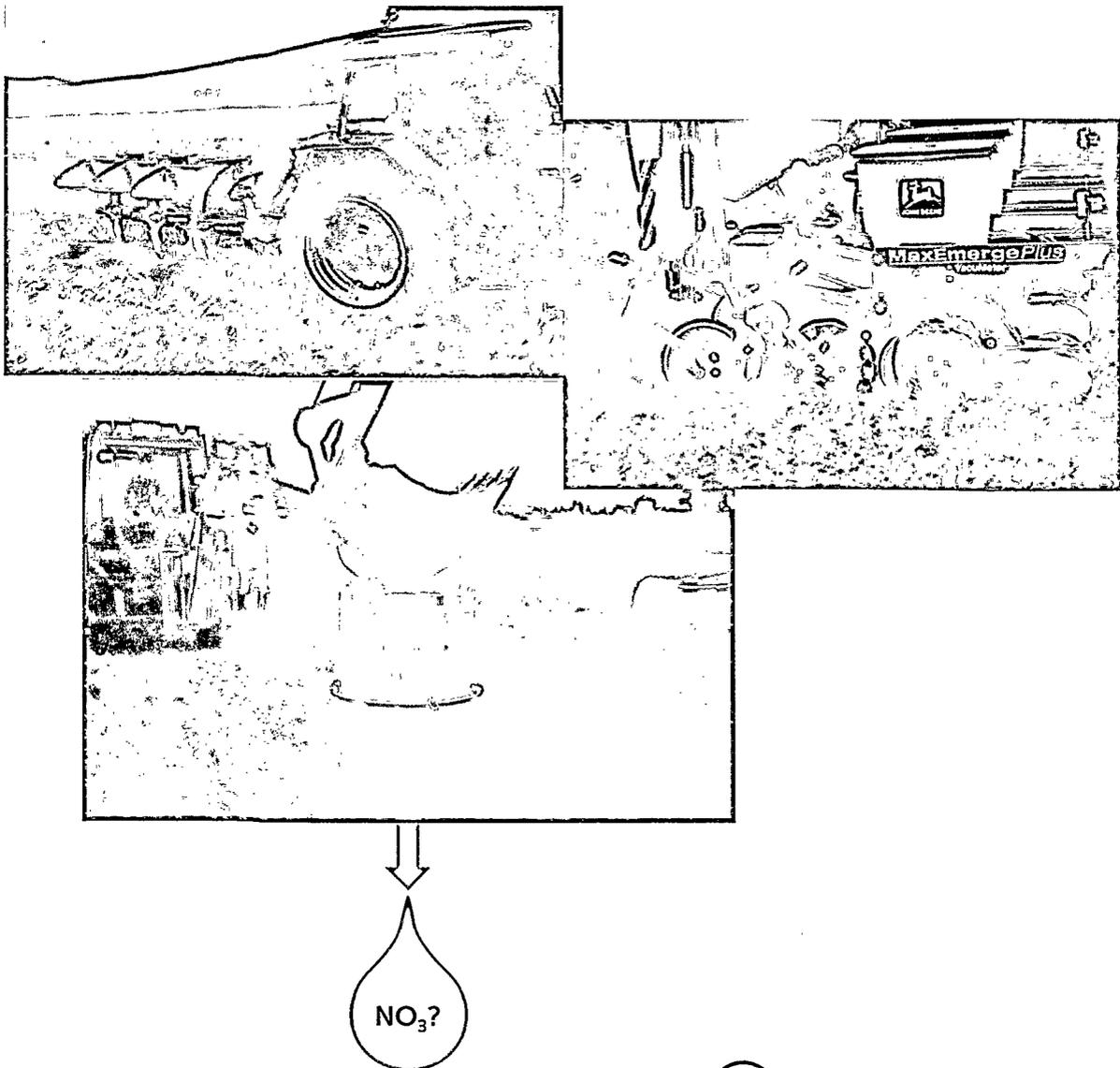




FAT-Schriftenreihe Nr. 63

Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung gepflügter und direktgesäter Parzellen

Thomas Anken, Peter Stamp, Walter Richner, Ueli Walther



 agroscope
FAT TÄNIKON

Abkürzungsverzeichnis

ON	Düngeverfahren "keine Stickstoffdüngung"
BBCH	Entwicklungsstadien gemäss Lancashire et al. (1991) und Meier (2001)
°C	Temperatur in Grad Celsius
cm	Zentimeter (10^{-2} m)
DS	Bestellverfahren "Direktsaat"
g	Gramm
GUL	Düngeverfahren "Gülledüngung"
ha	Hektare
hPa	Hektopascal (10^2 Pa = 10^{-3} bar)
kg	Kilogramm
l	Liter (10^{-3} m ³)
m, m ²	Meter und Quadratmeter
Mg	Megagramm (10^3 kg)
mg	Milligramm (10^{-3} kg)
ml	Milliliter (10^{-6} m ³)
MIN	Düngeverfahren "Mineralische Stickstoffdüngung"
N	Stickstoff
NH ₄	Ammonium
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff: Menge Reinstickstoff enthalten im Ammonium
N _{min}	Mineralischer Stickstoffgehalt des Bodens
NO ₃	Nitrat
NO ₃ -N	Nitratstickstoff: Menge Reinstickstoff enthalten im Nitrat
org. C	Organischer Kohlenstoff
PF	Bestellverfahren "Pflug"
Pfl.	Pflanzen
TM	Trockenmasse

Diss ETH No. 15393

Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitrat- auswaschung gepflügter und direktgesäter Parzellen

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN
der EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
THOMAS ANKEN, Dipl. Ing.-Agr. ETH
geboren am 18.09.64
von Därstetten BE

Angenommen auf Antrag von
Referent: Prof. Dr. Peter Stamp,
Eidgenössische Technische Hochschule, CH-8092 Zürich
Korreferenten: Dr. Walter Richner und Dr. Ulrich Walther
Agroscope FAL Reckenholz, CH-8046 Zürich

2004

 **agroscope**
FAT TÄNIKON

Eidgenössische Forschungsanstalt für
Agrarwirtschaft und Landtechnik
CH-8356 Ettenhausen

Direktor: Prof. Dr. Walter Meier

Inhalt

1.	Einleitung	3
1.1.	Entstehung und Verbreitung der pfluglosen Bodenbearbeitung	3
1.2.	Stickstoffumsätze im Agrarökosystem	4
1.3.	Bestelltechnik und Pflanzenerträge	6
1.4.	Bestelltechnik und Bodenstruktur	7
1.5.	Bestelltechnik und N-Dynamik	9
1.6.	Benötigt die Direktsaat eine andere Düngung?	9
1.7.	Bestelltechnik und Nitratauswaschung	10
1.8.	Erhebung der Nitratkonzentration und -auswaschung	11
2.	Problemstellung	15
3.	Material und Methoden	17
3.1.	Standort und Witterung	17
3.2.	Versuchsanlage und Verfahren	20
3.3.	Konstruktion der Lysimeteranlage	23
3.4.	Bodenwasserentnahme mittels Saugkerzen	25
3.5.	Pflanzenernten und -analysen	26
3.6.	Messung der Bodentemperaturen	27
3.7.	Bestimmung des Stickstoffs in Boden und Wasser	27
3.8.	Visualisierung der Fließwege des Wassers	28
3.9.	Statistische Auswertungen	28
4.	Resultate	31
4.1.	Darstellung der Bestell- und Düngeverfahren	31
4.2.	Bestelltechnik und Maisentwicklung	31
4.3.	Stickstoffdüngung und Maisentwicklung	37
4.4.	Bestelltechnik und Weizenentwicklung	42
4.5.	Stickstoffdüngung und Weizenentwicklung	45
4.6.	Bodenphysikalische Parameter und Bodentemperatur	48
4.7.	Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min})	52
4.8.	Nitratkonzentration im Boden- und Sickerwasser	54
4.9.	Sickerwassermenge und Nitratauswaschung	58
5.	Diskussion	61
5.1.	Bestelltechnik und Pflanzenentwicklung	61
5.2.	Stickstoffdüngung und Pflanzenentwicklung	66
5.3.	Bodenphysikalische Parameter und Bodentemperaturen	70
5.4.	Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min})	71
5.5.	Nitratkonzentration im Boden- und Sickerwasser	72
5.6.	Sickerwassermenge und Nitratauswaschung	73
5.7.	Gründe für die schlechte Entwicklung der direktgesäten Pflanzen 1999	75
5.8.	Methoden zur Bestimmung der Nitratauswaschung	78

6.	Schlussfolgerungen	79
6.1	Bestelltechnik.....	79
6.2	Stickstoffdüngeverfahren.....	81
6.3	Bestimmung der Nitratauswaschung.....	82
7.	Zusammenfassung	83
8.	Abstract	85
9.	Literatur	87
10.	Anhang	99
Merci	101

1. Einleitung

1.1 Entstehung und Verbreitung der pfluglosen Bodenbearbeitung

Grosse Sandstürme, die in den 1930er Jahren über die Great-Plains der USA fegten, zwangen viele Farmer zur Aufgabe ihres Betriebes. Eine grosse wirtschaftliche Not herrschte im Mittleren Westen der USA, da Winderosion ungeahnten Ausmasses die Siedler ihrer Existenz beraubte. Die riesigen gepflügten, unbedeckten Ebenen boten den starken Winden eine ideale Angriffsfläche. Der Umbruch der riesigen Flächen mit dem Pflug sowie das Auftreten von Dürrejahren waren die Ursachen dieser "Dust bowl" genannten Katastrophe (WERU 1997). Bald wurde erkannt, dass eine Bodenbedeckung aus Ernterückständen den Boden wirkungsvoll vor Winderosion zu schützen vermag. Dies war die Geburtsstunde der pfluglosen Bodenbearbeitung. Statt des Pfluges kamen die ersten Grubber zum Einsatz (Abbildung 1).

Heute haben die amerikanischen Farmer das Problem der Winderosion unter Kontrolle. Sie erhalten vom Staat Direktzahlungen, wenn der Boden zu mehr als 30 % bedeckt ist (CTIC 2002). Im mittleren Westen der USA sind heute kaum mehr Pflüge anzutreffen (Karlen 2000).

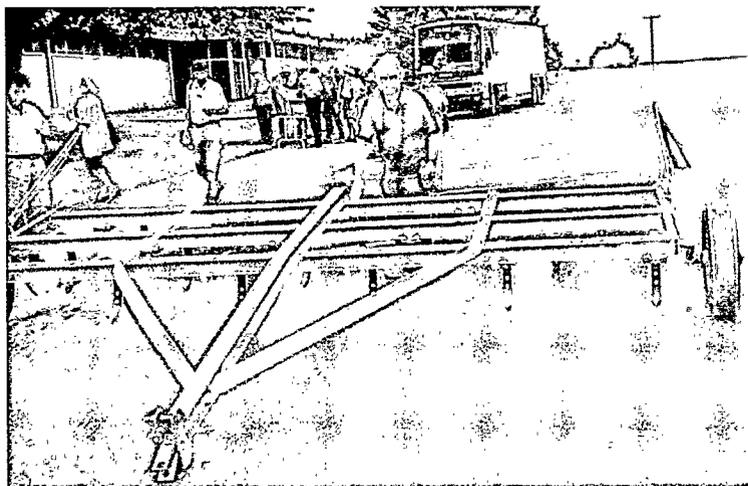


Abbildung 1. Einer der ersten Grubber aus dem Jahr 1945 stellt den Beginn der pfluglosen Bodenbearbeitung dar.

Der pfluglose Anbau fristete in der Schweiz lange ein kümmerliches Dasein. Nach Hausheer et al. (1998) lag der Anteil der gepflügten Flächen während der Jahre 1991-1996 in der Schweiz bei Getreide bei zirka 80 % und bei Mais bei 90 %. Einzig für den Anbau der Kunstwiesen lag der Anteil tiefer (zirka 30 %). Eine Umfrage der schweizerischen Zuckerrübenfachstelle zeigte, dass 1998 92 % der Zuckerrübenanbaufläche gepflügt wurde (Avato und Herrenschiwand 1999). Hohe Produktpreise, kleinstrukturierte Betriebe, Vertrautheit mit der traditionellen Bodenbearbeitung, effektive Unkrautbekämpfung, Einarbeitung der Ernterückstände, schwere Böden und hohe Niederschlagsmengen mögen die wichtigsten Gründe für den nach wie vor verbreiteten Einsatz des Pfluges sein. Unbestritten sichert er auf schweren, schlecht durchlässigen Böden in feucht-kühlen Klimaten durch intensive Lockerung sichere Erträge (Anken et al.

1997, Karutanilake et al. 2000). Die in den schweizerischen Ackerbaugebieten häufigen Jahresniederschlagsmengen von 1000 mm und mehr betragen fast das Doppelte derjenigen der Getreideanbaugebiete in Übersee. Steigende Niederschlagsmengen erhöhen die Wahrscheinlichkeit, Erntearbeiten in nassen Böden durchführen zu müssen, was Bodenverdichtungen bewirken kann. Ohne nachfolgende Lockerung können diese Verdichtungen wegen dem verminderten Gasaustausch und der niedrigeren Wasserdurchlässigkeit der Böden die Pflanzenentwicklung behindern. Feuchte bis nasse Böden erschweren zudem die Aussaat, weil sie durch ihre hohe Plastizität schlecht krümeln und sich in den Saattrillen Schmierschichten bilden können (Iqbal et al. 1998).

Die Preise der Ackerbauprodukte weisen in der Schweiz eine fallende Tendenz auf. Von 1992 bis 2001 sank der Produzentenpreis für 100 kg Winterweizen von 105 Franken (Baltisberg und Genoni 1992) auf 58 Franken (LBL et al. 2002). Diese Preisentwicklung führt zu einem massiven Kostendruck im Ackerbau, was der pfluglosen Bodenbearbeitungstechnik Vorschub leistet. Vor allem die begrenzte Schlagkraft und die hohen variablen Kosten des Pflugverfahrens fördern das Umsteigen auf pfluglose Verfahren. Hinzu kommt, dass der technische Fortschritt viele Probleme der pfluglosen Systeme entschärft hat. Spezifisch wirkende Kontaktherbizide (Bsp. Sulfonylharnstoffe) und die Verfügbarkeit von billigen Totalherbiziden (Glyphosat) vereinfachen die Regulierung der Unkrautflora. Die stark verbesserte Sätechnik ermöglicht die kontrollierte Saat in Pflanzenmulch ohne Verstopfungen. Während im europäischen Umfeld die tiefen Produktpreise wohl den wichtigsten Grund für den zunehmenden Umstieg auf die pfluglose Bearbeitung darstellten, nimmt in der Schweiz der Boden- und Gewässerschutz zusätzlich einen hohen Stellenwert ein (Ammon et al. 1990, BUWAL 2001, Maillard et al. 1990, Sturny und Schwarz 1995). Aus diesem Grund unterstützen zur Zeit die Kantone Aargau, Bern, Luzern und Solothurn die Direktsaat und andere Minimalbodenbearbeitungsverfahren mit kantonalen Flächenbeiträgen (Kanton Bern 1997, Swiss No-till 2003). Diese Verfahren zeichnen sich durch eine Vielzahl von Vorteilen aus: Schonung der Bodenstruktur und der Bodenfauna, Verminderung von Bodenerosion, Verbesserung der Tragfähigkeit der Böden, Verminderung der Arbeitszeit und der Kosten. Neben diesen positiven Eigenschaften stellen sich für diese Systeme in Bezug auf die Stickstoffdynamik und -verluste noch zahlreiche offene Fragen: Verläuft die Dynamik der Stickstoffmineralisierung im Boden anders als bei gepflügten Parzellen? Wie beeinflusst die pfluglose Bodenbearbeitung die Nitratauswaschung?

1.2 Stickstoffumsätze im Agrarökosystem

Der Stickstoff als "Motor des Pflanzenwachstums" kommt im Agrarökosystem in den verschiedensten Formen vor. Der Stickstoffumsatz des Bodens kann mit beträchtlichen Verlusten ins Grundwasser oder in die Atmosphäre verbunden sein. Dies führt zu unerwünschten Umweltwirkungen wie Nitratbelastung der Gewässer, Bildung von Treibhausgasen oder Erhöhung der Stickstoffeinträge aus der Atmosphäre (Stadelmann 2003).

Abbildung 2 stellt den Stickstoffkreislauf leicht abgeändert nach Blume (1990) dar. Der Grundpool für alle ablaufenden Prozesse ist der in organischer Form im Boden vorhandene Stickstoff.

Für den vorliegenden Versuch kann dessen Grösse aus dem Humusgehalt grob geschätzt werden. Bei einem Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff von 0,16 % und einem geschätzten C/N-Verhältnis für Mull von 1 : 12,5 (Scheffer und Schachtschabel 1984) sowie einer gemessenen Bodendichte von $1,4 \text{ g/cm}^3$ ergibt sich im obersten Bodenhorizont von 25 cm eine Menge von zirka: $2500 \text{ m}^3 \times 0,016 \text{ org. C} \times 1'400 \text{ kg/m}^3 / 12,5 \text{ C/N} = 4500 \text{ kg}$ organisch gebundener Stickstoff pro Hektare.

Über die mikrobiologischen Prozesse der Mineralisation und Nitrifikation wird der organische Stickstoff in mineralische, pflanzenverfügbare Formen umgewandelt. Im Gegensatz zu organischen Stickstoffformen kann der mineralische Stickstoff in Form von Ammonium (NH_4) oder Nitrat (NO_3) einerseits durch die Pflanzen aufgenommen werden, andererseits kann er aber auch in die Atmosphäre oder ins Grundwasser gelangen.

Stickstoff kann in Form von Ammoniak gasförmig in die Atmosphäre entweichen, während der Nitratstickstoff nach der Denitrifikation vorwiegend als molekularer Stickstoff (N_2) oder Lachgas (N_2O) entweichen kann. Die Höhe dieser gasförmigen Verluste wird stark durch das Klima geprägt. Zum Beispiel sind hohe Niederschläge, die anaerobe Verhältnisse in der Bodenluft bewirken können, der Denitrifikation stark förderlich. Ein Teil des atmosphärischen Stickstoffs gelangt mit dem Regen oder als Trockendeposition auf den Boden zurück. Laut Untersuchungen des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (Weber 2002) betragen die Stickstoffeinträge über die Niederschläge von 1997 bis 1999 für den Standort Tänikon: $2,9 \text{ kg NO}_3\text{-N/ha}$ und $4,3 \text{ kg NH}_4\text{-N/ha}$; insgesamt $7,2 \text{ kg}$ Stickstoff pro Hektare und Jahr. Hinzu kommen zirka 15 kg N/ha und Jahr in Form von trockenen Depositionen (Eugster 1999). Dies bedeutet für den Standort Tänikon einen Stickstoffeintrag von rund 20 kg N/ha und Jahr, wobei zirka 7 kg als NH_4 - und $\text{NO}_3\text{-N}$ direkt pflanzenverfügbar und verlustgefährdet sind.

Die Auswaschung von mineralischem Stickstoff ins Grundwasser erfolgt in Form von Nitrat über den Wassertransport durch den Boden. Die Höhe dieser Auswaschungen wird durch die im Boden verfügbare Menge Nitrat, durch die Sickerwassermenge und die Transportprozesse im Boden bestimmt.

Mineralischer Stickstoff kann immobilisiert werden, indem er über die Einlagerung in Pflanzen, Bodenfauna und -flora in organische Substanz eingebaut wird. Die Dynamik der ablaufenden Prozesse der N-Mineralisation, N-Immobilisation, Nitrifikation und Denitrifikation ist nur sehr schwer quantifizierbar. Diese mikrobiologischen Prozesse sind von vielen sich rasch ändernden Faktoren wie Bodentemperatur, Wassergehalt des Bodens, pH, C-, N-, und O_2 -Angebot abhängig (Scheffer und Schachtschabel 1984).

Im vorliegenden Versuch wurden folgende Grössen gemessen: Stickstoffeinträge über die Düngung, Stickstoffentzüge der Pflanzen, Gehalte an mineralischem Stickstoff (NO_3 und NH_4) im Boden sowie im Boden- und Sickerwasser. Über die Ermittlung der Sickerwassermenge liess sich der ausgewaschene mineralische Stickstoff quantifizieren. Gasförmige Stickstoffverluste wurden nicht erhoben. Sie stellen nach wie vor schlecht bekannte und nur schwer bestimmbare Parameter im gesamten Stickstoffkreislauf dar.

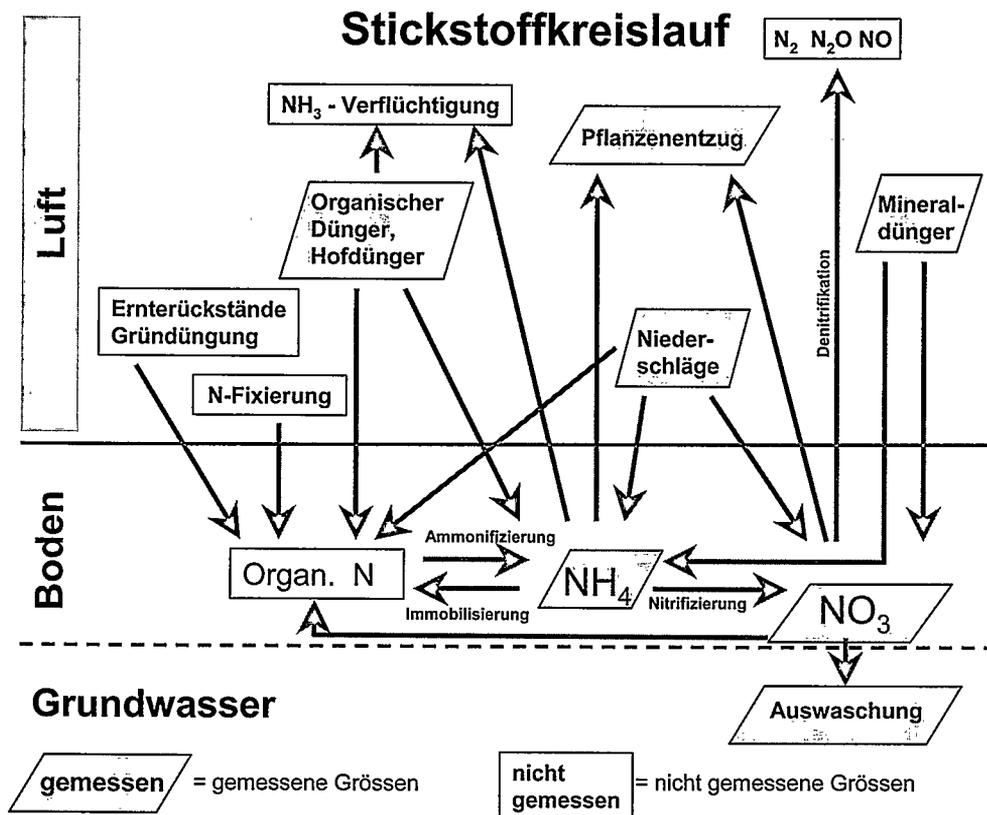


Abbildung 2. Stickstoffkreislauf angepasst nach Blume (1990). Die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Grössen sind dunkel hinterlegt.

1.3 Bestelltechnik und Pflanzenerträge

Die Kornerträge von Winterweizen von gepflügten und direktgesäten Parzellen unterscheiden sich gemäss der Literatur meistens nur unwesentlich (Boisgontier et al. 1997, Arshad et al. 1994, Anken et al. 1997, Sartori und Peruzzi 1997, Fortune 1997, Rieger 2001). In einer Übersicht zitierten Tebrügge und Böhrnsen (1997a) 30 zum Teil langjährige Versuche mit Winterweizen, bei denen mit Direktsaat zwischen 87 und 122 % des Weizenertes der Pflugvarianten erzielt wurden (Mittel 100,7 %).

In vergleichenden Versuchen liegen die Maiserträge bei Direktsaat häufig deutlich unter denjenigen der gepflügten Parzellen: Sartori und Peruzzi (1997), Boisgontier et al. (1997), Hoffman (1998), Mehdi et al. (1999), Rieger (2001), Linden et al. (2000), Baumann (2002) und Bohren et al. (2002). Kornmann (1998) und Chervet et al. (1999) belegten andererseits, dass mit Maisdirektsaat zum Teil bessere Erträge als mit dem Pflug möglich sind.

Es herrscht weitgehend Einigkeit, dass sich bei guten Bodenverhältnissen mit Direktsaat im Vergleich zu gepflügten Parzellen ebenbürtige Erträge erzielen lassen. Die Ansprüche an den Standort und an die gesamte Anbautechnik sind bei Direktsaat jedoch höher. Die vielen positiven Versuchsergebnisse dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass in der Praxis Ertragseinbussen

bei Direktsaat sehr sensibel wahrgenommen werden. So sind in einer europäischen Praxisumfrage von Tebrügge und Böhrnsen (1997b) die Ertragseinbussen neben der mangelnden Erfahrung und Beratung sowie den hohen Anschaffungskosten für Maschinen der wichtigste Grund, weshalb Landwirte die Direktsaat nicht weiter empfehlen würden. Diese hohe Sensibilität bezüglich des Ertragsniveaus zeigt sich ebenfalls in der schweizerischen Praxis.

1.4 Bestelltechnik und Bodenstruktur

Auswirkungen der Bodenstruktur: In der Literatur sind zahlreiche Angaben zu finden, die den Einfluss der Bodenstruktur auf den Feldaufgang und die Jugendentwicklung der Pflanzen bei der Direktsaat beschreiben. So schreibt Vez schon 1977: "Dans le cas des semis réalisés directement sur des sols qui n'ont pas été préalablement préparés, on constate souvent une des causes d'échec." Ball (1995) beschrieb, dass in England bei der Direktsaat generell die obersten 10 cm des Bodens sehr kompakt sowie der Luft- und der Gasaustausch vermindert waren. Karutani et al. (2000) berichteten, dass im feuchten Nordosten der USA die schlechte Durchlüftung der Böden bei Direktsaat klar das grössere Problem sei als bei bearbeiteten Böden. Ball et al. (1999) und Mummey et al. (1998) beschrieben im Vergleich zu bearbeiteten eine erhöhte Lachgasproduktion auf direktgesäten Böden. Dies weist auf anaerobe Verhältnisse im obersten Bodenhorizont als Folge tiefer Grobporenvolumina in Kombination mit hohen Niederschlagsmengen hin.

Lal (1996), Boisgontier et al. (1997) und Bueno et al. (2002) wiesen nach, dass durch hohe Achslasten verursachte Bodenverdichtungen bei der Direktsaat starke Ertragseinbussen bewirken können. Czeratzki (1972) und Dannowski (1992) beschrieben, dass ein erhöhter Durchdringungswiderstand für die Wurzeln das Pflanzenwachstum hemmen kann. Hoffman (1995) beschreibt einen Farmer im Norden der USA, der die leichten Böden seiner Farm unbearbeitet lässt, die Standorte mit schweren Böden aber bearbeitet.

All den oben erwähnten Zitaten ist gemeinsam, dass sie Situationen beschreiben, bei denen mit Direktsätechnik bestellte Kulturen auf Grund der bodenphysikalischen Beschaffenheit schlechtere Kornerträge erzielten. Besonders die Kombination von hohen Bodendichten und hohen Niederschlagsmengen auf schweren Böden scheint sich negativ auf die Erträge auswirken zu können.

Der Praxis und der Maschinenindustrie sind diese Schwierigkeiten nicht entgangen. Mit unterschiedlichsten Schar- und Saatsystemen wird versucht, diese Probleme bei der Direktsaat zu vermindern (Lajoux et al. 1998, Böhrnsen 1999, Böhrnsen und Nichols 2002). Mit gewellten Scheiben, reissenden Meisselscharen, Cross-Slot-Scharen (Baker No-Tillage Ltd, Feilding, NZ) oder gezackten statt glatten Andruckrollen (Yetter, Colchester, Illinois, USA) und verschiedensten Strohräumern wird versucht, den Boden in der Saatrille zu krümeln und die Einbettung der Samen zu verbessern. Die direktsaaterfahrenen Thompson Brothers (Osage County, Kansas, USA) konstruierten aus diesem Grund gezackte Andruckrollen mit dem Ziel, im Säschlitz eine Krümelung zu erzielen, die sich in ihren Augen sehr bewährt hat. Manuel (2000) aus Westaustralien setzt selbst unter trockenen Bedingungen (600 mm Jahresniederschlag) auf Meisselschare, welche den Boden aufreissen und - im Gegensatz zu Scheibenscharen - die Saatrille nicht ver-

dichten. Diese Beispiele zeigen, dass die Entwicklung der Direktsätechnik noch nicht abgeschlossen und noch mit Detailverbesserungen zu rechnen ist.

Flache Saatbettbereitung: Viele Landwirte umgehen die bodenphysikalischen Schwierigkeiten, indem sie den Boden bei pflugloser Bestellung mehr oder weniger tief bearbeiten. Die grossen Fortschritte im Bereich der Sätechnik für Mulchsaaten ermöglichen es heute, den Boden nur noch flach (zirka 5 cm tief) zu bearbeiten und trotzdem sichere Feldaufgänge und Erträge zu erzielen. Langjährige Versuche zeigen, dass sich die flache Bearbeitung auch unter schweizerischen Verhältnissen gut bewährt (Vullioud 2000, Anken et al. 1997). In Frankreich, wo zur Zeit die Direktsaatfläche rückläufig ist, setzen die Landwirte auf eine flache Bearbeitung des Bodens (Lajoux 2002). Der französische Landwirt Bruno Hyais (1997) zum Beispiel ist der Meinung, dass ein Bestellsystem ohne jegliche Bearbeitung nicht funktioniere.

Als Kompromiss zwischen der Direktsaat und der ganzflächigen Bearbeitung ist es im Maisanbau möglich, mittels einer streifenförmigen Bearbeitung (Streifenfrässaat, strip tillage) nur den Saatstreifen zu lockern (Ammon et al. 1990, Morrison und Sanabria 2002).

Mittels einer flachen Bearbeitung lassen sich noch andere Effekte erzielen: Verminderung von Schneckenpopulationen (Voss et al. 1998, Anken et al. 1997), Förderung der Verrottung des Strohs (Hofmann 1994, Stemmer et al. 1999), Verminderung des Anteils des in die Saatrille gedrückten Strohs (Böhrnsen 1996), Beschleunigung der Erwärmung und der Abtrocknung der Böden im Frühjahr (Hoffman 1996, Ehlers et al. 1986, Smith und Fink 1996), sowie der Vereinfachung der Bewirtschaftung und Verminderung von Ertragsschwankungen (Anken et al. 1997).

Diese Eigenschaften erklären den Aufschwung der flachen Bodenbearbeitung mit gezogenen Geräten wie Flachgrubber, tiefengeführten Kurzscheibeneggen, gezogenen Bestellkombinationen sowie schweren Mulch- und Direktsämaschinen im internationalen Umfeld.

Controlled traffic: Eine andere Möglichkeit, Oberbodenverdichtungen zu vermeiden, ist das System des "controlled traffic farming". Frye (1986) schrieb schon vor über 15 Jahren: "controlled traffic under zero-tillage systems may minimize the compaction problems of susceptible soils". Bei dieser Technik erfolgen zur Begrenzung der Bodenverdichtungen sämtliche Überfahrten von der Saat bis zur Ernte auf immer denselben Fahrgassen. Dazwischen verdichtet kein Rad den Boden. In England wurde zu diesem Zweck der "gantry" entwickelt. Dies ist ein zirka 3 m breites und 12 m langes Trägerfahrzeug, mit schwenkbaren Rädern. Auf der Strasse wird das Gerät in Längs- und auf dem Feld in Querrichtung gefahren (Chamen et al. 1991). Diese Spezialfahrzeuge schafften jedoch bis anhin den Durchbruch in die Praxis nicht.

Insbesondere bei Dreschfrüchten ermöglichen es die zunehmenden Arbeitsbreiten der landwirtschaftlichen Geräte, die Arbeitsbreiten der verschiedenen Bestell-, Pflege- und Erntemaschinen ohne grossen Aufwand aufeinander abzustimmen. In Australien findet das "controlled traffic" mittels konventioneller Geräte langsam den Weg in die Praxis (Yule 2000). Weit verbreitet sind dabei Fahrgassen im Abstand von 9 Metern (9 m breit Boden bearbeiten und säen, 9 m breit dreschen, 18 m, 27 m oder 36 m breit düngern und spritzen). 1995 betrug die Anbaufläche dieser Technik in Australien noch 3000 ha, heute ist sie auf zirka 1 Mio. Hektaren (Tullberg

et al. 2003) angestiegen. Gemäss Yule (2003) hat diese Technik die Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität und die verstärkte Verbreitung der Direktsaat ermöglicht.

1.5 Bestelltechnik und N-Dynamik

Stickstoffmineralisierung: Die Stickstoffmineralisierung ist ein komplexer Prozess, der durch verschiedenste Faktoren wie Bodentemperatur und -feuchte, Sauerstoffangebot, pH-Wert des Bodens sowie Menge und C/N-Verhältnis der verfügbaren organischen Substanz bestimmt wird (Scheffer und Schachtschabel 1984). Wie schwierig das Einschätzen des Mineralisierungsverhalten der Böden ist, zeigten Oberholzer et al. (2001), die nachwiesen, dass sich mit verschiedenen Stickstoffmodellen (CANDY, EXPERT-N, MINERVA, NSIM) die Ergebnisse langjähriger Lysimeterversuche nicht zuverlässig nachbilden lassen. Oberholzer und Rek (2001) wiesen nach, dass sich unter Feldbedingungen der Einfluss der Bodentemperatur auf die Stickstoffmineralisierung nicht immer eindeutig nachweisen lässt. Trotzdem gelang es Oberholzer und Walther (2001) anhand eines einfachen empirischen Modelles mit verschiedenen Grundgesetzmässigkeiten, die potenzielle Stickstoffmineralisierung bei einer Mehrheit von praktischen Beispielen einigermaßen korrekt zu schätzen.

Die gängige Lehrbuchmeinung und zahlreiche Untersuchungen besagen, dass die Lockerung der Böden die Stickstoffmineralisierung fördert (Stenberg et al. 1999, Prior et al. 2000, Lickfett 1994, Briffaux und Aubrion 1998, Weisskopf et al. 2001, Moller Hansen und Djurhuus 1997, Watts et al. 2000). Bezüglich des Einflusses der Direktsaat auf die Stickstoffmineralisierung sind jedoch in der Literatur verschiedene, widersprüchliche Aussagen anzutreffen. Weit verbreitet ist die Aussage, dass bei Direktsaat die Stickstoffmineralisierung geringer sein soll oder im Frühjahr verzögert einsetzt als bei der Bodenbearbeitung mit dem Pflug (Kohl und Harrach 1991, Harrach und Richter 1992, Massé et al. 1994, Zihlmann et al. 2002, Köller und Linke 1997, Tebrügge 2002). Die mittels Boden- oder Bodenwasseruntersuchungen erhobenen und zitierten Unterschiede liegen in den meisten Fällen zwischen 20 und 50 kg mineralischem Stickstoff pro Hektare. In den meisten Fällen werden die Unterschiede im Frühjahr mit der verzögerten Bodenerwärmung der direktgesäten im Vergleich zu den gepflügten Parzellen erklärt.

Andere Untersuchungen wiesen im Boden oder Bodenwasser kaum unterschiedliche mineralische Stickstoffgehalte als Wirkung der beiden Bestellverfahren nach (Arshad et al. 1994, Weed und Kanwar 1996, Boisgontier et al. 1997, Rieger 2001, Baumann 2001, Zihlmann und Weisskopf 2001). Salinas-Garcia et al. (1997) wiesen bei Direktsaat leicht höhere N_{\min} -Gehalte nach.

Die oben angegebenen Zitate zeigen, dass die Gehalte an mineralischem Stickstoff im Boden oder Bodenwasser bei Direktsaat im Vergleich zum Pflugverfahren in der Regel sehr ähnliche oder leicht tiefere und nur vereinzelt höhere Werte aufweisen.

1.6 Benötigt die Direktsaat eine andere Düngung?

Eine ausreichende Stickstoffversorgung der Pflanzen ist ein wichtiger Baustein für die Ausschöpfung des Ertragspotentials. Die gängige Meinung für die Düngung von Mulchsaaten und insbe-

sondere von Direktsaaten ist, die erste Stickstoffgabe im Frühling zu erhöhen, die gesamte Stickstoffgabe im Vergleich zum Pflug jedoch nicht zu verändern (Köller und Linke 1997, Baumann 2001). Diesem Gedanken wird in der schweizerischen Praxis bei Mulch- und Direktsaaten mittels einer erhöhten ersten Stickstoffgabe Rechnung getragen. Der Lohnunternehmer Rösli (2000) praktiziert dies ebenfalls, doch wies er darauf hin, dass die Vermeidung von Bodenverdichtung wichtiger sei als die Anpassung der Düngung. In der Praxis wird häufig bei hellgrünen, unter Stress stehenden Pflanzen mit einer zusätzlichen Stickstoffdüngung versucht, deren Wachstum zu verbessern. Dies geschieht unabhängig davon, ob die hellgrüne Färbung der Pflanzen durch einen Stickstoffmangel oder durch einen anderen Stress hervorgerufen wird. Zu diesem Zeitpunkt der Pflanzenentwicklung gibt es neben der Düngung kaum andere Alternativen, um das Pflanzenwachstum zu fördern. Bueno et al. (2002) und Walther (1996) schrieben ebenfalls, dass die N-Düngung kein geeignetes Mittel sei, anbautechnische Unzulänglichkeiten zu korrigieren. Das Ertragspotential werde im Einzelfall durch die Faktoren Boden, Sorte, Klima, Anbautechnik etc. bestimmt. Die Stickstoffdüngung helfe nur mit, dieses Potential auszuschöpfen. Baumann (2001) wies bei Direktsaaten tiefere Stickstoffaufnahmeleistungen nach, die er auf Strukturprobleme und Bodenverdichtungen zurückführte. Er schreibt dazu treffend: "Abschliessend sollte also davor gewarnt werden, dass mit der Direktsaat das oft verbundene Problem der verlangsamten Jugendentwicklung bei geringen Keimpflanzendichten oder ungleichmässigem Bestand mit erhöhten Anfangsgaben durch die Stickstoffdüngung lösen zu wollen." Kreuz (1977) schrieb dazu, dass die Stickstoffaufnahme des Mais neben der Düngerform auch vom CO₂-Gehalt der Bodenluft abhängig sei. Eine schlechte Stickstoffversorgung der Maispflanze bedeute nicht unbedingt, dass im Boden zu wenig mineralischer Stickstoff vorhanden sei, sondern, dass die Pflanze den Stickstoff unter Umständen nicht aufnehmen könne, was sich durch die Düngung nicht korrigieren liesse.

Maillard et al. (1994) und Vullioud (2000) empfahlen auf Grund der Erfahrungen aus ihrem 30-jährigen Bodenbearbeitungsversuch die Stickstoffdüngung für Mulchsaaten nicht zu verändern. Hoffmann und Koch (1998) kamen zum selben Schluss.

Die zeitlich vorgezogene N-Düngung von Mulch- und Direktsaaten erfreut sich in der Praxis einer grossen Akzeptanz. Im Vergleich zu gelockerten Böden scheint sie gewisse Nachteile unbearbeiteter Böden wie die langsamere Erwärmung im Frühjahr etwas ausgleichen und die Jugendentwicklung der Pflanzen fördern zu können. Die vorgezogene Düngung ist aber nicht in der Lage, Mängel der Bodenstruktur zu beheben. Auf Grund der ähnlich verlaufenden Stickstoffmineralisierung scheint es bei intakter Bodenstruktur keinen Grund zu geben, die Stickstoffgaben bei Direktsaat vorzuziehen oder zu erhöhen.

1.7 Bestelltechnik und Nitratauswaschung

Der Einfluss der Bestelltechnik auf die Nitratauswaschung wird in der Literatur sehr unterschiedlich beurteilt. Etliche Autoren weisen mittels Messungen des mineralischen Stickstoffs im Bodenwasser beim Pflugverfahren leicht höhere Nitratgehalte nach und schliessen daraus, dass die Nitratauswaschung bei Direktsaat geringer sei als in gepflügten Böden (Kohl und Harrach 1991,

Addiscott 2000, Tebrügge 2002 und Chervet et al. 2003a). Moller Hansen und Djurhuus (1997) fanden in Dänemark auf Sandböden keine Unterschiede zwischen den beiden Bestellverfahren.

Interessanterweise vermitteln Untersuchungen in denen die N-Auswaschung mittels Drainagen oder Lysimetern bestimmt wurde ein anderes Bild als solche, die die Nitratauswaschung aus dem Nitratgehalt des mittels Saugkerzen gewonnenen Bodenwassers abgeleitet hatten.

Drainagen: Randall und Iragavarapu (1995) wiesen mittels eines Drainagesystems in Minnesota in gepflügten Parzellen während 11 Jahren eine geringfügig höhere Nitratauswaschung nach als bei Direktsaat. In 6 von 11 Jahren zeigten sich allerdings keine klaren Unterschiede. Patni et al. (1998) ermittelten in Kanada in einem grossflächig angelegten Versuch zwar höhere Nitratkonzentrationen im Sickerwasser gepflügter Parzellen, wegen der grösseren Sickerwassermengen bei Direktsaat unterschieden sich die beiden Bestellverfahren bezüglich der Nitratauswaschung nicht. Kanwar et al. (1993) sowie Weed und Kanwar (1996) beschrieben vergleichbare Ergebnisse. Wegen der höheren Sickerwassermengen bei Direktsaat massen sie im Vergleich zum Pflugverfahren zum Teil grössere Mengen an ausgewaschenem Nitrat. Auch Tan et al. (1998) massen in einem grossflächigen Versuch bei Direktsaat eine deutlich erhöhte Nitratauswaschung. Die gemessenen grösseren Sickerwassermengen führten die Autoren auf den verminderten Oberflächenabfluss bei Direktsaat zurück. Bakhsh et al. (2003) kamen anhand von Studien im Mittleren Westen der USA zu einem ähnlichen Schluss. Sie massen mit 1,2 m tief gelegten Drainagen in einem gegrubberten Feld durchschnittlich 16 % weniger Nitratauswaschung als bei Direktsaat. Die Höhe der Nitratauswaschung korrelierte in dieser Arbeit mit der Sickerwassermenge ($r^2 = 0,89$) und stand in Zusammenhang mit der Höhe des Pflanzenertrages (gegrubberte Variante erzielte durchschnittlich 11 % mehr Ertrag). Goss et al. (1993) bestimmten bei Direktsaat teilweise weniger Nitratauswaschung, in anderen Fällen wieder unterschieden sich die Systeme nicht.

Lysimetermessungen: Shipitalo et al. (2000) folgerten aus 60-jährigen Lysimeterversuchen in den nördlichen Appalachen der USA, dass die Bodenbearbeitungssysteme das Nitratauswaschungsverhalten nicht beeinflussen. Dick et al. (1989) wiesen in einem Lysimeterversuch bei Direktsaat höhere Nitratauswaschung nach.

All diese Publikationen zeigen, dass sich die Bestellverfahren Pflug und Direktsaat bezüglich der Nitratauswaschung nicht systematisch unterscheiden. Generelle Schlussfolgerungen lassen sich nicht ziehen. Andere Einflussfaktoren wie der Boden, das Klima und die Fruchtfolge scheinen die Höhe der Nitratauswaschung stärker zu prägen als die Art des Bestellsystems. Höhere Nitratgehalte im Bodenwasser gepflügter Böden scheinen im Vergleich zur Direktsaat höhere N-Auswaschungsmengen nur begrenzt zu widerspiegeln.

1.8 Erhebung der Nitratkonzentration und -auswaschung

Räumliche Variabilität des Nitrates im Boden: Für die Erhebungen der Nitratkonzentrationen im Boden spielt dessen räumliche Variabilität eine wichtige Rolle. Kirby et al. (2000) wiesen nach, dass mineralischer Stickstoff vermehrt in den lockeren und weniger in den kompakteren

Bereichen des Bodens zu finden ist. Parkin und Berry (1999) fanden erhöhte Nitratkonzentrationen entlang der Wände der Regenwurmgänge, da an diesen Stellen durch die Beschichtung mit Schleim und anderen organischen Substanzen die Mineralisierung verstärkt abläuft. Bundt et al. (2001) wiesen nach, dass entlang der Fließgänge die organische Substanz um 10-70 % und die biologische Aktivität um 9-22 % höher war als in der Bodenmatrix. Dies bedeutet, dass im Mikrobereich des Bodens bezüglich der Stickstoffmineralisierung eine grosse räumliche Heterogenität herrscht. Schmidhalter et al. (1992) wiesen anhand von N_{\min} -Untersuchungen nach, dass sich diese kleinsträumige Variabilität auch auf Parzellenebene grossräumig widerspiegelt.

Auf Grund dieser hohen Variabilität besteht bei einer nicht angepassten Beprobungsmethodik die Gefahr, dass Boden- statt Verfahrensunterschiede gemessen werden.

Präferenzielle oder Bypass-Flüsse: Für die mengenmässige Ausprägung der Nitratauswaschung spielen zusätzlich zur räumlichen Verteilung des Nitrates die ablaufenden Transportprozesse im Boden eine wichtige Rolle. Verschiedene Autoren wiesen präferenzielle Fließstrukturen nach (Germann et al. 1984, Wilkens 1992, Bundt et al. 2001, Forrer et al. 2000). Schmied et al. (2000) zeigten bei konventioneller Bodenbearbeitung auf, dass 75 % eines oberflächlich aufgetragenen Farbtracers über präferenzielle Fließwege und nicht über die Bodenmatrix in die Tiefe verfrachtet wurde. Klavivko et al. (1991) belegten, dass eine Bewässerung von 10 mm genügte, um in bearbeiteten Böden Herbizide in 75 cm tief gelegene Drainagen zu transportieren. Seiler et al. (2002) zeigten, dass sich der vertikale Wasserfluss im Boden in einen Matrixfluss und in einen Bypass-Fluss aufspaltet. Der Matrixfluss bewegte sich mit zirka 0,7 m pro Jahr, der Bypass-Fluss hingegen mit 0,5 m pro Tag fort. Kranz et al. (1998) zeigten mittels unterteilter Lysimeter, dass die Wasserdurchflussmengen über die Fläche gesehen eine grosse Variabilität aufweisen. Effekte wie ungleichmässiger Porenverlauf und "Regenschirmeffekte", verursacht durch die in der Bodenmatrix liegenden Steine, bewirkten bei den Transportprozessen eine grosse Heterogenität. Schmied et al. (2000) wiesen nach, dass starker Regen den präferenziellen Fluss durch vertikal angeordnete Grobporen fördert, während bei kleinen Niederschlagsmengen der Matrixfluss dominiert. Die Transportprozesse des Nitrats werden also zusätzlich durch die Niederschlagsintensität geprägt.

Kung et al. (2000) kamen mittels Tracerversuchen zum Schluss, dass präferenzielles Fließverhalten sowohl bei Pflug wie Direktsaat zu finden war. Bezüglich des Transportverhaltens von oberflächlich appliziertem Bromid fanden sie keine Unterschiede zwischen den beiden Bestellsystemen. Frede et al. (1994) bestätigten dies für einen sandigen Standort. Auf einem lehmigeren Standort wies das Direktsaat- im Vergleich zum Pflugverfahren bei der Durchbruchskurve einen zeitlich leicht verfrühten Bromid-Peak auf, der auf verstärktes, präferenzielles Fließverhalten hinwies.

All diese Untersuchungen zeigen, dass Wasser in bearbeiteten wie in unbearbeiteten Böden präferenziell versickert, sich aber die Ausprägung des präferenziellen Flusses im Oberboden bodenbearbeitungsspezifisch unterscheiden kann. Die Nitratauswaschung stellt die resultierende

Grösse aus der Menge und der Verteilung des Nitrats im Boden sowie der im Boden ablaufenden Transportprozesse dar.

Messung der Nitratauswaschung: Für die Quantifizierung der Nitratauswaschung bieten sich unterschiedliche Methoden an. Eine Möglichkeit ist die Entnahme von Bodenwasser mittels Saugkerzen und der anschliessenden Analyse der Nitratkonzentration (Weisskopf et al. 1992). Für die Berechnung der potentiellen Nitratauswaschung muss zusätzlich die Sickerwassermenge bestimmt werden. Prozesse wie Oberflächenabfluss erschweren deren Berechnung allerdings. Eine Alternative auf Standorten mit undurchlässigen Unterböden ist die Messung der Sickerwassermenge und der Nitratkonzentration im Drainagewasser, wie dies bei Schmiech et al. (2000) erfolgte. Eine klassische Möglichkeit für die Bestimmung ausgewaschener Nitratmengen bieten die Lysimeter (Nievergelt 1997, Murer 1995).

Für den vorliegenden Versuch wurden zur Quantifizierung der Nitratauswaschung Lysimeter nach dem Vorbild von Murer (1995) ausgewählt (Beschreibung siehe 3.3).

Sie bieten folgende Vorteile:

- Die Nitratkonzentration wird im ausgeflossenen Sickerwasser und nicht im Bodenwasser gemessen. Die Bodenwasserentnahme stellt nur eine punktuelle Erhebung im Boden dar, während die Nitratkonzentration im Sickerwasser die resultierende Grösse aller im Boden ablaufender Prozesse darstellt.
- Die Sickerwassermenge wird direkt gemessen und nicht errechnet.

Die Arbeit mit Lysimetern beinhaltet auch gewisse Nachteile:

- Die Erstellung bedingt einen grossen materiellen Aufwand.
- Das Entfernen und Montieren der aufgesetzten Ringe für die Durchführung der Bodenbearbeitung ist arbeitsaufwändig.
- Wie bei allen anderen Messsystemen können gewisse Störungen des natürlichen Systems "Boden-Pflanze" nicht ausgeschlossen werden (Bsp. präferenzielle Fliesswege zwischen Boden und Lysimeterwand).

Die im Rahmen dieser Arbeit gesammelten methodischen Erfahrungen zur Bestimmung der Nitratauswaschung sind unter 5.8 zusammengefasst.

2. Problemstellung

Für die Trinkwasserversorgungen von zirka 350 schweizerischen Gemeinden sind zu hohe Nitratgehalte nach wie vor ein ungelöstes Problem (BLW 2002). Neben einer gezielten N-Düngung vermögen die Umstellung der Fruchtfolgen, die Förderung der Begrünungen der Ackerflächen oder die Anlage von Dauergrünland die Nitratbelastung des Grundwassers nachweislich zu senken (Brifaux und Aubrion 1998, Moller-Hansen und Djurhuus 1997, Neyroud und Chauvin 2000). Diese Massnahmen stellen jedoch einen grossen Eingriff in die Bewirtschaftung dar. Die Veränderung der Bodenbearbeitung würde weniger Anpassungen bedingen. Ob die Minimierung oder der Verzicht auf die Bodenbearbeitung die Nitratauswaschung tatsächlich vermindert, lässt sich zur Zeit nicht generell beantworten (siehe 1.7).

Die ausgewaschene Menge Nitrat ist eine Grösse, die aus vielen Prozessen resultiert. Bodeneigenschaften wie Humusgehalt, Bodenstruktur, Körnung und Klima beeinflussen die Mineralisierung, die den organischen Stickstoff im Boden in mineralische Form umwandelt. Denitrifizierung, Immobilisierung, Aufnahme durch die Pflanzen und Auswaschung sind die wichtigsten Prozesse, die den Nitratgehalt im Boden vermindern. Es stellt sich die Frage, wie die Bodenbearbeitung diese Prozesse beeinflusst. Der Pflug lockert den Oberboden intensiv, während bei der Direktsaat jegliche Bodenbearbeitung unterbleibt. Bodenphysikalisch gesehen unterscheiden sich also die beiden Verfahren in der obersten Bodenschicht sehr stark. Wie wirken sich diese Unterschiede auf die Stickstoffdynamik und die Nitratauswaschung aus?

Neben Fragen der Landtechnik und der pflanzenbaulichen Aspekte stehen die Stickstoffdynamik und die Nitratauswaschung im Zentrum der vorliegenden Arbeit. Im Gegensatz zu vielen Untersuchungen in trockenen Gebieten wurde im niederschlagsreichen Klima von Tänikon (1180 mm Jahresniederschlag) die effektive Nitratauswaschung mittels Lysimetern gemessen.

Anhand eines Feldversuches wurden in einer Modellfruchtfolge mit gepflügten und unbearbeiteten Parzellen sowie unterschiedlichen N-Düngeverfahren folgende Problemkreise näher untersucht:

- Messung der Nitratauswaschung ins Grundwasser mittels monolithischer Feldlysimeter.
- Quantifizieren der Stickstoffdynamik mittels Bestimmung des mineralischen Stickstoffs im Boden sowie im Bodenwasser.
- Verfolgen der Biomasseentwicklung und der Stickstoffaufnahme der Pflanzen mittels Zwischenernten und Pflanzenanalysen. Erheben der Ertragsstruktur der verschiedenen Bestell- und Düngeverfahren.

Die Resultate sollen das Wissen über die Bestellsysteme vertiefen und dazu dienen, die Verfahren in der Praxis gezielter einzusetzen. Sie sollen die Grundlagen zur Verminderung der Nitratauswaschung ins Grundwasser und zur Verbesserung des physikalischen Bodenschutzes erweitern.

3. Material und Methoden

3.1 Standort und Witterung

Der Feldversuch zur Messung der Stickstoffdynamik und -auswaschung stand auf der Parzelle "Grund" der Eidgenössischen Forschungsanstalt Tänikon (Koordinaten E 8 ° 54' 22" / N 47° 28' 53"). Die Parzelle war zirka 2 % leicht gegen Westen geneigt. Es handelte sich um eine tiefgründige Parabraunerde, die auf der Grundmoräne des postglazialen Alluvion des Aadorferfeldes entstanden war (Schläfli 1999). In den Wiederholungen 1 und 3 wurde je ein Bodenprofil aufgenommen, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Die Profile wiesen einen ziemlich homogenen Aufbau ohne grosse Unterschiede in der Körnung auf. Über die Bodentiefe von 0-100 cm wurde der Skelettgehalt der Parzelle auf zirka 10 % geschätzt. Vor Versuchsbeginn 1998 wurde von jeder Parzelle eine Bodenprobe entnommen und auf die Körnung, organisch gebundenen Kohlenstoff (org. C), pH-Wert, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalt hin untersucht. Tabelle 1 enthält die Mittelwerte der wichtigsten Bodenparameter (weitere Parameter siehe Anhang 1). Der Witterungsverlauf der Jahre 1999-2001 ist in Tabelle 2 enthalten. Zur Abschätzung des Temperatureinflusses auf die Maisentwicklung sind in Tabelle 3 die Anzahl Stunden der Monate Mai und Juni der Jahre 1999 und 2001 aufgelistet, in denen die Temperaturen 0 °C, 6 °C und 10 °C unterschritten. Gemäss Stamp und Struik (1985) sind Keimung und frühes Jugendwachstum des Mais bei Temperaturen zwischen 6-10 °C möglich, jedoch ergeben sich bei diesen Temperaturen grosse Verzögerungen. Unterhalb von 6 °C können physiologische Schädigungen der Pflanzen resultieren. Im Hinblick auf die Abschätzung der potentiellen Ammoniakverluste sind in Tabelle 4 verschiedene Witterungsparameter der Termine der Gülleausbringung aufgelistet. Gemäss Walther (1998) beeinflussen neben der Bodenbeschaffenheit, der Gülleausbringmenge und -verdünnung vor allem die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit die Höhe der Ammoniakverluste bei der Gülleausbringung. Als zusätzliche klimatische Parameter sind in Tabelle 4 zudem die Windgeschwindigkeit und die Globalstrahlung angegeben. Aus diesen Parametern wurde schliesslich das relative Ammoniakverlustpotential geschätzt.

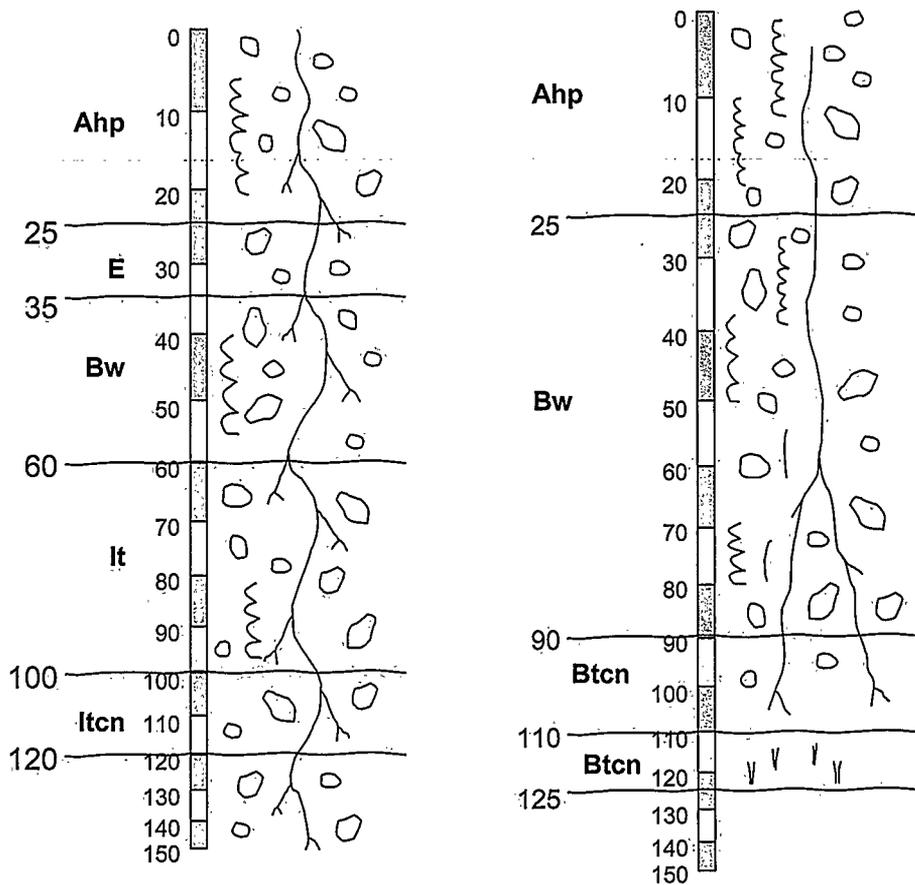


Abbildung 3. Profilskizze der beiden aufgenommenen Bodenprofile (links Wiederholung 1, rechts Wiederholung 3 (Parzellenplan siehe Abbildung 4), FAL Reckenholz 1998. Ahp = organo-mineralischer Oberboden, Humusstoffzone, gepflügt; Bw = Unterboden, Verwitterungshorizont; Btcn = Unterboden, relativ tonreich, mit punktförmigen schwärzlichen Knötchen; E = Auswaschungshorizont; It = Illuvialhorizont, relativ tonreich; Itcn = Illuvialhorizont, relativ tonreich, mit schwarzen Knötchen (Klassifikation gemäss Brunner et al. 2003).

Tabelle 1. Durchschnittliche Bodeneigenschaften des Versuchsstandortes

Eigenschaft	Tiefe 0-20 cm	Tiefe 30-50 cm
Ton [%]	21,9	24,9
Schluff [%]	33,8	33,2
Sand [%]	41,5	41,9
org. C. [%]	1,6	-
pH (H ₂ O)	6,6	6,8

Tabelle 2. Verlauf der Niederschläge und Lufttemperaturen (2 m Höhe) in Tänikon in den Jahren 1999-2001 (Daten Meteoschweiz, Zürich, CH).

	Niederschläge [mm]												Total
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
1999	61	163	81	104	244	189	71	107	94	54	99	154	1419
2000	29	152	84	69	79	61	221	115	145	64	75	34	1128
2001	100	56	253	153	99	184	111	150	188	98	104	87	1582
30J ¹	76	77	75	89	113	136	125	112	98	90	99	91	1179

	Lufttemperatur in 2 m Höhe [°C]												Mittel
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
1999	1,0	-1,4	5,3	8,3	14,4	14,6	18,0	17,1	15,7	8,7	0,9	1,5	8,7
2000	-0,6	3,6	5,6	9,0	14,5	17,3	15,5	18,3	14,0	10,2	5,1	3,0	9,7
2001	0,7	2,7	6,6	6,5	15,0	14,8	18,0	18,1	11,0	12,0	2,2	-0,6	9,0
30J ¹	-0,6	0,3	4,0	7,1	12,2	15,2	17,4	17,0	13,2	8,5	3,3	0,7	8,2

¹ Mittelwert von 1970-2000

Tabelle 3. Anzahl Stunden in den Monaten Mai und Juni (1999/2001), in denen die Lufttemperatur weniger als 0 °C, 6 °C bzw. 10 °C betrug.

	Temp < 0°C	Temp < 6°C	Temp < 10°C	Monatsmittel °C
Mai 1999	0 h	1 h	100 h	14,4
Juni 1999	0 h	8 h	94 h	14,6
Mai 2001	0 h	6 h	121 h	15,0
Juni 2001	0 h	13 h	90 h	14,8

Tabelle 4. Einschätzung der Gefahr von N-Verlusten anlässlich der Gülleausbringung auf Grund der Witterungsbedingungen

Datum	Lufttemperatur in 2 m Höhe		Relative Luft- feuchtigkeit		Windstärke		Globalstrahlung (Tagessumme)	Schätzung der Ge- fahr von N-Verlusten - klein -- mittel --- hoch
	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[m/s]	[m/s]		
Uhrzeit	13 h	19 h	13 h	19 h	13 h	19 h		
10.06.99	13,8	13,4	83	95	0,5	0,5	597	-
30.06.99	18,1	18,8	78	64	1,5	1,5	1520	--
10.03.00	9,7	9,4	71	71	3	1,5	408	-
04.04.00	15,1	11,4	51	46	2	0,5	1772	--
02.05.00	19,2	19,5	64	57	2	2	2100	--
08.06.01	15,0	13,7	80	90	3	0	733	-
29.06.01 ¹	22,6	23,6	44	44	3	3	2352	---

¹ Termin der Minereraldüngung von MIN war 27.06.03

3.2 Versuchsanlage und Verfahren

Versuchsanlage: In einer Split-Plot-Anlage wurden die zwei Stufen "Pflug" (PF) und "Direktsaat" (DS) des Hauptfaktors "Bestellverfahren" untersucht. Die Hauptparzellen waren in die drei Stufen "mineralische Stickstoffdüngung" (MIN), "Rindervollgülle" (GUL) und "keine Stickstoffdüngung" (ON) des Nebenfaktors "Düngung" unterteilt. Die Parzellengröße der Hauptparzellen betrug 12 x 30 m, diejenige der Nebenparzellen 12 x 10 m (Abbildung 4).

Fruchtfolge: Die Fruchtfolge der drei Versuchsjahre von 1999-2001 war Silomais (*Zea mays L.*), Winterweizen (*Triticum aestivum L.*), Silomais. Zwischen dem Winterweizen und dem Silomais wurde zusätzlich die Zwischenkultur Gelbsenf (*Sinapis alba L.*) angebaut. Vor Versuchsbeginn bedeckte während zweier Jahre eine Kunstwiese den Boden. Die wichtigsten Angaben zum Anbau der Kulturen sind in Tabelle 5 enthalten.

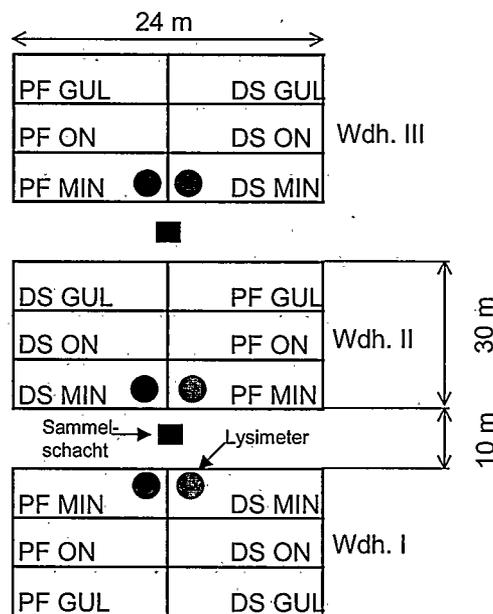


Abbildung 4. Plan der Versuchsanlage. Pflug (PF) und Direktsaat (DS) sind die zwei Stufen des Hauptfaktors "Bestellverfahren". Die drei Stufen des Nebenfaktors "Düngeverfahren" der Split-Plot-Anlage sind mineralische Stickstoffdüngung (MIN), Rindervollgülle (GUL) und keine Stickstoffdüngung (ON). Auf dem Plan ist die Lokalisation der Lysimeter und der Sammelschächte für das Sickerwasser ersichtlich.

Bodenbearbeitung und Saat: Gepflügt wurde mit dem Zweischarpflug Althaus Tierra (Althaus, Ersigen, CH) auf 25 cm Tiefe. Die Saatbettbereitung erfolgte in einem Durchgang mit der Kreiselegge NG 18/300 von Kverneland (Kverneland AG, Kverneland, N). Die Bearbeitungstiefe betrug zirka 8 cm, die Kreise drehten sich mit 250 U/min. Der Winterweizen wurde bei PF mit der pneumatischen Sämaschine Accord "CX" (Kverneland AG, Kverneland, N) mit einem Reihenabstand von 12,5 cm auf 2-3 cm Tiefe gesät. Für die Maissaat diente die Einzelkornsämaschine Accord "Optima" (Kverneland AG, Kverneland, N).

Tabelle 5. Angaben zu Bodenbearbeitung, Saat und Stickstoffdüngung der angebauten Kulturen.

	1999	2000		2001
Grundbodenbearbeitung ¹	03.05.99	11.10.99	-	04.04.01
Saatbettbereitung ¹	05.05.99	12.10.99	14.08.00 ²	02.05.01
Kultur	Silomais	Winterw.	Gelbsenf	Silomais
Sorte	LG 22.65	Titlis	Silenda	LG 22.65
Saadichte	10 Körner/m ²	420 Körner/m ²	20 kg/ha	10 Körner/m ²
Saatzeitpunkt	05.05.99	12.10.99	16.08.02 ³	02.05.01
1. N-Gabe (Zeitpunkt)	05.05.99 ⁴	10.03.00	-	02.05.01 ⁴
PF/MIN (kg N/ha)	30	50		30
DS/MIN (kg N/ha)	30	60		30
PF/GUL (kg N/ha)	30	29 ⁵		30
DS/GUL (kg N/ha)	30	29 ⁵		30
2. N-Gabe (Zeitpunkt)	10.06.99	04.04.00	-	08.06.01
PF/MIN (kg N/ha)	40	40		30
DS/MIN (kg N/ha)	60	50		50
PF/GUL (kg N/ha) ⁵	40	22		33
DS/GUL (kg N/ha) ⁵	59	34		55
3./4. N-Gabe (Zeitpunkt)	30.06.99	02.05.00/ 17.05.00	-	27.06.01/ 11.07.01
PF/MIN (kg N/ha)	80	30/30		60/40
DS/MIN (kg N/ha)	60	30/10		40/40
PF/GUL (kg N/ha) ⁵	48	27/0		67/0
DS/GUL (kg N/ha) ⁵	32	13/0		45/0
Total PF/MIN (kg N/ha)	150	150	-	160
DS/MIN (kg N/ha)	150	150	-	160
PF/GUL (kg N/ha) ⁵	118	78	-	130
DS/GUL (kg N/ha) ⁵	121	76	-	130

¹ Nur bei PF, bei DS erfolgte keine Bodenbearbeitung

² Spatenrollegge, zwei Durchgänge bei PF

³ Bei PF: Saat mit Kreiseleggenbestellkombination ohne Pflug

⁴ Erste Gabe als mineralische Unterfussdüngung

⁵ Nur NH₄-N gemäss den Analysresultaten der Gülleproben (Anhang 3)

Die Parzellen von DS wurden während der ganzen Versuchsdauer nie bearbeitet. Bei DS wurde die Meisselschardirektsämaschine Amazone NT 250 (Amazone, Hasbergen-Gaste, D) für die Winterweizensaat (Reihenabstand 19 cm, Saattiefe 2–3 cm) verwendet. Der Reihenabstand für die Maissaat betrug stets 75 cm, die Ablagetiefe lag bei 5 cm. Für die Maisdirektsaat diente die Einzelkornsämaschine John-Deere "Max Emerge" (John Deere, Moline, USA).

Düngetechnik: Die beiden Einzelkornsämaschinen waren mit Reihendüngerstreuern ausgerüstet, mit denen bei MIN und GUL eine Unterfussdüngung zur Saat erfolgte. Beim Verfahren ON erfolgte keine Stickstoffdüngung zur Saat. Der pneumatische Düngerstreuer Rauch Aero (Rauch GmbH, Sinzheim, D) diente für die mineralische Düngung der zehn Meter langen Parzellen beim Winterweizen und der ersten Kopfdüngung des Mais. Die zweite Kopfdüngung erhielt der Mais mit dem Reihendüngerstreuer des Haruwy Hackgerätes (Haruwy, Romanel, CH) in die Reihe verabreicht.

Die Gülle wurde mit einem Hadorn Güllefass (Hadorn AG, Leimiswil, CH), ausgerüstet mit einem Schleppschlauchverteiler, auf den Parzellen von GUL ausgebracht. Die Gülle stammte aus dem Milchvieh-Boxenlaufstall der FAT. Um die Homogenität der Gülle sicherzustellen, wurde die Gülle vor dem Ausbringen während mindestens zweier Stunden mit einem Schaufelrührwerk der Firma Fankhauser (Fankhauser AG, Malters, CH) gerührt. Pro Termin wurde während der Ausbringung jeweils eine Gülleprobe direkt ab den Schläuchen des Schleppschlauchvertailers entnommen. Die Analysen dieser Proben erfolgte durch das Labor der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL) in Zürich-Reckenholz. Die Resultate dieser Analysen sind in Anhang 3 enthalten und wurden für die Berechnung der mit der Gülle verabreichten N-Gaben verwendet.

Bemessung der Stickstoffgaben: Für den Mais wurde bei MIN und GUL zur Saat 30 kg N/ha als Unterfussdüngung appliziert (Tabelle 5). Im 6-Blatt-Stadium wurde die Stickstoffmenge (kg N/ha) gemäss der Formel $180 - N_{\min}$ berechnet. N_{\min} bezeichnet dabei die mittels der N_{\min} -Proben (siehe 3.7) im Boden (Tiefe 0-90 cm) bestimmte Menge an mineralischem Stickstoff.

Für die Unterfussdüngung des Mais diente 1999 Diammonphosphat (26 % N, 7% P) und 2001 Magnesium-Ammonsalpeter (27,5 % N + 5 % Mg). Für die Kopfdüngung wurde in beiden Jahren Mg-Ammonsalpeter (27,5 % N + 5 % Mg) eingesetzt.

Beim Weizen wurden im Frühjahr bei Vegetationsbeginn Stickstoffgaben nach den Formeln $110 - N_{\min}$ (PF) und $130 - N_{\min}$ (DS) verabreicht. Diese Mengen wurden im Jahr 2000 in zwei Gaben unterteilt. Zum Schossen des Weizens erhielten beide Bestellverfahren 30 kg N/ha. Die Ährens-gabe betrug 30 kg N/ha bei PF und 10 kg N/ha bei DS, somit wurde bei beiden Bestellverfahren dieselbe gesamte Stickstoffmenge gedüngt. Als Mineraldünger diente für alle Düngungs-gänge Ammonsalpeter (27 % N).

Für GUL galt sowohl beim Mais als auch beim Weizen der Grundsatz, dass 70 % des bei MIN gedüngten Stickstoffs mit $\text{NH}_4\text{-N}$ aus der Gülle zu decken ist. Aufgrund der Schwankungen des Stickstoffgehaltes der Gülle ergaben sich leider im Jahr 2000 grössere Abweichungen von dieser Regel, als nur 52 % verabreicht wurden. In den beiden anderen Jahren wurde die Zielmenge mit 80 % des $\text{NH}_4\text{-N}$ von MIN leicht überschritten.

Für die folgenden Berechnungen wurde ausschliesslich der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt von GUL einbezogen. Wegen der guten Versorgung des Versuchsstandortes mit den Grundnährstoffen (P, K, Mg), konnten ausser der Stickstoffwirkung der Gülle keine anderen Nährstoffwirkungen erwartet

werden. Deshalb wird in den folgenden Resultaten und der Diskussion nicht näher auf diese Aspekte eingegangen.

Die Durchführung des Pflanzenschutzes erfolgte nach dem Schadschwellenprinzip. Neben den Herbiziden wurde einzig beim Weizen im Jahr 2000 ein Fungizid eingesetzt. Insektizide kamen keine zum Einsatz. Bei der Direktsaat wurde im Jahr 2001 ein Molluskizid eingesetzt. Die getroffenen Massnahmen sind detailliert im Anhang 2 dargestellt.

3.3 Konstruktion der Lysimeteranlage

Die Lysimeter wurden nach dem Vorbild von Murer (1995) gefertigt (Abbildung 5). Sie waren in den drei Blöcken je in den gepflügten und den direktgesäten Parzellen mit mineralischer N-Düngung (Abbildung 4) platziert. Sie bestanden aus einem Zylinder, geformt aus 2 mm dickem Chromstahlblech. Für das Einrammen der Zylinder wurden im Eigenbau ein Schlagkopf und eine Schneide gefertigt, die oben und unten auf die Zylinder zu liegen kamen. Das Einrammen erfolgte mittels eines Raupenbaggers (Abbildung 6). Um sicherzustellen, dass keine auf der Schneide liegenden Steine im Inneren der Lysimeter Hohlräume verursachten, wurde während dieses Vorganges der Lysimeterzylinder aussen fortlaufend freigelegt. Ein unter dem Lysimeter durchgezogenes Drahtseil trennte schliesslich den Monolithen vom gewachsenen Boden, worauf dieser aus dem Loch gehoben werden konnte. Ein Deckel, gefüllt mit einer Sickerschicht bestehend aus Einkornbeton (Körnungsdurchmesser des Kiesel 4-8 mm), schloss die Lysimeter unten ab.

Die Lysimeter wurden mit dem Bagger an ihrem vorgesehenen Ort platziert und bodeneben eingegraben. Die Leitungen für das Sickerwasser und die Saugkerzen mündeten in zwei zentrale Sammelschächte. Um sicherzustellen, dass sich kein Stauwasser auf dem Grund der Lysimeter bildete, waren pro Lysimeter 4 Saugkerzen im Bodendeckel eingebaut. Auf diese Saugkerzen wirkte ein permanenter Unterdruck von 3,5 hPa. Dieser Unterdruck entstand durch das Gefälle der Kapillaren ("hängende Wassersäulen"), die die Saugkerzen entwässerten. Ein Gummischlauch leitete das Sickerwasser durch die Ausläufe der Lysimeter in die Sammelschächte. Dort floss das Sickerwasser über eine Zählwippe (Kottonau, Umweltsensorik, Uetikon, CH) in eine PVC-Wanne mit 40 Liter Inhalt pro Lysimeter. Die Sickerwassermenge der Lysimeter (Abbildung 18), wurde über die Messung der in den Wannen aufgefangenen Wassermengen bestimmt.

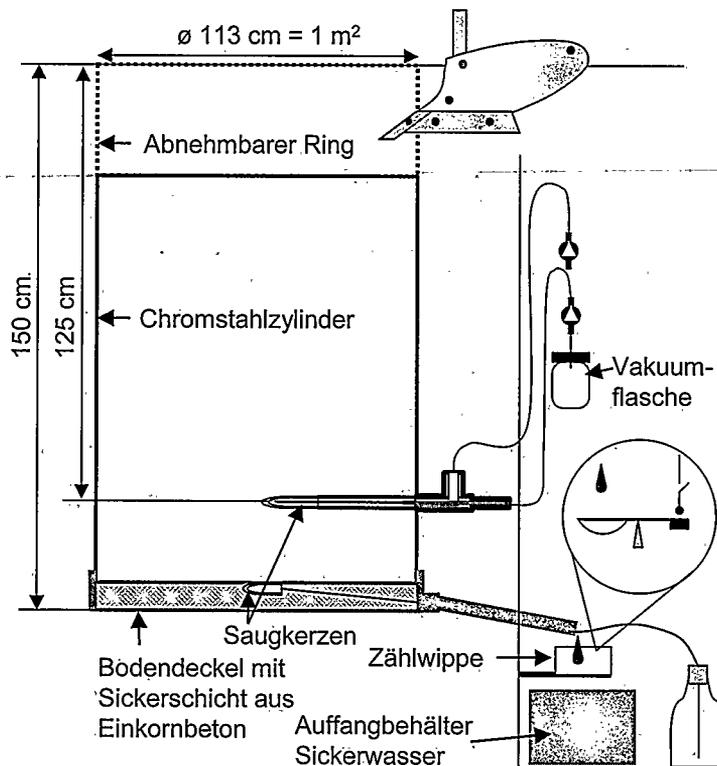


Abbildung 5. Konstruktions-skizze der monolithischen Lysimeter mit Freiauslauf. Das Sickerwasser wurde in einem zentralen Sammelschacht aufgefangen.

Ein Campbell Datalogger "CR 10" (Campbell Scientific Inc., Logan, USA) speicherte halbstündlich die aufsummierte Anzahl Wippenschläge. Für die Eichung der Wippen wurde die über ein bestimmtes Zeitintervall in den Auffanggefäßen gemessene Wassermenge durch die Anzahl erfasste Wippenschläge geteilt. Diese Werte wurden für die Bestimmung des Durchflussverhaltens der Lysimeter (Abbildung 19) verwendet.

Aus den Auffanggefäßen der einzelnen Lysimeter wurde zirka alle 14 Tage eine Wasserprobe (50 ml) für die Bestimmung der Nitrat- und Ammoniumkonzentration im Sickerwasser gezogen und bis zur Analyse bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiefgefroren. Die Ammoniumkonzentration lag bei allen Proben unter $2\text{ mg/l NH}_4\text{-N}$, weshalb in den Resultaten und der Diskussion nur der Nitratgehalt berücksichtigt wird.

Durchflusskurven: Neben den Bestimmungen der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser stellt sich die Frage, ob das sich das Durchflussverhalten des Wassers der beiden Bestellsystemen unterscheidet. Fließen nach einem Regenereignis die Wasserfronten (Durchbruchkurven) wegen dem präferenziellen Fluss bei DS schneller durch Lysimeter als bei PF? Die Berechnung der Charakteristiken des Durchflussverhaltens erfolgte pro Regenereignis auf Grund des Vergleiches der Maxima der Durchbruchkurven der einzelnen Lysimeter. Von jedem Maximum einer Durchflusskurve eines Lysimeters wurde die zeitliche Verschiebung (t_x) und die Höhe des Maximums (h_x) mit den anderen Lysimetern verglichen (Abbildung 7).

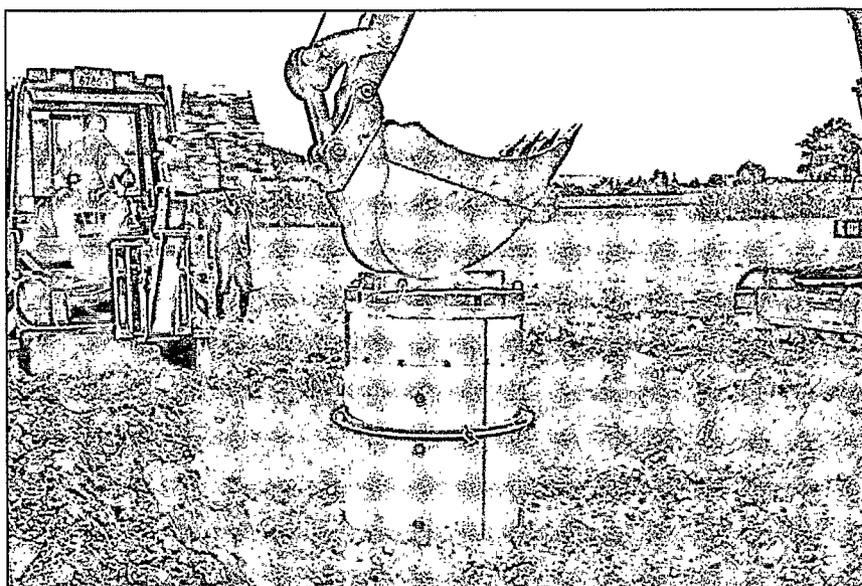


Abbildung 6. Einrammen eines Lysimeters mit einem Raupenbagger. Ein aufgesetzter Schlagkopf und eine Schneide schützten den Chromstahlzylinder während des Einrammens.

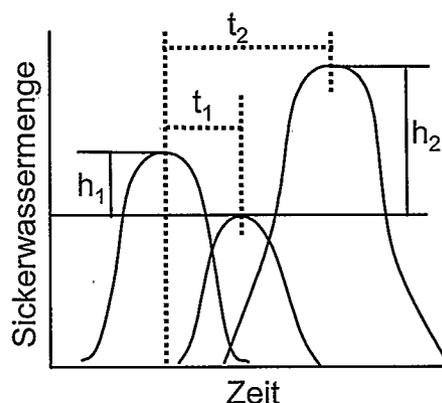


Abbildung 7. Berechnung der relativen zeitlichen und mengenmässigen Unterschiede der Maxima der Durchflusskurven der einzelnen Lysimeter. t_x bezeichnet die zeitliche Verschiebung in Bezug auf das erste pro Niederschlagsereignis aufgetretene Maximum, h_x bezeichnet die relativen Höhenunterschiede im Vergleich zum tiefsten, pro Niederschlagsereignis aufgetretene Maximum.

3.4 Bodenwasserentnahme mittels Saugkerzen

Im ungestörten Boden ausserhalb der Lysimeter waren in Block II in den Tiefen 10, 25, 50, 80 und 125 cm je drei Saugkerzen (Abbildung 8) eingebaut, um den Nitratgehalt des Bodenwassers in unterschiedlichen Tiefen zu erheben. Zirka alle zwei Wochen wurde mittels eines Vakuumpressors ein absoluter Luftdruck von 200 hPa angelegt, um Bodenwasser in das Innere der Saugkerzen einzusaugen. Dieses Bodenwasser wurde am Folgetag entnommen. Da die Saugkerzen nur im Block II installiert waren, war es nicht möglich, die Verfahren PF und DS sta-

tistisch miteinander zu vergleichen. Ziel war es, den dynamischen Verlauf der beiden Verfahren, ohne direkten Vergleich, aufzuzeigen.

Zusätzlich waren in allen sechs Lysimetern je drei Saugkerzen in der Tiefe von 125 cm eingebaut. Diese ermöglichten einen Vergleich des Nitratgehaltes im Boden- und im Sickerwasser.

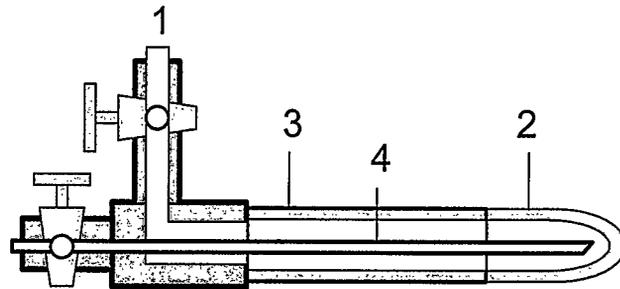


Abbildung 8. Konstruktionsskizze der Saugkerzen, die aus einer Vakuumleitung (1), einem porösen Keramikkopf (2), einem PVC-Rohr (3) und einer mit Teflon beschichteten Kapillare (4) zum Absaugen des Wassers bestehen.

3.5 Pflanzenernten und -analysen

Biomasseentwicklung: Die Biomasseentwicklung und die Stickstoffaufnahme der Pflanzen wurden mittels vier Zwischenernten beim Weizen und drei beim Mais erfasst. Der Zeitpunkt der Zwischenernten wurde nach dem Entwicklungsstand der Pflanzen von PF/MIN festgelegt. Die BBCH-Entwicklungsstadien (Lancashire et al. 1991, Meier 2001) sowie die dazugehörigen Termine sind in den entsprechenden Abbildungen angegeben. Pro Termin und Parzelle wurden beim Mais und Weizen je drei Probeflächen (unechte Wiederholungen) pro Parzelle geerntet. Die Masse einer Probefläche betrug beim Mais: 1 Reihe (75 cm Reihenabstand) x 2 m Länge = 0,75 m². Beim Weizen mass eine Probefläche bei DS drei Pflanzenreihen (19 cm Reihenabstand) x 0,6 m Länge = 0,34 m². Bei PF betrug diese Probefläche vier Reihen (Reihenabstand 12,5 cm) x 60 cm Länge = 0,3 m². Das Zählen der Anzahl Pflanzen und Ähren dieser Flächen ermöglichte das Berechnen der Bestandes- und Ährendichten. Die Anzahl Körner pro Kolben respektive Ähre wurde aus dem Kornertrag, dem Tausendkorngewicht und der Anzahl Kolben respektive Ähren der Probeflächen errechnet. Nach dem Wiegen der Proben zur Bestimmung des Frischgewichtes des Biomasseertrages (inkl. Strohertrag beim Weizen) wurden die Maisstängel und die Weizenhalme zur weiteren Verarbeitung mit einem Standhäcksler in Stücke von zirka 3 cm Länge zerkleinert. Zur Bestimmung des Trockenmassengehaltes trockneten die Proben im Trocknungsöfen während 24 Stunden bei 105 °C. Das Pflanzenmaterial für die chemische Analyse trocknete während 48 Stunden bei 60 °C. Die Pflanzenproben wurden im Labor auf den Gesamtstickstoffgehalt untersucht. Dazu diente jeweils eine Mischprobe des Pflanzenmaterials des gesamten Sprosses, welche mit der Labormühle gemahlen (Janke & Kunkel Labortechnik, Staufen i. Br. D, Typ "A10") und anschliessend mit einem LECO CHN-1000 Autoanalyzer (LECO Corporation, St. Joseph, MI, USA) analysiert wurde.

Blühverlauf: Für die Bestimmung des Blühverlaufes des Mais wurden 20 Maispflanzen pro Parzelle mit Wollfäden markiert. Die Bonitur der Pflanzen erfolgte für die männlichen Blüten nach dem Schema blühen "ja" (erste Staubbeutel sichtbar) oder "nein" (kein Staubbeutel sichtbar) und für die weibliche Blüte "ja" (Seide sichtbar), "nein" (keine Seide sichtbar). In Abbildung 9 und Abbildung 10 ist der relative Anteil [%] der blühenden im Verhältnis der nicht blühenden Pflanzen dargestellt.

Ernteindex: Der Ernteindex ist definiert als das Verhältnis der Korntrockenmasse zur gesamten Trockenmasse des Sprosses (Boguslawski 1981).

N-Ausnutzungsgrad: Der N-Ausnutzungsgrad der Stickstoffdünger wurde gemäss der Differenzmethode nach Finck (1992) bestimmt:

$$N - \text{Ausnutzungsgrad} [\%] = \frac{N \text{ gedüngt. Sprossbiom.} - N \text{ ungedüngt. Sprossbiom.}}{\text{applizierter N - Dünger}} * 100$$

N gedüngt. Sprossbiom. = Stickstoffgehalt [kg N/ha] der Sprossbiomasse der mit N gedüngten Parzellen

N ungedüngt. Sprossbiom. = Stickstoffgehalt [kg N/ha] der Sprossbiomasse der ungedüngten Parzellen.

applizierter N-Dünger = gedüngter N [kg N/ha]

N-Mehrertrag: Angelehnt an die obenstehende Formel wird die Wirkung der N-Düngung durch den Mehrertrag an Körnern oder Biomasse pro Kilogramm gedüngter Stickstoff im Vergleich zu den ungedüngten Parzellen ausgedrückt:

$$N - \text{Mehrertrag} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg N}} \right] = \frac{\text{kg gedüngte Körner} - \text{kg ungedüngte Körner}}{\text{applizierter N - Dünger}}$$

kg gedüngte Körner = Körnerertrag [kg/ha] der gedüngten Parzellen

kg ungedüngte Körner = Körnerertrag [kg/ha] der ungedüngten Parzellen

applizierter N-Dünger = gedüngter N [kg N/ha]

3.6 Messung der Bodentemperaturen

Die Bodentemperaturen wurden in Block II bei PF/Min und DS/Min mit je drei Temperatursonden pro Tiefe (Typ 107, Campbell Scientific Inc., Logan, USA) erhoben. Die Einbautiefen der Temperatursonden betragen 5 cm und 10 cm. Die Temperaturen wurden stündlich gemessen und durch den Datenlogger aufgezeichnet. Die Bodentemperaturen wurden nur in einem Block erhoben. Aus diesem Grund sind bei den Resultaten (Abbildung 12) nur die Standardabweichungen der Wochenmittelwerte dargestellt.

3.7 Bestimmung des Stickstoffs in Boden und Wasser

N_{min}: Der mineralische Stickstoffgehalt des Bodens wurde gemäss der N_{min}-Methode im Labor der FAL Reckenholz in Zürich (Eidg. Forschungsanstalten 1996) bestimmt. Mit Pürkhauersonden (System Fritzmeier, Grosshelfendorf, D) wurden aus den Tiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-

90 cm je fünf Einstiche pro Parzelle entnommen und pro Bodenschicht zu einer Mischprobe zusammengefügt. Diese Proben lagerten bei -20 °C. Die Termine der N_{\min} -Probenahmen sind in Abbildung 13 enthalten.

Nitrat im Bodenwasser- und Sickerwasser: Die mittels Saugkerzen und Lysimetern gewonnenen Bodenwasser- und Sickerwasserproben wurden in 50-ml-Flaschen abgefüllt und bei -20 °C tiefgefroren. Die Analysen auf Nitrat- und Ammoniumstickstoff erfolgten an der FAL-Reckenholz gemäss der Methoden von Hort et al. (1998).

3.8 Visualisierung der Fließwege des Wassers

Die Visualisierung und Quantifizierung der Fließmuster im Boden erfolgte in den Jahren 1999 und 2001 auf je einer Fläche von 1 m² in den Wiederholungen 1-3 durch die Infiltration von 40 l/m² Farbstofflösung. Als Farbstoff diente der Lebensmittelfarbstoff "Vitasynblau" (Clariant GmbH, Frankfurt (Main), D), appliziert als 0,3 prozentige, wässrige Lösung. Mit Giesskannen wurde die Lösung auf 1 m² Fläche pro Wiederholung verteilt. Die Ausbringung erfolgte nur in kleinen Dosierungen, mit dem Ziel, keinen Rückstau an der Bodenoberfläche zu verursachen, um den Farbstoff kontinuierlich in den Boden zu infiltrieren. Nach der Infiltration wurden vertikale Bodenprofile quer zur Bewirtschaftungsrichtung gegraben und mit einer Spiegelreflexkamera fotografiert (drei Profile pro Infiltrationsfläche mit 60 cm Breite und 45 cm Höhe). Die mit einem Scanner digitalisierten Bilder wurden anschliessend mit der Bildanalysesoftware "BMPtool" (Anken et al. 1999) ausgewertet.

3.9 Statistische Auswertungen

Statistische Auswertung: Die statistischen Auswertungen erfolgten mit Hilfe des Statistikpaketes S-Plus 6.1 (Insightful Corp, Seattle, USA). Die erhobenen Daten wurden gemäss dem Split-Plot-Design (Roth 1999) varianzanalytisch ausgewertet. Ergab der F-Test signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$, wurden die Verfahren mit dem multiplen Test von Tukey auf signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren analysiert. Bei Unterschieden mit $p > 0,05$ wurde auf weitere Testverfahren verzichtet. In diesen Fällen steht in den Tabellen und Abbildungen jeweils der p-Wert, ab dem der F-Test signifikante Unterschiede anzeigen würde.

Interaktionen: Über die drei Jahre gesehen, verhielten sich die Biomasseerträge und die Ertragskomponenten der Dünge- und Bestellverfahren nicht gleichmässig. Signifikante Interaktionen traten sowohl zwischen Jahr und Bestellverfahren sowie zwischen Jahr und Düngeverfahren auf. Aus diesem Grund sind alle Ergebnisse über die einzelnen Jahre dargestellt und wurden nicht über die drei Jahre gemittelt.

Da zwischen den Dünge- und den Bestellverfahren nur in Ausnahmefällen signifikante Interaktionen auftraten, wurden die Werte der Bestellverfahren über die Düngeverfahren gemittelt und umgekehrt. Beispiel: Die Werte von PF sind der Mittelwert der Einzelparzellen von PF/MIN, PF/GUL und PF/ON. Die Werte von MIN sind die gemittelten Werte der Einzelparzellen von PF/MIN und DS/MIN. Weil es sich beim Versuchsdesign um ein Split-Plot-Design handelt, lies-

sen sich die Verfahren statistisch nicht kreuzweise auswerten. So ist es zum Beispiel in einem solchen Design nicht möglich, PF/MIN von DS/GÜL zu unterscheiden. Es lassen sich lediglich die statistischen Unterschiede zwischen den Haupt- und den Nebenfaktoren getrennt errechnen. Aus diesem Grund sind die Resultate konsequent getrennt nach Bestell- und Düngeverfahren dargestellt.

4. Resultate

4.1 Darstellung der Bestell- und Düngeverfahren

Zwischen den Bestell- und den Düngeverfahren traten sowohl bei den erhobenen pflanzenbaulichen Parametern des Mais, als auch bei denjenigen des Winterweizens nur in Ausnahmefällen signifikante Interaktionen auf. Dasselbe galt für die N_{\min} -Erhebungen. Aus diesem Grund wurden die Resultate für den Hauptfaktor (Bestellverfahren) über den Nebenfaktor (Düngeverfahren) gemittelt und umgekehrt. In Fällen in denen signifikante Interaktionen auftraten, wird speziell darauf hingewiesen (Berechnungsgrundlage siehe 3.9). Die Resultate sind konsequent nach Bestellverfahren und Düngeverfahren getrennt dargestellt, da es sich beim gewählten Versuchsdesign um ein Split-Plot handelt, das keine kreuzweise Auswertungen zulässt (siehe 3.9).

4.2 Bestelltechnik und Maisentwicklung

Spross-Biomasseertrag 1999: Tabelle 6 zeigt die relativen Biomasseerträge der Maissprosse anlässlich der verschiedenen Zwischenernten. Die Erträge des Verfahrens Pflug (PF) sind als 100 gesetzt. Während sich die Pflanzen von PF standortüblich entwickelten, wies das Verfahren Direktsaat (DS) beim 3- und 6-Blattstadium des Mais (BBCH 13 resp. 16) nur zirka 10 % der Biomasse von PF auf, was die schlechte Entwicklung der Pflanzen von DS abbildete. Die Pflanzen wiesen im Vergleich zu PF nicht nur eine wesentlich geringere Biomasse, sondern auch eine stark unterschiedliche äussere Erscheinung auf. Neben dem unregelmässigen, verzögerten Feldaufgang und dem kümmerlichen Wuchs zeigten die Pflanzen von DS im Vergleich zu PF während der Jugendentwicklung eine sehr helle Blattfärbung. Im weiteren Entwicklungsverlauf verbesserte sich die Pflanzenentwicklung bei DS. Der Schlussertrag betrug schliesslich 52 % von PF. Letzteres Verfahren wies zu allen Zeitpunkten signifikant höhere Erträge auf als DS.

Spross-Biomasseertrag 2001: Der Spross-Biomassezuwachs von DS verlief bis zum 6-Blattstadium im Vergleich zu PF wiederum langsamer (Tabelle 6). Die Wachstumsdepressionen der Pflanzen von DS waren während der Jugendphase jedoch wesentlich weniger ausgeprägt als 1999. Bis zum 6-Blattstadium wies DS einen zirka 30 % tieferen Biomassertrag auf als PF. Nach der Jugendentwicklung kompensierten die Pflanzen von DS einen Teil dieses Wachstumsrückstandes. Bei der Schlussernte betrug der Unterschied zwischen den beiden Verfahren noch 8 %. Optisch waren zwischen den beiden Verfahren, mit Ausnahme der Jugendentwicklung, kaum Unterschiede feststellbar. Erstaunlicherweise unterschieden sich die Verfahren einzig zum 6-Blattstadium signifikant. Ursache dieses statistischen Verhaltens waren einerseits die grosse Streuung der Werte, andererseits die kleine Anzahl Freiheitsgrade (fünf Freiheitsgrade aus zwei Verfahren mit drei Wiederholungen).

Tabelle 6. Relative Sprossbiomasseerträge des Mais in den Jahren 1999 und 2001. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) und keine N-Düngung (ON) gemittelt. Die relativen Werte von DS sind im Vergleich zum Ertrag von PF (100 %) angegeben. Unterschiedliche Buchstaben in den Zeilen "stat" bezeichnen signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$. Bei $p > 0,05$ ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Jahr	Parameter	Wachstumsstadium			
		BBCH 13 3-Blatt	BBCH 16 6-Blatt	BBCH 65 Büte	BBCH 85 Ernte
1999	Relativertrag von DS [%] (PF =100 %)	11,0	10,6	27,3	52,1
	Ertrag PF [Mg TM/ha]	0,12	0,76	8,01	16,94
	stat	a/b	a/b	a/b	a/b
2001	Relativertrag von DS [%] (PF =100 %)	68,4	59,3	81,9	92,2
	Ertrag PF [Mg TM/ha]	0,08	0,66	5,39	14,29
	stat	0,08	a/b	0,27	0,39

Blühverlauf 1999 und 2001: Analog zur Biomasseentwicklung zeigte der Blühverlauf der männlichen und weiblichen Blüten von DS im Jahr 1999 im Vergleich zu PF einen stark verzögerten Verlauf (Abbildung 9). Die Pflanzen von DS blühten zirka 5 Tage später ab. Die beiden Bestellverfahren zeigten bei der männlichen Blüte am 26.07.99 ($p = 0,008$), am 02.08.99 ($p = 0,08$) und am 06.08.99 ($p = 0,05$) ein statistisch unterschiedliches Blühverhalten. Bei der weiblichen Blüte unterschieden sich die Bestellverfahren vom 26.07.99 bis am 09.08.99 signifikant. Bei PF erschienen die weiblichen Blüten tendenziell sogar früher als die männlichen Blüten von DS.

Im Jahr 2001 traten zwischen den Bestellverfahren bei der männlichen Blüte keine signifikante Unterschiede auf (Abbildung 9). Der Anteil der Pflanzen mit sichtbarer Seide (weibliche Blüten) unterschied sich zwischen den beiden Bestellverfahren am 25.07.01 und am 27.07.01. Im Gegensatz zu 1999 blühten die Pflanzen von DS früher als bei PF.

Parameter der Schlussernte 1999: Tabelle 7 zeigt die verschiedenen bei der Schlussernte erhobenen Parameter des Mais im Jahre 1999. Zwischen den Bestell- und den Düngeverfahren bestanden wiederum keine gesicherten Interaktionen. PF wies beinahe bei allen Parametern signifikant höhere Werte auf als DS. Einzig beim Wassergehalt der Pflanzen und bei der Anzahl Pflanzen pro Fläche unterschieden sich die beiden Verfahren nicht signifikant. Bei der Bestandesdichte fiel auf, dass die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren beträchtlich waren, aufgrund der grossen Streuung der Werte und der beschränkten Anzahl Freiheitsgrade aber statistisch nicht unterschieden werden konnten. Der tiefere Biomasseertrag von DS widerspiegelte sich in den Parametern Einzelpflanzengewicht, Anzahl Pflanzen pro Fläche, Kornertrag, Tausendkorngewicht, Anzahl Körner pro Kolben und dem Ernteindex. Im relativen Vergleich der beiden Verfahren wiesen Korn- sowie Biomasseertrag als resultierende Grössen (Bsp. Korn-

ertrag = Summe der Anzahl Pflanzen pro Fläche x Anzahl Kolben pro Pflanze x Anzahl Körner pro Kolben x Korngewicht) die grössten Differenzen auf.

Parameter der Schlussernte 2001: Im Vergleich zu 1999 zeigten die bei der Schlussernte des Mais im Jahre 2001 erhobenen Parameter ein gegensätzliches Bild (Tabelle 7). Die Biomasseertrag der Pflanzen von DS war tiefer, aber der Kornertrag, das Tausendkorngewicht, die Anzahl Körner pro Kolben, das Korngewicht pro Kolben und demzufolge auch der Ernteindex waren bei DS höher als bei PF. Die Unterschiede waren allerdings statistisch nicht gesichert.

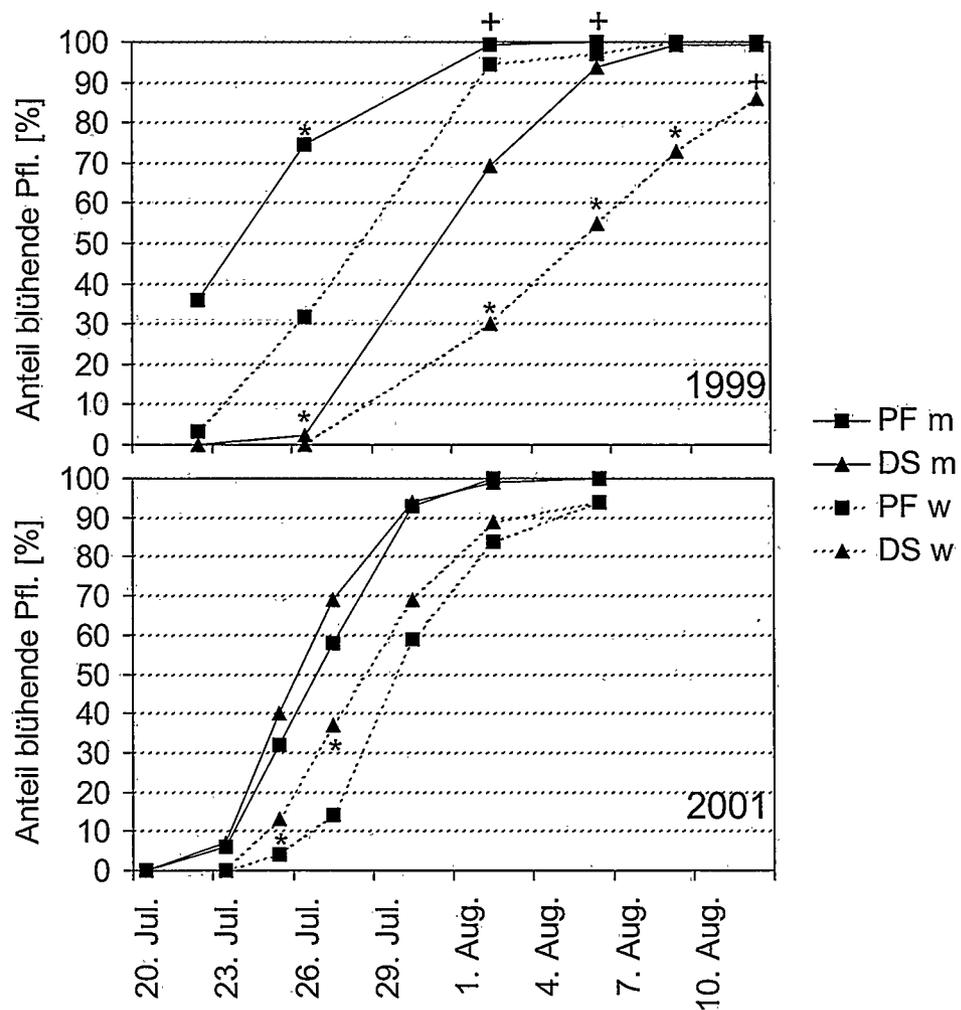


Abbildung 9. Blühverlauf der männlichen (m) und weiblichen (w) Maisblüten von Pflug (PF) und Direktsaat (DS) in den Jahren 1999 und 2001. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GÜL) und keine N-Düngung (ON) gemittelt. Bei 0 % sind keine Blüten sichtbar, bei 100 % blühen alle Pflanzen. Ein "*" bezeichnet signifikante Unterschiede für $p < 0,05$, "+" für $p < 0,10$.

Tabelle 7. Bei der Schlussernte des Mais in den Jahren 1999 und 2001 erhobene Parameter. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) und keine N-Düngung (ON) gemittelt. Die relativen Werte von DS stehen im Vergleich zu PF (100 %). Unterschiedliche Buchstaben (stat) bezeichnen signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$. Bei $p > 0,05$ ist der p -Wert des F -Tests angegeben.

1999	PF	DS		stat
	absolut	absolut	relativ	
Biomasseertrag [Mg TM/ha]	16,93	8,81	52 %	a/b
Wassergehalt bei Ernte [%]	32,9	34,3	104 %	0,26
Einzelpflanzengewicht [g TM/Pfl.]	182,3	114,3	63 %	a/b
Anzahl Pflanzen [Pfl./m ²]	10,2	7,6	74 %	0,06
Kornertrag [Mg TM/ha]	8,70	3,74	43 %	a/b
Tausendkorngewicht [g TM]	245,4	192,1	78 %	a/b
Anzahl Körner pro Kolben [Anzahl]	349,7	265,3	76 %	a/b
Gewicht der Körner/Kolben [g TM]	85,9	51,2	60 %	a/b
Ernteindex [Index 0-1]	0,46	0,42	91 %	a/b
2001				
Biomasseertrag [Mg TM/ha]	14,28	13,17	92 %	0,39
Wassergehalt bei Ernte [%]	35,1	37,6	107 %	a/b
Einzelpflanzengewicht [g TM/Pfl.]	133,7	132,3	99 %	0,91
Anzahl Pflanzen [Pfl./m ²]	10,7	9,9	93 %	0,09
Kornertrag [Mg TM/ha]	6,31	6,43	102 %	0,70
Tausendkorngewicht [g TM]	212,5	223,8	105 %	0,12
Anzahl Körner pro Kolben [Anzahl]	290,0	298,3	103 %	0,07
Gewicht der Körner/Kolben [g TM]	62,6	67,5	108 %	0,08
Ernteindex [Index 0-1]	0,43	0,49	114 %	0,24

Stickstoffgehalt der Pflanzen: Tabelle 8 enthält die Gesamtstickstoffgehalte der Maispflanzen. Zwischen den verschiedenen Bestellverfahren liessen sich in den Jahren 1999 und 2001 nur zu einem Termin signifikante Unterschiede feststellen. Im Gegensatz zum tiefen Biomasseertrag war der N-Gehalt von DS ausser im 6-Blatt-Stadium des Mais 1999 höher als derjenige von PF. Auch im Jahr 2001 wiesen die Pflanzen von DS im Vergleich zu PF einen Trend zu höheren Stickstoffgehalten in der Biomasse auf.

Tabelle 8. Stickstoffgehalte der Sprossbiomasse des Mais in den Jahren 1999 und 2001 zu den verschiedenen Probenahmeterminen. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) und keine N-Düngung (ON) gemittelt. Statistische Unterschiede mit $p < 0,05$ sind durch unterschiedliche Buchstaben in der Spalte "stat" bezeichnet, bei nicht signifikanten Unterschieden ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Jahr	Stadium	BBCH	N-Gehalt [mg N/g TM]		stat
			PF	DS	
1999	3-Blatt	13	44,1	44,9	0,77
	6-Blatt	16	36,3	32,4	0,06
	Blüte	65	11,5	13,0	a/b
	Schlussernte	85	8,5	9,3	0,09
2001	3-Blatt	13	37,4	36,9	0,80
	6-Blatt	16	14,4	14,7	0,76
	Blüte	65	11,2	14,1	0,16
	Schlussernte	85	9,1	10,3	0,12

Tabelle 9. Stickstoffentzug der Maissprosse der Jahre 1999 und 2001. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) und keine N-Düngung (ON) gemittelt. Statistische Unterschiede mit $p < 0,05$ sind durch unterschiedliche Buchstaben in der Spalte "stat" bezeichnet. Bei nicht signifikanten Unterschieden ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Jahr	Stadium	BBCH	N-Entzug [kg N/ha]		stat
			PF	DS	
1999	3-Blatt	16	5,4	0,6	a/b
	6-Blatt	16	27,5	2,7	a/b
	Blüte	65	92,2	28,8	a/b
	Schlussernte	85	145,5	81,6	a/b
2001	3-Blatt	13	3,1	2,1	0,14
	6-Blatt	16	9,7	5,8	0,08
	Blüte	65	61,9	66,5	0,9
	Schlussernte	85	130,3	136,7	0,7

Als Resultierende des Stickstoffgehaltes und der Trockenmasse stellt Tabelle 9 den Verlauf des Stickstoffentzuges der Pflanzensprosse dar. Während 1999 der tiefe Biomassertrag von DS einen signifikant geringeren N-Entzug der Pflanzen bewirkte, unterschieden sich die beiden Bestellverfahren im Jahr 2001 nicht.

N-Mehrertrag: Dieser wird in Kilogramm Mehrertrag an Körnern oder Sprossbiomasse pro Kilogramm gedüngter Stickstoff im Vergleich zu den ungedüngten Parzellen ausgedrückt (siehe 3.5). Über beide Jahre gesehen, verhielt sich der Mehrertrag sehr unterschiedlich (Tabelle 10).

1999 betrug der Mehrertrag beim Mais lediglich 9-13 kg Körner pro kg Stickstoff. Im Jahr 2001 bewirkte ein Kilogramm Stickstoff einen Mehrertrag von zirka 25 kg Körnern. Dieser Unterschied war dadurch bedingt, dass 1999 die ungedüngten Parzellen (ON) im Vergleich zu den mineralisch gedüngten Parzellen (MIN) zirka 73 % und im Jahr 2001 nur zirka 46 % des Korn-ertrages erzielten.

Tabelle 10. N-Mehrertrag an Körnern oder Sprossbiomasse pro Kilogramm gedüngter Stickstoff der Jahre 1999 und 2001. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die beiden Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN) und Gülledüngung (GUL) gemittelt. In der Zeile "stat" sind die p-Werte des F-Tests angegeben.

	Korn-Mehrertrag [kg TM/kg N]		Trockenmasse-Mehrertrag [kg TM/kg N]	
	1999	2001	1999	2001
PF	9,0	25,1	22,5	47,8
DS	13,5	26,2	22,1	44,3
stat	0,61	0,81	0,88	0,82

N-Ausnutzungsgrad: Wird vom Stickstoffentzug der Sprossbiomasse der gedüngten Parzellen (MIN und GUL) derjenige der ungedüngten Parzellen (ON) abgezogen, kann in Prozent ausgedrückt werden, wie viel vom gedüngten Stickstoff die Pflanzen zusätzlich zur natürlichen Mineralisierung aufgenommen haben (siehe 3.5). Im Vergleich der Jahre fällt auf, dass 1999 der N-Ausnutzungsgrad deutlich tiefer war als 2001 (Tabelle 11). Der Grund dafür sind die Differenzen der Stickstoffentzüge der gedüngten im Vergleich zu den ungedüngten Verfahren, die 1999 deutlich kleiner waren als 2001. Diese kleineren Differenzen dürften durch die intensivere N-Mineralisierung nach dem Kunstwiesenumbruch im Jahr 1999 entstanden sein. Zum Beispiel wies PF/ON, bei fast identischen N-Entzügen von PF/MIN (1999: 178 kg N/ha; 2001: 177 kg N/ha) 1999 einen Stickstoffentzug von 120 kg N/ha auf, während dieser nach dem Gelbsenf im Jahr 2001 bei 89 kg N/ha lag. Demzufolge hat PF/MIN im Jahr 2001 mehr gedüngten Stickstoff aufgenommen als 1999, was zur besseren N-Ausnutzung führte.

Tabelle 11. N-Ausnutzungsgrad des Mais in den Jahren 1999 und 2001. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die beiden Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) gemittelt. In der Zeile "stat" sind die p-Werte des F-Tests angegeben.

	1999	2001
PF [%]	27,1	40,9
DS [%]	18,0	54,7
stat	0,26	0,13

4.3 Stickstoffdüngung und Maisentwicklung

Spross-Biomasseertrag 1999: Die relativen Unterschiede der Biomasseerträge der verschiedenen Düngeverfahren zeigten vom Beginn der Entwicklung bis zur Schlussernte ein relativ einheitliches Bild (Tabelle 12). Das Verfahren ohne Stickstoffdüngung (ON) lag während der gesamten Entwicklung bei zirka 80 % der Werte von MIN. Die Unterschiede waren während der Jugendentwicklung geringer und vergrösserten sich gegen die Schlussernte hin. Das Verfahren mit Rindervollgülle (GUL) lag zu allen Zeitpunkten zwischen den Werten der anderen beiden Verfahren.

Spross-Biomasseertrag 2001: Im Vergleich zu den beiden anderen Düngeverfahren erzielte ON wie 1999 zu allen Zwischenernteterminen die signifikant tiefsten Erträge (Tabelle 12). Verglichen mit 1999 wies ON deutlich tiefere Werte auf. Diese lagen über alle Zwischenernten betrachtet bei 50 % der Biomasseerträge von MIN. Die Werte von GUL nahmen von 112 % (1. Zwischenernte) auf 83 % (Schlussernte) ab und wiesen im Vergleich zu MIN einen sinkenden Verlauf auf, wie dies schon 1999 zu beobachten war.

Blühverlauf 1999: Im Gegensatz zu den Bodenbearbeitungs- hatten die Düngeverfahren bei der männlichen Blüte keinen signifikanten Einfluss auf den Blühverlauf (Abbildung 10). Bei der weiblichen Blüte blühten in den Parzellen von MIN zwischen 06.08.99 und 9.08.99 signifikant mehr Pflanzen als bei ON ($p < 0,06$).

Blühverlauf 2001: Im Gegensatz zu 1999 beeinflusste 2001 die Düngung den Blühverlauf der männlichen Blüten signifikant (Abbildung 10). Die Verfahren MIN und ON wiesen deutliche Unterschiede auf. Die Düngeverfahren unterschieden sich vom 25.07.01 bis am 02.08.01 signifikant. Bei der weiblichen Blüte waren im Vergleich zu 1999 Differenzen von 2-3 Tagen festzustellen. Vom 27.07.01 bis 02.08.02 unterschieden sich die Düngeverfahren signifikant ($p < 0,02$), wobei die Reihenfolge wiederum $MIN > GUL > ON$ war.

Parameter der Schlussernte 1999: Die Unterschiede zwischen den Düngeverfahren der anlässlich der Schlussernte erhobenen Parameter zeigten bei der Schlussernte 1999 ein einheitliches Bild (Tabelle 13). MIN erzielte bei allen Parametern die höchsten, ON die tiefsten Werte. Von MIN zu GUL reduzierten sich die Werte der einzelnen Parameter ungefähr in gleichem Masse wie von GUL zu ON. Die Unterschiede zwischen ON und MIN waren ausser bei der Bestandesdichte und dem Ernteindex für alle Parameter statistisch gesichert. MIN unterschied sich von GUL nur beim Biomasseertrag signifikant.

Parameter der Schlussernte 2001: Wie im Jahr 1999 zeigten sich 2001 zwischen den verschiedenen Düngeverfahren dieselben, klar abgestuften Unterschiede, die meist der Reihenfolge $MIN > GUL > ON$ folgten (Tabelle 13). Ausser bei der Bestandesdichte erzielte MIN bei allen Parametern die höchsten und ON deutlich die tiefsten Werte. Wie schon 1999 wiesen einzig die Bestandesdichte und der Ernteindex keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verfahren auf. Mit Ausnahme der Bestandesdichte und des Tausendkorngewichtes waren im Jahr 2001 die relativen Unterschiede zwischen den Düngeverfahren grösser als 1999.

Tabelle 12. Relative Biomasseerträge des Mais zu verschiedenen Entwicklungsstadien in den Jahren 1999 und 2001. Die Werte der drei Düngerverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) sowie keine N-Düngung (ON) sind jeweils über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Unterschiedliche Buchstaben (stat) bezeichnen signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$. Bei $p > 0,05$ ist der p -Wert des F-Tests angegeben.

Jahr	Parameter	Entwicklungsstadium			
		BBCH 13 3-Blatt	BBCH 16 6-Blatt	BBCH 65 Büte	BBCH 85 Ernte
1999	Relativertrag von GUL [%] (MIN =100 %)	99,5	90,9	93,4	87,9
	Relativertrag von ON [%] (MIN =100 %)	84,9	80,2	75,1	73,2
	Ertrag MIN [Mg TM/ha]	0,07	0,46	5,70	14,80
	stat	ab/a/b	a/ab/b	a/a/b	a/b/c
2001	Relativertrag von GUL [%] (MIN =100 %)	111,7	96,2	90,3	82,8
	Relativertrag von ON [%] (MIN =100 %)	48,1	42,5	53,0	52,8
	Ertrag MIN [Mg TM/ha]	0,08	0,66	6,06	17,48
	stat	a/a/b	a/a/b	a/a/b	a/b/c

Tabelle 13. Bei der Schlussernte des Mais in den Jahren 1999 und 2001 erhobene Parameter. Die Werte der drei Düngerverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) sowie keine N-Düngung (ON) sind jeweils über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Die relativen Werte von GUL und ON sind im Vergleich zu MIN (100 %) angegeben. Unterschiedliche Buchstaben in der Spalte "stat" bezeichnen signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$. Bei $p > 0,05$ ist der p -Wert des F-Tests angegeben.

	MIN absolut (100 %)	GUL		ON		stat
		absolut	relativ [%]	absolut	relativ [%]	
1999						
Biomasseertrag [Mg TM/ha]	14,80	13,0	88	10,83	73	a/b/c
Einzelpflanzengewicht [g TM/Pfl.]	168,0	149,0	89	128,0	76	a/ab/b
Trockenmassegeh. bei Ernte [%]	34,8	33,3	96	32,7	94	a/ab/b
Anzahl Pflanzen [Pfl./m ²]	9,3	9,1	98	8,3	89	0,16
Kornertrag [Mg TM/ha]	7,16	6,32	88	5,19	73	a/ab/b
Tausendkorngewicht [g TM]	226,6	217,8	96	211,9	93	a/ab/b
Anzahl Körner pro Kolben [Anzahl]	335,5	311,6	93	275,0	82	a/ab/b
Korngewicht/Kolben [g TM]	76,7	69,2	90	59,9	78	a/ab/b
Ernteindex [Index 0-1]	0,44	0,44	100	0,44	100	0,87
2001						
Biomasseertrag [Mg TM/ha]	17,48	14,48	83	9,22	53	a/b/c
Einzelpflanzengewicht [g TM/Pfl.]	170,0	138,0	81	91,0	54	a/b/c
Trockenmassegeh. bei Ernte [%]	38,3	36,1	94	34,7	91	a/b/b
Anzahl Pflanzen [Pfl./m ²]	10,3	10,6	103	10,2	99	0,11
Kornertrag [Mg TM/ha]	8,47	6,78	80	3,86	46	a/b/c
Tausendkorngewicht [g TM]	232,0	224,0	97	198,5	86	a/a/b
Anzahl Körner pro Kolben [Anzahl]	361,5	303,5	84	217,5	60	a/b/c
Korngewicht/Kolben [g TM]	83,8	68,2	81	43,3	52	a/b/c
Ernteindex [Index 0-1]	0,49	0,47	96	0,42	86	0,06

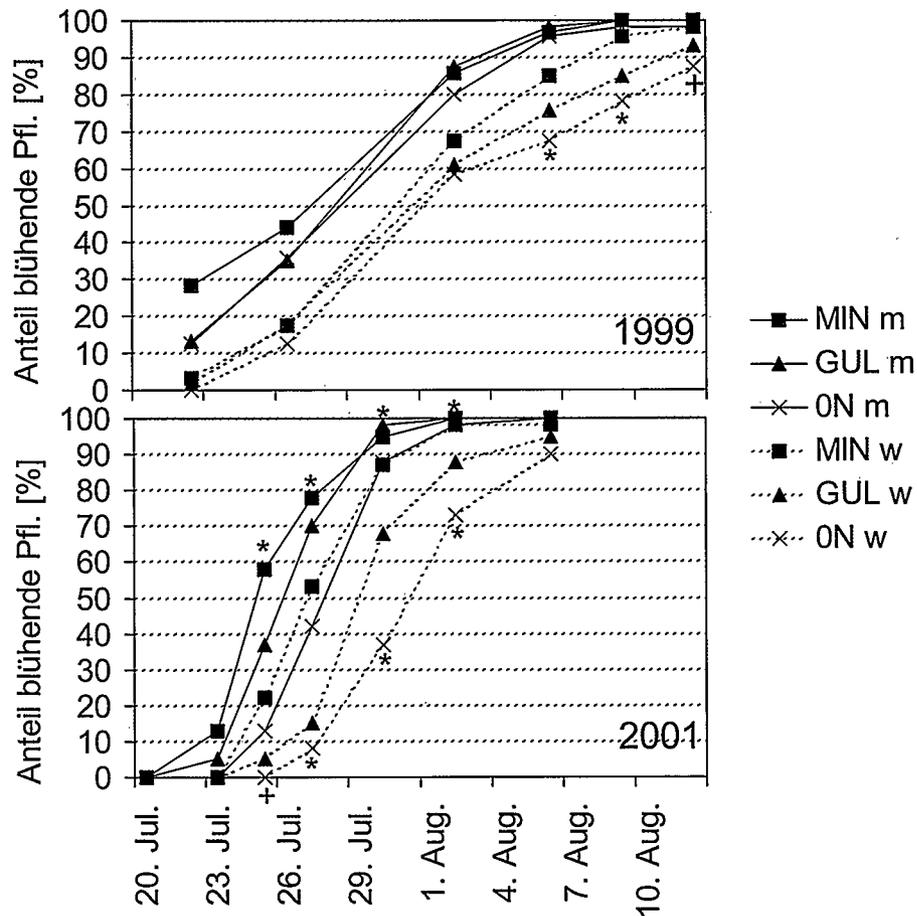


Abbildung 10. Blühverlauf der männlichen (m) und weiblichen (w) Maisblüte der Düngerverfahren mit mineralischer N-Düngung (MIN), mit Gülle (GUL) und ohne Stickstoffdüngung (ON) in den Jahren 1999 und 2001. Bei 0 % sind keine Blüten sichtbar, bei 100 % blühen alle Pflanzen. Die Werte von MIN, GUL und ON sind jeweils über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) gemittelt. Ein "*" bezeichnet Unterschiede für $p < 0,05$; "+" entspricht $0,05 < p < 0,10$.

Stickstoffgehalt der Pflanzen: Im Gegensatz zu den Bestellverfahren bewirkte die Düngung Unterschiede beim Gesamtstickstoffgehalt der Pflanzen (Tabelle 14). Mit Ausnahme der Schlussernte wies ON zu allen Zeitpunkten die tiefsten, MIN die höchsten Werte auf. Der Vergleich der beiden Maisanbaujahre zeigte, dass 2001 der Stickstoffgehalt der Trockenmasse im 6-Blatt-Stadium auf 15 mg N/g TM sank, während dieser im Jahr 1999 noch bei zirka 30 mg N/g TM lag. Die stark verzögerte Jugendentwicklung im Jahr 1999 schien demzufolge nicht durch eine mangelhafte Stickstoffversorgung verursacht worden zu sein. Ab der Blüte wiesen die Pflanzen während beider Jahre vergleichbare Stickstoffgehalte auf.

Tabelle 14. Stickstoffgehalte der Maissprosse in den Jahren 1999 sowie 2001. Die Werte der drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gölledüngung (GUL) sowie keine N-Düngung (ON) sind jeweils über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Statistisch signifikante Unterschiede sind in der Spalte "stat" durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet. Bei nicht-signifikanten Unterschieden $p > 0,05$ ist der p-Wert des F-Tests angegeben. "Interakt." bezeichnet signifikante Interaktionen zwischen PF und DS.

Jahr	Stadium	BBCH	Stickstoffgehalte [mg N/g TM]			stat
			MIN	GUL	ON	
1999	3-Blatt	13	46,0	47,2	40,4	a/a/b
	6-Blatt	16	39,6	33,8	29,8	Interakt.
	Blüte	65	13,8	11,6	11,4	Interakt.
	Schlussernte	85	9,4	8,6	8,8	0,07
2001	3-Blatt	13	40,5	40,2	30,9	a/a/b
	6-Blatt	16	16,5	14,4	12,9	0,09
	Blüte	65	15,7	12,4	10,0	0,07
	Schlussernte	85	10,6	9,1	9,5	0,25

Stickstoffentzug der Maispflanzen: Während beider Jahre zeigten sich zwischen den Düngeverfahren sehr deutliche Unterschiede beim Stickstoffentzug durch die Maissprosse (Tabelle 15). Ausser im 3-Blattstadium lagen die Werte von MIN immer am höchsten und diejenigen von ON am tiefsten. Die Werte von GUL lagen zwischen denjenigen von MIN und ON, was unter Berücksichtigung der teilweise geringeren N-Gaben bei GUL auch auf die schlechtere N-Ausnutzung bei GUL hinweist.

Die Mittelung der Werte über die beiden Bestellverfahren verdeckt die Tatsache, dass 1999 das Verfahren PF/ON einen Stickstoffentzug von 120 kg N/ha DS/ON aber nur 65 kg N/ha aufwies. Dies ist auf die schlechte Entwicklung der Pflanzen von DS zurückzuführen. Da sich aber die Düngung bei DS wie bei PF gleichförmig auswirkte, bestand keine Interaktion zwischen den Bestellverfahren und der Düngung. Im Jahr 2001 wiesen die ungedüngten Parzellen der beiden Bestellverfahren einen vergleichbaren Stickstoffentzug auf (DS/ON 83 kg N/ha; PF/ON 89 kg N/ha). Gemessen am Verfahren PF/ON war der Stickstoffentzug der ungedüngten Parzellen 1999 deutlich höher als im Jahr 2001, was auf eine deutlich höhere natürliche Stickstoffmineralisierung des Bodens hinweist.

N-Mehrertrag: In den beiden Jahren 1999 und 2001 ist der Mehrertrag (Berechnung siehe 3.5) an Maiskörnern und Biomasse pro Kilogramm gedüngtem Stickstoff bei GUL kleiner als derjenige von MIN (Tabelle 16). Bei der Betrachtung dieser Unterschiede ist zu berücksichtigen, dass bei GUL nur der mineralische Stickstoff (NH_4) der Gülle in die Berechnung einbezogen wurde (vgl. 3.2).

Die N-Mehrerträge an Körnern und Biomasse waren 2001 zirka doppelt so gross wie 1999. Im Vergleich zu MIN erzielten die Parzellen von ON 1999 zirka 30 % weniger Ertrag (Körner und Biomasse) während die Unterschiede im Jahr 2001 zirka 50 % betragen. Diese Ertragsunter-

schiede wirken sich direkt auf den N-Mehrertrag aus. Sie waren allerdings nur im Jahr 2001 für den N-Mehrertrag der Körner statistisch gesichert.

Tabelle 15. Stickstoffentzug der Maissprosse der Jahre 1999 und 2001. Die Werte der drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) sowie keine N-Düngung (ON) sind jeweils über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Statistische Unterschiede mit $p < 0,05$ sind durch unterschiedliche Buchstaben in der Spalte "stat" bezeichnet. Bei nicht signifikanten Unterschieden ist der p-Wert des F-Tests angegeben. "Interakt." bezeichnet eine signifikante Interaktion zwischen Düngeverfahren und Bestellverfahren.

Jahr	Stadium	BBCH	Stickstoffentzug [kg N/ha]			stat
			MIN	GUL	ON	
1999	3-Blatt	13	3,2	3,3	2,6	ab/a/b
	6-Blatt	16	18,4	14,5	12,5	Interakt.
	Blüte	65	74,0	63,1	44,4	a/a/b
	Schlussernte	85	138,6	109,6	92,5	a/b/b
2001	3-Blatt	13	3,1	3,5	1,2	a/a/b
	6-Blatt	16	10,9	8,9	3,5	a/a/b
	Blüte	65	93,0	67,6	32,2	a/a/b
	Schlussernte	85	183,0	131,5	86,0	a/b/c

N-Ausnutzungsgrad: Der N-Ausnutzungsgrad von GUL (Tabelle 17) war in beiden Maisanbaujahren im Vergleich zu MIN deutlich kleiner (1999 statistisch gesichert), obwohl nur der mineralische Stickstoff (NH_4) der Gülle in die Berechnung einbezogen wurde. Dies zeigt, dass die Stickstoffverluste bei GUL höher waren als bei MIN. Wie bei den N-Mehrerträgen zeigten sich zwischen den beiden Anbaujahren grosse Unterschiede.

Tabelle 16. N-Mehrertrag an Körnern und Biomasse bei Mais in den Jahren 1999 und 2001. Die Werte der drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) sowie keine N-Düngung (ON) sind jeweils über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Statistische Unterschiede mit $p < 0,05$ sind durch unterschiedliche Buchstaben in der Zeile "stat" bezeichnet. Bei nicht signifikanten Unterschieden ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

	N-Mehrertrag			
	kg Körner/kg N		kg TM/kg N	
	1999	2001	1999	2001
MIN	13,1	28,8	26,5	51,7
GUL	9,4	22,5	18,1	40,5
stat	0,36	a/b	a/b	0,14

Tabelle 17. N-Ausnutzungsgrad des Mais [%] in den Jahren 1999 und 2001. Die Werte der mineralischen N-Düngung (MIN) sowie der Gülledüngung (GUL) sind über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) gemittelt. Statistische Unterschiede mit $p < 0,05$ sind durch unterschiedliche Buchstaben in der Zeile "stat" bezeichnet. Bei nicht signifikanten Unterschieden ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

	1999	2001
MIN [%]	30,7	60,6
GUL [%]	14,4	34,9
stat	a/b	0,06

4.4 Bestelltechnik und Weizenentwicklung

Spross-Biomasse und Bestandesdichte: Tabelle 18 zeigt den relativen Zuwachs der Sprossbiomasse des Winterweizens. DS wies bis zum 1-Knoten-Stadium im Vergleich zu PF einen nicht signifikanten Minderertrag von zirka 25 % auf. Die relativen Unterschiede zwischen den beiden Verfahren verringerten sich ab dem Erscheinen des Fahnenblattes des Weizens auf zirka 10-15 %. Ab diesem Zeitpunkt unterschieden sich die Verfahren zugleich signifikant. Während der Jugendentwicklung war dies wegen der grossen Streuungen der Werte nicht der Fall.

Die stark verzögerte Jugendentwicklung im Jahr 1999 schien demzufolge nicht durch eine mangelhafte Stickstoffversorgung verursacht worden zu sein. Ab der Blüte wiesen die Pflanzen während beider Jahre vergleichbare Stickstoffgehalte auf.

Tabelle 19 zeigt die Entwicklung der Bestandesdichte beim Winterweizen. Analog zur Biomasseentwicklung wies PF zu allen Zeitpunkten eine leicht höhere Bestandesdichte auf als DS. Die Unterschiede waren jedoch statistisch nicht gesichert.

Tabelle 18. Relative Biomasseerträge des Winterweizens im Jahr 2000 zu 5 Ernteterminen. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die drei Düngerverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) und keine N-Düngung (ON) gemittelt. Die relativen Werte von DS sind im Vergleich zu PF (100 %) angegeben. Unterschiedliche Buchstaben in den Zeilen "stat" bezeichnen signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$. Bei $p > 0,05$ ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Datum	06.03.00	18.04.00	15.05.00	13.06.00	01.08.00
Stadium BBCH	15 veg. Beg.	31 1. Kn.	37 F. Blatt	65 Blüte	92 Ernte
Relativertrag von DS [%] (PF = 100 %)	84,5	75,1	89,2	86,8	87,1
Ertrag von PF [Mg TM/ha]	0,2	0,8	4,5	10,0	13,2
stat	0,59	0,13	a/b	a/b	a/b

Tabelle 19. Relative Anzahl Pflanzen, Halme oder Ähren pro m² des Winterweizens im Jahr 2000 zu verschiedenen Terminen. Die Werte von Pflug (PF) sowie Direktsaat (DS) sind über die drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) und keine N-Düngung (ON) gemittelt. In der Zeile "stat" sind die p-Werte des F-Tests angegeben.

Datum	01.11.99	15.05.00	13.06.00	01.08.00
Stadium BBCH	15	37	65	92
	Auflaufen	F. Blatt	Blüte	Ernte
Bestimmte Anzahl	Pflanzen	Halme	Halme	Ähren
Relative Anzahl Pfl. bei DS [%] (PF =100 %)	94,3	94,6	88,4	93,0
Anzahl Pfl. von PF [Anzahl/m ²]	270	360	350	364
stat	0,69	0,14	0,21	0,36

Parameter der Schlussernte 2000: Die Bestellverfahren unterschieden sich im Biomasse-, Korn- und Strohertrag statistisch signifikant (Tabelle 20). DS erzielte im Mittel der drei Düngeverfahren bei der Schlussernte 87 % des Biomasse- und 88 % des Kornertrages von PF. Bei der Anzahl Ähren pro Fläche, der Anzahl Körner pro Ähre, dem Ähren-, Tausendkorn- und Hektolitergewicht wies DS durchwegs leicht tiefere Werte auf (statistisch nicht gesichert). Diese Unterschiede resultierten schliesslich in signifikant tieferen Korn- und Stroherträgen.

Stickstoffgehalt und -entzug: Die Stickstoffgehalte der Weizenpflanzen der beiden Bestellverfahren wiesen über die verschiedenen Zwischenerntetermine gesehen keine systematischen Unterschiede auf (Tabelle 21). Einzig zu Vegetationsbeginn wiesen die Pflanzen von DS tiefere Stickstoffgehalte auf als diejenigen von PF. Zu den späteren Zeitpunkten lagen die Verfahren in wechselnder Rangfolge immer nahe beieinander.

Tabelle 20. Anlässlich der Schlussernte vom 1. Aug. 2000 beim Winterweizen erhobene Parameter. Die Werte der beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) sind über die drei Stickstoffdüngungsverfahren Mineralisch (MIN), Gülle (GUL) und kein Stickstoff (ON) gemittelt. In der Spalte DS sind die relativen Werte im Vergleich zu PF (= 100 %) angegeben. Statistische Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben in der Spalte "stat" bezeichnet. Bei nicht signifikanten Unterschieden ($p > 0,05$) ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

	PF absolut	DS		stat
		absolut	relativ	
Biomasseertrag [Mg TM/ha]	13,18	11,48	87 %	a/b
Kornertrag [Mg TM/ha]	5,52	4,85	88 %	a/b
Strohertrag [Mg TM/ha]	7,66	6,62	86 %	a/b
Ernteindex [Index von 0–1]	0,42	0,43	102 %	0,48
Ährenzahl [Anzahl/m ²]	364,1	338,6	93 %	0,36
Tausendkorngewicht [g TM]	44,9	44,3	99 %	0,50
Hektolitergewicht [kg/100 l]	80,4	80,1	100 %	0,10
Körner/Ähre [Anzahl]	33,5	32,3	96 %	0,70
Körnergewicht pro Ähre [g TM]	1,50	1,44	95 %	0,65

Bis zum Erscheinen des Fahnenblattes bestanden signifikante Interaktionen zwischen den Bestell- und den Düngeverfahren. Diese entstanden, weil DS im Vergleich zu PF bei MIN höhere, bei GUL tiefere und bei ON vergleichbare Werte aufwies. Aus diesem Grund liessen sich diese Zahlen statistisch nicht getrennt nach den Bestell- und Düngeverfahren auswerten. Bis zur Blüte glich sich dies allerdings wieder aus, zwischen den Bestell- und Düngeverfahren bestand dann keine Interaktion mehr. Bei der Schlussernte wies DS schliesslich geringfügig höhere N-Gehalte auf als PF.

Bedingt durch den höheren Biomassertrag war der Stickstoffentzug der Pflanzen bei PF höher als bei DS (Tabelle 22). Die Unterschiede waren jedoch nur zum Erscheinen des Fahnenblattes gesichert. Im Gegensatz zum Gesamtstickstoffgehalt der Pflanzen traten beim Stickstoffentzug keine signifikanten Interaktionen auf.

N-Mehrertrag: Dieser lag beim Weizen für PF im Vergleich zu ON bei einem Ertrag von 25,6 kg Körner pro kg gedüngtem Stickstoff, bei DS lag dieser Wert bei 18,4 kg (Daten nicht gesondert dargestellt). Die beiden Verfahren unterschieden sich mit $p = 0,06$ voneinander. Die bei Weizen erzielten Werte waren mit denjenigen des Mais vergleichbar.

N-Ausnutzungsgrad: PF wies mit 80,8 % den besseren N-Ausnutzungsgrad auf als DS mit 59,4 % ($p = 0,09$; Daten nicht gesondert dargestellt). Auffallend war, dass der Winterweizen den gedüngten Stickstoff wesentlich besser ausnutzte als der Mais.

Tabelle 21. Gesamtstickstoffgehalte der Biomasse des Winterweizens 2000 zu den verschiedenen Zwischenernteterminen. Die Werte der beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) sind über die drei Stickstoffdüngungsverfahren Mineralisch (MIN), Gülle (GUL) und kein Stickstoff (ON) gemittelt. Spalte "stat": Interakt. bedeutet signifikante Interaktion zwischen Bestellverfahren und Düngung, ansonsten steht der p-Wert des F-Tests.

Stadium	BBCH	N-Gehalte [mg N/g TM]		stat
		PF	DS	
Vegetationsbeginn	15	44,6	41,6	Interakt.
1 Knoten	31	39,8	40,6	"
Fahnenblatt	37	18,7	18,4	"
Blüte	65	12,2	11,0	0,25
Schlussernte gesamt	92	8,3	9,1	0,15
Schlussernte Stroh	92	4,1	4,2	0,49
Schlussernte Körner	92	22,3	22,4	0,83

Tabelle 22. Stickstoffentzug durch die Pflanzensprosse des Winterweizens 2000 zu den verschiedenen Zwischenernteterminen. Die Werte der beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) sind über die drei Stickstoffdüngungsverfahren Mineralisch (MIN), Gülle (GUL) und kein Stickstoff (ON) gemittelt. Statistische Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben in der Spalte "stat" bezeichnet. Bei nicht signifikanten Unterschieden ($p > 0,05$) ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Stadium	BBCH	Stickstoffentzug [kg N/ha]		stat
		PF	DS	
Vegetationsbeginn	15	7,2	5,7	0,48
1 Knoten	31	32,8	25,1	0,12
Fahnenblatt	37	87,4	76,4	a/b
Blüte	65	125,1	97,0	0,08
Schlussernte	92	158,2	140,2	0,12

4.5 Stickstoffdüngung und Weizenentwicklung

Spross-Biomasse: Beim Biomassertrag der drei Düngeverfahren ergaben sich beträchtliche Differenzen von zirka 50 % (Tabelle 23). Die Rangfolge lautete ausser bei Vegetationsbeginn stets MIN > GUL > ON. Ab dem 1-Knoten-Stadium waren die Differenzen statistisch gesichert. Die Werte des Verfahrens GUL pendelten im Vergleich zu MIN während der gesamten Vegetationsdauer um einen Minderertrag von zirka 20 %. Nach dem Vegetationsbeginn wies ON im Vergleich zu MIN Werte von zirka 50 % auf.

Tabelle 23. Relativer Biomassertrag des Winterweizens zu verschiedenen Ernteterminen. Die Werte der drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gölledüngung (GUL) und keine Stickstoffdüngung (ON) sind über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Die relativen Werte von GUL und ON sind im Vergleich zu MIN (100 %) angegeben. Unterschiedliche Buchstaben in der Zeile "stat" bezeichnen signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$. Bei $p > 0,05$ ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Stadium BBCH	06.03.00 15 veg. Beg.	18.04.00 31 1. Kn.	15.05.00 37 F. Blatt	13.06.00 65 Blüte	01.08.00 92 Ernte
Rel. Ertrag von GUL [%] (MIN =100 %)	85,3	79,9	76,6	84,3	77,2
Rel. Ertrag von ON [%] (MIN =100 %)	92,4	57,7	46,7	55,4	54,8
Ertrag MIN [Mg TM/ha]	0,2	0,9	5,7	11,7	15,9
stat	0,45	a/b/c	a/b/c	a/b/c	a/b/c

Bestandesdichte: Während die Düngung keinen Einfluss auf den Feldaufgang im November 1999 hatte, beeinflusste sie die Anzahl ährentragender Halme ab dem Erscheinen des Fahnen-

blattes deutlich (Tabelle 24). Im Gegensatz zu den geringen Auswirkungen der Bestellverfahren bewirkte der Verzicht auf die Stickstoffdüngung eine Reduktion der ährentragenden Halme um zirka 30 %. Die im Vergleich zu MIN um 50 kg NH₄-N/ha reduzierte Stickstoffdüngung von GUL wirkte sich ebenfalls signifikant auf die Bestandesdichte aus. Sie lag zirka 15 % unter derjenigen von MIN. Die Reihenfolge der Düngeverfahren lautete ab dem Erscheinen des Fahnenblattes stets MIN > GUL > ON.

Bei der Schlussernte erhobene Parameter: Bei allen Parametern ausser dem Ernteindex lautete die Reihenfolge der einzelnen bei der Schlussernte erhobenen Parameter MIN > GUL > ON (Tabelle 25). Das Verfahren MIN erzielte ausser beim Ernteindex signifikant höhere Werte als ON. Mit Ausnahme des Ernteindex der Anzahl Ähren pro m² und des Hektolitergewichtes trifft dies auch für GUL zu. Im Vergleich zu ON führte bei MIN die mineralische Düngung zu einer Ertragssteigerung von zirka 3 Mg Körnern/ha. Der tiefere Körnerertrag von GUL im Vergleich zu MIN war auf die verminderte Bestandesdichte zurückzuführen, da das Einzelährengewicht keine grossen Unterschiede aufwies. Im Gegensatz dazu wies ON ebenfalls ein deutlich tieferes Einzelährengewicht auf, das vor allem durch eine tiefere Anzahl Körner pro Ähre verursacht wurde. Der geringere Ernteindex von MIN im Vergleich zu GUL und ON zeigte, dass MIN den Strohertrag überproportional erhöhte.

Tabelle 24. Relative Anzahl Pflanzen, Halme oder Ähren pro m² im Verlauf der verschiedenen Zwischenernten beim Winterweizen 2000. Die Werte der drei Düngeverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülledüngung (GUL) und keine Stickstoffdüngung (ON) sind über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Die relativen Werte von GUL und ON sind im Vergleich zu MIN (100 %) angegeben. Unterschiedliche Buchstaben in den Zeilen "stat" bezeichnen signifikante Unterschiede bei p < 0,05. Bei p > 0,05 ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Datum	01.11.99	15.05.00	13.06.00	01.08.00
Stadium BBCH	15	37	65	92
Bestimmte Anzahl	Auflaufen Pflanzen	F. Blatt Halme	Blüte Halme	Ernte Ähren
Rel. Anzahl Pfl./m ² bei GUL [%] (MIN =100 %)	90,6	77,3	85,4	83,5
Rel. Anzahl Pfl./m ² bei ON [%] (MIN =100 %)	91,7	60,6	71,4	74,0
Anzahl Pfl. bei MIN [Pfl./m ²]	279	442	386	409
stat	0,20	a/b/c	a/b/c	a/b/b

Tabelle 25. Anlässlich der Schlussernte des Winterweizens vom 1.08.2000 erhobene Parameter. Die Werte der drei Stickstoffdüngungsverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülle (GUL) und keine Stickstoffdüngung (ON) sind über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. In den Spalten "GUL" und "ON" sind die relativen Werte im Vergleich zu MIN (= 100 %) angegeben. Statistische Unterschiede sind in der Spalte "stat" durch unterschiedliche Buchstaben bezeichnet.

	MIN	GUL		ON		stat
	absolut	absolut	relativ [%]	absolut	relativ [%]	
Biomasseertrag [Mg TM/ha]	15,94	12,31	77	8,74	55	a/b/c
Kornertrag [Mg TM/ha]	6,51	5,27	81	3,78	58	a/b/c
Strohertrag [Mg TM/ha]	9,43	7,04	75	4,96	53	a/b/c
Ernteindex [Index von 0–1]	0,41	0,43	105	0,43	105	b/a/a
Anzahl Ähren pro m ² [Anzahl]	409,3	341,8	84	303,0	74	a/b/b
Tausendkorngewicht [g TM]	45,7	45,5	99	42,6	93	a/a/b
Hektolitergewicht [kg/100 l]	80,8	80,2	99	79,9	99	a/b/b
Körner/Ähre [Anzahl]	35,0	34,3	98	29,6	85	a/a/b
Ährengewicht [g TM]	1,88	1,83	97	1,48	79	a/a/b

Stickstoffgehalt und Stickstoffentzug: Wie in Kapitel 4.4 erwähnt, bestand bezüglich des Stickstoffgehaltes der Pflanzen zwischen den Bestellverfahren und der N-Düngung während der ersten drei Zwischenernten eine signifikante Interaktion. Aus diesem Grund liess sich dieser Parameter statistisch nicht getrennt nach den Bestell- und Düngungsverfahren auswerten (Tabelle 26). Bis zur Blüte glich sich dies allerdings wieder aus; zwischen den Dünge- und den Bestellverfahren bestand keine Interaktion mehr. Zu diesem Zeitpunkt und bei der Schlussernte wies der Stickstoffgehalt der Pflanzen von MIN signifikant höhere Werte als GUL und ON auf. Ausser bei der ersten Zwischenernte lautete die Rangfolge des Stickstoffgehaltes der Pflanzen immer MIN > GUL > ON.

Dieselbe Reihenfolge zeigte sich beim Stickstoffentzug der Sprossbiomasse (Tabelle 27), wo sich aber im Gegensatz zum Stickstoffgehalt der Pflanzen alle drei Düngungsverfahren statistisch voneinander unterschieden. Verglichen mit MIN wurde bei GUL 70 kg NH₄-N/ha weniger gedüngt (Tabelle 5). Diese Differenz schlug sich schliesslich ebenfalls in der Biomasse nieder, die bei GUL ebenfalls fast 70 kg N/ha weniger enthielt.

N-Mehrertrag: Im Vergleich zu ON betrug der Mehrerertrag der Düngungsverfahren beim Winterweizen für MIN 21,4 kg Körner pro kg gedüngtem Stickstoff. Bei GUL betrug dieser Wert 22,6 kg ($p = 0,73$; Daten nicht gesondert dargestellt). In Bezug auf die Biomasse betrug dieser Wert 48,0 kg Biomasse pro kg gedüngter Stickstoff für MIN, resp. 46,0 für GUL ($p = 0,12$). Zwischen den beiden Düngungsverfahren zeigten sich keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 26. Stickstoffgehalte der Sprossbiomasse des Weizens zu den verschiedenen Probenahmeterminen. Die Werte der drei Stickstoffdüngungsverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülle (GUL) und keine Stickstoffdüngung (ON) sind über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Spalte "stat": Interakt. bedeutet signifikante Interaktion zwischen Bestellverfahren und Düngung, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede.

Stadium	BBCH	Stickstoffgehalt [mg N/g TM]			stat
		MIN	GUL	ON	
Vegetationsbeginn	15	42,3	44,1	43,0	Interakt.
1 Knoten-Stadium	31	49,3	40,5	30,7	"
Fahnenblatt	37	21,3	18,5	15,8	"
Blüte	65	13,0	11,1	10,6	a/b/b
Schlussernte gesamt	92	10,5	8,6	7,1	a/b/c
Schlussernte Körner	92	24,2	22,1	20,9	a/b/b
Schlussernte Stroh	92	5,6	3,8	3,1	a/b/b

N-Ausnutzungsgrad: Mit 76,8 % wies MIN wie beim Mais einen besseren N-Ausnutzungsgrad auf als GUL mit 63,4 %. Die Unterschiede zwischen den beiden Düngungsverfahren waren allerdings nicht gesichert ($p = 0,21$, Daten nicht gesondert dargestellt). Wie beim Mais scheinen die Stickstoffverluste auch beim Winterweizen bei GUL höher zu sein als bei MIN.

Tabelle 27. Stickstoffentzug durch die Sprossbiomasse des Winterweizens. Die Werte der drei Stickstoffdüngungsverfahren mineralische N-Düngung (MIN), Gülle (GUL) und keine Stickstoffdüngung (ON) sind über die beiden Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Spalte "stat": Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede. Bei $p > 0,05$ ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Stadium	BBCH	Stickstoffentzug [kg N/ha]			stat
		MIN	GUL	ON	
Veg. Beginn	15	6,8	6,1	6,5	0,64
1 Knoten	31	42,9	28,4	15,5	a/b/c
Fahnenblatt	37	121,9	81,5	42,3	a/b/c
Blüte	65	153,2	110,8	69,1	a/b/c
Schlussernte	92	209,7	143,4	94,5	a/b/c

4.6 Bodenphysikalische Parameter und Bodentemperatur

Bodenphysik: Im Oberboden wies das Verfahren DS in den Jahren 2000 sowie 2001 mit Werten um $1,5 \text{ g/cm}^3$ (Tabelle 28) höhere Lagerungsdichten auf als das Verfahren PF (Daten von Weisskopf et al. 2002). Entsprechend waren das Grobporenvolumen und die Luftpermeabilität bei PF höher und die Vorbelastung nach Casagrande (1936) des Bodens tiefer. Besonders das Grobporenvolumen und die Luftpermeabilität in 10-15 cm Tiefe sind bei DS als gering zu be-

zeichnen. Die Werte der beiden Bestellverfahren wiesen im Unterboden (35-40 cm Tiefe) eine ähnliche Struktur wie in 10-15 cm Tiefe auf. Die Differenzen waren allerdings kleiner als in der oberen Bodenschicht.

Fliesswege: Abbildung 11 zeigt die quantifizierten, blau gefärbten Flächen der Fliesswege (Methode siehe 3.8) nach erfolgter Infiltration der Vitasynblau-Farbstofflösung bei PF und DS in den Jahren 1999 und 2001. PF wies im Oberboden bis zirka 25 cm Tiefe in beiden Erhebungsjahren mehr blau gefärbte Flächen auf als DS. Die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren betragen bis zu 30 %.

Die Fliessmuster zeigten bei PF wie bei DS präferenzielle Fliessstrukturen. Bei PF durchfloss zum Beispiel im Jahr 2001 die Farbstofflösung in 10 cm Tiefe 40 % der aufgegrabenen Profilflächen. Dies bedeutete, dass die Farbstofflösung bei PF keinen Kontakt mit 60 % der Profilflächen hatte, also dort vorhandenes Nitrat nicht durch präferenziell fliessendes Wasser erfasst, sondern nur durch den Matrixfluss transportiert wurde. Unterhalb der Pflugsohle waren bezüglich der Blaufärbung nur geringe Verfahrensunterschiede feststellbar. In beiden Fällen durchfloss der Farbstoff das Profil entlang präferenzieller Fliesspfade (nur zirka 10 % gefärbte Profilfläche). Im Vergleich zu 1999 zeigte die Erhebung 2001 eine Verminderung der gefärbten Flächen und der Unterschiede zwischen den beiden Verfahren.

Tabelle 28. Lagerungsdichte, Grobporenvolumen, Vorbelastung und Luftpermeabilität der Verfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) (Daten von Weisskopf et al. 2002). Unterschiedliche Buchstaben in den Zeilen "stat" bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bestellverfahren bei $p < 0,05$. Bei $p > 0,05$ ist der p-Wert des F-Tests angegeben.

Jahr	Tiefe [cm]	Verfahren	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Grobporen- volumen [%] ¹	Vorbelas- tung ² [kPa]	Luftperme- abilität [cm ³ /h]
2000	10-15	PF	1,38	11,9	32	2995
		DS	1,51	6,4	68	786
		stat	0,11	0,10	0,08	a/b
	35-40	PF	1,49	9,6	70	1115
		DS	1,55	6,5	73	996
		stat	a/b	0,18	0,37	0,88
2001	10-15	PF	1,44	8,1	49	1302
		DS	1,53	4,2	91	213
		stat	a/b	a/b	a/b	a/b
	35-40	PF	1,52	7,8	72	465
		DS	1,54	6,8	79	442
		stat	0,14	0,13	a/b	0,91

¹ Grobe Grobporen < pF 1,8

² Vorbelastungspunkt gemäss Casagrande (1936)

³ An Zylinderproben im Labor gemessene Luftpermeabilität

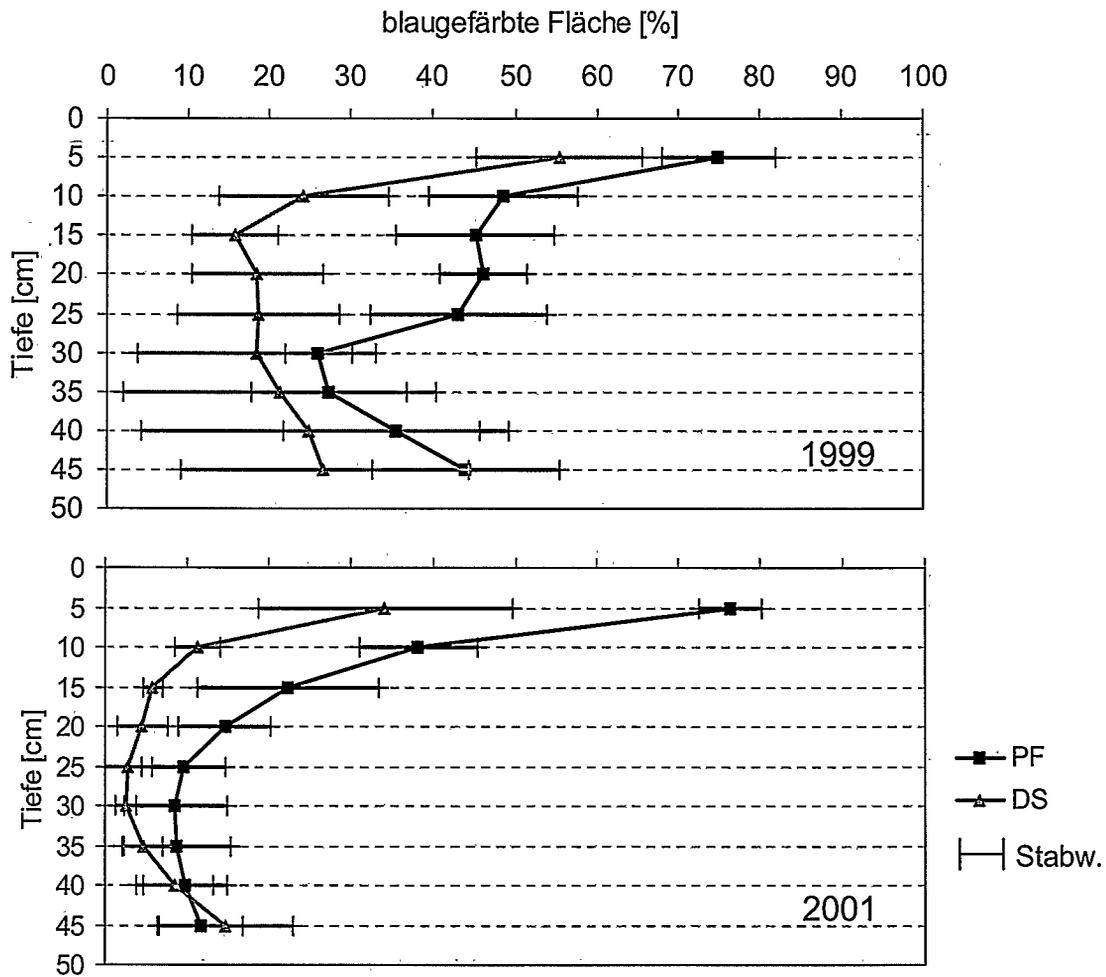


Abbildung 11. Quantifizierte blaue Flächen der Fließwege nach der Infiltration von Vitasytblau-Farbstofflösung. Der Anteil der blau gefärbten Fläche ist als prozentualer Anteil der gesamten Fläche ausgedrückt. Die Standardabweichung (Stabw.) ist in Balkenform dargestellt.

Bodentemperaturen: Abbildung 12 zeigt den Bodentemperaturverlauf von PF und DS in 10 cm Bodentiefe in den Jahren 1999 und 2001. Da die Bodentemperaturmessung nur in einer Wiederholung stattgefunden hatte, wurde von einer varianzanalytischen Auswertung abgesehen und nur die Standardabweichung der Wochenmittelwerte errechnet. Die Bodentemperaturen lagen in beiden Jahren während der Monate Mai und Juni deutlich über 15 °C, was ausreichende Temperaturen für die Maisentwicklung bedeutet. Die Differenzen der Wochenmittelwerte zwischen DS und PF lagen 1999 abgesehen von einigen Ausnahmen und 2001 zu allen Zeitpunkten unter 1 °C. DS wies in keinem der beiden Jahre tiefere Temperaturen als PF auf. Im Gegenteil, im Sommer 1999 lagen die Bodentemperaturen bei DS sogar leicht höher als bei PF.

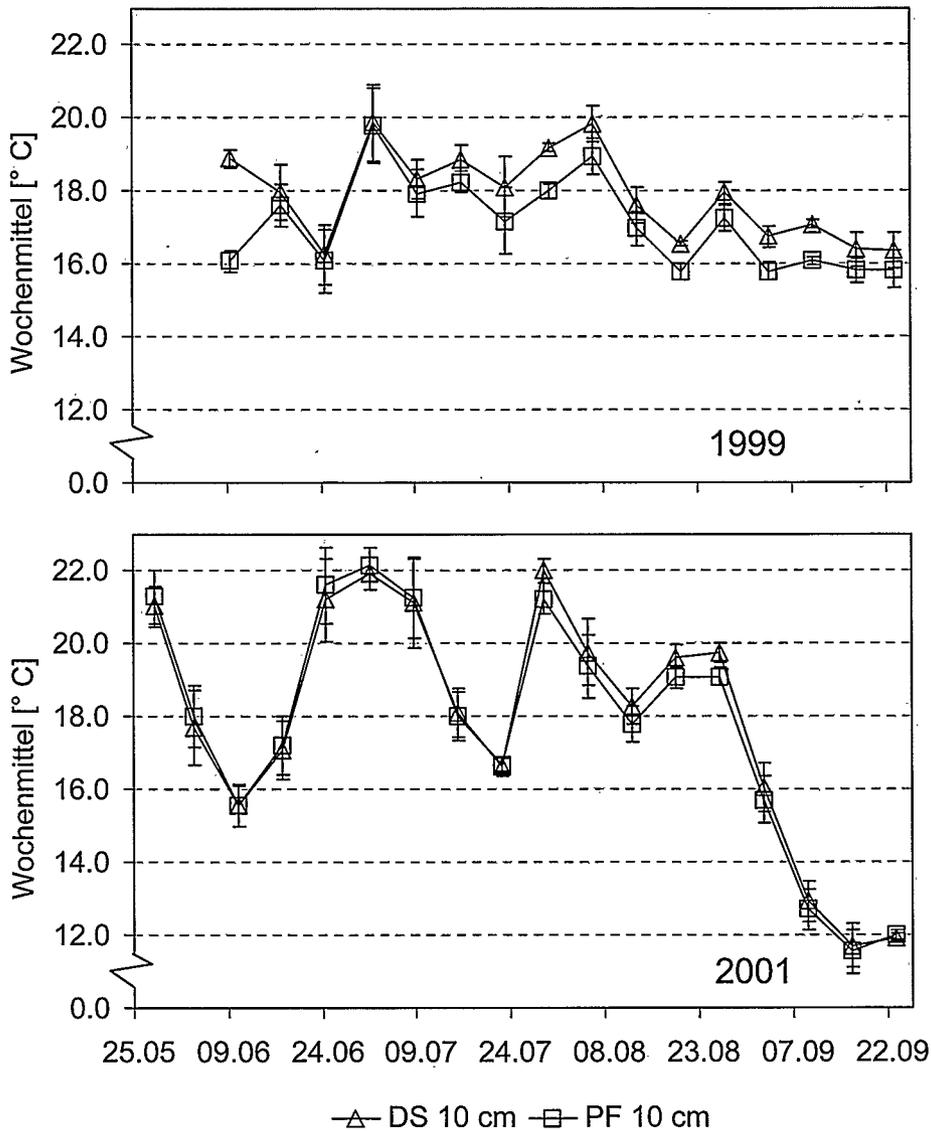


Abbildung 12. Wochenmitteltemperaturen der Jahre 1999 und 2001 im Boden in 10 cm Tiefe. Pro Woche wurden die Tagesmittelwerte von Pflug (PF) und Direktsaat (DS) gemittelt. Die vertikalen Fehlerlinien bezeichnen die Standardabweichung.

Dies wird auf die verminderte Beschattung des Bodens wegen der reduzierten Biomasseentwicklung der Pflanzen von DS zurückgeführt. Die geringen Temperaturdifferenzen lassen sich neben den Unterschieden in der Biomasseentwicklung auch durch die relativ geringe Bedeckung des Bodens durch Ernterückstände erklären. Nach der Kunstwiese (Frühjahr 1999) sowie nach dem Gelbsenf (Frühjahr 2001), der nicht stark entwickelt war (Ertrag von 1 Mg TM/ha), war diese Bedeckung bei DS in beiden Jahren nicht sehr dicht. Bei PF war der Boden immer unbedeckt.

4.7 Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min})

Abbildung 13 stellt die gemessenen Gehalte an mineralischem Stickstoff im Boden (N_{\min}) zu verschiedenen Zeitpunkten der Jahre 1999-2002 dar. Die Werte verliefen während der ganzen Periode auf tiefem Niveau. Leicht erhöhte N_{\min} -Gehalte wurden jeweils nach der Düngung während der Jugendentwicklung der Mais- und Weizenpflanzen gemessen. Ausser bei Versuchsbeginn im Jahr 1999 wiesen die beiden Bestellverfahren einen sehr ähnlichen Verlauf der N_{\min} -Werte auf. Statistische Unterschiede traten in 5 von 17 Einzelfällen auf.

Über alle Werte der Versuchsperiode gerechnet (ausser einzelner Ausreisser vom 09.06.99 und 23.06.99) korrelierten die Einzelparzellenwerte von DS und PF mit einem Bestimmtheitsmass von $r^2=0,40$. Dieser Wert drückt aus, dass zwischen den beiden Bestellverfahren eine lockere Übereinstimmung bestand. Ein klarer Trend, wie sich die Verfahren zueinander verhielten, liess sich nicht ableiten.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Düngeverfahren waren generell klein. Sie unterschieden sich an 8 von 17 Probenahmeterminen signifikant voneinander. Dies war jeweils kurz nach der Stickstoffdüngung im Frühjahr der Fall. Statistisch gesehen hob sich das Verfahren MIN zu diesen Zeitpunkten in allen drei Versuchsjahren von den beiden anderen Verfahren ab. Die Werte des Verfahrens GUL lagen in den meisten Fällen zwischen denjenigen von MIN und ON. Nur zu 5 Zeitpunkten waren die Werte von GUL signifikant kleiner als diejenigen von MIN und nur zu 4 Zeitpunkten signifikant grösser als diejenigen von ON. Gegen den Herbst hin verringerten sich die Unterschiede zwischen den Düngeverfahren zusehends. Statistisch gesicherte Unterschiede traten ausser im Herbst 2001, als ON die tiefsten Werte aufwies, keine mehr auf. Erwartungsgemäss wies ON über die ganze Versuchsperiode gesehen die tiefsten Werte auf.

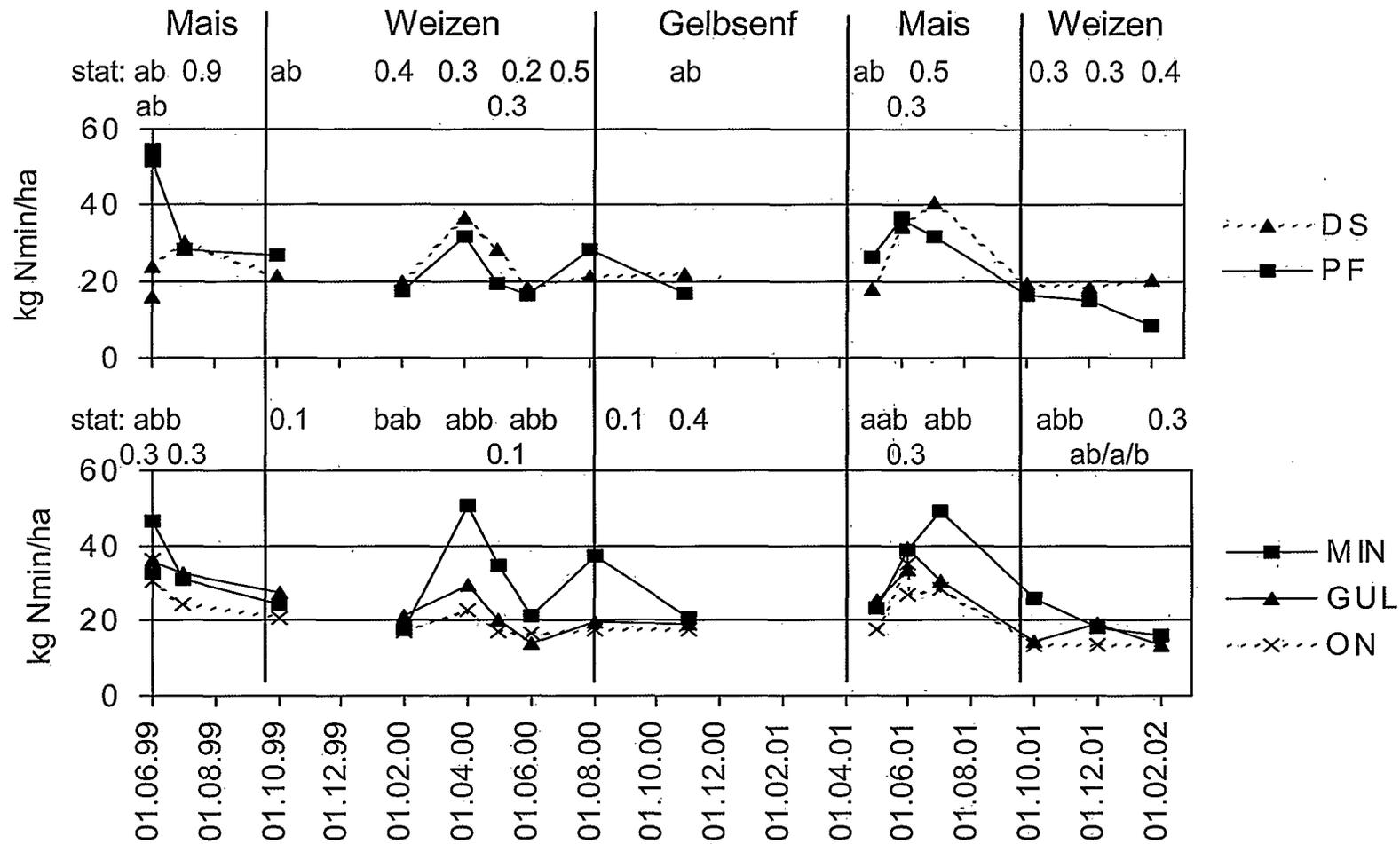


Abbildung 13: Verlauf des Gehältes an mineralischem Stickstoff im Boden (N_{min}) von 1999-2001 für die Bestellverfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS) sowie der Düngerverfahren mineralische (MIN), Gülle (GUL) und keine Stickstoffdüngung (ON). Statistische Unterschiede sind in den Zeilen "stat" durch unterschiedliche Buchstaben bezeichnet. Bei $p > 0,05$ ist der p -Wert des F-Tests angegeben.

4.8 Nitratkonzentration im Boden- und Sickerwasser

Bodenwasser: Der Verlauf der Nitrat-N-Konzentration im Bodenwasser (Abbildung 14) veranschaulicht die Dynamik, welche im Block II bei beiden Bestellverfahren einen ähnlichen Verlauf aufzeigte. Wie die N_{\min} -Werte verliefen auch die Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser auf einem relativ niedrigen Niveau. Nur in einzelnen Fällen überstiegen sie 30 mg NO_3 -N/l. Es zeigte sich deutlich, wie die Auswaschung im Winter und das Pflanzenwachstum im Frühjahr/Sommer die Nitrat-N-Konzentration im Bodenwasser mit zunehmender Tiefe zeitlich verzögert verringerte. Zu leicht erhöhten Konzentrationen kam es im Winter 1999 unter Winterweizen nach Mais. Ein kurzer Anstieg war nach der Weizenernte (2000) und während der Jugendentwicklung des Mais (2001) zu beobachten. Im Labor wurden routinemässig ebenfalls die NH_4 -Konzentrationen im Bodenwasser bestimmt. Die Gehalte an NH_4 -Stickstoff waren jedoch generell sehr gering (< 1 mg NH_4 -N/l) und wurden deshalb ausser Acht gelassen.

Sickerwasser: Abbildung 15 stellt den Verlauf der Nitrat-N-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter dar. Im Herbst nach der Silomaisernte 1999 und über den Winter 1999/2000 wies DS signifikant höhere Nitrat-N-Konzentrationen auf als PF. Während der beiden folgenden Jahre unterschieden sich die beiden Bestellverfahren abgesehen von einzelnen Ausschlägen nicht stark voneinander. PF wies im Frühjahr 2001 kurzfristig einen schnelleren Anstieg der Nitrat-N-Konzentration auf als DS. Dieser Anstieg lag zeitlich nach der Bodenbearbeitung und der Stickstoffdüngung für den Mais. Die höchsten Konzentrationen um 15 mg NO_3 -N/l traten nach Mais 1999 und nach der Düngung während der Jugendentwicklung des Mais 2001 auf.

Varianz und Korrelation der NO_3 -N-Konzentrationen: Die mit je drei Saugkerzen erhobenen NO_3 -N-Konzentrationen in 125 cm Tiefe in den drei Wiederholungen der Lysimeter wiesen eine viel höhere Varianz auf als die Werte im Sickerwasser. Tabelle 29 zeigt die Mittelwerte der Varianzen über alle Erhebungen der Messperiode. Dies zeigt, dass Erhebungen mittels Saugkerzen, die nur punktuelle Bodenwasserentnahmen ermöglichen, einer viel grösseren räumlichen Variabilität unterliegen, als dies bei den Lysimetern der Fall ist. Die Lysimeter erfassten das Sickerwasser von einem Quadratmeter Fläche, wodurch die kleinräumige Variabilität nicht zum Tragen kam.

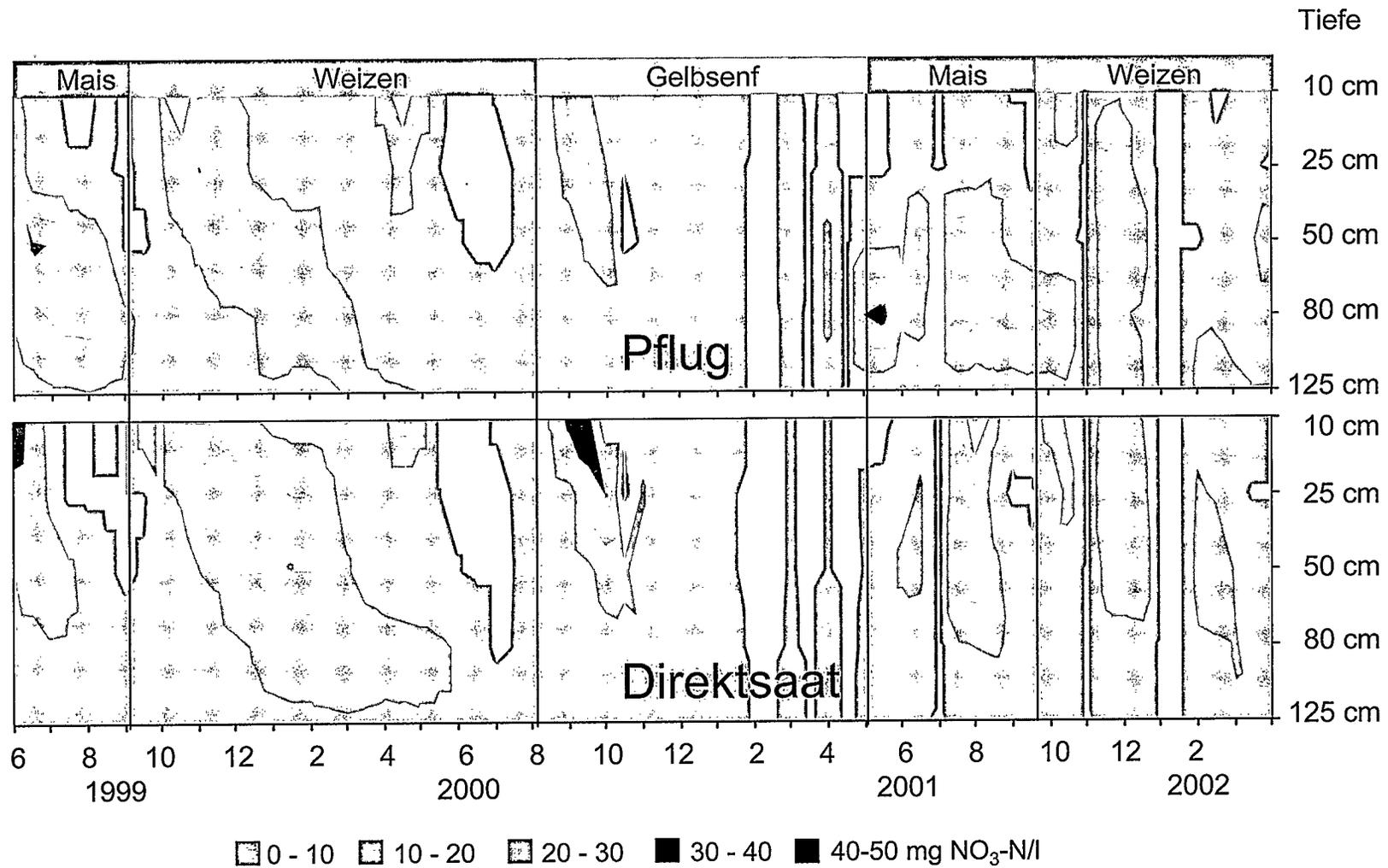


Abbildung 14. Verlauf der Nitratkonzentration im Bodenwasser, ermittelt mit Saugkerzen in den Tiefen 10, 25, 50, 80 und 125 cm im Block II.

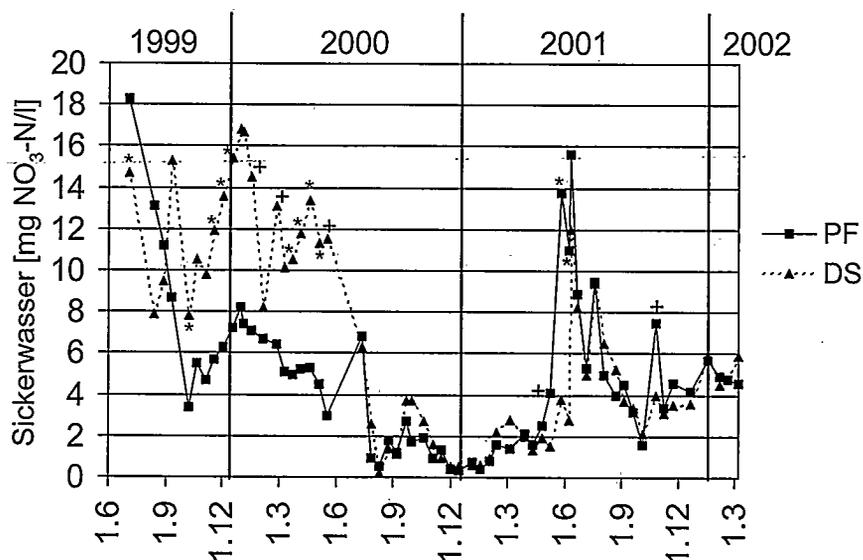


Abbildung 15. Verlauf der Nitrat-N-Konzentration im Sickerwasser der sechs Lysimeter von Pflug (PF) und Direktsaat (DS). Signifikante Unterschiede zu den einzelnen Zeitpunkten, ermittelt mit dem T-Test, sind mit * ($p < 0,05$) oder mit + ($p < 0,10$) bezeichnet.

Tabelle 29. Mittel der Varianz im Sickerwasser der Lysimeter und dem Bodenwasser der Saugkerzen bei Pflug und Direktsaat, gemessen vom 29.07.99 - 07.03.02

	Varianz [mg NO ₃ -N/l]	
	PF	DS
Saugkerzen in Lysimeter, 125 cm Tiefe	59,0	32,0
Sickerwasser der Lysimeter, 150 cm Tiefe	6,5	11,2

Die NO₃-N-Konzentration im Sickerwasser der Lysimeter und der in den Lysimetern installierten Saugkerzen in 125 cm Tiefe wiesen keine enge Korrelation auf (Abbildung 16). Die Datenreihen liessen auch keine systematische zeitliche Verschiebung erkennen, wie sich dies auf Grund der unterschiedlichen Erhebungstiefen vermuten liesse. Es schien, dass diese Unterschiede vor allem auf die unterschiedliche Erhebungsmethodik zurückzuführen waren.

Aus den mittels Saugkerzen gemessenen NO₃-N-Konzentrationen liess sich in Kombination mit der volumetrischen Wassergehaltsbestimmung (Time domain reflectometry TDR) die Menge des mineralischen Stickstoffs im Boden bestimmen. Abbildung 17 zeigt die Beziehung zwischen den N_{min}-Werten des Bodens und der im Bodenwasser enthaltenen Mengen an mineralischem Stickstoff. Zwischen diesen beiden Grössen bestand keine Beziehung.

Die schlechte Übereinstimmung der verschiedenen Erhebungsmethoden weist darauf hin, dass das Nitrat im Boden scheinbar nicht homogen verteilt war und deshalb die verschiedenen Erhebungsmethoden zu unterschiedlichen Ergebnissen führten.

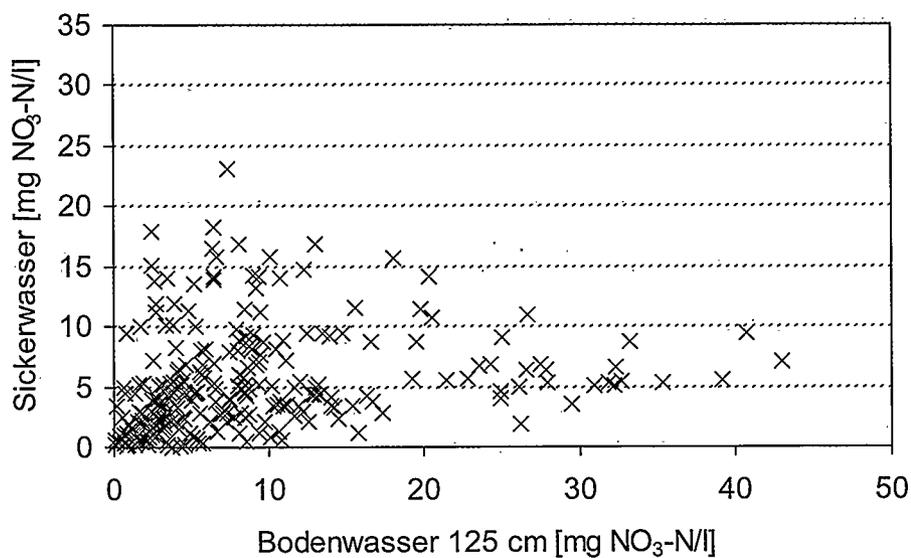


Abbildung 16. Beziehung der Nitrat-N-Konzentrationen des Sickerwassers der Lysimeter und des Bodenwassers der Saugkerzen, die innerhalb der Lysimeter in 125 cm Tiefe installiert waren.

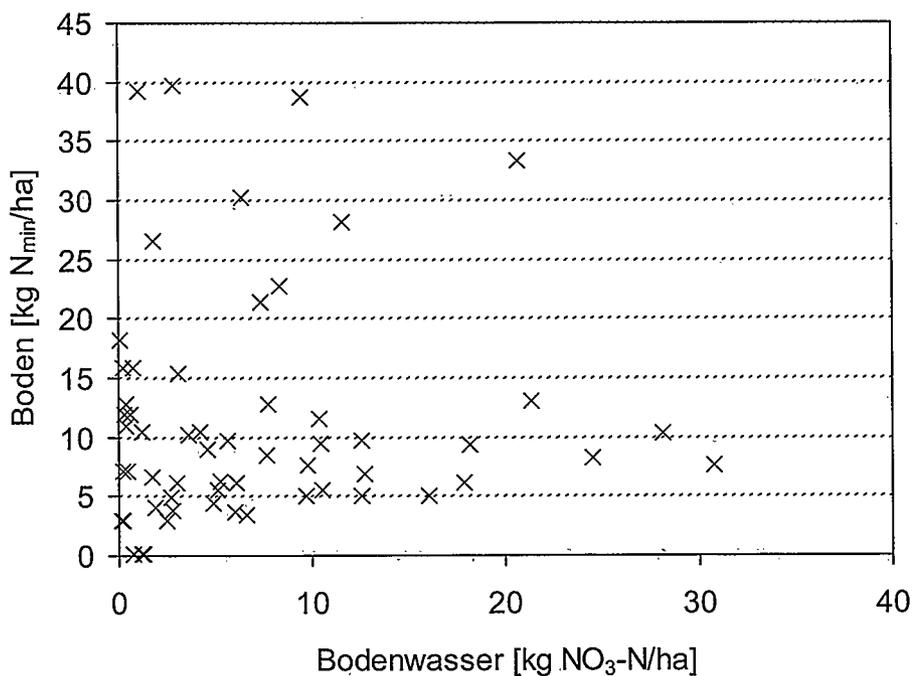


Abbildung 17. Beziehung zwischen den N_{min} -Werten des Bodens und der Nitratmenge im Bodenwasser (erhoben mittels Saugkerzen und Wassergehaltsmessungen) im Block II, während der Jahre 1999-2001.

4.9 Sickerwassermenge und Nitratauswaschung

Sickerwassermenge: Abbildung 18 zeigt die Sickerwassermengen, die bei PF und DS im Düngungsverfahren MIN aus den Lysimetern geflossen sind. In den Jahren 1999 und 2000 wies PF bei starken Niederschlägen eine Tendenz zu höheren Sickerwassermengen auf als DS. Dies war darauf zurückzuführen, dass der oberste Ring der Lysimeterwand (30 cm Höhe) nach der Bodenbearbeitung und Saat 1999 und im Jahr 2000 nicht auf die Lysimeter aufgesetzt wurde. Da bei grossen Niederschlagsereignissen bei PF die Sickerwassermengen zum Teil die Niederschlagsmengen überstiegen, dürfte zu diesen Zeitpunkten ein lateraler Wasserfluss vom umgebenden Boden in die Lysimeter stattgefunden haben. Aus diesem Grund wurden in den folgenden Perioden die Ringe nach jeder Bodenbearbeitung auf die Lysimeter gesetzt, so dass diese gegenüber dem umliegenden Boden hermetisch abgedichtet waren. Nach dieser Massnahme wiesen beide Verfahren ein sehr synchrones Verhalten auf.

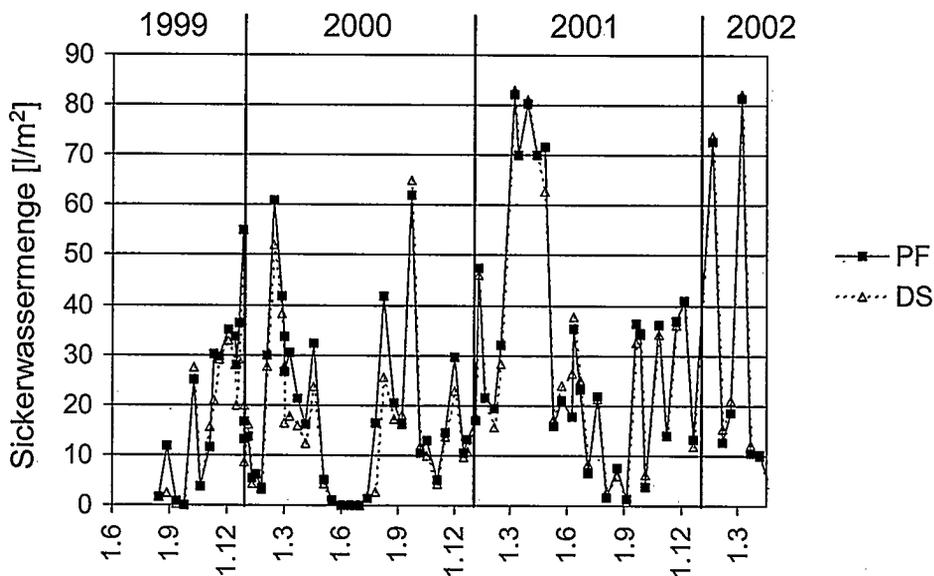


Abbildung 18. Mittelwerte der zirka 14-täglich bestimmten Sickerwassermengen von Pflug (PF) und Direktsaat (DS) von 1999-2001.

Die Sickerwassermengen waren direkt von den Niederschlagsmengen und dem Bodenwasser-gehalt abhängig. Bei vollständig wassergesättigtem Boden floss die gesamte Niederschlagsmenge mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung unten aus den Lysimetern. Im Gegensatz dazu floss zum Beispiel im Juni 2000 trotz 61 mm Niederschlag beinahe kein Wasser aus den Lysimetern. Dieses Wasser war im Boden gespeichert oder durch den Weizenbestand aufgenommen worden.

Durchbruchskurven: Abbildung 19 zeigt die zeitlichen und die mengenmässigen Unterschiede der Maxima der einzelnen Durchflusskurven, die für die Lysimeter von PF und DS dargestellt sind (Berechnung vgl. Abbildung 7). Würden bei einem Verfahren die Maxima der Durchbruchskurven (maximale Ausflussmenge während einem Niederschlagsereignis) der einzelnen Lysimeter zeitlich verzögert auftreten, dann müssten deren Punkte in der Grafik gegen rechts verschoben sein. Würden die Maxima der Durchbruchskurven höhere Wassermengen aufweisen, dann wären die Punkte nach oben verschoben. Abbildung 19 zeigt aber, dass die Streuungen der zeitlichen Verzögerungen und der mengenmässigen Ausprägungen der Maxima der einzelnen Durchflusskurven für PF und DS keinen sichtbaren Trend aufwiesen. Im Mittel über alle 42 ausgewerteten Niederschlagsereignisse betrug die zeitliche Verzögerung der Maxima beim Pflug 1,67 Std., bei DS 1,76 Std. Die Auswertung der Verfahrensmittelwerte von 42 Ereignissen mit dem zweiseitigen T-Tests ergab zwischen PF und DS keinen gesicherten Unterschied bei der zeitlichen Verzögerung ($p = 0,77$). Die Auswertung der Unterschiede der Maxima der Sickerwasserkurven ergibt ein ähnliches Bild. PF wies mit 0,69 l pro halbe Stunde zwar im Mittel leicht höhere maximale Werte auf als DS mit 0,53 l pro halbe Stunde, die Unterschiede waren jedoch ebenfalls nicht gesichert (t -Test $p = 0,37$).

Nitratauswaschung: Abbildung 20 zeigt die gemessenen Stickstoffausträge, die in Nitratform die Lysimeter verliessen. Nach dem Mais 1999 wurden während dem folgenden Winter unter dem Winterweizen bei DS 70 kg $\text{NO}_3\text{-N/ha}$ und bei PF 40 kg $\text{NO}_3\text{-N/ha}$ aus den Lysimetern ausgewaschen. Während der beiden folgenden Anbauperioden zeigten sich zwischen den beiden Verfahren keine signifikanten Unterschiede.

Die Nitratauswaschung fand vor allem über Winter statt. Von Mai bis September waren in allen 3 Jahren nur geringe Auswaschungen messbar. Eine Ausnahme bildete die niederschlagsreiche Periode vom 8. bis 10. Juni 2001 während der es innerhalb von 3 Tagen 80 mm regnete. Mit dem Sickerwasser dieser Niederschläge wurden zirka 10 kg $\text{NO}_3\text{-N/ha}$ aus den Lysimetern ausgebracht. Mit Sicherheit stammte dieses Nitrat von der Düngung des Mais oder der natürlichen N-Mineralisierung im Frühjahr, denn sowohl die N_{min} - als auch die Nitrat-N-Werte im Bodenwasser zeigten vor der Maissaat 2001 sehr tiefe Werte, die kaum zu einer entsprechenden Nitratauswaschung hätten führen können. Dies belegt, dass es während der Jugendentwicklung des Mais zu Nitratauswaschungen ins Grundwasser kommen kann.

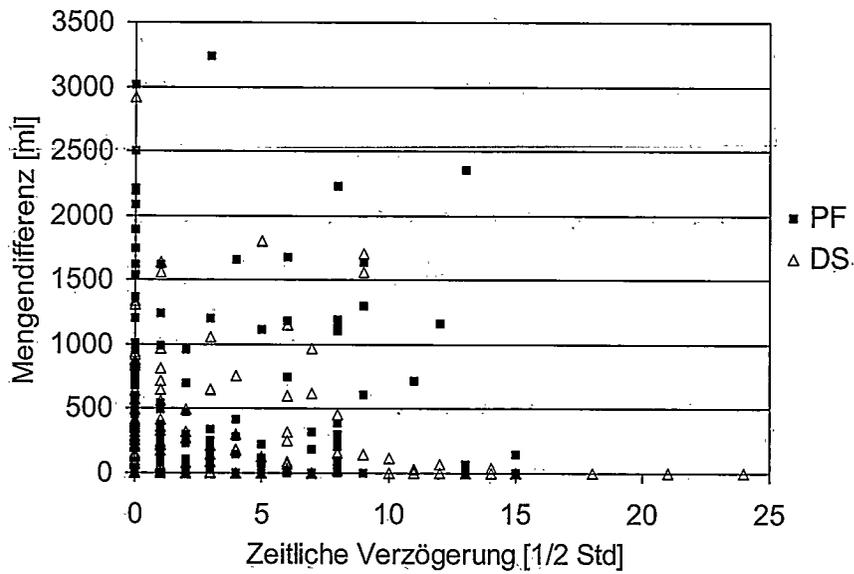


Abbildung 19. Beziehung zwischen den zeitlichen und mengenmässigen Verschiebungen der maximalen Durchflussmenge pro Niederschlagsereignis (Bestimmung vgl. Abbildung 7) der einzelnen Lysimeter der Verfahren Pflug (PF) und Direktsaat (DS).

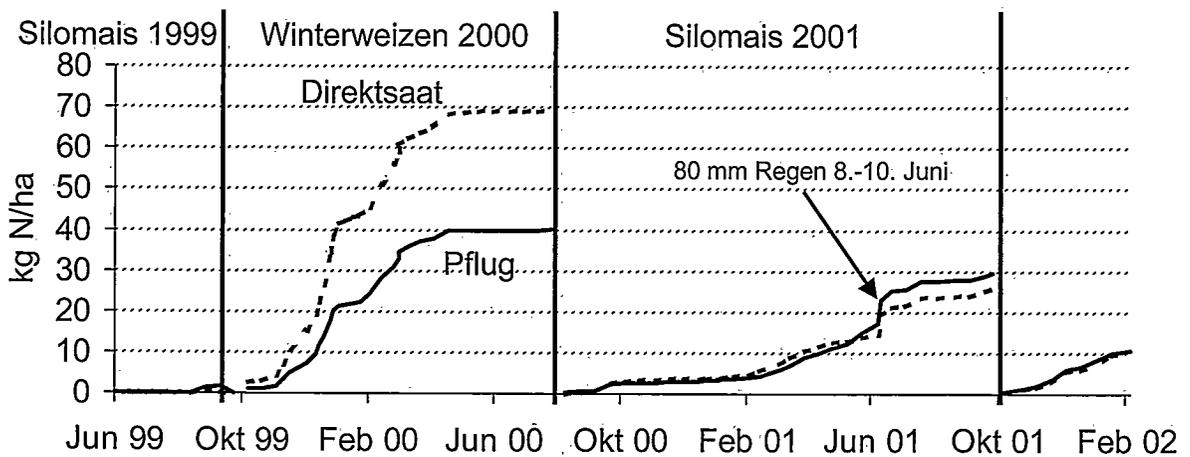


Abbildung 20. Summenkurve des Nitratstickstoffs [kg NO₃-N/ha], der bei Pflug (PF) und Direktsaat (DS) aus den Lysimetern ausgewaschen wurde.

5. Diskussion

5.1 Bestelltechnik und Pflanzenentwicklung

Biomasseertrag, Kornertrag und Blühverlauf: 1999 wies das Verfahren Direktsaat (DS) eine wesentlich langsamere Jugendentwicklung auf als Verfahren Pflug (PF) (Tabelle 6). Neben der starken Einbusse bei der Biomasseentwicklung zeigte sich zudem 1999 bei DS beim Abblühen der Maispflanzen eine zeitliche Verzögerung von zirka 6 Tagen (Abbildung 9). Die Gründe der grossen Ertragsdepression von DS im Jahre 1999 liessen sich nicht eindeutig eruieren. Im Kapitel 5.7 werden mögliche Einflussfaktoren im Hinblick auf die schlechte Pflanzenentwicklung ausführlich diskutiert.

Im Jahre 2001 konnte bei DS wiederum eine verzögerte Biomasseentwicklung und ein tieferer Biomasseschlussertrag beobachtet werden. Beim Blühverlauf traten hingegen keine grossen Unterschiede zwischen den Bestellverfahren auf. Im Gegensatz zu 1999 war der Kornertrag bei DS 2001 geringfügig höher als bei PF (Tabelle 7). Die Unterschiede waren aber weder bei der Biomasse noch beim Kornertrag statistisch gesichert.

Wie die Mais- wiesen im Frühjahr 2000 die Weizenpflanzen von DS im Jugendstadium im Vergleich zu PF ebenfalls eine leicht verzögerte Biomasseentwicklung auf (Tabelle 18). Der Kornertrag wie der Biomasseertrag bei der Schlussernte war bei DS um etwa 12 % geringer als bei PF (Tabelle 20). Der Kornertrag lag mit zirka 5,5 Mg TM/ha auf einem standortüblichen Niveau. Im Vergleich zu Angaben aus der Literatur sind Ertragsdifferenzen dieser Grössenordnung als bedeutend einzustufen (siehe Kapitel 1.3). Dieser Minderertrag von DS ist aus dem Zusammenwirken der Ertragskomponenten entstanden; ihre Werte lagen bei DS im Vergleich zu PF mehrere Prozent tiefer (siehe weiter unten). Die genauen Gründe der Ursache dieses Ertragsunterschiedes liessen sich ebenfalls wie beim Mais 1999 nicht genau erörtern. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Ertragsunterschiede mit den Oberbodenverdichtungen im Zusammenhang stehen, die anlässlich der Silomaisernte vom 20.09.99 bei feuchtem Boden verursacht wurden. Das tiefe Grobporenvolumen, die hohen Lagerungsdichten und die tiefe Luftdurchlässigkeit bei DS weisen in diese Richtung (siehe 4.6).

Feldaufgang und Bestandesdichte: Die Parzellen von DS wiesen im Maisanbaujahr 1999 26 % weniger Pflanzen pro Fläche auf als diejenigen von PF. Im Jahr 2001 wies die Bestandesdichte keine grossen Unterschiede auf; DS erzielte allerdings wieder eine leicht geringere Bestandesdichte (Tabelle 7). Während der Jugendentwicklung des Mais (Mai bis Juni 1999) wirkte sich das sehr nasse Wetter (433 mm Niederschlag im Mai/Juni 1999) bei DS nicht nur negativ auf die Biomasseentwicklung, sondern auch stark auf den Feldaufgang aus. Es ist anzunehmen, dass vor allem die mangelhafte Sauerstoffversorgung der Wurzeln diese Wachstumsdepressionen verursachte (siehe 5.7). Eine bei DS um über 25 % geringere Bestandesdichte bei Mais ist in der Literatur nicht auffindbar und stellt sicherlich einen Ausnahmefall dar. In schweizerischen Anbauversuchen lagen die Unterschiede der Bestandesdichten bei Mais zwischen unterschiedlichen Anbausystemen generell unter 10 % (Rüegg 1994, Garibay 1996, Rieger 2001).

Beim Winterweizen im Anbaujahr 2000 (Tabelle 19) hatte die Bestelltechnik keinen gesicherten Einfluss auf die Bestandesdichte, jedoch lagen die Mittelwerte von DS immer leicht tiefer als diejenigen von PF. Die Ährenzahlen lagen mit 300-400 Ähren/m² auf einem bescheidenen Niveau. Eine geringe Bestandesdichte ist eine typische Eigenschaft der Winterweizensorte Titlis (Fossati 2003). Rieger (2001) fand in 6 von 14 Versuchen für DS im Vergleich zu PF ebenfalls leicht geringere und in 8 von 14 Versuchen signifikant tiefere Bestandesdichten bei Winterweizen. Bei Anken et al. (1997) waren in einem 14 Jahre dauernden Versuch die Bestandesdichten bei DS besonders auf einem schweren und schlecht durchlässigen, tonigen Lehm geringer als bei PF, auf einem zweiten, leichteren Standort war kein eindeutiger Trend erkennbar. Linke (1998) ist aufgrund seiner Literaturstudien der Meinung, dass sich bei sachgerechter Durchführung bei der Direktsaat der Feldaufgang bei im Vergleich zu anderen Systemen nicht grundsätzlich unterscheidet. Wenn auch die vorliegenden Untersuchungen keine eindeutigen Unterschiede zeigten, bestand doch bei DS der Trend zu tieferen Bestandesdichten. Da die Bestandesdichte bei DS um 7 % geringer war als bei PF, der Kornertrag aber um 12 % tiefer lag, muss die Ährenausbildung des Weizens ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf den Kornertrag gehabt haben.

Kornzahl pro Ähre oder Kolben: Bei Mais unterschied sich die Kornzahl pro Kolben im Jahre 1999 signifikant, als DS 24 % weniger Körner aufwies als PF (Tabelle 7). Im Gegensatz dazu wies DS im Jahr 2001 eine leicht höhere Anzahl Körner pro Kolben auf. Die in diesen Versuchen erzielten Werte von zirka 300 Körnern pro Kolben stimmen mit anderen Versuchen recht gut überein (Walther 1995c, Garibay 1996, Rieger 2001). In 8 Maisversuchen fand Rieger (2001) bei DS im Vergleich zu PF einen leichten Trend zu weniger Körnern pro Kolben auf. Garibay (1996) wies bei ausreichender Stickstoffversorgung keinen Unterschied zwischen den Bestellverfahren Pflug und Streifenfrässaat nach. Das "Ausnahmejahr" 1999 hebt sich also deutlich vom zweiten Anbaujahr und von den Literaturangaben ab.

Beim Winterweizen wies DS um 4 % tiefere Werte auf als PF (Tabelle 20). Mit rund 33 Körnern pro Ähre erzielte die Sorte "Titlis" im Vergleich zur Sorte "Runal" mit zirka 25 Körnern pro Ähre (Rieger 2001) hohe Werte. Rieger (2001) fand keine Unterschiede zwischen den Bestellsystemen Pflug und Direktsaat. Baumann (2001) erzielte mit den Sorten "Reka" und "Granada" im Süden Deutschlands ebenfalls Werte um 34 Körner pro Ähre, was die hohe Sortenabhängigkeit dieser Eigenschaft belegt.

Nach Struik und Stamp (1985) wirken vor allem Temperatur und Fotoperiode auf die Anlage der Anzahl Blüten beim Mais. Bei den vorliegenden Versuchen erzielte DS nur im Jahr 1999 eine bedeutend geringere Anzahl Körner pro Kolben. Die Bodentemperatur (Abbildung 12) sowie die Fotoperiode scheiden zur Erklärung der Unterschiede aus, da die beiden Verfahren PF und DS denselben Bedingungen ausgesetzt waren. Gemäss den beiden Autoren könne Dürre die Anzahl angelegter Blüten stark reduzieren. Garibay (1996) wies bei der Streifenfrässaat von Mais bei reduzierter N-Düngung und ausgeprägter Konkurrenz durch Grasbewuchs eine starke Reduktion der Anzahl Körner nach. Im vorliegenden Versuch hatten bei DS 1999 offensichtlich weitere Stressfaktoren eine starke Reduktion der Anzahl Körner bewirkt (siehe 5.7). In Situationen, in

denen sich die Pflanzen von DS im Vergleich zu PF normal entwickeln und einen vollen Ertrag erzielen, scheinen bei der Kornanlage nur sehr geringe Unterschiede aufzutreten. Stressfaktoren, die den Biomasse- und den Kornertrag reduzieren, wirken sich ebenfalls auf die Kornanlage aus. Dies zeigten die signifikanten Regressionen des Kornertrages mit der Anzahl Körner pro Ähre resp. Kolben, die über alle drei Jahre gesehen ein Bestimmtheitsmass (r^2) von 0,50 bis 0,80 aufwiesen. Bei gleichwertigen Erträgen sind bei der Anzahl Körner pro Ähre resp. Kolben kaum Unterschiede festzustellen und das Bestimmtheitsmass ist gering, beim Auftreten von Stressfaktoren scheint jedoch die Anzahl Körner pro Ähre resp. Kolben einer der am empfindlichsten reagierenden Parameter zu sein.

Tausendkorngewicht: Wie der Kornertrag und die Anzahl Körner pro Kolben war das Tausendkorngewicht des Mais (Tabelle 7) bei DS 1999 signifikant tiefer, während es 2001 höher lag. Das Tausendkorngewicht der Maissorte LG 22.65 mit Werten um 212 g TM lag in einem vergleichbaren Rahmen mit den Versuchen von Garibay (1996). Walther (1995c) und Rieger (2001) erzielten Werte um zwischen 250 und 300 g TM. Dies zeigt, dass das Tausendkorngewicht beim Mais durch Sorte und/oder Umwelt bestimmt wird.

Beim Winterweizen waren zwischen den beiden Bestellverfahren bezüglich des Tausendkorngewichtes keine Unterschiede festzustellen (Tabelle 20). Der um 12 % tiefere Kornertrag von DS wurde also durch die tiefere Bestandesdichte sowie durch die verminderte Anzahl Körner pro Ähre verursacht. Die Winterweizensorte Titlis wies in den vorliegenden Versuchen mit einem Tausendkorngewicht von knapp 45 g TM ausserordentlich hohe Werte auf. Gemäss Fossati (2003) ist das hohe Tausendkorngewicht im Vergleich zu anderen Sorten eine typische Eigenschaft der Sorte Titlis. Es wird ebenfalls auf der Schweizerischen Sortenliste für Winterweizen hoch eingestuft (Menzi und Andres 2003). Rieger (2001) fand in 14 Versuchen im schweizerischen Mittelland bei Weizen für DS im Vergleich zu PF ein leicht tieferes Tausendkorngewicht. Baumann (2001) wies bei DS im Vergleich zu einer gegrubberten Variante nur kleine Unterschiede nach. Linke (1998) schliesslich fand in einer Literaturübersicht ebenfalls nur geringfügige Unterschiede beim Tausendkorngewicht. Bei einer standortüblich verlaufenden Pflanzenentwicklung scheinen die beiden Bestellsysteme kaum einen Einfluss auf das Tausendkorngewicht zu nehmen.

Wie die Anzahl Körner pro Kolben war das Tausendkorngewicht über die drei Jahren gesehen mit dem Kornertrag verbunden (r^2 von 0,64 bis 0,94).

Im Gegensatz zur verlangsamten Jugendentwicklung von DS bedeuten die vergleichsweise hohen Werte beim Tausendkorngewicht dass sich die Leistungsfähigkeit der Pflanzen der beiden Bestellverfahren während der Kornfüllungsphase nicht unterscheidet. Mit Ausnahme von 1999 lagen die relativen Kornerträge von DS im Vergleich zu PF über den relativen Biomasseerträgen.

Ernteindex: Der Ernteindex des Mais (Tabelle 7) war 1999 bei DS im Vergleich zu PF signifikant kleiner, was mit der schlechten Biomasseentwicklung und dem Blühverzug im Zusammenhang stehen dürfte. Im Jahr 2001 war er hingegen leicht höher.

Beim Winterweizen im Jahr 2000 war der Ernteindex bei DS leicht höher als bei PF (Tabelle 20). Bei Rieger (2001) wiesen Mais und Weizen bei DS einen geringfügig kleineren Ernteindex auf als bei PF. Gemäss Linke (1998) ist der Ernteindex bei DS häufig höher als bei PF.

Diese unterschiedlichen Angaben zeigen, dass sich bezüglich des Ernteindex zwischen den beiden Bestellverfahren keine eindeutigen Schlüsse ziehen lassen. Im Vergleich zu PF kann für DS ein gewisser Trend zu höheren Ernteindizes festgestellt werden. Wie beim Tausendkorngewicht ist dies ein Hinweis dafür, dass die Leistungsfähigkeit direktgesäter Pflanzen zum Zeitpunkt der Kornfüllung derjenigen konventionell bestellter Pflanzen nicht nachsteht oder diese gar überbieten kann.

Stickstoffgehalt und -entzug der Pflanzen: Der Stickstoffgehalt der Sprossbiomasse zur Blüte und Schlussernte des Mais 1999 und 2001 war bei DS im Vergleich zu PF höher (Tabelle 8). Die im Vergleich zu PF leicht höheren Stickstoffgehalte von DS im Jahr 1999 weisen darauf hin, dass wohl nicht der Stickstoff bei DS ertragsbegrenzend wirkte, sondern dass die grossen Ertragsunterschiede auf andere Faktoren zurückzuführen waren. Rüegg (1994), Garibay (1996) und Walther et al. (2001b) bestimmten in ihren Versuchen bei der Schlussernte vergleichbare Stickstoffgehalte in der Sprossbiomasse des Mais.

Infolge des höheren Biomasseertrages lag der Stickstoffentzug von PF (Tabelle 9) 1999 bei allen Düngeverfahren zirka 60 kg N/ha höher als bei DS. Daraus könnte abgeleitet werden, dass bei vergleichbarer Stickstoffmineralisierung des Bodens, der Gehalt an mineralischem Stickstoff im Boden nach dem Mais 1999 bei DS höher hätte ausfallen müssen als bei PF. In den Kapiteln 5.4 und 5.5 wird gezeigt, dass im Gegensatz zu dieser Annahme bei DS nach der Maisernte 1999 nicht mehr mineralischer Stickstoff im Boden nachweisbar war. Es stellt sich die Frage, wo dieser verblieben war. Er könnte in der organischen Substanz des Bodens festgelegt oder als gasförmiger Verlust (Denitrifikation) entwichen sein, was mit den vorliegenden Untersuchungen nicht quantifizierbar war.

Im Jahr 2001 waren die N-Entzüge von PF und DS beinahe identisch. Im Vergleich zu den Normwerten der schweizerischen "Grundlagen der Düngung im Acker- und Futterbau" (Walther et al. 2001b) lagen die gemessenen Stickstoffentzüge von PF/MIN mit 180 kg N/ha zirka 20 kg tiefer. Rüegg (1994) fand über fünf Umwelten keine systematischen Unterschiede bezüglich des N-Entzuges unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren (Pflugverfahren und Mulchsaat). Rieger (2001) fand bei verschiedenen Versuchen mit Mais zwischen den Bestellverfahren Pflug und Direktsaat ebenfalls keine nennenswerten Unterschiede.

Beim Stickstoffgehalt des Winterweizens im Jahr 2000 traten bei den Zwischenernten keine grossen Unterschiede auf (Tabelle 21). Auch bei der Schlussernte unterschieden sich weder die N-Gehalte des Stroh noch diejenigen der Körner. Die N-Gehalte bei der Schlussernte waren vergleichbar mit denjenigen von Walther et al. (2001b) und Rieger (2001).

Der Stickstoffentzug des Winterweizens im Jahr 2000 (Tabelle 22) war bei DS im Vergleich zu PF entsprechend dem tieferen Ertrag leicht geringer ausgefallen. Die Stickstoffentzüge des Winterweizens, angebaut mit den Verfahren PF/MIN, liegen mit 200 kg N/ha zirka 40 kg über den

Angaben von Walther et al. (2001). Rieger (2001) fand über 8 verschiedene Umwelten bei den beiden Bestellverfahren PF und DS nur geringe Unterschiede bei den N-Entzügen.

Über die drei Jahre gesehen, waren der Stickstoffzug der Pflanzen und der Biomasseertrag relativ eng gekoppelt ($r^2 = 0,86$). Nyborg et al. (1995), Arshad et al. (1994), Moller Hansen und Djurrhuus (1997) und Rieger (2001) kamen zu vergleichbaren Ergebnissen. Interessant ist die Tatsache, dass die relativen Unterschiede zwischen den Bestellverfahren beim Biomasseertrag immer grösser waren als die Unterschiede des N-Entzuges. Bei geringerem Ertrag war der N-Gehalt der Pflanzen leicht erhöht.

N-Mehrertrag: 1999 erzielten die beiden Bestellverfahren einen N-Mehrertrag von 9-13 kg Maiskörner pro kg gedüngtem Stickstoff (Tabelle 10). Trotz der schlechten Biomasseentwicklung wies DS 1999 sogar einen leicht besseren Mehrertrag auf als PF. Im Jahr 2001 lag der Mehrertrag mit zirka 25 kg Körner/kg N (Tabelle 10) deutlich höher als 1999. Diese Jahresunterschiede könnten dadurch erklärt werden, dass nach dem Wiesenumbruch 1999 mehr Stickstoff mineralisiert wurde, als dies nach dem Gelbsenf im Jahr 2001 der Fall war. Stickstoff wirkte 1999 also weniger ertragslimitierend als 2001. Das Einzelverfahren PF/ON führte 1999 zu einem N-Entzug von 120 kg N/ha, während dieser im Jahr 2001 bei 90 kg N/ha lag. Im Vergleich zu den vorliegenden Resultaten erzielte Walther (1995c) in einer Versuchsreihe mit konventioneller Bodenbearbeitung Mehrerträge von 10-30 kg Maiskörner pro kg gedüngtem Stickstoff, was gut mit den vorliegenden Ergebnissen übereinstimmt.

Im Gegensatz zum Mais verhielt sich der N-Mehrertrag beim Winterweizen im Jahr 2000 zwischen den Bestellverfahren gerade umgekehrt. PF wies mit 25,6 kg Körner/kg N den besseren N-Mehrertrag auf als DS mit 18,4 kg Körner/kg N (Kapitel 4.4). Bei DS schien demzufolge der Stickstoff auch beim Winterweizen nicht der ertragslimitierende Faktor zu sein, worauf auch die leicht erhöhten N-Konzentrationen der Biomasse zur Schlussernte hinweisen.

N-Ausnutzungsgrad: Walther (1995b) gibt für Mais bei optimaler N-Düngung einen durchschnittlichen N-Ausnutzungsgrad von 57 % an. Dieser Wert wurde 1999 und 2001 von beiden Bestellverfahren unterschritten. 1999 nutzte PF den gedüngten Stickstoff besser aus als DS, 2001 war dies gerade umgekehrt (Tabelle 11). Die tiefe N-Ausnutzung von 18-27 % im Jahr 1999 lässt sich, wie oben erwähnt auf den hohen N-Entzug der ungedüngten Parzellen (hohe Mineralisierung des Bodens nach Kunstwiese) zurückführen. Im Jahr 2001 lagen die Werte mit 41-55 % nur leicht unter der Referenz von Walther (1995b), die auf mineralischer Düngung basiert. Dabei ist zu bedenken, dass die vorliegenden Werte für PF und DS den Mittelwert aus MIN und GUL darstellen, wobei GUL einen schlechteren N-Ausnutzungsgrad aufweist als MIN (siehe Tabelle 11 und Kapitel 4.4).

Beim Weizen beziffert Walther (1995b) den N-Ausnutzungsgrad mit 65-75 %. Mit einem N-Ausnutzungsgrad von 60 % (Kapitel 4.4) stimmen die Werte von DS gut mit diesen Angaben überein, während PF diese mit 80 % übertraf. Somit lag der N-Ausnutzungsgrad des Weizens klar höher als derjenige des Mais.

5.2 Stickstoffdüngung und Pflanzenentwicklung

Biomasse-, Kornertrag und Blühverlauf: Die Düngung hatte während beiden Maisanbaujahren einen signifikanten Einfluss auf den Biomasse- und den Kornertrag des Mais. Die Verfahren mineralische Stickstoffdüngung (MIN) und Gülleüngung (GUL) hoben sich zu den verschiedenen Zwischenernteterminen signifikant von der ungedüngten Variante ON ab (Tabelle 12, Tabelle 13). Das im Vergleich zu MIN um zirka 20 % reduzierte mineralische N-Angebot (NH_4) bei GUL bewirkte 1999 einen relativen Minderertrag bei der Biomasse und den Körnern von 12 %. 2001 betrug dieser Wert zirka 20 %. Dieser Sachverhalt wurde teilweise durch den Blühverlauf widerspiegelt, als GUL und ON 1999 geringfügig und 2001 signifikant später abblühten als MIN (Abbildung 10).

Beim Winterweizen im Jahr 2000 waren die relativen Ertragsunterschiede zwischen den Stickstoffdüngungsverfahren im Vergleich zum Mais grösser. GUL resp. ON erzielten im Vergleich zu MIN einen Biomasse-Minderertrag von 33 % resp. 46 % (Tabelle 23). Im Vergleich zum Mais lässt sich die grössere Ertragsdifferenz zwischen MIN und GUL beim Winterweizen durch die unterschiedlichen N-Gaben erklären. Während der beiden Maisanbaujahre wurden zirka 80 % des mineralisch gedüngten Stickstoffs durch den Ammoniumstickstoff der Gülle abgedeckt. Wegen des tiefen Ammoniumgehaltes der Gülle im Jahr 2000 betrug dieser Wert beim Winterweizen im Jahr 2000 nur 50 % (Tabelle 5). Der N-Ausnutzungsgrad (siehe weiter unten) war entsprechend im Jahr 2000 am höchsten und 2001 am geringsten.

Im Vergleich zu den obenstehenden Resultaten erzielten Walther et al. (2001) in ihren Düngerversuchen bei Mais mit Vollgülle 5-40 % Mindererträge gegenüber der mineralischen Stickstoffdüngung. Die Höhe der Ertrageinbussen war gemäss Autoren stark abhängig von der Menge der gasförmigen Stickstoffverluste bei der Gülleausbringung. Die Höhe dieser Verluste werde bestimmt durch die Witterungsbedingungen bei der Ausbringung, der Ammoniumkonzentration der Gülle sowie der Ausbringmenge. Tiefe Stickstoffverluste lassen sich bei der Gülleausbringung gemäss Walther (1998) durch das Beachten folgender Faktoren erzielen: Lufttemperatur tiefer als 17 °C, Luftfeuchtigkeit über 64 %, Ammoniumkonzentration unter 1 kg $\text{NH}_4\text{-N/m}^3$ Gülle, Ausbringmenge über 50 m^3/ha . Aufgrund dieser Kriterien wurden in der Tabelle 4 die einzelnen Ausbringtermine auf deren Wahrscheinlichkeit von tiefen, mittleren und hohen Stickstoffverlusten eingeteilt. Summarisch gesehen war 1999 und 2000 die Gefahr von Gülleverlusten mittel und im Jahr 2001 mittel bis hoch. Die Werte des N-Ausnutzungsgrades (siehe weiter unten) verhielten sich über die drei Anbaujahre gesehen entsprechend dieser Einteilung.

Zusätzlich zu den Witterungsbedingungen und den Eigenschaften der Gülle beeinflusst die Ausbringtechnik die Höhe der Stickstoffverluste. Frick et al. (1996) wiesen nach, dass die Ammoniakverluste bei der Gülleausbringung unter ungünstigen Witterungsbedingungen mit dem Prallteller bis zu 95 % des NH_3/NH_4 -Gehalts der Gülle und mit dem eingesetzten Schleppschlauchverteiler bis zu 35 % Prozent betragen können. Wie im Kapitel 3.2 beschrieben ist, wurde die Gülle im vorliegenden Versuch mit dem Schleppschlauchverteiler ausgebracht. Wie oben erwähnt, konnten im vorliegenden Versuch im Vergleich zu den zitierten Literaturdaten mit kon-

ventioneller Ausbringtechnik keine verbesserte Ertragswirkung oder einen höheren N-Ausnutzungsgrad (siehe unten) erzielt werden. Über den Einfluss der Gülleausbringtechnik können allerdings keine detaillierten Schlüsse gezogen werden, da sie nicht als Faktor im Versuch integriert war.

Feldaufgang und Bestandesdichte: In den Jahren 1999 und 2001 hatte die Düngung erwartungsgemäss keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl Maispflanzen pro Quadratmeter (Tabelle 13), was auch Rieger (2001) und Walther (1995a) aufzeigten.

Beim Winterweizen (Tabelle 24), beeinflusste die Düngung die Anzahl Pflanzen, Halme oder Ähren pro Quadratmeter signifikant. Ab dem Erscheinen des Fahnenblattes wies MIN die höchste und ON die kleinste Anzahl ährentragender Halme auf. Die Werte von GUL lagen dazwischen. Bei Rieger (2001) wirkte sich die N-Düngung in vergleichbarem Ausmass auf die Anzahl Ähren pro Quadratmeter aus.

Kornzahl pro Ähre oder Kolben: Die Stickstoffdüngung beeinflusste beim Mais in beiden Jahren 1999 und 2001 die Anzahl Körner pro Kolben signifikant (Tabelle 13). Die Werte der drei Düngeverfahren folgten in beiden Jahren der Rangfolge MIN > GUL > ON. In den Versuchen von Walther (1995c) nahm bei Mais die Kornzahl der gedüngten Verfahren im Vergleich zu den ungedüngten um zirka 27 % zu, was bei den vorliegenden Versuchen noch übertroffen wurde. Garibay (1996) und Rieger (2001) wiesen in ihren Versuchen ebenfalls einen deutlichen Einfluss der N-Düngung auf die Kornzahlen pro Kolben nach.

Beim Winterweizen beeinflusste die Stickstoffdüngung die Anzahl Körner pro Ähre ebenfalls positiv (Tabelle 25), was gut mit den Resultaten von Rieger (2001) und Baumann (2001) übereinstimmt.

Tausendkorngewicht: Beim Mais liessen sich die Tausendkorngewichte wiederum in der Rangfolge MIN > GUL > ON klassieren (Tabelle 13), wobei die Unterschiede zwischen den Düngeverfahren weniger stark ausgeprägt waren als bei der Anzahl Körner pro Kolben. Walther (1995c), Garibay (1996) und Rieger (2001) stellten bei Mais ebenfalls einen deutlich positiven Einfluss der Stickstoffdüngung auf das Tausendkorngewicht fest.

Beim Weizen (Tabelle 25) unterschieden sich bezüglich des Tausendkorngewichtes nur die beiden Verfahren MIN und ON signifikant voneinander. Baumann (2001) und Rieger (2001) kamen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Wie in andern Düngeversuchen mit Mais (Walther 1995c, Garibay 1996) und Weizen (Rieger 2001) reagierte das Tausendkorngewicht in allen drei Jahren weniger empfindlich auf verminderte Stickstoffgaben als die Anzahl Körner pro Kolben oder Ähre.

Ernteindex: Beim Mais bewirkte die Düngung 1999 keine Veränderung des Ernteindex (Tabelle 13). Im Gegensatz dazu bewirkten im Jahr 2001 MIN und GUL einen deutlichen Anstieg des Ernteindex, wobei sich die Verfahren nur geringfügig unterschieden. Zu einem ähnlichen Schluss kamen Walther (1995c) und Rieger (2001), die für Mais mit zunehmender Stick-

stoffmenge eine Zunahme des Ernteindex belegten. Das Jahr 1999 scheint auch bei diesem Parameter ein "Ausnahmejahr" darzustellen.

Die Werte des Ernteindex des Winterweizens im Jahr 2000 lagen bei MIN leicht tiefer als bei GUL und ON (Tabelle 25). Im Gegensatz zum Mais schien die Stickstoffdüngung das vegetative Wachstum anzuregen. Bei Baumann (2001) beeinflusste die Düngung den Ernteindex bei Winterweizen kaum, einzig die Nullparzellen wiesen in den meisten Fällen tiefere Werte auf. Bei Winterweizen ermittelte auch Rieger (2001) keine signifikanten Unterschiede zwischen unterschiedlichen Düngeverfahren.

Stickstoffgehalt der Biomasse: Während der beiden Maisanbaujahre erzielte das Verfahren MIN stets den höchsten N-Gehalt in der Biomasse. Die Unterschiede waren dabei zwischen MIN und GUL meist grösser als zwischen GUL und ON (Tabelle 14). Interessant ist die Tatsache, dass bei der Schlussernte GUL in beiden Jahren keinen höheren, sondern sogar einen geringfügig niedrigeren N-Gehalt in der Biomasse aufwies als ON. Im Gegensatz dazu war der gesamte Stickstoffentzug (siehe unten) bei GUL deutlich höher als bei ON. Dies bedeutet, dass der verfügbare Stickstoff bei GUL noch in zusätzliche Biomasse integriert wurde und nicht wie bei MIN zu einer höheren N-Konzentration in der Biomasse führte.

Beim Winterweizen im Jahr 2000 (Tabelle 26) folgten die N-Gehalte der Biomasse, der Körner und des Strohs, ausser bei Vegetationsbeginn, der Reihenfolge MIN > GUL > ON. Wie beim Mais waren die Unterschiede beim N-Gehalt zwischen MIN und GUL grösser als zwischen GUL und ON. Der im Vergleich zu ON zusätzlich verfügbare Stickstoff wurde bei GUL also auch beim Winterweizen zu einem grösseren Teil für die Bildung zusätzlicher Biomasse und nicht zur Erhöhung der N-Konzentration der Biomasse verwendet.

In allen drei Versuchsjahren wiesen die Pflanzen bei MIN den höchsten Stickstoffgehalt auf. Auch Walther (2001) und Rieger (2001) stellten sowohl bei Weizen als auch bei Mais einen deutlichen Einfluss der Stickstoffdüngung auf den Stickstoffgehalt der Biomasse fest.

Stickstoffaufnahme der Biomasse: Erwartungsgemäss folgte die bei der Schlussernte in der Biomasse enthaltene Stickstoffmenge sowohl beim Mais (Tabelle 15) als auch beim Weizen (Tabelle 27) stets der Reihenfolge MIN > GUL > ON. Diese Entzüge hingen in allen Jahren stark von den Biomasseerträgen ab, da die Unterschiede bei den Biomasseerträgen relativ gesehen grösser waren als die unterschiedlichen N-Gehalte der Biomasse. Dies stimmt mit den Resultaten von Garibay (1996), Walther (1995b), Rieger (2001), Ryser (2001) überein.

N-Mehrertrag: Die N-Mehrerträge der beiden Stickstoffdüngungsverfahren beim Mais waren wie bei den Bestellsystemen im Jahr 2001 mehr als doppelt so hoch als 1999 (Tabelle 16). Die verstärkte Stickstoffmineralisierung von 1999 sorgte im Vergleich zu 2001 für eine deutliche Verminderung des N-Mehrertrages an Körnern wie an Biomasse. Die N-Mehrerträge der Düngeverfahren liegen in derselben Grössenordnung wie bei Walther (1995c).

Nach Walther (1994) lässt sich bei Getreide mit einer Stickstoffdüngung im Vergleich zu ungedüngten Parzellen ein zusätzlicher Kornertrag von 10–30 % erzielen. Im vorliegenden Versuch

wurde diese Angabe mit 42 % übertroffen (Kapitel 4.5). Die Gründe dieses hohen N-Mehrertrages lassen sich nicht eindeutig eruieren, es ist aber anzunehmen, dass sie auf Sorten- und Standorteigenschaften beruhen.

N-Ausnutzungsgrad: Bei der Variante GUL wurde 50-80 % des mineralischen Stickstoffs von MIN gedüngt (Tabelle 5). Wie im Kapitel 3.5 beschrieben, wurde für die vorliegenden Auswertungen der organische Stickstoff der Gülle nicht mit in die Berechnungen einbezogen. Diese bezogen sich ausschliesslich auf den Ammoniumstickstoff gemäss der Gehaltsbestimmung (Anhang 3). Auch ohne den Einbezug des organischen Stickstoffs der Gülle war der N-Ausnutzungsgrad bei GUL im Vergleich zu MIN während der beiden Maisanbaujahre (Tabelle 17) mit 14 % (1999) resp. 35 % (2001) tiefer als bei MIN. Der tiefere Ertrag bei GUL lässt sich also nicht nur durch die geringere mineralische Stickstoffgabe im Vergleich zu MIN erklären (Tabelle 5). Zusätzlich wurde bei GUL weniger applizierter mineralischer Stickstoff in die Biomasse der Pflanzen eingelagert als bei MIN. Wohin dieser Stickstoff schlussendlich gelangt ist, lässt sich nicht mit Sicherheit bestimmen, ein grosser Teil davon wird aber als gasförmige Verluste in die Atmosphäre entwichen sein (siehe oben).

Beim Winterweizen im Jahr 2000 erzielte GUL mit 63 % einen um 13 % tieferen N-Ausnutzungsgrad als MIN (Kapitel 4.5). Somit erzielte GUL beim Winterweizen einen deutlich besseren N-Ausnutzungsgrad als beim Mais. Dies lässt sich durch die längere Vegetationszeit des Weizens im Vergleich zum Mais (Mineralisierung der organischen Substanz der Gülle) und der klimatisch relativ günstigen Ausbringtermine (Tabelle 4) erklären.

Walther (2001) wies in Versuchen mit konventioneller Bodenbearbeitung, bei Beachtung aller verlustlimitierenden Faktoren beim Ausbringen der Gülle, einen leicht höheren N-Ausnutzungsgrad des $\text{NH}_4\text{-N}$ der Gülle nach. Dies führte er auf die Mineralisierung der organischen Substanz der Gülle zurück. Balik und Olfs (1998) wiesen für Gülle ebenfalls einen schlechteren N-Ausnutzungsgrad nach. Dieser scheint stark von den jeweiligen Standort- und Klimateigenschaften abhängig zu sein, die bestimmend wirken, wie viel mineralischer Stickstoff bei der Gülleaussbringung in die Atmosphäre entweicht und wie viel organische Substanz der Gülle mineralisiert wird. Da sich bei GUL im Vergleich zu MIN nach der Ernte jeweils keine höheren N_{min} -Gehalte im Boden nachweisen liessen, könnte der nicht nachgewiesene Stickstoff in der organischen Substanz des Bodens immobilisiert, denitrifiziert oder als Ammoniak in die Atmosphäre entwichen sein. Die vorliegenden Messdaten erlaubten keine weitere Bestimmung, wo genau dieser Stickstoff lokalisiert sein könnte. Dazu müssten gezielte Versuche angestellt werden. Auf den ersten Blick mag die Höhe der Beträge an nicht nachgewiesenem Stickstoff erstaunen. Nach Scheffer und Schachtschabel (1984) werden in gut durchlüfteten Böden 15 bis 30 % des gedüngten Stickstoffs denitrifiziert. Dass im vorliegenden Versuch zum Teil denitrifizierende Bedingungen herrschten, belegten Weisskopf et al. (2003). Sie führten auf dem vorliegenden Standort Sauerstoffmessungen in der Bodenluft durch und wiesen nach, dass bei hohem Wassergehalt des Bodens zum Teil anaerobe Verhältnisse herrschten, die der Denitrifikation stark förderlich sind.

5.3 Bodenphysikalische Parameter und Bodentemperaturen

Grobporenvolumen und Lagerungsdichte: Im Gegensatz zu DS erhöhte bei PF die jährliche Bodenlockerung mit dem Pflug das Grobporenvolumen, verringerte die Lagerungsdichte und verbesserte die Luftpermeabilität (Tabelle 28). Dieses typische Verhalten der beiden Bestellsysteme ist auch in der Literatur ausführlich dokumentiert (Maillard et al. 1995, Wiermann und Horn 1996, Linke 1998). Die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren waren erwartungsgemäss in 35-40 cm Tiefe deutlich geringer.

Wegen des geringen Grobporenvolumens von DS im Oberboden von zirka 5 % erstaunt es nicht, dass Weiskopf et al. (2003) auf dem vorliegenden Standort bei hohen Wassergehalten des Bodens in der Bodenluft Sauerstoffkonzentrationen von unter 5 % bestimmten, was anaeroben Werten gleichkommt. Interessanterweise massen die Autoren während der Vegetationsperiode geringere Werte als über Winter, als die Wurzeln in Folge der Vegetationsruhe keinen Sauerstoff verbrauchten. Im Zusammenhang mit den intensiven Niederschlägen im Mai/Juni 1999 spielten vermutlich die bodenphysikalischen Verhältnisse und der Sauerstoffgehalt der Bodenluft eine entscheidende Rolle für die schlechte Pflanzenentwicklung bei DS. Im Abschnitt (5.7) wird näher auf die möglichen Gründe eingegangen, die die schlechte Pflanzenentwicklung bei DS 1999 verursacht haben könnten.

Fliesswege: Abbildung 11 zeigt, dass sowohl bei DS als auch bei PF die Vitasynblau-Farbstofflösung präferenziellen Fliesswegen folgte und in den obersten 10 cm zirka zwei Drittel der vertikalen Profilflächen färbte. Im Unterboden kamen weniger als 50 % der Matrix mit dem Farbstoff in Kontakt. In beiden Erhebungsjahren wies PF im Oberboden einen höheren gefärbten Flächenanteil auf als DS. Dies bedeutet, dass das Wasser bei PF im Oberboden weniger ausgeprägt kanalisiert wird und verstärkt über die Bodenmatrix, statt über präferenzielle Fliesswege versickert. Petersen et al. (2001) sowie Anken et al. (1997) kamen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Präferenzielle Fliessstrukturen traten sowohl bei DS als auch bei PF auf, einzig deren Ausprägung unterschied die beiden Verfahren. Im Gegensatz zum Oberboden unterschieden sich die beiden Verfahren im Unterboden nicht. Diese Beobachtungen deckten sich mit der Feststellung, dass sich das Wasserdurchflussverhalten bei den beiden Bestellverfahren nicht unterschied (siehe 4.9).

Im Gegensatz zu viel zitierten Infiltrationsmessungen bei welchen die Oberbodeneigenschaften bestimmend wirken (Germann et al. 1984, Tebrügge und Abelsova 1999, Chervet et al. 2003b), integrieren Lysimetermessungen die Eigenschaften des gesamten Bodenprofils über 1,5 m. Mit zunehmender Tiefe scheinen sich die unterschiedlichen Flieseigenschaften des Oberbodens auszugleichen und schlussendlich zu keinem unterschiedlichen Durchflussverhalten der verschiedenen Lysimeter zu führen (siehe 5.6).

Bodentemperatur: Im Gegensatz zu vielen Publikationen (Hoffman 1995, Kornmann 1998, Chassot et al. 2001, Linden et al. 2000) wies DS keine tieferen Bodentemperaturen auf als PF. Rüegg (1994) wies bei Mulch- und Streifenfrässaaten ebenfalls keine tieferen Bodentemperaturen nach als bei Pflugeinsatz. Kromer und Thelen (1995) fanden eine enge Beziehung der Bo-

dentemperatur in Funktion von Lufttemperatur, Globalstrahlung und Bodenbedeckung ($r^2 = 0,90$). Sie belegten den grossen Einfluss der als Isolationsschicht wirkenden Mulchdecke. Die dünnen Bodenbedeckungen nach der Kunstwiese (1999) und dem Gelbsenf (2001) waren in den vorliegenden Versuchen der Grund für die geringen Temperaturunterschiede.

5.4 Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min})

Die gemessenen N_{\min} -Werte lagen generell auf einem bescheidenen Niveau (Abbildung 13). Der höchste während der drei Jahre gemessene N_{\min} -Wert betrug nach dem Wiesenumbruch beim Verfahren PF 57,7 kg N_{\min} /ha. Diese Werte sind im Vergleich zu anderen schweizerischen Erhebungen als tief einzustufen (Walther und Jäggi 1992, Neyroud und Chauvin 2000). Sie deuten darauf hin, dass der vorliegende Lehmboden im Frühjahr ein träges Mineralisierungsverhalten besass.

Die N_{\min} -Werte der beiden Bestellverfahren PF und DS unterschieden sich nur zu 5 von 17 Zeitpunkten signifikant voneinander (Abbildung 13). Die Differenzen zwischen den beiden Bestellverfahren waren generell klein und lagen meist unter 10 kg N_{\min} /ha. Die grösste gemessene Differenz zwischen den Verfahren betrug im Juni 1999 zirka 40 kg N_{\min} /ha. Der Wiesenumbruch mit dem Pflug schien zu diesem Zeitpunkt die Mineralisierung schneller gefördert zu haben, als dies bei DS der Fall war. Die N_{\min} -Einzelparzellen-Werte der beiden Bestellverfahren korrelierten mit $r^2 = 0,37$ mässig. Die in der Literatur häufig zitierte Aussage, dass die Mineralisierung bei DS im Vergleich zu PF verzögert ablaufe (Köller und Linke 1997), liess sich im vorliegenden Versuch im Frühjahr 1999 und 2001 teilweise nachvollziehen, als PF leicht höhere Werte als DS aufwies.

Abbildung 13 zeigt, dass in allen drei Jahren (Juni 1999, April 2000, Juni 2001) die Kopfdüngungen im Vergleich zu ON zu einer gewissen Akkumulation von mineralischem Stickstoff im Boden führten. Die N_{\min} -Werte wiesen in diesen Perioden die höchsten Werte auf. Bis zur Ernte nahmen die Pflanzen kontinuierlich Stickstoff auf, was die Menge des im Boden vorhandenen mineralischen Stickstoffs verringerte.

Zwischen den verschiedenen Düngeverfahren zeigten sich nur geringe Unterschiede. Nach der Kopfdüngung wies MIN jeweils die höchsten und ON die kleinsten N_{\min} -Werte auf (Abbildung 13). Diejenigen von GUL lagen meist zwischen diesen beiden Verfahren. Walther und Nievergelt (2001) sowie Stauffer et al. (1991) stellten ebenfalls fest, dass sich Unterschiede in der Düngung kaum mittels N_{\min} -Erhebungen nachweisen liessen. Eine zeit- und bedarfsgerechte Düngung wird relativ schnell durch die Pflanzen aufgenommen und lässt sich nur schwer im Boden nachweisen. Die unterschiedlichen Düngeverfahren führten nach der Ernte nicht zu unterschiedlichen N_{\min} -Werten, was Walther (1995a) ebenso feststellte.

Diese kleinen Unterschiede dürfen nicht darüber hinweg täuschen, dass der gesamte Stickstoffentzug der Pflanzen beim Düngeverfahren MIN immer am höchsten und bei ON am kleinsten war. Die Pflanzen schienen den mineralischen Stickstoff jeweils zügig aufgenommen zu haben, denn die Unterschiede der N-Aufnahme der Pflanzen (Tabelle 15, Tabelle 27) fielen mit bis zu

50 kg N/ha wesentlich deutlicher aus, als dies die N_{\min} -Werte des Bodens zu erkennen gaben. Es kam also nie zu einer grossen Akkumulation von mineralischem Stickstoff im Boden. Die Pflanzen in den ungedüngten Parzellen lagerten während allen drei Jahren um die 90 kg N/ha ein, was mit anderen schweizerischen Erhebungen übereinstimmt (Walther 1995b). Übers ganze Jahr gesehen war also die mineralisierte N-Menge des vorliegenden Standorts mit anderen Feldern vergleichbar, wenn auch nicht von hohen mineralisierten N-Mengen gesprochen werden kann und der Standort im Frühjahr eher ein träges Mineralisierungsverhalten aufwies.

5.5 Nitratkonzentration im Boden- und Sickerwasser

Wie die N_{\min} -Werte wiesen die Nitrat-N-Konzentrationen im Boden- und Sickerwasser im Vergleich zu anderen Studien (Stauffer et al. 1991, Murer 1997, Tebrügge 2002, Weisskopf et al. 2001) keine hohen Werte auf. Während der Kulturübergänge der Jahre 2000/2001 sowie 2001/2002 waren kaum Unterschiede zwischen den Anbauverfahren ersichtlich. Anders war die Situation nach der Maisernte im Herbst/Winter 1999/2000 als DS im Vergleich zu PF sowohl im Boden- wie im Sickerwasser erhöhte Nitrat-N-Konzentrationen aufwies. Wie in Tabelle 9 aufgezeigt ist, wies DS wegen dem tiefen Ertrag im Vergleich zu PF einen tiefen N-Entzug durch die Sprossbiomasse auf. Es stellt sich also die Frage, ob die höheren Auswaschungsverluste im folgenden Winter (siehe 5.6) auf den tieferen N-Entzug der Pflanzen zurückgeführt werden können. Dies schien nicht der Fall zu sein, da nach der Maisernte Anfang Oktober 1999 das mittels Saugkerzen gewonnene Bodenwasser sehr tiefe Nitrat-N-Werte aufwies (Abbildung 14). Zudem waren die N_{\min} -Werte nach der Maisernte am 04.10.99 in den Parzellen von DS/MIN mit 21 kg N_{\min} /ha sogar tiefer als bei PF/MIN mit 27 kg N_{\min} /ha. Der vorhergehende Mais hatte demzufolge kaum mineralischen Stickstoff im Boden zurückgelassen. Die geringe Stickstoffaufnahme der Pflanzen von DS schlug sich nach der Maisernte also nicht direkt in erhöhten Werten an mineralischem Stickstoff im Boden nieder. Die Nitratgehalte im Bodenwasser von Oktober-November 1999 zeigten, dass unter dem frisch gesäten Winterweizen die Stickstoffmineralisierung einsetzte. Diese war bei DS deutlich höher als bei PF. Die Bodenbearbeitung verursachte also in diesem Fall keinen "Mineralisierungsschub" wie er in der Literatur (siehe 1.5 häufig beschrieben wurde. Es schien, dass unter DS die Mineralisierungsverhältnisse günstiger waren als bei PF. Dies könnte durch vermehrt verfügbaren organischen Kohlenstoff und Stickstoff verursacht worden sein, die von der vorhergehenden Kunstwiese stammten und bei DS im Verlauf des Jahres 1999 weniger schnell abgebaut wurden als bei PF. Einen ähnlichen Effekt hatte auch Garibay (1996) beschrieben, der zum Teil bei Streifenfrüsaaten im Herbst verstärkte Stickstoffmineralisierung nachwies.

Weiter lagen die Bodentemperaturen bis gegen Ende Oktober über 10 °C und sanken erst ab dem 5. November langsam ab (Daten nicht gezeigt). Diese günstigen Temperaturverhältnisse schienen die Mineralisierung bei DS begünstigt zu haben. In Abbildung 14 ist ersichtlich, wie sich gegen Ende 1999 die "Nitratfront" im Boden nach unten fortbewegte und zu Stickstoffauswaschung führte.

In den beiden folgenden Jahren war das Mineralisierungsverhalten der beiden Verfahren sehr ähnlich, was sich an den N_{\min} -Werten und den Nitrat-N-Gehalten im Boden- und Sickerwasser zeigte. Abgesehen vom Ausgangsjahr 1999, das auch bezüglich des Pflanzenwachstums besondere Verhältnisse aufwies, unterschieden sich die beiden Bestellverfahren bezüglich der Konzentrationen im Sicker- und Bodenwasser nicht systematisch.

5.6 Sickerwassermenge und Nitratauswaschung

Sickerwassermengen und Transportprozesse: Wie in Abbildung 18 dargestellt ist, unterschieden sich die Sickerwassermengen der beiden Bestellverfahren PF und DS nicht wesentlich. Randall und Irigavarapu (1995) sowie Kanvar et al. (1993) stellten bei DS mehr Sickerwasser fest als beim Pflugverfahren. Bei deren Arbeiten war die Sickerwassermenge bei Direktsaat in Folge des präferentiellen Flusses vor allem während heftiger Niederschläge und trockenem Boden erhöht. Bei trockenem Boden ist die Oberflächenspannung der Bodenteilchen grösser, so dass sie das Wasser abstossen. Hinzu kommt, dass sich bei Trockenheit durch Schrumpfung der Bodenteile die Bodenrisse weiter öffnen. Bei starken Niederschlägen und trockenen Böden wird das Wasser also verstärkt diesen präferenziellen Fließpfaden zugeleitet und versickert nur zu einem kleinen Teil durch die Bodenmatrix. Da die Böden in den Lysimetern im vorliegenden Versuch nur kurzzeitig bis in die Tiefe abtrockneten und die Niederschläge selten mit sehr hohen Intensitäten fielen, liess sich das oben beschriebene Phänomen nicht nachvollziehen. Aus den Lysimetern floss während der Trockenperioden nur wenig Wasser. Der Wasserfluss setzte jeweils erst wieder mit erhöhter Wassersättigung des Bodenprofils ein (Bsp. Juni 2000). Das Wasserdurchflussverhalten entsprach weitgehend einem Massenfluss, bei dem das von oben nach unten fließende Wasser das unten liegende verdrängte. Nievergelt (2002) umschrieb dieses Verhalten mit "piston-flow". Der feinkörnige und mit wenig Grobporen versehene Unterboden prägte bei den vorliegenden Lysimetern dieses Verhalten. Die gemessenen Sickerwassermengen von zirka 500 lt pro Jahr entsprachen ungefähr den gemessenen Werten von Murer (1998), Nievergelt (1997) sowie von Ryser und Pittet (2002).

Hätte bei den vorliegenden Versuchen die Direktsaat ein stärker ausgeprägtes präferenzielles Fließverhalten aufgewiesen als das Pflugverfahren, dann hätten bei Niederschlägen die Sickerwasser-Spitzen bei der DS früher über die Wippen fließen müssen. Wie in Kapitel 4.9 beschrieben und in Abbildung 19 aufgezeigt ist, konnten weder zeitliche Verschiebungen der Durchbruchkurven noch unterschiedliche maximale Durchflussmengen bei PF und DS festgestellt werden (Berechnung siehe Abbildung 7). Es ist möglich, dass die 1,5 m tiefen Lysimeter mit ihrem "piston-flow"-artigen Fließverhalten ausgleichend auf die Fliesseffekte wirkten. Andererseits deckten sich diese Feststellungen gut mit den Erhebungen der Fließmuster, die mittels Vitasynblau erhoben wurden und zwischen den beiden Bestellverfahren nur im Oberboden deutliche Unterschiede feststellten (siehe 4.6).

Eine einfache Überlegung zeigte, dass das Nitrat in allen drei Jahren mehrheitlich nicht nur über den Matrix-, sondern auch über den präferenziellen Fluss ausgewaschen wurde. Unter der Annahme, dass maximal 45 % Wasser im Bodenprofil vorhanden waren (entspricht dem Gesamt-

porenvolumen bei pF 1,8), wären zirka 600 mm Wasser notwendig, um eine Nitratfront durch die 1,5 m tiefen Lysimeter auszuwaschen. Die gemessenen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser zeigten aber, dass sich die Nitratfronten über Winter in weniger als einem halben Jahr und mit weniger als 300 mm Sickerwasser durch die Lysimeter bewegten (Abbildung 15). Dieses Verhalten wurde von Knappe und Russow (1998) bestätigt, die mittels Multitracing nachwiesen, dass in den Fließwegen enthaltenes Nitrat sich auf Grund der Abstossung durch die Ton-Humuskomplexe schneller nach unten bewegte als das Bodenwasser, welches durch diese Komplexe angezogen wurde. Nievergelt (2002) wies bei Lysimetern der FAL-Reckenholz, die mit einer Schotter-Braunerde gefüllt waren, schnelle Fließwege mit höheren und kürzeren Nitratspitzen nach als bei Lysimetern mit Braunerde aus Moränenlehm, die einen höheren Matrixflussanteil besaßen. Diese Angaben zeigten, dass der Aufbau und die Struktur des Bodenprofils über die Tiefe das Durchflussverhalten stärker prägten als unterschiedliche Bestellsysteme.

Nitratauswaschung: Abgesehen vom ersten Jahr, als die Direktsaat nach Mais im folgenden Winter/Frühjahr eine erhöhte Nitratauswaschung aufwies, unterschieden sich die beiden Bestellverfahren kaum. Die Nitratauswaschung betrug unter dem Winterweizen 1999/2000 bei DS zirka 70 kg NO₃-N/ha und bei PF 40 kg NO₃-N/ha. Im Winterhalbjahr 2000/2001 war die Auswaschung mit gut 10 kg Nitratstickstoff gering und betrug unter dem Mais 2001 gut 30 kg ausgewaschener Stickstoff. Im Winterhalbjahr 2001/2002 war die Auswaschung bis am 6. März 2002 wiederum bei beiden Bestellverfahren mit zirka 10 kg Stickstoff gering. Im Vergleich dazu massen Ryser und Pittet (2002) langjährig 18-40 kg N-Auswaschung unter Winterweizen. Nievergelt (1997) mass von 1986-1996 zirka 50 kg N-Auswaschung mittels Lysimetern. Die ausgewaschene Menge Nitrat war ausser im Winter 1999/2000 für einen Ackerbaustandort nicht hoch. Die Mineralisierung des Standorts und die Aufnahme durch die Pflanzen schienen auf dem vorliegenden Standort gut aufeinander abgestimmt gewesen zu sein. Es traten über die drei Jahre gesehen keine hohen N_{min}-Werte auf. Die Nitratauswaschung war gering und doch war der Entzug der Pflanzen der ungedüngten Parzellen mit 90 kg N/ha, welche als Mass für die gesamte Mineralisierung herangezogen werden kann, mit anderen schweizerischen Arbeiten vergleichbar.

Abgesehen von den Unterschieden über den Winter 1999/2000 wo DS eine höhere Nitratauswaschung als PF aufwies, die wegen des Versuchsbeginns nicht überbewertet werden darf, decken sich die geringen Differenzen der beiden Bestellverfahren mit den unter 1.7 dargestellten Literaturzitataten.

Bei den vorliegenden Versuchen war die Sickerwassermenge nicht mit der Nitratkonzentration korreliert (Daten nicht gezeigt). Im Gegensatz dazu dokumentierten Schmied et al. (2000) einen Versuch mit einem Drainagesystem, wo die Sickerwassermenge positiv mit dem Nitratgehalt korreliert war. Starke Niederschläge führten in diesem Fall zu verstärkten präferenziellen Flüssen, die im Oberboden vorhandenes Nitrat schnell in ein Drainagesystem beförderten. Bei leichten Niederschlägen versickerte das Wasser über die Bodenmatrix, in der die Transportgeschwindigkeit für Nitrat viel tiefer war. Die generell tiefen N_{min}-Gehalte im Boden sowie das oben be-

schriebene "piston-flow"-artige Fliessverhalten der 1,5 m tiefen Lysimeter liessen kein solches Verhalten beobachten.

In Bezug auf die vorliegenden Resultate ist in Betracht zu ziehen, dass die Umstellungsphase von der konventionellen Bodenbearbeitung zur Direktsaat auf dem vorliegenden Feld noch nicht ganz abgeschlossen war. Bei DS erfolgte die letzte flache Bodenbearbeitung im Sommer 1997 als die Kunstwiese angelegt wurde. Die Erhebung der Fliesspfade zeigte jedoch, dass im Vergleich zu langjährig angelegten Direktsaatparzellen, die typischen vertikal verlaufenden Grobporen (Wurmgänge, Wurzelrisse...) schon vorhanden waren. Aus diesem Grund ist künftig nicht mit einem grundsätzlich anderen Verhalten der Parzellen von DS zu rechnen.

In Bezug auf die Unterschiede der Nitratauswaschung bei mineralischer und organischer Düngung können aus dem vorliegenden Versuch keine Schlüsse gezogen werden, da aus Kapazitätsgründen bei GUL keine Messungen der Nitratauswaschung stattgefunden hatten. Walther und Nievergelt (2001) befürchten, dass Mist und Gülle, insbesondere bei erhöhten Gaben, zu höheren Nitratwerten im Sickerwasser führen könnten. Problem der organischen Dünger sei eine zusätzliche, zeitlich nicht steuerbare Mineralisierung von organischem Stickstoff. Ryser und Pittet (2000) konnten anhand von Lysimeteruntersuchungen in Changins keinen unterschiedlichen Einfluss von Mineraldünger und Gülle auf die Nitratauswaschung nachweisen. Bei Mist fanden die beiden Autoren in anderen Untersuchungen allerdings eine grössere Nitratauswaschung (Ryser und Pittet 2002).

Für die Verminderung der Nitratauswaschung gilt es also alles daran zu setzen, dass sich im Herbst möglichst wenig Nitrat im Bodenprofil befindet, da es ansonsten auch aus Direktsaatparzellen ausgewaschen wird. Briffaux und Aubrion (1998), Neyroud und Chauvin (2000), Stauffer und Spiess (2001) zeigten, dass Zwischenkulturen in der Lage sind, 80 bis über 100 kg Nitratstickstoff pro Hektare aufzunehmen, was die Wirkung der Bodenbearbeitung klar übertrifft.

5.7 Gründe für die schlechte Entwicklung der direktgesäten Pflanzen 1999

Massive Ertragsreduktion: 1999 betrug das Trockengewicht der Maissprosse im 3-Blattstadium bei DS gegenüber PF nur 11 % (Tabelle 6). Die Pflanzen von DS wiesen im Vergleich zu PF eine sehr helle Blattfärbung auf, wirkten gestresst und entwickelten sich optisch gesehen sehr schlecht. Der optische Aspekt der Pflanzen verbesserte sich mit zunehmendem Alter. Der Rückstand bei der Sprossbiomasseentwicklung von DS gegenüber PF verringerte sich, blieb aber bei der Schlussernte mit 52 % weit hinter den Werten von PF zurück. Das verzögerte Abblühen der Pflanzen von DS (Abbildung 9) widerspiegelt diesen Sachverhalt ebenfalls. Im Gegensatz zu 1999 waren in den beiden folgenden Jahren keine ausgeprägten phänologischen Unterschiede zu beobachten. In allen drei Jahren waren die Unterschiede während der Jugendentwicklung der Pflanzen am grössten und glichen sich mit zunehmendem Alter etwas aus. Das Phänomen der langsameren Keimung und Jugendentwicklung bei DS im Vergleich zu PF wurde in der Literatur schon vielfach erwähnt (Frye 1986, Chan et al. 1987, Kirkegaard et al. 1995, Rieger 2001, Chassot et al. 2001, Anken und Bohren 2002, Mehdi et al. 1999). Linke (1998) zitiert in seiner

Arbeit ebenfalls zahlreiche Autoren, die dieses Phänomen beschreiben. Er folgert, dass neben der Bodentemperatur und der Bodenbedeckung noch andere Faktoren die Jugendentwicklung beeinflussen müssen.

Bodentemperatur: In vielen Literaturzitate (Hoffman 1995, Körnmann 1998, Chassot et al. 2001, Linden et al. 2000) wird nachgewiesen, dass die tieferen Bodentemperaturen bei DS ein wichtiger Grund für eine verzögerte Jugendentwicklung und Ertragseinbussen bei DS sein können. Bei den vorliegenden Versuchen wies DS im Vergleich zu PF jedoch keine tieferen Bodentemperaturen auf (Abbildung 12).

Gemäss Stamp und Struik (1985) ist der Silomaisanbau bei einer Durchschnittstemperatur von 13,5 °C während der Vegetationsperiode möglich, das Temperaturoptimum für die Keimung liege aber bei 30 °C. Quellung, Keimung und frühes Jugendwachstum seien auch bei Temperaturen zwischen 6-10 °C möglich, jedoch ergaben sich bei diesen Temperaturen grosse Verzögerungen. Physiologische Schädigungen der Pflanzen treten laut den beiden Autoren bei langanhaltenden Temperaturen zwischen 0-6 °C auf. Tabelle 3 zeigt, dass sowohl im Jahr 1999 wie 2001 kaum Temperaturen unter 6 °C auftraten und dass die beiden Jahre nur wenige Anzahl Stunden mit kritischen Temperaturen unter 10 °C aufwiesen und auch die durchschnittliche Lufttemperatur der beiden Jahre sich kaum unterschied. Aus dieser Sicht können Temperaturdifferenzen für die Erklärung der schlechten Jugendentwicklung des direktgesäten Mais 1999 ausgeschlossen werden.

Stickstoffversorgung: Als weiterer Faktor könnte die Stickstoffversorgung limitierend auf das Pflanzenwachstum gewirkt haben. Häufig wird in der Literatur nachgewiesen, dass bei DS die N_{\min} -Gehalte des Bodens geringer sind als bei PF (siehe 1.5). In den vorliegenden Versuchen erfolgte eine Unterfussdüngung von 30 kg N/ha bei Mais in die Reihe, welche die Stickstoffversorgung während der Jugendversorgung sicherstellen sollte. Im Vergleich zu Rüegg (1994), Garibay (1996) und Rieger (2001), die vergleichbare Anbauversuche in der Schweiz angelegt hatten, wiesen die Pflanzen im vorliegenden Versuch ebenbürtige Stickstoffkonzentrationen auf. Die N-Gehalte des Pflanzenmaterials waren 1999 bei DS, mit Ausnahme des 6-Blatt-Stadiums, höher als bei PF (Tabelle 8). Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Stickstoffversorgung nicht limitierend auf das Maiswachstum wirkte.

Andere Nährstoffmangelsymptome wie Phosphor- oder Kaliummangel wurden keine beobachtet.

Krankheiten: Es ist denkbar, dass Pflanzenkrankheiten oder Schädlinge die Jugendentwicklung bei DS hemmen könnten. Bei den vorliegenden Versuchen deuteten aber keine Indizien in diese Richtung. Schäden von Schnecken, Fritfliegen, Erdwürmern oder Schnaken waren nur vereinzelt zu beobachten. Gegen Schnecken wurde präventiv Schneckenkorn gestreut.

In der Literatur werden verschiedene Krankheiten wie Fusarien (Krebs et al. 2000) und Rapskrebs (Maillard und Vez 1993) zitiert, die bei Direktsaat vermehrt auftreten können, sich aber nicht verzögernd auf die Jugendentwicklung auswirken. Einzig Simpfendorfer et al. (1998) haben in einer Untersuchung von Bodenproben aus 27 Praxisfeldern festgestellt, dass neben den

bodenphysikalischen Eigenschaften, eine Sterilisierung des Bodens die Jugendentwicklung der Pflanzen verbesserte. Die Autoren schliessen daraus, dass bodenbiologische Prozesse die Jugendentwicklung von Pflanzen beeinflussen können. Es ist denkbar, dass neben den bodenphysikalischen Unterschieden auch die Mikrobiologie eine Rolle bei der Entwicklung der Pflanzen von DS spielte.

Ernterückstände: Ein weiteres Problem der Direktsaat betrifft die Ernterückstände, welche durch Scheibenschare kaum durchschnitten und deshalb in die Saatrille gepresst werden können (Linke 1998). Zahlreiche Autoren wiesen nach, dass sich Stroh negativ auf den Feldaufgang und den Schlussertrag auswirken kann (Linke 1994, Rasmussen 1995, Böhrsen 1997, Vosshenrich 1998, Linke 1998, Cheshire et al. 1999). Christian und Bacon (1995) wiesen in England nach, dass das Verbrennen des Strohs eine sichere Methode ist, um auf schweren Böden den Feldaufgang zu verbessern und Ertragsdepressionen zu verhindern. Laut Cheshire et al. (1999) kann sich das Stroh wegen seines weiten C/N-Verhältnisses negativ auf die Stickstoffmineralisierung auswirken. In Bezug auf den vorliegenden Versuch kann ausgeschlossen werden, dass die Ernterückstände eine wichtige Rolle spielten. 1999 erfolgte die Maissaat in die Stoppeln einer abgeernteten Kunstwiese. Der Boden war nicht mit Ernterückständen bedeckt und die Samenablage erfolgte in einen gut geräumten Säschlitz. Abgesehen von den hohen Anforderungen der Unkrautregulierung funktioniert die Direktsaat in Kunstwiesen in der Regel ohne grössere Probleme (Bohren et al. 2002).

Unkrautkonkurrenz: Ammon et al. (1990), Garibay (1996), und Bohren et al. (2002) belegten, dass starker Grasbewuchs die Entwicklung des Mais hemmen und zu Ertragsverlusten führen kann, chemisch regulierter Grasbewuchs jedoch kaum Auswirkungen auf den Ertrag zeigt. Die Kunstwiese wurde im vorliegenden Versuch mit Glyphosat und Atrazin reguliert, was einen befriedigenden Erfolg bewirkte. Da die Beschattung durch den Mais ausblieb, erfolgte eine zusätzliche Behandlung mit Sulfonylharnstoff, um die Graskonkurrenz zu unterdrücken. Diese Behandlungen führten zu einer weitgehenden, aber nicht ganz vollständigen Ausschaltung der Konkurrenz. Die verbliebene Bodenbedeckung ist als konkurrenzschwache Bedeckung zu bezeichnen, welche in vergleichbaren Versuchen keine ertragsmindernde Folgen hatte.

Schlechte Wachstumsbedingungen in der Saatrille: Die helle Färbung und die schlechte Jugendentwicklung der Maispflanzen von DS im Jahr 1999 könnte ihre Ursache in der bodenphysikalischen Beschaffenheit der Saatrille und des angrenzenden obersten, kompakten Bodenhorizontes haben. Der Boden wies in allen drei Jahren bei DS eine höhere scheinbare Dichte, ein geringeres Grobporenvolumen und eine geringere Luftleitfähigkeit als bei PF auf (Tabelle 28). Aufgrund dieser Parameter ist die Bodenstruktur bei DS in den obersten 10 cm als kompakt und mit geringer Luftdurchlässigkeit zu charakterisieren. Anlässlich der Maissaat herrschten 1999 feuchte Bodenverhältnisse. Die gewellten Scheibensche und die Doppelscheibenschare der Direktsämaschine schnitten glatte Saatrillen mit einer Tiefe von 5 cm in den Boden. Im Bereich dieser Rillen fand wegen der hohen Bodenfeuchte praktisch keine Krümelung statt. Die Samenablage erfolgte wunschgemäß in eine Tiefe von zirka 4-5 cm. Die glatten V-Rollen der Sämaschine schlossen die Saatrillen auf ihrer ganzen Länge tadellos. Nach der Saat wurde kein Öff-

nen und Schliessen der Saatrillen beobachtet. Es könnte möglich gewesen sein, dass der hohe Druck der Andruckrollen die Saatrille zu stark anpresste und den Bereich um die Samen verdichtete. Die folgenden hohen Niederschlagsmengen in den Monaten Mai und Juni 1999 (Tabelle 2) könnten dazu geführt haben, dass in der Saatrille bei DS schlechte Wachstumsbedingungen für die Pflanzen (Sauerstoffmangel) geherrscht haben könnten. Linke (1994) wies nach, dass bei der Direktsaat die Saatrille durch die hohen Gewichte der Säckeiben verdichtet werden kann. Diese Verdichtungen können in tonigeren Böden bei starken Niederschlägen zu Staunässe in der Saatrille führen (Anken et al. 1997), was die empfindlichen Keimlinge anaeroben Verhältnissen aussetzen kann. Diese nur schwer messbaren bodenphysikalischen Bedingungen in der Saatrille könnten der wichtigste Grund für die schlechte Jugendentwicklung des Mais sein. Zihlmann (1999) machte auf anderen Standorten ähnliche Beobachtungen. Sauerstoffmessungen in der Bodenluft dieses Standortes zeigten, dass DS bei Niederschlägen schneller zu anaeroben Verhältnissen in der Bodenluft tendiert als PF (Weisskopf et al. 2003).

5.8 Methoden zur Bestimmung der Nitratauswaschung

Im vorliegenden Versuch wurden Nitratgehalte mittels Saugkerzen im Bodenwasser und im Sickerwasser der Lysimeter erhoben. Zusätzlich wurde der mineralische Stickstoff im Boden (N_{\min}) bestimmt. Es stellt sich die Frage, inwiefern die Ergebnisse dieser drei Erhebungsmethoden miteinander korrelieren. Die Resultate zeigten, dass die drei Erhebungsmethoden nur geringe Korrelationen und grosse Streuungen aufwiesen. Nievergelt und Weisskopf (1993) zeigten, dass sich dieser Sachverhalt erklären lässt. Die drei Methoden Bodenproben, Saugkerzen und Lysimeter messen alle einen anderen Aspekt des mineralischen Stickstoffs im Boden. Die Bodenproben (N_{\min}) erfassen die gesamte Bodenmatrix und das darin enthaltene Wasser. Saugkerzen saugen Bodenwasser aus Grobporen ab. Beim angesetzten Unterdruck von 20 hPa beziehen sie das Wasser der Mittel- und Feinporen nicht mit ein. Die Konzentration des Nitrats im Sickerwasser schliesslich stellt bezüglich der Nitratauswaschung die Integration aller Prozesse dar, erfasst aber nur den Nitratgehalt des mittels der Gravitationskraft versickernden Wassers. Die geringen Übereinstimmungen zwischen den verschiedenen Methoden belegten, dass mit jeder Methode ein anderes „Raumkompartiment“ beprobt wird und dies wegen der grossen räumlichen Variabilität der Nitratkonzentrationen im Boden zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann.

Im Gegensatz zu den vorliegenden Resultaten fanden Ballif und Muller (1990) sowie Deutsch et al. (1993) eine recht gute Korrelation zwischen dem Nitratgehalt im Bodenwasser aus Saugkerzen und im Sickerwasser aus Lysimetern. Dies zeigt, wie stark die Messungen durch die örtlichen Gegebenheiten beeinflusst werden und verallgemeinernde Aussagen fragwürdig sind.

Besonders in stark strukturierten, tonigen Böden mit ausgeprägten präferenziellen Fließstrukturen ist mit Abweichungen zwischen den verschiedenen Messverfahren zu rechnen. Entsprechend kritisch sind Aussagen bezüglich des Nitratauswaschungsverhaltens zu werten, die nur auf Erhebungen mittels Saugkerzen oder Bodenproben basieren.

6. Schlussfolgerungen

6.1 Bestelltechnik

Die Pflanzen wiesen beim Verfahren Direktsaat (DS) während allen drei Anbaujahren im Vergleich zum Verfahren Pflug (PF) ein verzögertes Jugendwachstum auf. Diese Entwicklung ist für DS charakteristisch und aus der Literatur bekannt. Verließ die Jugendentwicklung bei DS im Vergleich zu PF ohne grosse Verzögerung ab, wiesen die Korn- und Biomasseerträge bei der Schlussernte im Vergleich zu PF keine grossen Unterschiede auf. Der grosse Minderertrag von 48 % des Silomais im Jahr 1999 ist als Ausnahme zu betrachten. Bodenphysikalische Gegebenheiten (tiefes Grobporenvolumen, tiefe Luftdurchlässigkeit, stark rückverfestigte Saattrille) in Kombination mit den intensiven Niederschlägen führten vermutlich zu anaeroben Bedingungen im Boden, was bei DS starke Wachstumseinschränkungen bewirkte. Wie die Werte der Pflanzenanalysen zeigten, waren 1999 die Maispflanzen von DS ausreichend mit Stickstoff versorgt. In Analogie zum Gesetz des Minimums von Liebig hätte also die Erhöhung der Stickstoffdüngung keine Verbesserung bewirkt, solange Staunässe und tiefer Sauerstoffgehalt in der Bodenluft das Pflanzenwachstum limitierten.

Die Parzellen von DS wiesen 1999 beim Mais eine deutlich geringere Bestandesdichte auf als diejenigen von PF, was aussergewöhnlich ist. Beim Mais im Jahr 2001 und beim Weizen im Jahr 2000 zeigten sich nur kleine, nicht signifikante Unterschiede zwischen den Bestellsystemen. Typisch war jedoch, dass die Bestandesdichten bei DS auch während dieser beiden Jahre leicht tiefer lagen als bei PF.

Das Tausendkorngewicht, die Anzahl Körner pro Ähre resp. Kolben wiesen ausser 1999 zwischen den beiden Bestellverfahren keine grossen und systematischen Unterschiede auf. Im Vergleich zur Biomasse waren die relativen Unterschiede der Bestellverfahren bei diesen Parametern immer geringer.

Die Werte des Ernteindex waren im Jahr 1999 bei DS deutlich geringer, in den beiden anderen Jahren waren sie höher als bei PF. Abgesehen vom Ausnahmejahr 1999 wies der Ernteindex bei DS also eine Tendenz zu leicht höheren Werten als bei PF auf.

Beim N-Mehrertrag und N-Ausnutzungsgrad der beiden Maisanbaujahre wies DS im Vergleich zu PF leicht höhere Werte auf. Beim Weizen verhielt sich dies gerade umgekehrt.

Der Stickstoffgehalt sowie der Stickstoffentzug der Pflanzen wiesen abgesehen von 1999 zwischen den Bestellverfahren nur kleine Unterschiede auf. Während der beiden Maisanbaujahre erzielten die Pflanzen von DS höhere Stickstoffgehalte und kompensierten so im Vergleich zum Pflug einen Teil des Stickstoffentzuges. Der Stickstoffentzug war eng an den Biomasseertrag gekoppelt.

Die bodenphysikalischen Messungen zeigten zwischen den beiden Verfahren deutliche Unterschiede auf. Im Vergleich zu PF wies DS höhere Lagerungsdichten, tiefere Grobporenvolumina, tiefere Luftdurchlässigkeiten und höhere Vorverdichtungswerte auf. Die Parzellen von DS wie-

sen im Oberboden eine sehr kompakte Bodenstruktur auf, während im Unterboden die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren gering waren. Wenn keine Einschränkungen des Pflanzenwachstums in Kauf genommen werden wollen, muss bei der Direktsaat die Vermeidung von Bodenverdichtungen oberste Priorität besitzen.

In den häufig sehr kompakten Oberböden stellt sich bei der Direktsaat das Problem, in einem Arbeitsgang gut strukturierte, rückverfestigte Saatrillen zu erzeugen, die den Kontakt zwischen Samen und Boden gewähren, einen ungehinderten Luftaustausch und den Wurzeln ein ungestörtes Wachstum ermöglichen. Bezüglich der Verbesserung der Bedingungen im "Mikrosaatbett" der Saatrille sind sicherlich die technischen Optimierungsmöglichkeiten nicht ausgeschöpft. 1999 dürften der verminderte Gasaustausch, die verschmierte, Staunässe fördernde Saatrille und der erhöhte Durchdringungswiderstand des kompakten Oberbodens, den schlechten Feldaufgang sowie die stark verzögerte Jugendentwicklung der Maispflanzen bewirkt haben. Bessere Kenntnisse dieser Zusammenhänge würden es erlauben, Direkt- und Mulchsämaschinen gezielt zu optimieren.

Die Unterschiede der N_{\min} -Werte und der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser der beiden Bestellverfahren waren während der ganzen Versuchsperiode gering. Ausser einzelnen Unterschieden bei Versuchsbeginn im Frühjahr 1999, im Herbst 1999 und im Frühjahr 2001 wurden bei DS und PF vergleichbare Stickstoffgehalte im Boden- und im Sickerwasser nachgewiesen. Im Herbst 1999 zeigte sich, dass im Gegensatz zur gängigen Lehrbuchmeinung unbearbeitete Böden unter gewissen Umständen eine grössere Mineralisierung aufweisen können als bearbeitete. Dieser Fall dürfte jedoch eher als Ausnahme zu betrachten sein.

Die Stickstoffmineralisierung im Frühjahr war bei DS im Vergleich zu PF nur minimal verzögert. Die Erhöhung der ersten Stickstoffgabe bei DS, wie sie auch im vorliegenden Versuch angewendet wurde, dürfte keine Notwendigkeit sein. Die positiven Erfahrungen mit der erhöhten ersten Stickstoffdüngergabe in der Praxis lassen die Vermutung aufkommen, dass diese Stickstoffgabe weniger dazu dient die verzögerte Stickstoffmineralisierung der Böden oder einen N-Mangel der Pflanzen auszugleichen, als vielmehr andere einschränkende Faktoren (Bsp. Bodenphysik) durch eine erhöhte Stickstoffverfügbarkeit indirekt teilweise auszugleichen. Die vorliegenden Versuche zeigten jedoch, dass in Analogie zum Minimumgesetz von Liebig diese Möglichkeiten nur sehr eingeschränkt sind.

Die Untersuchung des Fliessverhaltens des Wassers im Boden zeigte auf, dass sowohl PF als auch DS ein stark ausgeprägtes, präferenzielles Fliessverhalten aufwiesen. Dieses präferenzielle Fliessverhalten war bei DS im Oberboden ausgeprägter als bei PF. Die Lysimetererhebungen belegten jedoch, dass sich diese bodenphysikalischen Unterschiede nicht auf die Nitratauswaschung auswirkten.

Die durchgeführten Lysimetermessungen belegten, dass DS im Vergleich zu PF keine geringere Nitratauswaschung bewirkte. Im Herbst im Boden vorhandenes Nitrat wurde über Winter bei beiden Verfahren aus den 150 cm tiefen Lysimetern ausgewaschen. Bei der Beurteilung der langjährigen Bestellversuche in Giessen (D) kommen Harrach und Richter (1994) zu folgendem,

sehr treffenden Schluss: "So muss eine generelle Annahme, dass mit einer Reduktion der Bodenbearbeitung automatisch eine Verringerung der Nitratfracht einhergeht, nur als bedingt richtig angesehen werden."

Die wichtigsten, die Nitratauswaschung prägenden Faktoren sind und bleiben die Fruchtfolge, die Bodeneigenschaften und das Klima. Es gilt auch bei der Direktsaat alles daran zu setzen, dass sich im Herbst möglichst wenig Nitrat im Bodenprofil befindet, da dieses ebenso wie bei gepflügten Parzellen stark auswaschungsgefährdet ist.

6.2 Stickstoffdüngungsverfahren

Zwischen den Bestell- und Düngungsverfahren liessen sich abgesehen von einigen wenigen Ausnahmen keine Interaktionen nachweisen. Die Düngungsverfahren mit mineralischer Stickstoffdüngung (MIN), mit Gülle- (GUL) oder ohne Stickstoffdüngung (ON) wirkten sich bei den beiden Bestellverfahren PF und DS gleich aus.

Die Düngungsverfahren hatten während den drei Anbaujahren einen signifikanten Einfluss auf die Biomasse- und die Kornerträge. Die Reihenfolge dieser Werte lautete dabei immer MIN > GUL > ON.

Erwartungsgemäss hatte die Düngung während der beiden Maisanbaujahre keinen signifikanten Einfluss auf die Bestandesdichten. Beim Weizenanbaujahr bewirkten sowohl die Verfahren MIN wie GUL im Vergleich zur ungedüngten Variante eine deutliche Erhöhung der Bestandesdichten.

Zwischen den Düngungsverfahren traten bei der Anzahl Körner pro Kolben resp. Ähren, dem Tausendkorngewicht und dem Einzelähren- oder Kolbengewicht in allen drei Jahren gesicherte Unterschiede auf. Sie waren jedoch deutlich geringer als bei der Biomasse. MIN wies bei allen Parametern die höchsten und ON die tiefsten Werte auf. Von MIN zu GUL reduzierten sich die einzelnen Werte meist in ähnlichem Masse wie von GUL zu ON. Das Tausendkorngewicht reagierte in allen drei Jahren weniger empfindlich auf verminderte Stickstoffgaben als die Anzahl Körner pro Kolben resp. Ähren.

Der Einfluss der Stickstoffdüngungsverfahren auf den Ernteindex der Pflanzen war uneinheitlich.

Während der gesamten Versuchsperiode erzielte MIN bei der Schlussernte die höchsten N-Gehalte in der Sprossbiomasse. Die relativen Differenzen zwischen GUL und ON verhielten sich unterschiedlich. Beim Mais wies GUL tiefere, beim Weizen höhere Werte auf.

Als Folge der abgestuften Pflanzenerträge erzielte MIN in allen drei Jahren die höchsten und ON die tiefsten Stickstoffentzüge durch die Biomasse.

Im Vergleich zu MIN wies GUL immer einen schlechteren N-Ausnutzungsgrad auf. Es ist zu bedenken, dass bei GUL zirka ein Drittel weniger mineralischer Stickstoff (NH_4) gedüngt wurde als bei MIN und der organische Stickstoff der Gülle aus der Berechnung ausgeklammert war. Dieser schlechterer Ausnutzungsgrad wurde trotz des Einsatzes eines Schleppschlauchverteilers auf die gasförmigen Stickstoffverluste bei der Gülleausbringung zurückgeführt.

Die Untersuchungen des mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{\min}) wiesen nur nach den Kopfdüngungen grössere Unterschiede nach. Ansonsten verliefen die N_{\min} -Werte der verschiedenen Düngeverfahren auf sehr ähnlichem Niveau. Dies zeigte, dass die Pflanzen den verfügbaren Stickstoff jeweils zügig aufgenommen hatten und es im Boden keine grosse Akkumulation von mineralischem Stickstoff gab. Eine Ausnahme bildete ein starkes Niederschlagsereignis im Juni 2001. Heftige Niederschläge kurz nach der erfolgten Kopfdüngung führten zu einer Nitratauswaschung unter dem wachsenden Pflanzenbestand.

6.3 Bestimmung der Nitratauswaschung

Die Bestimmung der Höhe der Nitratauswaschung kann stark von der gewählten Methodik abhängen. In der Literatur weisen Erhebungen mittels Saugkerzen bei einer Vielzahl von Studien für DS tiefere Nitratkonzentrationen auf als für PF. Daraus direkt auf die Nitratauswaschung zu schliessen, scheint nicht zuverlässig zu sein. Im Gegensatz zu Erhebungen mittels Saugkerzen weisen Publikationen welche die Nitratauswaschung anhand von Sickerwasseranalysen aus Drainagen oder Lysimetern bestimmten, für DS kaum geringere Nitratauswaschungen nach.

Der im vorliegenden Versuch angestellte Vergleich der Nitratkonzentration im Bodenwasser, erhoben mittels Saugkerzen in 125 cm Tiefe und der Nitratkonzentration im Sickerwasser der Lysimeter aus 150 cm Tiefe, zeigte keine enge Korrelation. Der Grund dafür, dürften die grossen Variabilitäten der räumlichen Verteilung des Nitrats im Boden und der Transportprozesse (präferenzielle Fliesswege) sein. Dies bedeutet, dass die Messung der Nitratkonzentration im Bodenwasser mittels Saugkerzen keine genaue Schätzung des Nitratgehaltes im Sickerwasser erlaubt.

7. Zusammenfassung

Wie beeinflussen die beiden Bestellverfahren "Pflug" (PF) und "Direktsaat" (DS) die Pflanzenentwicklung, die Stickstoffdynamik des Bodens und die Nitratauswaschung? Welchen Einfluss haben die "mineralische Stickstoffdüngung" (MIN) und die "Gülldüngung" (GUL) auf die Pflanzenentwicklung und die Stickstoffdynamik des Bodens? Ein mehrjähriger Feldversuch in Tänikon bei Aadorf hatte das Ziel, diese Fragen praxisnah zu untersuchen. Der Boden bestand aus einer tiefgründigen Parabraunerde mit 22 % Ton, 34 % Schluff und 1,6 % organischem Kohlenstoff. Die Fruchtfolge war Mais (1999) - Winterweizen (2000) - Mais (2001). Zwei Jahre vor Versuchsbeginn bedeckte eine Kunstwiese die Versuchsparzelle, welche ohne Bodenbearbeitung ins Verfahren DS übergeführt wurde. Die Erhebung des Biomassezuwachs und der Stickstoffaufnahme der Pflanzen erfolgte mittels Zwischenernten. Der mineralische Stickstoff im Boden wurde mittels N_{\min} -Analysen sowie Stickstoffgehaltsanalysen des Bodenwasser gemessen. Die Gewinnung des Bodenwassers aus verschiedenen Bodentiefen erfolgte mittels Saugkerzen. Zur Erfassung der Sickerwassermenge und der Menge ausgewaschenen Nitratstickstoffs wurden in den Verfahren PF/MIN und DS/MIN monolithische Lysimeter mit einer Oberfläche von 1 m² und einer Tiefe von 1,5 m erstellt. Sämtliche Bodenbearbeitungs-, und Pflegearbeiten erfolgten auch auf den Lysimetern mit praxisüblichen landwirtschaftlichen Maschinen.

In den beiden ersten Jahren wies das Verfahren DS im Vergleich zum Verfahren PF signifikant tiefere Weizen- und Silomaiserträge auf. Besonders im Jahr 1999 erzielte DS eine Ertragseinbusse von 50 %, welche auf die stark verzögerte Jugendentwicklung zurückgeführt wurde. Die Ursachen dieser mangelhaften Entwicklung liessen sich nicht eindeutig eruieren. Die hohe Lagerungsdichte des Bodens, das tiefe Grobporenvolumen (5 %), die tiefe Luftleitfähigkeit verbunden mit den hohen Niederschlägen im Mai/Juni 1999 hatten in den Saattrillen von DS Staunässe und somit wohl schlechte Wachstumsbedingungen für den Mais bewirkt.

Die Werte der verschiedenen Düngeverfahren folgten bei den meisten erhobenen Pflanzenparametern wie Biomassertrag und Tausendkorngewicht der Rangfolge MIN > GUL > "keine Stickstoffdüngung" (ON). Der Ausnutzungsgrad des mineralisch gedüngten Stickstoffs war bei MIN höher als der Ausnutzungsgrad des mineralischen Stickstoffs (NH_4) von GUL. Trotz des Einsatzes eines Schleppschlauchverteilers, unter Beachtung der Witterungsbedingungen, dürften die Ammoniakverluste nach der Ausbringung der Gülle die schlechtere Ausnutzung bewirkt haben.

Die verschiedenen erhobenen Parameter zeigten zwischen den Bestell- und Düngeverfahren nur in Ausnahmefällen signifikante Interaktionen. Die Düngeverfahren wirkten sich bei beiden Bestellsystemen gleichförmig aus.

Nach dem ersten Maisanbaujahr 1999 wurden unter dem Winterweizen vom September 1999 bis Mai 2000 bei DS 70 kg NO_3 -N/ha ausgewaschen. Bei PF betrug dieser Wert 40 kg NO_3 -N/ha. Sehr wahrscheinlich führten der verbliebene organische Kohlenstoff und Stickstoff der dem Mais vorausgegangenen Kunstwiese bei der Direktsaat zu einer verstärkten Stickstoffmineralisierung. Im zweiten Maisanbaujahr kam es bei beiden Bestellverfahren vom September 2000

bis September 2001 je zu einer Auswaschung von zirka 30 kg NO₃-N/ha. Die Sickerwassermengen unterschieden sich nicht. Nach der Infiltration von Vitasynblau-Farbstofflösung im Oberboden war bei PF im Vergleich zu DS zirka 30 % mehr Profilfläche blau gefärbt, was auf ein höheres, durchflossenes Bodenvolumen hinweist. Auswirkungen wie die Verminderung der Nitrat- auswaschung liessen sich auf Grund dieser unterschiedlichen Fließstrukturen nicht nachweisen. Der Gehalt an mineralischem Stickstoff im Boden, erhoben über N_{min}-Proben und der Nitratgehalt im Bodenwasser entnommen mittels Saugkerzen, zeigten bei beiden Verfahren ein ähnliches Muster im Jahresverlauf. Im vorliegenden Versuch wirkten sich die beiden Bestellsysteme ausser vom September 1999 bis Mai 2000 nicht unterschiedlich auf die Stickstoffmineralisierung des Bodens und die Nitratauswaschung ins Grundwasser aus.

8. Abstract

How do "mouldboard ploughing" (PF) and "no-tillage" (DS) cultivation techniques influence plant development, soil nitrogen dynamics and nitrate leaching? What influence do "mineral nitrogen fertilisation" (MIN) and "slurry fertilisation" (GUL) have on plant development and soil nitrogen dynamics? In Tänikon near Aadorf (Switzerland), these issues were investigated under practical conditions in a field trial lasting several years. The soil was a luvisol with 22 % clay, 34 % silt and 1.6 % organic carbon. Crop rotation was maize (1999) – winter wheat (2000) - maize (2001). Two years before the trial, the plot was covered by a temporary pasture. Plant biomass development and nitrogen absorption were recorded using intermediate harvests. Mineral nitrogen was measured at various depths using N_{\min} -analysis for the soil and suction cups for soil water. Where ploughing and no-tillage with mineral nitrogen fertilisation were carried out, monolithic lysimeters with a 1 m² surface and a depth of 1.5 m were installed to record the volumes of percolating water and leached nitrate-nitrogen. Even with the lysimeters in place, all soil cultivation, management and harvesting was carried out with commonly used agricultural machinery.

In the first two years, the yields of wheat and silage maize were significantly lower with DS than with PF. Especially in 1999, there was a 50 % lower yield with DS, attributed to severely retarded early growth. No clear reasons could be found for this unsatisfactory growth. The high bulk density of the soil, low macroporosity (5 %), low air conductivity combined with high rainfall in May/June 1999 had caused waterlogging in the no-tillage seed drills, doubtless creating poor growing conditions for the maize.

In most of the plant parameters recorded, e.g. biomass yield and weight per thousand seeds, the values of the various fertilisation methods followed the sequence MIN > GUL > "no nitrogen fertilisation" (ON). Nitrogen utilisation in mineral fertilisation was higher than the mineral nitrogen utilisation (NH_4) of slurry. The ammonia losses following slurry spreading must have caused this poorer nitrogen utilisation by the plants despite the fact that a trailing hose spreader was used and attention was paid to the weather conditions.

The various parameters recorded only showed significant interaction between the tillage and fertilisation techniques in exceptional cases. The fertilisation methods had a uniform effect on both tillage regimes.

After the first year of maize cultivation, 1999, 70 kg NO_3 -N/ha were leached beneath the winter wheat between September 1999 and May 2000 with DS. This figure was 40 kg NO_3 -N/ha with PF. The remaining organic carbon and nitrogen from the temporary ley preceding the maize very probably caused increased nitrogen mineralisation in the no-tillage regime. In the second year of maize cultivation, approximately 30 kg NO_3 -N/ha were leached in each of the tillage regimes between September 2000 and September 2001. The amounts of percolating water did not differ here. After infiltrating Vitasyn-Blue dye solution into the topsoil, approximately 30 % more profile area was dyed blue in PF than in DS, indicating flow through a greater soil volume. Despite these differing flow structures, it is impossible to prove effects such

as a reduction in nitrate leaching. In both techniques, soil nitrate concentrations recorded using N_{\min} samples and suction cups showed a similar pattern in the course of the year. Except between September 1999 and May 2000, both tillage systems in this trial affected soil nitrogen mineralisation and nitrate leaching to ground water in much the same way:

9. Literatur

- Addiscott T.M., 2000. Tillage, mineralization and leaching. Soil and Tillage Research special issue. 53 (special issue "Tillage, mineralization and leaching"), 163-165.
- Ammon H.U., Bohren C. und Anken, T., 1990. Breitband-FräsSaat von Mais in Wiesen und Zwischenfrüchte. Landwirtschaft Schweiz. 3 (3), 121-124.
- Anken T., Heusser J., Weisskopf P., Zihlmann U., Forrer H.R., Högger C., Scherrer C., Mozafar A. und Sturny W.G., 1997. Bodenbearbeitungssysteme - Direktsaat stellt höchste Anforderungen. FAT-Berichte. 501, 16 S.
- Anken T., Irla E. und Gysi M., 1999. Bildanalyse - billig und vielseitig einsetzbar. Agrarforschung. 6 (6), 240-241.
- Anken T. und Bohren C., 2002. Mais: Anspruchsvoller Start. Schweizer Landtechnik. April, 4-6.
- Arshad M.A., Gill K. S. und Coy G. R., 1994. Wheat yield and weed population as influenced by three tillage systems on a clay soil in temperate continental climate. Soil and Tillage Research. 28 (3-4), 227-238.
- Avato L. und Herrenschild W., 1999. Pflanzler-Umfrage 1998. Der Rübenpflanzler. 1, 4.
- Balik J. und Olfs H.W., 1998. Einfluss mineralischer und organischer N-Düngung auf Parameter der Bodenfruchtbarkeit in einem 5-jährigen Mais-Monokulturversuch. Agribiological Research. 51 (4), 319-328.
- Ballif J.L. und Muller J.C., 1990. Les bougies poreuses et les lysimètres. Perspectives Agricoles. 144, 72-81.
- Ball B.C. 1995. Soil responses to tillage and their environmental implications in Scotland. In: Experience with the applicability of no-tillage crop production in the west-europe countries - EC Workshop II, Fachverlag Giessen. p. 7-16.
- Ball B.C., Parker J.P. und Scott A., 1999. Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous fluxes under controlled traffic in Scotland - 2. Nitrous oxide, soil N status and weather. Soil and Tillage Research. 52 (3-4), 191-201.
- Baltisberg F. und Genoni M., 1992. Deckungsbeitragskatalog LBL. Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau, Lindau. 292 S.
- Bakhsh A., Kanwar R.S., Bailey T.B., Cambardella C. A., Karlen D.L. und Colvin T.S., 2002. Cropping system effects on NO₃-N loss with subsurface drainage water. Transactions of the ASAE. 45 (6), 1789-1797.
- Baumann J., 2001. Möglichkeiten zur Verbesserung der Düngungseffizienz bei Direktsaat durch verfahrenstechnische und ackerbauliche Massnahmen. Universität Hohenheim, Hohenheim. 152 S.
- Baumann K., 2002. Maisanbautechnik-Versuch 1998 bis 2001 auf dem Betrieb Hans Rohr in Leimbach. Thurgauer Bauer. 5, 17-21.

- BLW, 2002. Nitrat gehört nicht ins Wasser. Pressemitteilung des Bundesamtes für Landwirtschaft. 27. Mai. 1 S.
- Blume H.P., 1990. Handbuch des Bodenschutzes. ecomed, Landsberg. 686 S.
- Bogusławski E., 1981. Ackerbau - Grundlagen der Pflanzenproduktion. DLG, Frankfurt. 427 S.
- Bohren C., Ammon H.U., Dubois D. und Streit B., 2002. Erträge von Silomais nach verschiedenen Anbauverfahren. Agrarforschung. 9 (9), 386-391.
- Böhrnsen A., 1996. Direktsaat und Strohmanagement. Landtechnik. 1, 8-9.
- Böhrnsen A., 1997. Direktsaat von Raps - Möglichkeiten eines erfolgreichen Strohmanagements. Direktsaat. 3, 7-10.
- Böhrnsen A., 1999. Saatgutablage bei Mulch- und Direktsaat: Das Saatkorn will gut gebettet sein. Profi. 9, 48-51.
- Böhrnsen A. und Nichols J., 2002. Welche Sämaschine? Profi. 8, 60-64.
- Boisgontier D., Barthélémy P. und Lescar L., 1997. Feasibility of minimum tillage practices in France. In: Tebrügge, F. & A. Böhrnsen (editors): Experiences with the application of no-tillage crop production in the West-European countries. Proceedings of the EC-workshop IV, Boigneville, 12-14 May. Wissenschaftlicher Fachverlag Giessen, Giessen, 81-92.
- Briffaux G. und Aubrion G., 1998. Cultures intermédiaires - Les meilleurs pièges à nitrates. Perspectives Agricoles. 239, octobre, 71-75.
- Brunner H., Nievergelt J., Peyer K., Weisskopf P. und Zihlmann U., 2003. Klassifikation der Böden der Schweiz. FAL-Reckenholz, Zürich. 94 S.
- Bundt M., Widmer F., Pesaro M., Zeyer J. und Blaser P., 2001. Preferential flow paths: biological "hot spots" in soils. Soil Biology and Biochemistry. 33 (6), 729-738.
- Bueno J., Hernanz J.L., Alvarez M. und Amiama C., 2002. Seeding opener and fertiliser placement in no-tillage silage corn production. Conference of the EurAgEng. Budapest, Paper 02-PM-031.
- BUWAL 2001. Erläuterungen zur Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo). Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft, Bern. 40 S.
- Casagrande A., 1936. The determination of pre-consolidation load and its practical significance. 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 60-64.
- Chamen W.C.T., Watts C.W., Leede P.R. und Lonstaff D.J., 1991. Assessment of a wide span vehicle (gantry), and soil cereal crop responses to its use in a zero traffic regime. Soil and Tillage Research. 24 (4), 359-380.
- Chan K.Y., Mead J.A. und Roberts W.P., 1987. Poor early growth of wheat under direct drilling. Australian Journal of Agricultural Research. 38, 791-800.

- Chassot A., Stamp P. und Richner W., 2001. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. *Plant and Soil*. 231, 123-135.
- Chervet A., Sturny W.G. und Reinhard H., 1999. Direktsaat von Mais - Erkenntnisse für die Praxis. *UFA-Revue*. 3, 24-27.
- Chervet A., Flückiger H., Kündig C., Maurer-Troxler C., Ramseier L., Schwarz R., Sturny W., Fehlmann A., Roberts L., Rytz I. und Stössel F., 2003a. Bodenbericht 2003. Abteilung Umwelt und Landwirtschaft Kt. Bern, Zollikofen. 51 S.
- Chervet A., Hofer P., Sturny W.G. und Reinhard H., 2003b. Vorteile der Direktsaat überwiegen. *Landwirtschaft ohne Pflug*. 2, 24-27.
- Cheshire M.V., Bedrock C.N., Williams B.L., Chapman S.J., Solntseva I. und Thomsen I., 1999. The immobilization of nitrogen by straw decomposing in soil. *European Journal of Soil Science*. 50 (2), 329-341.
- Christian D.G. und Bacon E.T.G., 1995. Straw incorporation by different tillage systems on heavy clay soils in southern England. In: Experience with the applicability of no-tillage crop production in the West-europe countries - EC Workshop II. Fachverlag Giessen, Giessen. 101-110.
- CTIC 2002: "No-Tillage Report 2002", Conservation Tillage Center, Purdue University.
- Czeratzki W., 1972. Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforschung Völkenrode*. 22 (1), 29-36.
- Dannowski M., 1992. Das Penetrationsvermögen von Wurzeln unterschiedlicher Roggen- und Triticalegenotypen in Abhängigkeit von der Bodenlagerungsdichte. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 168, 169-180.
- Deutsch A., Fastl G., Robier J., 1993. Vergleich von Lysimeterdaten mit monatlich gezogenen N_{min} -Proben im Grossparzellenversuch Wagna. BAL-Bericht über die 3. Lysimetertagung "Lysimeter und ihre Hilfe zur umweltschonenden Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen" vom 20.-21. April 1993. BAL Gumpenstein. 21-34.
- Dick W.A., Roseberg R.J., McCoy E.L., Edwards W.M. und Haghiri F., 1989. Surface hydrologic response of soils to no-tillage. *Soil Science Society of America Journal*. 53, 1520-1526.
- Ehlers W., Goss M.J. und Boone F.R., 1986. Einfluss der Bodenbearbeitung auf Bodenwasserhaushalt, Durchwurzelung und Wasserentzug. *Kali-Briefe (Büntehof)*. 18 (2), 107-125.
- Eidg. Forschungsanstalten FAL, RAC und FAW, 1996. Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 1: Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung (Acker-, Futter-, Obst-, Wein- und Gartenbau).
- Eugster R., 1999. Environmental documentation No. 116 - Atmospheric Deposition of Nitrogen to the Swiss Seeland Region. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 109 S.
- Finck A., 1992. Dünger und Düngung. Zweite Ausgabe. VCH-Verlag. Weinheim. 488 S.

- Forrer I., Papritz A., Kasteel R., Flühler H. und Luca D., 2000. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *European Journal of Soil Science*. 51, 313-322.
- Fortune T., 1997. Direct drilling and reduced cultivation in Ireland. In: Tebrügge F. & Böhrnsen A. (editors): Experiences with the application of no-tillage crop production in the West-European countries. Proceedings of the EC-workshop IV, Boigneville, 12-14 May. Wissenschaftlicher Fachverlag Giessen, Giessen. 33-38.
- Fossati D., 2003. Schriftliche Mitteilung vom 25.09.03, RAC-Changins, CH-Nyon.
- Frede H.G., Beisecker R., Lütkemöller D. und Gäth S., 1994. Auswirkungen langfristig differenzierter Bodenbearbeitung auf die Porenraumstruktur und den Wasser- und Stofftransport eines Löss- und eines Sandbodens. In: Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf den Boden. F. Tebrügge und M. Dreier (Hrsg.), Wissenschaftlicher Fachverlag Giessen, Giessen. 91-115.
- Frick R., Menzi H. und Katz P., 1996. Ammoniakverluste nach der Hofdüngeranwendung. FAT-Berichte. 486. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik FAT, Ettenhausen. 12 S.
- Frye W.W., 1986. Zero tillage research priorities. *Soil and Tillage Research*. 8 (special volume into 10th conference proceedings, part III), 311-316.
- Garibay S., 1996. Maize production in living mulches in a humid temperate climate. Diss. ETH No 11655. ETH Zürich, 120 S.
- Germann P.F., Edwards W.M. und Owens L.B., 1984. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores. *Soil Science Society of America Journal*. 48, 237-244.
- Goss M.J., Howse K.R., Lane P.W., Christian D.G. und Harris G.L., 1993. Losses of nitrate-nitrogen in water draining from under autumn-sown crops established by direct drilling or mouldboard ploughing. *Journal of Soil Science*. 44, 35-48.
- Harrach T. und Richter U., 1992. Wirkung von Bodenbearbeitungsverfahren auf den Stickstoffhaushalt im System Boden-Pflanze. In: Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12.-13. Mai 1992 in Giessen, Friebe B. (Hrsg.), Wissenschaftlicher Fachverlag, Giessen, 81-96.
- Harrach T. und Richter U., 1994. Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf die Durchwurzelbarkeit des Bodens und die Stickstoffverlagerung mit dem Sickerwasser. In: Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden, F. Tebrügge und M. Dreier (Hrsg.), Wissenschaftlicher Fachverlag Giessen, Giessen, 129-176.
- Hausheer J., Rogger C., Freyer B., Hilfiker J., Keller L., Lehmann H.J., Magnollay F., Pericin C., Roux O., Schüpbach H. und Schwab P., 1998. Ökologische und produktionstechnische Entwicklung landwirtschaftlicher Pilotbetriebe 1991 bis 1996. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik FAT, Ettenhausen. 170 S.

- Hofmann B., 1994. Qualitätsgerechte Stoppelbearbeitung. Zuckerrübe. 43 (4), 236-238.
- Hoffman R., 1995. The quest for the best tillage system. Farm Journal, November, 4-5.
- Hoffman R., 1996. Still searching for just enough tillage. Farm Journal, mid January, 4.
- Hoffman R., 1998. The trouble with no-till corn. Farm Journal, February, 20-21.
- Hoffmann C. und Koch H.-J., 1998. Einfluss reduzierter Bodenbearbeitung auf Ertrag und N-Aufnahme von Weizen und Gerste bei unterschiedlicher N-Düngung. Pflanzenbauwissenschaften. 2, 69-75.
- Hort R., Gupta S. und Häni H., 1998. Methodenbuch für Boden-, Wasser- und Lysimeterwasseruntersuchungen. Schriftenreihe der FAL (27), FAL - Reckenholz, Zürich. 228 S.
- Hyais B. 1997. Farm of Mr Bruno Hyais - Practicing minimized cultivation since 1987. In: Experience with the applicability of no-tillage crop production in the West-European countries. Proceedings of the EC-Workshop IV, Boigneville, 12 - 14 May. 179-181.
- Iqbal M., Marley S.J., Erbach D.C. und Kaspar T.C., 1998. An evaluation of seed furrow smearing. Transactions of the ASAE. 41 (5), 1243-1248.
- Kanton Bern, 1997. Verordnung über die Erhaltung der Lebensgrundlagen und der Kulturlandschaft (LKV) 05.11.97.
- Kanwar S.R., Stoltenberg D.E., Pfeiffer R., Karlen D.L., Colvin T.S. und Simpkins W.W., 1993. Transport of nitrate and pesticides to shallow groundwater system as affected by tillage and crop rotation practices. Proceedings of the national conference on agricultural research to protect water quality; 21-24 Feb. Minneapolis (MN), USA, 270-273.
- Karlen D.L., 2000. Mündliche Mitteilung. National Soil Tilth Laboratory, Ames, IOWA, USA
- Karutani U., van Es H.M. und Schindelbeck R.R., 2000. Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to-maize conversion on a clay loam soil in New York. Soil and Tillage Research. 55 (1-2), 31-42.
- Kirby J.M., Pierret A., Moran C.J. und Pankhurst C.E., 2000. Imaging of soil structure - root interaction. Agricultural Machinery Research and Design Center, University of South Australia, Adelaide.
- Kirkegaard J.A., Munns R., James R.A., Gardner P.A. und Angus J.F., 1995. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping. 2. Soil biological factors limiting growth under direct drilling. Australian Journal of Agricultural Research. 46. 75-88.
- Kladivko E.J., Van Scoyoc G.E., Monke E.J., Oates K.M. und Pask W., 1991. Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana. Journal of Environmental Quality. 20, 264-270.
- Knappe S. und Russow R., 1998. Multitracer Untersuchungen zur Bestimmung der Sickerwasser- und Anionenbewegung in monolithischen Lysimetern mit unterschiedlichen Bodenformen. Bulletin der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz. 22, 17-24.

- Kohl R. und Harrach T., 1991. Zeitliche und räumliche Variabilität der Nitratkonzentration in der Bodenlösung in einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung. 32, 80-87.
- Köller K. und Linke C., 1997. Direktsaat. Merkblatt Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft. 301, 16 S.
- Kornmann M., 1998. Direktsaat von Mais - technische Lösungen und praktische Erfahrungen. Proceedings der Tagung "Landtechnik 1998" der VDI-MEG in Garching. VDI-Verlag, Düsseldorf, 127-132.
- Kranz W.L., Kanwar R.S., Pederson C.E., 1998. Collection and monitoring of one-meter cubic soil monoliths for leaching studies. Transactions of the ASAE. 41 (2), 333-344.
- Krebs H., Dubois D., Külling C., Forrer H.-R., Streit B., Rieger S. und Richner W., 2000. Fusarien und Toxinbelastung des Weizens bei Direktsaat. Agrarforschung 7, 264-268.
- Kreuz E., 1977. Neue Ergebnisse zur Ernährung und zum Wasserhaushalt des Maises - Übersichtsbeitrag. Archiv Acker- und Pflanzenbau, Bodenkunde. 21 (4), 327-344.
- Kromer K.H. und Thelen M., 1995. Mulchanbauverfahren bei Zuckerrüben. Landtechnik. 50 (3), 150-159.
- Kung K.-J., Steenhuis T.S., Klavivko E.J., Gish T.J., Bubenzer G. und Helling C.S., 2000. Impact of preferential flow on the transport of adsorbing and non-adsorbing tracers. Soil Science Society of America Journal. 64, 1290-1296.
- Lajoux P., Moullart J., Hébrard J.P., Boillet P. und Couture D., 1998. Semoirs rapides - Gros plan sur huit modèles. Perspectives agricoles. 238 (septembre), 76-80.
- Lajoux P. 2002. mündliche Mitteilung, ITCF-Boigneville (F).
- Lal R., 1996. Axle load and tillage effects on crop yields on a mollic ochraqualf in Northwest Ohio. Soil and Tillage Research. 37 (2-3), 143-160.
- Lancashire P.D., Bleiholder H., Langelüdecke P., Strauss R., Van den Boom T., Weber E., Witzemberger A., 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. Annals of Applied Biology. 119, 561-601.
- LBL, SRVA und FiBL, 2002. Deckungsbeiträge Ausgabe 2002. Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau, Lindau. 60 S.
- Lickfett T., 1994. Zuviel Nitrat nach Raps - was tun? DLG-Mitteilungen. 8, 32-33.
- Linden D.R., Clapp C.E. und Dowdy R.H., 2000. Long-term corn grain and stover yields as a function of tillage and residue removal in East Central Minnesota. Soil and Tillage Research. 56 (3-4), 167-174.
- Linke C., 1994. John Deere Direktsaatmaschine: Stroh und Nässe machen ihr zu schaffen. Top Agrar. 4, 103-106.

Linke C., 1998. Direktsaat - eine Bestandesaufnahme unter besonderer Berücksichtigung technischer, agronomischer und ökonomischer Aspekte. Dissertation, Universität Hohenheim (D), 482 S.

Maillard A., Vullioud P., Sturny W.G. und Mühlebach J., 1990. Mulchsaat von Zuckerrüben in abgefrorene Gründüngungsbestände; Schwierigkeiten dieser Bestelltechnik und Lösungsvorschläge - Betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte. *Landwirtschaft Schweiz*. 3 (1-2), 5-10.

Maillard A. und Vez A., 1993. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins – 1. Rendement des cultures, maladies et ravageurs. *Revue suisse d'agriculture*. 25 (6), 327-336.

Maillard A., Vez A. und Ryser J. P., 1994. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins – 2. Propriétés chimiques du sol. *Revue suisse d'agriculture*. 26 (3), 133-139.

Maillard A., Neyroud J.-A. und Vez A., 1995. Résultats d'un essai de culture sans labour depuis plus de 20 ans à Changins – 3. Propriétés physiques du sol. *Revue suisse d'agriculture*. 27 (1), 5-10.

Manuel P. 2000. Mündliche Mitteilung, Wagin, Western Australia.

Massé J., Boisgontier D., Bodet J.M. und Gillet J.P., 1994. Feasibility of minimum tillage practices for annual cropping systems in France. In: *Conservation tillage in temperate agroecosystems: development and adaptation to soil, climatic, and biological constraints*, M.R. Carter (Hrsg.), Lewis Publisher, Boca Raton (Florida). 168-179.

Mehdi B.B., Madramootoo C.A. und Mehuys G.R., 1999. Yield and nitrogen content of corn under different tillage practices. *Agronomy Journal*. 91 (july-august), 631-636.

Meier U., 2001. Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen - BBCH Monografie. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin. 165 S.

Menzi M. und Andres M., 2003. Von der Branchenorganisation empfohlene Getreidesorten für die Ernte 2004. *Agrarforschung*. 10 (7), 3-8

Moller Hansen E. und Djurhuus, J., 1997. Yield and N uptake as affected by soil tillage and catch crop. *Soil and Tillage Research*. 42 (4), 241-252.

Morrison J.E. und Sanabria J., 2002. One-pass and two-pass spring strip tillage for conservation row-cropping in adhesive clay soils. *Transactions of the ASAE*. 45 (5), 1263-1270.

Mummey D.L., Smith J.L. und Bluhm G., 1998. Assessment of alternative soil management practices on N₂O emissions from US agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 70 (1), 79-87.

Murer E., 1995. Wassergüteerfassungssysteme in der ungesättigten Bodenzone - Ergebnisbericht aus dem Grundwassersanierungs-Pilotprojekt "Obere Pettenbachrinne", OÖ, In: "Gewässerverträgliche Landbewirtschaftung", Oesterreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 160-173.

- Murer E., 1997. Nitrataustrag im Grundwasser-Sanierungsprojekt "Obere Pettenbachrinne, OÖ". In: 7. Gumpensteiner Lysimetertagung "Lysimeter und nachhaltige Landnutzung", Gumpenstein (A), 7.-9. April. 121-124.
- Murer E., 1998. Erfassung und Bewertung der Sickerwasserquantität und -qualität im Grundwassersanierungs-Pilotprojekt "Obere Pettenbachrinne" (Oberösterreich). Bulletin der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz. 22, 5-10.
- Neyroud J.-A. und Chauvin B., 2000. Mesure de N_{min} pour la gestion de la fumure azotée et l'appréciation du risque de perte par lixiviation au niveau parcellaire. Revue suisse d'agriculture. 32 (4), 153-158.
- Nievergelt J. und Weisskopf P., 1993. Bestimmung des mineralischen Stickstoff-Gehaltes von Böden; Charakterisierung von drei Beprobungsmethoden. Bulletin der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz. 17, 57-60.
- Nievergelt J., 1997. Lysimeterversuch 1981 bis 1996: N-Auswaschung in Fruchtfolgen. Agrarforschung. 4 (5), 209-212.
- Nievergelt J., 2002. Nitrat und Fruchtfolgen 20 Jahre beobachtet. Agrarforschung. 9 (1), 28-33.
- Nyborg M., Solberg E.D., Izzauralde R.C., Malhi S.S. und Molina-Ayala M., 1995. Influence of long-term tillage, straw and fertilizer on barley yield, plant-N uptake and soil-N balance. Soil and Tillage Research. 36 (3-4), 165-174.
- Oberholzer H.-R. und Rek J., 2001. Stickstoffmineralisation des Bodens unter Freilandbedingungen. FAL-Tagung "Neue Erkenntnisse zu N-Flüssen im Ackerbau", Zürich-Reckenholz, 6. April.
- Oberholzer H.R. und Walther U., 2001. Modell zur Abschätzung des Nitratauswaschungspotenzials. FAL-Tagung "Neue Erkenntnisse zu N-Flüssen im Ackerbau", 6. April.
- Oberholzer B., Poser K., Dill A. und Herzog F., 2001. Kann die Nitratauswaschung zuverlässig simuliert werden? FAL-Tagung "Neue Erkenntnisse zu N-Flüssen im Ackerbau", 6. April.
- Parkin T.B. und Berry E.C., 1999. Microbial nitrogen transformations in earthworm burrows. Soil Biology and Biochemistry. 31 (13), 1765-1771.
- Patni N.K., Masse L., Jui P.Y., 1998. Water quality - groundwater quality under conventional and no-tillage 1. Nitrate, electrical conductivity, and pH. Journal of Environmental Quality. 47, 869-877.
- Petersen C.T., Jensen H.E., Hansen S. und Bender Koch C., 2001. Susceptibility of a sandy loam soil to preferential flow as affected by tillage. Soil and Tillage Research. 58 (1-2), 81-89.
- Prior S.A., Reicosky D.C., Reeves D.V., Runion G.B. und Raper R.L., 2000. Residue and tillage effects on planting implement-induced short-term CO_2 and water loss from a loamy sand soil in Alabama. Soil and Tillage Research. 54 (3-4), 197-199.
- Randall G.W. und Iragavarapu T.K., 1995. Impact of long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. Journal of Environmental Quality. 24, 360-366.

- Rasmussen K.J., 1995. Straw management in various tillage systems in Denmark. In: Experience with the applicability of no-tillage crop production in the west-europe countries - EC Workshop II, Fachverlag Giessen, 111-121.
- Rieger S.B., 2001. Impacts of tillage systems and crop rotation on crop development, yield and nitrogen efficiency. Diss. ETH Nr. 14124. 138 S.
- Rösli F., 2000. Früher etwas mehr. UFA-Revue. 4, 32-34.
- Roth H.R., 1999. Varianzanalyse Ila - Nachdiplomkurs in angewandter Statistik, ETH-Zürich, Seminar für Statistik. 46 S.
- Rüegg W., 1994. Verfügbarkeit von Stickstoff für Silomais bei Mulchsaat in abgestorbene Zwischenfruchtbestände. Diss. ETH Zürich Nr. 10708. 150 S.
- Ryser J.P., 2001. Drainage des nitrates en fonction du type de sol, de la forme d'engrais et de la culture. FAL-Tagung "Neue Erkenntnisse zu N-Flüssen im Ackerbau", 6. April. 9 S.
- Ryser J.P. und Pittet J.P., 2000. Influence du sol et de la fumure sur les cultures et le drainage des éléments fertilisants. Revue suisse d'agriculture. 32 (4), 159-164.
- Ryser J.P. und Pittet J.P., 2002. Effets de la texture du sol et de la fumure azotée sur la lixiviation de l'azote. Revue suisse d'agriculture. 34 (5), 217-220.
- Salinas-Garcia J.R., Hons F.M., Matocha J.E. und Zuberer D.A., 1997. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by long-term tillage and nitrogen fertilization. *Biology and Fertility of Soils*. 25, 182-188.
- Sartori L. und Peruzzi A., 1997. The evolution of no-tillage in Italy. A review of the scientific literature. In: Terbrügge, F. & A. Böhrnsen (ed.): Experiences with the application of no-tillage crop production in the West-European countries. Proceedings of the EC-workshop IV, Boigneville, 12-14 May. Wissenschaftlicher Fachverlag Giessen, Giessen, 119-129.
- Scheffer F. und Schachtschabel P., 1984. Lehrbuch der Bodenkunde. Enke, Stuttgart. 442 S.
- Schläfli A., 1999. Geologie des Kantons Thurgau. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft. Bd. 55. Thurgauische Naturforschende Gesellschaft, Frauenfeld. 102 S.
- Schmidhalter U., Strasser R., Oertli J. und Hengeler S., 1992. Zeitliche und räumliche Variabilität von Mineralstickstoff im Boden. *Landwirtschaft Schweiz*. 5 (7), 354-362.
- Schmied B., Kohler A., Schulin R. und Fritsch M., 2000. Nitrataustrag aus einem dränierten, humusreichen und landwirtschaftlich genutzten Boden. Institut für terrestrische Ökologie, Zürich. 113 S.
- Seiler K.-P., von Loewenstern S. und Schneider S., 2002. Matrix and bypass-flow in quaternary and tertiary sediments of agricultural areas in south Germany. *Geoderma*. 105 (3-4), 299-306.
- Shipitalo M.J., Dick W.A. und Edwards W.M., 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research*. 53 (3-4), 167-183.

Simpfendorfer S., Kirkegaard J.A. und Heenan D.P., 1998. Soil biological factors limit the early growth of direct-drilled wheat. Proceedings of the 9th Australian Agronomy Conference, Wagga Wagga. 3 S.

Stadelmann F.X., 2003. Stickstoff in der Landwirtschaft und Umwelt: Probleme, Lösungswege und Perspektiven im internationalen, nationalen und lokalen Umfeld. Schriftenreihe der FAL. 43, 7-14.

Smith D. und Fink C., 1996. Strip-tillage warms no-till seedbeds. Farm Journal. November, 33.

Stamp P. und Struik P.C., 1985. Silomaisproduktion in klimatischen Grenzlagen - I. Anbauentwicklung und Klima. Kali-Briefe (Büntehof). 17 (10), 757-765.

Stauffer W., Siegenthaler A., Stauffer B., Fankhauser O. und Stadelmann F.X., 1991. Versuche mit umweltfreundlichen Maisanbaumethoden: Einfluss auf den Ertrag, den Nitratgehalt, die Struktur und die Regenwurmpopulation des Bodens. Landwirtschaftliches Jahrbuch der Schweiz. 105, 305-333.

Stauffer W. und Spiess E., 2001. Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen auf die Nitratauswaschung. Agrarforschung. 8 (8), 324-329.

Stemmer M., Von Lützwow M., Kandeler E., Pichlmayer F. und Gerzabek M.H., 1999. The effect of maize straw placement on mineralization of C and N in soil particle size fractions. European Journal of Soil Science. 50 (1), 73-85.

Stenberg M., Aronsson H., Linden B., Rydberg T. und Gustafson A., 1999. Soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses in soil tillage systems combined with a catch crop. Soil and Tillage Research. 50 (2), 115-125.

Struik P.C. und Stamp P., 1985. Silomaisproduktion in klimatischen Grenzlagen - II. Einfluss der Witterung auf Entwicklung, Wachstum und Qualität zu unterschiedlichen Entwicklungsphasen. Kali-Briefe (Büntehof). 17 (10), 767-783.

Surny W.G. und Schwarz R., 1995. Mit neuer Technik mehr Bodenschutz. Landfreund. 27, 20-21.

Swiss No-till, 2003. Übersicht der Flächenbeiträge für Direktsaaten der Kantone Aargau, Bern, Luzern und Solothurn. http://www.no-till.ch/Diverses/index_Diverses.htm.

Tan C.S., Drury C.F., Sultani M., van Wesenbeeck I.J., Ng H.Y.F., Gaynor J.D. und Welacky T.W., 1998. Effect of controlled drainage and tillage on soil structure and tile drainage nitrate loss at the field scale. Water Science and Technology. 38 (4-5), 103-110.

Tebrügge F., 2002. Verminderte Nitratauswaschung. UFA-Revue. 9, 42-43.

Tebrügge F. und Abelsova J., 1999. Bioporen fördern die Versickerung. Landtechnik. 53 (1), 13-15.

Tebrügge F. und Böhrnsen A., 1997a. Crop yields and economic aspects of no-tillage compared to plough tillage: results of long-term soil tillage field experiments in Germany. In Tebrügge F. & Böhrnsen A. (editors): Experiences with the application of no-tillage crop production in the

West-European countries. Proceedings of the EC-workshop IV, Boigneville, 12-14 May. Wissenschaftlicher Fachverlag, Giessen. 25-43.

Tebrügge F. und Böhrnsen A., 1997b. Farmers' experiences with no-tillage crop production. In: Experiences with the application of no-tillage crop production in the West-European countries. Proceedings of the EC-workshop IV, Boigneville, 12-14 May. Wissenschaftlicher Fachverlag, Giessen. 55-102.

Tullberg J, Yule D.F. und McGarry D., 2003. "On track" to sustainable cropping systems in Australia. Proceedings of the 16th ISTRO conference, 13.-18. July, Brisbane, Australia. 1271-1285.

Veiz A., 1977. Dix ans d'experience de cultures sans labour. Revue suisse d'agriculture. 9 (2), 59-70.

Voss M.C., Ulr B. und Hoppe H.-H., 1998. Einfluss von reduzierter Bodenbearbeitung und Direktsaat auf die Aktivitätsdichte und die Abundanz von Ackerschnecken (Mollusca, Gastropoda) in Winteraps unter Berücksichtigung einer Schneckenbekämpfung mit Metaldehyd. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. 357, 372-373.

Vosshenrich H.H., 1998. Strohwirkungen. Landtechnik. 53 (4), 238-239.

Vullioud P.A., 2000. 30 years ploughless tillage experiment at Changins (Switzerland). Proceedings of the 15th Conference of the International Soil and Tillage Research Organisation, 2-7 July 2000, Fort Worth, Texas, USA.

Walther U. und Jäggli F., 1992. Stickstoffdüngung von Mais: N_{min} -Gehalte des Bodens vor, während und nach dem Anbau. Landwirtschaft Schweiz. 5 (3), 79-85.

Walther U. 1994., Stickstoffdüngung im Getreidebau. Die Grüne. 6, 20-22.

Walther U., 1995a. Stickstoffdüngung zu Mais - zur Saat oder später? Agrarforschung. 2 (4), 129-133.

Walther U., 1995b. Stickstoffentzug und N-Ausnutzung einiger Kulturen. Agrarforschung. 2 (11-12), 508-511.

Walther U., 1995c. Stickstoffdüngung und Ertrag von Mais. Agrarforschung. 2 (7), 269-272.

Walther U., 1996. N-Düngung im Ackerbau ist unabhängig vom Ertragsniveau. UFA-Revue. 3, 18-20.

Walther U., 1998. Beim Güllen entscheiden Menge, Gehalt und Wetter über N-Wirkung. Agrarforschung. 5 (2), 77-80.

Walther U., 2001. Stickstoffeffizienz von Hofdünger bei IP und Bio. FAL-Tagung "Neue Erkenntnisse zu Stickstoffflüssen im Ackerbau", 6. April, Zürich. 9 S.

Walther U. und Nievergelt J., 2001. Nitratauswaschung bei mineralischer und organischer Düngung. FAL-Tagung "Neue Erkenntnisse zu N-Flüssen im Ackerbau", 6. April, Zürich. 9 S.

- Walther U., Vuilloud P. und Collaud J.F., 2001. Stickstoffwirkung von Hofdüngern zu Mais. 4-7. In: FAL-Tagung "Maisanbau wohin", 28. Februar, Zürich. 30 S.
- Walther U., Ryser J.P. und Flisch R., 2001b. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. 2001. Agrarforschung. 8.(6), 1-80.
- Watts C.W., Eich S. und Dexter A.R., 2000. Effects of mechanical energy inputs on soil respiration at the aggregate and field scales. Soil and Tillage Research. 53 (3-4), 231-243.
- Weber R., 2002. Schriftliche Mitteilung, BUWAL, Bern.
- Weed J. und Kanwar R.S., 1996. Nitrate and water present in and flowing from root zone soil. Journal of Environmental Quality. 25, 709-719.
- Weisskopf P., Oberholzer H.-R und Zihlmann U., 1992. Erfassung des Ammonium- und Nitratgehaltes in der Bodenlösung mit Hilfe von Saugkerzen. Landwirtschaft Schweiz. 5 (3), 117-121.
- Weisskopf P., Zihlmann U. und Walther U., 2001. Einfluss der Bewirtschaftung auf die Stickstoffdynamik im Bodenwasser. Agrarforschung. 8 (9), 348-353.
- Weisskopf P., 2002. Schriftliche Mitteilung, FAL-Reckenholz, Zürich.
- Weisskopf P., Oberholzer H.J., Rek J. und Anken T., 2003. Dynamics of soil structure during vegetation periods depending on soil tillage and drilling system. Proceedings of the 16th ISTRO conference, 13.-18. July, Brisbane, Australia.
- WERU 1997. Wind Erosion: An international symposium – Slide show of the history of the wind erosion research unit. Wind Erosion Research Unit, Kansas University, 3 – 5 Juni, CD-ROM.
- Wiermann C. und Horn R., 1996. Auswirkungen reduzierter Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge. Getreide. 2 (3), 11-13.
- Wilkens K., 1992. Kennzeichnung des Makroporensystems des Bodens bei abnehmender Bearbeitungsintensität (P, FR, D) mittels digitaler Bildanalyse. In: Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12.- 13 Mai, Friebe B. (Hrsg), Wissenschaftlicher Fachverlag, Giessen. 43-49.
- Yule D., 2000. Controlled Traffic Farming – Technology for Sustainability. Proceedings of the 15th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, 2-7 July, Fort Worth, Texas, USA.
- Yule D., 2003. Persönliche Mitteilung. Yule Consultings, Taringa, Queensland, Australia.
- Zihlmann U., 1999. Mündliche Mitteilung, FAL-Reckenholz, Zürich.
- Zihlmann U. und Weisskopf P., 2001. Stickstoffgehalte im Bodenwasser in Abhängigkeit vom Anbausystem. FAL-Tagung "Neue Erkenntnisse zu N-Flüssen im Ackerbau", 6.April. Zürich-Reckenholz.
- Zihlmann U., Weisskopf P., Bohren C. und Dubois D., 2002. Stickstoffdynamik im Boden beim Maisanbau. Agrarforschung 9 (9), 392-397.

10. Anhang

Anhang 1. Phosphor und Kaligehalte der Parzellen bei Versuchsbeginn 1999

Eigenschaft	Tiefe 0-20 cm	Tiefe 30-50 cm
P [mg/100 g Boden]	0,61	0,15
K [mg/100 g Boden]	2,7	2,0
Mg [mg/100 g Boden]	15,1	14,3

Anhang 2. Wirkstoffe und Zeitpunkt der Pflanzenschutzmassnahmen

Jahr	1999	2000	2000	2001
Herbizid	06.05.99 1,2 kg Atrazin 3 l Glyphos.	24.09.99 5 l/ha Glyphos (nur DS)	14.08.00 4 l Glyphosat (nur DS)	27.04.01 3 l/ha Glyphosat (nur DS) 29.05.01 Atrazin 1.2 kg Sulcotrione 1,5 l/ha
Schneckenkorn				10.05.01 7 kg Schnecken- korn Steiner bei DS
Insektizid	-	-	-	-
Fungizid	-	02.06.00 Opus top 1,5 l/ha	-	-

Anhang 3. Analysenresultate der einzelnen Gülleproben

	10.06. 1999	30.06. 1999	10.03. 2000	04.04. 2000	02.05. 2000	08.06. 2001	29.06. 2001
NH ₄ -N [g/l]	0,99	0,8	0,58	0,62	0,67	1,11	1,12
TM [g/l]	39,8	36,7	38,0	37,7	38,3	46,0	43,4
Asche [g/l]	8,2	9,2	9,4	8,8	9,7	11,6	12,2
org Subst. [g/l]	31,6	27,5	28,6	29,1	28,6	34,3	31,1
gesamt N [g/l]	1,73	1,62	1,35	1,49	1,49	2,17	2,16
P [g/l]	0,34	0,31	0,33	0,37	0,36	0,38	0,38
K [g/l]	2,61	2,54	1,84	2,01	2,11	2,97	2,91
Ca [g/l]	0,66	0,66	0,61	0,66	0,69	0,84	0,82
Mg [g/l]	0,296	0,275	0,27	0,28	0,31	0,39	0,38
Na [g/l]	0,173	0,122	0,17	0,18	0,17	0,14	0,13

Merci

Ich möchte ganz besonders unserem Direktor Prof. Dr. Walter Meier und meinem Doktorvater Prof. Dr. Peter Stamp für die Ermöglichung dieser Arbeit danken. Es war ein spannendes Abenteuer, das mit Dr. Peter Weisskopf und Jakob Nievergelt von Agroscope FAL Reckenholz begann. Mit Ihnen erörterten wir die Möglichkeiten die Nitratauswaschungen messen zu können. Bei Erwin Murer, Petzenkirchen (A) fanden wir einen Prototypen der Lysimeter, wie wir sie schliesslich realisierten. Beim Bau der Anlage durften wir auf die tatkräftige Unterstützung der Leute von Bruno Singer vom AMP Frauenfeld zählen, die mit Bagger und viel Know-How tatkräftig mitwirkten. Werner Jäggi plante und realisierte einen Grossteil Wassersammelgeräte. Ernst Brack, Hansruedi Bosshard und ihre Leute halfen mit bei der Probenahme und analysierten unzählige Boden- und Wasserproben. Dr. Jan Rek und Rudolf Hanic steuerten mit ihren Bodenluftmessungen wertvolle zusätzliche Erkenntnisse bei.

Bei der Durchführung der Feldarbeiten und Erhebungen arbeiteten Jakob Heusser, Isidor Schiess, August Sidler, Christian Schenk und Marc Wymann tatkräftig mit. Meinen Vorgesetzten August Ott, Ueli Wolfensberger und Robert Kaufmann danke ich für das Verständnis und den Freiraum, den sie mir für diese Arbeit gewährt haben.

Schliesslich möchte ich Dr. Walter Richner und Dr. Ulrich Walther für Ihre Mitarbeit im Projektteam und vor allem für die intensive Arbeit bei der Redigierung des Manuskriptes danken.

Es war toll mit Euch allen zusammenzuarbeiten! Ganz herzlichen Dank!

Frühere Nummern der FAT-Schriftenreihe

Jahr	Nr.	Verfasser	Titel
1995	39	Schick M.	Arbeitswirtschaftliche Einordnung zeitgemässer Haltungssysteme für Mastkälber.
1996	41	Meier B.	Vergleich landwirtschaftlicher Buchhaltungsdaten der Schweiz und der EU - Methodische Grundlagen.
1996	42	Rossier R.	Arbeitszeitaufwand im bäuerlichen Haushalt.
1997	44	Zimmermann A. et al.	Ammoniak: Kosten der Emissionsminderung.
1997	45	Weber R. (Redaktion)	Tiergerechte Haltungssysteme für landwirtschaftliche Nutztiere.
1997	46	Gaillard G. et al.	Umweltinventar der landwirtschaftlichen Inputs im Pflanzenbau.
1998	47	Kaufmann R. (Red.)	Elektronik in der Landtechnik:
1998	48	Van Caenegem L. et al.	Erdwärmetauscher für Mastschweine.
1998	49	Deininger E.	Beeinflussung der aggressiven Auseinandersetzungen beim Gruppieren von abgesetzten Sauen.
1999	50	Mayer C.	Stallklimatische, ethologische und klinische Untersuchungen zur Tiergerechtheit unterschiedlicher Haltungssysteme in der Schweinemast.
2000	51	Van Caenegem L. und Wechsler B.	Stallklimawerte und ihre Berechnung.
2000	52	Heinzer L. et al.	Ökologische und ökonomische Bewertung von Bioenergieträgern.
2001	53	Kircher A.	Untersuchungen zum Tier-Fressplatz-Verhältnis bei der Fütterung von Aufzuchtferkeln und Mastschweinen an Rohrbreiautomaten unter dem Aspekt der Tiergerechtheit.
2002	54	Kaufmann R., Hütl G. (Redaktion)	Landtechnik im Alpenraum. 6. Tagung 15./16.5.2002 in Feldkirch
2002	55	Schnider R.	Gesundheit von Mastschweinen in unterschiedlichen Haltungssystemen.
2003	56	Hilty R. und Herzog D.	Wie teuer sind Milchviehställe wirklich?
2003	57	Ferjani A.	Équilibre sectoriel, équilibre général: Modelisation de l'impact de la libéralisation sur l'agriculture et l'économie tunisiennes (nur französisch).
2003	58	Loretz C.	Verhalten von behornten und hornlosen Ziegen im Laufstall am Fressplatz und im Liegebereich.
2004	59	Kaufmann R. (Redaktion)	Elektronik in der Landtechnik.
2004	60	Gysi M. (Redaktion)	Landwirtschaftliche Forschung auf der Faktorseite.
2004	61	Rossier R.	Familienkonzepte und Betriebliche Entwicklungsoptionen

Schriftenreihe von Agroscope FAT Tänikon,
der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik
CH-8356 Ettenhausen

Gemäss Erhebungen des Bundesamtes für Landwirtschaft weist das Trinkwasser aus Fassungen von 350 schweizerischen Gemeinden zu hohe Nitratwerte auf. In vielen Fällen ist die ackerbauliche Nutzung der Böden für diese Probleme mitverantwortlich. Es stellt sich die Frage, ob sich die Nitratauswaschung durch den Verzicht auf Bodenbearbeitung mittels Einsatzes der Direktsaat im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug reduzieren liesse.

Das Ziel dieser Studie war es, den Einfluss der beiden Bestellverfahren Pflug und Direktsaat auf die Stickstoffdynamik im Boden sowie die Nitratauswaschung ins Grundwasser zu quantifizieren. Zusätzlich zu den beiden Bestellverfahren wurde der Einfluss der Stickstoffdüngung (mineralisch, Rindervollgülle, keine N-Düngung) auf verschiedene pflanzenbauliche Parameter gemessen. Boden- (N_{\min}) und Bodenwasserproben (Saugkerzen) dienten für die Ermittlung des mineralischen Stickstoffs im Boden. Für die Messung der Nitratauswaschung in situ bei den Verfahren Direktsaat und Pflug mit mineralischer Düngung wurde eine Anlage mit monolithischen Feldlysimetern erstellt.

Die Messungen zeigten, dass die Bodenbearbeitung auf dem gewählten Standort mit 22 % Ton und 34 % Schluff keinen eindeutigen Einfluss auf die Nitratauswaschung hatte. Freies, im Boden gespeichertes Nitrat wurde bei beiden Bestellverfahren über Winter ausgewaschen.