

# Mischungseffekte in Getreide-Körnerleguminosen-Beständen auf die N-Rückstände in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis

E. Kübler, W. Aufhammer und H.-P. Piepho

## Mixing effects in cereal-grain legume stands on the N-residues in dependence of the mixing ratio

### 1 Einleitung und Problemstellung

Diverse Untersuchungen zeigen, dass Getreide-Körnerleguminosen-Mischbestände Aufwuchsbedingungen ohne oder mit geringer Dünge- und Pflanzenschutzmittelzufuhr besser zur Trockenmasseproduktion nutzen können als die relevanten Reinbestände. Mit unterschiedlicher Gewichtung sind daran eine geringere Ausbreitung von Schadfaktoren, Verschiebungen der Artenanteile im Entwicklungsverlauf der Bestände, artenspezifische Harvestindices und Kompensa-

tionseffekte zwischen den Mischungskomponenten beteiligt (DEWIT, 1960; DEWIT und VAN DEN BERGH, 1965; AUFHAMMER, 1999; AUFHAMMER et al., 2004, 2005a, b; HOF und RAUBER, 2003; KÜBLER et al., 2006, 2008, 2010). Getreidearten weisen insbesondere unter Low-Input-Bedingungen geringere N-Gehalte in der Sprossmasse auf als Leguminosen. Jedoch sind Mischbestände aus Getreide- und Leguminosenkomponenten im Einzelfall in der Lage, das N-Akkumulationsniveau von Leguminosenreinbeständen (JENSEN, 1996; KÜBLER et al., 2010) zu erreichen. Dazu tra-

### Summary

Effects of the mixing ratios in stands combining cereal (wheat, oats) with legume (lentil, pea) components on the N-harvest indices, on the  $N_{\min}$  residues in the soil and on the N residues in the above ground dry matter residues after grain harvest were investigated. In a two years field experiment stands with different legume proportions in substitution and addition series were established. Independently of the mixing ratios, mixed stands revealed N-harvest indices similar to those of pure cereal stands. But the mixing ratios affected the N-harvest indices of the components and therefore the contributions of the components to the indices of the mixed stands. Concerning the  $N_{\min}$  residues in the soil and the N residues in the above ground dry matter, pure legume stands exceeded pure cereal stands considerably. In mixed stands cereal components were able to compensate the  $N_{\min}$  residues of the legume components.

**Key words:** Cereal-grain legume mixed stands, N-harvest index, N residues.

### Zusammenfassung

Unter Low-Input-Bedingungen wurden in zweijährigen Feldversuchen die Effekte des Mischungsverhältnisses in Beständen aus einer Getreidekomponente (Weizen, Hafer) und einer Leguminosenkomponente (Linse, Erbse) auf den N-Harvestindex, die  $N_{\min}$ -Rückstände im Boden und die N-Rückstände in den Ernteresten der Sprossmassen untersucht. Mischbestände aus Getreide- und Körnerleguminosenkomponenten wiesen weitgehend unabhängig vom Mischungsverhältnis mit Getreidereinbeständen vergleichbare N-Harvestindices auf. Unterschiedliche Mischungsverhältnisse veränderten aber die Indices und damit die Beiträge der beteiligten Komponenten. Hinsichtlich der N-Rückstände im Boden und in den Ernteresten übertrafen Leguminosenreinbestände die Getreidereinbestände deutlich. In Mischbeständen konnten die Getreideanteile den Einfluss von bis zu 50% Leguminosen auf die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden kompensieren.

**Schlagworte:** Getreide-Körnerleguminosen-Mischbestände, N-Harvestindex, N-Rückstände.

gen veränderte Standräume und ein größeres durchwurzelbares Bodenvolumen je Pflanze (BOLLER und NÖSBERGER, 1988), sowie ein N-Transfer von den Leguminosen zu den Getreidepflanzen als mögliche Elemente bei (HAUGGAARD-NIELSEN et al., 2001; AUFHAMMER et al., 2005b; KÜBLER et al., 2008, 2010). Die Verteilung und die Effekte des aufgenommenen Stickstoffs in den Sprossmassen, gemessen als Harvest- bzw. als N-Harvestindices, bestimmen die erntbaren und die mit den Restsprossmassen auf dem Feld bleibenden Trockenmassen und ihre N-Anteile. Beide Fraktionen, sowohl die erntbare als auch die zurückbleibende, sind ökonomisch wie ökologisch bedeutend. Hinzu kommt die Problematik von nicht mehr aufgenommenem mineralisiertem Stickstoff im Boden nach der Ernte. Die Erfassung der N-Rückstände schließt daher mit dem vorliegenden Beitrag die Untersuchungen zu den Mischungseffekten von Leguminosen-Getreide-Mischbeständen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis (KÜBLER et al., 2006, 2008, 2010) ab. Im Einzelnen sind folgende Hypothesen mit dem erhobenen Datenmaterial zu prüfen:

- Bei steigenden Leguminosenanteilen nimmt in Getreide-Körnerleguminosen-Mischbeständen das N-Angebot für die Getreideanteile mit teilweise positiven Kornertrags- und/oder Qualitätseffekten zu. Diese Effekte sichern die Nutzung des N-Mehrangebots. Über die ansteigenden Leguminosenanteile hinweg bleibt daher der N-Harvestindex der Mischbestände unverändert.
- Trotz der N-Verwertung zur Kornbildung nehmen mit steigenden Leguminosenanteilen die N-Rückstände, die nach der Ernte auf dem Feld verbleiben, zu. Dies gilt sowohl für die  $N_{\min}$ -Rückstände im Boden als auch für die organisch gebundenen N-Mengen in den Restsprossmassen. Andererseits sind zunehmende Getreideanteile in Mischbeständen in der Lage, ein relativ hohes leguminosenbürtiges  $N_{\min}$ -Niveau im Boden bis auf das Niveau von Getreidereinbeständen abzusenken. Damit kann die Gefahr von N-Verlusten durch Verlagerung und Auswaschung reduziert werden.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Versuchsanlage

Auf der Versuchsstation für Pflanzenbau und Pflanzenschutz Ihinger Hof (470–510 m NN; 8,2 °C; 690 mm Niederschlag; schluffreiche Parabraunerden) der Universität Hohenheim wurden 2002 und 2003 Feldversuche (Spalt-

Spalt-Anlage) mit 3 Wiederholungen auf Low-Input-Basis durchgeführt. Die Versuche wurden bereits in mehreren Publikationen (KÜBLER et al., 2006, 2008, 2010) beschrieben, sie werden hier noch einmal kurz umrissen.

Die N-Versorgung (Haupteinheit) umfasste zwei Stufen. In  $N_1$  wurde gänzlich auf eine externe Stickstoffzufuhr in Form von Düngemitteln verzichtet. In  $N_2$  wurde 2002 durch eine Güllegabe vor der Aussaat 50 kg ha<sup>-1</sup> Ammonium-N ausgebracht. 2003 enthielt die Gülle sehr geringe Trockensubstanz- und NH<sub>4</sub>-Gehalte, die erst nach der Ausbringung ermittelt werden konnten. Weil daher 2003 mit derselben Güllemenge wie 2002 nur die Hälfte der vorgesehenen NH<sub>4</sub>-Menge verabfolgt wurde, sollte die Differenz zu 50 kg ha<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>-N durch eine Entec-Gabe zur Saat ausgeglichen werden (Tab. 1).

Die Artenkombinationen stellten die Untereinheiten dar (Tab. 1). Sommerweizen und Nackthafer wurden mit Linsen und Erbsen faktoriell zu Zweikomponenten-Mischbeständen kombiniert. Diese wurden nach dem Substitutions- und dem Additionsprinzip in breiter Anteilsvariation angelegt und den jeweiligen Reinbeständen gegenübergestellt (Unter-Unter-Einheiten, Tab. 1).

In den Substitutionsbeständen wurde – ausgehend von standortüblichen Reinbestandssaatdichten (Tab. 1) – 25, 50 und 75 % der Saatkichte einer Komponente durch die der jeweils anderen Komponente ersetzt. Bei den Additionsbeständen wurden zur Reinbestandssaatkichte der Getreidekomponente 25, 50, 75 und 100% der Leguminosenreinbestandssaatkichte addiert. Die Saat erfolgte mit der Ojord in einer Überfahrt im Getreidereißenabstand (12 cm) ca. 3,5 cm tief. Eine Grunddüngung unterblieb ebenso wie ein Biozideinsatz. Die Unkrautregulierung erfolgte mit dem Striegel.

Aus dem in den Versuchen erhobenen Datenmaterial sind im vorliegenden Beitrag die Daten zu den N-Rückständen relevant. Die N-Gehalte der Ernterückstände wurden an definierten Mengen der Stroh- bzw. Spreu-/Hülstrockenmasse mit dem Elementargerät nach der Verbrennungsmethode Dumas bestimmt (WINKLER et al., 2000; KÜBLER et al., 2010) und mit den entsprechenden Trockenmasseerträgen multipliziert.

Aus der Relation der N-Akkumulation in der Korntrockenmasse und in der gesamten Sprosstrockenmasse wurden die N-Ernteindices mit der Beziehung

$$\text{N-Ernteindex} = \frac{\text{N-Akkumulation in der Korntrockenmasse}}{\text{N-Akkumulation in der Sprosstrockenmasse insgesamt}} \times 100$$

Tabelle 1: Versuchsanlage – Rein- und Mischbestände  
 Table 1: Experimental design – pure and mixed stands

## I N-Angebot

$N_1$  = Bodenbürtiges N-Angebot, symbiotische N-Bindung, keine N-Düngung  
 $N_{\min}$  0–90 cm vor der Saat 2002 = 38 kg, 2003 = 32 kg  $\text{NO}_3\text{-N ha}^{-1}$

$N_2$  = wie  $N_1$ , mit einer zusätzlichen Güllegabe wurden 2002 vor der Saat 50 kg  $\text{ha}^{-1}$  Ammonium-N auf den gefrorenen Boden ausgebracht. 2003 enthielt die Gülle sehr geringe TS- und N-Gehalte. Mit derselben Güllemenge wie 2002 wurden nur 25 kg  $\text{ha}^{-1}$  Ammonium-N ausgebracht, deshalb wurde zur Ergänzung auf 50 kg  $\text{ha}^{-1}$  N eine Entecgabe von 25 kg  $\text{ha}^{-1}$  Ammonium-N verabfolgt.

## II Bestände (Rein- und Mischbestände)

## Reinbestände

Getreide- arten	Sorten	Saadichten (kf. Körner $\text{m}^{-2}$ )	Leguminosen- arten	Sorten	Saadichten (kf. Körner $\text{m}^{-2}$ )
Sommerweizen	(S) Quattro <sup>1)</sup>	300	Linsen	(L) Anicia <sup>2)</sup>	160
Nackthafer	(H) Salomon <sup>1)</sup>	300	Erbsen	(E) Madonna <sup>1)</sup>	80

## Mischbestände

Arten und Artenkombinationen		Rein- und Substitutionsbestände (keimfähige Körner $\text{m}^{-2}$ )		Additionsbestände (keimfähige Körner $\text{m}^{-2}$ )	
S	H	300	Reinbestand		
S + L	H + L	225 + 40	( $\frac{3}{4}$ + $\frac{1}{4}$ )		
S + L	H + L	150 + 80	( $\frac{1}{2}$ + $\frac{1}{2}$ )		
S + L	H + L	75 + 120	( $\frac{1}{4}$ + $\frac{3}{4}$ )		
L	L	160	Reinbestand		
S + L	H + L			300 + 40	(1 + $\frac{1}{4}$ )
S + L	H + L			300 + 80	(1 + $\frac{1}{2}$ )
S + L	H + L			300 + 120	(1 + $\frac{3}{4}$ )
S + L	H + L			300 + 160	(1 + 1)
S	H	300	Reinbestand		
S + E	H + E	225 + 20	( $\frac{3}{4}$ + $\frac{1}{4}$ )		
S + E	H + E	150 + 40	( $\frac{1}{2}$ + $\frac{1}{2}$ )		
S + E	H + E	75 + 60	( $\frac{1}{4}$ + $\frac{3}{4}$ )		
E	E	80	Reinbestand		
S + E	H + E			300 + 20	(1 + $\frac{1}{4}$ )
S + E	H + E			300 + 40	(1 + $\frac{1}{2}$ )
S + E	H + E			300 + 60	(1 + $\frac{3}{4}$ )
S + E	H + E			300 + 80	(1 + 1)

1) Anonymus 2002

2) Horneburg 2003

für die Rein- und Mischbestände (komponentengetrennt) errechnet. Die relative Differenz zwischen N-Ernteindex und 100% entspricht dem %-Anteil, der als N-Rückstand auf dem Feld verbleibt. Die Differenz zwischen der N-Akkumulation in der Sprossmasse insgesamt und der N-Akkumulation in der Korntrockenmasse stellt die absoluten N-Rückstände ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) auf der Bodenoberfläche dar.

Nach dem Drusch wurden in beiden Jahren von allen Parzellen mit dem Nietfeld Bodenprobenziehgerät Bodenproben – 2 Einstiche je 12  $\text{m}^2$ -Parzelle – gezogen. Die Probenahmetiefe betrug insgesamt 90 cm, unterteilt in die Schichten 0–30, 30–60 und 60–90 cm. Mit dem Fließinjektionsanalysengerät (FIA)-Foss-Tecator wurde der Nitrat-

gehalt in jeder Probe gemessen (AUFHAMMER et al., 1993). Unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte des Bodens wurde die Nitratmenge ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) für jede Bodenschicht errechnet. Die Addition der Werte der drei Teiltiefen ergab den Nitratgehalt im gesamten Probenahmevolumen.

Die N-Mengen in den Ernteresten und die Nitratmenge im Boden addiert ergeben in der Summe den Gesamtstickstoffrückstand. Allerdings fehlen noch nicht mineralisierte und daher nicht erfasste Anteile im Boden. Jedenfalls quantifiziert der Rückstand die potenziell für die Folgefrucht verfügbare N-Menge, beschreibt aber auch – zumindest anteilig – das N-Verlustpotenzial (MAIDL, 1989; AUFHAMMER et al., 1994, 1994a, 1995; KAUL, 1998).

## 2.2 Kalkulation der Erwartungswerte (EW) und der Mischungseffekte (ME)

Zur Errechnung der Mischungseffekte auf die  $N_{\min}$ -Werte wurde aus den Saatkichteanteilen der an einem Mischbestand beteiligten Komponenten und den gemessenen Werten (GW) ihrer Reinbestände ein Erwartungswert (EW) kalkuliert (Tab. 2) und dieser dem unter dem entsprechenden Mischbestand gemessenen Wert (GW) gegenüber gestellt. Die Differenz  $EW - GW$  stellt den jeweiligen Mischungseffekt (ME) dar. In Tab. 2 wird die Ermittlung des ME für je einen Substitutions- ( $\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$ ) und Additionsbestand ( $1 + 1$ ) anhand der Daten für das Versuchsmittel beispielhaft gezeigt.

Im Substitutionsbestand ( $\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$ ) wurden 25 % des Getreidesaatguts durch Leguminosensaatgut ersetzt. 75% des  $N_{\min}$ -Wertes unter dem Getreidereinbestand ergeben 11,95 kg; 25 % des Wertes unter dem Leguminosenreinbestand entsprechen 10,36 kg. Der Erwartungswert für den Mischbestand beträgt somit 22,31 kg. Der Erwartungswert für den Additionsbestand wurde analog kalkuliert. Die gemessenen Werte lagen bei 16,47 bzw. 20,07 kg  $NO_3-N ha^{-1}$ , die Mischungseffekte erreichten -5,84 bzw. -37,32 kg  $NO_3-N ha^{-1}$ .

## 2.3 Überprüfung der Daten

Nach einem Modell für eine Spalt-Spalt-Anlage wurden die Mittelwerte der Rein- und Mischbestände geprüft und verglichen. Für die paarweisen Vergleiche wurden Grenzdifferenzen zum Niveau 5 % errechnet. Für die Auswertung über beide Jahre wurde eine Serienauswertung vorgenommen. Der Faktor Jahr wurde als zufällig betrachtet.

Die Mischungseffekte wurden als lineare Kontraste formuliert und getestet. Der Kontrast für den Vergleich des gemessenen Wertes mit dem Erwartungswert wurde gleich-

falls mit einem t-Test zum Niveau 5 % geprüft (PIEPHO, 2004; PIEPHO et al., 2003, 2004, 2006).

## 3 Ergebnisse

Zur Präsentation der Effekte, die die Etablierung von Mischbeständen gegenüber Reinbeständen auf die N-Harvestindices und die N-Rückstände nach der Ernte hervorruft, wird nachfolgend durchgängig der Faktor Artenkombinationen herangezogen. So können die essenziellen Befunde in überschaubarer Form wiedergegeben werden. Auf die Darstellung der Variation durch die Versuchsjahre und die N-Stufen wird verzichtet, da sie den Informationsgewinn nicht entscheidend beeinflussen.

### 3.1 N-Harvestindices

Verglichen mit den Reinbeständen zeigen weder die Substitutions- noch die Additionsbestände von Weizen mit zunehmenden Leguminosenanteilen nachweisbare Veränderungen der N-Harvestindices. Diese liegen in Kombination mit der Linse durchgängig um 75 und in Mischungen mit der Erbse um 70. Die Mischbestände von Hafer lassen hingegen – in einigen Fällen nachweisbar – einen Trend zu etwas höheren Indices, verglichen mit den Haferreinbeständen, erkennen. Die Werte der Haferreinbestände erreichen mit 65–68 nicht die der Weizenreinbestände (Tab. 3). Gegenüber dem Mischbestand als Einheit sind seine Komponenten gesondert zu betrachten. Mit ansteigenden Leguminosenanteilen unterschreiten die N-Harvestindices des Weizens als Mischungskomponente die Reinbestandswerte zunehmend. Beim Hafer zeichnet sich in Kombination mit der Linse ein gegenteiliger Trend ab. Die Indices der Leguminosenkomponenten übertreffen hingegen in den Kom-

Tabelle 2: Kalkulation der Erwartungswerte (EW) und der Mischungseffekte (ME) der  $N_{\min}$ -Werte (0–90 cm) von Zweikomponenten-Mischbeständen. Beispiel für einen Substitutionsbestand ( $\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$ ) und einen Additionsbestand ( $1 + 1$ )

Table 2: Calculation of the expected values (EW) and the mixture effects (ME) of the  $N_{\min}$ -values (0–90 cm) of two component mixed stands. Example for a substitution stand ( $\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$ ) and for an addition stand ( $1 + 1$ )

Parameter	Arten	Reinbestand (kg $NO_3-N ha^{-1}$ )	Substitutionsbestand ( $\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$ )		Additionsbestand ( $1 + 1$ )	
Erwartungswert (EW)	Getreide		75 % = 11,95	EW = 22,31	100 % = 15,93	EW = 57,39
	Leguminosen		25 % = 10,36		100 % = 41,46	
Gemessener Wert (GW)	Getreide	15,93		GW = 16,47		GW = 20,07
	Leguminosen	41,46		ME = -5,84***		ME = -37,32***
Mischungseffekte (ME)						

ME = EW – GW \*\*\* = Signifikanz bei 0,1 % Irrtumswahrscheinlichkeit

binationsfolgen mit Werten zwischen 70 und 80 durchgängig, wenn auch nicht in allen Fällen signifikant, das relevante Reinbestandsniveau. Eine Ausnahme stellt die Kombination Hafer ( $\frac{3}{4}$ ) + Erbse ( $\frac{1}{4}$ ) dar (Tab. 3).

### 3.2 $N_{\min}$ -Rückstände im Boden

In 0–90 cm Bodentiefe wurden unter den Getreidereinbeständen zwischen 14,5 und 16,5 kg, unter den Leguminosenreinbeständen zwischen rund 30 und 50 kg  $N_{\min}$  ha<sup>-1</sup> gemessen. Ausgehend vom Niveau der Getreidereinbestände stiegen unter den Mischbeständen mit steigendem Linsenanteil die  $N_{\min}$ -Rückstände in geringerem Ausmaß an als unter den Mischbeständen mit der Erbse (Tab. 4, 6). Alle Mischbestände, sowohl die Substitutions- als auch die Additionsbestände, unterboten die erwarteten  $N_{\min}$ -Mengen in der gleichen Bodentiefe signifikant. Die Mischungseffekte stiegen unter den Substitutionsbeständen mit zunehmenden Leguminosenanteilen von ca. -4 kg bis auf -18 kg  $N_{\min}$  ha<sup>-1</sup> an. Bei den Additionsbeständen erreichten die Differenzen ca. -5 bis -40 kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup> (Tab. 4). Damit fielen die  $N_{\min}$ -Rückstände nahezu aller Mischbestände in 0–90 cm Bodentiefe auf das Niveau der Getreidereinbestände. Nur bei Additionsbeständen mit hohen Erbsenanteilen reichte der Rückgang hierzu nicht aus (Tab. 4). Selbst die zwar relativ geringen, aber vorrangig auswaschungsgefährdeten  $N_{\min}$ -Mengen in 60–90 cm Bodentiefe lassen die dargestellten Relationen erkennen (Tab. 5).

### 3.3 N-Rückstände in der Sprossmasse und Gesamt-N-Rückstände

Mit den Sprossmasserückständen, Stroh, Spreu und Hülssen, die beim Drusch der Bestände anfielen, blieben bei den Getreidereinbeständen bis zu 32 kg ha<sup>-1</sup>, bei den Leguminosenreinbeständen bis zu 66 kg ha<sup>-1</sup> an organisch gebundenem Stickstoff als längerfristig mineralisierbares N-Potenzial zurück. Dieses Potenzial stieg bei den Mischbeständen mit zunehmenden Leguminosenanteilen bis auf 51 kg N ha<sup>-1</sup>. Die N-Rückstände in der Sprossmasse der Erbsenmischbestände übertrafen zum Teil die N-Rückstände in der Sprossmasse der Erbsenreinbestände, während die Linsenreinbestände höhere N-Rückstände in der Sprossmasse aufwiesen als die relevanten Mischbestände (Tab. 6). Über Mineralisierungsprozesse werden diese N-Rückstände pflanzenverfügbar und zugleich auswaschungsgefährdet. Die boden- und die sprossbürtigen N-Rückstände zusammengekommen, hinterließen die Getreidereinbestände in den vorliegenden Versuchen 40–50 kg N ha<sup>-1</sup>, die Leguminosenreinbestände mit 85–100 kg N ha<sup>-1</sup> die doppelte Menge. Dabei hinterließ die Erbse im Boden höhere N-Rückstände, während die Linse höhere N-Rückstände in der Sprossmasse als im Boden zurückließ. In den substituierten wie den additierten Mischbeständen nahm das N-Rückstandsniveau, ausgehend vom Getreidereinbestand, mit steigenden Leguminosenanteilen um 10–30 kg N ha<sup>-1</sup> zu. Die N-Bereitstellung durch Körnerleguminosen im Verbund mit dem N-Aneignungsvermögen der Getreidear-

Tabelle 3: N-Harvestindices der Rein- und Mischbestände sowie der Mischungskomponenten (S, H, L, E) in Abhängigkeit von den Artenkombinationen und den Mischungsverhältnissen (Mittelwerte über Jahre und N-Stufen)

Table 3: N-harvest indices of pure and mixed stands and of the mixing components (S, H, L, E) in dependence of the species combinations and the mixing relations (mean values across years and N-levels)

Mischbestände bzw. Komponenten	Getreidereinbestände	Substitutionsbestände			Additionsbestände				Leguminosenreinbestände	Mischbestände bzw. Komponenten GD 5 %
		$\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} + \frac{3}{4}$	$1 + \frac{1}{4}$	$1 + \frac{1}{2}$	$1 + \frac{3}{4}$	$1 + 1$		
S + L	75,43	75,90	74,16	71,75	75,53	76,87	76,78	75,83	66,68	4,45
S		71,60	69,16	66,30	70,76	72,04	71,49	71,29		4,73
L		82,76	78,72	73,60	82,09	82,23	80,45	79,73		4,73
S + E	72,10	70,63	71,13	71,77	70,60	70,82	70,72	70,58	78,00	4,45
S		64,50	56,47	45,81	64,35	58,28	54,30	50,27		4,73
E		81,63	81,98	79,17	83,37	79,96	80,29	79,66		4,73
H + L	65,86	71,16	71,96	68,83	72,29	73,43	71,22	72,17	62,19	4,45
H		67,75	67,74	67,50	69,31	70,59	67,30	69,38		4,73
L		78,30	76,19	69,68	77,85	76,44	74,49	73,00		4,73
H + E	68,78	69,73	71,37	71,62	69,36	71,04	72,60	71,41	75,26	4,45
H		64,77	62,11	56,85	65,20	65,07	64,93	62,00		4,73
E		72,03	79,21	77,10	78,43	77,62	77,91	76,70		4,73

S = Sommerweizen, L = Linse, E = Erbse, H = Hafer



Tabelle 4: Erwartete (EW) und gemessene (GW)  $N_{\min}$ -Werte ( $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ ) im Boden (0–90 cm) nach der Ernte unter den Rein- und Mischbeständen sowie Mischungseffekte (ME) in Abhängigkeit von den Artenkombinationen und den Mischungsverhältnissen (Mittelwerte über Jahre und N-Stufen)

Table 4: Expected (EW) and measured (GW)  $N_{\min}$ -values ( $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ ) in the soil (0–90 cm) after harvest under pure and mixed stands and mixing effects (ME) in dependence of the species combinations and the mixing relations (mean values across years and N-levels)

Artenkombinationen	Parameter	Getreide-reinbestände	Substitutionsbestände			Additionsbestände				Leguminosenreinbestände	GD 5 %
			$\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} + \frac{3}{4}$	$1 + \frac{1}{4}$	$1 + \frac{1}{2}$	$1 + \frac{3}{4}$	$1 + 1$		
S + L	EW	16,14	21,49	26,83	32,18	25,52	34,90	44,28	53,67	37,52	4,603
	GW		17,40	17,98	18,26	20,72	17,48	18,00	19,34		
	ME		-4,09	-8,85***	-13,92***	-4,80*	-17,42***	-26,28***	-34,33***		
S + E	EW	16,48	24,53	32,59	40,64	28,65	40,82	53,00	65,17	48,69	
	GW		18,40	22,79	25,11	16,75	20,26	24,47	26,02		
	ME		-6,13**	-9,80***	-15,53***	-11,90***	-20,56***	-28,53***	-39,15***		
H + L	EW	16,53	20,49	24,46	28,43	24,63	32,73	40,83	48,93	32,40	
	GW		15,88	15,82	15,48	17,76	14,41	14,99	14,35		
	ME		-4,61*	-8,64***	-12,95***	-6,87***	-18,32***	-25,84***	-34,58***		
H + E	EW	14,58	22,74	30,89	39,05	26,38	38,19	49,99	61,79	47,20	
	GW		14,20	18,01	21,44	15,41	16,41	15,81	20,57		
	ME		-8,54***	-12,88***	-17,61***	-10,97***	-21,78***	-34,18***	-41,22***		

S = Sommerweizen, L = Linse, E = Erbse, H = Hafer

\* = Signifikanz bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit

\*\* = Signifikanz bei 1 % Irrtumswahrscheinlichkeit

\*\*\* = Signifikanz bei 0,1 % Irrtumswahrscheinlichkeit

Tabelle 5:  $N_{\min}$ -Werte ( $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ ) im Boden (60–90 cm) nach der Ernte unter Rein- und Mischbeständen in Abhängigkeit von den Artenkombinationen und den Mischungsverhältnissen (Mittelwerte über Jahre und N-Stufen)

Table 5:  $N_{\min}$ -values ( $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ ) in the soil (60–90 cm) after harvest under pure and mixed stands in dependence of the species combinations and the mixing relations (mean values across years and N-levels)

Artenkombinationen	Getreide-reinbestände	Substitutionsbestände			Additionsbestände				Leguminosenreinbestände	GD 5 %
		$\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} + \frac{3}{4}$	$1 + \frac{1}{4}$	$1 + \frac{1}{2}$	$1 + \frac{3}{4}$	$1 + 1$		
S + L	3,01	3,81	3,17	4,26	3,70	3,21	3,49	4,22	9,07	2,43
S + E	3,11	3,83	4,36	4,62	3,27	4,37	4,34	5,78	10,06	
H + L	3,51	3,33	3,50	1,39	3,27	3,02	2,72	2,99	8,56	
H + E	3,35	2,82	3,16	4,67	3,94	2,06	3,58	3,73	9,61	

S = Sommerweizen, L = Linse, E = Erbse, H = Hafer

ten führten in den Mischungsvarianten, den Substitutions- und den Additionsbeständen zu einem N-Rückstandspool in der Größenordnung von 50–75  $\text{kg N ha}^{-1}$ . Der Pool wurde abhängig von der Leguminosenart vom Rückstand in der Sprossmasse bzw. im Boden dominiert (Tab. 6).

## 4 Diskussion

Getreide-Körnerleguminosen-Mischbestände zeigten gegenüber Getreidereinbeständen weitgehend unveränderte

N-Harvestindices. Mit der artengemischten Kornfraktion wurde jeweils ein stabiler relativer Anteil des Stickstoffs in der gesamten artengemischten Sprossmasse geerntet. Dies bestätigt unsere Eingangshypothese. Jedoch veränderten sich mit steigenden Leguminosenanteilen die Beiträge der Komponenten Getreide und Leguminosen zu den N-Harvestindices der Mischbestände. Trotz zunehmendem Rohproteingehalt im Korn (KÜBLER et al., 2010) fiel der N-Harvestindex der Weizenkomponente. Vermutlich beeinträchtigte während der Bestandsentwicklung die leguminosenbürtige Konkurrenz um andere Wachstumsfaktoren

Tabelle 6: N-Rückstände in der Sprossmasse ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ), im Boden ( $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ ) und insgesamt ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) nach der Ernte bei Rein- und Mischbeständen in Abhängigkeit von den Artenkombinationen und den Mischungsverhältnissen (Mittelwerte über Jahre und N-Stufen)Table 6: N-residues in the above ground dry matter ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ), in the soil ( $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ ) and totally ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) after harvest of pure and mixed stands in dependence of the species combinations and the mixing relations (mean values across years and N-levels)

Artenkombinationen	Getreide-reinbestände	Substitutionsbestände			Additionsbestände				Leguminosenreinbestände	GD 5 %
		$\frac{3}{4} + \frac{1}{4}$	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} + \frac{3}{4}$	$1 + \frac{1}{4}$	$1 + \frac{1}{2}$	$1 + \frac{3}{4}$	$1 + 1$		
$N_{\min}$ -Rückstände ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) in der Sprossmasse										
S + L	24,20	32,26	41,39	50,50	32,47	35,03	35,41	39,41	57,08	5,21
S + E	26,34	36,43	46,27	46,73	38,55	44,10	47,76	51,40	38,33	
H + L	32,47	34,80	39,78	50,16	35,40	35,38	40,71	42,43	66,19	
H + E	28,80	36,86	43,28	50,78	34,28	39,52	42,26	46,15	38,62	
$N_{\min}$ -Rückstände ( $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ ) im Boden (0–90 cm)										
S + L	16,14	17,40	17,98	18,26	20,72	17,48	18,00	19,34	37,52	4,60
S + E	16,48	18,40	22,79	25,11	16,75	20,26	24,47	26,02	48,69	
H + L	16,53	15,88	15,82	15,48	17,76	14,41	14,99	14,35	32,40	
H + E	14,58	14,20	18,01	21,44	15,41	16,41	15,81	20,57	47,20	
N-Rückstände ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) insgesamt										
S + L	40,34	49,66	59,37	68,76	53,19	52,51	53,41	58,75	94,60	8,33
S + E	42,82	54,83	69,06	71,84	55,30	64,36	72,23	77,42	87,02	
H + L	49,00	50,68	55,60	65,64	53,16	49,79	55,70	56,78	98,59	
H + E	43,38	51,06	61,29	72,22	49,69	55,93	58,07	66,72	85,82	

S = Sommerweizen, L = Linse, E = Erbse, H = Hafer

ren, vornehmlich Licht, die Kornbildung (DEWIT, 1960; DEWIT und VAN DEN BERGH, 1965; WILSON, 1988; SNAYDON, 1991, 1996). Darunter litt der dichter- und kürzerwüchsige Weizen deutlich stärker als der Hafer. Zwar gingen unter dem Einfluss der Mischungskomponente Erbse auch die N-Harvestindices des Hafers zurück. In Kombination mit der konkurrenzschwächeren Linse ließen jedoch gegenteilige Effekte die positive Wirkung des höheren N-Angebots auf den Korn-N-Ertrag und damit die N-Harvestindices in den Vordergrund treten. Gegenüber den Getreidekomponenten bewegten sich die N-Harvestindices der Leguminosenkomponenten über die Mischungsvarianten hinweg über dem Niveau der relevanten Reinbestände. Somit fanden Leguminosenpflanzen in den Mischbeständen günstigere Kornbildungs- und N-Speicherungsbedingungen vor als in den Reinbeständen. Dazu gehören unter anderem die Standfestigkeit der Linse stützende Effekte stabiler Getreidehalme (RAUBER, SCHMIDTKE und KIMPELFREUND, 2000; HOF und RAUBER, 2003). Somit resultieren die weitgehend konstanten N-Harvestindices der Mischbestände aus komplexen, aber ineinander greifenden Reaktionen der beteiligten Komponenten und ihrer Anteile. Linsenreinbestände hinterließen mit ca.  $35 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Boden und um  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$  in den Restsprossmassen gegenüber Erbsenreinbeständen mit ca. 48 bzw.  $38 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Boden geringere, in den Restsprossmassen größere N-Men-

gen. Damit wurden die zurückbleibenden N-Mengen der Getreidearten – ca.  $16 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Boden und etwa  $28 \text{ kg N ha}^{-1}$  in den Restsprossmassen – übertroffen. Kombinationen von Getreide- und Leguminosenarten verminderten die leguminosenbürtigen Rückstände im Boden in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis. Die Getreidekomponenten konnten die  $N_{\min}$ -Rückstände eines Leguminosenanteils von 25 % am Mischbestand unter den gegebenen Low-Input-Bedingungen auf das Niveau von Getreidereinbeständen reduzieren. Im Hafersubstitutionsbestand fielen selbst bei einem Leguminosenanteil von 50 % die  $N_{\min}$ -Rückstände noch in 60–90 cm Tiefe auf das Niveau der Haferreinbestände. Der  $N_{\min}$  in dieser Bodenschicht ist besonders auswaschungsgefährdet. Diese Ergebnisse bestätigen unsere zweite Hypothese. Denn diese besagt, im Mischbestand stellt die Leguminose anteilsabhängig Stickstoff zum Vorteil der Getreidekomponente zur Verfügung. Zugleich mindert die Getreidekomponente durch N-Entzug die Problematik leguminosenbürtiger  $N_{\min}$ -Rückstände im Boden. Allerdings muss darüber hinaus die Problematik des Stickstoffs, der auf der Bodenoberfläche in den Restsprossmassen verbleibt, erörtert werden. Die Mineralisierungsprozesse werden wesentlich von der Qualität der Pflanzenreste mitbestimmt. Die Verholzung und der geringe N-Gehalt der Getreidereste verzögern die Mineralisierung erheblich. Demgegenüber dürfte das feinere, stick-

stoffreichere Rückstandsmaterial der Leguminosen, insbesondere der Linse, erheblich rascher mineralisiert werden (MAIDL, 1989; AUFHAMMER et al., 1994, 1995; JUSTUS, 1996; KAUL, 1998). Einerseits stellen nennenswerte Mengen mineralischen Stickstoffs, die aus den Resten größerer Leguminosenanteile in Mischbeständen verfügbar werden können, ein weiteres Verlust- und Auswaschungspotenzial dar, andererseits können sie aber auch zunehmend die Mineralisierung abnehmender Getreidestrohreste fördern. Bezogen auf die N-Rückstandsproblematik ist damit von einer wechselseitigen Unterstützung der Getreide- und der Leguminosenkomponenten in Mischbeständen auszugehen. Dies gilt sowohl für den  $N_{\min}$  im Boden, als auch für den organisch gebundenen Stickstoff in den Restsprossmassen (AUFHAMMER et al., 1994, 1994a, 1995; KAUL, 1998). Dass diese Beziehungen insbesondere unter Low-Input-Bedingungen eine Rolle spielen, liegt auf der Hand.

## Literatur

- ANONYMUS (2002): Beschreibende Sortenliste: Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln). Bundessortenamt Hannover, Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Hannover.
- AUFHAMMER, W. (1999): Mischbau von Getreide- und anderen Körnerfruchtarten. Ein Beitrag zur Nutzung von Biodiversität im Pflanzenbau. Ulmer, Stuttgart.
- AUFHAMMER, W., H. STÜTZEL, E. KÜBLER, A. FIEGENBAUM und G. RENZ (1993): Einflüsse des Probenahmeverfahrens auf die Nitrat ( $N_{\min}$ )-Messwerte von Ackerböden. *Agribiol. Res.* 46 (1), 54–64.
- AUFHAMMER, W., E. KÜBLER und M. BURY (1994): Stickstoffaufnahme und Stickstoffrückstände von Hauptfrucht- und Ausfallrapsbeständen. *J. Agron. Crop. Sci.* 172, 255–264.
- AUFHAMMER, W., A. FIEGENBAUM und E. KÜBLER (1994a): Zur Problematik der Stickstoffrückstände von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.). Teil 1: Stickstoffakkumulation und Stickstoffrückstände von Ackerbohnen. *Die Bodenkultur* 45 (3), 239–251.
- AUFHAMMER, W., A. FIEGENBAUM und E. KÜBLER (1995): Zur Problematik der Stickstoffrückstände von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.). Teil 3: Nutzung und Sicherung von Nitratstickstoff im Boden nach Ackerbohnen durch Untersaaten. *Bodenkultur* 46 (1), 25–37.
- AUFHAMMER, W., E. KÜBLER und H.P. PIEPHO (2004): Getreidearten und Körnerleguminosen als Komponenten von Mischbeständen – 1. Mitt.: Mischungseffekte auf die Kornerträge. *Pflanzenbauwiss.* 8 (2), 56–63.
- AUFHAMMER, W., E. KÜBLER und H.P. PIEPHO (2005a): Getreidearten und Körnerleguminosen als Komponenten von Mischbeständen – 2. Mitt.: Mischungseffekte auf die Produktion und die Verteilung der Sprosstrockenmasse. *Pflanzenbauwiss.* 9 (1), 1–8.
- AUFHAMMER, W., E. KÜBLER und H.P. PIEPHO (2005b): Getreidearten und Körnerleguminosen als Komponenten von Mischbeständen – 3. Mitt.: Mischungseffekte auf die N-Akkumulation der Sprosstrockenmasse und die  $N_{\min}$ -Rückstände im Boden. *Pflanzenbauwiss.* 9 (2), 87–95.
- BOLLER, B. and J. NÖSBERGER (1988): Influence of dissimilarities in temporal and spatial N-uptake pattern on  $^{15}N$ -based estimates of fixation and transfer of N in ryegrass-clover mixtures. *Plant and Soil* 112, 167–175.
- DEWIT, C.T. (1960): On competition. *Versl. Landbouwk. Onderzoek.* No. 66.8., Wageningen, 1–82.
- DEWIT, C.T. and J.P. VAN DEN BERGH (1965): Competition between herbage plants. *Neth. J. Agric. Sci.* 13, 212–221.
- HAUGGAARD-NIELSEN, H., P. AMBUS and E.S. JENSEN (2001): Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops. – A field study employing  $^{32}P$  technique. *Plant and Soil* 236, 63–74.
- HOF, C. und R. RAUBER (2003): Anbau von Gemengen im ökologischen Landbau. Inst. f. Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Georg-August-Universität Göttingen. Hrsg.: Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bonn, 1. Auflage.
- HORNEBURG, B. (2003): Frischer Wind für eine alte Kulturpflanze! Linsen im ökologischen Anbau, ihre Geschichte und Verwendung. Herausgegeben vom Dreschflegel e. V. und dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Universität Göttingen.
- JENSEN, E.S. (1996): Grain yield, symbiotic  $N_2$ -fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 182, 25–38.
- JUSTUS, M. (1996): Optimierung des Anbaus von Ackerbohnen: Reduzierung von Nitratverlusten und Steigerung der Vorfruchtwirkung zu Sommergetreide. Diss. Universität Bonn.
- KAUL, H.P. (1998): Analyse und Modellierung des Vorfrucht-Nachfrucht-Systems unter besonderer Berücksichtigung der Stickstoffflüsse nach dem Anbau öl- und



- eiweißreicher Körnerfruchtarten. Habil.-Schrift Universität Hohenheim.
- KÜBLER, E., W. AUFHAMMER und H.P. PIEPHO (2006): Mischungseffekte in Getreide-Körnerleguminosen-Beständen auf den Kornertrag in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis. *Die Bodenkultur* 57 (3), 121–130.
- KÜBLER, E., W. AUFHAMMER und H.P. PIEPHO (2008): Mischungseffekte in Getreide-Körnerleguminosen-Beständen auf die Zusammensetzung der Spross- und Kornmassen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis. *Die Bodenkultur* 59, 35–43.
- KÜBLER, E., W. AUFHAMMER und H.P. PIEPHO (2010): Mischungseffekte in Getreide-Körnerleguminosen-Beständen auf die N-Akkumulation in den Spross- und Kornmassen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis. *Die Bodenkultur* 61, 19–27.
- MAIDL, F.X. (1989): Einfluss landwirtschaftlicher Anbausysteme auf Größe und Verminderung des Nitrateintrags in tiefere Bodenschichten. *Kali-Briefe* 19 (9), 649–662.
- PIEPHO, H.P., A. BÜCHSE and K. EMRICH (2003): A hitchhiker's guide to the mixed model analysis of randomized experiments. *J. Agron. Crop Sci.* 189, 310–322.
- PIEPHO, H.P. (2004): An algorithm for a letter-based representation of all-pairwise comparisons. *J. of Computational and Graphical Statistics* 13, 456–466.
- PIEPHO, H.P., A. BÜCHSE and C. RICHTER (2004): A mixed modelling approach to randomized experiments with repeated measures. *J. Agron. Crop Sci.* 190, 230–247.
- PIEPHO, H.P., E.R. WILLIAMS and M. FLECK (2006): A note on the analysis of designed experiments with complex treatment structure. *Hort-Science* 41, 446–452.
- RAUBER, R., K. SCHMIDTKE und H. KIMPEL-FREUND (2000): Konkurrenz und Ertragsvorteile in Gemengen aus Erbsen (*Pisum sativum* L.) und Hafer (*Avena sativa* L.). *J. Agron. Crop Sci.* 185, 33–47.
- SNAYDON, R.W. (1991): Replacement or additive designs for competition studies? *J. Appl. Ecol.* 28, 930–946.
- SNAYDON, R.W. (1996): Above-ground and below-ground interactions in intercropping. In: ITO, O., C. JOHANSEN, J.J. ABU-GYMAFI, K. KATAYAMA, J.V. D.K. KUMAR RAO and T.J. REGO (Eds.): *Dynamics of roots and nitrogen in cropping systems of the semi-arid tropics*. Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 73–92.
- WILSON, J.B. (1988): Shoot competition and root competition. *J. Appl. Ecol.* 25, 279–296.
- WINKLER, R., S. BOTTERBRODT, E. RABE und M.G. LINDHAUER (2000): Stickstoff-/Proteinbestimmung mit der Dumas-Methode in Getreide und Getreideprodukten. *Getreide, Mehl und Brot* 54 (2), 86–91.

### **Anschrift der Autoren**

**Dr. E. Kübler, Prof. Dr. W. Aufhammer, Prof. Dr. H.-P. Piepho**, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Universität Hohenheim, Fruwirthstraße 23, 70599 Stuttgart, Deutschland; E-mail: piepho@uni-hohenheim.de; Fax: Kübler +49 (0)7150-33217

Eingelangt am 12. November 2010

Angenommen am 26. Januar 2011