

1 Einleitung und Problemstellung

Bodenbearbeitung ist untrennbar mit Ackerbau verbunden. Überall da, wo annuelle Kulturpflanzen angebaut werden, wird der Boden, mindestens beim Sävorgang, gestört. Bodenbearbeitung wird mit dem Ziel durchgeführt, negative Effekte des vorangegangenen Kulturpflanzenanbaus zu beseitigen und den Boden für die Aussaat und das Gedeihen der nächsten Kultur vorzubereiten. Eines der wichtigsten Ziele der Bodenbearbeitung ist es hierbei, das Schicksal von Samen zu beeinflussen.

Der Zusammenhang zwischen Bodenbearbeitung und Auflaufbedingungen für **ausgesäte Kulturpflanzen** ist den Menschen vermutlich schon seit Beginn des Ackerbaus bewusst. Durch Bodenbearbeitung wird zum einen die bis dahin an dem Standort befindliche Vegetation beseitigt und damit die Konkurrenzsituation für die auszusäende Kulturpflanze verbessert. Zum anderen wird der folgende Aussaatprozess erleichtert und die Auflaufwahrscheinlichkeit der gesäten Kulturen erhöht. Darüber hinaus sind die Feuchteverhältnisse im Boden meist günstiger als auf der Bodenoberfläche, sodass Samen, die in den Boden gesät werden, meist bessere Keimbedingungen vorfinden als Samen, die auf einem unbearbeiteten Boden ausgebracht werden. Hinzu kommt, dass die Wahrscheinlichkeit von Fraß durch Vögel, Nager oder andere Tiere verringert werden kann, wenn Saatgut in den Boden statt auf die Bodenoberfläche abgelegt wird.

Durch Bodenbearbeitung wird nicht nur das ausgesäte Saatgut beeinflusst, sondern auch das Schicksal von vor und während der Ernte **ausgefallenen Kulturpflanzen- und Unkrautsamen**. Das Überleben dieser Samen ist unerwünscht. Nach der Ernte wird deshalb versucht, einen möglichst großen Anteil dieser Samen zur Keimung zu bringen. Dies geschieht, indem für ausgefallene Kulturpflanzen- und Unkrautsamen ein Keimbett bereitet wird. Dieses verbessert die Wasserversorgung der ausgefallenen Körner, hat darüber hinaus aber auch andere Effekte, die im Rahmen dieser Arbeit näher beleuchtet werden sollen. Samen, die in den Boden eingearbeitet sind, sind Umweltbedingungen ausgesetzt, die eher Dormanz erhalten als Dormanz abbauen. Diese Samen sind dem Fraß durch Vögel und andere Tiere entzogen. Es stellt sich zudem die Frage, inwiefern frisch gereifte Unkrautsamen im Sommer keimbereit sind und inwiefern somit die Schaffung eines Saatbetts Keimung von ausgefallenen Unkrautsamen begünstigen kann.

Die **Zwischenbrachezeit** und die Intensität der Bodenbearbeitung in dieser Zeit können sehr unterschiedlich ausfallen. Die Bodenbearbeitung kann sehr intensiv erfolgen, z. B. mit mehrfach wiederholter Stoppelbearbeitung, später folgender wendender Bearbeitung auf Krumentiefe und darauf folgenden Saatbettbereitungsmaßnahmen. Sie kann aber auch auf ein Minimum, nämlich den Sävorgang selber, beschränkt bleiben, wie z. B. in Direktsaatsystemen. Die Zeit, die zur Bodenbearbeitung in der Zwischenbrachezeit verbleibt, kann ebenfalls stark variieren. Sie kann nur wenige Tage betragen, z. B. wenn im sofortigen Anschluss an eine Hauptfrucht eine Zwischenfrucht eingesät wird. Sie kann nur wenige Wochen betragen, wie z. B. zwischen Wintergerste und Winterraps. Sie kann jedoch auch mehrere Monate betragen, wie z. B. zwischen Wintergerste und Zuckerrüben, oder ein Jahr und länger, wie in niederschlagsarmen Gebieten, wo aus Gründen der Wasserersparnis jeweils ein Brachejahr zwischen zwei Anbaujahren eingefügt werden muss.

Die Bodenbearbeitung hat sich im Laufe der Jahrhunderte und Jahrtausende des Ackerbaus erheblich gewandelt. Heute wird sie in Abhängigkeit von Klima und Boden, in Abhängigkeit von den ökonomischen Rahmenbedingungen sowie den Vorlieben des Betriebsleiters sehr unterschiedlich durchgeführt. Insofern kann man nicht von ‚Bodenbearbeitung‘ im Allgemeinen sprechen, sondern wenn es sich um relativ kurzfristige Betrachtungen über einen absehbaren Zeitraum handelt, von **Bodenbearbeitungsverfahren** sowie bei längerfristigen Betrachtungen von **Bodenbearbeitungssystemen**.

In Eurasien und Nordafrika steht seit der neolithischen Revolution der Pflug im Zentrum der Bodenbearbeitungsgeräte. Dies ist anders als auf dem Amerikanischen Kontinent, wo vor Ankunft der Europäer eine Hackkultur betrieben wurde. In den Anfängen des Ackerbaus in Mesopotamien und Ägypten sowie auch bei den steinzeitlich lebenden Menschen in Europa handelte es sich hierbei zunächst um einfache, handbetätigte **Hakenpflüge** (SÖHNE 1992). Diesen wurden später Rinder als Zugtiere vorgespannt, sodass ein Teil der menschlichen Arbeitskraft freigesetzt werden konnte, der anderweitig in Gewerbe, Bildung von städtischen Siedlungen, Kunst etc. tätig sein konnte und so den Grundstein für folgende kulturelle Entwicklungen bildete. Die Hakenpflüge wurden sehr lange beibehalten. Sie führten zu einer eher lockernden als wendenden Arbeitsweise und wurden mehrfach und über Kreuz eingesetzt. Erst im Mittelalter wurden Streichblechpflüge entwickelt, mit denen eine vollständige Wendung des Bodenbalkens und damit nach nur einmaliger Bearbeitung ein ‚reiner Tisch‘ erreicht werden konnte. Die mittelalterlichen Pflüge waren jedoch noch überwiegend aus Holz hergestellt und damit in ihrer Wirkungsweise mit den heute verwendeten Pflügen nicht zu vergleichen. Der große Durchbruch bei der Konstruktion von Pflügen kam erst im 18. und vor allen Dingen im 19. Jahrhundert als Folge der industriellen Revolution. In Amerika und Europa entstanden **Pflugfabriken**, z. B. Ransomes (England), John Deere (USA), Eberhardt (Ulm), Sachs (Leipzig), um nur einige zu nennen.

Die Bodenbearbeitung wurde jedoch auch im 18. und 19. Jahrhundert noch in vollkommen anderer Weise durchgeführt als heute. Der Boden wurde offensichtlich **relativ häufig und flach** bearbeitet. Eine flachere Bearbeitung beruhte auf der geringeren Zugkraft vor Einführung der Schlepper. Häufigere Bearbeitung war vermutlich aufgrund stärkeren Unkrautdrucks nötig. So schreibt HABERLANDT (1879), dass man für die Vorbereitung des Ackers zwei- bis viermal pflügen müsse. Er beschreibt unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten von Herbst- und Frühjahrsfurche. Offensichtlich wurde der Pflug auch zur Saatbettbereitung verwendet. Zu Raps schlägt er z. B. vor, zunächst eine Sturzfurche zu ziehen (Stoppelsturz), danach eine tiefe Furche zur Unterbringung des Düngers und schließlich eine sehr flache Saatsfurche. Auch noch in der Mitte des 20. Jahrhunderts wurde Bodenbearbeitung z. T. sehr intensiv durchgeführt, wie aus den Ausführungen von BULLEN (1977) zu entnehmen ist: *„Ungefähr vor einer Generation war es nicht unüblich, ein Feld mehr als einmal zu pflügen und danach mehrere Bearbeitungsgänge mit Eggen oder Scheibenwerkzeugen anzuschließen. Zum Teil wurde der Acker zehnmal oder häufiger bearbeitet, z. B. für Kartoffeln oder Wurzelfrüchte.“*

Im 19. Jahrhundert gab es allerdings gleichzeitig auch schon erste Überlegungen, ob eine wendende Bodenbearbeitung notwendig ist und wenn ja warum. Darüber hinaus wurde der Sinn von Bodenbearbeitung insgesamt hinterfragt. Es herrschte zwar allgemein die Meinung vor, dass Bodenbearbeitung und speziell Pflügen für das Gedeihen der Kulturpflanzen notwendig sei, wie

man z.B. an folgendem Satz von HABERLANDT (1879) ablesen kann: „*Jene Lockerung, welche auf natürlichem Wege erfolgt, ist für die Kulturpflanzen bei weitem nicht ausreichend. Sie genügt nur eine Wurzelbildung zu ermöglichen, wie sie wildwachsenden Pflanzen eigen ist.*“ Es gab jedoch auch bereits Personen wie BEATSON (1828) oder STURTEVANT (1885), die für eine **Beibehaltung der natürlichen Schichtung** des Bodens plädierten. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts und speziell in den 30-iger Jahren fanden diese Meinungen mehr Gehör und wurden von Personen wie HOLLDACK (1918) oder ACHENBACH (1921) aufgegriffen. Negative Effekte einer intensiven Bodenbearbeitung wurden in den 30-iger Jahren des 20. Jahrhunderts schließlich in den USA deutlich, wo es infolge der Inkulturnahme der Steppen in den Great Plains zu Winderosion in starkem Maße kam, welche schließlich zur Entwicklung von nicht wendenden Verfahren der Bodenbearbeitung führte (siehe BLEVINS & FRYE 1993).

In den 30-iger Jahren wurden die ersten **Exaktversuche** auch in Europa angelegt, z. B. in Gießen (SCHWIND 1938) und in Rothamsted, England (RUSSELL & KEEN 1941). Hierbei wurde deutlich, dass nicht wendende Bodenbearbeitung geringere Erträge als wendende Bodenbearbeitung hervorbringt. Die Versuche zeigten jedoch auch, dass bei Verzicht auf den Pflug Erträge erzielt werden können, die an die bei Pflugarbeit heranreichen. RUSSELL & KEEN (1941) zogen aus ihren Versuchen den Schluss, dass eine pfluglose Wirtschaft bei ausreichender Unkrautbekämpfung möglich und ertragreich sein würde. Sie befanden sich damit allerdings nach KUIPERS (1970) in ihren Ansichten der deutschen Schule entgegengesetzt, die die Bedeutung der durch Bodenbearbeitung herbeizuführenden Bodengare weiterhin sehr hoch einschätzte und natürlichen Boden als nachteilig für das Wachstum von Kulturpflanzen betrachtete (ROEMER 1929).

Während vor dem Zweiten Weltkrieg noch auf die Unkraut bekämpfende Wirkung des Pflugs nicht verzichtet werden konnte, änderte sich die Situation grundlegend mit der Einführung wirksamer Herbizide in der Landwirtschaft. Damit begann eine umfangreiche Versuchstätigkeit zur reduzierten Bodenbearbeitung, zunächst in den USA (z.B. MUSGRAVE *et al.* 1955), in den 60-iger Jahren auch in vielen Ländern Mitteleuropas: Großbritannien (HOOD *et al.* 1963, 1964, DAVIES & CANNELL 1975), Bundesrepublik Deutschland (KAHNT 1969, BAEUMER 1970), Holland (BAKERMANS & DE WIT 1970), Deutsche Demokratische Republik (STRACKE 1969, HERZOG & BOSSE 1969), Dänemark (SCHJØNNING 1989), Polen (BUTORAC 1994), Ungarn (BIRKAS *et al.* 1997b), Tschechien (KNÁKAL & PROCHÁZKOVÁ 1997).

Heute wird die Bodenbearbeitung in den gemäßigten Breiten ganz unterschiedlich durchgeführt. Es findet sich eine **Vielzahl von Verfahren** in der Praxis: von konventioneller Bodenbearbeitung mit Stoppelbearbeitung, wendender Grundbodenbearbeitung und anschließender Saattbettbereitung bis hin zur Direktsaat, bei der keinerlei Bodenbearbeitung mehr erfolgt mit Ausnahme des minimalen Eingriffs während der Saat. Zwischen diesen beiden Extremen liegt eine große Bandbreite an Verfahren, bei denen Bearbeitungstiefe, -häufigkeit und die Bodenbearbeitungsgeräte in ganz unterschiedlicher Kombination gewählt werden. Hierbei wird sehr häufig der Grubber als Gerät zur nicht wendenden Grundbodenbearbeitung eingesetzt, mit dem zuvor auch Stoppelbearbeitung durchgeführt wird. Sehr verbreitet ist ein Wechsel zwischen wendender und nicht wendender Bodenbearbeitung, angepasst an die jeweilige Vor- und Nachfrucht sowie in Abhängigkeit vom Bodenzustand.

Verfahren reduzierter Bodenbearbeitung und die Auswirkungen dieser Verfahren auf pflanzenbauliche und ökologische Parameter sind in den vergangenen Jahrzehnten weltweit sehr intensiv untersucht worden. Es gibt hierzu eine Vielzahl von Büchern und Übersichtsartikeln, die insbesondere die Auswirkungen von Bodenbearbeitungsverfahren in den gemäßigten Klimaten behandeln (CANNELL 1985, BAEUMER & EHLERS 1989, BUCHNER & KÖLLER 1990, CANNELL & HAWES 1994, CARTER 1994a, b, TEBRÜGGE & BÖHRNSEN 1994, 1997b, KAHNT 1995, PEKRUN & CLAUPEIN 1998b). Weniger gut untersucht ist hingegen die **Wirkung einzelner Bearbeitungsmaßnahmen**. Speziell zur Wirkung der Stoppelbearbeitung finden sich nur sehr begrenzt Arbeiten. In Lehrbüchern werden zwar jeweils mehrere Ziele der Stoppelbearbeitung beschrieben. Daten, die die Wirksamkeit der Stoppelbearbeitung belegen, liegen jedoch nur vereinzelt vor. Insbesondere zu der Frage der Beeinflussung der Überdauerung von Kulturpflanzensamen finden sich mit Ausnahme der Arbeiten von RAUBER (1985) und ISSELSTEIN (1987) zur Wintergerste keine detaillierten Untersuchungen. Hier besteht Forschungsbedarf. Dieser ist insbesondere vor dem Hintergrund der Einführung gentechnisch veränderter Kulturpflanzen von Relevanz, da die Überdauerung von Ausfallsamen transgener Kulturpflanzen Probleme in der Fruchtfolge verursachen kann sowie aus ökologischen Gründen unerwünscht ist.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Überdauerung von Samen und andere pflanzenbauliche Parameter darzustellen. Eine zentrale Stellung nimmt hierbei der Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Populationsdynamik von Ausfallraps ein. Um den Stand des Wissens zu diesem Thema darzulegen, werden den beiden Blöcken mit experimentellen Arbeiten zwei Kapitel mit einem Literaturüberblick vorangestellt. Zunächst wird der Stand des Wissens zum ‚Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche und ökologische Parameter‘ erläutert (Kapitel 2). Hieran schließt sich ein Kapitel an, in dem die Literatur zum ‚Einfluss der Bodenbearbeitung auf Samen‘ dargestellt wird (Kapitel 3). In dem folgenden Kapitel werden ‚Untersuchungen zur Wirkung der Bodenbearbeitung auf die Überdauerung und die Populationsdynamik von Ausfallraps‘ beschrieben (Kapitel 4). Zu dieser Frage wurden eingehende Untersuchungen auf mehreren Ebenen (Labor-, Modell-, Feldversuche, Modellierung) und an mehreren Standorten durchgeführt, um pflanzenbauliche Lösungsmöglichkeiten für das Problem Rapsdurchwuchs zu erarbeiten. Um die im Rahmen der Arbeiten mit Raps gefundenen Zusammenhänge in einen pflanzenbaulichen Kontext setzen zu können, folgten weitergehende ‚Untersuchungen zum Einfluss der Stoppelbearbeitung auf die Überdauerung von Kulturpflanzen- und Unkrautsamen sowie weitere pflanzenbauliche Parameter‘ (Kapitel 5). Im Zusammenhang mit diesen Daten sowie den Ergebnissen aus der Literatur wird schließlich die Wirkung der Bodenbearbeitung auf die Überdauerung von Samen und andere pflanzenbauliche Parameter in einer Gesamtbetrachtung diskutiert (Kapitel 6). Hierbei wird besonderes Gewicht auf die Wirkung der Stoppelbearbeitung gelegt, da diese eine Bodenbearbeitungsmaßnahme darstellt, die in jüngerer Zeit kaum Gegenstand der Forschung war, die jedoch vor dem Hintergrund sinkender Erlöse aus der landwirtschaftlichen Produktion sowie der möglichen Einführung gentechnisch veränderter Kulturpflanzen in ihrer pflanzenbaulichen und ökologischen Wirkung bewertet werden muss.

2 Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche und ökologische Parameter

Im Folgenden soll der Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche und ökologische Parameter dargelegt werden, so wie er sich in Feldversuchen in gemäßigten Klimabedingungen zeigt. Es wird hierzu nacheinander der Einfluss auf Bodenstruktur und Bodenleben, die Nährstoffdynamik, auf Unkräuter sowie Krankheiten und Schädlinge, schließlich der Einfluss auf die Ertragsbildung der Kulturpflanze und Umweltwirkungen betrachtet.

2.1 Bodenstruktur und Bodenleben

Bodenbearbeitung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bodenstruktur. Durch Bodenbearbeitung wird das Porenvolumen im bearbeiteten Horizont zunächst erhöht. Je nach Bodenart, Intensität der Bodenbearbeitung sowie Wassergehalt des Bodens zur Zeit der Bearbeitung entsteht hierdurch ein **Lockergefüge**. Gleichzeitig kann unterhalb des gelockerten Horizonts eine Verdichtungszone entstehen, vor allen Dingen dann, wenn bei zu nassem Boden bearbeitet wird. Ein durch mechanische Lockerung geschaffenes Lockergefüge besitzt im Vergleich zu einem natürlich dichten Boden nur eine geringe Tragfähigkeit. Nach einer Lockerung kommt es deshalb bald wiederum zu einer Minderung des Porenvolumens, zum einen durch gezielte maschinelle **Rückverdichtung**, zum anderen aber auch durch natürliche Sackung und durch Befahren mit Pflege- und Erntegeräten (KREUZ 1992, TEBRÜGGE 1994, GYURICZA *et al.* 1998, SCHJØNNING & RASMUSSEN 1989, EHLERS 1992, WATTS & DEXTER 1997, HORN 1986, HORN & LEBERT 1994, HORN *et al.* 1994, BALL *et al.* 1989, SOMMER *et al.* 1992, SOMMER & ZACH 1992, GRUBER 1994, SOANE & VAN OUWERKERK 1994).

Bodenbearbeitung beeinflusst im und am Boden lebende Tiere und Mikroorganismen. Das Bodenleben besitzt wiederum eine Rückwirkung auf die Bodenstruktur. In intensiv bearbeiteten Böden finden sich meist deutlich weniger **Regenwürmer** als in reduziert bearbeiteten Böden (GERARD & HAY 1979, DIEZ *et al.* 1988, FRIEBE & HENKE 1991, CLAUPEIN 1994c, FRIEBE 1994, TEBRÜGGE & WAGNER 1994, KORNMANN & KÖLLER 1997). Durch Bodenbearbeitung werden Regenwurmröhren zerstört, Regenwürmer direkt getötet sowie freigelegt und dem Fraß von Vögeln und anderen Fressfeinden ausgesetzt. Außerdem werden durch Bodenbearbeitung Erntereste eingearbeitet. Damit wird die Nahrungsgrundlage für Regenwürmer verschlechtert. Durch Bodenbearbeitung werden vertikal reichende Makroporen vernichtet, wie z. B. verlassene Wurzelgänge oder durch Trockenrisse entstandene Grobporen (BAEUMER & BAKERMANS 1973, EHLERS 1975, 1989, VORDERBRÜGGE 1989, WILKENS 1994). Entsprechend ist in bearbeiteten Böden die Durchlüftung des Unterbodens (BALL *et al.* 1989) und die Infiltrabilität häufig geringer als in unbearbeiteten Böden (BORCHERT 1988). In konventionell gepflügten Böden kommt es eher zu **Erosion**, was zum einen auf die im Vergleich zu unbearbeiteten Böden verringerte Infiltration zurückzuführen ist, zum anderen aber auch auf die fehlende Mulchdecke (DIEZ *et al.* 1988, BARKUSKY 1990, KWAAD *et al.* 1998). Eine dichte Mulchdecke mindert die Evaporation (BOND & WILLIS 1969, BIRKÁS & SZABÓ 1992, LAL 1994). Darüber hinaus mildert sie Temperaturschwankungen und wirkt so schützend auf das Bodenleben und als Folge hiervon wiederum positiv auf die Bodenstruktur (BALL *et al.* 1989, CANNELL & HAWES 1994).

Verringerte Evaporation in Kombination mit einer erhöhten Infiltrabilität und damit größeren Wassermengen, die bei Starkregenereignissen in den Boden gelangen, sowie ein verstärktes Wurzelwachstum in die Tiefe im Vergleich zu konventionell gepflügten Böden, in denen Pflugsohlenverdichtungen das Wurzelwachstum behindern können, sind nach EHLERS (1996) Ursachen dafür, dass in reduziert bearbeiteten Böden häufig eine bessere Ausnutzung des Wachstumsfaktors Wasser festgestellt wird als in konventionell gepflügten und intensiv bearbeiteten Böden. Dieser Vorteil kann auf Standorten mit Wassermangel der entscheidende ertragswirksame Faktor sein.

2.2 Nährstoffdynamik

Die Bodenbearbeitung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Nährstoffdynamik im Boden. Wenn von konventioneller Bodenbearbeitung auf reduzierte Bodenbearbeitung umgestellt wird, so ergeben sich für die Nährstoffdynamik im Wesentlichen folgende Veränderungen. Da der Boden weniger stark durchmischt wird und weniger Sauerstoff in den Boden eindringt, kommt es zur Anreicherung organischer Bodensubstanz in der obersten Schicht. Ähnlich wie bei Grünland entwickelt sich ein nährstoffreicher oberster Horizont. Die unteren Horizonte können dagegen an Nährstoffen verarmen (HARGROVE *et al.* 1982, FOLLETT & PETERSON 1988, KARLEN *et al.* 1991, EDWARDS *et al.* 1992, LIEBHARD 1993a, b, IRAGAVARAPU & RANDALL 1995, FRANZLUEBBERS & HONS 1996). Diese Entwicklung vollzieht sich über einen längeren Zeitraum hinweg. Sie kann mehrere Jahre bis Jahrzehnte dauern (MANZKE 1995). Während des Übergangs von konventioneller zu reduzierter Bodenbearbeitung kann es aufgrund der **Anreicherungsprozesse** zu einer Unterversorgung der Kulturpflanze mit Stickstoff kommen, wenn nicht zusätzlich Dünger appliziert wird, der die Festlegung von Nährstoffen in der organischen Bodensubstanz ausgleicht (BAEUMER & KÖPKE 1989, HAUGEN-KOZYRA *et al.* 1993, EHLERS & CLAUPEIN 1994). Nachdem sich ein neues Fließgleichgewicht eingestellt hat, kann die Netto-Mineralisation in reduziert bearbeiteten Böden allerdings gleich hoch oder höher liegen als in konventionell bearbeiteten Böden (FRANZLUEBBERS *et al.* 1996a). Dies kann unter anderem auf eine erhöhte biologische Aktivität von reduziert bearbeiteten Böden zurückgeführt werden (WEIL *et al.* 1993, MARINISSEN & DE RUITER 1993, HELLING & LARINK 1998). Unabhängig davon, ob die Mineralisation bei reduzierter Bodenbearbeitung erhöht oder verringert ist, kommt es häufig zu einer **veränderten Nährstoffdynamik in zeitlicher Hinsicht**. In gemäßigten Klimaten ist die Mineralisation in reduziert bearbeiteten Böden im Frühjahr häufig geringer, da sich der Boden aufgrund des höheren Bodenwassergehalts langsamer erwärmt, was die Ertragsbildung von Sommerungen und damit wiederum die Nährstoffaufnahme beeinträchtigen kann (WEST *et al.* 1996).

Die organische Bodensubstanz, die infolge reduzierter Bodenbearbeitung angereichert wurde, kann unter Umständen sehr rasch wieder abgebaut werden. So beobachteten STOCKFISCH *et al.* (1999), dass eine einmalige Pflugbearbeitung zu einem sehr raschen Abbau der organischen Bodensubstanz führte, die über einen Zeitraum von 20 Jahren durch pfluglose Bodenbearbeitung angereichert worden war. Die akkumulierte organische Bodensubstanz wies somit eine nur geringe Stabilität auf.

2.3 Unkräuter

Bodenbearbeitung beeinflusst in entscheidendem Maße die Populationsdynamik von Unkräutern. Unkräuter bzw. ihre nahen Verwandten besiedeln unter natürlichen Bedingungen Flussläufe und andere gestörte Habitate. Sie sind an regelmäßig wiederkehrende Bodenstörungen gut angepasst, allerdings in unterschiedlichem Maße. CUSSANS (1989) unterscheidet drei Typen von Unkräutern: 1.) **Perennierende Arten**, die durch regelmäßige Pflugarbeit gut bekämpft werden und von einer Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität eindeutig profitieren. 2.) **Short-cycle-Arten**, zu denen die meisten monokotylen Unkrautarten gehören. Die Samen dieser Arten besitzen nur eine relativ kurze Lebensdauer im Boden, maximal sechs bis zehn Jahre. Sie werden durch regelmäßig tiefgreifende Bodenbearbeitung dezimiert, da ein Großteil der Samen während ihrer Lebensdauer nicht wieder in die Nähe der Bodenoberfläche gelangt und somit keine Chance zur Reproduktion erhält. 3.) **Long-cycle-Arten**. Zu diesen gehören die meisten dikotylen Unkräuter. Die Samen dieser Arten weisen eine hohe Lebensdauer im Boden auf. Sie können mehrere Jahrzehnte im Boden überdauern und sind aufgrund ihrer ausgeprägten Dormanz und Langlebigkeit an Habitate mit häufiger Bodenbewegung wie den Acker hervorragend angepasst (GRIME 1989). Die Wirkung der Bodenbearbeitung lässt sich bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Biologie der Unkrautarten gut interpretieren. Die Ergebnisse vieler Feldversuche geben diesen Sachverhalt wider (FROUD-WILLIAMS *et al.* 1983, 1984, KNAB & HURLE 1986, NEURURER 1988, PALLUTT & BENNEWITZ 1996, GEROWITT 1996, JEDRUSZCZAK *et al.* 1997, STEINMANN *et al.* 1997, BIRKÁS *et al.* 1997a, 1998, ZWERGER 1996). Die Populationsdynamik von Unkräutern wird allerdings durch das Bodenbearbeitungssystem auch in anderer Weise beeinflusst. So kann zusätzlich zur veränderten vertikalen Verteilung von Samen im Boden das Konkurrenzgeschehen zwischen Unkräutern und Kulturpflanze verschoben werden, z. B. durch Minderung der Konkurrenzkraft der Kultur oder durch Beeinflussung der Keimrate von Unkräutern aufgrund unterschiedlicher Bodenwassergehalte in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungsverfahren (PEKRUN *et al.* 2000).

Wie weit die Populationsdynamik von Unkräutern durch Bodenbearbeitung beeinflusst wird, hängt in entscheidendem Maße von der **Intensität direkter und indirekter Kontrollmaßnahmen** ab. Wenn Herbizide in ausreichendem Umfang und in wirkungsvoller Weise eingesetzt werden, führt die Umstellung auf nicht wendende Bodenbearbeitung nicht notwendigerweise zu einer Zunahme von Unkrautproblemen, wie die Erhebungen von CUSSANS *et al.* (1994) zum Vorkommen der Trespen (*Bromus* spp.) in England zeigten. Das Vorkommen dieser Arten konnte keineswegs, wie lange Zeit angenommen, allein mit der Art der Bodenbearbeitung in Zusammenhang gebracht werden. Auch bestätigen die Erfahrungen vieler Landwirte, dass reduzierte Bodenbearbeitung nicht grundsätzlich eine Intensivierung der Unkrautbekämpfung erfordert (TEBRÜGGE & BÖHRNSEN 1997b, eigene Gespräche mit Landwirten). Die Unkrautbekämpfung muss an das System angepasst werden, d. h. sie muss in verstärktem Maße auf die Bekämpfung von Gräsern und mehrjährigen Unkräutern ausgerichtet werden. Neben einer Anpassung der chemischen und mechanischen Unkrautbekämpfung kann auch durch Veränderung der Fruchtfolge, z. B. durch eine Erhöhung des Anteils der Blattfrüchte oder eine Erhöhung des Anteils der Sommerungen, einer Zunahme von Unkrautproblemen entgegengewirkt werden (BRÄUTIGAM & TEBRÜGGE 1997). Auch andere pflanzenbauliche Maßnahmen, wie die Wahl eines späteren Saatzeitpunkts bei Wintergetreide (AMANN *et al.* 1992) oder die Erhöhung der Konkurrenzkraft der Kulturpflanze durch Düngung

(BIRKÁS *et al.* 1997a, 1998), können dazu dienen, die Verunkrautung nach Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung auf einem niedrigen Niveau zu halten. Weiterentwicklungen auf dem Herbizidsektor sowie die Einführung herbizidresistenter Kulturpflanzen könnten die Praktikabilität von Direktsaatverfahren in Zukunft verbessern (MARSHALL 1998).

Unter Produktionsbedingungen mit eingeschränkten Möglichkeiten der Unkrautkontrolle, z. B. im **Ökologischen Landbau**, kann weniger gut auf wendende und intensive Bodenbearbeitung verzichtet werden. Im Ökologischen Landbau wird Schicht erhaltende und Boden schonende Wirtschaftsweise zwar als Ziel angestrebt. Es wurden hierzu Spezialgeräte konstruiert, z. B. der Zweischichtenpflug oder der von der Firma Weichel entwickelte Schichtengrubber. Inwiefern eine Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität und –tiefe jedoch möglich ist, ist noch nicht eingehend untersucht und wird kontrovers diskutiert (HAMPL 1996, NEUERBURG 1996). Aufgrund bisheriger Erfahrungen (NEUERBURG 1996, KOUWENHOVEN & BOER 1997) sowie aufgrund dessen, was über die Biologie mehrjähriger Unkräuter bekannt ist (DONALD 1990, DOCK GUSTAVSSON 1997, HÅKANSSON *et al.* 1998), ist jedoch anzunehmen, dass bei Pflugverzicht im Ökologischen Landbau insbesondere perennierende Unkräuter problematisch werden, die bereits heute in vielen Betrieben ein ernsthaftes Problem darstellen. Trotzdem gibt es Bestrebungen, pfluglose Bestellmethoden speziell für den Ökologischen Landbau zu entwickeln und zu verbreiten, z. B. in Kombination mit gut deckenden Zwischenfrüchten (HAMPL 1996) oder in Kombination mit der Dammkultur (KRESS 1997).

2.4 Krankheiten und Schädlinge

Krankheiten und Schädlinge werden durch Bodenbearbeitung in der Mehrzahl nicht oder nur geringfügig beeinflusst (KENDALL *et al.* 1991, BOISGONTIER *et al.* 1994a, BRÄUTIGAM & TEBRÜGGE 1997, JORDAN *et al.* 1997). Wenn sie beeinflusst werden, dann ist es die Wirkung der Bodenbearbeitung auf die Position der Erntereste und die hiermit verbundene Beeinflussung der Umsetzung von Ernterückständen. **Fusarien**, vor allem Ähren-Fusarium an Weizen (*Fusarium graminearum*), haben in den letzten Jahren in Deutschland stark zugenommen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist dies auf eine Ausweitung pflugloser Bestellmethoden zurückzuführen. Fusarien werden in Fruchtfolgen mit Weizen und Mais vor allem bei reduzierter Bodenbearbeitung beobachtet (SUMMERELL *et al.* 1990, LEPSCHY & BECK 1997, MC MULLEN *et al.* 1997, BECK 1999, YI *et al.* 2001). Auch das Auftreten von *Helminthosporium tritici-repentis* wird durch reduzierte Bodenbearbeitung in weizenreichen Fruchtfolgen gefördert (GARBE 1994). Nicht immer werden jedoch Krankheiten durch Bodenbearbeitung zurückgedrängt. So werden Halmbasiskrankheitserreger (*Pseudocercospora herpotrichoides*, *Gaeumannomyces graminis*) durch reduzierte Bodenbearbeitung meist verringert. CLAPPERTON *et al.* (2001) versuchten die Ursachen hierfür zu ergründen. Sie stellten fest, dass Regenwürmer aufgrund der Beeinflussung des Verhältnisses von Bakterien zu Pilzen im Boden das Krankheitsgeschehen positiv beeinflussen können. Alle im und am Boden lebenden Tiere werden durch jegliche Form der Reduktion der Bodenbearbeitung gefördert, so z. B. Mäuse und Schnecken, die in Direktsaatverfahren erheblichen Schaden anrichten können (GLEN & SYMONDSON 2002).

2.5 Ertragsbildung der Kulturpflanze

Die Lockerung des Bodens hat Vorteile in mehrfacher Hinsicht, nicht nur in Bezug auf die in Kapitel 2.1 bis 2.4 genannten Parameter, sondern insgesamt für die Ertragsbildung der Kultur. In einen gelockerten Boden kann Saatgut auf eine einheitliche Tiefe abgelegt werden. Mit der Schaffung eines an das jeweilige Saatgut, den Bodenzustand und die zu erwartenden Witterungsbedingungen angepassten Saatbetts kann ein hoher Feldaufgang erreicht werden. Auch die weitere Ertragsbildung wird positiv beeinflusst. So kommt es im Frühjahr in einem gelockerten Boden rascher zur Erwärmung, was insbesondere für die Jugendentwicklung von Sommerungen wichtig ist.

Wenn man die Erträge bei konventioneller Pflugbewirtschaftung mit Direktsaatverfahren vergleicht, so stellt man fest, dass bei konventioneller Bewirtschaftung im Mittel höhere Erträge erwirtschaftet werden als bei Direktsaat (CANNELL & HAWES 1994, TEBRÜGGE & BÖHRNSEN 1997a, SOANE & BALL 1998). Wie hoch die Differenz ausfällt, hängt allerdings sehr stark vom jeweiligen **Standort**, der angebauten **Kultur** sowie allen übrigen **pflanzenbaulichen Maßnahmen** ab. In Gebieten, in denen Wasser ein wesentlicher ertragsbegrenzender Faktor ist, schneiden Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung meist besser ab als Verfahren mit intensiver und wendender Bodenbearbeitung (LAL 1989). Aus Versuchen in Mitteleuropa ist ein deutlicher Einfluss der Kultur ersichtlich. Winterungen sind im Allgemeinen eher geeignet für reduzierte Bodenbearbeitung als Sommerungen. Wintergetreide, insbesondere Winterweizen, ist besonders gut pfluglos zu bestellen (KREUZ 1990a, b, HOFFMANN & KOCH 1998), ebenso Körnerleguminosen (BECKER & KOCH 1997). Zuckerrüben werden sehr oft in einen Zwischenfruchtmulch ohne wendende Bodenbearbeitung gesät. Hier sind die Erfahrungen in der Praxis äußerst positiv. Allerdings wird zur vorangehenden Zwischenfrucht häufig gepflügt. Extreme Formen der reduzierten Bodenbearbeitung haben sich bei Zuckerrüben nicht bewährt (BRUNOTTE & ISENSEE 1994, BOISGONTIER *et al.* 1994b, KORDAS 1997, BECKER & MÄRLÄNDER 1998).

In etlichen Versuchsserien wurde beobachtet, dass die Varianten der reduzierten Bodenbearbeitung zunächst sehr stark schwankende Erträge aufwiesen, im Laufe der Zeit jedoch ertragsmäßig zunahmten (BALL *et al.* 1989, CLAUPEIN & BAEUMER 1990, SOANE & BALL 1998). Derartige Effekte sind vermutlich auf die sich erst im Laufe der Zeit manifestierenden Verbesserungen der Bodenstruktur zurückzuführen sowie darauf, dass sich erst allmählich ein neues Fließgleichgewicht in Bezug auf Nährstoffe einstellt. Darüber hinaus kann man hierin allerdings vermutlich auch den Effekt eines Lernprozesses der beteiligten Versuchsansteller und –techniker erkennen, der erst allmählich zu einer verbesserten Handhabung des Systems ‚reduzierte Bodenbearbeitung‘ führt.

2.6 Umweltwirkungen

Reduzierte Bodenbearbeitung wirkt erosionsmindernd. Damit wird der Abtrag von Boden und hiermit verbunden der Abtrag von auf und am Boden befindlichen Düngemitteln und Pestiziden vermindert. Dies ist ein wichtiger positiver Beitrag der reduzierten Bodenbearbeitung zum Umweltschutz, vor allem da Boden eine knappe und nur langsam nachzuliefernde Ressource darstellt (DE PLOEY 1989, PESZT *et al.* 1997, KLAGHOFER 1997). Darüber hinaus wird durch reduzierte Bodenbearbeitung die Tragfähigkeit des Bodens erhöht und damit die