

Management der Bodensamenbank von Raps durch Bodenbearbeitung und Genotypenwahl – Bilanz aus drei Projektjahren

S. Gruber, K. Emrich und W. Claupein

Managing the soil seed bank of oilseed rape by tillage and genotype selection – a survey of three project years

1 Einleitung

Für eine Koexistenz von transgenem und konventionellem Raps (*Brassica napus* L.) sind Ausfallverluste von Samen bei der Rapsernte, Überdauerungsfähigkeit der Samen und die dafür ausschlaggebenden pflanzenbaulichen Maßnahmen wiederholt zu hinterfragen und neu zu bewerten. Bei Ausfallverlusten von Samen von rund 1 % des Ertrags vor der Rapsernte (PAHKALA und SANKARI, 2001) bzw. bis zu 11 % des Ertrags vor und während der Ernte (PRICE et al., 1996; GULDEN et al., 2003) kann im Durchschnitt mit einem Sa-

menausfall in der Höhe von 2 bis 3 dt ha⁻¹ bzw. 4.000 bis 6.000 Samen m⁻² gerechnet werden (CRAMER, 1990). Neben unmittelbaren ökonomischen Einbußen durch die Ertragsminderung sind mittel- und langfristig unerwünschte Effekte von Durchwuchsrap zu erwarten, da Rapssamen mit sekundärer Dormanz lange Zeit im Boden überdauern (SCHLINK, 1998; ROLLER et al., 2002; LUTMAN et al., 2003; PEKRUN, 2004). Erste Arbeiten (PEKRUN et al., 1997a, MOMOH et al., 2002) weisen darauf hin, dass bei der sekundären Dormanz von Raps eine genotypische Variation vorliegt, wie sie für Dormanz allgemein bei verschiede-

Summary

The study aimed at strategies for managing the soil seed bank of oilseed rape and minimizing gene dispersal by transgenic volunteers. Three-year results and well-combined approaches were evaluated in one overall approach. Varieties differed in dormancy from 8–46 % in the laboratory. Corresponding field experiments showed that low-dormancy genotypes established a smaller soil seed bank than high-dormancy genotypes. 7–9 % of seeds from harvesting losses entered the soil seed bank after immediate stubble tillage. This number was below 0.6 % when the soil was temporarily or always untilled. Therefore, low-dormant genotypes should be grown in combination with appropriate soil tillage. The data allow individual risk calculations on farm level since the reference value „seed loss“ can be easily determined by farmers. Scenario calculations for risk assessment studies can be well supported by the data.

Key words: Volunteer oilseed rape, *Brassica napus*, dormancy, seed bank, gene dispersal, soil tillage.

Zusammenfassung

Dreijährige Ergebnisse methodisch und inhaltlich verzahnter Versuchsansätze wurden gemeinsam verrechnet, um Strategien für das Management des Bodensamenvorrats von Raps zu entwickeln, die das Potenzial für Gentransfer über transgenen Durchwuchsrap minimieren. Im Laborversuch zeigte sich eine sortenabhängige Dormanz der Rapsamen von 8 bis 46 %. Im korrespondierenden Feldversuch bildeten gering dormante Sorten einen kleineren Bodensamenvorrat als höher dormante Sorten. 7 bis 9 % der Ausfallverluste gingen in den Bodensamenvorrat ein, wenn Stoppelbearbeitung unmittelbar nach der Ernte erfolgte. Spät durchgeführte Stoppelbearbeitung oder unterlassene Bodenbearbeitung führte zu einem Bodensamenvorrat von unter 0,6 %. Gering dormante Genotypen sollten daher gezielt eingesetzt und mit geeigneter Bodenbearbeitung kombiniert werden. Die gewonnenen Daten erlauben wegen der praxistauglichen Bezugsgröße „Samenverluste“ eine individuelle Schätzung des Potenzials für Durchwuchsrap auf Betriebsebene sowie Szenariokalkulationen.

Schlagerworte: Durchwuchsrap, *Brassica napus*, Dormanz, Bodensamenvorrat, Gentransfer, Bodenbearbeitung.

nen Wild- und Kulturpflanzen gefunden wurde (NAYLOR und JANA, 1976; BURAAS und SKINNES, 1984; GARBUTT und WITCOMBE, 1986; LI und FOLEY, 1997; FOLEY und FENNIMORE, 1998; DE PAUW und MCCRAIG, 1991; NYACHIRO et al., 2002).

Ein entscheidender Faktor für die Ausbildung von sekundärer Dormanz ist die Einwirkung von Licht bestimmter Wellenlänge auf das Phytochromsystem von gequollenen Samen (BEWLEY und BLACK, 1994; CASAL und SÁNCHEZ, 1998). Auch Rapssamen lassen sich im Labor unter Trockenstress (niedriges osmotisches Potenzial des umgebenden Mediums) bei Dunkelheit (d. h. Ausschluss bestimmter Lichtqualitäten) in den Zustand von Lichtsensitivität bzw. Dormanz versetzen (PEKRUN, 1994; SCHLINK, 1994; PEKRUN et al., 1997b). Für die landwirtschaftliche Praxis bedeutet das, dass nach der Rapsernte bei gewöhnlich trockener Sommerwitterung mit anschließender Stoppelbearbeitung ausgefallene Samen in trockenen Boden eingearbeitet werden, wo Bedingungen herrschen, die Dormanz induzieren. Die Art der Bodenbearbeitung hat somit einen deutlichen Einfluss auf die Ausbildung einer Bodensamenbank von Raps (PEKRUN et al., 2006) und auflaufenden Durchwuchsrapss.

Bei gentechnisch verändertem Durchwuchsrapss könnte die wirtschaftliche Schadensschwelle für Durchwuchsrapss deutlich niedriger liegen als bei konventionellem Durchwuchsrapss, da bereits 0,9 % transgene Bestandteile in Produkten nach der EU-Kennzeichnungspflicht deklariert werden müssen. Daher soll nach Möglichkeiten gesucht werden, über das Management des Bodensamenvorrats Durchwuchsrapss zu minimieren. Die Arbeit sollte erstmals in methodisch aufeinander aufbauenden und sich fachlich ergänzenden Versuchsansätzen im Labor und unter praxisnahen Bedingungen auf dem Feld prüfen, ob und wie sich Rapsdurchwuchs und das Potenzial für Gentransfer minimieren lässt. Da viele Methoden zur Datenerhebung, z. B. des Bodensamenvorrats, in der Praxis schwer anwendbar sind, sollte die Menge an ausgefallenen Samen als Bezugsgröße verwendet werden, die vom Landwirt ohne größeren Aufwand ermittelt werden kann.

Der erste hier beschriebene Versuchsansatz verfolgte die Untersuchung der genotypischen Variation der Überdauerungsneigung und somit der Chancen, über Züchtung und Sortenwahl Durchwuchsrapss einzugrenzen; mit dem zweiten Ansatz wurden Möglichkeiten untersucht, durch geeignete Bodenbearbeitung zur Reduzierung des Bodensamenvorrats beizutragen. Die Studie fasst dreijährige Versuchsergebnisse zusammen und nimmt eine Gesamtbewertung vor.

2 Material und Methoden

2.1 Genotypische Variation der Überdauerungsneigung

(A) Laborversuch: Sekundäre Dormanz wurde im Labor nach dem Hohenheimer Standardtest geprüft. Proben von 4×100 gereinigten und äußerlich intakten Rapssamen wurden auf 90 mm-Petrischalen mit einer Doppellage Filterpapier gegeben, die mit 8 ml Polyethylenglykollösung (PEG) versetzt waren. Die Lösung entsprach einem Trockenstress von -15 bar (permanenter Welkepunkt) bei 20 °C (MICHEL und KAUFMANN, 1979). In Stapeln zu 4×4 Petrischalen wurden die Proben vollständig randomisiert in einen Metallkasten von $22 \times 22 \times 10$ cm verbracht, mit dunkler Plastikfolie bedeckt und mit einem Deckel verschlossen, so dass Lichtzutritt vermieden wurde. Bei 20 °C und in Dunkelheit fand eine 14-tägige Dormanzinduktion im Keimschrank statt. Nach dieser Induktionsphase wurden die Samen in Petrischalen mit einer Doppellage Filterpapier und 6 ml deionisiertem Wasser übertragen, um nicht-dormanten Samen über einen Zeitraum von 14 Tagen die Keimung zu ermöglichen. Gekeimte Samen wurden am 2., 4. und 14. Tag des Keimtests entfernt. Am 4. Tag des Keimtests wurden alle verbliebenen Samen auf neue Petrischalen mit frischem Wasser übertragen, um eventuell noch anhaftendes PEG weitgehend zu verdünnen. Alle Arbeiten fanden ab der Zugabe der Samen in die Petrischale nur unter grünem Sicherheitslicht (500–600 nm) statt. Im Keimtest ungekeimte Samen wurden über sieben Tage einer Dormanz brechenden Wechseltemperaturbehandlung unterzogen (Licht/Dunkelheit; 30 °C/3 °C/12/12 h). Samen, die erst während dieser Behandlung keimten, galten als vorher sekundär dormant, während ungekeimte Samen als nicht lebensfähig eingestuft wurden.

Der Laborversuch zur genotypischen Variation der Überdauerungsneigung wurde mit vier Sorten aus dem Feldversuch (Versuch B) mit Material der Erntejahre 2002 und 2003 durchgeführt. Jeder Versuchsansatz im Labor wurde innerhalb von zwei Monaten nach der Ernte dreimal vorgenommen, so dass insgesamt je Sorte 12×100 Samen getestet wurden. Zusätzlich zur Dormanzinduktion wurde als Kontrolle ein Keimtest in Dunkelheit und bei Licht angelegt (Bedingungen wie im oben beschriebenen Keimtest), um eventuell auftretende primäre Dormanz zu bestimmen.

(B) Feldversuch: In den Jahren 2001 und 2002 wurden die Winterrapssorten Artus, Bristol, Capitol und Liberator in einem Blockdesign mit vier Wiederholungen und einer Par-

zellengröße von 10×10 m auf der Versuchsstation Ihinger Hof der Universität Hohenheim ausgesät. Auf den ausgewählten Flächen hatte zu diesem Zeitpunkt seit mindestens zehn Jahren kein Rapsanbau stattgefunden. Artus und Liberator sind die nah-isogenen Pendanten zu den transgenen, herbizidresistenten Sorten Avalon^{LL} und Lilly^{LL}. Nach der Ernte, d. h. im Sommer 2002 bzw. 2003, begann der eigentliche Versuch mit den bei der Ernte auf der Fläche ausgefallenen Rapsamen. Ausfallverluste beim Drusch wurden bestimmt, indem am Tag der Ernte 50×70 cm große Tücher bodennah im stehenden Bestand zwischen von Hand durchtrennten Rapsstängeln verteilt wurden, um die Samen aufzufangen. Die ausgefallenen Samen wurden von Hand gereinigt, gezählt sowie auf Keimfähigkeit und Dormanz geprüft. Innerhalb von 24 Stunden nach der Rapsernte erfolgte eine flach-mulchende Stoppelbearbeitung mit einer Dyna-Drive. Vor der Aussaat der Nachfrucht Winterweizen im Dezember 2002 bzw. Oktober 2003 wurde der Boden auf 20–25 cm Tiefe gepflügt. In der Nachfrucht Winterweizen wurden keine Herbizide eingesetzt, um einem Maximum an Durchwuchsrap das Auflaufen zu ermöglichen und ein „Worst-Case-Szenario“ zu schaffen. Zwischen Stoppel- und Grundbodenbearbeitung wurde je Parzelle auf $10 \times 0,025$ m die Anzahl auflaufender Durchwuchsrapspflanzen bestimmt. Zur Erfassung des Bodensamenvorrats wurde nach ca. 6 Monaten, kurz vor Vegetationsbeginn, Bodenproben mit einem 11×15 mm Bohrstock in den Tiefen 0–10, 10–20 und 20–30 cm Tiefe gezogen. Je Parzelle wurden 40 Einstiche vorgenommen. Die Bodenproben wurden eingefroren und ca. 3 Monate gelagert. Die Bestimmung des Bodensamenvorrats erfolgte durch Auswaschen mit einem Nasssiebgerät. Alle äußerlich intakten und festen Rapsamen galten als Teil des Bodensamenvorrats, da aus vorangehenden Versuchen hervorging, dass diese Samen hoch keimfähig waren (Daten nicht gezeigt). Im jeweils folgenden Frühjahr und Sommer wurde die Anzahl der im Winterweizen keimenden und ggf. blühenden und fruchtenden Rapspflanzen auf der gesamten Parzelle gezählt.

2.2 Einfluss der Bodenbearbeitung

Im Versuchsansatz mit künstlichen Ausfallverlusten (C) wurden auf der Versuchsstation Ihinger Hof im Sommer 2001 und 2002 das Äquivalent von 10.000 Samen m^{-2} der Winterrapssorten Artus und Liberator auf einer Getreidestoppel ausgestreut. Das Versuchsdesign war eine Spaltanlage mit Bodenbearbeitung als Großteilstückfaktor und Sorte als Kleinteilstückfaktor, mit vier Wiederholungen und einer Parzellengröße von 4×10 m. Nach dem Ausstreuen der Samen auf die Bodenoberfläche mit einer Sämaschine ohne Einsatz der Säscharre wurde die Bodenbearbeitung in vier Varianten vorgenommen (Tabelle 1).

In den Varianten „S₀/P“ und „S₀/G“ wurde die Stoppel innerhalb von 24 Stunden nach dem Sameneintrag mit einer Dyna-Drive auf ca. 8 cm Tiefe bearbeitet, während in Variante „S₄/P“ die Stoppelbearbeitung und somit auch die Einarbeitung der Rapsamen erst vier Wochen später erfolgte. In Variante „-/-“ erfolgte keinerlei Bodenbearbeitung. In den Varianten „S₀/P“ und „S₄/P“ wurde zur Grundbodenbearbeitung vor der Nachfrucht Winterweizen der Pflug auf ca. 20 cm Tiefe eingesetzt, während in Variante „S₀/G“ nicht-wendende Bodenbearbeitung mit dem Grubber auf ca. 15 cm Tiefe erfolgte. Alle weiteren Erhebungen und Maßnahmen entsprachen denen in Versuch B, Kapitel 2.1.

Der Versuchsansatz mit natürlichen Ausfallverlusten (D) bestand aus einer Blockanlage in vier Wiederholungen mit den beschriebenen Bodenbearbeitungsvarianten (Tabelle 1). Der Sameneintrag erfolgte durch den Anbau und Drusch der Winterrapssorte Liberator in den Jahren 2002 (Ernte) und 2003 (Ernte). Im Gegensatz zu den künstlichen Ausfallverlusten (C) mit einer definierten, hohen Samenmenge auf einer Getreidestoppel im ersten Versuchsansatz herrschten hier bezüglich des Bodenzustands und der Menge an Ausfallrap praxisnahe Bedingungen. Die Bestimmung der Ausfallverluste sowie die weiteren Erhebungen und Maßnahmen waren analog den Verfahren für Versuch B.

Tabelle 1: Varianten der Bodenbearbeitung; S: Stoppelbearbeitung, P: Pflug, G: Grubber; 0: keine Zeitverzögerung zwischen Ernte und Stoppelbearbeitung, 4: 4 Wochen zwischen Ernte und Stoppelbearbeitung

Table 1: Tillage treatments; S: stubble tillage, P: plough, G: rigid tine cultivator; 0: no delay between harvesting and stubble tillage, 4: 4 weeks delay between harvesting and stubble tillage

| Variante | Stoppelbearbeitung | Zeitpunkt Stoppelbearbeitung | Grundbodenbearbeitung |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| S ₀ /P | Dyna-Drive, 8 cm ¹⁾ | sofort (0 Wochen) | Pflug 20–25 cm |
| S ₄ /P | Dyna-Drive, 8 cm ¹⁾ | nach 4 Wochen | Pflug 20–25 cm |
| S ₀ /G | Dyna-Drive, 8 cm ¹⁾ | sofort (0 Wochen) | Grubber 15–18 cm |
| -/- | keine (Direktsaat) | – | – |

¹⁾ flach mulchendes Stoppelbearbeitungsgerät mit stark mischender Wirkung

2.3 Statistische Auswertung

Die Versuche wurden über alle Jahre und beim Versuchsansatz zur Bodenbearbeitung auch über beide Teilversuche (C und D) ausgewertet. Die statistische Analyse erfolgte über generalisierte lineare gemischte Modelle (GLMMs). Diese kombinieren verschiedene Verteilungsannahmen und Transformationen der Zielvariablen über sogenannte Linkfunktionen miteinander (SAS 9.13, PROC GLIMMIX, Tabelle 2). Die Transformationen erwiesen sich als notwendig, da gemischte lineare Modelle sehr hohe Varianzheterogenität der Merkmale aufwiesen. Diese Eigenschaft wird häufig bei Zähldaten beobachtet. Die Zählwerte wurden durch die Anzahl ausgefallener Samen dividiert und – nach Bedarf – mit einer hohen Konstanten (z. B. 10.000) multipliziert, um Rundungsfehler zu reduzieren. Die GLMMs modellierten Bodenbearbeitung und/oder Sorten als feste Behandlungseffekte, während Jahre und Wiederholungen (Blöcke) als zufällig angesehen wurden (PIEPHO et al., 2003). Die Mittelwertvergleiche erfolgten mit der Option SIM, einem simulationsbasierten Ansatz (verwendetes

Statement: LSMEANS VARIETY/PDIFF ADJUST=SIM ILINK CL PLOTS=DIFFPLOT). Diese Option hält im unbalancierten Fall das versuchsbezogene Testniveau ein.

3 Ergebnisse

3.1 Genotypische Variation der Überdauerungsneigung

Bei den vier geprüften Winterrapsorten traten im Laborversuch (Versuch A) signifikante genotypische Unterschiede in der Ausbildung sekundärer Dormanz auf (Tabelle 3). Die Sorten Capitol und Liberator zeigten mit rund 45 bzw. 46 % dormanten/lebensfähigen Samen eine deutlich höhere Überdauerungsneigung als die Sorten Artus und Bristol mit 9 bzw. 12 % Dormanz.

Im Herbst nach der Rapsernte liefen 27 bis 39 % der eingetragenen Samen auf (Versuch B). Eine klare Sortendifferenzierung zeigte sich beim Bodensamenvorrat, der 4 % (Artus) bis 20 % (Liberator) der eingebrachten Samenmen-

Tabelle 2: Verwendete Transformationen

Table 2: Transformations

| Versuch | Merkmal | Verteilung | Linkfunktion |
|---|---------------------|--|--------------|
| Genotypen Labor (A) Genotypen Feld (B) | Sekundäre Dormanz | Binomialverteilung | Logit |
| | Herbstaufgang in WW | Normalverteilung | Logarithmus |
| Bodenbearbeitung (C, D) | Bodensamenvorrat | Betaverteilung | Logit |
| | Frühjahrsaufgang | Normalverteilung | Logarithmus |
| | Blüte Durchwuchsrap | Geom. Verteilung der wurzeltransf. Werte | Logarithmus |
| | Herbstaufgang in WW | Normalverteilung | Logarithmus |
| | Bodensamenvorrat | Normalverteilung | Logarithmus |
| | Frühjahrsaufgang | Normalverteilung | Logarithmus |
| | Blüte Durchwuchsrap | Normalverteilung | Logarithmus |

Tabelle 3: Dormanz (% dormante/lebensfähige Samen), Bodensamenvorrat und Durchwuchsrap im Herbst und Frühjahr als Anteil (%) am Sameneintrag von vier Winterrapsorten, im Mittel der Erntejahre 2002 und 2003. Transformierte Werte in Klammern; s.e.d.: Standardfehler der Differenz; Mittelwertvergleiche halten den versuchsbezogenen Fehler 1. Art ein (5 %)

Table 3: Dormancy % (dormant/viable seeds), soil seed bank and volunteers in autumn and spring as proportion (%) of the seed rain of four winter oilseed rape varieties; mean of two years; in brackets: transformed data, s.e.d.: standard error of difference; comparisons of means comply with family-wise error rate type I (5 %)

| Sorte | Dormanz ¹⁾ | Auflauf Herbst ²⁾ | Bodensamenvorrat ³⁾ | Auflauf Frühjahr ⁴⁾ | Blüte Durchwuchs ⁵⁾ |
|---------------|------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | in % des Sameneintrags | | | | |
| Artus | 7,8 c | 39,0 (-0,94) a | 3,6 (-3,29) c | $0,5 \times 10^{-4}$ (-5,37) b | $0,5 \times 10^{-4}$ (-2,65) a |
| Bristol | 12,4 b | 31,5 (-1,16) ab | 7,3 (-2,54) bc | $0,5 \times 10^{-4}$ (-5,34) b | $0,8 \times 10^{-4}$ (-2,42) a |
| Capitol | 44,8 a | 37,0 (-0,99) a | 16,5 (-1,62) ab | $36,2 \times 10^{-4}$ (-1,02) a | $7,6 \times 10^{-4}$ (-1,29) a |
| Liberator | 46,4 a | 26,9 (-1,31) b | 19,8 (-1,40) a | $3,0 \times 10^{-4}$ (-3,49) b | $3,3 \times 10^{-4}$ (-1,70) a |
| s.e.d. trans. | (0,216) | (0,1561) | (0,4127–0,6798) | (1,020) | (1,0660–1,588) |

¹⁾ % dormante/lebensfähige Samen;

²⁾ zwischen Rapsernte und Aussaat Winterweizen;

³⁾ sechs Monate nach der Rapsernte;

⁴⁾ im ersten Frühjahr nach der Rapsernte;

⁵⁾ im ersten Frühjahr/Sommer nach der Rapsernte; alle Erhebungen vor bzw. in der Nachfrucht Winterweizen

ge betrug. Die Werte für im Frühjahr auflaufenden und blühenden Durchwuchsrapss unterlagen einer sehr großen Streuung, die sich in sehr großen Konfidenzintervallen widerspiegelte. Unterschiede zwischen den Sorten waren daher kaum sicher messbar. Die maximale Anzahl blühender Pflanzen mit Potenzial zur Auskreuzung betrug weniger als 0,001 % des Sameneintrags. Zwischen der Ausbildung sekundärer Dormanz und dem Umfang des Bodensamenvorrats lag bei der sehr geringen Anzahl von vier geprüften Sorten eine signifikante positive Korrelation von 0,98 vor (Abbildung 1).

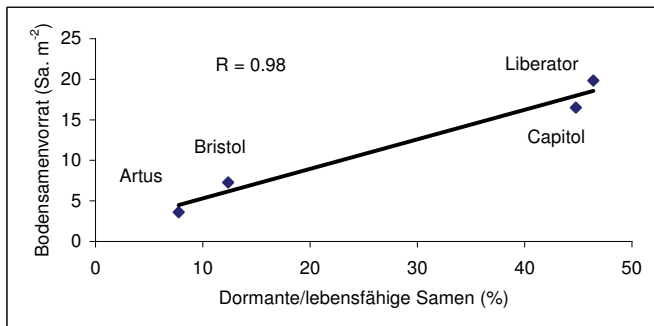


Abbildung 1: Korrelation zwischen sekundärer Dormanz und Umfang des Bodensamenvorrats bei vier Wintererapssorten, Mittelwerte aus zwei Jahren, $n = 4$, $P < 0,05$

Figure 1: Correlation between secondary dormancy and size of the soil seed bank of four winter oilseed rape varieties; mean of two years, $n = 4$, $P < 0.05$

3.2 Einfluss der Bodenbearbeitung

Im Zeitraum zwischen dem Eintrag der Rapssamen durch Ernteverluste bzw. gezieltem Ausstreuen und der Aussaat der Nachfrucht Winterweizen liefen im Herbst zwischen 20 % und 30 % der eingetragenen Samen auf (Versuche C

und D, Tabelle 4). In Variante „-/-“ ohne jegliche Bodenbearbeitung bis zur Weizenaussaat war signifikant weniger Ausfallrapss zu beobachten als in den übrigen Varianten mit Stoppel- und Grundbodenbearbeitung.

Der Bodensamenvorrat betrug ein halbes Jahr nach dem Sameneintrag bei den Varianten mit sofortiger Stoppelbearbeitung rund 7 % (S_0/G) bzw. rund 9 % (S_0/P) der eingetragenen Samenmenge und hob sich damit signifikant von den Varianten „ S_4/P “ und „-/-“ ab (Tabelle 4). Hier überdauerten weniger als 0,6 % der eingetragenen Samen. Signifikante Wechselwirkungen mit den Sorten lagen nicht vor. Aus dem Bodensamenvorrat lief in der Variante „ S_0/G “ im ersten Frühjahr der meiste Durchwuchsrapss auf, der später auch zur Blüte kam (Tabelle 4). Am wenigsten blühender Durchwuchsrapss wurde in den Varianten mit wendender Grundbodenbearbeitung gefunden (S_0/P , S_4/P). Die Konfidenzintervalle waren für dieses Merkmal sehr groß, so dass eine abgesicherte Aussage nicht möglich ist. Insgesamt blieb der Anteil blühenden Durchwuchsrapsses gemessen am Sameneintrag in Winterweizen als erster Nachfrucht zu Raps im Durchschnitt der drei Versuchsjahre und -ansätze deutlich unter 0,001 % des Sameneintrags. Zwischen der Anzahl im Herbst aufgelaufener Samen und dem späteren Bodensamenvorrat bestand weder über alle Varianten noch in jeder einzelnen Variante eine relevante Beziehung (Korrelationskoeffizient zwischen -0,22 und 0,32, n. s.).

Nach wendender Bodenbearbeitung (S_0/P , S_4/P) lagen die Samen überwiegend in einer Tiefe von 10–20 cm vor (Abbildungen 2 und 3), während sie nach nicht-wendender Bearbeitung mit dem Grubber (S_0/G) vor allem oberflächennah in 0–10 cm verbracht worden waren. Auch in der Variante „-/-“ ohne Bodenbearbeitung kamen Samen in tieferen Bodenschichten vor.

Tabelle 4: Bodensamenvorrat und Durchwuchsrapss im Herbst und Frühjahr als Anteil (%) am Sameneintrag, als Effekt der Bodenbearbeitung, Mittel von drei Jahren und Teilversuchen C und D. Transformierte Werte in Klammern; s.e.d.: Standardfehler der Differenz; Mittelwertvergleiche halten den versuchsbezogenen Fehler 1. Art ein (5 %)

Table 4: Soil seed bank and volunteers in autumn or spring as proportion (%) of the seed input, as effected by tillage; mean of three years and two sub-experiments; in brackets: transformed data, s.e.d.: standard error of difference; comparison of means comply with family-wise error rate type I (5 %)

| Variante | Auflauf Herbst ¹⁾ | Bodensamenvorrat ²⁾ | in % des Sameneintrags | |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | Auflauf Frühjahr ³⁾ | Blüte Durchwuchs ⁴⁾ |
| S_0/P | 28,7 (3,35) a | 8,90 (2,19) a | $1,7 \times 10^{-3} (-4,06)$ b | $2,2 \times 10^{-6} (-3,81)$ b |
| S_4/P | 30,9 (3,43) a | 0,39 (-0,95) b | $0,7 \times 10^{-3} (-4,99)$ c | $0,3 \times 10^{-6} (-5,74)$ b |
| S_0/G | 28,8 (3,36) a | 7,01 (1,95) a | $10,3 \times 10^{-3} (-2,27)$ a | $49,8 \times 10^{-6} (-0,70)$ a |
| -/- | 20,3 (3,01) b | 0,58 (-0,55) b | $2,6 \times 10^{-3} (-3,34)$ b | $25,2 \times 10^{-6} (-1,38)$ a |
| s.e.d. transf | (0,1119) | (0,4557) | (0,3630) | (1,0467) |

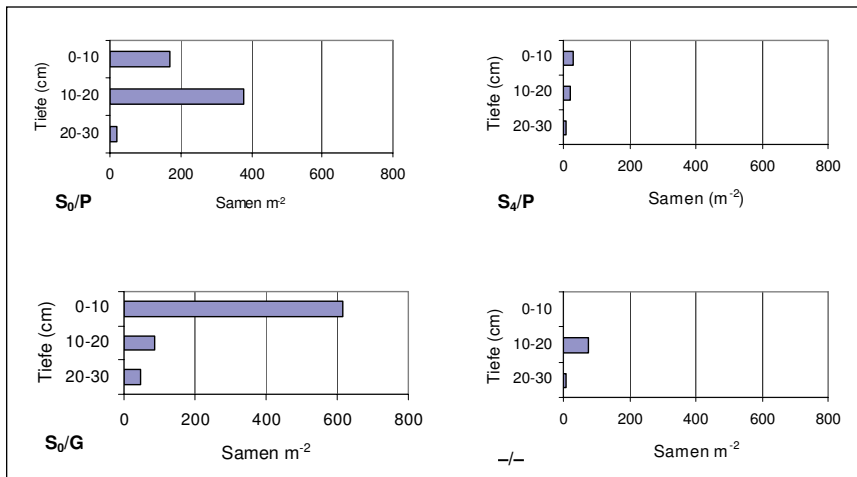


Abbildung 2: Umfang und vertikale Verteilung des Bodensamenvorrats von Raps im Frühjahr 2002 und 2003, sechs Monate nach künstlichem Sameneintrag von 10.000 Samen m^{-2} (Versuch C) nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung S_0/P , S_4/P , S_0/G und $-/-$

Figure 2: Size and vertical distribution of the soil seed bank of oilseed rape in spring 2002 and 2003, six months after broadcasting 10,000 seeds m^{-2} on the soil, as effected by tillage S_0/P , S_4/P , S_0/G and $-/-$

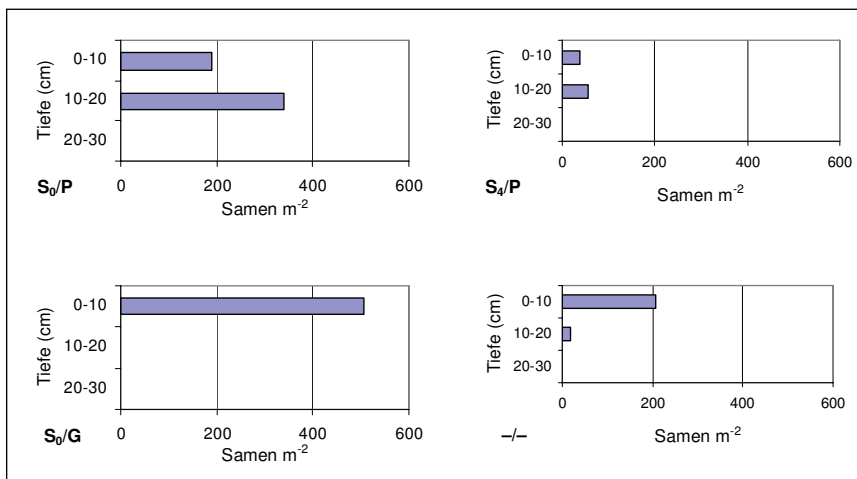


Abbildung 3: Umfang und vertikale Verteilung des Bodensamenvorrats von Raps im Frühjahr 2003 und 2004, sechs Monate nach natürlichem Sameneintrag von 1.000–3.000 Samen m^{-2} (Versuch D), nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung S_0/P , S_4/P , S_0/G und $-/-$

Figure 3: Size and vertical distribution of the soil seed bank of oilseed rape in spring 2003 and 2004, six months after seed input by harvesting losses of 1,000–3,000 seeds m^{-2} , as effected by tillage S_0/P , S_4/P , S_0/G and $-/-$


4 Diskussion

Mit den vorliegenden Ergebnissen wurde gezeigt, dass das Konzept einer Kombination unterschiedlicher methodischer Ansätze das Phänomen „Samenüberdauerung und Durchwuchsrap“ umfassend und neuartig beschreibt. Die Ergebnisse der vier Sorten im Laborversuch zur Dormanz integrieren sich in die Spannweite von 32 Winterrapssorten aus derselben Studie mit deutlich genotypischem Charakter sekundärer Dormanz von 3 bis 76 % dormanten/lebensfähigen Samen im Labor (Tabelle 5). Der nächste Annäherungsschritt an Praxisbedingungen ergab in einem modellhaften Vergrabungsexperiment im Boden eine Überdauerungsfähigkeit von Samen derselben Rapssorten mit je nach Sorte 7 bis 90 %. Dieser Versuchsansatz zeigte weiterhin, dass intakt im Boden aufgefundene Samen in hohem Maße keimfähig sind (99 %, GRUBER, unveröffent-

licht), so dass generell bei einem aufgefundenen Bodensamenvorrat mit einer hohen Keimfähigkeit gerechnet werden kann. Diese Ergebnisse wurden auch bei mehrjähriger Überdauerung der Samen im Boden (30 Monate) bestätigt (GRUBER und CLAUPEIN, 2007). Im letzten Annäherungsschritt an die Praxis wurden unter Feldbedingungen in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung Überdauerungsraten von 0 bis rund 30 % gefunden.

Die gemeinsame Auswertung der mehrjährigen Feldversuche in der vorliegenden Studie hat die Ergebnisse einzelner Versuchsjahre trotz stark unterschiedlicher Witterung (GRUBER et al., 2004b, 2005) untermauert. Rapssorten mit geringer Dormanz führten klar zu geringem Bodensamenvorrat, während Sorten mit höherer Dormanz einen signifikant größeren Bodensamenvorrat aufbauten. Dieses Potenzial spiegelte sich allerdings nur eingeschränkt in Durchwuchsrap im Frühjahr und Sommer wider, da hier

Tabelle 5: Methodische Verzahnung der Versuchsansätze zum Management der Bodensamenbank
 Table 5: Methodological approaches for managing the soil seed bank

| Experiment. Umfeld | Methode | Eigenschaft | Spannweite | Quelle |
|--|--------------------|--|------------------------------------|---------------------------------------|
| Labor  Praxis | 1. Labortest | Genotypische Variation sekundärer Dormanz | 3,2 – 75,6 % dormante Samen | GRUBER, 2004; GRUBER et al., 2004a |
| | 2. Samen Vergraben | Genotypische Variation der Samenüberdauerung | 7,2 – 89,7 % überdauernde Samen | GRUBER et al., 2004a |
| | 3. Feldversuch | Genotypen und Bodensamenvorrat Bodenbearbeitung und Bodensamenvorrat | 0,0 – 28,5 % des Sameneintrags | GRUBER et al., 2004b, 2004c, 2005 |

jahresbedingte Einflüsse (z. B. Fraßschäden oder Schneebedeckung) auftraten. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Umfang des Bodensamenvorrats und blühendem Durchwuchsrapr konnte für das erste Versuchsjahr gezeigt werden (GRUBER et al., 2004c). Die fehlende Korrelation zwischen der Menge der im Herbst aufgelaufenen Samen und dem Umfang des Bodensamenvorrats stellt die geläufige Auffassung, dass der Bodensamenvorrat von Raps durch Bodenbearbeitung und Anregung zur Keimung klein gehalten werden kann, deutlich in Frage. Erst durch mehrmalige flache Stoppelbearbeitung erzielten PEKRUN et al. (2006) einen ähnlich geringen Bodensamenvorrat wie ohne Stoppelbearbeitung. Ziel jeglicher Bearbeitung nach der Rapsernte darf daher nicht die Schaffung eines Saatbetts für Ausfallrapr sein, sondern die Schaffung von Bedingungen, die Dormanzinduktion vermeidet und Samenverluste fördert (GRUBER, 2004; GRUBER et al., 2005; PEKRUN et al., 2006). Daher ist neben der Sortenwahl die günstigste Strategie zur Vermeidung eines großen Bodensamenvorrats, den Boden mehrere Wochen unbearbeitet zu lassen. So werden die Samen Verlustfaktoren, z. B. Prädatoren, ausgesetzt, und sie können im Licht keine sekundäre Dormanz entwickeln. Erweiterte Versuche zur Bodenbearbeitung mit Samen und mit inertem Granulat bestätigen diese Ergebnisse (GRUBER und CLAUPEIN, 2006).

Die meisten Durchwuchspflanzen fanden sich im folgenden Frühjahr nicht unbedingt in den Varianten mit dem größten Bodensamenvorrat, sondern vielmehr bei oberflächennahem Samenvorrat, d. h. nach nicht-wendender oder ohne Bodenbearbeitung, wie für Unkrautsamen oder Samen-Imitate beschrieben (COUSENS und MOSS, 1990; ROGER-ESTRADE et al., 2001; PEKRUN et al., 2003, GRUBER und CLAUPEIN, 2006). Nach reduzierter, nicht-wendender Bodenbearbeitung bietet sich zur Vermeidung von transgenem Durchwuchs eine Nachfrucht an, mit der sich Durchwuchsrapr gut kontrollieren lässt, z. B. Sommergetreide.

Um das Auftreten von Durchwuchsrapr in der ersten Nachfrucht und in der gesamten Rotation zu minimieren, ist nach der mehrwöchigen Unterlassung jeglicher Bodenbearbeitung ein tiefes Vergraben der (relativ wenigen) verbliebenen Samen mit dem Pflug von Vorteil.

Es liegt kein Hinweis darauf vor, dass herbizidresistente, transgene Sorten sich auf Grund des Transgens in ihrem Überdauerungsvermögen und Dormanzausprägung von den nah-isogenen Sorten (Artus, Liberator) unterscheiden (GRUBER, 2004). Daher sind die Ergebnisse generell auf transgene Sorten übertragbar, solange keine neuartige transgene Eigenschaft direkt oder indirekt das Überdauerungsvermögen verändert. Gering dormante Raprsgenotypen wurden mehrfach beschrieben (GRUBER et al., 2004a; PEKRUN, 1997a; MOMOH et al., 2002; GULDEN et al., 2004) und sind daher offenbar in den anbaurelevanten Sortimenten bereits vertreten; auch scheint eine gezielte Selektion auf geringe Dormanz grundsätzlich möglich (GRUBER und CLAUPEIN, 2004). Hier könnten Ideotypen speziell für transgenen Rapr entwickelt werden.

Die Studie hat gezeigt, dass mit praxistauglichen Maßnahmen ein gezieltes Management der Bodensamenbank möglich ist, um das Potenzial für Gentransfer stark einzuschränken. Ein Screening und eine Beschreibung der anbaurelevanten Sorten hinsichtlich ihrer Dormanzneigung wären für den Landwirt in Zukunft hilfreich. Züchtungsprogramme könnten sich für neue Transformationen auf gering dormante Genotypen als Ausgangsmaterial stützen. Die Studie bietet dem Landwirt oder Berater durch das umfangreiche Datenmaterial auf Basis der vom Landwirt leicht zu erfassenden Ausfallverluste wertvolle Hinweise auf das individuelle Risiko eines großen Bodensamenvorrats. Diese Daten sollen auch in einfach zu handhabende Modellkalkulationen einfließen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch das BMBF gefördert und durch BayerCropScience, die Deutsche Saatveredelung und die Norddeutsche Pflanzenzucht unterstützt. Die Ergebnisse sind Grundlage für die prämierte Präsentation im Rahmen des Ernst-Klapp-Zukunftspreises 2005 der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften bei deren 48. Jahrestagung in Wien.

Literatur

- BEWLEY, J.D. and M. BLACK (1994): Seeds: Physiology of Development and Germination. 2. ed., Plenum Press, New York.
- CRAMER, N. (1990): Raps: Anbau und Verwertung. 1. Aufl., Ulmer, Stuttgart.
- BURAAS, T. and H. SKINNES (1984): Genetic investigations on seed dormancy in barley. *Hereditas* 101, 235–244.
- CASAL, J.J. and R.A. SÁNCHEZ (1998): Phytochromes and seed germination. *Seed Sci. Res.* 8, 317–329.
- COUSENS, R. and S.R. MOSS (1990): A model of the effects of cultivation on the vertical distribution of weed seeds within the soil. *Weed Res.* 30, 61–70.
- DE PAUW, R.M. and T.N. MCCRAIG (1991): Components of variation, heritabilities and correlations for indices of sprouting tolerance and seed dormancy in *Triticum* ssp. *Euphytica* 52, 221–229.
- FOLEY, M.E. and S.A. FENNIMORE (1998): Genetic basis for seed dormancy. *Seed Sci. Res.* 8, 173–182.
- GARBUTT, K. and J.R. WITCOMBE (1986): The inheritance of seed dormancy in *Sinapis arvensis* L. *Heredity* 56, 25–31.
- GRUBER, S. (2004): Genotypische Variation der Überdauerungsneigung von transgenem und konventionell gezüchtetem Raps und Möglichkeiten der Beeinflussung durch Bodenbearbeitung als Beitrag zur Sicherheitsforschung bei transgenen Kulturpflanzen. Diss. Hohenheim.
- GRUBER, S. and W. CLAUPEIN (2004): Secondary dormancy of oilseed rape: first aspects of heredity. Proc. 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia.
- GRUBER, S. and W. CLAUPEIN (2006): Effect of soil tillage intensity on seedbank dynamics of oilseed rape compared with plastic pellets as reference material. *J. Plant Dis. Prot., Special Issue XX*, 173–280.
- GRUBER, S. and W. CLAUPEIN (2007): Low-dormancy oilseed rape genotypes – what can they contribute to co-existence? Proc. 3rd International Conference on Co-Existence between Genetically Modified (GM) and non-GM based Agricultural Supply Chains, Seville, Spain, 259–260.
- GRUBER, S., C. PEKRUN and W. CLAUPEIN (2004a): Seed persistence of oilseed rape: variation in transgenic and conventionally bred cultivars. *J. Agr. Sci. (Cambridge)* 142, 29–40.
- GRUBER, S., C. PEKRUN and W. CLAUPEIN (2004b): Population dynamics of volunteer oilseed rape (*Brassica napus* L.) affected by tillage. *Eur. J. Agr.* 20, 351–361.
- GRUBER, S., C. PEKRUN and W. CLAUPEIN (2004c): Reducing oilseed rape volunteers by selecting genotypes with low seed persistence. *J. Plant Dis. Prot., Special Issue XIX*, 151–159.
- GRUBER, S., C. PEKRUN and W. CLAUPEIN (2005): Life cycle and potential gene flow of volunteer oilseed rape in different tillage systems. *Weed Res.* 45, 83–93.
- GULDEN R.H., S.J. SHIRTLIFFE and A.G. THOMAS (2003): Harvest losses of canola (*Brassica napus*) cause large seedbank inputs. *Weed Sci.* 51, 83–86.
- GULDEN, R.H., A.G. THOMAS and S.J. SHIRTLIFFE (2004): Relative contribution of genotype, seed size and environment to secondary seed dormancy potential in Canadian spring oilseed rape (*Brassica napus*). *Weed Res.* 44, 97–106.
- LI, B. and M.E. FOLEY (1997): Genetic and molecular control of seed dormancy. *Trends Plant Sci.* 2, 384–389.
- LUTMAN, P.J.W., S.E. FREEMAN and C. PEKRUN (2003): The long-term persistence of seeds of oilseed rape (*Brassica napus*) in arable fields. *J. Agr. Sci. (Cambridge)* 141, 231–240.
- MICHEL, B.E. and M.R. KAUFMANN (1979): The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.* 51, 914–916.
- MOMOH, E.J.J., W.J. ZHOU and B. KRISTIANSSON (2002): Variation in the development of secondary dormancy in oilseed rape genotypes under conditions of stress. *Weed Res.* 42, 446–455.
- NAYLOR, J.M. and S. JANA (1976): Genetic adaptation for seed dormancy in *Avena fatua*. *Canadian J. Bot.* 54, 306–312.
- NYACHIRO, J.M., F.R. CLARKE, R.M. DE PAUW, R.E. KNOX and K.C. ARMSTRONG (2002): Temperature effects on seed germination and expression of seed dormancy in wheat. *Euphytica* 126, 123–127.

- PAHKALA K. and H. SANKARI (2001): Seed loss as a result of pod shatter in spring rape and spring turnip rape in Finland. *Agr. Food Sci. Finland* 10, 209–216.
- PIEPHO, H.P., A. BÜCHSE and K. EMRICH (2003): A hitchhiker's guide to the mixed model analysis of randomized experiments. In: *J. Agr. Crop Sci.* 189, 310–322.
- PEKRUN, C. (1994): Untersuchungen zur sekundären Dormanz bei Raps (*Brassica napus* L.). Diss. Göttingen.
- PEKRUN, C., A. EL TITI and W. CLAUPEIN (2003): Implications of soil tillage for crop and weed seeds. In: *El Titi: Soil tillage in agro-ecosystems*. CRC Press LRC, Boca Raton (FL), 115–146.
- PEKRUN, C. (2004): Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Überdauerung von Samen und andere pflanzenbauliche Parameter unter besonderer Berücksichtigung der Populationsdynamik von Ausfallraps. Habil. Hohenheim.
- PEKRUN, C., T.C. POTTER and P.J.W. LUTMAN (1997a): Genotypic variation in the development of secondary dormancy in oilseed rape and its impact on the persistence of volunteer rape. *Proc. 1997 Brighton Crop Protection Conference – Weeds*, Brighton, UK, 243–248.
- PEKRUN, C., P.J.W. LUTMAN and K. BAEUMER (1997b): Induction of secondary dormancy in rape seeds (*Brassica napus* L.) by prolonged imbibition under conditions of water stress or oxygen deficiency in darkness. *Eur. J. Agr.* 6, 245–255.
- PEKRUN, C., P.J.W. LUTMAN, A. BÜCHSE, A. ALBERTINI and W. CLAUPEIN (2006): Reducing gene escape in time by appropriate post-harvest tillage – Evidence from field experiments with oilseed rape at 10 sites in Europe. *Eur. J. Agr.* 25, 289–298.
- PRICE, J.S., R.N. HOBSON, M.A. NEALE and D.M. BRUCE (1996): Seed losses in commercial harvesting of oilseed rape. *J. Agr. Eng. Res.* 65, 183–191.
- ROGER-ESTRADE, J., N. COLBACH, P. LETERME, G. RICHARD and J. CANEILL (2001): Modelling vertical and lateral weed seed movements during mouldboard ploughing with a skim-coulter. *Soil and Till. Res.* 63, 35–49.
- ROLLER, A., H. BEISMANN and H. ALBRECHT (2002): Persistence of genetically modified, herbicide-tolerant oilseed rape – first observations under practically relevant conditions in South Germany. *J. Plant Dis. Prot., Special Issue XVIII*, 255–260.
- SCHLINK, S. (1994): Ökologie der Keimung und Dormanz von Körnerraps (*Brassica napus* L.) und ihre Bedeutung für eine Überdauerung der Samen im Boden. Diss. Göttingen.
- SCHLINK, S. (1998): 10 years survival of rape seed (*Brassica napus* L.) in soil. *J. Plant Dis. Prot., Special Issue XVI*, 169–172.

Anschrift der Verfasser

Sabine Gruber, W. Claupein, Institut für Pflanzenbau und Grünland, Universität Hohenheim (340), 70593 Stuttgart, Deutschland

E-Mail: grubersf@uni-hohenheim.de

Katharina Emrich, Krebsregister Rheinland-Pfalz, Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI), 55101 Mainz, Deutschland

Eingelangt am 19. März 2007

Angenommen am 8. September 2008