

Vergleich von Methoden zur Berechnung der biologischen N₂-Fixierung von Leguminosen zum Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis

Comparison of methods for calculation of legume N₂ fixation for use in practical agriculture

H. Kolbe

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung Pflanzliche Erzeugung, Leipzig

Zusammenfassung

Für die Körnerleguminosen Ackerbohne (*Vicia faba*) und Erbse (*Pisum sativum*) und die Futterleguminosen Luzerne (*Medicago sativa*) und Rotklee (*Trifolium pratense*) wurden Methoden zur Berechnung der symbiotischen N-Fixierung und der N-Flächensalden miteinander verglichen und zusätzlich ihre Handhabbarkeit beim Einsatz unter praktischen Bedingungen getestet. Es wurde eine Bewertung der Übereinstimmung mathematisch-statistischer Eigenschaften zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten vorgenommen. Hierzu wurde aus Literaturangaben ein umfangreiches Datenmaterial entsprechender Feldversuche von verschiedenen Standorten, Jahren, Anbau- und Nutzungsarten zusammengetragen. In der Praxis weit verbreitete, relativ einfach aufgebaute Verfahren, bei denen zur Berechnung der N-Fixierung lediglich die Ernteerträge mit einem Fixierungskoeffizienten multipliziert werden, wiesen bei den berechneten N-Salden kaum eine Übereinstimmung mit experimentellen Werten auf. Es bestand zudem eine sehr große Methodenstreuung für die N-Fixierung (N-Salden) von ± 95 (85) kg N ha⁻¹ bei Körnerleguminosen und ± 145 -175 (140-204) kg N ha⁻¹ bei den Futterleguminosen. Ausführlichere Methoden, die auf explizit erklärten mathematischen Grundsätzen aufgebaut sind, wiesen kaum verbesserte Eigenschaften auf. Demgegenüber waren die Ergebnisse von Verfahren, die eher auf beschreibenden mathematisch-statistischen Grundsätzen beruhen, durch z. T. deutlich höhere Übereinstimmungen mit Versuchsdaten gekennzeichnet. Je nach Komplexität des Verfahrens, ob noch manuell oder über EDV-Anlagen nutzbar, wurde eine Methodenstreuung für die N-Salden bei Körnerleguminosen von ± 50 -65 kg N ha⁻¹ und bei Futterleguminosen von ± 90 -140 kg N ha⁻¹ ermittelt. Auf Grund der hohen Streuungen kann bisher lediglich eine orientierende bis halb-quantitative Genauigkeit veranschlagt werden. Durch sensibel durchgeführte Validierungsarbeiten zur genaueren Fixierung von Parameterwerten und Gleichungssystemen könnten Genauigkeitseigenschaften einiger Verfahren deutlich verbessert werden.

Schlüsselworte: Leguminosen, biologische N₂-Fixierung, N-Flächensaldo, Bestimmungsmethoden, Genauigkeit

Summary

Methods to calculate symbiotic N₂ fixation and N balances for field beans (*Vicia faba*), peas (*Pisum sativum*), alfalfa

(*Medicago sativa*) and red clover (*Trifolium pratense*) were compared and tested for their usability under practical conditions. Accuracy was evaluated on the basis of the degree of statistical agreement between calculated and experimental values. For this purpose, an extensive dataset of results from corresponding legume field trials involving different locations, years, and cultivation techniques was compiled from the literature. N balances calculated by relatively simple methods widespread used in farming which determine N₂ fixation by merely multiplying the harvested yields by an N fixation factor were found to rarely predict N balances satisfyingly. Serious deviations were also detected regarding N₂ fixation (N balances) of ± 95 (85) kg N ha⁻¹ for grain legumes and ± 145 -175 (140-204) kg N ha⁻¹ for fodder legumes. More detailed methods based on explicit explanatory mathematical principles were found to perform hardly better. By contrast, the results of procedures involving more descriptive mathematical and statistical principles matched experimental data more closely. Depending on the complexity of the procedure (i.e. whether it can be applied manually or only by using a computer), deviation for N balances of just ± 50 -65 kg N ha⁻¹ for grain legumes and ± 90 -140 kg N ha⁻¹ for fodder legumes was determined. Even the best methods hitherto, which require a personal computer, provide no more than semi-quantitative accuracy due to their high statistical deviations.

Key words: Legumes, symbiotic N₂ fixation, N balance, determination methods, accuracy

Einleitung

In extensiveren Anbausystemen kommt der symbiotischen N-Bindung der Leguminosen eine große Bedeutung zu (LOGES & TAUBE 2007, SCHMIDTKE 2008). So ist der Anbau von Futter- und Körnerleguminosen im ökologischen Landbau die wichtigste Quelle, um dem Betriebskreislauf den Nährstoff Stickstoff zuzuführen. Als Bodenfruchtbarkeit förderndes Glied wird dem Leguminosenanbau daher mit 20-40% ein relativ großer Anteil bei der Fruchtfolgezusammensetzung zugewiesen (FREYER 2003, KOLBE 2006).

Im Rahmen des betrieblichen Nährstoffmanagements ist es bei der Anwendung verschiedener Formen der Nährstoffbilanzierung (Hof- und Flächen- und Schlagbilanz) erforderlich, auch die N-Zufuhr über die Leguminosen zu quantifizieren. Im Vergleich zu anderen Bilanzgliedern ist die Berechnung der legumens N-Bindung allerdings mit großen Ungenauigkeiten behaftet (STEIN-BACHINGER et al.

2004, BACH & FREDE 2005, BAUMGÄRTEL et al. 2007, LOGES & TAUBE 2007). Die Gründe hierfür liegen sicherlich zunächst bei dem relativ niedrigen Anbauumfang im konventionellen Landbau und den damit zusammenhängenden geringen Bemühungen zur Erstellung geeigneter Berechnungsverfahren für die legume N-Bindung. Ein weiterer Grund liegt darin, dass in der landwirtschaftlichen Praxis nur verhältnismäßig einfache Verfahren zur Berechnung der N-Bindung zum Einsatz kommen können.

Die Symbiose von Rhizobien mit den Leguminosen sowie die Faktoren, die auf diesen Prozess einwirken, sind dagegen von hoher Komplexität und z. T. noch nicht bis in alle Einzelheiten untersucht und verstanden (siehe Übersicht bei SCHMIDTKE & RAUBER 2000, CUTTLE et al. 2003, SCHULZ 2004, HEUWINKEL 2007). Diese Komplexität in möglichst einfache mathematische Gleichungen zu überführen, die dann in Berechnungsverfahren implementiert

werden, kann daher als besondere Herausforderung angesehen werden.

Auf Grund der erhöhten Aufmerksamkeit gegenüber der legumen N-Bindung wurden in jüngster Zeit einige neue Berechnungsverfahren vorgestellt. Diese auf verschiedenen Prinzipien beruhenden Verfahren wurden für die Futterleguminosen Rotklee und Luzerne sowie die Körnerleguminosen Ackerbohne und Erbse in dieser Arbeit einer genauen Prüfung unterzogen. Zu diesem Anlass wurde für diese Leguminosenarten eine entsprechende Datensammlung aus Feldversuchen erstellt und für den Methodenvergleich verwendet. Neben der Übereinstimmung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten standen der zu erhebende Merkmalskatalog der Methoden sowie auch die Anwendbarkeit unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis im Vordergrund der Untersuchungen.

Tab. 1: Beschreibung der für den Methodenvergleich herangezogenen Datengrundlage für Körner- und Futterleguminosen
Description of the field data set used in the method comparison for grain and fodder legumes

Autor	Standort	Fruchtarten (Anzahl Varianten)	Methode zur Abschätzung der N ₂ -Fixierungsleistung	Referenzpflanzen
LOPOTZ (1996)	Ort: Nordrhein-Westfalen Boden: toniger Schluff Witterung: warm, trocken	Rotklee, Rotklee-Gras (1)	¹⁵ N-Verdünnungs-Methode, Differenz-Methode	Deutsches Weidelgras
KELNER et al. (1997)	Ort: Kanada, Manitoba Boden: Ton Witterung: durchschnittlich	Luzerne (7)	¹⁵ N-Verdünnungs-Methode	Weizen, Hafer
LOGES (1998)	Ort: Schleswig-Holstein Boden: lehmiger Sand bis sandiger Lehm Witterung: durchschnittlich bis warm, trocken, feucht	Rotklee, Rotklee-Gras (24)	Erweiterte Differenz-Methode, ¹⁵ N-Anreicherungs-Methode	Deutsches Weidelgras
LOGES & TAUBE (1999), LOGES et al. (2000)	Ort: Schleswig-Holstein Boden: sandiger Lehm Witterung: durchschnittlich	Luzerne, Luzerne-Gras (5) Rotklee, Rotklee-Gras (9)	N-Differenz-Methode, ¹⁵ N-Anreicherungs-Methode	Deutsches Weidelgras
KASKE (2000)	Ort: Schleswig-Holstein Boden: Lehm Witterung: durchschnittlich bis trocken	Luzerne, Luzerne-Gras (8) Rotklee, Rotklee-Gras (8)	Erweiterte Differenz-Methode	Deutsches Weidelgras
SCHMIDTKE & RAUBER (2000)	zusammengefasste Versuche verschiedener Standorte in Deutschland	Ackerbohne (44) Erbse (41) Luzerne (7) Rotklee (4)	Erweiterte Differenz-Methode, $\delta^{15}\text{N}$ -Methode	verschiedene Referenzpflanzen
JOST (2003)	Ort: Niedersachsen Boden: sandiger Schluff, toniger Schluff, stark toniger Schluff, schwach schluffiger Sand Witterung: durchschnittlich bis warm, trocken	Ackerbohne, Acker- bohne-Hafer (12) Erbse, Erbse-Hafer (12)	Erweiterte Differenz-Methode, ¹⁵ N-Verdünnungs-Methode	Hafer, Raps
JUNG (2003)	Ort: Niedersachsen Boden: toniger Schluff, schluffiger Lehm, Sand Witterung: durchschnittlich bis etwas warm, trocken	Luzerne, Luzerne-Gras (24) Rotklee, Rotklee-Gras (24)	$\delta^{15}\text{N}$ -Methode, ¹⁵ N-Verdünnungs-Methode	Welsches Weidelgras, Wiesenschwingel, Spitzwegerich
PIETSCH (2004)	Ort: Österreich, Wiener Becken Boden: lehmiger Schluff Witterung: warm, trocken	Luzerne, Luzerne-Gras (18) Rotklee (8)	Erweiterte Differenz-Methode, ¹⁵ N-Verdünnungs-Methode	Gras-Gemenge (Glatthafer, Rot-, Schaf-, Wiesenschwin- gel), Kräuter-Gemenge (u.a. Spitzwegerich, Schafgarbe)
WICHMANN (2004)	Ort: Schleswig-Holstein Boden: lehmiger Sand bis sandiger Lehm Witterung: durchschnittlich bis feucht	Ackerbohne, Ackerbohne-Hafer (2) Erbse, Erbse-Sommergerste (2)	Erweiterte Differenz-Methode	Hafer, Sommergerste

Material und Methoden

Erhebung von Ergebnissen aus Feldversuchen

Für den Vergleich von Methoden zur Berechnung der N-Fixierung von Leguminosen sind Ergebnisse aus Feldversuchen möglichst verschiedener Standorte und klimatischer Lagen erforderlich. Daher wurden entsprechend Tab. 1 Literaturdaten zu nachfolgenden Merkmalen erhoben:

- N_{min}-Mengen im Frühjahr im Boden (kg ha⁻¹; in der Regel 0-90 cm Tiefe)
- Erträge an TM-Ernteprodukten (dt ha⁻¹; Körner, Sprossmasse)
- Leguminosenanteil am Gesamtertrag (%)
- N-Gehalte der Pflanzenteile (% i. d. TM)
- N-Abfuhr (kg ha⁻¹)
- N-Saldo (kg ha⁻¹)
- Ernte- und Wurzelrückstände (EWR, dt ha⁻¹)
- N-Aufnahme durch Gesamtpflanze (kg ha⁻¹; Spross, Wurzel, Stoppel)
- N-Bindung Gesamtpflanze durch N₂-Fixierung (kg ha⁻¹)
- Anteil der N₂-Fixierung an der Gesamt-N-Aufnahme (%)
- N-Harvest-Index (%)
- N-Transfer Boden (% von der N-Bindung; aus Leguminosen-Wurzel in Boden und in Nichtleguminosen).

Bei dem N-Bodentransfer, auch ausgedrückt als N-Rhizodeposition, handelt es sich um N-Mengen, die aus der leguminösen N-Fixierung stammen, aber z. T. der Untersuchung der EWR bereits über eine direkte Abgabe an den Boden oder durch abgestorbene Wurzeln dem Boden zugefügt bzw. von anderen Pflanzen, wie z. B. dem Gemengegrass, aufgenommen worden sind. Diese transferierten N-Fixierungsmengen können einen erheblichen Umfang von den insgesamt fixierten Mengen einnehmen. Bei einigen Fruchtarten sind die betreffenden Daten zudem noch mit Unsicherheiten behaftet. Die in dieser Arbeit unterstellten Werte an Rhizodeposition wurden aus einer entsprechenden Zusammenstellung von SCHMIDTKE (2004, 2008) übernommen und als Relativbeträge von den ermittelten Werten der N-Bindung (= 100%) dargestellt und den Mengen der N-Fixierung hinzugefügt:

- Ackerbohne (*Vicia faba*) 19%
- Erbse (*Pisum sativum*) 12%
- Futterleguminosen im Ansaatzjahr 18%
- Luzerne (*Medicago sativa*) 15%
- Rotklee (*Trifolium pratense*) 20%.

Kurzbeschreibung der geprüften Verfahren

Einen Überblick über verschieden komplexe Verfahren zur Abschätzung der symbiotischen N-Bindung geben CUTTLE et al. (2003). Die in dieser Arbeit herangezogenen Methoden werden in Tab. 2 erläutert. Die in der Praxis weit verbreiteten Berechnungsverfahren der Länder- und Beratungseinrichtungen beruhen auf sehr einfachen Annahmen. So ist es üblich, bestimmte fruchtartenabhängige Parameterwerte für die N-Bindung einzusetzen. Darüber hinaus wurden z. T. deutlich komplexere Verfahren zur Berechnung der N-Bindung geprüft, die sowohl dem explizit erklärenden als auch dem mehr beschreibenden mathematisch-statistischen Formenkreis an Methoden zugeschrieben werden können, aber bisher nur in geringem Umfang Eingang in die praktische Anwendung gefunden haben.

Da der Datenpool auf Grund der Komplexität der Erhebungen relativ begrenzt ist, werden für annähernd alle Methoden in unterschiedlichem Ausmaß auch Datensätze verwendet, die bereits für den Aufbau der Methoden herangezogen worden sind. Eine völlige Unabhängigkeit der

Prüfdaten kann daher nicht gewährleistet werden. Aus diesem Grund steht die Frage im Vordergrund, inwieweit es durch die zu vergleichenden Methoden gelungen ist, eine Übereinstimmung mit den verfügbaren Prüfdaten zu erreichen und welche Vorschläge für eine weitere Verbesserung der Methoden abgeleitet werden können.

Die Leistungen der Leguminosen in den Feldversuchen werden durch Ermittlung der N-Bindung und der N-Salden dokumentiert. Die allgemeine mathematische Erfassung der N-Bindung durch Leguminosen kann aus nachfolgender vereinfachter Gl. 1 entnommen werden:

$$N_2\text{-Fixierung} = f(\text{Hauptertrag, Leguminosenanteil, N-Gehalt, N-Harvest-Index, N-Fixierungsanteil, N-Transfer Boden, ...}) \quad (1)$$

Bei den einjährigen Körnerleguminosen wird unter der N₂-Fixierung die im Laufe der Vegetation bis zur Ernte erreichte Fixierleistung des Gesamtpflanzenbestandes (inkl. EWR und Rhizodeposition) verstanden. Bei den Futterleguminosen besteht die Fixierleistung des Gesamtpflanzenbestandes aus den einzelnen Aufwüchsen einer Vegetationsperiode inklusive der anteiligen EWR- und Rhizodepositionswerte. Als N-Saldo wird der Anteil der Gesamtfixierung je Flächeneinheit bezeichnet, der nach Abzug der durch den abgeernteten Pflanzenaufwuchs entfernten N-Menge auf der Fläche verbleibt. Bei den Körnerleguminosen wird lediglich der Körnerertrag von der Fläche entfernt, während das Stroh auf der Fläche verbleibt. Bei den Futterleguminosen werden die einzelnen Aufwüchse abgefahren und die Stoppeln verbleiben auf dem Feld. Der N-Saldo ist entweder direkte Ausgabevariable oder kann nach folgender Gl. 2 berechnet werden:

$$N\text{-Saldo} = N_2\text{-Fixierung} - N\text{-Entzug} \quad (2)$$

wobei der N-Entzug als Produkt aus Ertrag und dem N-Gehalt gebildet wird.

Arbeiten zur Eignungs- und Genauigkeitsprüfung der Verfahren

Der Methodenvergleich wurde in folgender Weise durchgeführt: Entsprechend den Anweisungen in den Verfahrensbeschreibungen für den praktischen Einsatz wurden die direkten oder aufbereiteten Eingabemerkmale aus den Feldversuchen verwendet und die N-Bindung sowie die N-Flächenbilanzsalden ermittelt. Es wurden die Bruttowerte, d. h. inklusive der bekannten oder angenommenen Werte an N-Bodentransfer, verwendet.

Anschließend wurden diese Daten den experimentell ermittelten Werten aus den Versuchen gegenüber gestellt und graphisch in einem 1:1-Achsenystem abgebildet. Darüber hinaus wurden verschiedene statistische Parameter der linearen Regressionsgleichungen (Achsenabschnitt a, Steigung b, Bestimmtheitsmaß R² mit einseitigem Signifikanztest für α = 0,001***, 0,01**, 0,05*) sowie Häufigkeitsberechnungen der Differenzen zwischen berechneten und experimentellen Werten (Mittelwert M, Varianz s², Spannweite Span) mit Hilfe des Programms SPSS (SPSS Inc.) ermittelt. Die Methodenschwankung (Meth) für die N-Bindung und den N-Saldo wurde bei Vorlage eines berechneten Wertes nach folgender vereinfachter Gl. 3 ermittelt:

$$\text{Methodenstreuung} (\pm \text{kg N ha}^{-1}) = \text{Standardabweichung} \times t\text{-Wert} (\alpha = 0,05) \quad (3)$$

Ergebnisse

Körnerleguminosen

Für den Methodenvergleich wurden graphische Gegenüberstellungen von berechneten und experimentell ermit-

telten Werten über die N-Bindung und die N-Salden erstellt. Die Abb. 1 (oben) zeigt entsprechende Ergebnisse für Körnerleguminosen unter Verwendung des LÄNDER-Verfahrens. Im Vergleich zur 1:1-Achse werden mit dieser Methode niedrige N-Bindungsmengen (insbesondere bei Erbse) um 50-75 kg N ha⁻¹ überschätzt, während hohe Mengen bei Ackerbohne um gleiche Beträge unterschätzt werden. Bei den N-Salden ist keine Übereinstimmung mit den gemessenen Werten zu erkennen. Insbesondere höhere N-Salden der Ackerbohne werden deutlich unterschätzt und niedrige, meistens negative Salden der Erbse werden genauso deutlich überschätzt.

Bei dem von JOST & SCHMIDTKE (2007) vorgestellten Verfahren ist die Einschätzung der N-Nachlieferung aus dem Boden in Stufen erforderlich. Durch Variation entspre-

chender Merkmale, die diesen Prozess ebenfalls beeinflussen (Anbaujahr, Ackerzahl), wurde ein zwischen dem Experiment und dem Ergebnisprotokoll genau entsprechendes Boden-N-Angebot eingegeben. Da diese Genauigkeit unter praktischen Verhältnissen nicht erreicht wird, sind die in Abb. 1 (Mitte) angegebenen Ergebnisse der LENIBA-Methode als potenziell mögliche Genauigkeit des Verfahrens zu interpretieren.

Für die N-Bindung ist gegenüber dem LÄNDER-Verfahren eine vergleichbare Genauigkeit zu erkennen (vgl. Abb. 1, oben): geringe Werte werden z. T. deutlich überschätzt, hohe Werte werden unterschätzt. Auch die berechneten N-Salden weichen erheblich von der 1:1-Achse ab, was besonders für die Werte der Erbse zutrifft. Gegenüber dem LÄNDER-Verfahren werden z. T. noch deutlichere Ab-

Tab. 2: Beschreibung der untersuchten Verfahren zur Berechnung der biologischen N₂-Fixierung
Description of the tested methods to calculate the symbiotic N₂ fixation

Autor	Beschreibung des Verfahrens	Eingangsgrößen	Prinzip der Berechnung	KURZNAME Unabhängigkeit der Prüfdaten ¹⁾
ALBERT et al. (2007)	Verfahren der Ländereinrichtungen für eine manuelle Nutzung oder über das PC-Programm BEFU (www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/befu , Fassung Januar 2008) Futter- und Körnerleguminosen	Leguminosenart (umfangreich), Leguminosenanteil in Stufen, Ernteertrag (FM), N-Fixierungsfaktor	N-Fixierung = Ertrag × N-Fixierungsfaktor; N-Saldo = N-Fixierung - Ertrag × N-Gehalt	LÄNDER (nein)
REINING et al. (1999), STEIN-BACHINGER et al. (2004)	N-Saldo-Rechner als CD-Version auf Basis eines EXCEL-Programms für PC-Nutzung, veränderbare Standardbedingungen für Futterleguminosen (keine Artendifferenzierung)	Leguminosenanteil, Ernteertrag (FM), Nutzungsform, Ernteverluste (im erweiterten Teil u. a. zusätzlich N-Gehalt von Leguminose und Gras)	N-Fixierung = Anteil N-Fixierung am Gesamt-N d. Leguminose × Ertrag × (N-Gehalt Leguminose + Harvest-Index × N-Gehalt EWR) × Verhältnis Leguminose zu Nichtleguminose + Anteil N-Fixierung am Gesamt-N in Nicht-Leguminose × Ertrag × (N-Gehalt Nicht-Leguminose + Harvest-Index × N-Gehalt EWR) × (1 - Verhältnis Leguminose zu Nicht-Leguminose) N-Saldo = N-Fixierung - Ertrag × N-Gehalt	SALDO-RECHNER (nein)
HOGH-JENSEN et al. (2004), LOGES & TAUBE (2007)	mathematische Gleichungen sind (manuell) zu erstellen, kein PC-Anwendungsprogramm verfügbar, für Futterleguminosen und Gemenge	Leguminosenart (eingeschränkt), Leguminosenanteil in Stufen, Ernteertrag (TM), Nutzungsform, Bodenart in Stufen, Parameterwerte u. a. für den N-Gehalt und den fixierten N-Anteil	N-Fixierung = Ertrag × N-Gehalt Leguminose × Anteil N-Fixierung am Gesamt-N d. Leguminose im Spross × (1 + Anteil N-Fixierung in EWR an N-Fixierung Spross am Vegetationsende + Anteil N-Fixierung in Nicht-Leguminose an N-Fixierung Leguminose am Vegetationsende + Anteil N-Fixierung im Boden an N-Fixierung Spross am Vegetationsende) N-Saldo = N-Fixierung - Ertrag × N-Gehalt	HOGH-JENSEN nein

Tab. 2: Fortsetzung
Continue

Autor	Beschreibung des Verfahrens	Eingangsgrößen	Prinzip der Berechnung	KURZNAME Unabhängigkeit der Prüfdaten ¹⁾
JUNG (2003), JOST (2003), Jost & Schmidtke (2007, 2008)	Internet-Fassung des Programms LeNiBa auf der Homepage www.isip.de (Fassung Januar 2008) zur PC-Nutzung, für einige Körner- und Futterleguminosenarten	Leguminosenart (eingeschränkt), Leguminosenanteil in Stufen, Nutzungsform, Anbaujahr, Ackerzahl, Boden-N-Nachlieferung in Stufen, Ernteertrag (FM), Witterung in Stufen, Verunkrautung zur Ernte in Stufen, Ernteverluste in Stufen, Rohproteingehalt, Restfeuchte	Gesamt-N = f (Ertrag, Restfeuchte, Ernteverluste, N-Gehalt, N-Harvest-Index, Witterung) Boden-N = f (Jahresbasiswert, Ackerzahl, N-Nachlieferung, Verunkrautung) N-Fixierung = f (Gesamt-N, Boden-N, N-Referenzpflanze, N-Rhizodeposition) N-Saldo = N-Fixierung - N-Entzug	LENIBA nein
KOLBE & KÖHLER (2008)	als Kurz- (auch manuell berechenbar) und Langfassung im PC-Programm BEFU, Teil Ökologischer Landbau (www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/befu, Fassung Januar 2008), für Körner- und Futterleguminosen	<i>Kurzfassungen:</i> Leguminosenart (umfangreich), Leguminosenanteil in Stufen, Ernteertrag (FM), N _{min} Frühjahr (bei Körnerleguminosen), Nutzungsform (Schnitt, Mulch) <i>Langfassungen:</i> Leguminosenart (umfangreich), Leguminosenanteil, Ernteertrag (FM), N _{min} Frühjahr (bei Körnerleguminosen), Nutzungsform je Einzelaufwuchs (Schnitt, Mulch, Weide), Erntezeitpunkt in Stufen, Ernteverluste nach Nutzungsart in Stufen, Witterung (extreme Trockenheit)	<i>Körnerleguminosen Kurzfassung:</i> N-Saldo = f (Ertrag, N-Gehalt, N _{min} Frühjahr) N-Fixierung = N-Saldo + N-Entzug <i>Körnerleguminosen Langfassung:</i> Verhältnis N-Saldo zu N-Entzug = f (Ertrag, N-Harvest-Index, N _{min} Frühjahr) N-Harvest-Index = f (Ertrag, N _{min} Frühjahr) N-Saldo = N-Entzug × Verhältnis N-Saldo zu N-Entzug N-Fixierung = N-Saldo + N-Entzug <i>Futterleguminosen:</i> <i>Kurzfassung</i> (einfache lineare Gleichungsglieder) <i>Langfassung</i> (komplexe lineare, quadratische, Wechselwirkungsglieder): N-Fixierung = f (Ertrag, N-Gehalt, Leguminosen-Anteil, Nutzungsform) N-Saldo = f (Ertrag, N-Gehalt, Leguminosen-Anteil)	ÖKO-BEFU nein

1)Unabhängigkeit der Prüfdaten entsprechend Tab. 1: (nein) = Verwendung kann zum Aufbau des Verfahrens nicht ausgeschlossen werden, nein = teilweise Verwendung zum Aufbau des Verfahrens

PC= Personalcomputer, EWR = Ernte- und Wurzelrückstände, TM = Trockenmasse, FM = Frischmasse

weichungen gefunden, die Streuung der Werte ist höher und die Übereinstimmung ist eher geringer.

Eine Verringerung der postulierten Rhizodeposition auf 13% der N-Bindung (vgl. SCHMIDTKE 2008) brachte für die Ackerbohne keine Verbesserung in der Übereinstimmung der N-Bindung und der N-Salden gegenüber den experimentell ermittelten Werten (ohne Abb.). Dagegen waren für Erbsen

die Werte beider Merkmale z. T. deutlich besser an die 1:1-Achse angepasst, wenn die LENIBA-Berechnungen mit der Einstellung auf warm/trocken erfolgt sind (Abb. 1, LENIBA II). Bei den N-Salden können auch negative Werte berechnet werden, doch können die grundsätzlichen Abweichungen (niedrige Werte zu hoch geschätzt und umgekehrt) auch durch diese Korrekturstellung nicht behoben werden.

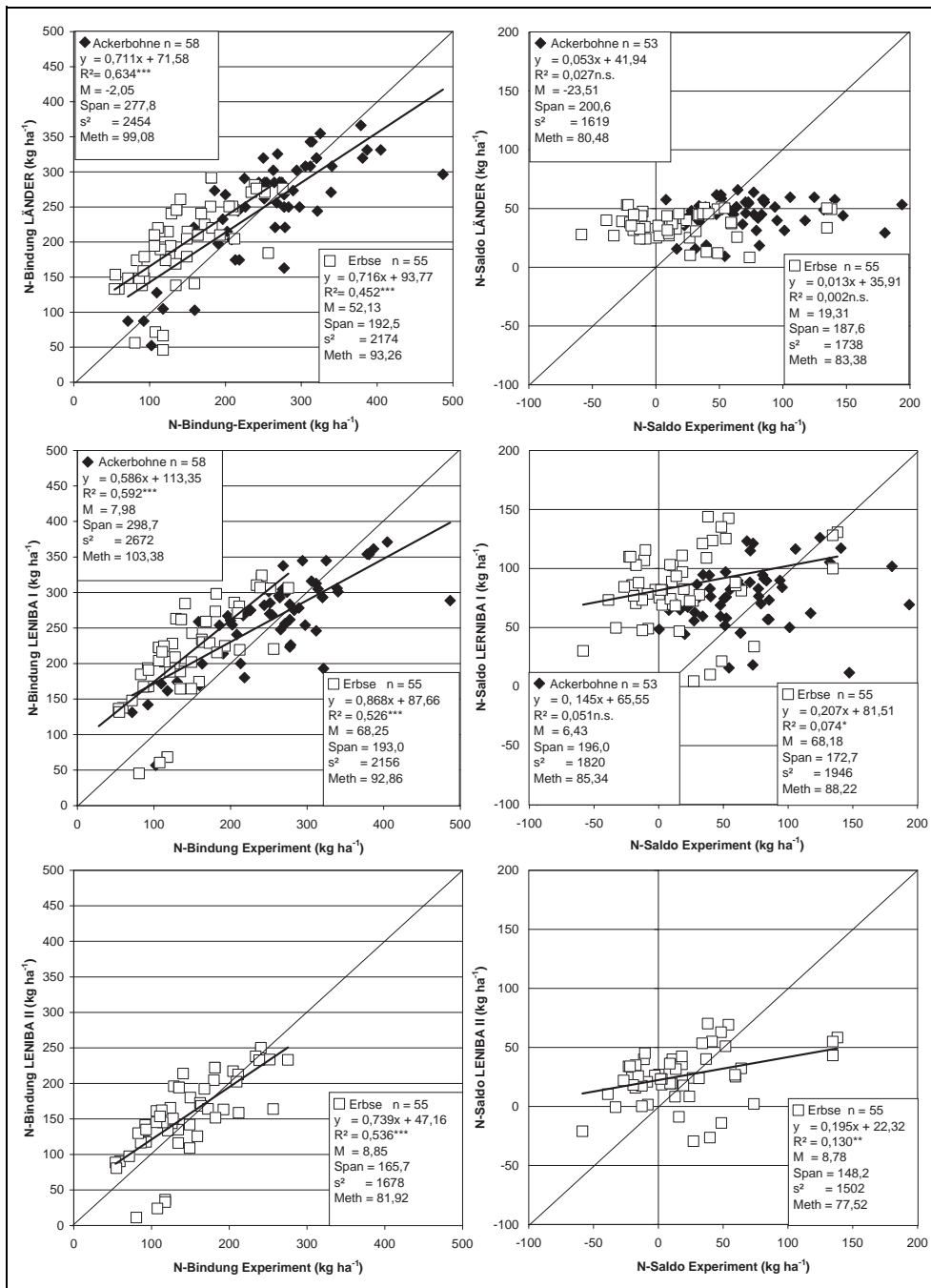


Abb. 1: Vergleich zwischen experimentell ermittelten und berechneten Werten der N-Bindung (links) und N-Salden (rechts) für Körnerleguminosen: LÄNDER-Verfahren (oben), LENIBA-I (Mitte), LENIBA-II (Einstellung: warm & trocken, unten); statistische Maßzahlen s. Text
Comparison of experimentally determined and calculated values of N fixation (left) and N balances (right) for grain legumes: LÄNDER method (above), LENIBA-I (centre), LENIBA-II (setting: warm & dry, below); statistical parameters cf. text

Als weitere Verfahren wurden die im ÖKO-BEFU implementierten Methoden untersucht, die in einer Kurz- und in einer Langform vorliegen. Die unter Nutzung einfacher mathematisch-statistischer Gleichungen berechneten Ergebnisse zeigt Abb. 2 (oben). Trotz ebenfalls erheblicher Streuung der Einzelwerte wird eine relativ hohe Übereinstimmung bei den N-Bindungsmengen und den N-Salden mit der 1:1-Achse ermittelt, was besonders für die Erbse zutrifft. Insgesamt entsteht der Eindruck, dass im Vergleich zum LENIBA-Verfahren mit den Kurzfassungen des ÖKO-BEFU-Verfahrens eine vergleichbare bis etwas bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten besteht. Gegenüber den Kurzfassungen wird eine nochmals etwas verbesserte Abbildung der experimentell ermittelten Werten in der N-Bindung sowie eine z. T. deutliche Verbesserung der Werte für die N-Salden der Ackerbohne und der Erbse bei den Langfassungen des ÖKO-BEFU-Verfahrens festgestellt (Abb. 2, unten). Die Streuung der Einzelwerte

sowie die Überbewertung niedriger und die Unterbewertung hoher Werte fallen geringer aus und die Mittelwerte der N-Salden stimmen weitgehend mit den experimentellen Werten überein.

Bei allen untersuchten Verfahren besteht eine große Spannweite (Span) und Streuung (s²) der Differenzen zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten (Abb. 1, 2). Die Ackerbohne weist z. T. deutlich höhere Spannweiten auf als die Erbse und keines der Verfahren tritt durch eine besonders gute Übereinstimmung hervor. Die geringsten Spannweiten und Varianzen der ausgewiesenen Werte für die N-Bindung und die N-Salden weist bei Ackerbohne das Verfahren ÖKO-BEFU-lang auf. Die Ergebnisse für die Erbse sind durch eine geringere Streuung gekennzeichnet. Zu den Bestimmungsverfahren mit der geringsten Streuung und der höchsten Übereinstimmung (R²) mit den experimentellen Werten zählen die ÖKO-BEFU- und das LENIBA II-Verfahren.

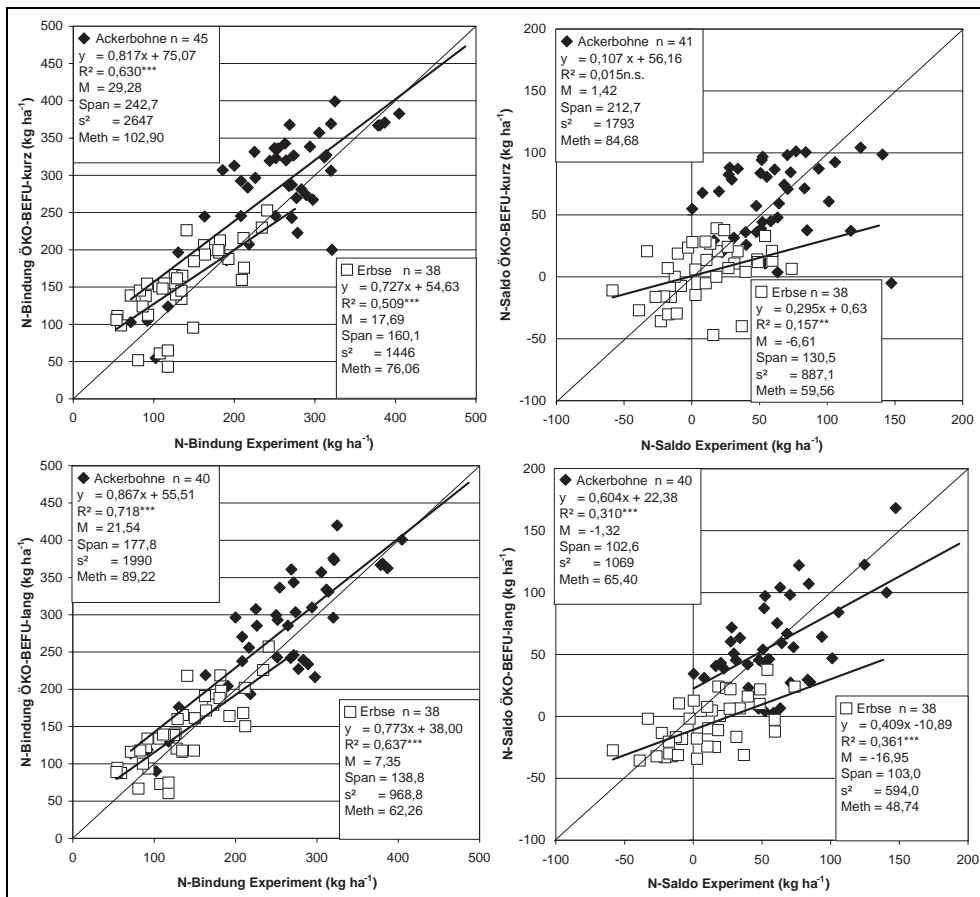


Abb. 2: Vergleich von experimentell ermittelten und berechneten Werte für die N-Bindung (links) und die N-Salden (rechts) für Körnerleguminosen: ÖKO-BEFU-kurz (oben), ÖKO-BEFU-lang (unten); statistische Maßzahlen s. Text

Comparison of experimentally determined and calculated values of N fixation (left) and N balances (right) for grain legumes: ÖKO-BEFU-short (above), ÖKO-BEFU-long (below); statistical parameters cf. text

Bei den ausgewiesenen statistischen Kennzahlen fällt weiterhin die relativ geringe Methodensicherheit (Meth) auf, die für die N-Bindung der Ackerbohne bei den besten Verfahren kaum unter ± 90 bzw. für den Saldo um ± 65 kg N ha⁻¹ beträgt. Die geringste Methodenstreuung wurde für die Langversion des ÖKO-BEFU-Verfahrens ermittelt. Der Abstand zwischen diesem und dem jeweils ungünstigsten Verfahren beträgt bei der N-Bindung in der Methodensicherheit 16% und in der Varianz 34%. Da die entsprechenden Werte beim N-Saldo um ca. 100% höher liegen, kann festgestellt werden, dass Bemühungen zur Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit bei den N-Salden eher zum Erfolg geführt haben als bei der N-Bindung.

Die Methodenunterschiede treten bei der Erbse deutlicher hervor. Bei dem Verfahren ÖKO-BEFU-lang liegt die Methodenstreuung bei der N-Bindung mit ± 62 kg und beim N-Saldo mit ± 49 kg N ha⁻¹ jeweils ca. 20 kg niedriger als bei der Ackerbohne. Auch der Abstand zu den ungünstigsten Verfahren beträgt bei der N-Bindung (beim N-Saldo) mit 124% (238%) in der Varianz und mit 50% (81%) bei der Methodenstreuung deutlich höhere Werte. Weitere günstige statistische Eigenschaften weisen für die Erbse die Verfahren ÖKO-BEFU-kurz und LENIBA II auf (Abb. 1, 2).

Futterleguminosen und Gemenge

Zunächst werden Ergebnisse mit dem LÄNDER-Verfahren vorgestellt (Abb. 3, oben). Zwischen den experimentell ermittelten und berechneten Daten gibt es eine relativ gute Übereinstimmung für die N-Bindung bei Luzerne und Rotklee. Ähnlich wie bei den Körnerleguminosen erfolgt jedoch auch bei den Futterleguminosen eine zu hohe Berechnung niedriger Werte von bis zu 50 kg N ha⁻¹ bei Lu-

zernerne und eine zu niedrige Berechnung hoher Werte, wobei insbesondere die N-Bindung des Rotklees um bis zu 100 kg N ha⁻¹ unterschätzt wird.

Wie aus Abb. 3 weiterhin hervorgeht, ist jedoch für den größten Datenbereich keine oder nur eine geringe Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten N-Salden zu erlangen, obwohl die Streuung der ermittelten N-Salden relativ niedrig ist. Entsprechend der mathematisch fixierten Verrechnungswerte können nur negative Ergebnisse erzielt werden.

Bei der Methode von HOGH-JENSEN et al. (2004) kann eine Differenzierung der Berechnung nach den Bodenarten vorgenommen werden, auf denen die Leguminosenbestände herangewachsen sind (Abb. 3). Ohne näher auf die genaue Einteilung der Standorte einzugehen (es wurden die experimentell ermittelten Daten sowohl auf leichten als auch auf schweren Böden erhoben, siehe Tab. 1), ist bei den N-Salden deutlich zu sehen, dass für die Gemenge kaum eine Übereinstimmung mit den gemessenen Werten der N-Salden besteht. Es werden jeweils deutlich höhere Werte berechnet als im Experiment ermittelt worden sind. Die N-Salden der Reinbestände an Luzerne und Rotklee (nicht extra ausgewiesen) stimmen in der absoluten Höhe zwar besser überein. Dennoch werden ähnliche Abweichungen gefunden, die auch bereits im LÄNDER-Verfahren für die Luzerne beschrieben worden sind: zu hohe Werte bei experimentell ermittelten niedrigen Werten und umgekehrt. Dagegen stimmen - unabhängig von der gewählten Bodenart - die Werte der N-Bindung relativ gut mit experimentellen Daten überein, während es hier zu einer erheblichen Überschätzung der Rotkleeerwerte kommt, die im Durchschnitt um 100-200 kg N ha⁻¹ höher liegen als im Experiment (Abb. 3). Auf Grund des großen Unterschiedes zwischen gemessenen und berechneten Werten wurde auf

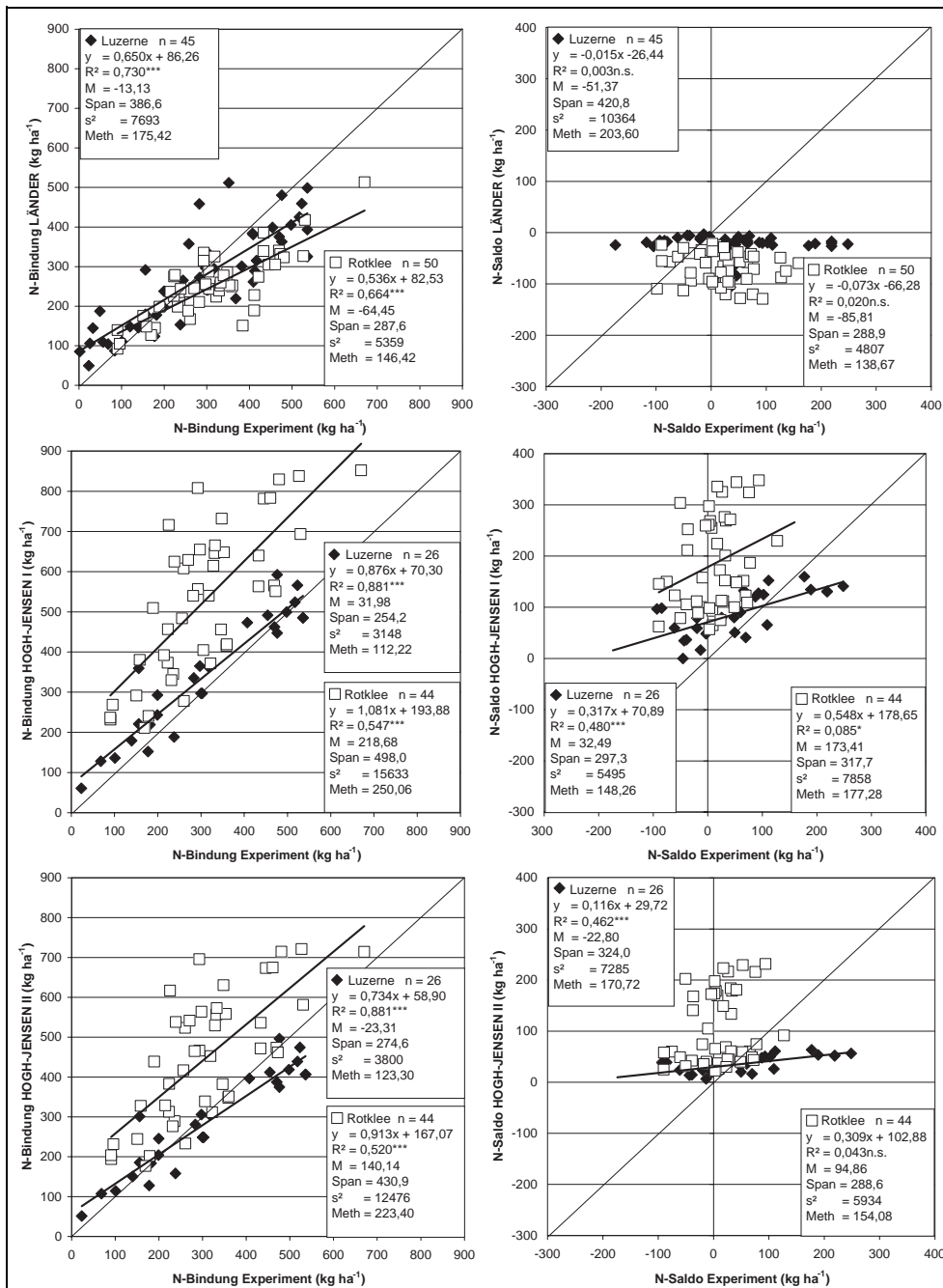


Abb. 3: Vergleich von experimentell ermittelten und berechneten Werten der N-Bindung (links) und N-Salden (rechts) für Futterleguminosen: LÄNDER (oben), HOGH-JENSEN (Einstellung für schwere Böden: Mitte; leichte Böden: unten); statistische Maßzahlen s. Text
Comparison of experimentally determined and calculated values of N fixation (left) and N balances (right) for fodder legumes: LÄNDER (above), HOGH-JENSEN (setting for heavy soils: centre, light soils: below); statistical parameters cf. text

eine detaillierte Aufgliederung des Datenmaterials nach den Standorten verzichtet.

Nachfolgend wurde das Verfahren von STEIN-BACHINGER et al. (2004) geprüft (Abb. 4, SALDO-RECHNER). Aus der Gegenüberstellung der N-Bindungsmengen kann eine relativ hohe Übereinstimmung zwischen Experiment und Modell abgeleitet werden. Bei diesem Verfahren erfolgt keine Kalkulation zu niedriger Werte bei hohen gemessenen N-Bindungsmengen, da ein weitgehend paralleler Verlauf im Vergleich zur 1:1-Achse festzustellen ist. Allerdings werden durchschnittlich um ca. 60 kg N ha⁻¹ zu hohe Werte der N-Bindung ermittelt. Mit dem SALDO-RECHNER-Verfahren können bei Reinkulturen von Rotklee und Luzerne offensichtlich keine negativen Salden erstellt werden, zudem weichen die anderen Anbau- und Nutzungsformen deutlich von der Ideallinie ab (nicht extra ausgewiesen, vgl. Tab. 1). Auch für dieses Schätzverfahren ist eine erhebliche Streubreite der berechneten Einzelwerte im Vergleich zu den experimentellen Daten gegeben.

Für das LENIBA-Verfahren besteht ebenfalls keine enge Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten für die N-Bindung und die N-Salden von Rotklee und Luzerne (Abb. 4). Niedrige Werte in der N-Bindung aber auch im N-Saldo werden zu hoch berechnet und hohe experimentelle Werte z. T. deutlich zu niedrig geschätzt. Dieses Missverhältnis bei den extremen Werten ist beim N-Saldo besonders bei der Luzerne ausgeprägt. Die Übereinstimmung mit der 1:1-Achse ist bei den N-Salden allerdings höher als bei den bisher vorgestellten Ergebnissen der anderen Verfahren. Es können mit dem LENIBA-Verfahren positive und negative Werte bei den N-Salden ermittelt werden. Eine Veränderung der zugrunde gelegten Rhizodepositionswerte auf 20% für Luzerne brachte hingegen eine etwas geringere Übereinstimmung mit den experimentellen Daten (ohne Abb.).

Bei Verwendung der Einzelgleichungen der Kurzfassungen des ÖKO-BEFU-Verfahrens ist eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse mit den 1:1-Achsen für beide Legu-

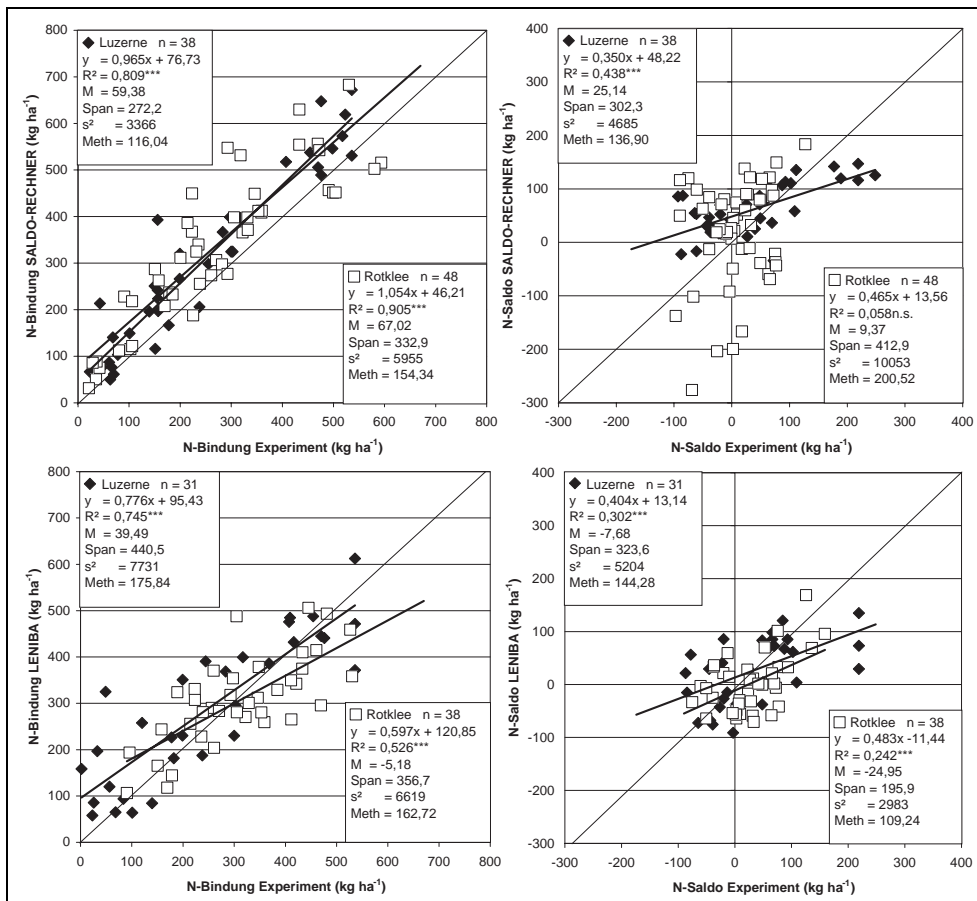


Abb. 4: Vergleich zwischen experimentell ermittelten und berechneten Werten der N-Bindung (links) und der N-Salden (rechts) bei Luzerne und Rotklee: SALDO-RECHNER (oben), LENIBA (unten); statistische Maßzahlen s. Text
Comparison of experimentally determined and calculated values of N fixation (left) and N balances (right) for alfalfa and red clover: SALDO-RECHNER (above), LENIBA (below); statistical parameters cf. text

minosenarten erreicht worden (Abb. 5). Die mathematischen Gleichungen der Langfassungen für Luzerne und Rotklee sind komplizierter als die der Kurzfassungen. Durch die jeweiligen quadratischen Glieder an Stelle von linearen Beziehungen im Gleichungssystem wurden Ergebnisse erzielt, die meistens eine nochmals bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Werten aufweisen, was besonders für den Rotklee zutrifft.

Die in den Abbildungen ausgewiesenen Spannweiten (Span) der Ergebnisse der geprüften Schätzverfahren sind für die Futterleguminosen z. T. deutlich größer als bei den Körnerleguminosen (vgl. Abb. 1-2 u. Abb. 3-5). Zwischen den Methoden bestehen zudem größere Unterschiede. Für die Luzerne weisen die ÖKO-BEFU-Verfahren sowie das LENIBA-Verfahren neben relativ geringen Streubreiten (s²) Mittelwerte (M) aus, die in hoher Übereinstimmung mit den experimentellen N-Salden stehen. Dies trifft ebenfalls für den Rotklee zu, wobei bei dieser Art noch die relativ geringe Streubreite der Werte hervorzuheben ist. Weiterhin sind die Verfahren HOGH-JENSEN und SALDO-RECHNER für die N-Bindung bei Luzerne und das LENIBA-Verfahren für die Rotklee-N-Salden mit günstigen Eigenschaften auszuweisen.

Beim Vergleich der ermittelten mathematisch-statistischen Kennzahlen treten Widersprüche in der Charakterisierung der Methodengenauigkeit (Meth) zwischen einzelnen Merkmalen zutage. Der Vergleich erfolgt daher unter Beachtung mehrerer Kennwerte sowohl für die N-Bindung als auch für die N-Salden. Bei den Bestimmungsverfahren, bei denen auch Ergebnisse aus Leguminosen-Nichtleguminosen-Gemenge und Mulchvarianten berücksichtigt werden können, wurden auch die entsprechenden Datensätze berechnet, sodass sich die Anzahl der berechneten Varianten (n) entsprechend unterscheiden kann. Besonders für die N-Bindung der Luzerne werden für die Verfahren

HOGH-JENSEN und SALDO-RECHNER die geringsten Werte für die Methodenstreuung und z. T. auch für die Varianz ausgewiesen, während die ÖKO-BEFU- und das LENIBA-Verfahren durch eine höhere Güte aller weiteren statistischen Kennzahlen charakterisiert sind. Die ausgewiesene Methodenstreuung der besten Verfahren beträgt für die N-Bindung der Luzerne um ± 115 kg, während für die N-Salden Werte von ± 137 - 145 kg N ha⁻¹ angenommen werden können. Die jeweils ungünstigsten Verfahren liegen bei der Varianz um 120-146% und bei der Methodenstreuung um 50-57% darüber.

Für den Rotklee sind die Methodenunterschiede in den erfassten statistischen Kennzahlen wesentlich stärker ausgeprägt als bei der Luzerne. Zwischen den besten und den ungünstigsten Verfahren sind Unterschiede von 350-870% bei der Varianz und von 110-210% bei der Methodenstreuung ermittelt worden. Das Schätzverfahren ÖKO-BEFU-lang weist die geringste Methodenstreuung auf. Bei diesem Verfahren wird eine Methodensicherheit für die N-Bindung von ± 118 kg N ha⁻¹ und für die N-Salden von ± 89 kg N ha⁻¹ veranschlagt. Neben dem ÖKO-BEFU-kurz sind das LENIBA- und mit Abstrichen auch das SALDO-RECHNER-Verfahren durch günstige Eigenschaften gekennzeichnet (Abb. 3-5).

Diskussion

Vor Beginn der eigentlichen Modellüberprüfungen war es von besonderer Wichtigkeit, aus den wenigen verfügbaren Quellen ein ausreichend umfassendes und durch unterschiedliche Standortbedingungen gegliedertes Datenmaterial über die symbiotische N-Bindung der untersuchten Leguminosenarten und Nutzungsweisen zusammen zu tra-

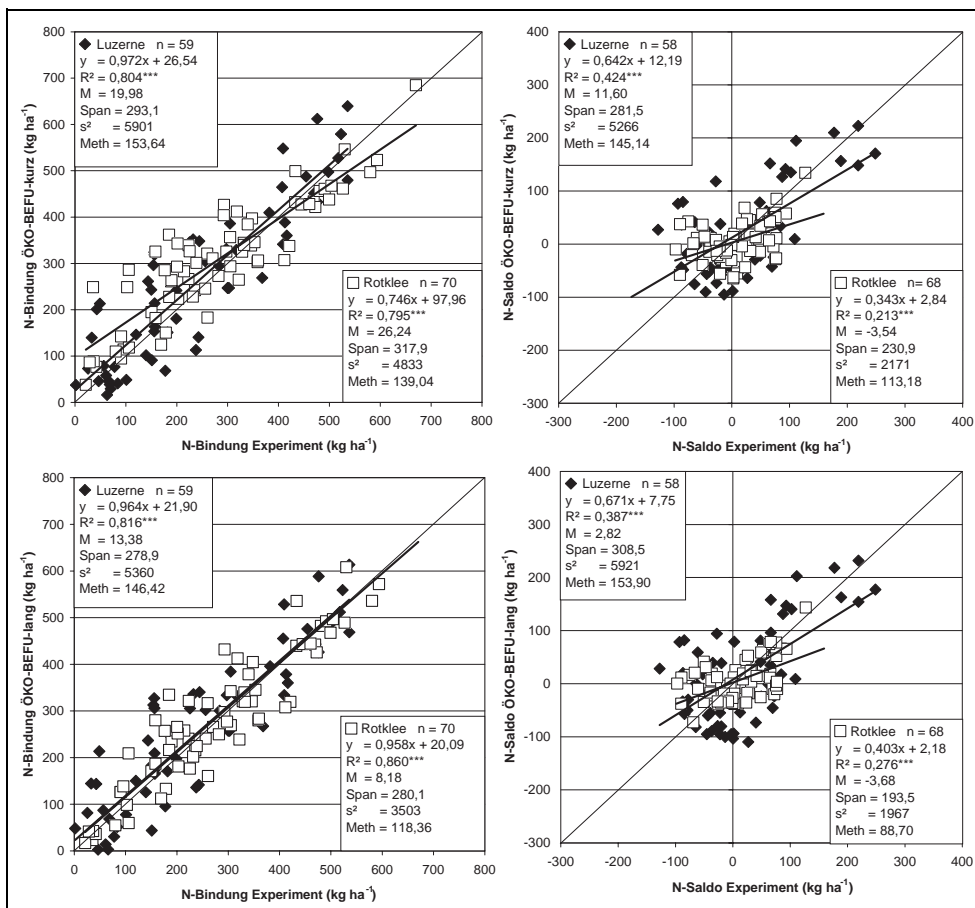


Abb. 5: Vergleich zwischen experimentell ermittelten und mit Hilfe des ÖKO-BEFU-Verfahrens berechneten N-Bindungen (links) und der N-Salden (rechts) bei Luzerne und Rotklee für die Kurzfassung (oben) und die Langfassung (unten); statistische Maßzahlen s. Text
 Comparison of experimental and calculated values for N fixation (left) and N balances (right) for alfalfa and red clover using the short version (above) and long version (below) of the ÖKO-BEFU procedure; statistical parameters cf. text

gen (siehe Tab. 1). Anschließend erfolgte eine strenge Sichtung des Datenmaterials, um Ausreißer zu erkennen und von einer weiteren Verwendung auszuschließen. Wenn es möglich war, wurden Mittelwerte gebildet, wie z. B. bei Vorlage von Ergebnissen mehrerer ¹⁵N-Bestimmungsmethoden, um die Sicherheit des Datenmaterials zu erhöhen. Bei der Interpretation der erlangten Ergebnisse gilt es zu bedenken, dass insbesondere für die nachfolgend genannten Merkmale erhebliche statistische Streubreiten in Kauf genommen werden müssen (siehe HARDARSON & DANSO 1993, GOINS & RUSSELLE 1996, JOST 2003, SCHMIDTKE 2005, 2008, HEUWINKEL 2007):

- ¹⁵N-Bestimmungsmethoden zur Ermittlung des aus der Atmosphäre stammenden N-Anteils
- Strohanteil bei Körnerleguminosen wegen Blattfall vor Ernte
- EWR-Mengen, insbesondere der Wurzelanteil
- N-Rhizodeposition.

Die allgemeine Verbreitung und die Häufigkeit der Anwendung einer Methode sind abhängig von der Modellkomplexität, Transparenz, Anwenderfreundlichkeit und von der Verfügbarkeit der Eingabemerkmale. Dieser Grundsatz gilt besonders dann, wenn ein Verfahren in die landwirtschaftliche Praxis und Beratung Eingang finden soll oder sogar z. B. zur Erfüllung hoheitlicher und gesetzlicher Erfordernisse (ANONYM 2007) vorgegeben wird. Neben der Anwendung von Pauschalsätzen für die legume N-Bindung (z. B. DÄMMGEN 2007) zur Berechnung von regionalen oder nationalen Nährstoffbilanzen bestehen die Kalkulationsunterlagen für die Praxis, Beratung und Verwaltung daher aus leicht verständlichen mathematischen Gleichungen oder Schaubildern unter Verwendung von einfach zu erhebenden Grunddaten (STEIN-BACHINGER et al. 2004, BACH & FREDE 2005, SCHMIDTKE 1996, 2008).

So ist bei dem hier geprüften LÄNDER-Verfahren zur Berechnung der N-Bindungsmenge aus einem Tabellenwerk lediglich eine Auswahl der Leguminosenart und des Anbauverhältnisses als Reinbestand oder als Gemenge erforderlich, um anschließend den ermittelten Ernteertrag mit einem bestimmten N-Fixierungsfaktor zu multiplizieren (siehe Tab. 2). Der N-Saldo wird ermittelt, indem von der berechneten N-Bindungsmenge der N-Entzug mit dem Ernteprodukt (= Ertrag x N-Gehalt) abgezogen wird (ALBERT et al. 2007, ZORN et al. 2007).

Da z. B. bei den Körnerleguminosen der N-Gehalt für die Reinbestände oft niedriger fixiert wurde als der N-Bindungsfaktor, können somit keine negativen N-Salden erlangt werden. Auf Grund dieser mathematischen Gesetzmäßigkeiten kommt es bei dem LÄNDER-Verfahren zu den beschriebenen deutlich gerichteten Abweichungen der berechneten N-Salden im Vergleich zu den Versuchsdaten. Durch die dafür meistens vorhandene Vielschichtigkeit der zu verwendenden Koeffizienten für die verschiedenen Leguminosen- und Nutzungsarten kann dagegen nur eine geringe bis gar keine Verbesserung der Übereinstimmung mit experimentellen Werten erlangt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse des LÄNDER-Verfahrens im Vergleich zu den anderen getesteten Methoden mit wenigen Ausnahmen (Ackerbohne: N-Bindung) mit den größten Abweichungen zu experimentell ermittelten Werten, mit der geringsten Methodensicherheit und der größten, z. T. deutlich gerichteten Streuung der Einzelwerte behaftet sind. Diese Feststellung hat eine umso größere Bedeutung, da gleichzeitig diese Verfahren mit Abstand am weitesten verbreitet und angewendet werden. Gegenüber früheren Versionen des LÄNDER-Verfahrens wurde sogar eine Verringerung der Berechnungsgenauigkeit bewirkt (vgl. KOLBE & KÖHLER

2008). Eine grundsätzliche Verbesserung des Verfahrens ist nur gegeben, wenn eine Aufnahme weiterer wichtiger Faktoren in das Gleichungssystem erfolgt.

Bei dem LÄNDER-Verfahren handelt es sich zunächst um ein von ALBERT et al. (1997) zur Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis vereinfachtes Schätzverfahren. Die methodischen Grundlagen wurden an der Universität Halle entwickelt. Ausführliche Versionen dieser im Wesentlichen auf so genannte erklärenden mathematischen Gleichungen aufbauenden Methoden haben Eingang im Programm REPRO gefunden (BIERMANN 1995, HÜLSBERGEN 2003) und wurden auch zur Erstellung des SALDO-RECHNER-Verfahrens verwendet (BACHINGER & ZANDER 2003). Auf Grund von Vergleichsrechnungen bestanden allerdings nur geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen, die nach der vereinfachten und der ausführlichen Version berechnet worden sind (ALBERT et al. 1997). Hierdurch konnte nachgewiesen werden, dass bestimmte Eigenschaften des LÄNDER-Verfahrens auch in den verwandten Methoden vorzufinden sind. So kann z. B. an den berechneten Saldo-Werten des HOGH-JENSEN- und SALDO-RECHNER-Verfahrens für die Rotklee- und Luzerne-Reinbestände aufgezeigt werden, dass jeweils keine negativen Werte berechnet werden können, wodurch auch bei diesen Methoden ein bedeutender Anteil der Methodenstreuung auf diese mathematische Fehlerquelle zurückgeführt werden kann.

Die in diesem Methodenvergleich geprüften Verfahren HOGH-JENSEN und SALDO-RECHNER enthalten mathematische Gleichungen zur Berechnung der legumen N-Bindung in mehr oder weniger ausführlicher Form (siehe Tab. 2). Als Durchschnittswerte für einige Parameter, wie z. B. den N-Harvest-Index oder den N-Fixierungsanteil, werden entweder fixe Werte aus der Literatur (z. B. BACHINGER & ZANDER 2003) oder fallspezifische Werte, z. B. bei einer stufenweisen Festsetzung der Boden-N-Aufnahme zur indirekten Charakterisierung des N-Fixierungsanteils, in den Modellen HOGH-JENSEN und LENIBA verwendet.

Diese analytische Vorgehensweise im Modellbau der Schätzverfahren hat jedoch im Vergleich zu dem LÄNDER-Verfahren bisher zu keinen deutlichen Fortschritten in der Genauigkeit geführt. Lediglich bei den Futterleguminosen ist bei einigen Verfahren eine Verbesserung festgestellt worden (z. B. LENIBA oder SALDO-RECHNER). Zudem war oft nur eine bessere Übereinstimmung mit experimentellen Werten gegeben, wenn bestimmte Teilmengen unter Sondereinstellungen gerechnet worden sind. Das trifft z. B. bei LENIBA II für die Erbse durch Einstellung auf trocken/warm oder bei HOGH-JENSEN durch Einstellung auf leichte oder schwere Böden zu. Diese extremen Witterungsverhältnisse und eine entsprechende Bodeneinteilung waren aber nur bei einem Teil der experimentellen Ergebnisse zutreffend. Aus dieser Aufstellung und den offensichtlichen mathematischen Grundfehlern in einigen Verfahren kann abgeleitet werden, dass eine weitere Ungenauigkeit darin besteht, dass beim Modellbau die wichtige Phase der Validierungsarbeiten nicht sorgfältig durchgeführt worden ist. Eine sensible Fixierung der Parameterwerte bzw. eine weitere Untergliederung von Parametern, die durch den Nutzer auszuwählen sind, könnte die Genauigkeit dieser Verfahren deutlich erhöhen.

Auf Grund detaillierter mathematisch-statistischer Auswertungen der aufgenommenen Datensätze für die vier Leguminosenarten konnten ganz spezifische Wirkungsmechanismen zur Bestimmung der N-Bindung und der N-Salden ermittelt werden. Hierbei stellte sich heraus, dass gerade Merkmale, die als statische Koeffizienten (Parameterwerte) in den Verfahren genutzt werden, einer deutlichen

Variabilität unterliegen und deswegen für die Genauigkeit entscheidend mitverantwortlich sind (siehe HEUWINKEL 2007, KOLBE & KÖHLER 2008). Aus diesem Grund können Validierungsarbeiten an diesen Verfahren auch deutliche Grenzen bei den potenziell zu erwartenden Verbesserungsmöglichkeiten aufweisen.

So bestehen zwar relativ enge statistische Korrelationen zwischen den Kornerträgen der Körnerleguminosen bzw. den Aufwüchsen der Futterleguminosen und der N-Bindung (LOGES 1998, JOST 2003, JUNG 2003), so dass diese Beziehungen in verschiedenen Ausprägungen oft als grundlegende Elemente in die Modelle aufgenommen werden. Bei den eigenen Auswertungsarbeiten konnte jedoch aufgezeigt werden, dass diese Relationen keine statischen Beziehungen sind, sondern von vielen Faktoren verändert werden, die über den Standort (Boden, Klima) und den Pflanzenbestand (Art, Vegetationsphase) wirken. Einige von diesen Merkmalen sind prinzipiell von den Verfahrensnutzern zu ermitteln. Dazu können z. B. die Leguminosenart, der Leguminosenanteil im Gemenge, das Vegetationsstadium sowie Boden- und Wittereigenschaften gezählt werden. Diese Merkmale können daher zur weiteren Differenzierung in die Modelle aufgenommen werden. Eine möglichst genaue Erfassung der Erträge und des Leguminosenanteils ist hierbei von entscheidender Bedeutung (STEIN-BACHINGER et al. 2004, HEUWINKEL 2007).

Andere Merkmale sind dagegen nicht bekannt und können auch nicht mit höherem Aufwand bereitgestellt werden. Hierzu zählen z. B. der N-Harvest-Index oder der N-Fixierungsanteil in Relation zur aufgenommenen N-Menge des Pflanzenbestandes. Die Beziehungen zwischen Ertrag und N-Bindungsmenge sowie die daraus abgeleiteten N-Salden werden aber gerade durch diese beiden Merkmale deutlich variiert (KOLBE & KÖHLER 2008). Auch SCHMIDTKE (1997a, b), CUTTLE et al. (2003), JOST (2003), JUNG (2003), ANTHES (2005), WICHMANN et al. (2006) und HEUWINKEL (2007) weisen auf die Wichtigkeit dieser Faktoren hin. Die entscheidende Herausforderung ist daher bei den Modellierungsarbeiten, ob es gelingt, diese oft hoch dynamischen Prozesse in die Verfahren integrieren zu können, damit eine genaue Berechnung überhaupt erreicht werden kann.

Der N-Harvest-Index drückt das Verhältnis zwischen den N-Mengen aus, die in den Pflanzenteilen der Wurzeln, Stoppeln (im Futterbau) und des Stroh (Körnerleguminosen) auf der Fläche verbleiben, im Verhältnis zu den N-Mengen, die mit der Erntesubstanz von der Fläche entfernt werden. Auf Grund detaillierter mathematisch-statistischer Auswertungsarbeiten wurde deutlich, dass besonders bei den Körnerleguminosen z. T. artspezifische Einflüsse verschiedener Umweltbedingungen (Klima, Bodenfruchtbarkeit) und des Wachstumsverlaufs auf dieses Verhältnis vorliegen (KOLBE & KÖHLER 2008).

Da der N-Harvest-Index nicht vom Anwender ermittelt werden kann, ist nur eine Verbesserung der Modellstruktur möglich, wenn es gelingt, dieses Merkmal in indirekter Weise zu berücksichtigen. So wurde versucht, durch eine Stufeneinstellung für Erbsen im Modell LENIBA diese Wirkungen einer unterschiedlichen Witterung auf den N-Harvest-Index auszudrücken. Im ÖKO-BEFU-Verfahren wurde ein anderer Weg eingeschlagen. Eine Analyse der Einflussfaktoren brachte einen relativ engen, deutlich nichtlinearen dreidimensionalen Einfluss von steigenden Kornerträgen und ansteigenden N_{\min} -Mengen im Frühjahr auf die N-Harvest-Indices der Körnerleguminosen zu Tage (KOLBE 2005). Auch SCHMIDTKE & RAUBER (2000) konnten die positive Wirkung steigender Erträge und ANTHES (2005) den Einfluss der N-Ernährung auf die N-Harvest-Indices bestätigen. Da die Merkmale Ertrag und N_{\min} -Gehalt als Eingangs-

bevariablen vorzusehen waren, ist es durch Integration eines relativ komplexen Gleichungssystems in das Gesamtmodell gelungen, den Einfluss des N-Harvest-Indexes zu berücksichtigen (siehe Tab. 2). Neben der Implementierung komplexerer Gleichungen (mit quadratischen und Wechselwirkungsgliedern) ist die indirekte Integration des N-Harvest-Indexes eine bedeutende Ursache für die Zunahme der Berechnungsgenauigkeit der Langfassungen des ÖKO-BEFU-Verfahrens für Körnerleguminosen, für deren Nutzung allerdings ein Personalcomputer erforderlich ist.

Eine vergleichbare Vorgehensweise führte allerdings bei den Futterleguminosen zu keiner Verbesserung der Ergebnisse. Bei Luzerne und Rotklee sind zwar grundsätzlich auch Effekte des Harvest-Indexes nachzuweisen, diese üben aber nicht so einen ausgeprägten Einfluss auf die N-Bindung und die N-Salden aus. Es gelang daher nicht, diesen Einfluss über indirekte Beziehungen in die mathematischen Gleichungen zu integrieren (KOLBE & KÖHLER 2008).

Eine steigende N-Düngung oder N-Verfügbarkeit im Boden führt zu einer deutlichen Abnahme der N-Fixierungsanteile bei verschiedenen Leguminosenarten (WEISSBACH 1995, BOLLER et al. 2003, KOLBE 2004, ANTHES 2005). Auswertungsarbeiten von JUNG (2003) und JOST (2003) zum Aufbau des LENIBA-Verfahrens haben gezeigt, dass eine Verbesserung erreicht werden kann, wenn die Aufnahme an Stickstoff aus dem Bodenvorrat quantifiziert wird. In Relation zur insgesamt aufgenommenen N-Menge des Pflanzenbestandes verhält sich diese N-Menge reziprok zur symbiotisch gebundenen N-Menge und wird im Vergleich zur N-Bindung von den Leguminosen bevorzugt aufgenommen. Die Erfassung der N-Aufnahme aus dem Boden kann auf Grund dieser Arbeiten prinzipiell durch ein Referenzpflanzensystem verbessert werden, welches parallel zum Anbau der Leguminosen untersucht werden muss. Auch ergänzende Angaben im LENIBA-Verfahren über das Anbaujahr sowie die Bodenart oder die Ackerzahl sind geeignet, Auskunft über die N-Verfügbarkeit des Bodens zu geben (JOST & SCHMIDTKE 2008).

Durch die vorgestellten Ergebnisse zum LENIBA-Verfahren konnte deshalb eine verbesserte Berechnung der N-Salden bei den Futterleguminosen nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den früheren Versionen, mit denen Berechnungsergebnisse mit relativ hoher Genauigkeit mit Hilfe tabellarischer Nachschlagewerke erlangt werden (JUNG 2003), wird aber dieser Genauigkeitsgrad im LENIBA-Verfahren offenbar nicht mehr erreicht (vgl. KOLBE & KÖHLER 2008). Außerdem dürfte bei Anwendung des Verfahrens unter praktischen Bedingungen die Genauigkeit reduziert werden, weil die Bodenaufnahme lediglich in Stufen eingeschätzt werden kann und nicht, wie in den hier vorgestellten Ergebnissen, eine passgenaue Eingabe erfolgen kann. Darüber hinaus ist es in der praktischen Durchführung nicht einfach, die Höhe der N-Aufnahme aus dem Boden einzuschätzen, da dieses Merkmal nicht quantitativ vorliegt und bisher auch keine Rolle im üblichen Nährstoffmanagement des Betriebes spielt.

Bei Anwendung des LENIBA-Verfahrens für Körnerleguminosen war im Vergleich zum LÄNDER-Verfahren nur eine geringe Verbesserung der Genauigkeit festgestellt worden. Im Vergleich zu Ergebnissen mit dem von JOST (2003) vorgeschlagenen Tabellenwerk ist wiederum eher eine Verringerung der Übereinstimmung mit Experimentalwerten nachzuweisen. Das erreichte Genauigkeitsniveau des LENIBA-Verfahrens entspricht in etwa dem Niveau der Kurzfassungen des ÖKO-BEFU-Verfahrens. Bei beiden Verfahren wurden in verstärktem Maße Ergebnisse von Regressionsanalysen zum Modellaufbau verwendet,

während die erklärenden mathematischen Ansätze mehr in den Hintergrund treten (siehe Tab. 2.).

Für die ÖKO-BEFU-Versionen ist die Aufnahme der Bodenbereitstellung an Stickstoff lediglich für die Körnerleguminosen als wichtiges direktes Merkmal erkannt worden. Hierbei wurde aber der in der landwirtschaftlichen Praxis allgemein bekannte N_{min}-Gehalt zu Vegetationsbeginn der Körnerleguminosen im Frühjahr in das Gleichungssystem integriert. Im gewissen Sinne sind daher zu diesen Methoden auch die potenziell möglichen Genauigkeiten ermittelt worden, da die gemessenen N_{min}-Werte aus den Feldversuchen verwendet worden sind. Wenn im praktischen Einsatz nicht direkt bestimmte N_{min}-Werte, sondern lediglich Tabellenwerte oder Werte aus periodisch bereitgestellten Ergebnissen von Testflächen verwendet werden, müssen daher auch bei diesen Verfahren Abstriche bei der Genauigkeit veranschlagt werden.

Insbesondere länger im Feld stehende Futterpflanzenbestände unterliegen einem ausgeprägten Selbstregulierungsprozess (SCHMIDTKE & RAUBER 2000, ANTHES 2005, KOLBE 2007). So werden bei einer niedrigen N-Verfügbarkeit im Boden die Leguminosen im Gemenge stärker gefördert als die Nichtleguminosen. Je nach N-Verfügbarkeit kann es daher von Aufwuchs zu Aufwuchs zu relativ schnellen Änderungen des Leguminosenanteils kommen. Gleichzeitig besteht eine enge statistische Beziehung zwischen dem Leguminosenanteil und der N-Aufnahme aus dem Boden (HEUWINKEL 2007).

Infolge dieser Zusammenhänge war als Ergebnis multiplexer Regressionsanalysen zur Bestimmung der N-Bindung bei den Futterleguminosen der Einfluss des N_{min}-Gehaltes im Boden gering oder nicht mehr signifikant. Dagegen stieg der Einfluss des Leguminosenanteils im Gemenge im Ergebnis der Analysen deutlich an. Auf diese Weise ist es gelungen, lediglich durch Integration des Leguminosenanteils in einem quantitativen statistischen Gleichungsansatz die Information einer unterschiedlichen N-Verfügbarkeit im ÖKO-BEFU-Verfahren indirekt zu berücksichtigen.

Dagegen war der Einfluss der im Rahmen der Leguminosenart vorkommenden Variation der N-Gehalte auf die N-Bindung gering ausgeprägt (KOLBE & KÖHLER 2008). Es bestehen relativ enge Beziehungen zwischen den Erträgen und den N-Mengen im Erntegut der verschiedenen Leguminosenarten, die im LENIBA-Verfahrens direkt genutzt werden (JOST 2003, JUNG 2003, JOST & SCHMIDTKE 2008). Die Nutzung von experimentell genügend abgesicherten Tabellenwerten über die N-Gehalte der Leguminosenarten, wie bei den anderen Verfahren, ist daher ebenfalls ausreichend. Um darüber hinaus Effekte des N-Gehaltes zu berücksichtigen, wurden die ÖKO-BEFU-Verfahren unter Nutzung der in bestimmten Tabellenwerken festgelegten N-Gehalte validiert. Es ist daher mit einer erhöhten Genauigkeit zu rechnen, wenn bei der praktischen Verwendung auch diese Tabellenwerte zum Einsatz kommen.

Aus dem Methodenvergleich kann die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass durch die bisherigen Entwicklungsarbeiten sowohl für die Berechnung der N-Bindung als auch für die N-Salden für Körner- und Futterleguminosen unterschiedlich genaue Übereinstimmungen mit experimentell ermittelten Werten gegeben sind und dass die Methodengenauigkeit für die meisten Verfahren noch relativ gering ist. Die Angleichung ist offensichtlich bei den beschreibenden mathematisch-statistischen Verfahren (LENIBA, ÖKO-BEFU) bisher besser gelungen als bei den mehr auf erklärenden mathematischen Gleichungen aufbauenden Methoden. Auch die Handhabung ist teilweise noch unzulänglich (HOGH-JENSEN, SALDO-RECHNER), so dass sie in der Praxis kaum eingesetzt werden können. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass vergleichsweise günstige

ge Genauigkeitseigenschaften erreicht werden können, wenn die Verfahren einem intensiven Validierungsprozess unterzogen werden.

Literatur

- ALBERT, E., H. ERNST, S. BIERMANN & D. MICHEL, 1997: Stickstoffbindung durch Leguminosen sowie Möglichkeiten zu ihrer Abschätzung. Infodienst für Schulung und Beratung in der sächsischen Agrarverwaltung, Nr. 5, 64-71.
- ALBERT, E., F. FÖRSTER, H. ERNST, H. KOLBE, B. DITTRICH, H. LABER, M. HANDSCHACK, G. KRIEGHOFF, T. HEIDENREICH, G. RIEHL, S. HEINRICH & W. ZORN, 2007: Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- ANONYM, 2007: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007, Teil I Nr. 7, 222-227.
- ANTHES, J., 2005: Beitrag von Ackerbohne (*Vicia faba* L.), Luzerne (*Medicago sativa* L.) und Saatwicke (*Vicia sativa* L.) zur Selbstregelung der N-Zufuhr in leguminosenbasierten Fruchtfolgen. Diss., Göttingen. <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2005/anthes/anthes.pdf>
- BACH, M. & H. G. FREDE, 2005: Methodische Aspekte und Aussagemöglichkeiten von Stickstoff-Bilanzen, H. 9. Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft (FNL), Bonn.
- BACHINGER, J. & P. ZANDER, 2003: Planungswerkzeuge zur Optimierung der Stickstoffversorgung in Anbausystemen des Ökologischen Landbaus - Standort- und vorfruchtabhängige Kalkulation der N-Salden von Anbauverfahren. In: RAHMANN, G. & H. NIEBERG: Ressortforschung für den ökologischen Landbau 2002. Landbauforschung Völknerode, Sonderh. 256, 21-30.
- BAUMGÄRTEL, G., G. BREITSCHUH, T. EBERTSEDER, H. ECKERT, R. GUTSER, U. HEGE, L. HEROLD, F. WIESLER & W. ZORN, 2007: Nährstoffbilanzierung im landwirtschaftlichen Betrieb. Standpunkt. VDLUFA, Speyer.
- BIERMANN, S., 1995: Flächendeckende, räumlich differenzierte Untersuchung von Stickstoffflüssen für das Gebiet der neuen Bundesländer. Diss., Halle/Saale. Verlag Shaker, Aachen.
- BOLLER, B., A. LÜSCHER & S. ZANETTI, 2003: Schätzung der biologischen Stickstoff-Fixierung in Klee-Gras-Beständen. Schriftenreihe der FAL 45, 47-54.
- CUTTLE, S., M. SHEPHERD & G. GOODLASS, 2003: A review of leguminous fertility-building crops, with particular reference to nitrogen fixation and utilisation. Defra Project OF0316 "The development of improved guidance on the use of fertility-building crops in organic farming". Institute of Grassland & Environmental Research, Plas Gogerddan, Aberystwyth, UK.
- DÄMMGEN, U., 2007: Calculations of emissions from German agriculture – National Emission Inventory Report (NIR) 2007 for 2005 – Introduction, Methods and Data (GAS-EM). Landbauforschung Völknerode, Sonderh. 304.
- FREYER, B., 2003: Fruchtfolgen. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- GOINS, G. D. & M. P. RUSSELLE, 1996: Fine root demography in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant and Soil* 185, 281-291.
- HARDARSON, G. & S. K. A. DANSO, 1993: Methods for measuring biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant and Soil* 152, 19-23.
- HEUWINKEL, H., 2007: Symbiotische N₂-Fixierung im ökologischen Landbau: Ansätze zur Verbesserung der Schätzwerte. KTBL-Schrift 458, 70-83. KTBL, Darmstadt.
- HOGH-JENSEN, H., R. LOGES, V. FINN, V. JORGENSEN, F. P. VINTHER & E. S. JENSEN, 2004: An empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. *Agricultural Systems* 82, 181-194.
- HÜLSBERGEN, K., 2003: Entwicklung und Anwendung eines Bilanzmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker, Aachen.
- JOST, B., 2003: Untersuchungen und Kalkulationstabellen zur Schätzung der N₂-Fixierleistung und der N-Flächenbilanz beim Anbau von *Lupinus albus* und *Lupinus luteus* in Reinsaat und im Gemenge mit *Vicia faba* und *Pisum sativum* in Reinsaat und im Gemenge mit *Avena sativa*. Diss., Göttingen. <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2003/jost/jost.pdf>
- JOST, B. & K. SCHMIDTKE, 2007: Kalkulation der symbiotischen N₂-Fixierleistung von Leguminosen im ökologischen Landbau. Informationssysteme Integrierte Pflanzenproduktion. <http://www.isip2.de/coremedia/generator/isip/Kulturen/Leguminosen/Leni/LeNi.html>
- JOST, B. & K. SCHMIDTKE, 2008: Kalkulation der symbiotischen N₂-Fixierleistung und der N-Flächenbilanz beim Anbau von Leguminosen im ökologischen Landbau. Abschlussbericht AZ 23181. Department f. Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Pflanzenbau, Göttingen, Hochschule f. Technik und Wirtschaft, FG Ökologischer Landbau, Dresden. http://www.isip2.de/coremedia/generator/isip/Kulturen/Leguminosen/Leni/Abschlussbericht_20AZ_2023181.property=Dokument.pdf
- JUNG, R., 2003: Stickstoff-Fixierleistung von Luzerne (*Medicago sativa* L.), Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und Persischem Klee (*Trifolium resupinatum* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen. Diss., Göttingen. http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2003/jung_ruediger/jung_ruediger.pdf
- KASKE, A., 2000: Leistungen unterschiedlich bewirtschafteter Futterleguminosenbestände und deren Auswirkungen auf Ertrag und ausgewählte Kenngrößen des Stickstoffhaushaltes der Folgefrucht Winterweizen. Diss., Kiel.
- KELNER, D. J., J. K. VESSEY & M. H. ENTZ, 1997: The nitrogen dynamics of 1-, 2- and 3-year stands of alfalfa in a cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 64, 1-10.
- KOLBE, H., 2004: Wasserschutz und Ökologischer Landbau. SIGÖL-Fortbildungskurs Ökologischer Landbau 29, Bad Döben. Boden, Tier, Vermarktung 13. WLV Wissenschaftliches Lektorat & Verlag, Leipzig. <http://orgprints.org/2931/>
- KOLBE, H., 2005: Grain legume nitrogen and balance sheet model for use in practical (organic) agriculture. In: LI, C. J. et al. (Eds.): Plant nutrition for food security, human health and environmental protection. Internat. Plant Nutrition Coll. 15, 1152-1153, Tsinghua University Press, Beijing, China. <http://orgprints.org/00006091>
- KOLBE, H., 2006: Fruchtfolgegestaltung im ökologischen und extensiven Landbau: Bewertung von Vorfruchtwirkungen. *Pflanzenbauwiss.* 10 (2), 82-89.
- KOLBE, H., 2007: Effects of increasing fertilization in organic farming fodder cultivation and market crop systems. Report. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig, 1-17. <http://orgprints.org/11139/>
- KOLBE, H. & B. KÖHLER, 2008: BEFU - Teil Ökologischer Landbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, H. 36. <http://orgprints.org/15101/>
- LOGES, R., 1998: Ertrag, Futterqualität, N₂-Fixierungsleistung und Vorfruchtwert von Rotklee- und Rotklee-grasbeständen. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 9.
- LOGES, R. & F. TAUBE, 1999: Ertrag und Futterqualität von Rotklee und Luzerne als Reinsaat sowie im Gemenge mit

- Gräsern. In: HOFFMANN, H. & S. MÜLLER (Hrsg.): Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, 501-504. Verlag Köster, Berlin. <http://orgprints.org/00002154/>
- LOGES, R. & F. TAUBE, 2007: Stickstoffflüsse im ökologischen Futterbaubetrieb. KTBL-Schrift 458, 84-94. KTBL, Darmstadt.
- LOGES, R., A. KASKE, K. INGWERSEN & F. TAUBE, 2000: Yield, forage quality, residue nitrogen and nitrogen fixation of different forage legumes. Proceedings 13th IFOAM scientific conference, Basel, 83.
- LOPOTZ, H.-W., 1996: Biologische N₂-Fixierung von Klee-Reinbeständen und Klee gras-Gemengen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der N-Nachlieferung des Bodens. Diss., Bonn.
- PIETSCH, G., 2004: N₂-Fixierungsleistung und Wasserverbrauch von Futterleguminosen im Ökologischen Landbau unter den klimatischen Bedingungen der pannonischen Region Österreichs. Diss., Univ. für Bodenkultur Wien. http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H933/Personen/Pietsch/GPDISS.pdf
- REINING, E., J. BACHINGER & K. STEIN-BACHINGER, 1999: Verfahren zur Abschätzung der symbiontisch fixierten N-Menge von Futter- und Körnerleguminosen als Grundlage von Planungswerkzeugen zur schlag- und fruchtfolgebewogenen N-Bilanzierung. In: HOFFMANN, H. & S. MÜLLER (Hrsg.): Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, 230-233. Verlag Köster, Berlin. http://www.zalf.de/home_zalf/download/forschungsprojekte_upload/56_20120051026390_x_bach_NFix_Berlin99.pdf
- SCHMIDTKE, K., 1996: Methodik zur Ermittlung der N-Flächenbilanz beim Anbau von Leguminosen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **9**, 43-44.
- SCHMIDTKE, K. 1997a: Einfluss von Rotklee (*Trifolium pratense* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen auf symbiontische N₂-Fixierung, bodenbürtige N-Aufnahme und CaCl₂-extrahierbare N-Fractionen im Boden. Diss., Gießen.
- SCHMIDTKE, K. 1997b: Stickstoff-Fixierung und N-Flächenbilanz beim Anbau von Erbsen (*Pisum sativum* L.) unterschiedlichen Wuchstyps in Reinsaat und Gemengesaat mit Hafer (*Avena sativa* L.). Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **10**, 63-64.
- SCHMIDTKE, K., 2004: Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Göttingen (mündliche Mitteilung).
- SCHMIDTKE, K., 2005: How to calculate nitrogen rhizodeposition: a case study in estimating N rhizodeposition in the pea (*Pisum sativum* L.) and grasspea (*Lathyrus sativus* L.) using a continuous ¹⁵N labelling split-root technique. Soil Biology & Biochemistry **37**, 1893-1897.
- SCHMIDTKE, K., 2008: How to optimise symbiotic nitrogen fixation in organic crop rotations. ISOFAR Conference „Organic Agriculture in Asia“, Dankook University, Korea, 1-19. <http://orgprints.org/13272/>
- SCHMIDTKE, K. & R. RAUBER, 2000: Stickstoffeffizienz von Leguminosen im Ackerbau. In: MÖLLERS, C. (Hrsg.): Stickstoffeffizienz landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Initiativen zum Umweltschutz **21**, 48-69.
- SCHULZ, J., 2004: How are nitrogen fixation rates regulated in legumes? J. Plant Nutr. Soil Sci. **167**, 125-137.
- STEIN-BACHINGER, K., J. BACHINGER & L. SCHMITT, 2004: Nährstoffmanagement im Ökologischen Landbau. KTBL-Schrift 423. Landwirtschaftsverlag, Münster.
- WEISSBACH, F., 1995: Über die Schätzung des Beitrages der symbiontischen N₂-Fixierung durch Weißklee zur Stickstoffbilanz von Grünlandflächen. Landbauforschung Völknerode **45** (2), 67-74.
- WICHMANN, S., 2004: Ertragsleistung, Futterqualitätsentwicklung, N₂-Fixierungsleistung und Vorfruchtwirkung von verschiedenen Körnerleguminosenarten in Reinsaat und im Gemenge mit Getreide. Diss., Kiel.
- WICHMANN, S., R. LOGES & F. TAUBE, 2006: Kornträge, N₂-Fixierungsleistung und N-Flächenbilanz von Erbsen, Ackerbohnen und schmalblättriger Lupinen in Reinsaat und im Gemenge mit Getreide. Pflanzenbauwiss. **10**, 2-15.
- ZORN, W., H. HESS, E. ALBERT, H. KOLBE, M. KERSCHBERGER & G. FRANKE, 2007: Düngung in Thüringen 2007 nach „Guter fachlicher Praxis“. Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, H. 7. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.

Eingereicht am 28. Mai 2008;
angenommen am 24. Februar 2009

Anschrift des Verfassers: Dr. Hartmut Kolbe, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung Pflanzliche Erzeugung, G.-Kühn-Str. 8, D-04159 Leipzig. Hartmut.Kolbe@smul.sachsen.de