha Fläche in den USA und mehreren anderen wichtigen Agrarländern bestätigen dies. Im Sinn des

integrierten Pflanzenschutzes ergeben sich neue Perspektiven für die Berücksichtigung von Schadensschwellen. Auch die Möglichkeit der verringerten Herbizidmenge und der späteren Applikation sind ökologisch positiv zu bewerten. Hinzu kommen äußerst günstige ökotoxikologische und toxikologische Eigenschaften der beiden Hauptwirkstoffe Glyphosat und Glufosinat. Ein hoch innovativer Effekt der HT-Technologie hinsichtlich der umfassenden Anforderungen an den modernen Pflanzenschutz ist damit nicht zu bestreiten. Da die Vorteile von HT-Sorten vor allem dem Landwirt zugute kommen, besteht in Europa dennoch Skepsis beim Verbraucher.

Literatur

- Andow, D.A., 2003: UK farm-scale evaluations of transgenic herbicide-tolerant crops. *Nature Biotechnology* 21, 1453-1454.
- Agbios database, 2006: <http://www.agbios.com>
- Beißner, L., 2000: Einfluss von Herbiziden auf Stoffwechsel und Ertragsbildung von Zuckerrüben. *Zuckerindustrie* 125, 721-726.
- BMVEL–Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, 2004: Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz. Internet: http://www.bmelv.de/cln_044/nn_751174/SharedDocs/downloads/04-Landwirtschaft/Pflanzenschutz/Reduktionsprogramm_20chemischer_20Pflanzenschutz,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Reduktionsprogramm_20chemischer_20Pflanzenschutz.pdf, Stand: 31.07.2006.
- Champion, G. T. et al. 2003: Crop management and agronomic context of the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. *Phil Trans R Soc Lond B* 358, 1801-1818.
- Dewar, A.M., May, M.J., Woiwod, I.P., Haylock, L.A., Champion, G.T., Garner, B.H., Sands, R.J.N., Qi, A., Pidgeon, J.D., 2003: A novel approach to the use of genetically modified herbicide tolerant crops for environmental benefit. *Proc R Soc Lond B* 270, 335-340.
- Dietsch, A., 2002: Rentabilität und Umweltverträglichkeit der Unkrautregulierung in gentechnisch veränderten herbizidtoleranten Zuckerrüben - ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung des Zuckerrübenanbaus. Dissertation Universität Göttingen, Kinzel, Göttingen.
- Gianessi, L., Sankula, S., Reigner, N., 2003: Plant Biotechnology: Potential impact for improving pest management in European agriculture. Sugarbeet case study. NCFAP, Washington.
- James, C., 2005: Global status of commercialized Biotech/GM crops: 2005. ISAAA Briefs No. 34. ISAAA: Ithaca, NY.
- Märländer, B., C. Hoffmann, H.-J., Koch, E., Ladewig, R., Merkes, J., Petersen, and N., Stockfisch, 2003: Environmental situation and yield performance of the sugar beet crop in Germany: heading for sustainable development. *J Agron Crop Sci* 189, 201-226.

- Märländer, B., 2005: Weed control in sugar beet using genetically modified herbicide-tolerant varieties- a review of the economics for cultivation in Europe. *J Agronomy & Crop Science* 191, 64-74.
- Märländer, B., Bückmann, H., 1999: Genetically modified varieties in Germany - status and prospects with special respect of a sustainable sugar beet cultivation. *Zuckerindustrie* 124, 943-946.
- May, M.J., 2000: Efficiency and selectivity of RR and LL weed control techniques compared to classical weed control systems. Proceedings IIRB 63rd Congress, Interlaken, 163-170.
- Perry, J. N., Firbank, L. G., Champion, G. T., Clark, S. J., Heard, M. S., May, M. J., Hawes, C., Squire, G. R., Rothery, P., Woiwod, I. P., Pidgeon, J. D., 2004: Ban on triazine herbicides likely to reduce but not negate relative benefits of GMHT maize cropping. *Nature* 428 (6980), 313-316.
- Petersen, J., A., Röver, 2005: Comparison of sugar beet cropping systems with dead and living mulch using a glyphosate-resistant hybrid. *J Agron Crop Sci* 191, 55-63.
- Squire, G.R. et al. 2003: On the rationale and interpretation of the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. *Phil Trans R Soc Lond B* 358, 1779-1799.
- Stringam, G.R., Ripley, V.L., Love, H.K. Mitchell, A., 2003: Transgenic herbicide tolerant canola – the Canadian experience. *Crop Sci* 43, 1590-1593.
- Tan, S., Evans, R. R., Dahmer, M. L., Singh, B. K., Shaner, D. L., 2005: Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future. *Pest Manag Sci* 61, 246-257.
- Weekes, Deppe, C., Allnutt, T., Boffey, C., Morgan, D., Morgan, S., Bilton, M., Daniels, R., Henry, C., 2005: Crop-to-crop gene flow using farm scale sites of oilseed rape (*Brassica napus*) in the UK. *Transgenic Res* 14, 749-759.