

8.3 Lokaler N-Austrag (TP IV-4b)

Teilprojektleiter: Dr. K.-C. Kersebaum

Bearbeiter: Dipl. Ing. agr. K. Lorenz

8.3.1 Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Effekte von verschiedenen Maßnahmen von teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung auf Nitrataustrag und Ertrag wurden Simulationsrechnungen auf der Basis von Standortuntersuchungsergebnissen durchgeführt. Hierzu wurden in 5 Betrieben auf jeweils einem Pflichtschlag zu mehreren Zeitpunkten flächendeckende Bodenproben aus dem Wurzelraum in einer dem Standort angepassten Rasteranordnung entnommen. An den Probenahmepunkten wurden neben den zeitlich sehr dynamischen Zustandsgrößen Wasser- und Mineralstickstoffgehalt auch zeitlich stabile Bodenkenngrößen wie Textur und C_{org} -Gehalt als Grundlage für eine räumlich verteilte Simulation bestimmt. Am Beispiel der Schläge Autobahn/Beckum und Kamp-Ost/Groß Twülpstedt werden Vergleiche von Modellergebnissen mit Messwerten dargestellt und Szenarien zum Effekt verschiedener Datengrundlagen und unterschiedlicher Düngungsvarianten berechnet. Während die beobachteten räumlichen Muster von Wasserhaushalt und Ertrag durch das Modell bei einer relativ hochaufgelösten Datenerhebung gut wiedergespiegelt werden, zeigen die N_{min} -Gehalte in einigen Bereichen deutliche Abweichungen. Im Mittel wird der nach der Ernte im Boden verbleibende Mineralstickstoff für beide Schläge jedoch ausreichend gut abgebildet. Bei Verwendung von Standardbodeninformationen nimmt die Qualität der Simulation ab, da eine Reihe von lokalen Besonderheiten keine Berücksichtigung findet. Für den Vergleich der teilflächenspezifischen Düngung mit einheitlicher Düngerapplikation wird der Effekt der unterschiedlichen Standortausrüstung der beiden Schlaghälften durch den Transfer der beiden Düngerstrategien auf die jeweils andere Schlaghälfte mittels Szenarioberechnungen eliminiert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Nitratauswaschung mit der gewählten Düngungsstrategie durch die teilflächenspezifische Düngung bislang kaum erreicht wurde. Simulationsexperimente deuten darauf hin, dass die Stickstoffversorgung auf beiden Schlägen oberhalb des Optimums lag, so dass ein potentieller Minderungseffekt durch teilflächenspezifische Düngung nicht nachweisbar war.

Summary

To study effects of various measures of uniform and site-specific nitrogen fertilization on crop yield and nitrate leaching model simulations were performed based on grid oriented soil sampling. At the grid points time invariable soil characteristics were measured as input for a spatially distributed simulation as well as temporal dynamic state variables like soil moisture and mineral nitrogen content for model validation. Scenarios were calculated to study the effect of different soil data bases and different fertilization strategies. A reduction of nitrate leaching or an increase of grain yield by the applied site specific fertilization could not be achieved so far. Model based optimization of N-fertilization show, that the spatial pattern as well as the quantity of the nitrogen fertilizer recommendation is dependent on the spatial resolution and accuracy of the available soil data.

8.3.2 Bezug zum Verbundprojekt

Das Teilprojekt hat die Aufgabe, verschiedene Düngungsstrategien im Rahmen der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf ihre lokalen Wirkungen im Hinblick auf die Auswaschung von Stickstoff mit dem Sickerwasser zu untersuchen, um mögliche positive ökologische wie ökonomische Vorteile von *precision agriculture* aufzuzeigen. Das Teilprojekt führt hierzu Zeitreihenuntersuchungen zur vertikalen Mineralstickstoffverteilung in der Fläche durch und nutzt diese zur Validierung von Simulationsrechnungen zur Stickstoffdynamik im System Pflanze-Boden. Die Ertragskartierungen aus Teilprojekt II-5 (Aufbereitung Ertragsdaten) werden im ersten Jahr zur Ableitung der Startbedingungen und in den Folgejahren zur Validierung unserer Ertragssimulation herangezogen. Weiterhin werden die Kartierungen des Teilprojektes TP II-1a (Hof-Bodenkarten) sowie die Reliefinformationen des Teilprojektes II-1b (Relief) für die Simulation verwendet. Die Angaben aus der Bodenkartierung werden an den Probenahmepunkten durch weitere für die Simulation notwendige eigene Bodenanalysenwerte unterlegt. Hieraus lässt sich die Streuung bestimmter Basisgrößen innerhalb von Kartiereinheiten der Hof-Bodenkarte (Teilprojekt II-1a, *Hof-Bodenkarten*) ermitteln. Auch die im Teilprojekt IV-4a (*Regionale Stoffdynamik*) verwendeten Regionalisierungsverfahren sowie die über die EM38-Messung (TP II-6a, Bodenwasserspeicher) abgeleiteten Tongehalte lassen sich mit Hilfe dieser Analysendaten validieren. Damit ergibt sich indirekt eine Nutzung durch das Teilprojekt II-6b (Ertragspotentialkarten). Der Vergleich der unterschiedlichen Düngerstrategien verlangt eine enge Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt III-4 (*Düngung*), welches für die Gestaltung der konkret durchgeführten Düngungsmaßnahmen zuständig ist. Die von unserem Teilprojekt gemessenen Frühjahrs-N_{min}-Gehalte sind unter anderem Basis für die Ableitung der teilflächenspezifischen Düngeempfehlung. Im Gegenzug wird das N-Düngungsmodul des Teilprojektes *Düngung* für die Projektion der teilflächenspezifischen Düngung auf den real einheitlich gedüngten Teilschlag für die Szenariosimulation genutzt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen werden darüber hinaus verwendet, um ökonomische Berechnungen zu einzelnen Düngungsstrategien durchzuführen (TP IV-1, Ökonomie).

8.3.3 Einleitung und Problemstellung

Aufgrund der räumlichen Variabilität ertragsrelevanter Standorteigenschaften werden durch Düngung verabreichte Nährstoffe in unterschiedlicher Menge durch den Pflanzenbestand genutzt. Dies kann zu lokaler Über- oder Unterversorgung insbesondere mit Stickstoff führen mit der Folge, dass örtliche Ertragspotentiale nicht optimal genutzt werden bzw. ökologisch wie ökonomisch unerwünschte Nährstoffverluste auftreten. Insbesondere bei der Stickstoffdüngung werden positive Effekte hinsichtlich einer höheren Düngereffizienz erwartet. Unklar ist jedoch noch, inwieweit die bislang in der Praxis üblichen Verfahren zur Stickstoffbedarfsermittlung in der Lage sind, mit vertretbarem Aufwand der Standortvariabilität und der N-Dynamik Rechnung zu tragen. Ferner steht der Nachweis aus, ob und in welchem Maße durch teilflächenspezifische N-Dosierung unerwünschte ökologische Schäden durch Nitrat-austrag zu vermeiden sind.

Nach entsprechender Validierung lässt sich mit Hilfe von Simulationsmodellen standortspezifisch die Wirkung unterschiedlicher Düngungsstrategien im Vergleich von schlageinheitlicher und teilschlagspezifischer Bewirtschaftung auf die Effizienz und den Austrag von Stickstoff bestimmen. Zudem werden hieraus Erkenntnisse erwartet, welche Genauigkeitsanforderungen an die Beschreibung der Standorte gestellt werden müssen, um eine hinreichend differenzierte Aussage zur Ertragsbildung und Nährstoffdynamik zu erreichen.

8.3.4 Material und Methoden

8.3.4.1 Bodenuntersuchungen

Das Teilprojekt führte Untersuchungen auf den 3 Pflichtschlägen der Anbaujahre 2000 und 2001 bzw. 2 Pflichtschlägen der Anbauperiode 2001 in 5 Betrieben durch. Dabei wurden auf der Basis der vorhandenen Grundinformationen (z. B. Reichsbodenschätzung (TP IV-4a), Hof-Bodenkarte (TP II-1a), Reliefinformationen (TP II-1b) und EM38-Muster (TP II-6a) die Probenahmepunkte festgelegt.

Die Bodenprobenahme erfolgte in einem so genannten Standardraster bis in 90 cm Tiefe sowie in 2 - 4 Nestern mit engerer Maschenweite bis 3 m Tiefe, die in das Standardraster eingehängt waren. Einzelne Bereiche des Standardrasters wurden durch Zwischenpunkte ergänzt, um Zwischenabstände für die geostatistische Analyse zu erhalten. Die Lage der Nester wurde auf der Basis der Boden- und Reliefinformationen so gewählt, dass jeweils 1 - 2 korrespondierende Standorte auf der teilflächenspezifisch und der betriebsüblich bewirtschafteten Schlaghälfte untersucht wurden. Je Probenahmepunkt des Standardrasters wurden 5 Bohrungen zu einer Mischprobe vereint. Je nach Untersuchungsschlag variiert die Gesamtzahl der untersuchten Punkte zwischen 92 (Beckum) und 181 (Kassow).

Die erste Bodenprobenahme diente der Erfassung der Anfangssituation der Mineralstickstoffverteilung auf dem Schlag vor der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung sowie der Messung von langfristig stabilen Bodenzustandsgrößen (Textur, C_{org}), die als Grundlage für die Simulation notwendig sind. Aus Kostengründen konnte auf einigen Schlägen jedoch nur ein Teil der Untersuchungsprofile auf Textur analysiert werden. Die fehlenden Daten wurden, wenn möglich, aus den Bohrbefunden der Hofbodenkarte (TP II-1a) ergänzt oder aus benachbarten Werten interpoliert.

Die Ergebnisse der Texturanalyse werden zur Bestimmung der Texturklassen nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4) verwendet. Innerhalb des verwendeten Simulationsmodells HERMES (Kersebaum, 1995) erfolgt eine automatische Ableitung der Kapazitätsparameter für das Wasserspeichervermögen des Bodens entsprechend der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4). Neben der Textur werden die vom Modell benötigten Parameter für die Wasserhaushaltssimulation durch Lagerungsdichte, Grundwasserstand und Steingehalt modifiziert. Da hierzu oft nur sehr ungenaue Informationen vorliegen, werden diese Größen im Rahmen ihres Unsicherheitsbereiches im Hinblick auf eine bessere Anpassung der Modellergebnisse an den Einzelpunkten variiert. Diese Merkmalskombination soll dann anhand der Beobachtungen in den Folgejahren validiert werden.

Die C_{org} - und N_{org} -Gehalte werden zur modellinternen Ableitung des Mineralisationspotentials des Bodens verwendet. Dieses wird ergänzt durch die unterschiedlichen N-Pools aus den Ernterückständen der Vorfrucht, die teilflächenspezifisch aus der Ertragskarte der Vorfrucht abgeleitet werden.

In jedem Jahr werden an den Rasterpunkten der Erstbeprobung jeweils nach der Ernte Untersuchungen zur vertikalen Verteilung des N_{min} -Gehaltes (incl. gravimetrische Wassergehaltsbestimmung) durchgeführt. Die Werte dienen in erster Linie zur Validierung der Modellrechnungen, sind aber auch Indikator für die Effektivität der angewendeten Düngungsmaßnahmen und das Nitratauswaschungspotential für die nachfolgende Winterperiode.

Zusätzlich werden an ausgewählten Punkten des Rasters bzw. der Nester N_{min} -Untersuchungen vor Beginn der Vegetationsperiode durchgeführt. Diese dienen einerseits als Grundlage zur räumlich differenzierten Ermittlung des Stickstoffdüngerbedarfs sowie ebenfalls zur Validierung der Simulation.

8.3.4.2 Modellierung

8.3.4.2.1 Grundlagen der Modellierung

Zur Simulation der Stickstoffdynamik und des Pflanzenwachstums wurde das Modell HERMES (Kersebaum, 1995) verwendet. Das Modell beschreibt auf der Basis täglicher Witterungsdaten den Wasserhaushalt des Bodens, die Netto-N-Mineralisation von organischer Bodensubstanz und die eingebrachten Pflanzenresiduen, die Denitrifikation, den Transport von Nitrat in der Bodenlösung sowie das Wachstum und die N-Aufnahme durch Pflanzen. Das Pflanzenwachstumsmodell simuliert auf der Basis von Sonneneinstrahlung und Temperatur die tägliche Nettotrockenmassebildung und ihre Partitionierung auf die unterschiedlichen Pflanzenorgane. Wasser- und Stickstoffmangel reduzieren mittels Stressfunktionen das Wachstum, wobei ober- und unterirdisches Wachstum unterschiedlich reduziert werden können. Zeitweiliger Luftmangel durch Staunässe wird als Stressfaktor in Anlehnung an Supit et al. (1994) berücksichtigt. Detailliertere Darstellungen des Modellansatzes finden sich bei Kersebaum (1995), Kersebaum & Beblík (2001) und Kersebaum et al. (2002).

Die Simulation einer Fruchtfolge startet mit der Ernte der ersten Vorfrucht. Als Startbedingungen (Bodenwassergehalt, N_{\min} -Verteilung) werden zunächst vorfruchtspezifisch Annahmen getroffen, die durch entsprechende Messungen während der Herbstmonate (siehe Bodenuntersuchungen) aktualisiert werden. Die Simulation wird für alle Probenahmepunkte separat mit dem jeweiligen Parametersatz und den dort gemessenen Anfangsbedingungen durchgeführt. Neben den oben genannten Angaben zur Bodenart und zum Humusgehalt gehen Angaben zum Grundwasserflurabstand (geschätzt) sowie die Ertragskarte der Vorfrucht für die Berechnungen der Ernteresiduen in die Modellrechnungen ein. Sowohl hierfür als auch für die anschließende Validierung werden die Rohdaten der Ertragskartierung in einem 10 m Radius um den jeweiligen Probenahmepunkt unter Ausschluss der Werte außerhalb der 2fachen Standardabweichung (Jürschik et al., 1999) gemittelt. Gegebenenfalls können zusätzliche Parameter wie der Wetness Index (Moore et al., 1993) aus dem Digitalen Geländemodell abgeleitet und für die Simulation verwendet werden (Kersebaum et al., 2001).

Die Simulation erfolgt unter Verwendung der täglichen Witterungsdaten aus den automatisch aufzeichnenden Wetterstationen der beteiligten Betriebe. Benötigt werden die tägliche Niederschlagssumme, die Tagesmitteltemperatur, Temperatur und relative Luftfeuchte um 14 Uhr sowie die Globalstrahlung. Die Strahlungswerte der Station können bei entsprechendem Relief oder bei Beschattung durch angrenzende Hindernisse (Waldränder, Gebäude etc.) punktspezifisch korrigiert werden (Reuter et al., 2001; Kersebaum et al., 2001). Die Korrektur erfolgt auf der Basis von aggregierten Berechnungen mit dem Modul SRAD des Modellpaketes TapesG (Gallant & Wilson, 1996) unter Verwendung des digitalen Höhenmodells.

8.3.4.2.2 Vergleich von Düngungsmaßnahmen

Auf den Pflichtschlägen der einzelnen Betriebe erfolgte auf jeweils einem Teil des Schlages eine teilflächenspezifische N-Düngung, während auf dem anderen Teilstück eine entsprechende mittlere Düngung ohne Berücksichtigung der Standortheterogenität erfolgte (siehe TP III-4, Düngung). Ein direkter Vergleich dieser Varianten im Hinblick auf ihre Ertragswirkung sowie ihre Auswirkung auf die Stickstoffverluste durch Auswaschung von Nitrat mit dem Sickerwasser oder gasförmige Verluste durch Denitrifikation ist aufgrund der unterschiedlichen standörtlichen Zusammensetzung der Teilschläge nicht ohne weiteres möglich. Mit

Hilfe der Simulation können jedoch die unterschiedlichen Strategien virtuell auf die jeweils andere Teilfläche projiziert und die Ergebnisse anschließend für gleiche Flächen d. h. den Gesamtschlag miteinander verglichen werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die Simulation die Verhältnisse auf den beiden Teilschlägen mit ihrer realen Bewirtschaftung hinreichend genau widerspiegelt.

8.3.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Folgenden am Beispiel der Schläge Autobahn/Beckum und Kamp-Ost/Groß Twülpstedt dargestellt. Die Auswertung und Berechnung für die weiteren Schläge sowie für die Anbauperiode 2001 wird zur Zeit bearbeitet.

8.3.5.1 Vergleich Messung/Simulation

8.3.5.1.1 Modellierung der realen Bewirtschaftung

Zur Überprüfung der Modellrechnungen wurden die Simulationsergebnisse für die Zustandsgrößen Ertrag, Wasser- und N_{\min} -Gehalt in der Wurzelzone zum Zeitpunkt der Ernte mit den an den jeweiligen Rasterpunkten beobachteten Werten verglichen. Zur Verdeutlichung der räumlichen Beziehung zwischen Mess- und Modellwert sind die Ergebnisse für die beiden Schläge Autobahn und Kamp Ost in den Abbildungen 8.3-1 und 8.3-2 in Form eines Transektes, getrennt nach teilflächenspezifisch und einheitlich bewirtschafteter Teilfläche, dargestellt. Die Fehlerbalken bei den Werten der Ertragsmessung repräsentieren die Standardabweichung der Ertragskartierung in einem Umkreis von 10 m um den Rasterpunkt. Der Schlag Autobahn weist aufgrund seiner klaren Gliederung der Bodenarten deutliche Unterschiede beim Wassergehalt nach der Ernte auf (Abb. 8.3-1a). Die Abbildung zeigt eine überwiegend gute Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Werten ($r^2 = 0,8$). Die Winterweizenerträge (Abb. 8.3-1b) zeigen eine befriedigende Parallelität von Messung und Simulation. Problematisch ist vor allem der nordöstliche Bereich, in dem eine ehemalige vernässte Senke (Grünland) durch Bodenaufschüttung für die Ackernutzung gewonnen wurde. Ca. 11 % der simulierten Werte weichen um mehr als 15 % vom Ertragsmesswert ab. Obwohl die Simulation für die N_{\min} -Gehalte nach der Ernte im Mittel die Verhältnisse auch zwischen den unterschiedlich bewirtschafteten Teilschlägen gut widerspiegelt (Kersebaum et al., 2001), werden einzelne Punkte in einigen Fällen nur unzureichend abgebildet (Abb. 8.3-1c). Zum Teil ergeben sich größere Abweichungen in den unteren Bodenschichten, die vermutlich auf die nicht berücksichtigte Drainung der Fläche zurückzuführen sind, zu der genaue Angaben nicht verfügbar waren. Zudem fällt auf, dass größere Abweichungen vorwiegend auf der teilflächenspezifisch gedüngten Fläche auftreten. Hier kann es vor allem im Umschaltbereich des Düngerstreuers zu Abweichungen der Ausbringungsmenge gegenüber der im Modell errechneten Menge auf der Basis der Applikationskarte gekommen sein. Abbildung 8.3-2 zeigt in gleicher Weise die Ergebnisse der Simulation für den Schlag Kamp Ost in Groß Twülpstedt. Auch hier zeigen sich nach der Ernte 2000 große Unterschiede bei den Wassergehalten. Diese werden jedoch nur zum Teil durch die Textur geprägt, die insgesamt weniger stark innerhalb des Schlages differenziert. Durch die teilweise Anpassung der "unsicheren" Parameter Lagerungsdichtestufe und Grundwasserflurabstand innerhalb ihres Unsicherheitsbereiches konnte die Anpassung sowohl bei den Wassergehalten ($r^2 = 0,45$) als auch bei den Erträgen ($r^2 = 0,49$) verbessert werden (Tab. 8.3-1). Die simulierten N_{\min} -Gehalte weisen gegenüber den Messwerten häufig größere Differenzen auf. Im Mittel wird der N_{\min} -Gehalt zur Ernte für den Bereich 0 - 60 cm gut getroffen, die Schicht 60 - 90 cm

wird dagegen überschätzt, da auch in diesem Fall hinreichende Angaben zur Dränung der Fläche fehlten, so dass der Abfluss über die Dränung nicht berücksichtigt wurde.

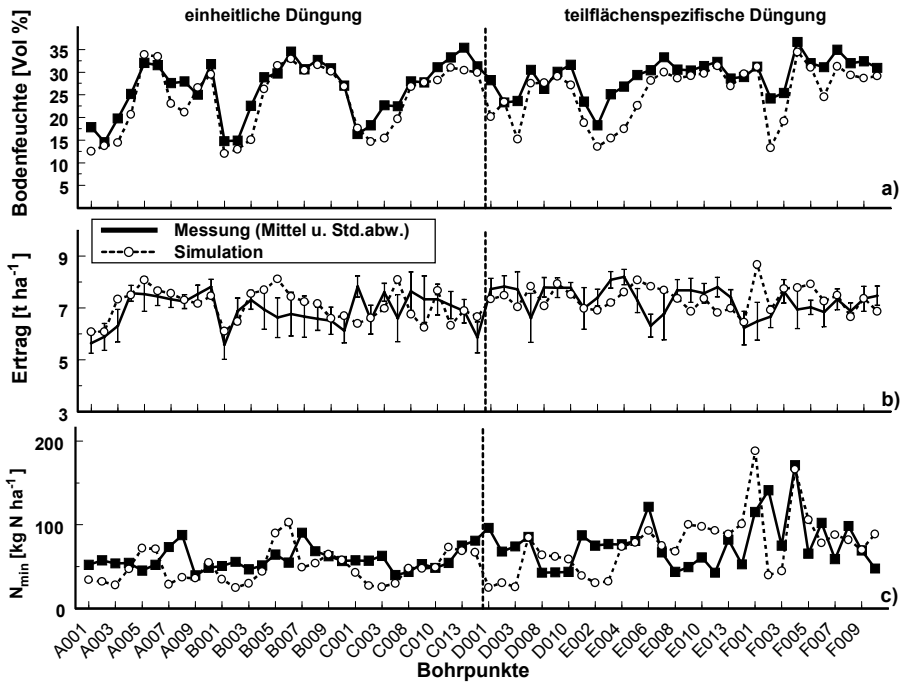


Abb. 8.3-1: Vergleich von gemessenen und simulierten Werten des a) Wassergehaltes (0 – 90 cm), b) des Kornertrages (Trockenmasse) und des c) N_{min}-Gehaltes (0 – 90 cm) nach einjähriger Simulation zur Ernte 2000 auf Schlag Autobahn/Beckum

Fig. 8.3-1: Observations and simulations of a) soil moisture content (0-90 cm), b) crop grain yield (dry matter) and c) soil mineral nitrogen content (0-90 cm) after one year simulation period at harvest 2000 on field Autobahn (Beckum).

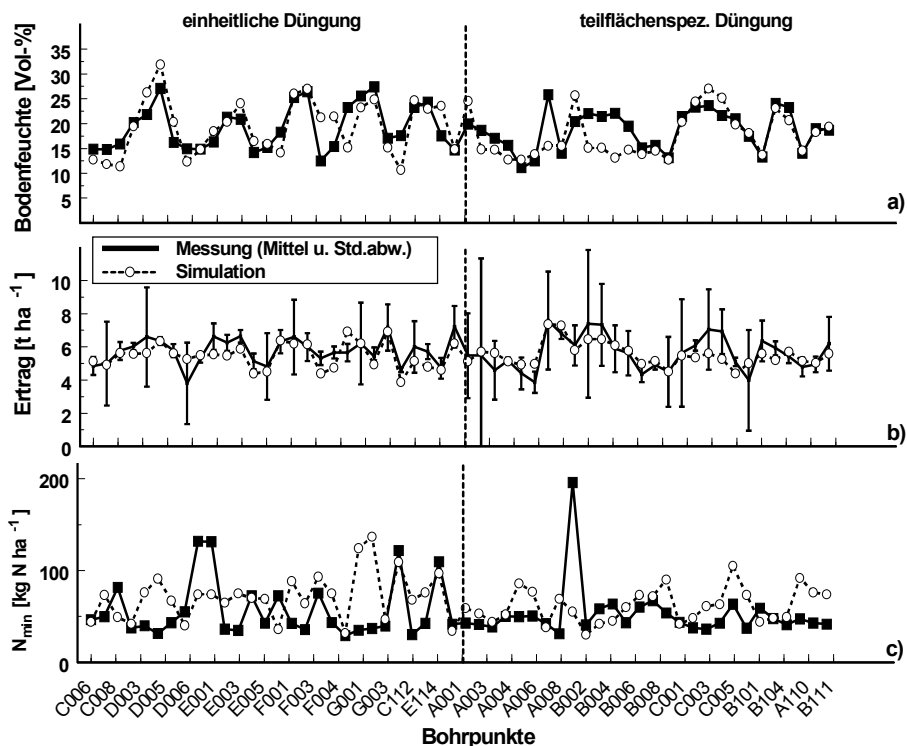


Abb. 8.3-2: Vergleich von gemessenen und simulierten Werten des a) Wassergehaltes (0 – 90 cm), b) des Kornertrages (Trockenmasse) und des c) N_{\min} -Gehaltes (0 – 90 cm) nach einjähriger Simulation zur Ernte 2000 auf Schlag Kamp Ost/Groß Twülpstedt

Fig. 8.3-2: Observations and simulations of a) soil moisture content (0-90 cm), b) crop grain yield (dry matter) and c) soil mineral nitrogen content (0-90 cm) after one year simulation period at harvest 2000 on field Kamp Ost/ Groß Twülpstedt

Insgesamt ergeben sich auf dem Schlag Kamp Ost erhebliche Probleme, die hydrologischen Verhältnisse während der Wintermonate korrekt abzubilden, da vor allem zum Frühjahr 2000 die ungünstigen Witterungsverhältnisse dazu führten, dass ein Teil des Schlages unter Wasser stand und die Dränung aufgrund des hohen Wasserstandes im Vorfluter zeitweise nicht wirksam war.

8.3.5.1.2 Einfluss der Basisdaten auf die Ergebnisse der Modellierung

Die in den Abbildungen 8.3-1 und 8.3-2 dargestellten Ergebnisse wurden auf der Grundlage der an den Rasterpunkten gemessenen Basisdaten berechnet. Für die Praxis bietet es sich an, bezüglich der Bodendaten zunächst auf die aus der Reichsbodenschätzung vorhandenen Bodenkartierungen zurückzugreifen oder ggf. Neukartierungen mit reduziertem Aufwand in Form von Hof-Bodenkarten vorzunehmen. Es stellt sich die Frage, inwieweit diese Unterlagen eine geeignete Grundlage zur Abschätzung von Ertragspotentialen bieten können. Daher wurden die aus den Teilprojekten IV-4a (Regionaler Stoffaustrag) bzw. II-1a (Hof-Bodenkarten) zur Verfügung gestellten Profile für die Einheiten der Reichsbodenschätzung

bzw. der Hof-Bodenkarte für die Simulation verwendet und mit den Ergebnissen der Messung verglichen. Die Berechnungen wurden einerseits mit den hierzu geschätzten C_{org} -Gehalten durchgeführt, zum anderen wurden den Bodeneinheiten die gemittelten C_{org} -Messwerte der zugehörigen Rasterpunkte zugeordnet. Tabelle 8.3-1 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die Erträge, Wasser- und N_{min} -Gehalte nach der Ernte 2000 für den Standort Kamp Ost im Vergleich mit den gemessenen Werten.

Tab. 8.3-1: Vergleich der auf unterschiedlichen Bodeninformationen basierenden Simulationswerte für Ertrag, Wassergehalt und N_{min} nach der Ernte 2000 mit gemessenen Werten auf Schlag Kamp Ost/Groß Twülpstedt

Tab. 8.3-1: Comparison of observed grain yield, soil moisture and mineral nitrogen after harvest 2000 on field Kamp Ost/Groß Twülpstedt with simulations based on different soil information levels.

Variante	Ertrag $\bar{\varnothing}$ (dt TM/ha)	r^2 Ertrag	Wassergehalt $\bar{\varnothing}$ (Vol%)				r^2 W.g.h. 0-9 dm	N_{min} (kg N/ha) $\bar{\varnothing}$				r^2 N_{min} 0-9 dm
			0-3 dm	3-6 dm	6-9 dm	0-9 dm		0-3 dm	3-6 dm	6-9 dm	0-9 dm	
Messwert	57	-	20	16	20	19	-	33	14	8	55	-
Reichsbodenschätzung Original	49	0.032	18	16	33	22	0.004	53	19	40	111	0.011
Reichsbodenschätzung Mit C_{org} -Mittelwerten	49	0.115	17	15	33	22	0.004	43	16	38	97	0.017
Hof-Bodenkarte Original	50	0.077	13	14	32	20	0.164	45	13	35	93	0.020
Hof-Bodenkarte Mit C_{org} -Mittelwerten	50	0.091	13	14	32	19	0.165	46	14	36	96	0.016
Einzelrasterdaten original	52	0.197	19	14	21	18	0.313	31	13	24	67	0.005
Einzelrasterdaten optimiert	55	0.492	19	15	22	19	0.449	29	13	24	65	0.004

Sowohl für die Ertragsschätzung als auch für die Wasserhaushaltsrechnung zeigen die Ergebnisse auf der Basis der Reichsbodenschätzung nur eine geringe Korrelation zu den Messwerten. Die Verwendung der gemessenen Humusgehalte führt sowohl bei der Reichsbodenschätzung als auch bei der Hof-Bodenkarte zu einer geringfügigen Verbesserung der Beziehung. Bei den N_{min} -Gehalten ist wie auch bei der Verwendung der Punktmessungen keinerlei Korrelation zu erkennen. Während bei der Verwendung der Punktmessung jedoch der gemessene Mittelwert zumindest im Oberboden gut getroffen wird, zeigen die Berechnungen auf der Basis der Reichsbodenschätzung und der Hof-Bodenkarte eine deutliche Überschätzung der Mineralstickstoffgehalte, die überwiegend durch die Unterschätzung der Erträge verursacht wird. Neben der Bodenart spielen jedoch weitere Faktoren eine Rolle, wie die deutliche Verbesserung des Ergebnisses nach der "Optimierung" der unsicheren Eingangsgrößen (Lagerungsdichtestufe, Grundwasserflurabstand) zeigt.

8.3.5.2 Vergleich unterschiedlicher Düngungsvarianten

8.3.5.2.1 Vergleich von teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung

Vergleicht man für die Schläge die beiden unterschiedlich bewirtschafteten Teilflächen im Hinblick auf die erzielten Erträge und die nicht ausgeschöpften Mineralstickstoffgehalte nach der Ernte, so ergibt sich für den Schlag Autobahn/Beckum ein Mehrertrag der teilflächenspezifischen Schlaghälfte gegenüber einheitlicher Düngung von 4 dt/ha (Tab. 8.3-2). Die Simulation weist die gleiche Tendenz mit 3 dt/ha Differenz aus. Nach der Ernte werden auf der teilflächenspezifischen Variante im Durchschnitt 19 kg N/ha mehr Mineralstickstoff im Wurzelraum zurückgelassen als nach einheitlicher Düngung. Auch hier zeigt die Simulation eine ähnliche Tendenz bei einer insgesamt höheren Differenz von 27 kg N/ha. Auf dem Schlag Kamp Ost/Groß Twülpstedt weist die Messung einen leicht höheren Ertrag (2 dt/ha) auf der einheitlich gedüngten Teilfläche aus, während die Simulation keinen Unterschied zeigt. Der im Boden verbleibende Mineralstickstoff ist auf der teilflächenspezifisch gedüngten Variante mit 5 kg N/ha geringfügig niedriger.

Tab. 8.3-2: Vergleich gemessener und simulierter Erträge und residueller N_{\min} -Gehalte (5-7 Tage nach Ernte) nach Winterweizen auf Schlag Autobahn/Beckum für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsvarianten (Vk = Variationskoeffizient in %)

Tab. 8.3-2: Comparison of simulated and observed winter wheat grain yield and residual soil mineral nitrogen (5-7 days after harvest on field Autobahn for differently managed field plots (VK = coefficient of variation in %)

Methode	einheitliche Düngung		teilflächenspezifische Düngung		Schlag
	Messung	Modell	Messung	Modell	
Ertrag (Mittel/Vk)	69 (9)	71 (9)	73 (7)	74 (7)	Autobahn (jeweils 30 Rasterpunkte)
N_{\min} (Mittel/Vk)	58 (22)	49 (41)	77 (48)	76 (49)	
Ertrag (Mittel/Vk)	58 (14)	55 (14)	56 (19)	55 (13)	Kamp Ost (jeweils 28 Rasterpunkte)
N_{\min} (Mittel/Vk)	57 (55)	71 (37)	52 (56)	61 (30)	

Da die Flächenausstattung beider Schlaghälften unterschiedlich ist, bietet erst das Simulationsszenario die Voraussetzungen, die Ergebnisse für identische Flächen, in diesem Fall für den ganzen Schlag zu vergleichen. Tabelle 8.3-3 zeigt für beide Schläge diesen Vergleich von einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung für identische Flächen.

Für den Schlag Kamp Ost fällt, nicht zuletzt wegen der geringen Unterschiede in der Düngeraufwendung beider Varianten, das Ergebnis ähnlich aus wie bei der Berechnung der realen Bewirtschaftung. Für den Schlag Autobahn zeigt das Ergebnis, dass es im Falle der Erträge keine signifikanten Unterschiede zwischen teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung gibt, sich aber bei insgesamt etwas höheren residuellen N_{\min} -Mengen nach der Ernte ein höheres Austragpotential für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung ergeben würde.

Tab 8.3-3: Vergleich von einheitlicher und teilschlagspezifischer Düngung bei virtueller Übertragung des jeweiligen Düngungsregimes auf den Gesamtschlag (N_{\min} am Erntetag)

Tab. 8.3-3: Comparison of site specific and uniform fertilization virtually applied to the entire field (residual mineral N at harvest).

Düngungs-Variante	Düngung [kg N/ha]				Ertrag [dt TM/ha]				N_{\min} -Rest [kg N/ha]			
	Mittel	Min	Max	Vk %	Mittel	Min	Max	Vk %	Mittel	Min	Max	Vk %
Kamp Ost/Groß Twülpstedt												
real (Schlagteilung)	170	150	185	7,2	54,8	38,7	73,8	13,4	64	27	134	35,6
Szenario einheitlich	170	170	170	0,0	54,8	38,7	73,8	13,4	64	29	134	34,4
Szenario teilflächensp.	164	150	185	10,4	54,8	38,7	73,8	13,4	60	26	117	34,2
Autobahn/Beckum												
real (Schlagteilung)	195	155	215	8,6	72,2	60,9	86,8	8,0	58	20	172	55,4
Szenario einheitlich	185	185	185	0,0	71,9	60,9	81	7,2	50	21	154	53,2
Szenario teilflächensp.	202	155	215	9,6	71,9	60,8	80,9	7,2	65	20	178	51,0

8.3.5.2.2 Vergleich unterschiedlicher Düngungsszenarien

Aus den Ergebnissen der bislang auf den Standorten angewendeten Verfahren zur Düngerbemessung lassen sich kaum signifikante Unterschiede zwischen den Erträgen bei teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung nachweisen. Die Unterschiede in den residuellen N_{\min} -Mengen sind insgesamt gering und spiegeln im Wesentlichen die Unterschiede in der Gesamthöhe der Düngung wider. Dies deutet zusammen mit der Höhe der verbleibenden Mineralstickstoffgehalte darauf hin, dass die bislang applizierten Düngermengen über dem Optimum liegen.

Zum Vergleich wurde für die beiden Standorte eine Berechnung des Düngungsbedarfs mit Hilfe einer hierfür ausgelegten Version des Modells HERMES vorgenommen. Hierzu wird unter Verwendung der vorhandenen räumlichen Daten sowie der Witterungsdaten eine Berechnung des Stickstoffdefizites für die unterschiedlichen Wachstumsphasen des Weizens erstellt. Eine detailliertere Beschreibung des Verfahrens, welches üblicherweise mit prognostischen Witterungsszenarien zur Ermittlung einzelner Düngergaben verwendet wird, ist bei Kersebaum & Beblík (2001) zu finden.

Um den Effekt der unterschiedlichen Bodeninformationen auf die Düngungsempfehlung zu untersuchen, wurden die Berechnungen sowohl mit den Daten der Reichsbodenschätzung als auch mit der Hof-Bodenkarte vorgenommen. Zusätzlich erfolgte eine in 10% Schritten abgestufte Variation der bei Verwendung der Rasterdaten empfohlenen Düngung, um die Modellempfehlung kritisch im Hinblick auf Ertragswirkung und verbleibende Mineralstickstoffgehalte zu hinterfragen. Alle Düngungsempfehlungsvarianten wurden dann unter Verwendung der tatsächlich an den Rasterpunkten gemessenen Daten neu berechnet und miteinander verglichen.

Abbildung 8.3-3 zeigt für die beiden untersuchten Schläge Autobahn und Kamp Ost den Effekt der unterschiedlichen Düngungshöhe auf Ertrag und N_{\min} -Gehalt nach der Ernte. Zur Verdeutlichung der Unterschiede innerhalb des Schlages sind die Beziehungen an einigen

ausgewählten Punkten des Rasters aufgezeigt sowie der Mittelwert über alle berechneten Rasterpunkte. An den beispielhaft dargestellten Einzelpunkten ist erkennbar, dass die Modellempfehlung zum Teil deutlich oberhalb des Grenzwertes liegt, an dem die Ertragskurve nach unten abknickt. Die Ursache hierfür liegt darin, dass bei der Berechnung der Düngungsempfehlung ein festes Proteinziel von 14 % in der Korntrockenmasse vorgegeben ist, so dass bei geringerer Düngung zunächst der Proteingehalt im Korn abfällt, bevor das Modell mit Ertragsdepression reagiert. Weiterhin wird bei der Simulation ein gewisser "Sicherheitsabstand" zum kritischen N-Gehalt in der Pflanze eingehalten, unterhalb dessen es zu einer Wachstumsdepression kommt. Bei einigen Punkten mit leichteren Böden ist bei geringerer N-Versorgung eine leichte Erhöhung des berechneten Ertrages zu beobachten. Ursache hierfür ist, dass im Modell eine Verschiebung des Wurzel/Sproß-Verhältnisses bei geringem Mangel im Frühjahr stattfindet, so dass während einer späteren Trockenphase eine bessere Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen aufgrund optimalerer Durchwurzelung möglich ist.

Es ist zu betonen, dass die Berechnungen sich ausschließlich auf die jeweilige Situation auf den Schlägen mit z. T. hohen N_{\min} -Gehalten im Frühjahr beziehen und nicht auf andere Jahre übertragen werden können. Beim Verlauf der Mittelwerte wird deutlich, dass es bis zum Erreichen des Ertragsmaximums kaum eine Reaktion bei den N_{\min} -Gehalten gibt. Erst nach Ausschöpfung des Aufnahmepotentials steigen die Restgehalte des Mineralstickstoffs an. Eine Ertragswirkung ist nur unterhalb der kritischen N-Versorgung zu erwarten, da ein Abfall des Ertrages bei Überdüngung z. B. durch im Modell nicht berücksichtigtes Lager

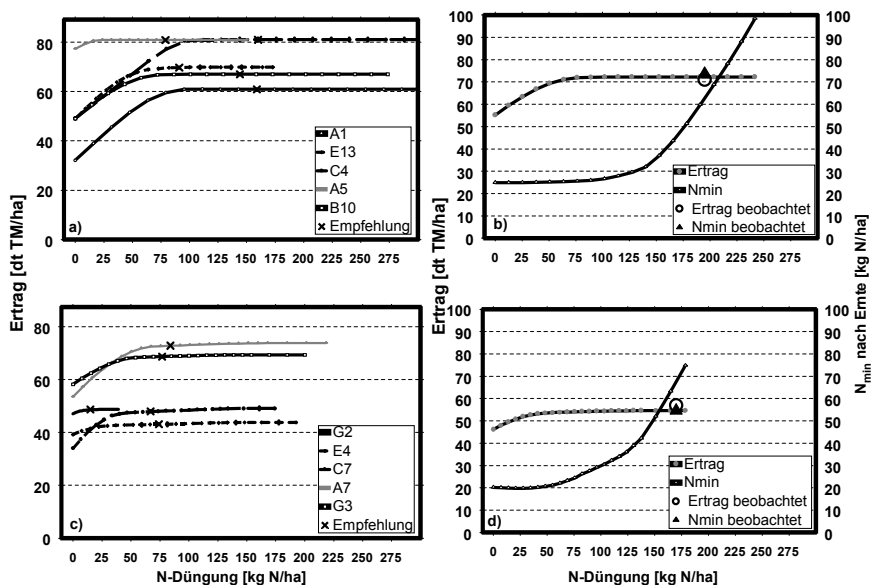


Abb. 8.3-3: Simulierte Effekte unterschiedlicher Düngungshöhen zu Winterweizen während der Vegetationsperiode 2000 für einzelne ausgewählte Punkte des Probenahmerasters von a) Autobahn und c) Kamp Ost (mit Modellempfehlung) sowie im Mittel aller Rasterpunkte auf b) Autobahn und d) Kamp Ost (mit beobachteten Mittelwerten der realen Bewirtschaftung)

Fig. 8.3-3: Simulated effects of different fertilization levels on winter wheat during the growing season 2000 for selected points of the sampling grid on Autobahn (a) and Kamp Ost (c) (including model recommendation) as well as the average of all grid points on Autobahn (b) and Kamp Ost (d) (including observed averages).

Wie bereits dargestellt, führt die Verwendung unterschiedlicher Basisdaten zu Unterschieden in den Ergebnissen der Simulation. Dementsprechend ändert sich auch die Düngerempfehlung des Modells sowohl in ihrer mittleren Höhe als auch in der räumlichen Verteilung. Abbildung 8.3-4 (s. Anhang) zeigt die räumliche Verteilung der Gesamtdüngerempfehlung am Beispiel des Schlates Autobahn für die Empfehlung nach dem N-Düngungsmodul (Stand 2000) (Abb. 8.3-4a) sowie nach dem Modell mit den drei unterschiedlichen Bodeninformationen der Reichsbodenschätzung (Abb. 8.3-4b), der Hofbodenkarte (Abb. 8.3-4c) (jeweils mit gemessenen Mittelwerten von Humus-, Wasser- und N_{\min} -Gehalt) und der Einzelersterpunkte (Abb. 8.3-4d).

Aus der Überlagerung der Karten lassen sich die Differenzen der Düngerapplikation für die einzelnen Varianten in Form von Differenzkarten darstellen (Abb. 8.3-5, s. Anhang). Dabei wird die Berechnung auf der Basis der gemessenen Einzelprofilaten als Referenz verwendet. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Düngungsempfehlung auf der Basis des *pre agro*-Düngungsalgorithmus vor allem im südlichen Teil des Schlates zu einer deutlichen Überschätzung führt. Ursache hierfür muss nicht der Algorithmus an sich sein. Die Gründe liegen zum Teil in einer Fehleinschätzung des Ertragspotentials durch die Nichtberücksichtigung von Profileigenschaften, die in der Profilbeschreibung der Reichsbodenschätzung nicht ausreichend detailliert dargestellt sind bzw. bei der Schätzung nicht berücksichtigt wurden (z. B. Begrenzung des Wurzelraumes durch die unterliegende Mergelschicht). Aus der Flächengewichtung ergeben sich die in Tabelle 8.3-4 dargestellten Gesamtdüngermengen bzw. Differenzen zur Referenzdüngung.

Tab. 8.3-4: Gesamtdüngeraufwendungen für unterschiedlich basierte Düngungsempfehlungen

Tab. 8.3-4: Total amounts of fertilizer applications on field Autobahn for different fertilizer recommendations.

Düngungsvariante	Düngermenge Schlag [kg N]	Differenz zu 1) [kg N]	Differenz zu 1) [kg N/ha]
1) Modell Rasterprofil	2486	-	-
2) Modell Reichsbodenschätzung	2133	-353	-17
3) Modell Hof-Bodenkarte	2840	+354	+18
4) <i>pre agro</i> -Algorithmus 2000	4056	+1570	+78

Um der Frage nachzugehen, inwieweit die teilflächenspezifische Düngung gegenüber einer flächeneinheitlichen Düngung Vorteile in ökologischer (Nitratauswaschungspotential) und ökonomischer Hinsicht bewirkt, wurden für die modellbasierten teilflächenspezifischen Empfehlungen Szenariorechnungen durchgeführt. Hierfür wurde jeweils eine flächenrelevante Empfehlung aus dem unteren und dem oberen Bereich der Modellempfehlung als Szenario für eine flächeneinheitliche Applikation berechnet. Beim Schlag Kamp Ost beschränkten sich diese Szenarien lediglich auf die rasterpunkt-basierte Modellempfehlung, für den Schlag Autobahn wurden auch die Modellvarianten für die Reichsbodenschätzung (**RBS**) und die Hof-Bodenkarte betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.3-5 zusammengefasst. Eine entsprechende ökonomische Bewertung der Szenarien für den Schlag Autobahn ist bei Teilprojekt IV-1 (Ökonomie) dargestellt.

Da die Modellempfehlung, wie bereits oben dargestellt, gegenüber der kritischen N-Versorgung einen bestimmten Sicherheitsabstand berücksichtigt, finden sich zwischen den teilspezifischen Varianten mit ungleicher Bodendatenbasis trotz Unterschieden von durchschnittlich etwa 20 kg N/ha nur geringe Differenzen im Ertragsmittelwert. Dies deutet daraufhin, dass nur an wenigen Einzelpunkten die Empfehlung durch die unterschiedliche Bo-

deninformation zu einer Unterversorgung geführt hat. Überraschend ist zunächst der leicht erhöhte Ertrag bei der reduzierten uniformen Applikation der rasterbasierten Düngungsempfehlung. Ursache ist die bereits oben erwähnte Veränderung der Durchwurzelung bei den sandigen Standorten.

Tab. 8.3-5: Vergleich von simulationsbasierten Düngungsszenarien für teilflächenspezifische Applikation und schlageinheitliche Düngung der Schläge Autobahn und Kamp Ost

Tab. 8.3-5: Comparison of model based fertilizer scenarios for site specific and uniform fertilization on Autobahn and Kamp Ost.

Düngungs- variante	Düngung [kg N/ha]				Ertrag [dt TM/ha]				N _{min} -Rest [kg N/ha]			
	Mittel	Min	Max	Vk %	Mittel	Min	Max	Vk %	Mittel	Min	Max	Vk %
Groß Twülpstedt (N = 56)												
Modell RBS teilflächenspez.	60	15	66	20,6	53,6	38,7	72,8	13,9	23	11	46	33,5
Modell teilfl.spez. Hof- Bodenkarte	59	48	66	8,7	53,7	38,7	72,8	13,5	22	12	50	35,5
Modell teilfl.spez. Rasterdaten	69	0	88	24,9	53,9	34,6	72,8	13,9	23	13	37	28,3
Modell einh. red. Rasterdaten	16	16	16	0,0	50,7	35,1	69,2	13,8	20	9	37	37,7
Modell einh. int. Rasterdaten	88	88	88	0,0	54,1	38,7	72,8	13,7	29	13	67	34,9
Autobahn (N = 60)												
Modell RBS Variabel	109	65	187	38,9	72,1	60,9	86,8	8,0	31	17	178	71,3
Modell teilfl.spez. Hof- Bodenkarte	148	0	170	22,6	71,7	45,8	86,8	9,6	38	18	178	65,1
Modell teilfl.spez. Rasterdaten	127	31	192	30,9	72,2	60,8	86,8	8,0	30	17	74	33,6
Modell RBS einheitl. intensiv	183	183	183	0,0	72,2	60,8	86,8	8,0	49	21	197	57,8
Modell RBS einheitl. reduz.	65	65	65	0,0	71,2	60,3	86,8	8,6	26	17	96	44,1
Modell einh. int. Hofbodenkarte	170	170	170	0,0	72,2	60,8	86,8	8,0	43	20	186	60,7
Modell einh. red. Hofboden- karte	147	147	147	0,0	72,2	61,2	86,8	7,9	36	18	166	62,5
Modell einh. int. Rasterdaten	180	180	180	0,0	72,2	60,8	86,8	8,0	48	21	194	58,0
Modell einh. red. Rasterdaten	83	83	83	0,0	72,4	62,3	86,8	7,7	27	17	110	49,3

Für Kamp Ost erscheinen die Reaktionen dagegen differenzierter. Obwohl die Unterschiede zwischen den teilflächenspezifischen Varianten im Mittel lediglich 10 kg N/ha betragen, zeigen sich hier bereits leichte Unterschiede in den simulierten Erträgen, wohingegen kaum Unterschiede in den residualen Mineralstickstoffgehalten auftreten. Dies deutet darauf hin,

dass hier die Modellempfehlung sehr viel näher an der kritischen N-Versorgung orientiert war. Ein Hinweis auf die bessere Standortangepasstheit der rasterdatenbasierten teilflächenspezifischen Düngung zeigt sich durch den auf beiden Schlägen geringsten Variationskoeffizienten beim nicht genutzten Mineralstickstoff bei gleichzeitig voller Ausschöpfung des Ertragspotentials.

8.3.6 Diskussion

An 2 Beispielen sollte die Vorgehensweise erläutert werden, wie mit Hilfe von Simulationsrechnungen ein Vergleich von Düngungsstrategien für gleiche Flächen durchgeführt werden kann. Dabei zeigt sich, dass auf der Basis einer intensiven, relativ kleinräumigen Standortaufnahme Wasserhaushalt und Ertrag in ihrem räumlichen Muster durch die Simulation befriedigend dargestellt werden können. Der Mineralstickstoffgehalt lässt sich zwar im Mittel des Schlages bzw. von unterschiedlich bewirtschafteten Teilschlägen relativ gut vom Modell beschreiben, die Abweichungen an einzelnen Punkten sind jedoch zum Teil beträchtlich. Dies kann neben der hohen kleinräumigen Variabilität unter anderem daran liegen, dass Teile des Schlages drainiert sind, was bislang in Ermangelung genauer Drainagepläne nicht berücksichtigt wurde.

Berechnungen mit den Profildaten aus der Reichsbodenschätzung sowie aus der Hof-Bodenkarte zeigen, dass diese Informationen vielfach nicht ausreichen, um die beobachteten räumlichen Muster durch eine prozessorientierte Simulation hinreichend gut zu beschreiben. Auf beiden Schlägen sind einige Besonderheiten sowohl bei der Simulation wie auch bei der Abschätzung des Düngungsbedarfs und der zugrundeliegenden Ertragspotentialabschätzung zu berücksichtigen. Hierzu gehört zum einen die Vernässung im nordöstlichen Bereich des Schlages Autobahn sowie im nordöstlichen Teil von Kamp Ost sowie die auf Autobahn nach Süden hin ansteigende Mergelschicht, die mit zunehmenden Steingehalten im Profil verbunden ist. Durch die Variation von unscharfen Eingangsgrößen innerhalb ihrer Unsicherheitsgrenzen lässt sich die Anpassung der Simulation an die gemessenen Daten deutlich verbessern.

Eine Ertragswirkung durch teilflächenspezifische Düngung ließ sich durch die Szenarienrechnungen nur zeigen, wenn das Düngungsniveau im Bereich der kritischen N-Versorgung lag. In diesem Bereich wird auch die beste Stickstoffausnutzung erreicht, die sich in reduzierten Rest-N_{min}-Werten nach der Ernte ausdrückt. Eine teilflächenspezifisch angepasste Düngung führt darüber hinaus zu einer deutlich geringeren Variabilität der verbleibenden N-Mengen im Boden.

8.3.7 Ausblick

Im Verlauf des kommenden Projektjahres werden die Messungen auf den 5 Standorten fortgeführt. Dabei werden die Schläge weiterhin auf den jeweiligen Teilschlägen teilflächenspezifisch bzw. betriebsüblich uniform gedüngt. Die für die beiden Schläge dargestellten Berechnungen werden auch für die anderen Standorte durchgeführt. Die für die Messpunkte im ersten Messjahr vorgenommene "Optimierung" von unsicheren Bodenkennwerten ist anhand der Beobachtungen in den Folgejahren zu validieren.

8.3.8 Literatur

- AG Bodenkunde (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. - 4. Auflage, Stuttgart. 392 S.
- Gallant, J. C.; Wilson, J. P. (1996): TAPESG: A terrain analysis program for the environmental sciences. *Computers and Geosciences* 22: 713-722
- Jürschik, P.; Giebel, A.; O. Wendroth (1999): Processing of point data from combine harvesters for precision farming. In: Stafford, J.V. (Ed.): Precision Agriculture '99. Proc. 2nd Europ. Conf. Prec. Agric. Odense Dänemark: 297-307
- Kersebaum, K. C. (1995): Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling* 81, 145 - 156
- Kersebaum, K.C.; Beblík, A. J. (2001): Performance of a nitrogen dynamics model applied to evaluate agricultural management practices. In: Shaffer, M. J., I. Ma & S. Hansen (Eds.): Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management. Lewis Publishers, Boca Raton, 549 - 569
- Kersebaum, K. C.; Lorenz, K.; Reuter, H. I.; Wendroth, O. (2002): Modelling crop growth and nitrogen dynamics for advisory purposes regarding spatial variability. In: Ajuha, L., L. Ma & T. Howell (Eds.): Agricultural system models in field research and technology transfer. Lewis Publishers, Boca Raton, (im Druck)
- Kersebaum, K.C.; Lorenz, K.; Wendroth, O.; Reuter, H.; Schwarz, J.; Jürschik, P. (2001): Effects of site specific nitrogen fertilization on nitrogen leaching - comparison of different strategies in arable fields based on observations and simulations. In: Grenier, G. & S. Blackmore [eds.]: Proc. 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 683 - 688
- Moore, I. D.; Gessler, P. E.; Nielsen, G. A.; Peterson, G. A. (1993): Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sc. Am. J.*, 57, 443 - 452
- Reuter, H. I.; Wendroth, O.; Kersebaum, K. C.; Schwarz, J. (2001): Solar radiation modelling for precision farming - a feasible approach for better understanding variability of crop production. In: Grenier, G. & S. Blackmore [eds.]: Proc. 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 845 - 850
- Supit, I.; Hooijer, A. A.; Diepen, C. A. van (eds.) (1994): System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1: Theory and Algorithms. EC Publication EUR 15956, Luxembourg, 146 S

