

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

Teilprojektleiter: Dr. K.-C. Kersebaum

Bearbeiter: Dipl. Ing. agr. K. Lorenz

21.1 Zusammenfassung

Auf fünf Pflichtschlägen von fünf Betrieben wurden zu mehreren Zeitpunkten flächendeckende Bodenprobenahmen im Wurzelraum in standortangepassten Rastern durchgeführt. Dabei wurden an den Probenahmepunkten neben den zeitlich sehr dynamischen Zustandsgrößen von Wassergehalt und Mineralstickstoff auch zeitlich stabile Bodenkenngrößen wie Textur und C_{org} -Gehalt als Grundlage für eine räumlich verteilte Simulation bestimmt. Am Beispiel des Schlags Autobahn in Beckum wird eine erste Überprüfung des Modells durch den Vergleich mit Messwerten vorgenommen. Während die räumlichen Muster von Wasserhaushalt und Ertrag durch das Modell gut wiedergespiegelt werden, zeigen die N_{min} -Gehalte in einigen Bereichen deutliche Abweichungen. Im Mittel der beiden unterschiedlich bewirtschafteten Teilflächen wird jedoch die zeitliche Dynamik der Mineralstickstoffgehalte im Jahresverlauf gut nachvollzogen. Ein Vergleich der teilflächenspezifischen Düngung mit der einheitlichen Düngerapplikation zeigt bei der Ertragskartierung einen leichten Mehrertrag auf der teilflächenspezifischen Schlaghälfte. Durch den Transfer der Düngerstrategien auf die jeweils andere Schlaghälfte mittels Szenarioberechnungen erweist sich jedoch, dass dieser Unterschied überwiegend durch die unterschiedliche Standortausstattung der Teilflächen bedingt ist. Eine Reduzierung der Nitratauswaschung wurde mit der gewählten Düngungsstrategie durch die teilflächenspezifische Düngung bislang nicht erreicht.

21.2 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 der Flächen (s. Teilprojekt *Aufbereitung Ertragskartierungen*) werden im ersten Jahr zur Ableitung der Startbedingungen und in den Folgejahren zur Validierung einer Ertragssimulation herangezogen. Weiterhin werden die Kartierungen des Teilprojektes *Hof-Bodenkarten* sowie die Reliefinformationen des Teilprojektes *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 *Hof-Bodenkarten*) bestimmen. Auch die im Teilprojekt *Regionale Stoffdynamik* verwendeten Regio-

nalierungsverfahren sowie die über die EM38-Messung (Teilprojekt *Bodenwasserspeicher*) abgeleiteten Tongehalte lassen sich mit Hilfe dieser Analysendaten validieren. Damit ergibt sich indirekt eine Nutzung durch das Teilprojekt *Ermittlung Ertragspotentiale*. Der Vergleich der unterschiedlichen Düngerstrategien verlangt eine enge Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt *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 der Düngealgorithmus des Teilprojekts *Düngung* für die Projektion der teilflächenspezifischen Düngung auf den real einheitlich gedüngten Teilschlag für die Szenariosimulation genutzt. Eine spätere Nutzung des Modells zur direkten Ableitung einer teilschlagspezifischen Düngung durch das Teilprojekt *Düngung* ist nach entsprechender Vorprüfung des Modells denkbar.

21.3 Einleitung und Problemstellung

Aufgrund der räumlichen Variabilität ertragsrelevanter Standorteigenschaften werden die durch Düngung verabreichten 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.

Aus Sicht der Landmaschinenindustrie ist das technische Problem, Nährstoffe ortsspezifisch zu dosieren, weitgehend gelöst. Insbesondere bei der Stickstoffdüngung werden positive Effekte hinsichtlich einer höheren Düngereffizienz erwartet. In der Bundesrepublik werden derzeit verschiedene Methoden der Düngerbedarfsermittlung für Stickstoff in unterschiedlichem Maße eingesetzt. Unklar ist jedoch, 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 Nitrataustrag 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.

21.4 Material und Methoden

21.4.1 Bodenuntersuchungen

Das Teilprojekt führte bislang Untersuchungen auf den 3 Pflichtschlägen der Anbauperiode 1999/2000 bzw. auf 2 Pflichtschlägen der Anbauperiode 2000/2001 in insgesamt 5 Betrieben durch. Dabei wurden zunächst auf der Basis der vorhandenen Grundinformationen (z. B. Bodenkarte der Reichsbodenschätzung) und, soweit bereits vorhanden, aus der Hofbodenkarte, Reliefinformationen (Teilprojekt *Relief*) und EM38-Mustern (Teilprojekt *Bodenwasserspeicher*) die Probenahmepunkte fixiert.

Die Bodenprobenahme erfolgte zum einen 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. Eine Übersicht über die Anzahl und räumliche Struktur der Probenahmepunkte auf den einzelnen Standorten ist in Tabelle 21-1 dargestellt. Je Probenahmepunkt des Standardrasters wurden fünf Bohrungen mit einem Pürckhauer Bohrstock durchgeführt und für drei Tiefenabschnitte à 30 cm zu einer Mischprobe vereint.

Die erste Bodenprobenahme sollte zunächst die Anfangssituation der Mineralstickstoffverteilung auf dem Schlag vor der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung erfassen sowie zur Messung von langfristig stabilen Bodenzustandsgrößen dienen, die als Grundlage für die Simulation notwendig sind.

Tab. 21-1: Übersicht über die durchgeführten Initialuntersuchungen des Teilprojektes *Lokaler N-Austrag*

Standort Schlagname	Beckum Autobahn	Kassow 111- 2	Gr.Twülpstedt Kamp - Ost	Baasdorf Finkenherd	Thumby Feldsch.- links
Erstbeprobung am:	15.09.99	28.10.99	11.11.99	12.09.00	23.08.00
<u>Standardraster:</u>					
Anzahl Probenahmepunkte	60	117	66	51	51
Basisabstand	50 x 50 m	34 x 34 m	48 x 48 m	96 x 96 m	72 x 72 m
<u>Nester:</u>					
Anzahl Nesterpunkte	32	64	64	64	90
Basisabstand	5 x 5 m	6 x 6 m	6 x 6 m	24 x 24 m	6 x 6 m

21.4.1.1 Basisbodendaten zur Simulation

Für die Simulation der Stickstoffdynamik im System Boden-Pflanze ist die Beschreibung des Bodens durch einige langfristig stabile Bodencharakteristika notwendig, aus denen vor allem die Parameter für die Modellierung der Bodenwasserdynamik sowie für die Simulation der Nettomi-

neralisation abgeleitet werden. Dementsprechend wurden Analysen jeweils in 30 cm Tiefenabschnitten zur Bodentextur und zum C_{org} - und N_{org} -Gehalt (bis 60 cm) aus dem Probenmaterial der Anfangsprobenahme durchgeführt. Bei einigen Standorten war neben der Texturanalyse des Feinbodens auch eine visuelle Abschätzung des Steingehaltes erforderlich.

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 KA4.

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.

21.4.1.2 Zeitreihen zur Modellvalidierung

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 durchgeführten Düngungsmaßnahmen und für das Nitratauswaschungspotential der nachfolgenden 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. So erfolgten für die Anbauperiode 1999/2000 Probenahmen auf den Schlägen Autobahn in Beckum (21.02.2000: 49 + 14 Bohrpunkte), Kamp Ost/Gr. Twülpstedt (07.03.2000: 19 + 28 Bohrpunkte) und Schlag 111/Kassow (15.03.2000: 43 + 32 Bohrpunkte).

21.4.2 Modellierung

21.4.2.1 Modellbeschreibung

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 eingebrachten Pflanzenresiduen, die Denitrifikation, den Transport von Nitrat in der Bodenlösung sowie das Wachstum und die N-Aufnahme durch Pflanzen. Detailliertere Darstellungen des Modellansatzes finden sich u. a. bei Kersebaum (1995).

Für die Simulation des Wasserhaushaltes wird ein Kapazitätsmodell verwendet, dessen Parameter (Feldkapazität und Permanenter Welkepunkt) sich aus Textur und Humusgehalt abschätzen lassen (AG Bodenkunde 1994). Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration erfolgt nach Haude (1955) unter Verwendung von bewuchsspezifischen Monatsfaktoren (Heger 1978; Deut-

scher Wetterdienst unveröffentlicht). Die potentielle Verdunstung wird, abhängig vom Bodenwassergehalt, zu einer aktuellen Verdunstung reduziert, wobei durchwurzelungsabhängig verschiedene Bodenschichten beteiligt sind. Die Nitratverlagerung mit dem Bodenwasser wird mit Hilfe der klassischen Konvektions-Dispersionsgleichung beschrieben.

Die Netto-Mineralisation von organischer Substanz wird im Modell unter Annahme von zwei unterschiedlich schnell mineralisierbaren N-Fractionen mit zwei Reaktionsgleichungen 1. Ordnung beschrieben (Richter et al. 1982). Das Mineralisationspotential der langsam abbaubaren N-Fraktion setzt sich im Wesentlichen aus einem am Umsatz beteiligten Anteil („aktiver pool“) der organischen Substanz des Bodens sowie schwer zersetzbaren Ernterückständen zusammen. Die schnell umsetzbare N-Fraktion besteht aus den leicht abbaubaren Stickstoffverbindungen in frischen Ernterückständen. Die Abhängigkeit der jeweiligen Mineralisationskoeffizienten von der Temperatur wird durch zwei Arrheniusfunktionen (Nordmeyer und Richter 1985) beschrieben. Der Einfluss der Bodenfeuchte auf die Mineralisation wird durch Korrektur der Mineralisationskoeffizienten mit einem von Myers et al. (1982) abgeleiteten Reduktionsfaktor berücksichtigt.

Die Simulation der Denitrifikation wird als Funktion des Nitratgehaltes im Boden, der Bodenfeuchte (in Prozent des wassergefüllten Porenraums) und der Temperatur abgebildet (Richter und Söndgerath unveröffentlicht, zit. in Schneider 1991). Ausbringungsverluste durch Ammoniakentgasung werden für mineralische Düngemittel mit 15 % des Ammonium- bzw. Harnstoffanteils im Dünger veranschlagt. Bei Wirtschaftsdüngern variieren die Verluste in Abhängigkeit von der Dauer bis zur Einarbeitung.

Das Pflanzenwachstumsmodell simuliert auf der Basis von Sonneneinstrahlung und Temperatur die tägliche Nettotrockenmassebildung. Die gebildete Trockenmasse wird in Abhängigkeit vom Pflanzenentwicklungsstadium auf die unterschiedlichen Pflanzenorgane verteilt. Der Ertrag wird zum Erntetermin aus dem Trockengewicht der Ähre abzüglich 20 % Anteil für Spindel und Spelzen ermittelt.

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. Die gebildete Wurzelmasse wird anhand einer empirischen Verteilungsfunktion über die Profiltiefe bis zu einer pflanzen- und bodenartspezifischen maximalen Durchwurzelungstiefe verteilt. Die Wasseraufnahme erfolgt proportional zur Wurzelverteilung und zur Wasserverfügbarkeit in den einzelnen Schichten, wobei Defizite in den oberen Bodenschichten teilweise in tieferen Schichten ausgeglichen werden können. Die Stickstoffaufnahme wird über einen vereinfachten Konvektions-Diffusions-Ansatz abgebildet.

21.4.2.2 Modelleingaben

Die Simulation 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 sowie die Ertragskarte der Vorfrucht für die Berechnungen der Ernteresiduen in die Modellrechnungen ein. Dabei 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 Stationen werden bei entsprechendem Relief oder bei Beschattung durch angrenzende Hindernisse (Waldränder, Gebäude etc.) punktspezifisch korrigiert (Reuter et al. 2001, Kersebaum et al. 2001). Die Korrektur erfolgt auf der Basis von aggregierten Berechnungen mit dem Modul SRAD des Modellpakets TapesG (Gallant & Wilson 1996) unter Verwendung des digitalen Höhenmodells.

21.4.2.3 Vergleich von Düngungsmaßnahmen

Auf den Pflichtschlägen der einzelnen Betriebe erfolgte auf jeweils einem Teil des Schlags eine teilflächenspezifische N-Düngung, während auf dem anderen Teilstück eine entsprechende mittlere Düngung ohne Berücksichtigung der Standortheterogenität erfolgte (siehe Teilprojekt *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 werden 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.

Bislang wurden derartige Simulationen lediglich für den Schlag Autobahn in Beckum durchgeführt, da die Datensätze für die Modellierung für die anderen Schläge noch nicht komplett vorliegen. Die vergleichende Berechnung des N-Austrages erfolgte dabei für den Zeitraum 01.04.2000 bis zum 31.03.2001. Somit wurde durch die Simulation die Zeit während der Vegetationsperiode 2000 sowie die daran anschließende Sickerperiode im Winterhalbjahr 2000/2001 abgedeckt. Da zum Zeitpunkt der Berichterstellung Wetterdaten für 2001 naturgemäß noch nicht vorliegen können, wurde für die Periode 2001 zunächst ein Wetterszenario entsprechend dem Witterungsverlauf im Frühjahr 2000 angenommen. Dies wird später durch aktuelle Wetterdaten ersetzt.

21.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Folgenden ausschließlich am Beispiel des Schrages Autobahn dargestellt, da hier alle notwendigen Messwerte und Daten zur Simulation vorliegen. Die Auswertung und Berechnung für die weiteren Schläge wird im Laufe des ersten Halbjahres 2001 nach dem Füllen der Datenlücken erfolgen.

21.5.1 Räumliche Struktur der Basisdaten

Die Textur stellt eine der zentralen Eingabevariablen sowohl für die Modellierung als auch für die Abschätzung der Ertragspotentiale dar, da sie in entscheidendem Maße die Wasserhaltekapazität des Bodens bestimmt. Durch die an den Rasterpunkten erfolgte Texturanalyse soll im Wesentlichen der Eingabebedarf des Modells für die Simulation an den Probenahmepunkten befriedigt werden. Auf der anderen Seite können die Ergebnisse dazu genutzt werden, Aussagen zur Heterogenität innerhalb von Bodenkartiereinheiten und damit zur Unsicherheit bei der Verwendung von ausgewiesenen Repräsentativprofilen sowie zur Kalibrierung von Messmethoden wie der EM38-Messung liefern. Die auf der Texturanalyse basierende Bodenartkarte für den Standort Autobahn/Beckum ist in Abbildung 21-1a dargestellt. Aufgrund der nach Südosten hin ansteigenden Mergelschicht im Untergrund nimmt der Tongehalt von Norden nach Süden deutlich zu. Die Zunahme der Wasserspeicherkapazität steigt jedoch unterproportional durch einen gleichzeitig ansteigenden Steingehalt im unteren Teil des Profils. Mit Ausnahme der nordöstlichen Ecke des Schrages zeigt die Verteilung des Tongehalts vor allem in 30-60 cm Tiefe ein sehr ähnliches Muster wie die ECa-Messungen (Teilprojekt *Bodenwasserspeicher*). In diesem Bereich nahe des Stelter Baches überlagert möglicherweise die höhere Bodenfeuchte das Signal des Tongehaltes. Das Bestimmtheitsmaß zwischen beiden Messungen beträgt 0,68.

Ein weiteres wichtiges Bodencharakteristikum, welches sowohl die physikalischen wie auch die physiko-chemischen und biologischen Bodeneigenschaften prägt, ist der Gehalt an organischem Kohlenstoff. Tendenziell ist ein Anstieg der Humusgehaltes von Norden nach Süden korrespondierend mit der Zunahme des Feinanteils (Ton + Feinschluff, $r^2 = 0,54$) zu beobachten. Eine Ausnahme bildet wiederum die nordöstliche Ecke des Schrages, wo sich die ehemalige Grünlandnutzung, der hohe Grundwasserstand sowie die anthropogene Auffüllung der ehemaligen Senke durch einen deutlich höheren Humusgehalt auch im Unterboden bemerkbar macht (Abb. 21-1b).

Neben den zeitlich stabilen Bodencharakteristika werden für die Simulation der Ausgangswassergehalt und die N_{\min} -Verteilung nach der Ernte sowie die Ertragskarte der Vorfrucht verwendet. Die Grundwasserstände, die im Wesentlichen im Bereich des Stelter Baches im Norden des Schrages eine Rolle spielen, konnten nur grob geschätzt werden. Die räumliche Verteilung der für das Modell notwendigen Anfangsbedingung des N_{\min} -Gehalts im September 1999 sind in Abbildung 21-1c dargestellt.

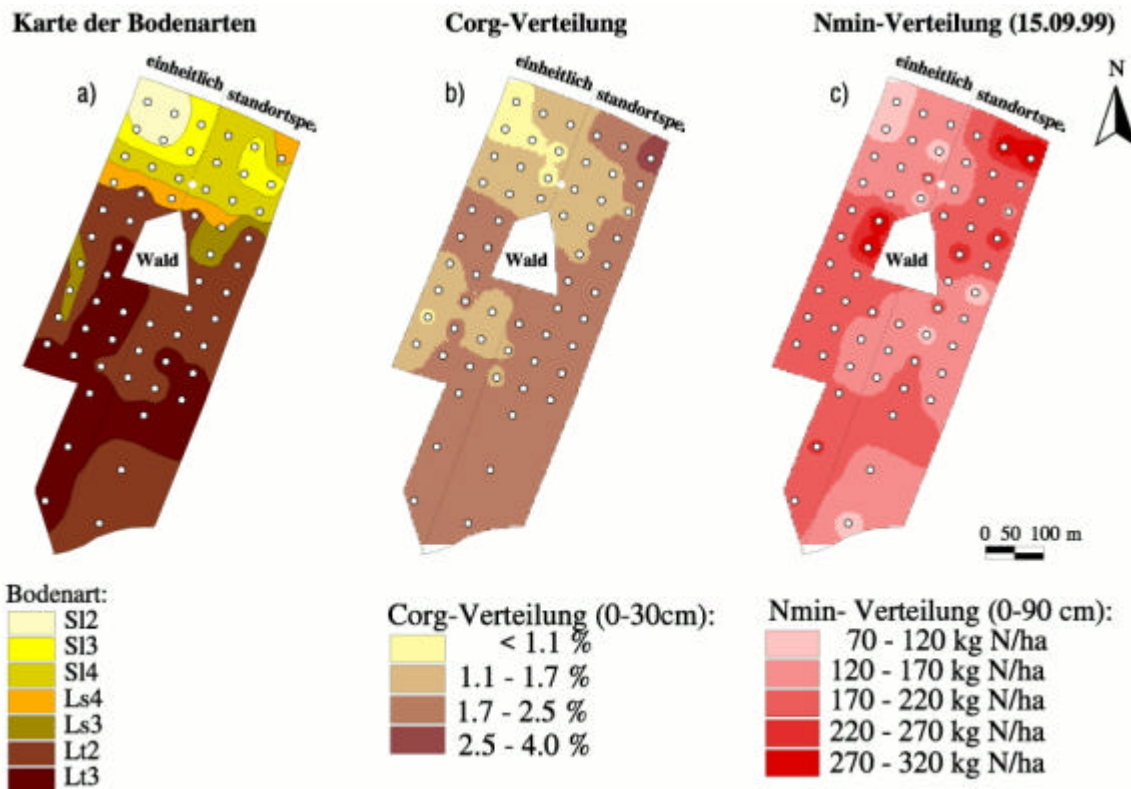


Abb. 21-1: Räumliche Verteilung einiger wichtiger Modelleingangsdaten auf Schlag Autobahn in Beckum: a) mittlere Bodenart 0-90 cm, b) C_{org} -Gehalt 0-30 cm, c) N_{min} -Gehalt 0-90 cm am 15.09.1999.

21.5.2 Zeitliche Dynamik des Mineralstickstoffgehalts

Die simulierte zeitliche Dynamik des Mineralstickstoffgehaltes in der Wurzelzone zwischen der ersten Probenahme im September 1999 und der Messung nach der Ernte des Winterweizens im August 2000 ist im Mittel der an allen drei Terminen untersuchten Standardraasterpunkte (49) im Vergleich zu den Messwerten dargestellt (Abb. 21-2).

Ausgehend von einem hohen Restgehalt nach der Ernte des Rapses sinkt der Mineralstickstoffgehalt in der Wurzelzone bis zum Frühjahr durch die N-Aufnahme und Auswaschungsverluste kontinuierlich ab. Die Messung zeigt zudem eine Abnahme der Streuung in den N_{min} -Gehalten bis zum Frühjahrstermin. Mittelwert und Streuung werden durch die Simulation gut nachvollzogen. Durch die variable Düngung auf der teilflächenspezifisch gedüngten Seite des Schlages nimmt bei der Simulation die Streuung der N_{min} -Gehalte wieder zu. Obwohl der Messwert nach der Ernte ebenfalls gut getroffen wird, ist die tatsächlich beobachtete Streuung der Messpunkte gegenüber der Simulation geringer.

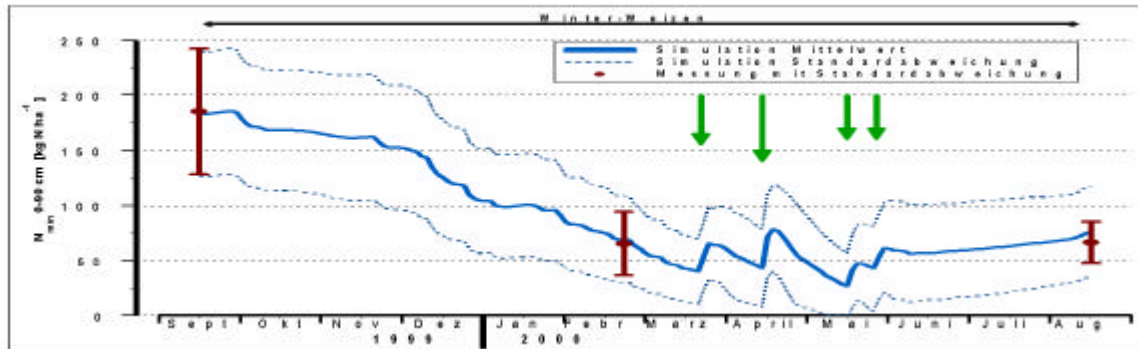


Abb. 21-2: Simulierte und gemessene N_{\min} -Gehalte in der Wurzelzone (0-90 cm) des Schlates Autobahn in Beckum während der Anbauperiode 1999/2000 an 49 Punkten des Standardrasters (Pfeile = mittlere Düngungsgaben)

21.5.3 Vergleich der räumlichen Muster von Messungen und Simulation

Zur Überprüfung der Nutzbarkeit des Modells für Fragestellungen der schlaginternen Variabilität ist neben der Überprüfung der zeitlichen Dynamik auch ein Vergleich der mit dem Modell simulierten räumlichen Verteilung von einzelnen Zustandsgrößen mit gemessenen Verteilungen in der Fläche vorzunehmen. Da die Wasserdynamik eine wesentliche Rolle sowohl bei der Ertragsbildung als auch bei Umsetzungs- und Transportprozessen von Stickstoff spielt, bietet sich zunächst ein Vergleich von gemessenen und simulierten Wassergehalten im Bodenprofil an. In Abbildung 21-3 ist die räumliche Verteilung des für die Wurzelzone (0-90 cm) gemittelten Wassergehaltes nach einer knapp 1-jährigen Simulationsdauer kurz nach Ernte des Winterweizens im August 2000 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit ist neben den Verteilungskarten der gemessene und simulierte Wassergehalt für die einzelnen Punkte des Standardrasters dargestellt. Die Abbildung zeigt eine überwiegend gute Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Werten ($r^2 = 0,8$).

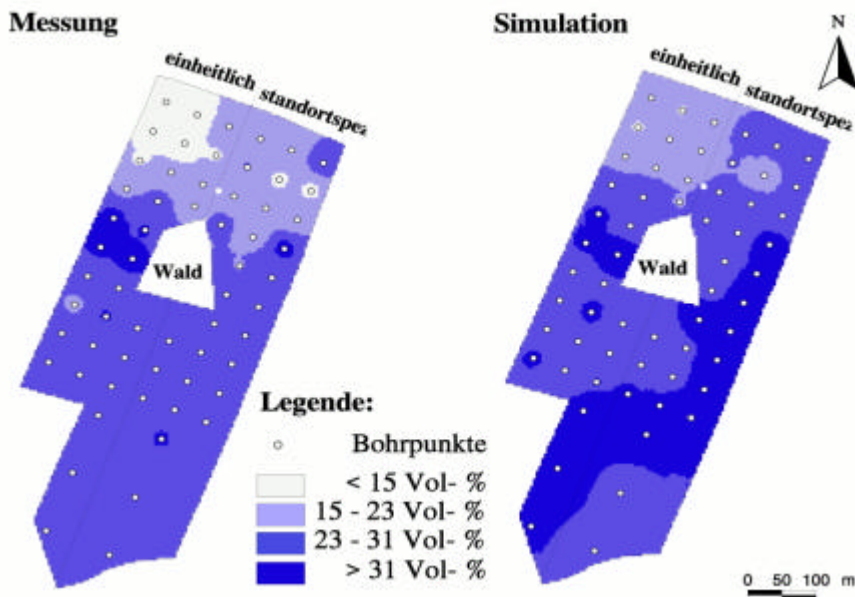
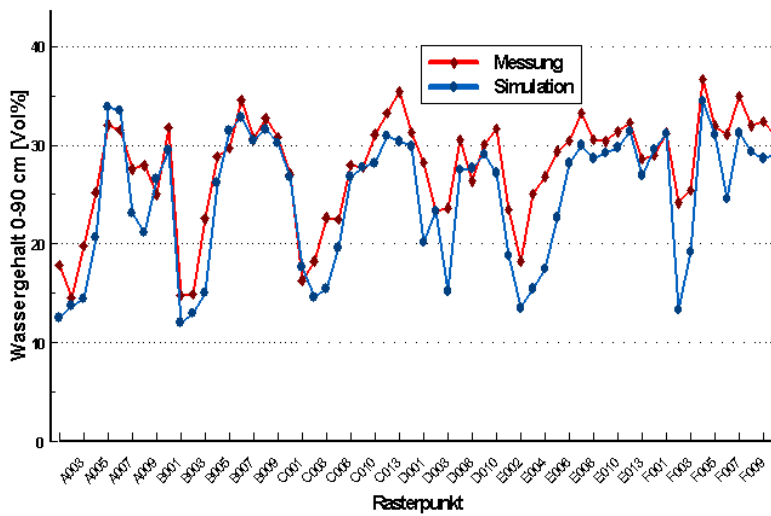


Abb. 21-3: Verteilung der gemessenen und simulierten Wassergehalte auf dem Schlag Autobahn in Beckum zur Ernte 2000 (Flächendarstellung und Darstellung im "Transekt")

Die räumliche Verteilung der Winterweizenerträge (Abb. 21-4) zeigt, dass die Simulation nicht nur das Ertragsniveau des Gesamtschlages gut abbildet, sondern auch in der Lage ist, das flächenhafte Muster der Ertragskartierung in ähnlicher Weise nachzuvollziehen. Nur 5 % der simulierten Werte weichen um mehr als 15 % von den gemittelten Messwerten ab. Die Darstellung der Rasterpunkte in Transektform macht deutlich, dass die insgesamt geringere Korrelation ($r^2 = 0,2$) z. T. durch eine sehr hohe kleinräumige Variabilität der Ertragsmessung innerhalb des 10 m Radius um den Rasterpunkt erklärbar ist.

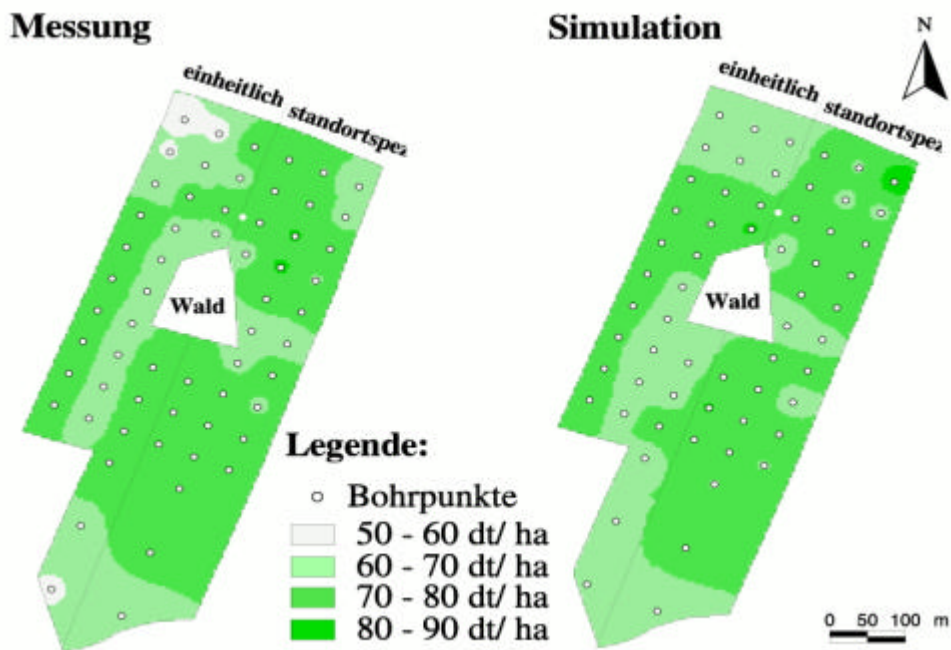
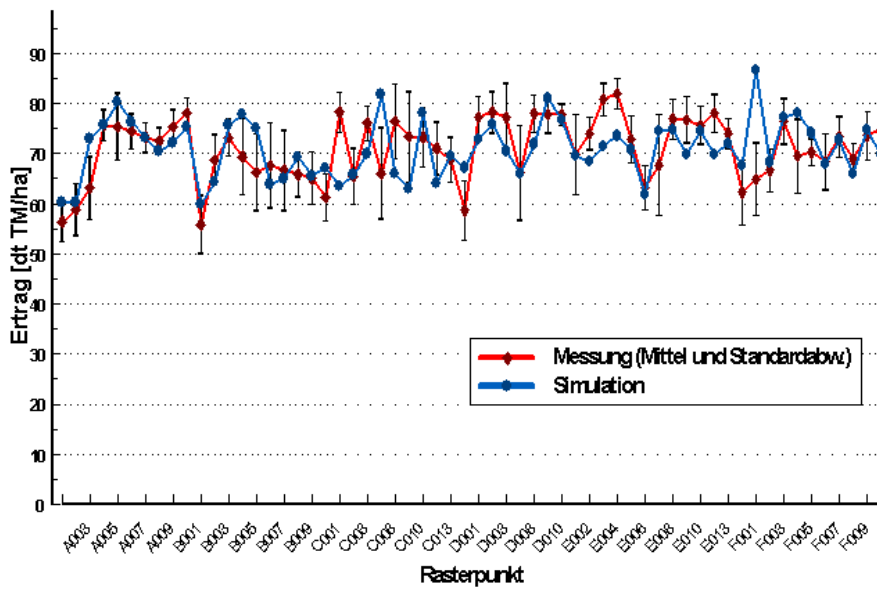


Abb. 21-4: Verteilung der gemessenen und simulierten Erträge auf dem Schlag Autobahn in Beckum zur Ernte 2000 (Flächendarstellung und Darstellung im "Transekt")

Obwohl die Simulation für die N_{\min} -Gehalte nach der Ernte im Mittel die Verhältnisse auch zwischen den unterschiedlich bewirtschafteten Teilschlägen gut widerspiegelt, wird das räumliche Muster nur recht grob abgebildet (Abb. 21-5). Insbesondere in den unteren Bodenschichten ergeben sich häufig größere Abweichungen.

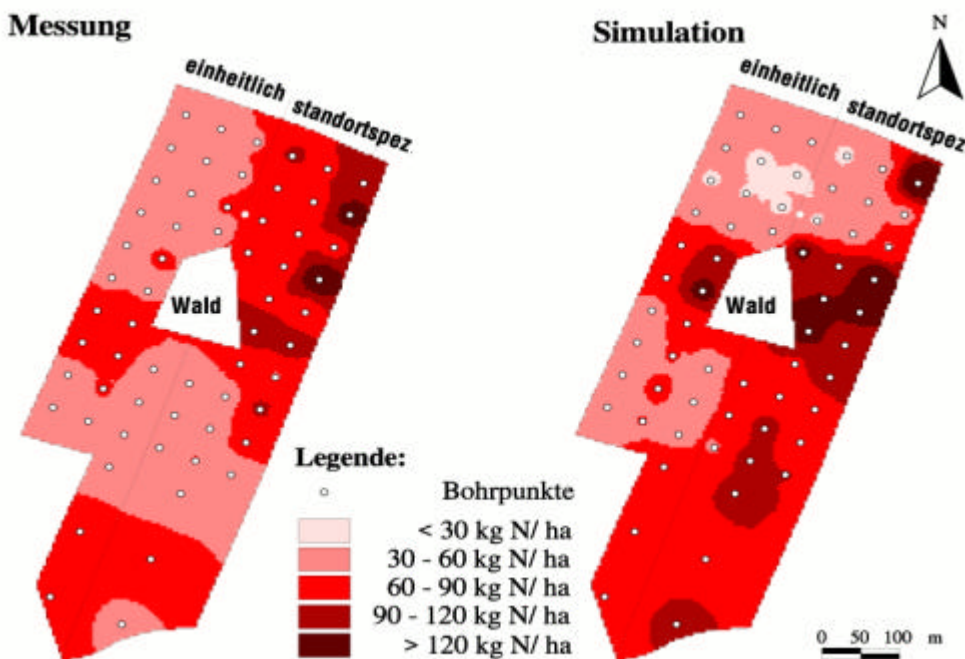
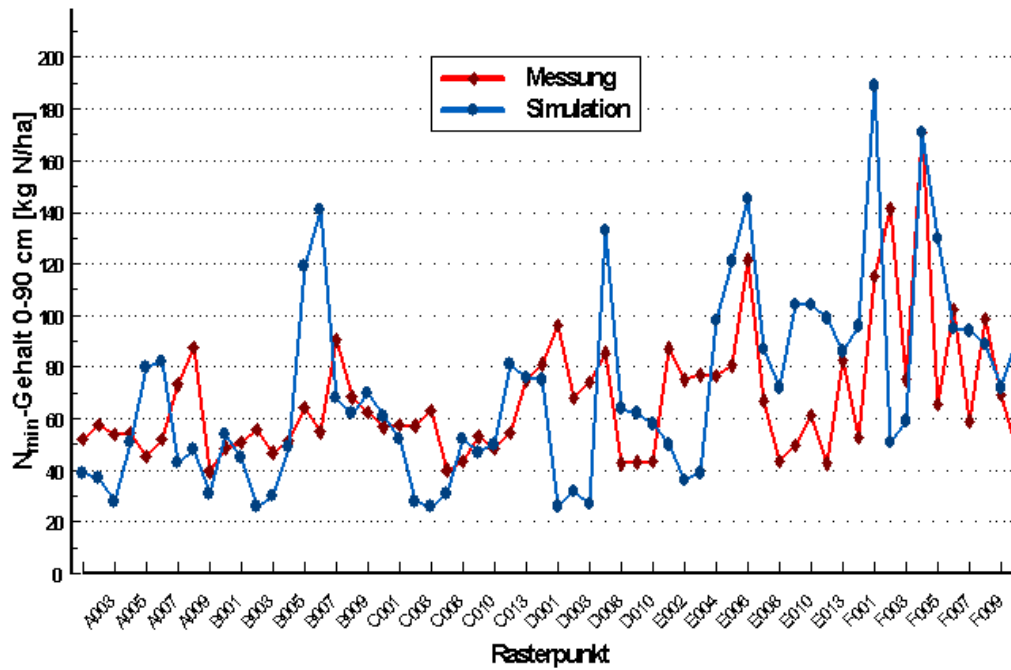


Abb. 21-5: Verteilung der gemessenen und simulierten N_{min}-Gehalte des Bodens (0 - 90 cm) auf dem Schlag Autobahn in Beckum zur Ernte 2000 (Flächendarstellung und Darstellung im "Transekt")

21.5.4 Vergleich von einheitlicher und teilflächenspezifischer Düngung

Vergleicht man die beiden unterschiedlich bewirtschafteten Teilflächen im Hinblick auf die erzielten Erträge und die nicht ausgeschöpften Mineralstickstoffgehalte nach der Ernte, so ergibt sich nach Tabelle 21-2 ein Mehrertrag der teilflächenspezifischen Schlaghälfte gegenüber einheitlicher Düngung von $4 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$. Die Simulation weist die gleiche Tendenz aus, jedoch nur mit $2 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$ Differenz. Gleichzeitig werden nach der Ernte auf der teilflächenspezifischen Variante im Durchschnitt $19 \text{ kg dt} \cdot \text{ha}^{-1}$ mehr nichtausgeschöpfter Mineralstickstoff im Wurzelraum zurückgelassen als nach einheitlicher Düngung. Auch hier zeigt die Simulation eine ähnliche Tendenz bei einer insgesamt höheren Differenz von $30 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Da die Flächenausstattung beider Schlaghälften jedoch unterschiedlich ist, ist ein solcher Vergleich kaum aussagefähig. Erst das Simulationsszenario schafft die Voraussetzungen, die Ergebnisse für identische Flächen zu vergleichen, in diesem Fall für den ganzen Schlag. Das ebenfalls in Tabelle 21-2 gezeigte Ergebnis zeigt, dass es im Falle der Erträge keine signifikanten Unterschiede zwischen teilflächenspezifischer und einheitlicher Düngung gibt, sich aber bei insgesamt etwas höheren residualen N_{\min} -Mengen nach der Ernte ein um $9 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ höherer Austrag für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung ergeben würde.

Tab. 21-2: Vergleich gemessener und simulierter Erträge und residualer N_{\min} -Gehalte zur Ernte Winterweizen auf Schlag Autobahn in Beckum für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsvarianten sowie Szenariorechnungen zur N-Auswaschung bei Anwendung der Varianten auf der Gesamtfläche (Vk = Variationskoeffizient)

	tatsächliche Bewirtschaftung				Bewirtschaftungsszenario	
	einheitliche Düngung		teilflächenspez. Düngung		einheitliche Düngung	teilflächenspez. Düngung
Methode	Messung	Modell	Messung	Modell	Modell	Modell
Anzahl Rasterpunkte	30	30	30	30	60	60
Ertrag (Mittel/Vk)	69 (0,09)	70 (0,09)	73 (0,07)	72 (0,07)	71 (0,08)	71 (0,08)
N_{\min} (Mittel/Vk)	58 (0,22)	56 (0,48)	77 (0,40)	86 (0,47)	64 (0,54)	78 (0,50)
N-Austrag (01.04.2000-31.03.2001)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	85	94

21.6 Diskussion

Am Beispiel des Schlages Autobahn in Beckum sollte zunächst die Vorgehensweise dargestellt 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 sehr gut in seiner zeitlichen Dynamik vom Modell beschreiben, die Abweichungen an einzelnen Punkten sind jedoch zum Teil beträchtlich. Das räumliche Muster wird durch das Modell daher nur grob wiedergespiegelt. 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.

Erste Berechnungen mit den bereits vorliegenden Bodeninformationen aus der Reichsbodenschätzung haben gezeigt, dass diese Informationen vielfach nicht ausreichen, um die beobachteten räumlichen Muster durch eine prozessorientierte Simulation hinreichend gut zu beschreiben. Auf dem Schlag Autobahn sind einige Besonderheiten sowohl bei der Simulation als auch bei der Abschätzung des Düngungsbedarfs und der zugrunde liegenden Ertragspotentialabschätzung zu berücksichtigen. Hierzu gehört zum einen die Vernässung im nordöstlichen Bereich des Schlages, zum anderen die nach Süden hin ansteigende Mergelschicht, die mit zunehmenden Steingehalten im Profil verbunden ist. Während die Kapazitätsparameter und damit die simulierten Wassergehalte den Steingehalt bereits entsprechend berücksichtigen, wurden die gemessenen N_{\min} -Werte bislang nicht um den Steingehalt bereinigt. Es ist jedoch auch darauf hinzuweisen, dass der Steingehalt nur sehr grob aus den Beobachtungen der Bohrungen geschätzt wurde. Eine detaillierte Aufnahme erscheint jedoch aus technischen Gründen nicht praktikabel.

Der Vergleich von gemessenen und simulierten Erträgen und N_{\min} -Gehalten zeigt zumindest im Mittel der Fläche, wie auch der unterschiedlich bewirtschafteten Teilschläge eine sehr gute Übereinstimmung. Der sowohl durch die Messung als auch durch die Simulation ausgewiesene Mehrertrag auf der teilflächenspezifisch bewirtschafteten Teilfläche erweist sich jedoch bei der Übertragung des jeweiligen Düngungsschemas auf die andere Schlaghälfte als bodenbedingter Unterschied. Die angestrebte Reduzierung der Sickerwasserbelastung konnte durch die teilflächenspezifische Bewirtschaftung nicht erreicht werden. Die Ursache hierfür liegt zum einen daran, dass der Düngeralgorithmus sich im Wesentlichen auf die Standardbodeninformationen stützt, wodurch die bereits erwähnten Schlagbesonderheiten unberücksichtigt bleiben. Auf der anderen Seite ist eine Reduktion der Nitratauswaschung nur dann zu erwarten, wenn das Stickstoffangebot aus dem Boden möglichst genau erfasst wird und das Ertragspotential und damit der Bedarf der Pflanze sich an der jeweils aktuellen Entwicklung orientiert. Erste positive Ergebnisse zu einer modellgestützten Düngerempfehlung, die versucht diese raumzeitliche Dynamik zu berücksichtigen, werden im Vergleich mit anderen Verfahren bei Kersebaum et al. (2001) dargestellt.

21.7 Ausblick

In Verlauf des kommenden Projektjahres werden die Messungen auf den fünf Standorten fortgeführt. Dabei werden die Schläge weiterhin auf den jeweiligen Teilschlägen teilflächenspezifisch bzw. betriebsüblich uniform mit Stickstoff gedüngt. Nach Schließung der noch vorhandenen Datenlücken werden die für den Schlag Autobahn dargestellten Berechnungen auch für die anderen Standorte durchgeführt. Durch die in den Nestern durchgeführten Untersuchungen der tieferen Bodenschichten bis 3 m wird, soweit möglich, eine Überprüfung der mit dem Modell berechneten Nitratverlagerung vorgenommen.

Die Flächensimulationen werden auf der Basis der unterschiedlich detaillierten Kartierungen bzw. Ableitungen durchgeführt, um zu untersuchen, welche Genauigkeitsanforderungen an die

Beschreibung der Standorte gestellt werden müssen, um eine hinreichend differenzierte Aussage zur Ertragsbildung und Nährstoffdynamik zu erreichen.

Ein Einsatz des Modells zur direkten Ableitung von teilflächenspezifischen Düngeempfehlungen ist derzeit in der Erprobung, sodass ein erster Testeinsatz an einzelnen Standorten für die Anbauperiode 2001/2002 möglich erscheint.

21.8 Literatur

- AG Bodenkunde (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. - 4. Auflage, Stuttgart. 392 S.
- Gallant, J. C. and Wilson J. P. (1996): TAPESG: A terrain analysis program for the environmental sciences. *Computers and Geosciences* 22: S.713-722.
- Jürschik, P., Giebel A. and Wendroth O. (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: S.297-307.
- Haude, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. - Mitt. d. Dt. Wetterdienst 11.
- Heger, K. (1978): Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration über unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen. - *Mitteilgn. Dtsch.Bodenkundl. Ges.* S.26: 21-40.
- Kersebaum, K. C. (1995): Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*: S.145 - 156, S.81
- Kersebaum, K C., Lorenz K., Wendroth O., Reuter H., Schwarz J. and 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: F. Sévila, S. Blackmore, G. Grenier [eds.]: Precision Agriculture '01.-Proc. 3rd Europ. Conf. Precision Agriculture, Montpellier, France, (zur Veröffentlichung eingereicht).
- Moore, I., Gessler D., E., Nielsen P. and Peterson, G. A. (1993) Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sc. Am. J.*, 57: S.443-452.
- Myers, R. J. K., A. Campbell C. and Weier, K. L. (1982): Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. - *Can. J. Soil Sci.* 62: S.111-124.
- Nordmeyer, H. and Richter, J. (1985): Incubation experiments on nitrogen mineralization in loess and sandy soils. - *Plant and Soil* 83: S.433-445.
- Reuter, H. I., Wendroth, O., Kersebaum, K. C. and Schwarz, J. (2001) Solar radiation modelling for precision farming - a feasible approach for better understanding variability of crop production. In: F. Sévila, S. Blackmore, G. Grenier [eds.]: Precision Agriculture '01.-Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France (zur Veröffentlichung eingereicht).
- Richter, J., Nuske A., Habenicht W. and Bauer J. (1982): Optimized N-mineralization parameters of loess soils from incubation experiments. - *Plant and Soil* 68: S.379-388.
- Schneider, U. (1991): Messungen von Denitrifikations- und Nitratauswaschungsverlusten in einem landwirtschaftlich genutzten Wassereinzugsgebiet. - Dissertation, Univ. Bonn.
- Supit, I, Hooijer A. A. and van Diepen C. A. [eds.] (1994): System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1: Theory and Algorithms. -EC Publication EUR 15956, Luxemburg, 146 S.

21.9 Adressen

Dr. K.-C. Kersebaum,

Dipl. Ing. agr. K. Lorenz

Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e. V.

Institut für Landschaftssystemanalyse

Eberswalder Straße 84

15374 Müncheberg

Tel: 033432/82-394,

033432/83-354

Fax: 033432/82-334

E-Mail: ckersebaum@zalf.de

klorenz@zalf.de