



Kapitel 1

Prolog



Prolog

Herbizidwirkstoffe, die in die Wirkstoffklasse „B“ des *Herbicide Resistance Action Committee* (HRAC) eingeordnet werden, blockieren das Enzym Acetolactat-Synthase (ALS) von Pflanzen und sind daher unter dem Begriff ALS-Inhibitoren in der Literatur und Praxis bekannt.

Das Saatzuchtunternehmen *KWS Saat SE* und das Pflanzenschutzunternehmen *Bayer CropScience AG* arbeiten seit 2001 mit konventionellen Zuchtmethoden an der Züchtung gegenüber ALS-Inhibitoren nicht sensitiven Zuckerrübengenotypen (KWS 2012). Beim Anbau dieses Genotyps wäre ein breiter Einsatz von Herbiziden mit ALS-Inhibitoren möglich. Bislang ist nur der Wirkstoff Triflursulfuron-methyl aus dieser Herbizidgruppe in Zuckerrüben zugelassen. Das Dossier für ein entsprechendes Herbizid, das unter dem Namen *Conviso[®]* zugelassen werden soll, ist bereits eingereicht. Das Konzept eines Herbizids, das ALS-Inhibitoren enthält, mit einer komplementären Sorte zu kombinieren, wird voraussichtlich als *Conviso Smart[®]* Technologie eingeführt werden (KWS 2015). Eine komplementäre Sorte wurde 2016 zur Wertprüfung angemeldet und könnte 2018 für die Markteinführung zur Verfügung stehen.

Der breite Einsatz von ALS-Inhibitoren könnte zukünftig eine Erweiterung der Unkrautkontrolle in Zuckerrüben in Zentraleuropa bieten, die heute in einigen Punkten an ihre Grenzen stößt. Zu diesen zählt zum einen die mangelnde Selektivität an jungen Zuckerrübenpflanzen. Zum anderen ist der Anteil schwer bekämpfbarer Unkräuter in den letzten 15 Jahren gestiegen sowie weisen einige Unkräuter Resistenzen gegenüber den meist eingesetzten Wirkstoffen auf. Zudem ist eine Reduktion der hohen Pflanzenschutzintensität im Zuckerrübenanbau mit den



heutigen Herbiziden nicht zu realisieren. Es gibt bisher keine wissenschaftlichen Daten darüber, ob die Conviso Smart[®] Technologie einen Beitrag zu einer innovativen Unkrautkontrolle in Zuckerrüben leisten kann.

Notwendigkeit der Unkrautkontrolle in Zuckerrüben

Der Hauptbestandteil des in der Europäischen Union (EU) verbrauchten Zuckers ist Rübenzucker aus der EU. Die Zuckerproduktion der EU betrug im Wirtschaftsjahr 2014/2015 19,27 Mio. Tonnen. Der Verbrauch betrug 19,22 Mio. Tonnen, was einem Pro-Kopf-Verbrauch von 38,1 kg entspricht, und war damit nur etwas geringer als die Produktion (WVZ 2016). Um die benötigte Zuckerproduktion gewährleisten zu können, ist es notwendig das Ertragspotenzial der Zuckerrüben auszuschöpfen. Die Unkrautkontrolle ist dabei eine der wesentlichen ackerbaulichen Maßnahmen. Zuckerrüben konkurrieren mit Unkräutern um Licht, Wasser und Nährstoffe (Hock et al. 1995). Neben vergleichsweise geringen Qualitätsverlusten, wie dem Anstieg des Natriumgehaltes, wird besonders der Rübenertrag negativ von Verunkrautung beeinflusst (Bräutigam 1998). Bei ausbleibender Unkrautkontrolle sind Ertragsverluste von bis zu über 90% (Jursik et al. 2008) oder gar ein Totalausfall durch unwirtschaftliche Erntebedingungen möglich.

Die wesentlichen Einflussmerkmale auf den Ertrag sind Zeitpunkt und Dauer des Auftretens sowie Dichte und Art der Verunkrautung. Aufgrund der langsamen Jugendentwicklung ist die Konkurrenzkraft junger Zuckerrüben gegenüber schnell und hoch wachsenden Unkräutern vergleichsweise gering. Eine frühe Verunkrautung in einem sich entwickelnden Zuckerrübenbestand verursacht höhere Ertragsverluste als eine Spätverunkrautung in einem geschlossenen Zuckerrübenbestand.



Besonders in der frühen Jugendentwicklung kann eine zeitliche Verzögerung des Auftretens von nur einer Woche signifikante Ertragsunterschiede mit sich bringen (Schäufele & Wellmann 1997, Wellmann 1999). Bei einer Spätverunkrautung sind zumeist keine Ertragsverluste mehr zu erwarten.

In Anlehnung an das zeitliche Auftreten der Verunkrautung nimmt die Dauer der Verunkrautung Einfluss auf den Ertrag. Zuckerrüben stehen bei Anwesenheit von Unkräutern in steter Konkurrenz zur Verunkrautung. So kann durch Ausbleiben einer Applikation der Unkrautdeckungsgrad zwischen 10 und 70% ansteigen und sich entsprechend negativ auf den Ertrag auswirken (Brandes 2000).

Die Unkrautarten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Konkurrenzkraft. So sind Ertragsverluste durch niedrig wachsende Unkräuter wie der Vogelmiere (*Stellaria media* (L.) Vill.), die unterhalb des Blattapparates der Zuckerrüben wächst, vergleichsweise gering (Schäufele 1991). Schnell und hoch wachsende Unkräuter, wie der Weiße Gänsefuß (*Chenopodium album* L.), können hingegen hohe Ertragsverluste verursachen, was in erster Linie auf die Konkurrenz um Licht zurückzuführen ist (Wellmann 1999). Auch die Unkrautart nimmt indirekt Einfluss auf den Zeitpunkt des Auftretens und die Dichte der Verunkrautung (Scott & Wilcockson 1976). Es treten verschiedene Unkrautarten zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahresverlauf auf, wodurch Frühjahrskeimer im Zuckerrübenanbau eine besondere Rolle spielen. Noch dazu unterscheiden sie sich in der Unkrautdichte aufgrund unterschiedlicher Samenmengen im Boden. Hierdurch dominieren Unkräuter wie *C. album* und *Matricaria recutita* L. im Zuckerrübenanbau (Buhre et al. 2011).



Charakteristik der Unkrautkontrolle in Zuckerrüben

Zu Beginn des Zuckerrübenanbaus wurden Unkräuter durch das Hacken von Hand kontrolliert. In den 1890er Jahren kamen erstmalig Maschinenhacken und Sulfate zum Einsatz (Cioni & Maines 2011). Ab den 1930er Jahren wurden die ersten organisch chemischen Stoffe (Pentachlorphenol 1937, Propham 1946, Endothal 1951, Dalapon 1954) vor der Saat zur Unkrautkontrolle eingesetzt. Bis in die 1960er Jahre war das Hacken von Hand dennoch üblich, denn als Folge des bis dahin verwendeten multigermen Saatgutes war das Verziehen ein obligater Handarbeitsschritt, bei dem parallel das Unkraut gehackt werden konnte. Seitdem stieg die chemische Unkrautkontrolle mit der Zulassung von Ethofumesat, Chloridazon, Metamitron und Phenmedipham an. Mit diesen Wirkstoffen war erstmalig eine vielseitige Kontrolle von dikotylen Unkräutern möglich (Petersen 2003). Diese Wirkstoffe wurden vorrangig in hohen Aufwandmengen im Vorauflauf appliziert, was bis in die 1980er Jahre vorherrschend war. Aufgrund ökologischer und ökonomischer Aspekte wurden dann die Aufwandmengen um etwa zwei Drittel reduziert und auflaufende Unkräuter in mehreren Nachauflaufapplikationen behandelt (Cioni & Maines 2011). Dieses System wird bis heute üblicherweise im zentraleuropäischen Zuckerrübenanbau angewendet und hat sich seitdem bis auf wenige Wirkstoffe nicht verändert.

Die heutige Strategie der Unkrautkontrolle ist von Vasel et al. (2012) auf Datengrundlage einer deutschlandweiten Betriebsbefragung analysiert worden. Demnach wird auf etwa 50% der Zuckerrübenflächen in Deutschland Glyphosat vor der Aussaat appliziert. Je nach Verunkrautung und Bodenart werden Unkräuter ebenfalls durch eine Bodenbearbeitung vor der Aussaat beseitigt. Nach der



Zuckerrübenaussaat sind je nach Verunkrautung drei bis fünf Applikationen notwendig. Die Applikationen werden jeweils zum Auflaufen der Unkräuter terminiert. Eine präzise Applikation zum Keimblattstadium der Unkräuter ist notwendig (May & Wilson 2006). Im Durchschnitt wurden zwischen 2010 und 2014 jährlich 3,85 Applikationen je Schlag durchgeführt (PAPA, 2016a). Die Applikationen erfolgen bis die Zuckerrüben gegenüber den Unkräutern konkurrenzstark genug sind und ein weiteres Auflaufen oder etwaige Ertragseinbußen nicht mehr zu befürchten sind. In den ersten drei Applikationen werden etwa drei bis fünf und in den letzten beiden Applikationen ein bis drei Wirkstoffe je Applikation ausgebracht (Vasel et al. 2012). Es werden sowohl Wirkstoffe, die hauptsächlich über das Blatt aufgenommen und schnell wirksam sind (z. B. Phenmedipham) als auch Wirkstoffe, die hauptsächlich über die Wurzeln aufgenommen und länger im Boden aktiv sind (z. B. Metamitron), appliziert (Liehe & Pape 2015). Die Abstände zwischen den einzelnen Applikationen sind wiederum von der Verunkrautung aber besonders von der Witterung abhängig. Durchschnittlich betragen sie fünf bis 14 Tage (Cioni & Maines 2011, Petersen 2003, Vasel et al. 2012). Durch den Einsatz von ALS-Inhibitoren könnte der Applikationszeitpunkt flexibler sein und durch eine verlängerte Wirkung im Boden die Abstände zwischen den Applikationen vergrößert werden.

Selektivität

Neben der präzisen Applikation zum Keimblattstadium der Unkräuter ist es notwendig, die Witterungsverhältnisse sowie Vitalität der Zuckerrüben zu berücksichtigen. Bei hohen Aufwandmengen in Kombination mit ungünstigen Witterungsverhältnissen können phytotoxische Schäden an Zuckerrüben auftreten



(Hamouzová et al. 2013, May & Wilson 2006). Besonders bei hoher Lichtintensität oder bei kühler und feuchter Witterung über mehrere Tage kann es vermehrt zu Phytotoxizität kommen. Dieser Effekt kann sich bei schlechter Vitalität der Zuckerrüben verstärken. Deshalb werden Herbizide oftmals in den frühen Morgen- oder Abendstunden appliziert (Liehe & Pape 2015). Symptome der Phytotoxizität sind beispielsweise Vergilbungen, Verformungen, Nekrosen, Wuchsdepressionen und Pflanzenverluste (EPPO 1/135 (3)). Im Vergleich zu den leichten Schäden wie Vergilbungen und Verformungen, können Wuchsdepressionen und Pflanzenverluste den Ertrag je nach Aufwandmenge und Schädigung zwischen 2 – 30% verringern (Beißner 2000, Pfeleiderer et al. 2001). Die Schonung einer Kulturpflanze bei gleichzeitiger Kontrolle der Unkräuter durch eine Herbizidanwendung wird als Selektivität bezeichnet (Aust et al. 2005). Die Wirkstoffe sowie Produkte unterscheiden sich in ihrer Selektivität bereits durch ihre Formulierung. Um eine möglichst hohe Selektivität zu erzielen ist bei der Unkrautkontrolle durch Herbizide auf Wirkstoffe, Produkte, Witterung, Vitalität und Applikationszeitpunkt zu achten. Mit dem Einsatz von nicht sensitiven Sorten gegenüber ALS-Inhibitoren ist eine hohe Selektivität zu erwarten. Bei hoher Selektivität könnte zum einen die Flexibilität der Applikationen steigen und zum anderen das Risiko von Ertragsverlusten vermindert werden.

Resistenzen

Die bereits in den 1960er Jahren eingeführten Wirkstoffe Ethofumesat, Phenmedipham und Metamitron werden heute bei nahezu jeder Applikation (99,9%) angewendet. Desmedipham findet in 72,4% aller Applikation Anwendung (Vasel et



al. 2012). Metamitron blockiert das Photosystem II der Unkräuter und Ethofumesat, Phenmedipham und Desmedipham blockieren die Lipid-Synthese (nicht ACCase). Eine über Jahrzehnte fast unveränderte Strategie der Unkrautkontrolle und der hohe Aufwand von Wirkstoffen mit nur zwei Wirkorten erhöht das Risiko Herbizid resistente Unkräuter zu selektieren (Balgheim 2006). Fälle von Weißem Gänsefuß (*Chenopodium album* L.), der weniger anfällig gegenüber Metamitron ist, sind bereits in Zuckerrüben aufgetreten (Mechant et al. 2008, Varrelmann & Kalfa 2013). Die Erweiterung der eingesetzten Wirkstoffgruppen, wie es bei einer Zulassung von Conviso[®] der Fall wäre, könnte das Resistenzrisiko vermindern. Untersuchungen zu Resistenzen sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Unkrautaufreten und Intensität des Herbizideinsatzes in Deutschland

Parallel zu der breiten Anwendung der Herbizid-Strategie hat sich die Unkrautzusammensetzung in den letzten 20 Jahren verändert. So ist der Anteil von Gänsefußgewächsen (z.B. *C. album*) von 47 auf 79%, Kamillearten (*Matricaria* spp.) von 16 auf 34%, Einjährigem Bingelkraut (*Mercurialis annua* L.) von 9 auf 25% und Knötericharten (*Polygonum* spp.) von 35 auf 86% der Zuckerrübenflächen in Deutschland von 1996 zu 2010 gestiegen (Buhre et al. 2011). Gänsefußgewächse und Knötericharten sind die dominierenden Unkrautarten im Zuckerrübenanbau. Einjähriges Bingelkraut, Kamillearten und Knötericharten sind als schwer bekämpfbar eingestuft (Vasel et al. 2012). Das bedeutet, dass mit der üblichen (wie oben beschriebenen) Herbizid-Strategie eine vollständige Kontrolle dieser Unkrautarten nicht gewährleistet ist. ALS-Inhibitoren könnten jedoch Wirkungslücken der schwer bekämpfbaren Unkräuter schließen.



Eine Quantifizierung der Intensität des Pflanzenschutzmitteleinsatzes in Deutschland erfolgt über die Berechnung des Behandlungsindex (BI) (Roßberg et al. 2009). Dieser wird mit folgender Formel (1) berechnet:

(1)

$$\text{Behandlungsindex} = \sum \left(\frac{\text{Aufwandmenge}}{\text{Zugelassene Aufwandmenge}} \times \frac{\text{Behandelte Fläche}}{\text{Totale Fläche}} \right)$$

Es steigt mit jeder Applikation oder mit steigenden Aufwandmengen auch die Intensität. Eine Reduktion der Intensität wäre also durch eine Reduktion der Anzahl der Applikationen oder durch die Reduktion der applizierten Wirkstoffe möglich. In den Jahren 2010 bis 2014 lag der BI von Herbiziden in Zuckerrüben durchschnittlich bei 2,64 (PAPA, 2016b). Diese Intensität ist im Vergleich zu anderen Pflanzenschutzmitteln wie Fungiziden und Insektiziden, die einen BI von 1,00 bzw. 0,18 in diesen Jahren hatten, relativ hoch.

Der Nationale Aktionsplan Pflanzenschutz (NAP) ist Teil der Umsetzung der EU-Pflanzenschutz-Rahmenrichtlinie 2009/128/EG. Im NAP ist gefordert, dass die Risiken der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln bis 2023 um 30% zu den Mittelwerten aus 1996 – 2005 reduziert werden sollen. Eine Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes bei Zuckerrüben wäre bei einem Vergleich der Pflanzenschutzmittel für Herbizide am effektivsten und bezüglich der Umsetzung am wahrscheinlichsten. In Anbetracht der heutigen Herbizid-Strategie erscheint weder eine Reduktion der Wirkstoffmengen noch der Anzahl der Applikationen mit den bisher eingesetzten Herbiziden möglich. Mit einer Reduktion der Wirkstoffmenge



oder der Anzahl der Applikationen durch die Conviso Smart[®]-Technologie könnte sich zumindest die Intensität gemessen am BI verringern.

ALS-Inhibitoren zur Unkrautkontrolle

Die Firma DuPont forschte in den 1970er Jahren mit Sulfonylharnstoffen als ALS-Inhibitoren zur Unkrautkontrolle. Anfang der 1980er Jahre kam der erste Wirkstoff dieser Wirkstoffklasse in den USA auf den Markt (Drobny et al. 2012). Seitdem werden ALS-Inhibitoren vorrangig gegen dikotyle aber auch monokotyle Unkräuter im Ackerbau eingesetzt. Es reichen vergleichsweise geringe Mengen von 5 bis 60 g ha⁻¹ aus. Heutzutage werden ALS-Inhibitoren auch in Europa in den Hauptackerbaukulturen wie Getreide, Mais und Kartoffeln zur Unkrautkontrolle eingesetzt. Die durch die Herbizide blockierten Aminosäuren sind für den menschlichen Organismus essentiell. Das wiederum bedeutet, dass der menschliche Organismus diesen Wirkort nicht besitzt und diese Herbizide entsprechend eine besonders geringe Humantoxizität mit sich bringen (Drobny et al. 2012).

Wirkmechanismus von ALS-Inhibitoren

Die verzweigten Aminosäuren Valin, Leucin und Isoleucin sind wichtige Bausteine für den Stoffwechsel innerhalb der Pflanze (Duggleby & Pang 2000). Das Enzym ALS katalysiert den jeweils ersten Schritt von zwei Synthesepfaden in der Biosynthese der Aminosäuren. Aus zwei Molekülen Pyruvat wird Acetolactat gebildet, das als Ausgangsstoff für Valin und Leucin fungiert. Oder aus je einem Molekül Pyruvat und Ketobutyrat wird Aceto-hydroxybutyrat gebildet, welches als Ausgangsstoff für