

## 6.4 Düngung (TP III-4)

Teilprojektleiter: Dr. K. O. Wenkel

Bearbeiter: Dipl. Geoökol. S. Brozio, Dipl. Ing. agr. R. Gebbers

### 6.4.1 Zusammenfassung

Die Entwicklung praxisverwendbarer Methoden und Algorithmen für einen ortsdifferenzierten, effizienten und umweltschonenden Einsatz von Nährstoffen ist Hauptziel des Teilprojektes. Hierzu wurden neueste Ergebnisse der Industrie, der VDLUFA sowie der wissenschaftlichen Grundlagenforschung in Module für die N- und Grunddüngung zusammengestellt und gezielt für eine teilflächenspezifische Anwendung weiterentwickelt. Diese Module sind als „White-Box“-Systeme konzipiert, die eine leichte Nachvollziehbarkeit des Rechenweges, Anpassungsmöglichkeiten der Parameter an spezielle betriebliche Bedingungen, Flexibilität der Algorithmen und deren Weiterentwicklung ermöglichen. Gleichzeitig wurden im verstärkten Umfang Aspekte des Natur- und Umweltschutzes integriert. Nach einer erfolgreichen Piloterprobung der Module und Verfahren in Feldversuchen und der Praxis erfolgt gegenwärtig die Implementierung auf ArcView-Basis.

Da in der Landwirtschaft je nach Fruchtart und Intensivierungsniveau unterschiedliche N-Düngungsstrategien und -technologien zum Einsatz kommen, werden Lösungen für ein Off- und On-line gesteuertes Nährstoffmanagement entwickelt und bereitgestellt (*pre agro*-N-Modul, Hydro-N-Sensor gekoppelt mit thematischen Karten, Nutzung dynamischer Bodensteinstoffmodelle). Bisher vorliegende Ergebnisse zeigen eine, statistisch nicht gesicherte, Erhöhung der N-Effizienz durch eine teilschlagbezogene Stickstoffsteuerung, eine Verringerung des N-Düngemittelaufwandes oder bei gleichbleibender N-Gesamtmenge eine Ertragssteigerung in Quantität oder Qualität. Eine erste ArcView-Extension liegt gegenwärtig für Winterweizen vor. Vorbereitet sind Algorithmen für Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Zuckerrübe.

Analog zur bewährten VDLUFA-Methodik beruhen die entwickelten Algorithmen der ortsspezifischen Grunddüngung (P, K, Mg, Kalkung) auf den drei Prinzipien Bilanz, Bedarfsprognose und Einstellung des bodentypischen Optimums. Besondere Merkmale der *pre agro*-Grunddüngungsalgorithmen sind die konsequente Flächendifferenzierung, die Nutzung neu zur Verfügung stehender Geodaten, der Einsatz neu entwickelter Ausgleichsfunktionen für das bodenartenspezifische Optimum, die Berücksichtigung der Unterbodenfruchtbarkeit und die Einbeziehung von Umweltschutzziele (Nährstoffbegrenzungen auf erosions- und auswaschungsgefährdeten Schlagteilen). Die neu- und weiterentwickelten Algorithmen liegen in Text-Form vor und wurden zunächst auf ACCESS-Basis implementiert, um Düngungsberechnungen für erste Versuchsschläge durchzuführen. Anhand von Simulationen sind Aussagen zur Sensitivität und Ökonomie der Algorithmen möglich. Ergebnisse aus der Praxis langjähriger differenzierter Grunddüngung ergänzen die Bewertung der Algorithmen.

### Summary

The sub-project "fertilization" develops new and improved methods and algorithms for the site-specific N-, P-, K- and CaCO<sub>3</sub>-fertilization. They make fertilization more efficient and reduce environmental impacts. The algorithms are implemented as "white-box-modules". This implies comprehensibility for the user and adaptability to specific site conditions, techni-

cal, and economical demands. A first version of the N-module is already in use. Further modules for the basal dressing will be provided in 2002. Supplementary research is focussed on the optimisation of input data acquisition.

## 6.4.2 Bezug zum Verbundprojekt

Die Arbeiten des Teilprojektes III-4 (Düngung) liefern naturwissenschaftlich begründete Entscheidungsalgorithmen für einen ökonomisch effizienten und gleichzeitig umweltschonenden Mineraldüngereinsatz. Die Algorithmen sind sowohl für die intensive als auch extensive Pflanzenproduktion anwendbar. Im Rahmen des Verbundprojektes *pre agro* sind die Arbeiten dem Kernbereich „Entwicklung pflanzenbaulicher Entscheidungsregeln“ für einen ortsspezifisch differenzierten Einsatz acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen zuzuordnen. Somit bestehen Bezüge zu allen Teilprojekten, die im Rahmen der Versuchsbetriebsbetreuung vielfach auch praktisch intensiviert werden konnten.

## 6.4.3 Einleitung und Problemstellung

Die ortsspezifische Düngung, die sich an den oft kleinräumigen Boden- und Bestandesheterogenitäten orientiert, ist eine der wichtigsten Maßnahmen des precision agriculture. Die technischen Verfahren zur Umsetzung einer GPS-gestützten, ortsspezifischen Düngung sind inzwischen relativ weit entwickelt. Nach wie vor mangelt es jedoch an allgemein (bundesweit) einsetzbaren, flexiblen und für den Praktiker leicht nachvollziehbaren Verfahren und Algorithmen für die Bemessung der ortsspezifischen Düngungsgaben. Hauptziel des Teilprojektes „Düngung“ ist deshalb die Bereitstellung solcher Algorithmen auf der Basis des gegenwärtig verfügbaren Wissens. Die Algorithmen sollen deutschlandweit anwendbar sein, sie sollen für den Landwirt akzeptabel, leicht überschaubar und an spezifische Standortbedingungen anpassbar sein (White-Box-Modelle). Eingangsparameter müssen sowohl mit den üblichen Methoden erhoben werden können als auch aus den in *pre agro* zum Einsatz kommenden neuen Methoden (z. B. Geoelektrik, Fernerkundung) ableitbar sein. Der Nachweis der Praktikabilität der neu entwickelten Algorithmen ist im Rahmen des Gesamtprojektes zu erbringen.

## 6.4.4 Das Modul „Operative ortsspezifische N-Düngung“

### 6.4.4.1 Aktuelle Situation

Zur Zeit werden in Deutschland Düngungsstrategien von unterschiedlichem Intensivierungsgrad angewendet. Von der Intensivdüngung in gesplitteten Gaben mit bis zu 4 Teilgaben geht der Trend hin zu einer aufwandsreduzierten Düngung (N-Düngung in 1-2 Gaben mit und ohne Nitrifikationshemmern). Zur Bemessung der Düngungshöhe gibt es mehrere Methoden: die Nmin-Methode nach Wehrmann, Scharpf (1986), Bilanzmodelle wie N-Plan von Hydro Agri oder SBA der TLL (2000) sowie Simulationsmodelle wie HERMES und MINERVA (Kersebaum & Beblík, 2001). Die genannten Methoden können prinzipiell auch teilflächenspezifisch angewendet werden. Allerdings sind sie hierfür nicht speziell ausgelegt. Seit Anfang 2000 ist ein neues Verfahren praxisreif – die variable On-line-Düngung mit dem Hydro-N-Sensor (Ludowicy et al., 2002). Es ist davon auszugehen, dass aufgrund unterschiedlicher Düngungsstrategien für verschiedene Fruchtarten sowie unterschiedlicher betrieblicher Voraussetzungen und Bedingungen für das praktische N-Düngungsmanagement sowohl Off-line- als auch On-line-Methoden benötigt werden. Die folgenden Ausführungen betreffen vor

allem das Bilanzierungsverfahren (Off-line-Steuerung). Gemeinsam mit TP I-2 (Anwendung von Modulen in der Praxis) wird jedoch auch das On-line-Verfahren (Hydro-N-Sensor) geprüft und durch die Kombination mit speziellen Faktorkarten (z.B. Ertragskarte, Bodenkarte etc.) weiterentwickelt.

#### 6.4.4.2 Konzeption der Algorithmenentwicklung (Off-line Approach) und Stand der Arbeit

Ziel der Arbeiten an einem Off-line-Steuerverfahren für die ortsspezifische N-Düngung ist es, einen Algorithmus zu entwickeln, welcher für beliebige Punkte eines Schlages, unter Beachtung von Umweltschutzkriterien, die pflanzenbaulich optimale Stickstoffdüngermenge für mehrere Teilgaben im Vegetationsablauf berechnet.

Das Modul ist als ein für den Praktiker leicht nachvollziehbares, flexibles Bilanzsystem mit „White-Box“-Charakter konzipiert, das sich an die VDLUFA-Richtlinien anlehnt. Auf der Basis des gegenwärtigen Wissensstandes zur optimalen Bestandesführung errechnet das Modul anhand von:

- Informationen über die Vorgeschichte des Schlages (Vorfrucht, organische Düngung, Nutzungsänderungen),
- der angebauten Sorte und des angestrebten Qualitätszieles,
- teilschlagspezifischen Daten zur aktuellen Boden- und Bestandessituation und
- der bereits applizierten N-Menge

für jede differenziert zu düngende Teilfläche (Management Unit) die optimale N-Menge für jede Teilgabe. Die räumliche Differenzierung der N-Düngung ergibt sich aus der räumlichen Verteilung der Bodeneigenschaften und der Ertragsersparnis sowie deren weiterer Untersetzung und Modifikation entsprechend der aktuellen Bestandesentwicklung.

Die Entwicklung des Moduls für die Fruchtart Winterweizen wurde bis zur Implementierung als ArcView-Extension vorangetrieben. Für weitere Fruchtarten (u. a. Wintergerste, Wintererbsen) liegen Algorithmen in Text- bzw. Datenbankform vor. Die Übertragung der Algorithmen in extensivere N-Düngungsstrategien wird in Feldversuchen getestet.

#### 6.4.4.3 Beschreibung des *pre agro* -N-Moduls

Ausgehend von Forschungsergebnissen des früheren Forschungszentrums für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg (Vorläufer des ZALF), des ehemaligen Institutes für Düngungsforschung Leipzig, sowie aufbauend auf dem methodischen Ansatz der N-Düngungsempfehlungen der LUFA Rostock (Schweder, et. al., 1998) wurde ein N-Bilanzmodell für Winterweizen erstellt, das von folgenden agronomischen Grundsätzen ausgeht:

Tab. 6.4-1: Strategie der Stickstoff-Düngung im Algorithmus (Winterweizen)

Tab. 6.4-1: General *pre agro*-N strategy of N-fertilization for winter wheat

1. N-Gabe	2. N-Gabe (Schossergabe)	3. N-Gabe (3B = Qualitätsgabe)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• frühe verhaltene Startgabe (ungeteilt)</li> <li>• spätestens BBCH 30</li> <li>• max. 70 kg N/ha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BBCH 31 - 33</li> <li>• bei N-Bedarf 80 kg N/ha Gabenteilung</li> <li>• B-Gabe: &lt; 100 kg N/ha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kornausbildung, Sicherung des Proteingehaltes</li> <li>• Je nach Produktionsziel, aktueller Ertragsersparnis und Bodenfeuchtesituation 1-2 Teilgaben: 3A: BBCH 37-39 (max. 80 kg N/ha), 3B: BBCH 49-51 (max. 60 kg N/ha)</li> </ul>

### 6.4.4.3.1 Berechnungsprinzip

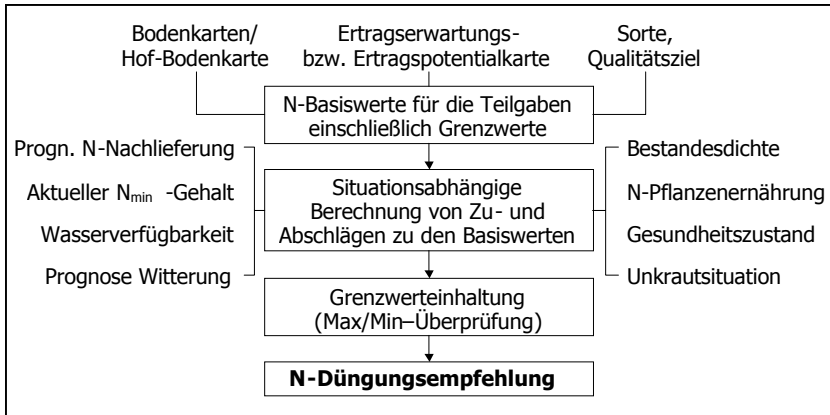


Abb. 6.4-1: Ablaufdiagramm des Moduls N-Düngungsempfehlung „pre agro“

Fig. 6.4-1: Flow chart of the pre agro-N recommendation

Ausgangsbasis bilden ertrags- und produktionszielabhängige Düngungsbasiswerte sowie obere und untere Grenzwerte für die einzelnen N-Gaben. Die Richtwerte sind damit standortabhängig und beziehen sich auf die normale Entwicklung des Bestandes bzw. die ihn beeinflussenden Faktoren. Als Ergebnis der Praxiserprobung 2000 wurden die Basisdaten für die 2. und 3. Gabe leicht modifiziert (Tab. 6.4-2).

Tab. 6.4-2: Basisdaten und Grenzwerte für Winterweizen (gegenüber 2000 leicht modifiziert)

Tab. 6.4-2: Basic settings and limits of the N recommendation for winter wheat

Winterweizen		Düngungsempfehlung [kg N/ha]												
		Gesamtmenge			1. Gabe Bestockung			2. Gabe Schossen			3. Gabe Ährenschieben/Blüte			
Proteingehalt	Ertragsziel [dt/ha]	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	
	Proteingehalt	>12%	50	140	90	190	30	30	60	60	30	70	50	30
60			170	110	220	40	30	70	70	40	80	60	40	70
80			210	140	250	50	30	70	80	60	90	80	50	90
100			230	160	270	50	30	70	90	70	100	90	60	100
≤12%		50	120	60	170	30	30	60	60	30	70	30	0	40
		60	150	90	200	40	30	70	70	40	80	40	20	50
		80	180	130	220	50	30	70	80	60	90	50	40	60
		100	200	150	240	50	30	70	90	70	100	60	50	70

Die Düngungsrichtwerte werden anschließend gabenspezifisch in Abhängigkeit von der konkreten Boden- und Bestandessituation durch ein System von Zu- und Abschlägen modifiziert (Tab. 6.4-3).

Tab. 6.4-3: Modifikation der Düngergaben von Wintergetreide und Winterraps entsprechend der ortsspezifischen Boden- und Bestandessituation

Tab. 6.4-3: Modifications of the basic N recommendation for winter cereals and winter rape depending on site-specific soil and crop conditions.

Ortsspezifische Standort- und Bestandesinformationen	Zu- und Abschläge [kg N/ha]		
	1. Gabe	2. Gabe	3. Gabe
Nmin-Gehalt (0-60cm)	-30 – 20		
Nmin – extrem hohe Werte	1.Gabe = 0		
Vorfruchtwirkung	- 10 – 10		
Organische Düngung zur Frucht		-30 – 0	-15 – 0
Relief (1.Gabe → Maxima)	Max.: Kuppe=60 Senke=50	-15 – 0	-10 – 0
Witterung: • Winter	-10 – 20		
• Frühjahr	-10 – 10		
Bestandesdichte / Bestockung	-20 – 20	-20 – 20	-10 – 10
Ernährungszustand des Bestandes		-20 – 15	-20 – 15
Zeitpunkt und Höhe der 1. N-Gabe		-10 – 0	
Gesundheitszustand, Verunkrautung			-20 – 0
Bodenwasserspeicherkapazität			-20 – 10
Nutzungsänderung (Grünland→Acker)		-10 – 0	-10 – 0
Ausprägung von Trockenstress			-20 – 0
Zeitpunkt der aktuellen N-Gabe			-20 – 0
Ökologische Einschränkungen	0 – 100%	0 – 100%	0 – 100%

Abschließend erfolgt eine Minimum-Maximum-Überprüfung anhand der Richtwerte.

#### 6.4.4.4 Implementierung des *pre agro*-N-Moduls in ArcView

Die softwareseitige Umsetzung des Moduls für die teilflächenspezifischen N-Düngung erfolgt zusammen mit dem Teilprojekt III-1b (Software Lohnunternehmer). In enger Zusammenarbeit konnte eine erste lauffähige Version auf der Basis von ArcView entwickelt werden. Im Jahre 2002 wird ein Hilfesystem aufgebaut, das dem Nutzer Hintergrundinformationen und Rechenschritte des Programms sichtbar macht und erläutert.

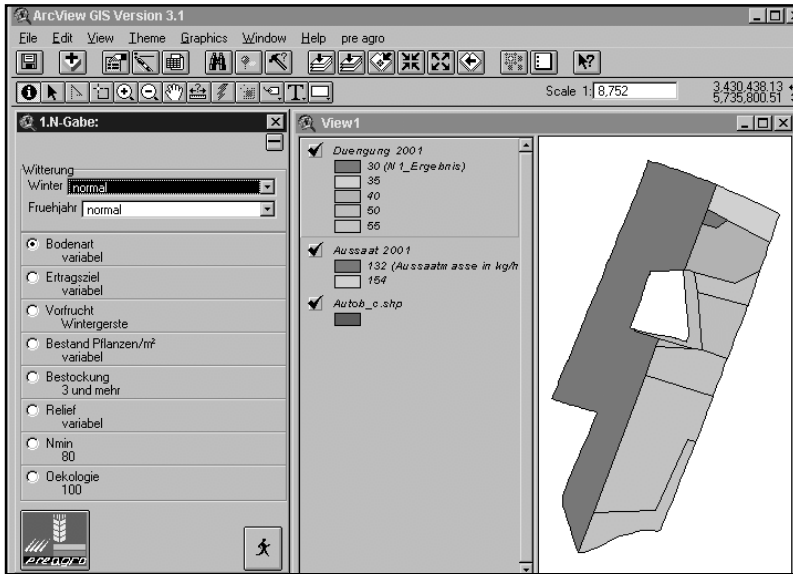


Abb. 6.4-2: Nutzeroberfläche von „pre agro-N“ (1.Gabe) als ArcView–Extension

Fig. 6.4-2: User interface of the pre agro–N module for ArcView

Damit besteht die Möglichkeit der Anpassung des Moduls an die spezifischen betrieblichen Bedingungen. Dies betrifft auch die variable Festlegung der Management Units für die einzelnen Teilgaben.

#### 6.4.4.5 Ergebnisse des Einsatzes des pre agro-N-Moduls

Das Modul wurde neben der Praxiserprobung auf den Projekt-Pflichtschlägen (7 Betriebe) mit Fruchtart Winterweizen in Parzellen- (Müncheberg) und Streifenversuchen (Kassow, Baasdorf) eingesetzt. Des Weiteren wurden erste N-Düngungsempfehlungen für die Fruchtarten Wintergerste, Winterraps mittels des gleichen Systems berechnet. Die Experimente dienen zur Klärung folgender Fragen:

- Ist das pre agro-N-Modul valide und robust?
- Welche Teile des Algorithmus müssen überprüft werden?
- Welche ökonomischen und ökologischen Effekte hat das ortsdifferenzierte N-Management?

Im Jahre 2000 gingen Daten der Reichsbodenschätzung, im Jahre 2001 erstmals die Hofbodenkarten (TP II-1a) als Eingangsparameter zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung in die Stickstoff-Düngungsempfehlung ein. Die Ertragszielstellungen für die einzelnen Teilflächen wurden zunächst im Jahresablauf konstant gehalten und vom Teilprojekt „Bestandesführung“ (TP III-2) unverändert übernommen.

Um genauere Aussagen über die Validität des Modells treffen zu können und damit eine verbesserte Steuerung der Stickstoffgaben und eine höhere Effizienz durch die teilflächenspezifische N-Düngung zu erreichen, wurden folgende Arbeiten zur Qualitätskontrolle durchgeführt:

- Vergleich von Düngungsstrategien im Feldversuch,

- Ertragskontrollen anhand von Handernten und deren Laboranalyse auf Rohproteingehalt,
- Erstellen von N-Bilanzen und N-Effizienzparametern für Teilflächen verschiedener Schläge und Standorte.

#### 6.4.4.5.1 Praxiserprobung

Die Ergebnisse zeigen, dass das *pre agro*-N-Modul für den teilflächenspezifischen Düngemiteleinsatz von Stickstoff geeignet ist. Die Empfehlungen wurden zu den einzelnen N-Gaben nach teilflächenspezifischen Ertragszielen sowie aktuellen Boden- und Bestandessituationen differenziert.

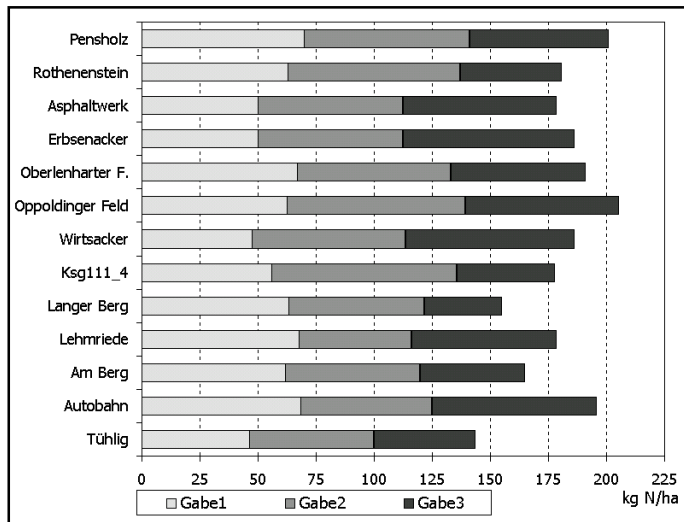


Abb. 6.4-3: Düngung 2001 der Pflichtschläge (es fehlen in der Abb.: Friedhofsacker und Baasdorf)

Fig. 6.4-3: Fertilizer rates on the test fields (Friedhofsacker and Baasdorf were excluded)

Insgesamt wurden auf allen 16 Schlägen durchschnittlich 180 kg N/ha appliziert. Um die Effizienz des N-Moduls zu ermitteln, wurden die Schläge in zwei Varianten geteilt: In eine konstant, betriebsüblich bewirtschaftete Variante (Bub) und eine differenziert, variabel gedüngte, teilflächenspezifisch bewirtschaftete Variante (PA).

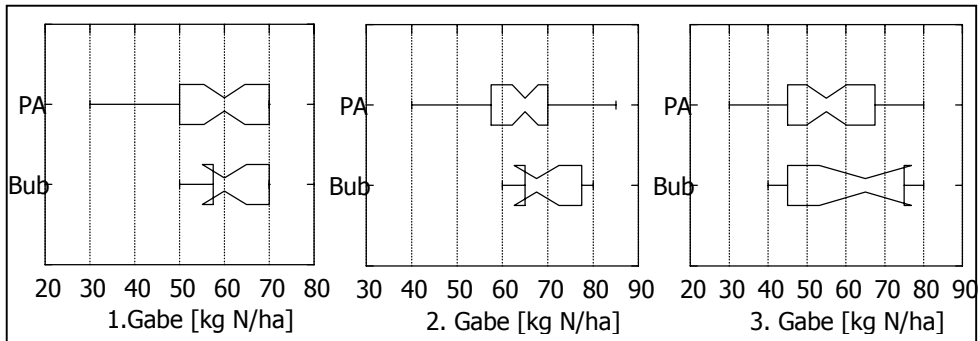


Abb. 6.4-4: Box-Plots der Düngergaben auf den Versuchsfeldern im Jahr 2001

Fig. 6.4-4: Box plots of the rates for site-specific (PA) and uniform (Bub) treatment in 2001 (all fields)

Entsprechend der dem Modell zugrundeliegenden allgemeinen Düngungsstrategie wird durch *pre agro-N* in der Regel eine geringere erste Gabe zu Vegetationsbeginn empfohlen, zum Zeitpunkt des Schossens erfolgt die Hauptgabe. Die dritte Stickstoffgabe ist nur bei Qualitätsweizen hoch und wird bei einem Bedarf von mehr als 80 kg N/ha geteilt. Wie Tabelle 6.4-4 zeigt, liegt die 3. Gabe aber im Mittel zwischen 55 und 60 kg N/ha. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Jahr 2000 reagierte das Modul mit einer insgesamt geringeren N-Gesamtmenge, verursacht hauptsächlich durch eine insgesamt geringere 3. N-Gabe.

Tab. 6.4-4: Mittlere Düngergaben der Versuchsvarianten

Tab. 6.4-4: Average rates for site-specific (PA) and uniform (Bub) treatment (all fields)

[kg N/ha]	Gabe 1	Gabe 2	Gabe 3	Gesamt
<b>PA</b>	59.7	64.0	55.4	<b>179.1</b>
<b>Bub</b>	61.8	70.6	60.9	<b>193.2</b>

Im Vergleich der Bewirtschaftungsweisen liegt auf der betriebsüblichen Variante die Gesamtdüngergabe im Mittel höher. Damit konnte auf der teilflächenspezifischen Variante im Durchschnitt eine Düngermenge von mindestens 10 kg N/ha eingespart werden.

## 6.4.4.5.2 Ausgewählte Beispiele

### 6.4.4.5.2.1 Schlag „Autobahn“ Beckum (Nordrhein-Westfalen)

Der Schlag „Autobahn“ in Beckum ist charakterisiert durch lehmigen Ton. Die westliche Seite des Schlages wurde einheitlich bewirtschaftet, auf der östlichen Seite wurden die Aussaat und die Stickstoffdüngung auf der Grundlage der Polygone der Hof-Bodenkarte differenziert. Verbunden mit der aktuellen Bestandessituation wurden drei Teilgaben ermittelt. Durch die aktuelle Bestandessituation fällt die zweite N-Gabe geringer aus. Um das Qualitätsziel zu erreichen, wurde eine höhere dritte Gabe errechnet.

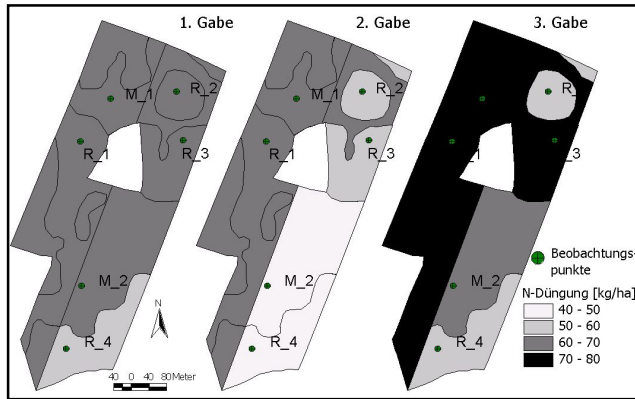


Abb. 6.4-5: N-Düngung 2001 auf Schlag „Autobahn“ in Beckum nach Empfehlungen von *pre agro*-N

Fig. 6.4-5: N recommendation by *pre agro*-N for the field Autobahn in 2001

Tab. 6.4-5: Variantenvergleich Ertrag und Effizienz, N-Saldo (Handernte)

Tab 6.4-5: Overall results from the treatments (yield, SD of the yield, N efficiency N balance (based on hand picking))

	Ertrag [dt/ha]	StAbw (Ertrag)	N-Effizienz [kg Korn/kg N]	N-Saldo (Hand- ernten) [kg N/ha]
<b>PA</b>	67,2	15,5	47,4	23,5
<b>Bub</b>	61,8	21,2	38,3	54,7

Insgesamt wird deutlich, dass die einheitlich bewirtschaftete Fläche eine höhere Gesamt-N-Menge erhielt, die sich in der Ertragsentwicklung aber nicht auswirkte. Die Erträge auf „PA“ liegen höher als auf „Bub“, die Varianz des Ertrages ist geringer.

Unter Berücksichtigung der Proteingehalte und der aufgewandten Düngermenge konnte auf dem Schlag „Autobahn“ ein positiver Saldo an den Handernten-Beprobungspunkten ermittelt werden, was einem zu hohen N-Aufwand gleichzusetzen ist. Der N-Saldo konnte aber auf der differenziert bewirtschafteten Schlaghälfte verringert werden. Auch die Ertragsstruktur ist zwischen den Bewirtschaftungsvarianten unterschiedlich:

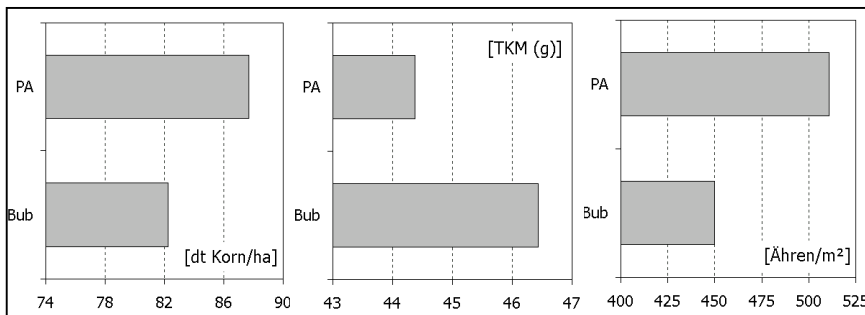



Abb. 6.4-6: Ertrag der Handernte, TKM und Ährenzahl pro m<sup>2</sup>

Fig. 6.4-6: Results of hand picking: yield, thousand grain weight, ears per m<sup>2</sup>

Auf der Teilfläche „PA“ wurde demzufolge durch die höhere Zahl der ährentragenden Halme ein höherer Ertrag erreicht. Die geringere Ährenzahl auf „Bub“ konnte zum Teil durch ein höheres Korngewicht den Ertragsverlust kompensieren. Die Proteingehalte auf „Bub“ sind geringer. Der niedrigere Ertrag und N-Gehalt im Korn sind letztendlich ausschlaggebend für die schlechtere Bilanz auf der konstant bewirtschafteten Variante.

#### 6.4.4.5.2 Schlag „Pensholz“ Thumby (Schleswig-Holstein)

Wie schon im Versuchsjahr 2000 ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse von der Ungenauigkeit der Ertragschätzung maßgeblich beeinflusst werden. Daher wird im Folgenden näher auf das Erreichen des geschätzten Ertrages eingegangen.

Die Ertragsziele unterschieden sich auf diesem Schlag nicht signifikant, doch wirkt sich dies auf eine geringere Düngermenge aus (Abb. 6.4-7, s. Anhang). In der Ertragskarte können die unterschiedlichen Düngungsniveaus kaum nachvollzogen werden. Daher wurden flächenhaft die Stickstoff-Effizienz und die Abweichung des erreichten Ertrages vom Ertragsziel ermittelt (Abb. 6.4-8 und Tab. 6.4-6, s. Anhang .

Es wird deutlich, dass im Allgemeinen das Ertragsziel erreicht wurde (Median „PA“ = 6,1 dt/ha; „Bub“ = 10,1 dt/ha), in einigen Teilflächen das Ertragsziel aber auch deutlich unterschätzt wurde. (nördlicher Teil von „PA“). Auf der teilflächenspezifischen Variante konnte durch geringere N-Gaben eine höhere N-Effizienz erreicht werden, da von einem geringeren Ertragsziel bei der Berechnung der N-Gaben ausgegangen wurde.

#### 6.4.4.5.3 Parzellenversuche Friedrichshof bei Müncheberg 2000/2001

Neben den Versuchen auf den Pflichtschlägen wurden Parzellenversuche in Friedrichshof bei Müncheberg in Zusammenarbeit mit der Forschungsstation „Landwirtschaft“ des ZALF angelegt. Das Versuchsdesign ist eine Blockanlage mit fünf verschiedenen Düngungsstrategien und je sechs Wiederholungen. Auf dem relativ homogenen, ebenen Standort dominieren lehmige Sande. Die vorherrschende Bodenform ist Tieflehm-Fahlerde (Bodenzahlen: 37-43). Die mittlere Jahresniederschlagsmenge beträgt 533 mm. Folgende Düngungsstrategien wurden geprüft:

- ohne Stickstoffdüngung
- N-Gaben nach *pre agro*-N-Empfehlung
- N-Gaben nach Hydro-N-Tester, insgesamt 3 N-Gaben; 1. Gabe einheitlich 40 kg N/ha
- standorttypische N-Gaben: 2000: 80; 50; 50 kg N/ha und 2001: 50, 80, 50 kg N/ha
- Düngung nach Empfehlung von SKW Piesteritz mit Alzon (nur Versuchsjahr 2001).



Das Ergebnis der Feldversuche kann wie folgt zusammengefasst werden:

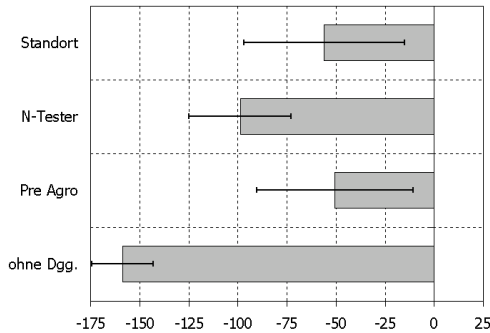


Abb. 6.4-9: Ertrag und Düngung 2000 (Sorte Bussard)

Fig. 6.4-9: Yield and fertilization in 2000 (variety Bussard)

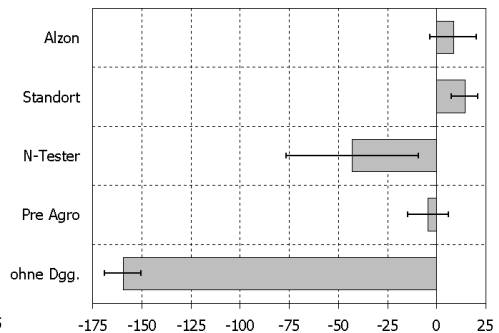


Abb. 6.4-10: Ertrag und Düngung 2001 (Sorte Ludwig)

Fig. 6.4-10: Yield and fertilization in 2000 (variety Ludwig)

In beiden Jahren sind die Erträge ohne Stickstoffdüngung beachtlich. Im Jahr 2000 zeigen die *pre agro* Parzellen die höchsten Erträge. Die Erträge 2001 sind stark beeinträchtigt durch das Auftreten einer Halmbruchkrankheit, von der vor allem die mit Stickstoff gedüngten Varianten betroffen waren. Auf der Kontrollvariante „ohne Düngung“ trat die Krankheit dagegen kaum auf. Da die Krankheit zu spät erkannt wurde, konnten Ertragseinbußen nicht mehr verhindert und auch durch das *pre agro*-N-Modul nicht berücksichtigt werden.

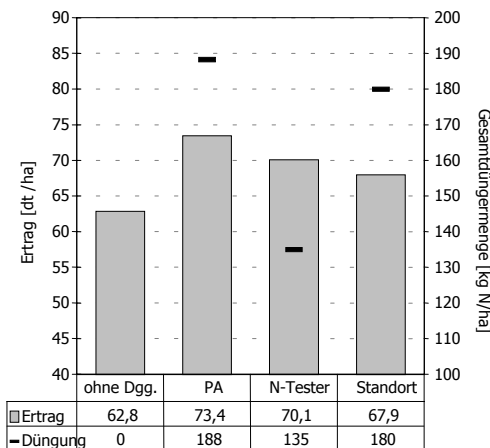


Abb. 6.4-11: N-Saldo 2000 [kg N/ha]

Fig. 6.4-11: N balance 2000

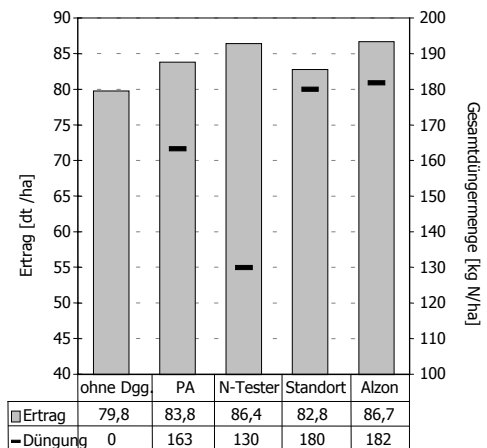


Abb. 6.4-12: N-Saldo 2001 [kg N/ha]

Fig. 6.4-12: N balance 2001

Die *pre agro* -Variante erzielte eine ausgeglichene Bilanz (Abb. 6.4-11/6.4-12) und erfüllt damit die VDLUFA-Kriterien für nachhaltige Landwirtschaft (Heyn et al., 2000). Die Ertrags-Varianzen sind im Vergleich zu anderen Düngungsstrategien gering. Durch die leichte Modifizierung des N-Algorithmus von 2000 konnte das Ergebnis nochmals verbessert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: die Erträge sind bereits auf den Nullvarianten sehr hoch; die Effizienz der kleinräumigen Anwendung des *pre agro*-N-Moduls wurde nachgewiesen und ließ sich von 2000 zu 2001 noch steigern; die hohe Effizienz der Variante „N-Tester“ relativiert sich bei Betrachtung der N-Salden infolge der geringeren Proteingehalte.

Tab. 6.4-7: N-Effizienz 2000, 2001

Tab. 6.4-7: N efficiency 2000, 2001

Effizienz [kg Korn/kg N]	pre agro	N-Tester	Standort	Alzon
<b>2000</b>	39,0	51,9	37,8	
<b>2001</b>	53,0	68,7	47,7	49,2

#### 6.4.4.5.4 Streifenversuch und Intensivprogramm Kassow 2001

Auf dem Standort Kassow wurden Streifenversuche zur Überprüfung der Ergebnisse aus dem Parzellenversuch in Müncheberg und der Übertragung des N-Moduls in Praxisbetriebe durchgeführt. Neben der Anwendung des *pre agro*-N-Moduls und der Kontrolle der Effizienz der N-Düngung durch eine „Nullvariante“ und eine konstante, betriebsübliche Düngung wurde der N-Sensor eingesetzt. Daneben wurden weitere Versuche zum Map-Overlay, der Kombination von Faktorkarten und N-Sensor, angestellt (Wenkel, et al., 2001). Folgende Resultate können zusammengefasst werden:

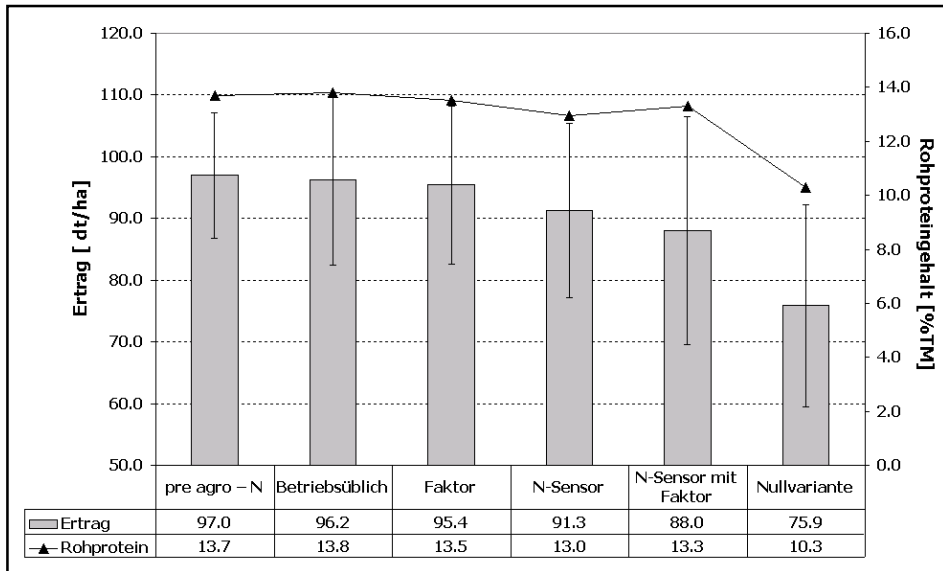


Abb. 6.4-13: Ertrag und Rohproteingehalt im Streifenversuch Kassow 106-2

Fig. 6.4-13: Yield and crude protein from the strip trial on field 106-2 at Kassow farm (treatments from left to right: variable by *pre agro*-N, uniform, variable by maps (yield, soil and relief), variable by the N-sensor, variable by N-Sensor and map overlay, nil)

Die Erträge sind insgesamt sehr hoch, die Rohproteingehalte unterscheiden sich nur wenig. Auffällig ist die geringe Varianz der Erträge auf der nach *pre agro*-N gedüngten Variante. Die

Düngung mittels N-Sensor ergab einen geringeren Rohproteingehalt – durch die Verbindung mit Faktorkarten wurde der Rohproteingehalt erhöht, jedoch der Ertrag leicht verringert. Die Ursachen hierfür müssen weiter analysiert werden.

#### 6.4.4.6 Zusammenfassung und Ausblick

- Das *pre agro*-N-Modul konnte erfolgreich in Feld- und Praxisversuchen getestet und angewendet werden. Durch eine geringe Modifikation aufgrund der Erprobungsergebnisse 2000 konnte die N-Effizienz 2001 weiter verbessert werden. Insgesamt konnten durch die Anwendung von „*pre agro*-N“ bzw. die ortsdifferenzierte N-Düngung gegenüber einer konstanten Düngung (betriebsüblich) 10-15 kg N/ha eingespart werden. Dabei wurden größtenteils gleiche Erträge erzielt.
- Erste Ansätze bei der Verwirklichung weiterer N-Düngungsstrategien (N-Sensor mit Map-Overlay, Düngung mit stabilisierten Düngemitteln) konnten in Feld- und Streifenversuchen getestet werden. Die von Ludowicy et al. (2002) beschriebene Überlegenheit des N-Sensors konnte allerdings im Streifenversuch Kassow nicht bestätigt werden.
- Die Auswertung der Handernt ermöglicht eine Bilanzierung – allerdings ist die Zahl der Beprobungen nicht ausreichend. Die Ergebnisse hinsichtlich der N-Effizienz und der N-Salden, abgeleitet aus Handernt, sind nicht verallgemeinerbar und müssen schlagweise interpretiert werden.
- Die Effizienz von „*pre agro*-N“ hängt stark von der richtigen Abschätzung des Ertragszieles bzw. des Ertragerwartungswertes im Vegetationsverlauf ab.
- Die Module „*pre agro*-N-Wintergerste“ bzw. „-Winterraps“ sind erfolgreich auf drei Schlägen (auf den Pflichtschlägen 2000 „Feldscheide links“ in Thumby, „Kamp-Ost“ in Groß-Twülpstedt und „Finkenherd“ im Betrieb WIMEX) in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt "Lokaler N-Austrag" angewendet worden. Im folgenden Versuchsjahr werden erste Entwicklungen zu den Fruchtarten Triticale und Zuckerrübe getestet. Durch die mehrjährige Anwendung des teilflächenspezifischen Düngungsalgorithmus soll neben der Wirtschaftlichkeit auch die Umweltwirkung des Moduls weiter geprüft werden.
- „*pre agro*-N“ wird im Versuchsjahr 2002 anhand des dynamischen Bodenstickstoffmodells HERMES weiter überprüft. Die Datengrundlage dafür liefern Feldversuche in Friedrichshof bei Müncheberg.
- Ein besonderes Problem des Bilanzierungsverfahrens „*pre agro*-N“ ist neben dem relativ hohen Datenerfassungsaufwand die Wahl repräsentativer Boniturstellen und die Festlegung der Management Units. Die Qualität der Empfehlung ist hiervon stark abhängig. Denkbar wären neben der Berücksichtigung weiterer flächendeckender Geodaten (z. B. aktuelle Luftbilder) auch eigens vom Landwirt festgelegte, saisonal verschiedene, variable Raumbezüge. Dies kann aber nur bei der Anwendung des Moduls durch die Betriebe selbst erfolgen, da die Nähe zum Standort und die Kenntnis der aktuellen Bestandessituation dabei nützlich und wichtig sind.

Ausgehend von einer Analyse der sich in der Praxis abzeichnenden zukünftigen N-Düngungstechnologien sollen folgende N-Managementsysteme weiter verfolgt werden:

- N-Bilanzierungsverfahren mit starrem Raumbezug (feste Management Units, etwa nach Reichsbodenschätzung, Hof-Bodenkarte) oder variablem Raumbezug (Ausgehend von Management Units der 1. N-Gabe variieren in den darauffolgenden Applikationen die Grenzen z. B. durch Einbeziehung von Luftbildern oder anderen flächenhaften Bestandsinformationen.).

- Modifizierung des N-Bilanzierungsverfahrens für eine „Reduzierte N-Gaben-Technologie (RGT)“, z.B. differenzierte Stickstoff-Düngung mit stabilisierten Düngemitteln (Injektionsdüngung).
- Kombination des Hydro-N-Sensors mit dem N-Bilanzierungsverfahren in Form von Faktorkarten (On-line-Steuerung mit Map-Overlay, Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt Technikbetreuung und -vergleich).
- Dynamische Bodenstickstoffmodelle (z.B. HERMES) mit reduziertem Parametersatz.

## 6.4.5 Module für die standortspezifische Grunddüngung

### 6.4.5.1 Einleitung und Problemstellung

Im Vergleich zur Stickstoffdüngung besteht die Spezifik der Grunddüngung vor allem darin, dass der Nachweis von Ertragseffekten im Feldversuch wesentlich länger dauert und mit größerer Unsicherheit behaftet ist. Die Entwicklung und Prüfung von Grunddüngungsalgorithmen durch empirische Untersuchungen benötigt mehrere Jahre (Schilling, 2000). Im Rahmen der Laufzeit von *pre agro* ist dies somit nicht erreichbar. Zur Entwicklung der Algorithmen muss daher auf bereits vorhandene Parameter und Regeln zurückgegriffen werden, die jedoch an die speziellen Möglichkeiten der ortsspezifische Bewirtschaftung zur Verbesserung von Ökonomie und Umweltschutz anzupassen sind. Als Grundlage hierfür kommen nur die Parameter und Regeln des VDLUFA in Frage, die in Deutschland der Standard für die Düngungsempfehlung sind (Schilling, 2000).

Von diesen Grundlagen ausgehend stellt sich das Teilprojektes „Grunddüngung“ folgende Ziele für die Modulentwicklung:

- Die algorithmische Aufbereitung der VDLUFA-Regeln, so dass diese programmiert werden können. Die dazu notwendigen Vereinheitlichungen, Aktualisierungen, Anpassungen und Ergänzungen umfassen insbesondere die:
  - Berücksichtigung der neuen Grenzwerte für die Gehaltsklasse C (VDLUFA-Standpunkte) und Abgleich der übrigen Klassen,
  - Entwicklung kontinuierlicher Funktionen für die Bodenausgleichsdüngung,
  - Einbeziehung von precision agriculture-Daten unter Berücksichtigung ihrer Spezifika (z. B. Reliefparameter).
- Die spezielle Berücksichtigung von Belangen des Umweltschutzes. Dazu sollen die Algorithmen in ihrer Grundfunktion den Nährstoffaustrag durch Düngung weitgehend vermeiden, zusätzlich sind Schnittstellen vorzusehen, über die Vorgaben aus Umwelt- und Naturschutz in die Berechnung der Düngergaben einfließen.
- Die Berücksichtigung betrieblicher Gegebenheiten und Ziele (Standort, Technik, Betriebsstrategie). Das System muss sich durch die Änderung seiner Parameter aufgrund lokaler Erfahrungen und neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse beständig weiterentwickeln und besser an die Standortbedingungen anpassen lassen (Flexibilitäts-Konzept).
- Die ergonomische Gestaltung der Module, so dass Transparenz und Eingriffsmöglichkeit für den Benutzer gesichert sind (White-Box-Konzept).
- Die Prüfung der Algorithmen und Software auf Plausibilität und Lauffähigkeit.
- Die praktische Anwendung der Algorithmen.
- Die Integration in ein komplexes Management-System. Neben der Verknüpfung zu anderen Modulen beinhaltet dies die Ergänzung der Düngungs-Algorithmen mit Verfahren zur Entscheidungsunterstützung.

Die Entwicklung und Anwendung von Algorithmen zur ortsspezifischen Düngung wirft etliche wissenschaftliche Fragen auf, von denen einige als Forschungsthemen dieses und folgender Projekte untersucht werden sollen:

- Lassen sich Effekte differenzierter Düngung in der Praxis nachweisen?
- Wie kann der Aufwand für die räumlich differenzierte Erfassung der Bodennährstoffe bezahlbar gehalten werden, ohne dabei an notwendiger Genauigkeit zu verlieren?
- Welche Bedeutung haben die Nährstoffgehalte des Unterbodens?

#### 6.4.5.2 Material und Methoden

Die Entwicklung der Düngungsalgorithmen muss, wie eingangs erläutert, im Wesentlichen von bereits vorhandenen Parametern und Regeln ausgehen. Die Arbeiten des VDLUFA bilden dabei die wichtigste Grundlage. Auf Forschungsergebnisse der Vorläuferinstitution des ZALF, dem Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit, wird ebenfalls zurückgegriffen. Weiterhin werden Forschungsberichte und Fachartikel ausgewertet. Anregungen aus der Praxis und neue wissenschaftliche Erkenntnisse werden laufend in die Algorithmen aufgenommen. Dazu finden Gespräche mit Experten aus dem Projekt und externen Einrichtungen statt.

Die Validierung der Algorithmen erfolgt durch Plausibilitätskontrolle, Simulation und Vergleichsrechnungen. Dazu wurden die Algorithmen mit dem Datenbanksystem ACCESS programmiert.

Die Implementierung der Algorithmen für die praktische Anwendung geschieht zusammen mit den zuständigen Teilprojekten „Software Lohnunternehmer“ und „Software Betriebe“.

Die Anwendung der Algorithmen war auf dem Versuchsbetrieb KSG Agrar GmbH Kassow im Herbst 2001 möglich. Mit dem dort vorhandenen TerraGator-Düngerstreuer wurde sowohl Kalk als auch Phosphor und Kalium für eine zweijährige Vorratsdüngung differenziert ausgebracht. Das Teilprojekt „Hof-Bodenkarte“ hat die dazu notwendigen Bodenuntersuchungen vorgenommen.

Die Wirkung der differenzierten Grunddüngung wird insbesondere auf dem Versuchsbetrieb KSG Agrar GmbH Kassow untersucht, mit der hier bereits 1993 begonnen wurde. Dazu wird vor allem auf die betriebseigenen Daten zurückgegriffen.

In der Forschungsarbeit zur effizienten Nährstoffkartierung wird geprüft, ob es Korrelationen zwischen Nährstoffgehalten und flächendeckenden Geodaten gibt. Solche Zusammenhänge können der genaueren Interpolation der gezielten Erhebung und dem Monitoring (Lamp, 1999) von Boden-Nährstoffen dienen. Dazu werden die in *pre agro* vorliegenden Geodaten, wie Reliefparameter, elektrische Leitfähigkeit des Bodens, Luftbilder und Ertragsdaten, in Verbindung mit Nährstoffuntersuchungen statistisch analysiert. Um Informationen über die Nährstoffdynamik zu gewinnen, kommen, ergänzend zu den LUFA-Methoden, weitere Nährstoffanalyse-Verfahren zum Einsatz.

Zur Bedeutung der Unterbodenversorgung wird zunächst geprüft, in welchem Ausmaß hohe Nährstoffgehalte des Unterbodens auftreten. Die Ertragsbildung an Standorten mit unterschiedlich hoher Unterbodenversorgung ist dann zu beobachten.

#### 6.4.5.3 Ergebnisse

##### 6.4.5.3.1 Algorithmische Aufbereitung und Erweiterung der VDLUFA-Regeln

Die Algorithmen liegen als Weiterentwicklung der VDLUFA-Regeln für die P-, K-, Mg- und Kalkdüngung vollständig ausgearbeitet. Die Dokumentation umfasst eine Beschreibung in Textform mit Formeln, Ablaufdiagrammen und Parameter-Tabelle. Zusätzlich erfolgte eine

eigene Implementierung mit dem Datenbankmanagementsystem ACCESS, die der Prüfung der Algorithmen und der Berechnung von Applikationskarten auf Versuchsstandorten dient. Die Berechnung der Düngung für einjährige und mehrjährige Düngungszyklen beruht auf folgenden Prinzipien:

- Nährstoffbedarfsprognose: Prognose des Nährstoffbedarfs der Kulturen entsprechend den Ertragszielen,
- Bilanz: Ausgleich der Bilanz aus Entzügen durch die Abfuhr der Ernte und der Zufuhr aus organischer und mineralischer Düngung sowie Nährstoffverluste durch Verlagerung und Auswaschung,
- bodentypisches Optimum: Mittelfristige Einstellung eines für jede Bodenart spezifischen Optimums der Nährstoffgehalte (Kompensation, LUFA-Versorgungsstufe C),
- betriebsspezifische Korrektur: Anpassung an betriebsspezifische Gegebenheiten zur Verbesserung der Ökonomie und des Umweltschutzes.

Diese Prinzipien lassen sich in folgende Formel überführen:

$$\text{Düngungsempfehlung} = \text{zukünftiger Nährstoffbedarf} + \text{bisheriger Nährstoffentzug} - \text{Nährstoffzufuhr} \pm \text{Boden-Nährstoffkompensation} \pm \text{betriebsspezifische Korrekturen}$$

Einen Überblick über den Ablauf der Düngungsberechnung gibt Abb. 6.4-14. Weitere Informationen sind dem Kapitel Düngung Wenkel, et. al. (2001) zu entnehmen.

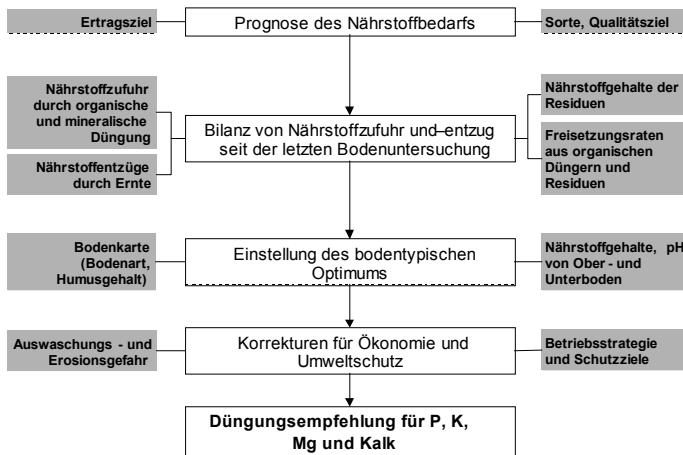


Abb.6.4-14: Allgemeines Flussdiagramm der Grunddüngungsberechnung

Fig. 6.4-14: Generalized flow chart of the calculation for basal dressing (P, K, Mg and lime)

Die wesentlichsten Neuerungen der *pre agro* - Grunddüngungs-Algorithmen gegenüber den regionalen VDLUFA-Algorithmen sind:

- Konsequente Flächendifferenzierung bei den Eingabedaten (Bodenuntersuchung, Ertragskartierung, Ertrags Erwartungen) und der Bestimmung der Applikationsraten.

- Berücksichtigung der neuen VDLUFA-Nährstoffgrenzwerte für die Gehaltsklasse C, bei denen DL- und CAL-Extrakte gleich behandelt werden.
- Anpassung der Grenzwerte für die Gehaltsklassen A – E an C, soweit nötig.
- Zum Angleich an die angestrebte Gehaltsklasse C der Bodennährstoffversorgung werden kontinuierliche Ausgleichsfunktionen verwendet. Sprünge in den Empfehlungen werden so vermieden (Ausnahme Kalk, hier liegt diese Funktion seitens des VDLUFA schon vor).
- Die Nährstoffsituation im Unterboden (30–60 cm) kann berücksichtigt werden, sofern Untersuchungen vorliegen. Hohe Unterbodengehalte führen bei niedrigen Oberbodengehalten zu Abschlägen bei der Düngungsempfehlung.
- Standorte mit hohen Auswaschungs- oder Erosionspotenzialen der werden besonders behandelt.

Der Phosphor-Düngungsalgorithmus (Abb. 6.4-15) wurde bereits in Wenkel et. al. (2001) detailliert vorgestellt. Seine Besonderheiten sind:

- Auf Standorten mit hoher P-Austragsgefährdung (Oberflächenabfluss, Erosion, Drainagen, hohe Sickerwasserrate) erfolgt eine erhöhte Düngung (Düngung über den Pflanzenentzug hinaus) erst ab einem Bodengrenzwert von  $\leq 15$  mg P/100 g Boden.
- Im Fall von kalten und untätigen Verwitterungsböden (tL, IT, T) und geringen P-Gehaltswerten im Oberboden ( $\leq 4,5$  mg P/100g Boden) erfolgt eine 10 %ige Erhöhung der P-Empfehlung.

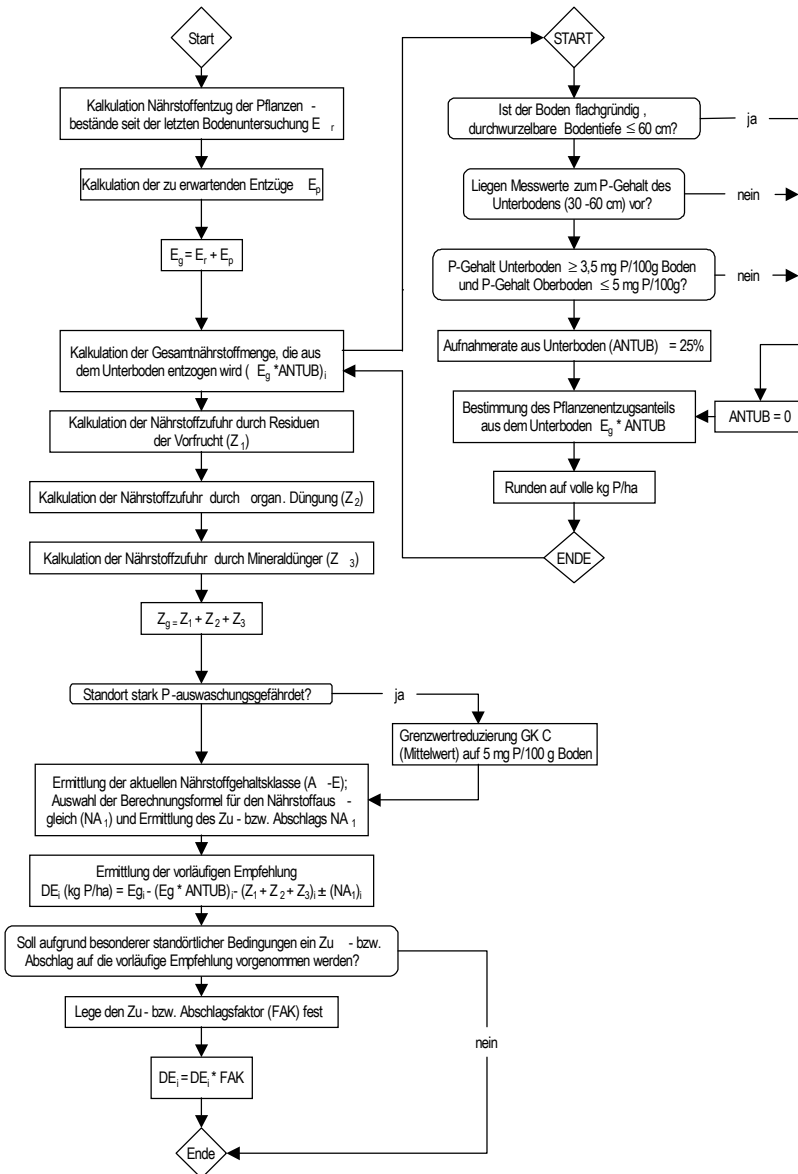


Abb. 6.4-15: Ablaufdiagramm für die Phosphor-Düngungsempfehlung

Fig. 6.4-15: Flow chart of the P recommendation

Als Besonderheiten des Kalium-Düngungsalgorithmus sind zu nennen:

- anteilige Reduktion der Düngungsempfehlungen bei hohem K-Nachlieferungspotential des Standortes und hoher K-Unterbodenversorgung,

- moderater Zuschlag zur Düngungsempfehlung für Sandböden und Standorte mit hohem K-Auswaschungspotential bei Gehaltsklasse C.

Die Magnesiumdüngung kann als Einzeldüngung oder im Rahmen der Kalkung (Zyklus 3-4 Jahre) erfolgen. Im letzteren Fall basiert die Düngungsempfehlung ausschließlich auf aktuellen Bodennährstoffgehalten und den entsprechenden Ausgleichs- bzw. Berechnungsfunktionen, d.h. es ist dann eine reine Bodendüngung, bei der Entzüge durch Erträge nicht berücksichtigt werden.

Die Kalkdüngung erfolgt ortsspezifisch in Übereinstimmung mit dem Rotentwurf VDLUFA 2000. Hier sind bereits kontinuierliche Ausgleichsfunktionen enthalten, die übernommen werden.

#### **6.4.5.3.2 Flexibilität und ergonomische Gestaltung der Module**

Diskussionen mit Praktikern machen deutlich, wie wichtig die Flexibilität und ergonomische Gestaltung der Software für die Akzeptanz von precision agriculture ist. Die Praktiker wünschen einerseits eine leichte Bedienbarkeit, um schnell zu Resultaten zu gelangen – gerade in der Anfangsphase sollten die Programme mit wenigen Eingangsparametern bzw. Einstellungen auskommen. Andererseits werden nach der Einarbeitungszeit bald erweiterte Anpassungsmöglichkeiten der Programme an betriebsspezifische Gegebenheiten und Ziele gefordert. Bei solchen Betriebsspezifika handelt es sich unter anderem um den Datenbestand (Umfang, Genauigkeit), die Düngungsstrategie (intensiv oder extensiv), die Art des Düngers (Einzel- oder Mehrnährstoffdünger), die Düngungstechnik (Bauform, Arbeitsbreite), Standorteigenschaften (Auswaschungsgefahr, Antwortverhalten) oder die Fruchtfolgen. Es ist jedoch unmöglich, Düngungsalgorithmen bereitzustellen, die von vornherein auf alle vorkommenden betrieblichen Situationen vorbereitet sind. Dies ist nur durch individuelle Anpassung auf betrieblicher Ebene erreichbar und setzt flexible Algorithmen voraus. Beispielsweise fehlen in der Praxis oft einige Daten für die Düngungsberechnung (Ertragspotentiale, genaue Ertragskarten, As-Applied-Karten etc.). In unseren flexiblen Algorithmen lassen sich diese Daten durch Schätzwerte ersetzen. Weiterhin müssen bei Bedarf Standortkenntnisse einfließen können, mit denen etwa auf Verdichtungs- oder Vernässungszonen speziell reagiert wird. In Kassow wurde z.B. auf das Düngen der Vorgewende und im Bereich der Sölle verzichtet. Für solche und ähnliche Fälle sind Editierfunktionen vorgesehen, mit denen der Nutzer die Düngungsempfehlungen frei verändern kann. Die Grundparametrisierung der vorgelegten Algorithmen sichert bereits eine hinreichend standortgerechte und umweltschonende Düngung. Die individuelle, betriebsspezifische ökonomische Optimierung und die zusätzliche Berücksichtigung von Umweltschutzziele kann den Erfolg der ortsspezifischen Düngung noch steigern. Die ergonomische Gestaltung der Module ist eine Voraussetzung, damit die oben beschriebene Flexibilität auch realisiert werden kann. Dazu müssen die Algorithmen offengelegt werden - nur wenn der Anwender diese nachvollziehen kann, ist es ihm möglich, gezielt Veränderungen vorzunehmen. Gleichzeitig muss der Eingriff in die Algorithmen durch die Software leicht realisierbar sein – nur dann wird der Anwender die Optionen auch nutzen. Mit diesem „White-Box-Konzept“ können die unersetzbaren, vor Ort gesammelten Erfahrungen eingebracht werden, um die Düngung an die spezifischen Standortbedingungen und die spezifische Bewirtschaftungsweise anzupassen.

Die Transparenz der Algorithmen wird durch eine ausführliche Dokumentation und Programmhilfe gewährleistet. Die nutzerfreundliche Gestaltung der Modul-Oberfläche geschieht

in Abstimmung mit den für die Programmierung zuständigen Teilprojekten. Die Implementierung der Algorithmen durch das Teilprojekt Software Lohnunternehmen beginnt Anfang 2002. Hinsichtlich der Ergonomie und Flexibilität dient die Umsetzung des N-Düngungsalgorithmus als Vorbild.

#### 6.4.5.3.3 Simulation zur Algorithmen-Prüfung und Entscheidungsfindung

Die eigene Implementierung mit dem Datenbankmanagementsystem ACCESS erlaubte eine Prüfung der Algorithmen, so dass viele Probleme schon vor der Programmierung im endgültigen Zielsystem (u.a. ArcView) behoben werden können. Gleichzeitig war es möglich, terminliche Engpässe zu umgehen und vor der endgültigen Programmierung Düngungskarten zu berechnen. Darüber hinaus können Modellrechnungen vorgenommen werden, wie etwa die Sensitivitätsanalyse oder ein Algorithmen-Vergleich.

Als einfaches Beispiel einer Sensitivitätsanalyse dient die Berechnung einer einjährigen Düngung zu Raps. Der mittlere Raps-Ertrag des Schlages soll bei 35 dt/ha liegen, der mittlere Ertrag der Vorfrucht Wintergerste bei 60 dt/ha. Als mittlerer Tongehalt des Bodens werden 15,5 Gewichtsprozent angenommen (stark lehmiger Sand, SL). Moorböden bleiben unberücksichtigt. Der mittlere Boden-Nährstoffgehalt beträgt für P-DL 6,85, für K-DL 11,25 und für Mg-CaCl<sub>2</sub> 7,05 mg/100g Boden. Diese Nährstoffgehalte gelten für ein SL-Substrat als optimal und sind daher in die Gehaltsklasse C einzustufen. In diesem Beispiel werden die Nährstoffgehalte des Unterbodens ausgeklammert, ebenso Standortbesonderheiten wie hohe Erosions- und Auswaschungsgefahr.

Abb. 6.4-16 zeigt die Sensitivitätsdiagramme der P-, K- und Mg-Düngungsempfehlung unter den zuvor genannten Voraussetzungen. Vorweg ist festzustellen, dass der Einfluss des Tongehaltes nicht stetig ist, da gemäß LUF A nur Tongehaltsklassen berücksichtigt werden. Weiterhin weisen die übrigen Eingangsparameter in verschiedenen Wertebereichen unterschiedlich starke Einflüsse auf (Neigungsunstetigkeit der Kurven).

Die Höhe der P-Düngungsempfehlung wird am stärksten durch den P-Gehalt des Bodens beeinflusst, an zweiter Stelle der Sensitivität steht das Ertragsziel. Der Tongehalt ist ohne Einfluss auf die Berechnung der P-Düngung, da gemäß VDLUFA alle Bodenarten gleich behandelt werden.

Die K-Düngung wird am stärksten durch das Ertragspotenzial bestimmt. Die Einflüsse von K-Gehalt des Bodens, organischer Düngung und Ertrag der Vorfrucht ähneln einander, wenn man den gesamten Wertebereich betrachtet (0 bis 200 %). Im mittleren Wertebereich ( $\pm 50$  %) ist der Kalium-Gehalt des Bodens am wichtigsten. Als Besonderheit sei auf die geringfügig höhere K-Düngungsempfehlung bei Sand gegenüber schwach lehmigem Sand hingewiesen, sie trägt der K-Auswaschung in sandigen Böden Rechnung.

Die Mg-Düngung wird am stärksten durch den Bodennährstoffgehalt bestimmt, an zweiter Stelle steht das Ertragsziel, an dritter der Tongehalt.

Zwar weisen die Algorithmen für die einzelnen Nährstoffe unterschiedliche Sensitivitäten hinsichtlich der Eingangsparameter auf, in allen Fällen haben jedoch die Bodennährstoffgehalte oder die Ertragserwartung den höchsten Einfluss auf die Düngungsempfehlung. Das bedeutet, dass unter den hier angenommenen Bedingungen vor allem in die exakte Bestimmung der Bodennährstoffgehalte und der Ertragserwartung investiert werden muss, um die Höhe der Düngung richtig bestimmen zu können. Bei der Berechnung einer Vorratsdüngung für mehrere Jahre können andere Eingangsparameter wichtiger werden. Der Einfluss der (geschätzten) Erträge der Vorfrüchte und der Ertragserwartungen wird gegenüber den Bodennährstoff- und Tongehalten in dem Maße zunehmen, in dem die Ertragspotenziale bzw.

realen Erträge verschiedener Fruchtarten räumlich korrelieren. Je ähnlicher die Karten von Ertragspotentialen und Erträgen der Fruchtfolgeglieder sind, desto größer wird der summarische Einfluss dieser Eingangsparameter auf die Berechnung einer Vorratsdüngung.

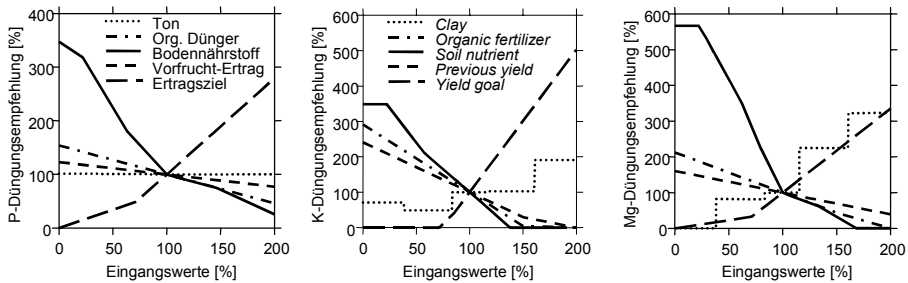


Abb. 6.4-16: Sensitivitätsdiagramme zur P-, K- und Mg-Düngungsempfehlung

Fig. 6.4-16: Sensitivity diagrams of P, K, and Mg recommendation depending on five input variables

Durch die Wahl der Mittelwerte und Variationsbereiche sind Sensitivitätsanalysen regional-, betriebs- und schlagspezifisch adaptierbar. Sie sind eine Möglichkeit, den Landwirt bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen, etwa bei der Frage, in welche Eingangsdaten vorrangig investiert werden sollte.

#### 6.4.5.3.4 Praktische Anwendung der Algorithmen

Im Herbst 2001 wurden für den 78,4 ha großen Schlag 106 der KSG Agrar GmbH Kassow Düngungsempfehlungen berechnet und umgesetzt. Dabei handelt es sich um eine zweijährige Vorratsdüngung für Winterweizen und Wintergerste. Dieser Düngungszyklus ist für den Betrieb nicht typisch und wurde extra für *pre agro* eingerichtet. Die Bodenuntersuchungen durch das TP „Hof-Bodenkarten“ fanden im Herbst 2000 und Frühjahr 2001 statt. Als mineralische Düngung erfolgte im Herbst 2000 eine Kalkung (vor der Bodenuntersuchung) und eine Mg-Düngung im Frühjahr 2001 (nach der Bodenuntersuchung). Hühnermist wurde im Herbst 2000 auf der nordöstlichen Hälfte (Teilschlag 106-1) appliziert. Die Vorfrucht 2001 war Winterweizen.

Wegen der erst kurz zurückliegenden Mg-Düngung ergab sich hierfür kein Düngerbedarf. Trotz der ebenfalls erst kürzlich erfolgten Kalkung war immer noch ein Kalkmangel festzustellen. Speziell im südlichen Teil des Schlages lässt die streifenförmige Verteilung niedriger pH-Werte parallel zur Bearbeitungsrichtung auf einen Fehler bei der Düngung schließen (s. Abb. 6.4-17, s. Anhang). Der P- und K-Bedarf lag im Bereich des Teilschlages 106-1 aufgrund der organischen Düngung deutlich unter dem des übrigen Schlages (Abb. 6.4-18, s. Anhang). Der K-Bedarf ist insgesamt gering, da der Boden überwiegend sehr gut mit Kalium versorgt ist.

Nach der Berechnung der allgemeinen Empfehlungen wurden diese entsprechend betriebs-spezifischer Vorgaben modifiziert. Im Falle der Kalkdüngung sollten selektiv nur größere, zusammenhängende Flächen gedüngt werden, deren Applikationsrate über 10 dt/ha lag. Die P- und K-Düngung sollte im Bereich von Vernässungsstellen, Söllen, Feldauffahrten und Vorgewenden entfallen. Die Abgrenzung der Zonen erfolgte aufgrund der Standortkenntnis im Betrieb.

In der Summe der Düngergabe für den gesamten Schlag ergeben sich zwischen der differenzierten und der einheitlichen Düngungsempfehlung folgende Unterschiede: 56 kg mehr P und 245 kg mehr K durch differenzierte Düngung. Diese entspricht nicht ganz der Erwartung, dass die Mengen bei differenzierter und einheitlicher Düngung in der Summe gleich sind. Ursache dafür ist die unterschiedliche Gewichtung der Boden-Nährstoffgehalte durch die Zuordnung zu den unterschiedlich großen Bodeneinheiten der Hof-Boden-Karte. Allerdings fällt die Summe der K-Düngung für den Gesamten Schlag mit 603 kg bei differenzierter und 358 kg bei einheitlicher Gabe sehr gering aus. Die differenzierte P-Düngung mit 3333 kg für den gesamten Schlag ist dagegen üblich und der Unterschied zur einheitlichen Gabe (3277 kg) relativ gering. Hier führt die differenzierte Düngung in erster Linie zu einer räumlichen Umverteilung von Düngemitteln und damit zum Abbau lokaler Überschüsse und Defizite. Im ersten Fall werden die eingesetzten Mittel nicht in Ertrag umgesetzt, zudem droht Nährstoffaustrag. Im zweiten Fall werden durch Nährstoffmangel die Ertragspotentiale nicht ausgeschöpft. So entstehen ökonomische Verluste durch Überdüngung und Ertragseinbußen. Im Beispiel ergibt sich in der Summe durch die einheitliche Düngung eine lokale Überdüngung von 312 kg P und 174 kg K, die summarische Unterversorgung von Standorten beträgt 368 kg P und 419 kg K. An einzelnen Standorten sind Überschüsse durch einheitliche Düngung von 52 kg P/ha und 11 kg K/ha zu verzeichnen, die Unterversorgung kann bis 30 kg P/ha und 60 kg K/ha betragen.

#### 6.4.5.4 Zusammenfassung und Ausblick

- Die neuesten, bundeseinheitlichen VDLUFA-Regeln wurden aufbereitet und in ACCESS programmiert. Dazu wurden, ausgehend von der neu definierten Gehaltsklasse C, die übrigen Gehaltsklassen angeglichen. Die Implementierung erfolgt zusammen mit den Teilprojekten zur Software-Erstellung im Jahr 2002.
- Eigene, ergänzende Entwicklungen zu den VDLUFA-Regeln sind die kontinuierlichen Funktionen für die Bodenausgleichsdüngung, die Berücksichtigung von Auswaschungs- und Erosionspotentialen sowie der Nährstoffversorgung des Unterbodens. Als weitere Ergänzung sind die Einbeziehung der Wechselwirkung zwischen den Nährstoffen und die stufenlose Berücksichtigung der Bodenart (Tongehalt) in den Funktionen für die Bodenausgleichsdüngung geplant.
- Bei der Einbeziehung flächendeckender Geodaten (precision agriculture-Daten) zeigen sich mehrere Probleme: Ertragskarten können sehr ungenau sein; die Schätzung von Ertragszielen anhand von Ertragspotenzialen ist wegen des hohen Datenbedarfs extrem aufwändig und es fehlen Angaben zur Genauigkeit; echte As-Applied-Karten existieren meist nicht oder können aufgrund der Streuertechnik und des eingesetzten Düngers ungenau sein; die Boden-Nährstoffanalyse kann aufgrund der hohen Kosten nicht in der notwendigen Beprobungsdichte vorgenommen werden. Bislang scheinen nur ECa-Karten und Geländemodelle zur flächendeckenden Erfassung von zwei Eingangsparametern geeignet zu sein, nämlich für die Körnung und die Erosionsgefahr.
- Die Belange von Natur- und Umweltschutz finden besondere Beachtung. Die Algorithmen enthalten Regeln zur Verminderung der Nährstoffverluste und zur Nutzung der bisher vernachlässigten Reserven im Unterboden. Darüber hinaus gibt es Schnittstellen zur Einbeziehung externer Schutzziele.
- Die Flexibilität des Moduls wird durch die Veränderbarkeit der Parameter und die Eingabe betriebsspezifischer Regeln gewährleistet (Flexibilitäts-Konzept).

- Die Ergonomie, als technische Voraussetzung für die flexible Anwendung, wird durch vollständige Dokumentation (Transparenz) der Algorithmen und leichte Handhabung der Software erzielt (White-Box-Konzept).
- Die Prüfung der Algorithmen auf Plausibilität und Lauffähigkeit erfolgte anhand einer eigenen Implementierung in ACCESS.
- Die Algorithmen wurden für die Düngung 2001/2002 auf Schlag 106 in Kassow angewendet. Es konnten damit lokale Über- und Unterversorgungen vermieden werden. Eine Bewertung aus Sicht der Ökonomie und des Umweltschutzes steht noch aus.
- Während die Implementierung und Integration in das endgültige Zielsystem ArcView noch ansteht, konnten mit den Modellrechnungen (Sensitivitätsanalyse etc.) Ansätze für die Erweiterung zu einem Entscheidungsunterstützungssystem gezeigt werden. Zu solchen Erweiterungen zählen Module zur linearen Optimierung, Sensitivitäts- und Szenarienanalyse, deren Entwicklung jedoch einem Folgeprojekt vorbehalten bleiben muss.
- Es lassen sich auch unter Praxisbedingungen Effekte der ortsspezifischen Grunddüngung nachweisen. Im Versuchsbetrieb KSG Agrar GmbH Kassow nähern sich die Boden-Nährstoffgehalte in den Management Units der Versuchsschläge der Versorgungsstufe C.
- Untersuchungen des Unterbodens zeigen, dass dort große Nährstoffvorräte vorliegen können. Über den Ausnutzungsgrad dieser Reserven ist noch zu wenig bekannt, so dass eigene Untersuchungen notwendig sind.
- Die Erstellung von Boden-Nährstoffkarten ist ein Kardinalproblem für die Grunddüngung. Die Boden-Nährstoffgehalte zählen, wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, zu den wichtigsten Eingangsparametern. Die Forschungsarbeiten des Teilprojektes konzentrieren sich daher auf Methoden zur effizienteren Erstellung von Nährstoffkarten.

#### 6.4.6 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten

- Abstimmung der Module untereinander (Teilprojekte "Bestandesführung", "Bodenbearbeitung", "Herbizide, Fungizide und Halmstabilisatoren"), um eine konsistente Anbaustrategie zu erreichen.
- Verbesserung der operativen Datenerfassung (Teilprojekte "Luftbilder", "Bestandesinformationen"): Die Bonituren der aktuellen Bestandessituationen sollen durch Fernerkundungsmethoden verbessert und der Aufwand stark verringert werden. Hierzu sind gemeinsame methodische Untersuchungen vorzunehmen.
- Verbesserung und Erweiterung der Module durch neue Eingangsdaten: z.B. N-Mineralisierungspotentiale (Teilprojekte Hof-Bodenkarten, TP Lokaler N-Austrag), Ertragspotentiale, Erosion (Teilprojekt Relief), Wasserversorgung (Teilprojekte Bodenwasserspeicher, Relief).

#### 6.4.7 Literatur

- Heyn, J.; Claasen, N.; Eckert, H.; von Knorre, D. (2000): Nachhaltige Landwirtschaft – Anforderungen und Kriterien aus ökologischer Sicht, VDLUFA-Schriftenreihe 55, Teil 1. Darmstadt: VDLUFA-Verlag.
- Hydro Agri (2000): Hydro Agri GmbH & Co Kg, HydroPlan. <http://www.hydro-agri.de/>
- Kersebaum, K.-C.; Beblík, A.J. (2001): Performance of a nitrogen dynamics model applied to evaluate agricultural management practices. In: Shaffer, M. J.; Liwang Ma; S. Hansen (eds.): Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management. Lewis Publishers: Boca Raton.

- Lamp, J. (1999): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität in der teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. KTBL-Arbeitspapier 264. Darmstadt: KTBL.
- Ludowicy, C.; Schwaiberger, R.; Leithold, P. (2002): Precision Farming: Handbuch für die Praxis. 1. Aufl., Frankfurt a.M.: DLG-Verlag.
- Pre agro (2000): Managementsystem für ortsspezifischen Pflanzenbau zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft und zur Förderung ihrer Umweltleistung. Zwischenbericht 2000. KTBL Sonderveröffentlichung 032. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. KTBL: Darmstadt und [www.preagro.de](http://www.preagro.de).
- Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Unter Mitwirkung von M. Kerschberger, K.-F. Kummer, H. Peschke. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Schweder, P.; Kape, E.; Neubauer, W. (1998): Düngung 1998. Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis. Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung. Schwerin: Ministerium für Landwirtschaft und Naturschutz.
- TLL (2000): Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Anwendungshinweise für das Programm Stickstoffbedarfsanalyse. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- TP-Düngung (2002): <http://www.zalf.de/lсад/vprojekte/prefarm/tpdueng/dueng.htm>.
- Wehrmann, J.; Scharpf, H.C. (1986): The Nmin-method – an aid to integrating various objectives of nitrogen fertilization, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 149, 428-440.
- Wenkel, K.-O.; Gebbers, R.I.B.; Brozio, S. (2001): Düngung (TP III-4). In: PRE AGRO (2001): Managementsystem für ortsspezifischen Pflanzenbau zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft und zur Förderung ihrer Umweltleistung. Zwischenbericht 2001. [www.preagro.de](http://www.preagro.de).
- VDLUFA: Zentralverband der LUFA, [www.vdlufa.de](http://www.vdlufa.de).
- VDLUFA-Standpunkte: [www.vdlufa.de](http://www.vdlufa.de).