Landwirtschaft und
Grundwasserschutz

Niedersächsisches
Landesamt für
Ökologie

# „N-Simulationsmodelle“ Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz in der Praxis

## Fachseminar

des Niedersächsischen
Landesamtes für Ökologie
am 16.07.1998 in Hildesheim

Niedersachsen

# Inhalt


## Vorwort

## I. Programm

## II. Manuskripte

**Hinweis:**
**Die Manuskripte der Tagungsbeiträge liegen nicht digital vor!**

## III. Zusammenfassung der Diskussions-ergebnisse

## IV. Anhang

**- entfällt -**

# Vorwort

Seit einigen Jahren werden bei umweltrelevanten Fragestellungen zunehmend Simulationsmodelle eingesetzt. Ein besonderer Vorzug dieser Simulationsmodelle liegt darin, dass mit ihrer Hilfe computergestützt komplexe naturwissenschaftliche, medienübergreifende Fragestellungen bearbeitet werden können, die anderweitig kaum zu bewältigen wären. Die i.d.R. damit verbundene Zeit- und Kostenersparnis hat dazu geführt, dass sich Simulationsmodelle in vielen Bereichen als ein effizientes Planungsinstrument etabliert haben.

Für die durch Spezialisierung und Intensivierung geprägte heutige Landwirtschaft und den damit verbundenen Belastungen der Umwelt, insbesondere der Umweltmedien Boden und Wasser, werden ebenfalls verstärkt Modelle entwickelt und eingesetzt. Dies geschieht einerseits, um die komplexen Zusammenhänge und Vorgänge z.B. im System Boden - Pflanze zu beschreiben, und andererseits, um konkrete Fragestellungen im Bereich Landwirtschaft - Grundwasserschutz (z.B. Düngeberatung) zu bearbeiten. So kann beispielsweise mit Hilfe entsprechender Simulationsmodelle die N-Dynamik (z.B. Mineralisation) eines Standortes prognostiziert werden, wodurch eine angestrebte, standortangepasste Düngeplanung optimiert werden kann. Dies hat zur Folge, dass der Aufwand für Routineuntersuchungen (z.B. $N_{min}$) im Feld reduziert und somit Kosten eingespart werden können.

Ziel dieses Fachseminars war es sein, anhand von ausgewählten Beispielen den Vertretern der Wasserwirtschaftsverwaltung, weiteren Behördenvertretern und den Beratungsträgern der landwirtschaftlichen Zusatzberatung einen Überblick sowohl über vorhandene als auch in Entwicklung befindliche N-Simulationsmodelle zu vermitteln.

Hierbei standen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Aktuelle Information zu den unterschiedlichen Modellen
- Schaffung von Transparenz hinsichtlich Modellaufbau und Datenbedarf
- Aufzeigen der Anwendungsgebiete der Modelle
- Kritische Prüfung der praktischen Relevanz im Hinblick auf die landwirtschaftliche Zusatzberatung
- Formulierung von Anforderungen seitens der Anwender
- Ausblick und zukünftige Planungen der Modellierer

Die sehr zielorientiert geführte Diskussion unterstrich das große Interesse der Anwesenden sowohl auf der Seite der Modellierer als auch auf der Nutzer- bzw. Anwenderseite an einem kritischen und konstruktiven Dialog. In der Diskussion ist es den Anwendern gelungen, ihre unterschiedlichen Ansprüche an die Simulationsmodelle zu formulieren. Ferner konnten sie Defizitbereiche aufzeigen und wichtige Anregungen liefern. Auf der anderen Seite ist es den Modellentwicklern gelungen, das Verständnis in Bezug auf die Komplexität, die Möglichkeiten aber auch die Grenzen der verschiedenen Modellansätze zu fördern.

Mit Blick auf die vorab genannten Ziele und Erwartungen, darf dieses Fachseminar als eine erfolgreiche Veranstaltung betrachtet werden, die eine Fortsetzung finden sollte, um beispielsweise Neu - oder Weiterentwicklungen von N-Simulationsmodellen zu präsentieren, und um die Möglichkeiten der Modellanwendung in der landwirtschaftlichen Beratungspraxis im Expertenkreis zu diskutieren. Allen Teilnehmern, insbesondere den Referenten, sei an dieser Stelle für ihren Beitrag zum guten Gelingen der Veranstaltung recht herzlich gedankt.

Die Manuskripte zu den einzelnen Fachbeiträgen folgen im Anschluß in chronologischer Reihenfolge gemäß Programm. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse des Fachseminars schließt sich an. Die Teilnehmerliste befindet sich im Anhang des Tagungsbandes.

Hildesheim, im August 1998

# I. Programm

**Leitung und Moderation:** Dipl.-Ing. agr. H. Schültken, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim

| | |
|---|---|
| 9.30 Uhr | Begrüßung<br>Dr. H.-J. Schultz-Wildelau, NLÖ |
| 9.45 Uhr | Die Anwendung von Mischzellenmodellen zur Abschätzung der Nitratauswaschung im Winterhalbjahr<br>Prof. R. van der Ploeg, Uni Hannover |
| 10.15 Uhr | Multiple Regressionsmodelle zur Beschreibung des Bodenstickstoffhaushaltes<br>Dr. P. Schweigert, Uni Hannover |
| 10.45 Uhr | Verfahren zur Berechnung der Nitratauswaschung aus Nmin-Meßwerten mit einem Simulationsmodell<br>Dipl.-Ing. agr. K. Köhler, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover |
| 11.15 Uhr | Kaffeepause |
| 11.30 Uhr | Szenarienberechnung zur Reduktion der Nitratbelastung am Fallbeispiel des Trinkwassereinzugsgebietes Scheeßel<br>Dr. Ch. Kersebaum, ZALF Müncheberg |
| 12.00 Uhr | Das N-Haushaltsmodell *Minerva*<br>Dr. A. Beblik, Institut für Boden- und Gewässerschutz, Braunschweig |
| 12.30 Uhr | Mittagspause |
| 13.15 Uhr | Praktische Erfahrungen mit dem Einsatz des N-Haushaltsmodelles *Minerva*<br>Dr. U. Lehrke, LwK Hannover, Bezirksstelle Braunschweig |
| 13.45 Uhr | Diskussion |
| 15.45 Uhr | Zusammenfassung der Ergebnisse und Vorschläge für die weitere Vorgehensweise |
| 16.15 Uhr | Ende der Veranstaltung |

# II. Manuskripte

# Die Anwendung von Mischzellenmodellen zur Abschätzung der Nitratauswaschung im Winterhalbjahr

R.R. van der Ploeg
Institut für Bodenkunde der Universität Hannover
Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover

Es ist m.E. fraglich ob jeweils voll-deterministische Modelle entwickelt werden können, mit welchen das Verhalten von Bodenstickstoff unter Feldbedingungen auf der Schlagebene ausreichend genau beschrieben werden kann. Der Grund für diese etwas getrübte Einschätzung ist zum einen die große Zahl von Prozessen, welche das Verhalten von Bodenstickstoff beeinflussen (und welche bislang nur zum Teil verstanden sind) und zum anderen die große Variabilität der Bodenkenngrößen, welche diese Prozesse steuern. Solche Modelle sind jedoch wertvoll als Mittel zur Deutung von Ergebnissen aus der Grundlagenforschung (für Säulen- oder Parzellenversuche) oder zur Herleitung von Grenzwerten und zur Begründung von Maßnahmen zum Schutz der Umwelt. Ein derartiges Modell ist das sogenannte Mischzellen- oder Plattenmodell (van der Ploeg et al., 1995a, b und c).
Das Mischzellenmodell von van der Ploeg et al. (1995a, b und c) beschreibt für stationäre, eindimensionale Fließbedingungen den Transport von gelösten Substanzen, wie Nitrat, durch das Bodenprofil. Stetige Fließbedingungen liegen in unseren Breiten annähernd im hydrologischen Winterhalbjahr (1. Nov. - 30. April) vor. Als Eingabedaten benötigt das Modell den konstanten Bodenwassergehalt im Winterhalbjahr (Feldkapazität), die konstante Niederschlagsrate über diese Periode (abzüglich der Evaporation) und die Nitratmenge und -verteilung im Bodenprofil zum Winteranfang. Die Wahl der Größe (Höhe) der Mischzellen beeinflußt die Rechenergebnisse in erheblichem Maße. Im Vergleich mit dem konventionellen Konvektions-Dispersionsmodell (für stationäre Fließbedingungen) liefert das Mischzellenmodell nahezu identische Ergebnisse, falls die Höhe der Mischzellen $\Delta z$, berechnet wird als

$$\Delta z = 2D/v,$$

wobei D der Dispersionskoeffizient und v die (konstante) Fließgeschwindigkeit des Porenwassers der Konvektions-Dispersionsgleichung darstellt (van der Ploeg et al., 1995c). Der Vorteil eines Mischzellenmodells gegenüber dem Konvektions-Dispersionsmodell ist, daß geringere Anforderungen an den Benutzer gestellt werden. Verfahren zur Bestimmung von D und v sind beispielsweise von van Genuchten und Wierenga (1986) beschrieben worden.
Van der Ploeg et al. (1995a, b) zeigten, daß mit dem Mischzellenmodell auch eine (konstante) N-Mineralisierung im Oberboden sowie der N-Eintrag aus der Atmosphäre berücksichtigt werden kann. Zudem wurde gezeigt (unveröffentlichtes Material), daß das Modell erweitert werden kann zur Beschreibung der Nitratverlagerung in Zweischicht-Böden oder in Böden mit kombiniertem mobilen/immobilen Wasser. Ebenfalls besteht die Möglichkeit das Modell für das Winterhalbjahr derart zu erweitern, daß zwar weiterhin ein konstanter Wassergehalt gefordert wird (Feldkapazität), aber z.B. monatsweise eine unterschiedliche Niederschlagsrate vorgegeben werden kann. Zur Simulation der Nitratverlagerung im Boden unter deutlich nichtstetigen Fließbedingungen ist das Modell aber nicht geeignet. Das Mischzellenmodell kann jedoch vorteilhaft eingesetzt werden, in Kombination mit einem GIS, zur Darstellung der Nitratauswaschungsgefährdung im Winterhalbjahr auf regionaler Ebene, z.B. auf der Ebene eines Bundeslandes (Hilmes et al., 1998).

Literatur

Hilmes, G., Heidrun Böckler, J. Ilsemann, U. Müller und R.R. van der Ploeg. 1998. Abschätzung und Darstellung des Nitratauswaschungsrisikos aus landwirtschaftlich genutzten Böden im Winter am Beispiel von Niedersachsen. Wasser und Boden (im Druck).

van der Ploeg, R.R., G. Machulla und H. Ringe. 1995a. Ein Mischzellenmodell zur Abschätzung der Nitratauswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Böden im Winterhalbjahr. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 158: 365-373.

van der Ploeg, R.R., G. Machulla, H. Ringe und C. Meins. 1995b. Herbstliche Nmin-Grenzwerte als Funktion von Bodenbeschaffenheit, Klima und Bodennutzung: Modellüberlegungen. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 158: 435-444.

van der Ploeg, R.R., H. Ringe, and G. Machulla. 1995c. Late fall site-specific soil nitrate upper limits for groundwater protection purposes. J. Environ. Qual. 24: 725-733.

van Genuchten, M.Th. and P.J. Wierenga. 1986. Solute dispersion coefficients and retardation factors. p. 1025-1054. *In* A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Agronomy 9 (Part 1), 2nd ed. ASA and SSSA, Madison (WI), USA.

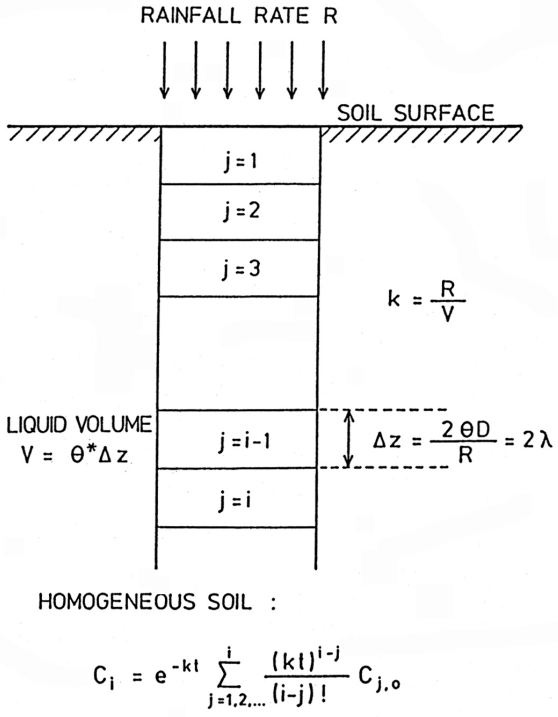



**Abb.1: Schematische Darstellung des Bodens als Abfolge von Mischzellen; $C_i$ ist die Konzentration in Mischzelle Nr.i.**

# Regressionsmodelle zur Witterungsabhängigkeit von Nmin-Werten

**Dr. P. Schweigert**

## Inhalt:


| | |
|---|---|
| 1. Veranschaulichung der Methode | 1 |
| 2. Anwendungsmöglichkeiten, benötigte Daten | 3 |
| 2.1 Trendanalyse | 4 |
| 2.2 Nmin-Prognose | 7 |


**Kurzfassung des Beitrags zum Fachgespräch:**
**„N-Simulationsmodelle" - Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz in der Praxis**
**NLÖ, 16.7.98**

# 1. Veranschaulichung der Methode

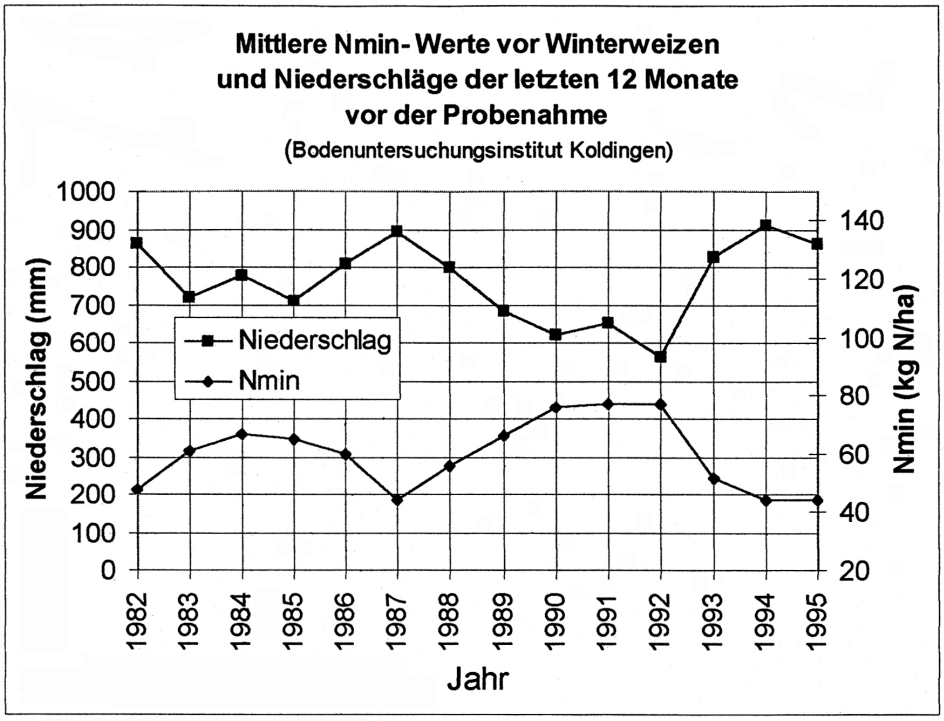



**Abb. 1**

**Datengrundlage:** Mittlere Nmin-Werte des Bodenuntersuchungsinstitutes Koldingen, mehrere tausend Einzelwerte pro Jahr, Niederschläge der Klimastation Hildesheim, Bodenart weitgehend Löß.

- Hohe Niederschläge haben niedrige Nmin-Werte zur Folge (allgemein bekannt).
- Die Beziehung ist sehr eng (bisher nicht bekannt) und sehr gut abgesichert (Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,1 %).
- Der Nmin-Wert ist von den Niederschlägen langer Zeiträume abhängig.
  Wahrscheinliche Ursachen des Niederschlagseinflusses:
  1. Nitratauswaschung in Winter
  2. verbesserte Nährstoffaufnahme im Sommer
- Temperatureinflüsse sind in diesem Beispiel und einer Reihe von anderen Fällen unbedeutend, wegen der besseren Anschaulichkeit werden nur Regressionsrechnungen dargestellt, die allein den Niederschlagseinfluß beschreiben. Daß in vielen Fällen keine Temperatureinflüsse festzustellen sind, dürfte weitgehend daran liegen, daß die durch steigende Temperaturen geförderte N-Freisetzung des Bodens durch die ebenfalls geförderte N-Aufnahme der Pflanzen weitgehend ausgeglichen wird. (Details zur Wirkung von Temperatur und Niederschlag: SCHWEIGERT, 1996a, b)

# Welche Zeitspanne hat den deutlichsten Einfluß auf die Nmin-Werte?

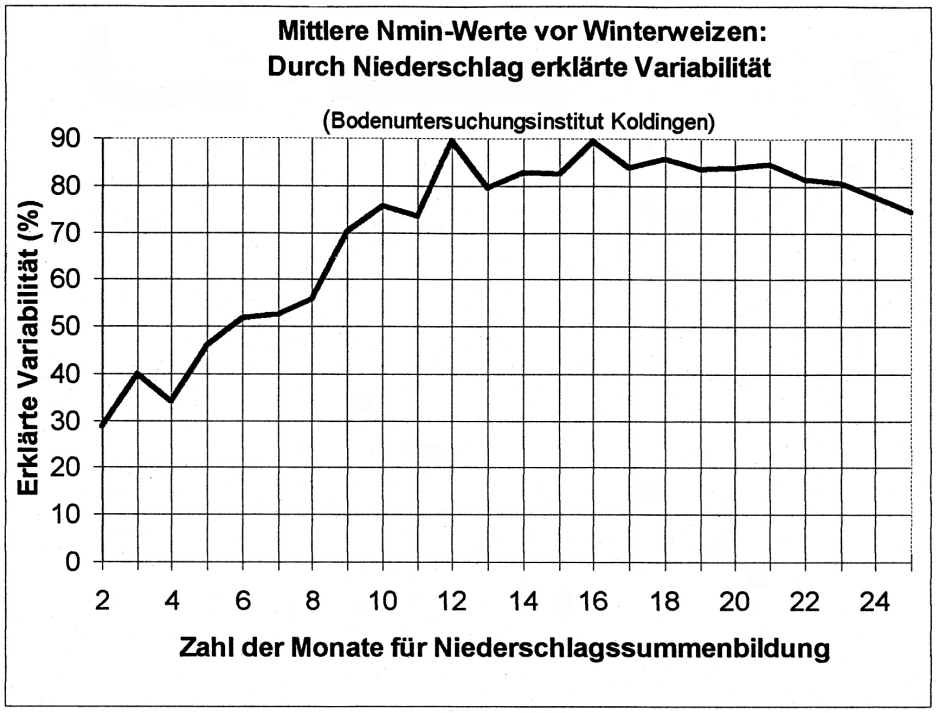



**Abb. 2**

**Datengrundlage:** Siehe Abb. 1

- Der Verlauf der Genauigkeit ist regelmäßig: Ein Zufallstreffer ist praktisch auszuschließen.
- Allein die vorangegangene Auswaschungsperiode (ca. 4-5 Monate) erklärt kaum die Variabilität der Werte.

**Prinzip der Methode:**
*1. Identifizierung des Zeitraums, der den deutlichsten Witterungseinfluß erkennen läßt.*
*2. Quantifizierung des Einflusses durch eine Regressionsgleichung.*

- Die gleichzeitige Wirkung mehrerer Einflußgrößen (Niederschlag, Temperatur, Düngung, usw.) wird durch multiple Regressionsmodelle erfaßt.

# 2. Anwendungsmöglichkeiten

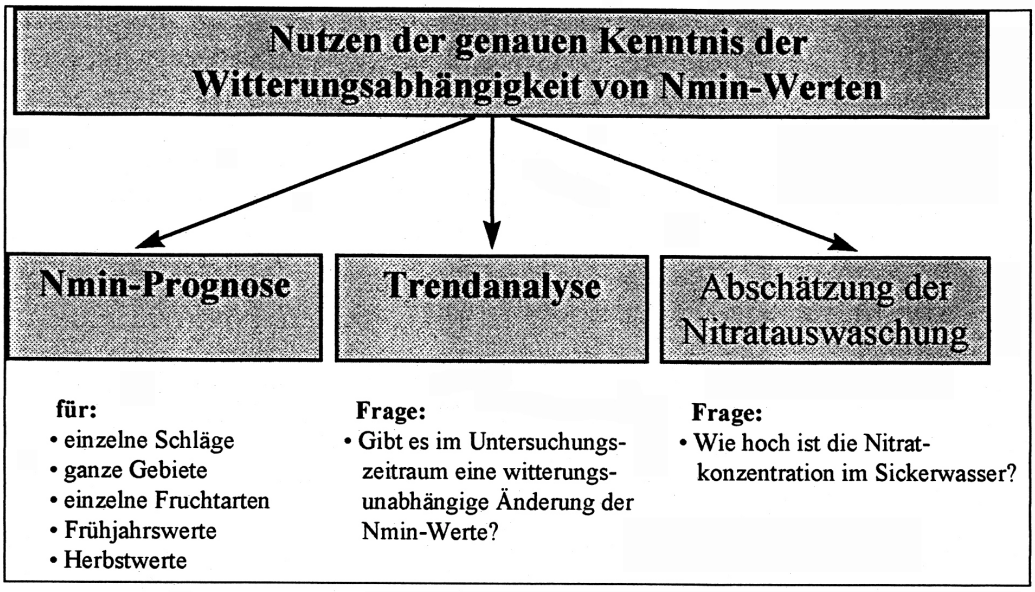



**Abb. 3**

- Die Trendanalyse kann als gesichert angesehen werden.
- Die Nmin-Prognose für mittlere Nmin-Werte hat sich bewährt, die Prognose für einzelne Schläge wird gerade näher untersucht.
- Die Abschätzung der Nitratauswaschung hat sich im Einzugsgebiet der Innerste bewährt, weitere Überprüfungen durch Meßwerte sind erforderlich - aus Zeitgründen wird dieser Anwendungsaspekt nicht dargestellt.

**Für die Anwendungen werden benötigt:**

1. Nmin-Werte aus mindestens 3-5 Jahren
2. monatliche Niederschläge
3. monatliche Temperaturen
4. eventuell hilfreich: Probenahmetermin, N-Düngermenge, usw.
5. Software: z.B. Excel, SPSS

# Trendanalyse

## Gab es unabhängig vom Witterungseinfluß zeitliche Trends?

### Nmin-Werte aus dem Frühjahr:

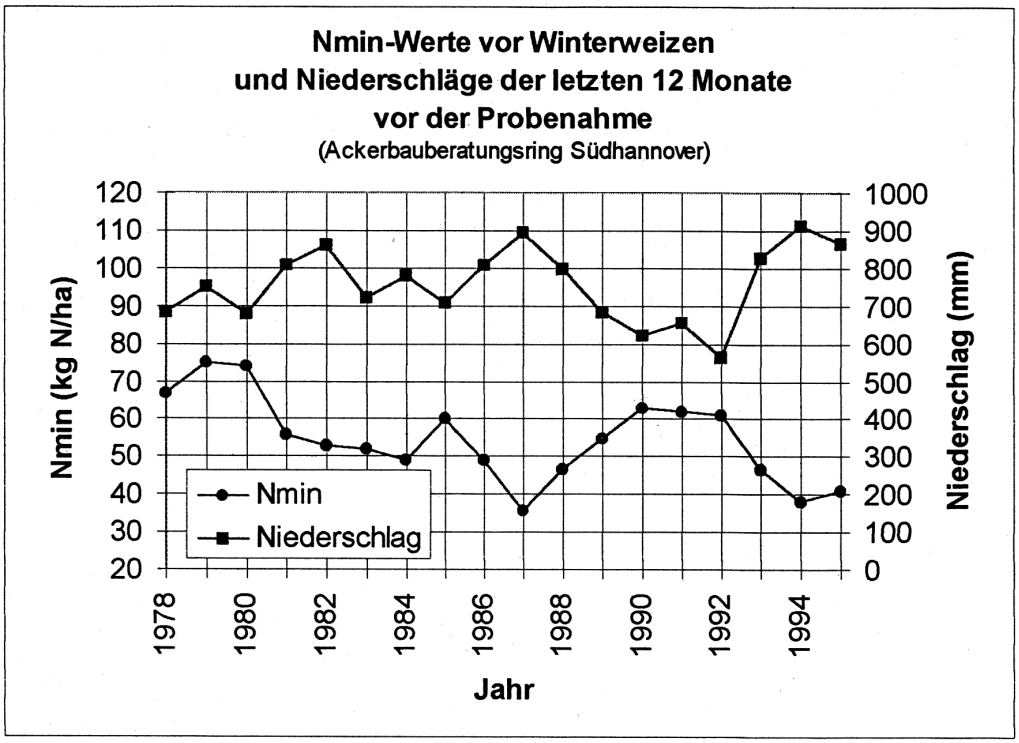



**Abb. 7**

**Datengrundlage:** Nmin-Werte des Beratungsringes, der in den Siebziger Jahren an der Entwicklung der Nmin-Methode beteiligt war. Bodenart: Weitgehend Löß.

- Ab Mitte der Achziger Jahre Nmin-Kurve weitgehend ein Spiegelbild des Niederschlags.
- Bis zur Mitte der Achziger Jahre sinkende Nmin-Werte ohne Anstieg des Niederschlags.
- Heute sind Nmin-Werte bei gleichem Niederschlag niedriger als zu Beginn der Messungen.
- Sinkende Nmin-Werte bei gleichem Niederschlag lassen Rückgang der Nmin-Werte erkennen!
- Der Rückgang in diesem Beispiel ist eng mit der Düngung zur Zuckerrübe korreliert.

*Weitere Details zur Trendanalyse siehe:* SCHWEIGERT u. V.D. PLOEG (1998)

# Trendanalyse

## Nmin-Werte aus dem Herbst:

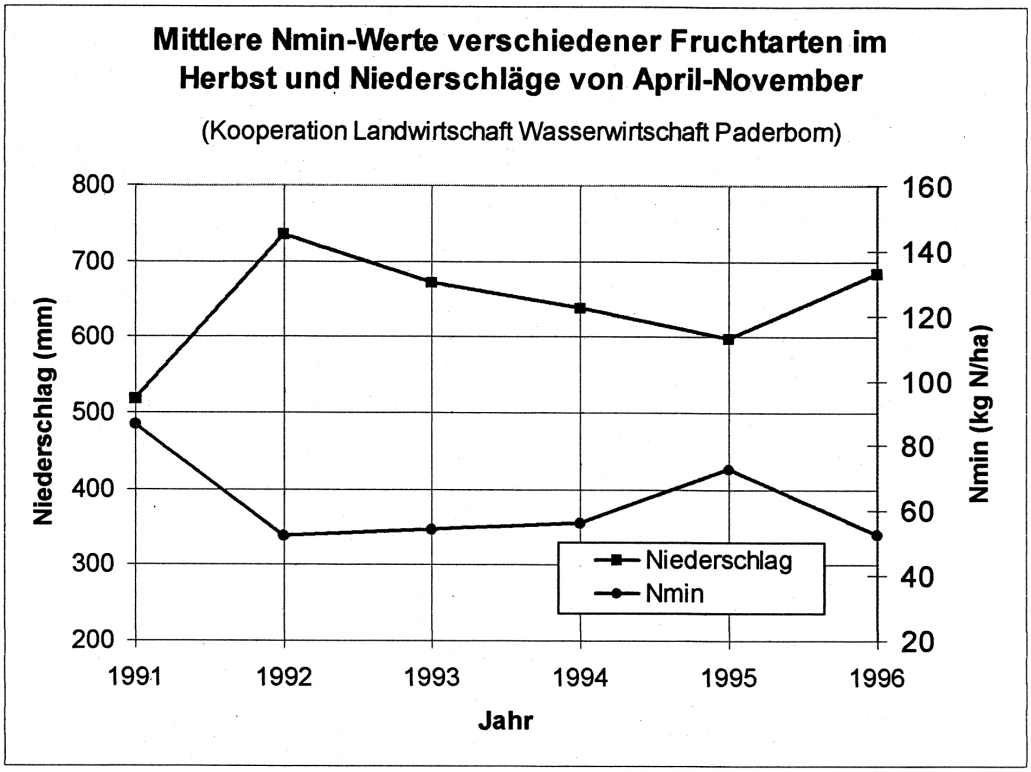



**Abb. 8**

**Datengrundlage:** Mittelwert von etwa 50 Schlägen pro Jahr, nicht differenziert nach Fruchtarten, Bodenart: alle Arten vertreten

- Auch Nmin-Werte aus dem Herbst lassen sich gut allein durch den Niederschlag erklären. Der Rückgang der Nmin-Werte in diesem Beispiel ist ausschließlich niederschlagsbedingt, da die Niederschläge von 1991-1996 ähnlich angestiegen wie die Nmin-Werte gesunken sind.

- Wahrscheinliche Ursachen des Niederschlagseinflusses:
  1. verbesserte Nährstoffaufnahme im Sommer
  2. teilweise auch Nitratauswaschung

- Wenn Anteil der Fruchtarten im Gebiet konstant ist, ist die Berechnung mittlerer Nmin-Werte ohne Differenzierung nach Fruchtarten möglich.

# Trendanalyse

## Sandböden im Frühjahr:

Auch Sandböden lassen deutlich die Niederschlagsabhängigkeit erkennen, die Grundlage für die Trendanalyse ist:

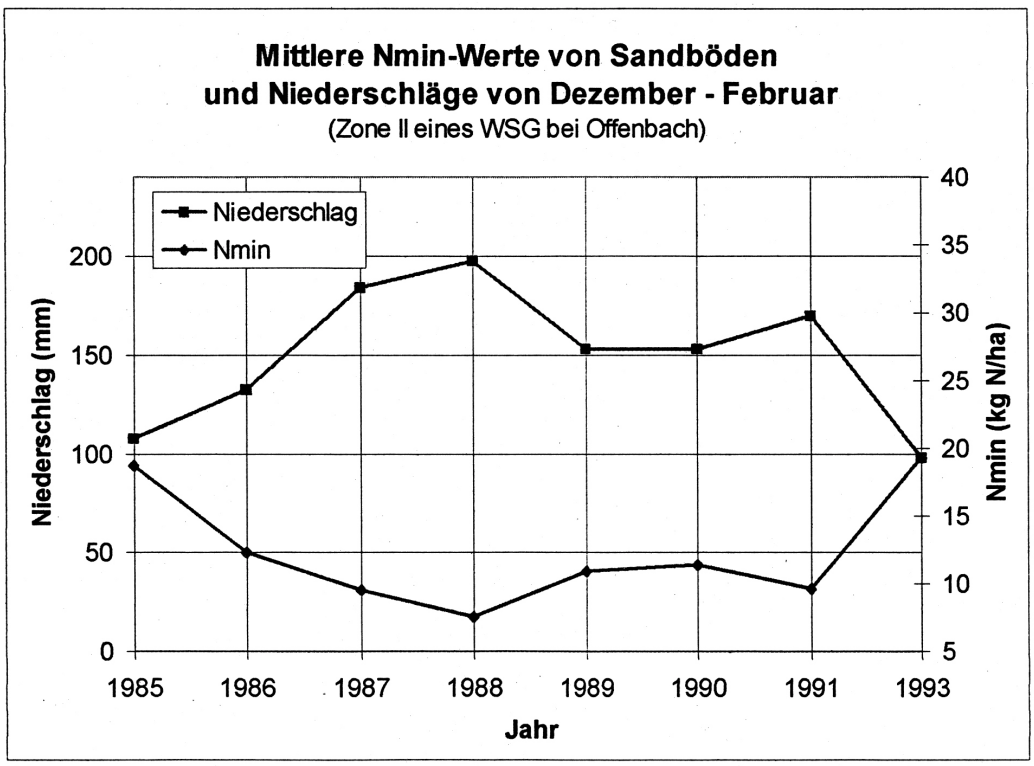



**Abb. 4**

**Datengrundlage:** Mittelwert von 13 Schlägen, 50 % der Schläge wurden im Laufe der untersuchten 8 Jahre in extensiv genutztes Grünland umgewandelt.

# Nmin-Prognose

**(mittlere Nmin-Werte vieler Schläge)**

## Welcher Nmin-Wert ist in Zukunft zu erwarten?

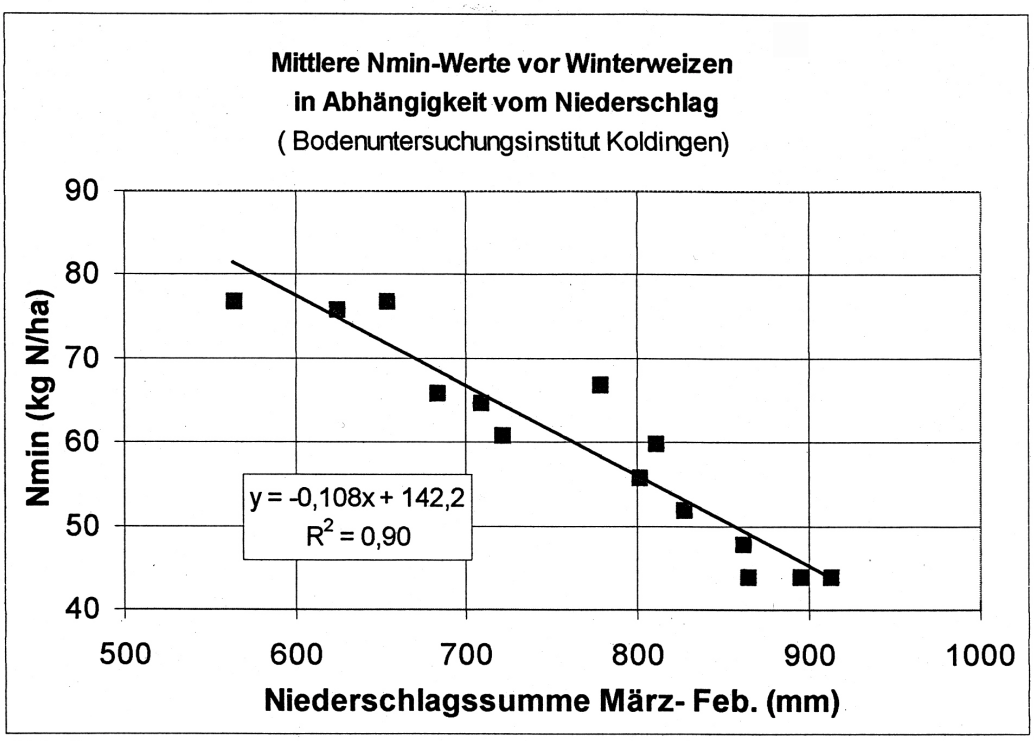



**Abb. 5**

**Datengrundlage:** Siehe Abb. 1

- Der bei einer bestimmten Niederschlagsmenge zu erwartende Nmin-Wert kann an der Regressionsgeraden abgelesen oder mit der Regressionsgleichung berechnet werden. Die Genauigkeit ist für viele Meßreihen etwa gleich groß wie in Abb. 5.

- Echte Vorhersagen sind z.B. bei dieser Meßreihe möglich gewesen.

# Nmin-Prognose

**(Nmin-Werte einzelner Schläge)**

Ein einfaches Beispiel aus Niedersachsen:

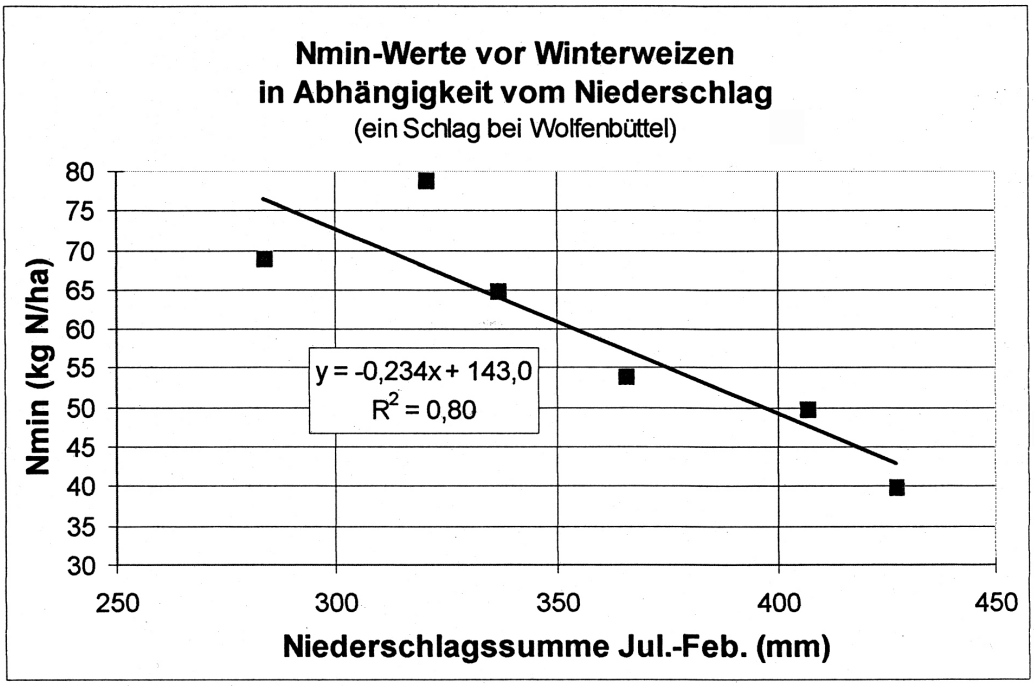



**Abb. 6**

Die Standardabweichung des Schätzfehlers beträgt in diesem Beispiel 6 kg N/ha, d.h. 68 % aller Werte weichen nicht mehr als 6 und 95 % aller Werte weichen nicht mehr als 12 kg N/ha ab.

**Einschränkung:** Dies gilt nur rückblickend, echte Prognosen wurden für diesen und andere einzelne Schläge bisher nicht durchgeführt.

**Anmerkung:** Die Gleichungen für einzelne Schläge unterscheiden sich und sind deshalb nicht übertragbar.

# Nmin-Prognose

**(Nmin-Werte einzelner Schläge)**

**Übersicht über die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen:**

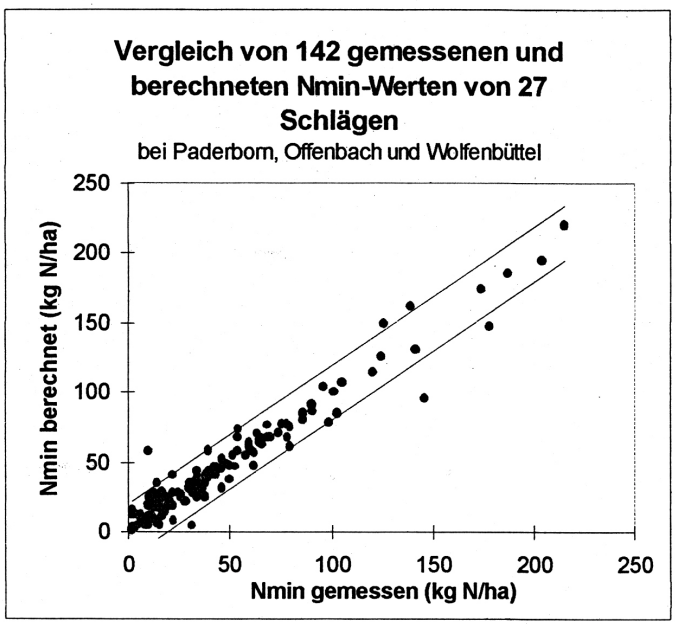



**Abb. 7**

**Datengrundlage:**

| Meßprogramm | untersuchte Schläge | signifikante Modelle | mittleres $r^2$ der signifikanten Modelle |
|---|---|---|---|
| Paderborn Frühjahr | 17 | 10 | 0,88 |
| Paderborn Herbst | 16 | 9 | 0,93 |
| Wolfenbüttel Frühjahr | 11 | 5 | 0,77 |
| Offenbach Frühjahr | 8 | 3 | 0,97 |
| Summe | 52 | 27 | |

Die mittlere Abweichung des Schätzfehlers beträgt 10 kg N/ha, d.h. 5 % aller Schätzungen weichen mehr als 20 kg N/ha ab.

**Einschränkung:** Alle nichtsignifikanten Modelle sind nicht berücksichtigt.

**Aber:** Für die untersuchten Schläge standen nur Meßwerte aus 4-6 Jahren zur Verfügung und es wurden außer Niederschlag und Temperatur keine weiteren Daten (z.B. Düngermenge) verwendet. Deshalb ist die hohe Genauigkeit bei 27 von 52 Schlägen bemerkenswert.

# Nachwort

Du sollst „Statistik lernen"? - Lern statistisch denken!
**Willst in der Welt Du forschen, planen, lenken,**
**dann brauchst Du eins vor allen Dingen:**
**Du mußt in klare Linien bringen,**
**was registriert** - mußt Zahlenmassen
das, was sie sagen können, sagen lassen,
mußt rare Daten dechiffrieren,
daß nichts von ihrer Botschaft wir verlieren!

Erlaubt ist, was dem Denken nützt,
was logisch ist und vor dem Irrtum schützt.
Sei kritisch, aber offen, und hab Mut
zum Neuen - doch sei auf der Hut
vor jenem Ungeist, der mit sinnentleerten
Routinen vorgibt, „Daten auszuwerten"!
Statistik sollst in diesem Buch Du sehen
als reiche Quelle praktischer Ideen.

**Von:**
*Martin Rutsch*, 1986, Institut für Statistik und Mathematische Wissenschaftstheorie der Universität Karlsruhe; Vorspruch an den Leser im Buch „Statistik 1, Mit Daten umgehen", Birkhäuser, Basel.

**Literatur:**

SCHWEIGERT, P., 1996a: Der Stickstoffhaushalt des landwirtschaftlich geprägten Wassereinzugsgebietes der Innerste im nordwestlichen Harzvorland bei Hildesheim. Dissertation. Universität Hannover.

SCHWEIGERT, P., 1996b: Nmin-Werte im Frühjahr sind abhängig von der Witterung der Vormonate. Zuckerrübe **45**/4, 128-131.

SCHWEIGERT, P. und R.R. VAN DER PLOEG, 1998: Erfolgskontrolle bei grundwasserschonender Landwirtschaft durch den Nachweis witterungsunabhängiger Nmin-Trends. Wasser und Boden **50**/5, 18-21.

# Kurzfassung zum Vortrag: „Verfahren zur Berechnung der Nitratauswaschung aus $N_{min}$-Meßwerten mit einem Simulationsmodell“

gehalten im Rahmen des Fachgesprächs „N-Simulationsmodell“ - Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz in der Praxis, 16.07.1998, NLÖ, Hildesheim

K. Köhler, W. Duijnisveld
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2, 30655 Hannover
und
S. Freimann, G.Baumgärtel
Landwirtschaftskammer Hannover
Johannssenstr. 10, 30159 Hannover

Auf sechs im Raum Niedersachsen verteilten Standorten (Bremervörde, Ohlendorf bei Hamburg, Hohenzethen, Liebenau, Schwüblingsen und Jühnde) werden in Dauerversuchen die Auswirkungen von Fruchtfolgeumstellungen und verschiedenen Düngungssystemen (Menge, Form, Termine etc.) auf **Pflanzenertrag und -qualität** sowie auf die **Nitratauswaschung** ermittelt. Die Standorte befinden sich alle nahe oder in Wasserschutzgebieten. Charakteristisch für alle Standorte ist das gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA4) geringe Wasserhaltevermögen. Dieses basiert bei fünf Standorten auf die in der Weichseleiszeit entstandene Dominanz der Sandfraktion (> 70 Gew.%), beim Standort Jühnde dagegen, im Trias entstanden, auf die geringe Durchwurzelungstiefe wegen anstehenden Festgesteins.

Alle Versuchsflächen sind jeweils in zwei Fruchtfolgesysteme (BI = konventionell, BII = konservierend) unterteilt, auf welchen Düngungssteigerungsversuche mit jeweils vier Wiederholungen durchgeführt werden.
Der Wasserfluß im Bodenprofil wird unter Anwendung der Richards-Gleichung, die um einen Senkenterm zur Beschreibung der Wasseraufnahme erweitert wurde, numerisch über das Finite-Differenzen-Verfahren berechnet. Die zur Berechnung erforderlichen Matrixpotential- / Wassergehaltsbeziehungen und Wassergehalts-/Leitfähigkeitsbeziehungen wurden aus bodenphysikalischen Untersuchungen abgeleitet. Die Prüfung der Wasserhaushaltsberechnungen erfolgte unter Einsatz von Tensiometern.
Die Berechnung des N-Austrages erfolgt über die Konvektions-Dispersionsgleichung, die gleichfalls numerisch gelöst wird. Die Erweiterung um einen Quellen-/Senkenterm dient der Berücksichtigung der N-Deposition aus der Atmosphäre, der N-Düngung, der Netto-N-Mineralisation sowie der N-Aufnahme durch die Pflanzen.
Zur Berechnung des N-Austrages müssen die $N_{min}$-Daten mit den über das Wasserhaushaltsmodell berechneten Wassergehalten des jeweiligen Probenahmetages und des jeweiligen Tiefenbereiches unter GOF zu N-Konzentrationen (mg/l) verrechnet werden. Diese gehen dann als Eingangsgrößen in das Stofftransportmodell ein.
Um eine ausreichend genaue Berechnung der N-Austräge zu ermöglichen, mußte eine $N_{min}$-Beprobungsstrategie entwickelt werden, die während der Auswaschungsperiode das Nachvollziehen der N-Verlagerung im Boden durchweg gewährleistet. Die Festlegung der $N_{min}$-Beprobungsstrategie basiert auf den Vergleich der Feldkapazitäten des Oberbodens (0-30 cm) und des Unterbodens (30-90cm). Unter Berücksichtigung des Piston-Flows ist stets eine erneute $N_{min}$-Beprobung vorgesehen, wenn die Gesamtniederschlagshöhe diegleiche Größenordnung annimmt wie die geringste Feldkapazität des Ober- bzw. Unterbodens des betrachteten Standortes.

Für die N-Austragsberechnung werden die $N_{min}$-Werte des Herbsttermins unmittelbar nach der Ernte der Hauptfrucht als Startwerte für die Simulation berücksichtigt. Die Ergebnisse der folgenden während der Auswaschungsperiode gewonnenen $N_{min}$-Beprobungen werden zur Neuinitialisierung der N-Konzentrationen im Simulationsprogramm genutzt, so daß stets eine Korrektur der berechneten Werte mit den gemessenen $N_{min}$-Werten erfolgt.

In den Jahren 1995 bis 1997 wurden u.a. folgende Ergebnisse erzielt:

Im Mittel von 24 Versuchsernten (12 x Getreide, 4 x Kartoffeln, 4 x Zuckerrüben, 4 x Mais) nehmen die Erträge bei einer N-Düngung von 20 bzw. 40 % unter Sollwert im Vergleich zur SW-Variante (=100%) um 6 bis 7 % ab. Ohne jegliche Düngung (Nullparzelle) ergibt sich eine durchschnittliche Ertragsminderung von 30 %.

Wird die für die Fruchtfolge notwendige N-Düngermenge auf der Grundlage der N-Abfuhr unter Berücksichtigung standortabhängiger N-Verluste (Ziel: 50 ppm Nitrat/l Sickerwasser) bestimmt, so ergeben sich bisher keine Ertragsunterschiede im Vergleich zur Düngung nach Sollwert. In Einzelfällen traten Abweichungen auf. Das Gleiche gilt für die Variante, in der der notwendige N-Düngerbedarf mit Gülle und Mineraldüngung abgedeckt wurde.

Die ersten Simulationsergebnisse (z.B. Standort Liebenau) ergaben einen deutlichen Anstieg der N-Austräge mit zunehmender Düngungsintensität von der Nullvariante (11,6 kg N/ha * a) über die Sollwert-40%-Variante (25,0 kg N/ha* a) bis zur Sollwertvariante (40,8 kg N/ha* a). Für die Sollwert/Gülle-Variante wurde ein N-Austrag berechnet, der in etwa das Niveau der Sollwert-40% Variante entspricht.

In rund 95 % der Fälle wurde mit konservierenden Maßnahmen (Zwischenfruchtanbau / Untersaat) ein verminderter N-Austrag aus dem durchwurzelten Bodenraum erzielt. Im Durchschnitt beträgt die N-Austragminderung ca. 35 % im Vergleich zur herkömmlichen Bewirtschaftungsweise. Der Erfolg der konservierenden Maßnahme war insbesondere bei der Sollwertvariante festzustellen (57 %), wohingegen dieser bei der SW-40%- und Null-Variante nur rund 30 % ausmachte.

Nach zweijähriger Versuchsdauer können noch keine gesicherten Aussagen über einen Rückgang der Nitratausträge bedingt durch N-auswaschungsreduzierende Maßnahmen getroffen werden, da die klimatischen Bedingungen der bisherigen Versuchsjahre nicht repräsentativ für die Standorte sind und außerdem zu erwarten ist, daß eine stärkere Differenzierung der Varianten erst nach längerer Laufzeit sichtbar wird. Die Einstellung der N-Dynamik infolge der Düngungs- und Bewirtschaftungsänderungen bedarf einer längeren Zeit.

**Szenarienberechnungen zur Reduktion der Nitratbelastung am Fallbeispiel des Trinkwassereinzugsgebietes Scheeßel.**

**K. C. Kersebaum**

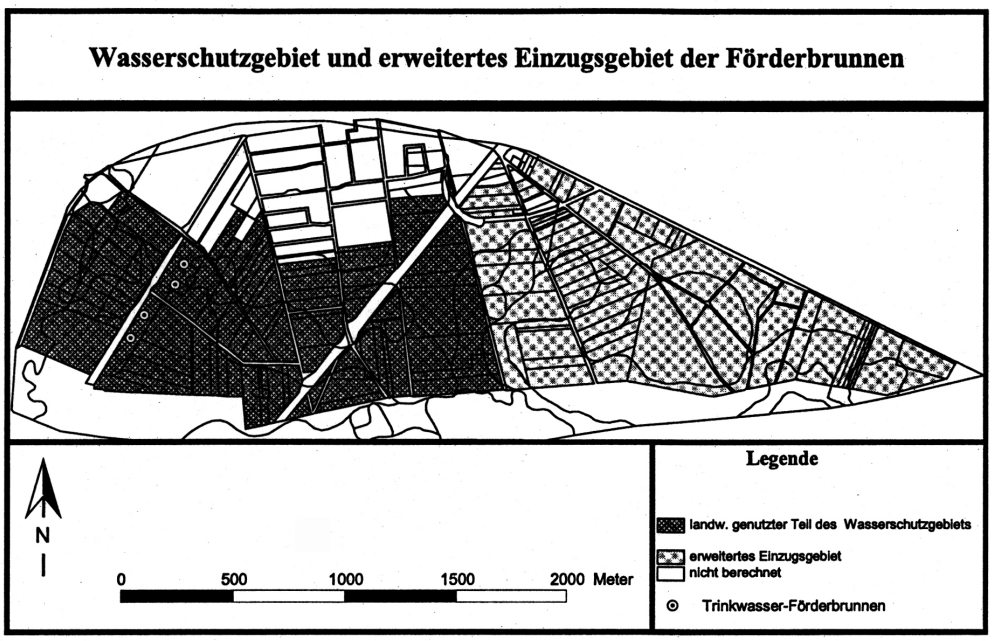
## 1. Problemstellung

Das Wassererschließungsgebiet Scheeßel ist bereits seit mehreren Jahren Ziel von Untersuchungen der beiden Niedersächsischen Landesämter für Ökologie und Bodenforschung, da seit Ende der 70er Jahre der derzeit gültige Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 50 mg $NO_3$/l überschritten wird. Die Verschneidung des geförderten Rohwassers mit zugekauftem Wasser anderer Regionen ist somit zur Einhaltung des Trinkwassergrenzwerts notwendig.

Die bisherigen Untersuchungen weisen eindeutig darauf hin, daß die überwiegend landwirtschaftliche Bodennutzung im Gebiet als wesentlicher Verursacher der Nitratbelastung anzusehen ist. Mit Hilfe von Simulationsszenarien wurden auf der Basis von Nutzungsdaten eines längeren Zeitraums (1990 - 1996) folgenden Fragen nachgegangen:

- Wie hoch ist die Belastung des Sickerwassers für die bisherige Landnutzung der letzen Jahre?
- Welche Schwachpunkte hinsichtlich der Nitratauswaschung ergeben sich in der derzeitigen Landbewirtschaftung?
- Welche Möglichkeiten der Reduzierung der Nitratbelastung ergeben sich im Rahmen der derzeitigen Landnutzung?
- Welche Flächen sind im Sinne der Einhaltung des Trinkwassergrenzwerts vorrangig aus der Ackernutzung in eine Grünlandbewirtschaftung zu überführen?

Zusätzlich zum land- und forstwirtschaflich genutzten Gebiet der ausgewiesenen Schutzzone werden die Berechnungen für ein erweitertes Gebiet durchgeführt, welches im Osten durch die Westerveseder Landstraße begrenzt wird. Dies begründet sich in den Befunden der Grundwassergütemessungen, die einen Einstrom von oberflächennah bereits belastetem Grundwasser (Meßstelle AB12: 85 mg $NO_3$/l) in die derzeitige Schutzzone III anzeigen (NLÖ, 1993). Zudem wird mit dem erweiterten Gebiet auch der Bereich weiträumig umfaßt, der durch das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung in seinem Gutachten vom Dezember 1993 als Grundwassereinzugsgebiet der Wasserförderung ausgewiesen wird. Die in der nachfolgenden Studie betrachteten Flächen, die sich lediglich auf die land- bzw. forstwirtschaftich genutzten Anteile der Schutzzonen I-III bzw. des erweiterten Gebiets beziehen, sind in Karte 1 dargestellt. Das im weiteren als Gesamtgebiet bezeichnete Areal aus den Schutzzonen und dem erweiterterten Gebiet umfaßt eine Fläche von 274.3 ha.




**Karte 1**

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Beschreibung des verwendeten Modells

Für die Berechnungen wurde das, lediglich in einigen Punkten modifizierte und verbesserte Simulationsmodell von Kersebaum (1995) verwendet. Es beschreibt auf der Basis täglicher Witterungsdaten den Wasserhaushalt des Bodens, die Netto-N-Mineralisation von organischer Bodensubstanz und eingebrachten Pflanzenresiduen, die Denitrifikation sowie den Transport von Nitrat in der Bodenlösung und Wachstum und N-Aufnahme durch Pflanzen.

Zur Abbildung der unterschiedlichen Kulturarten werden pflanzenspezifische Parameter zu Wachstum und Pflanzenentwicklung verwendet, die jedoch mit Ausnahme der Getreidearten bislang nur grob justiert sind, so daß sich mit dem Modell zwar ein realistischer Verlauf der N-Aufnahme einzelner Kulturen simulieren läßt, eine vertretbare Ertragsabschätzung jedoch bislang nicht möglich ist.

Detailliertere Darstellungen des Modellansatzes finden sich u.a. bei Kersebaum & Richter (1991), Kersebaum et al. (1993) und Kersebaum (1995). Der Modellaufbau gliedert sich wie in Abb. 1 skizziert in unterschiedliche Teilmodelle.

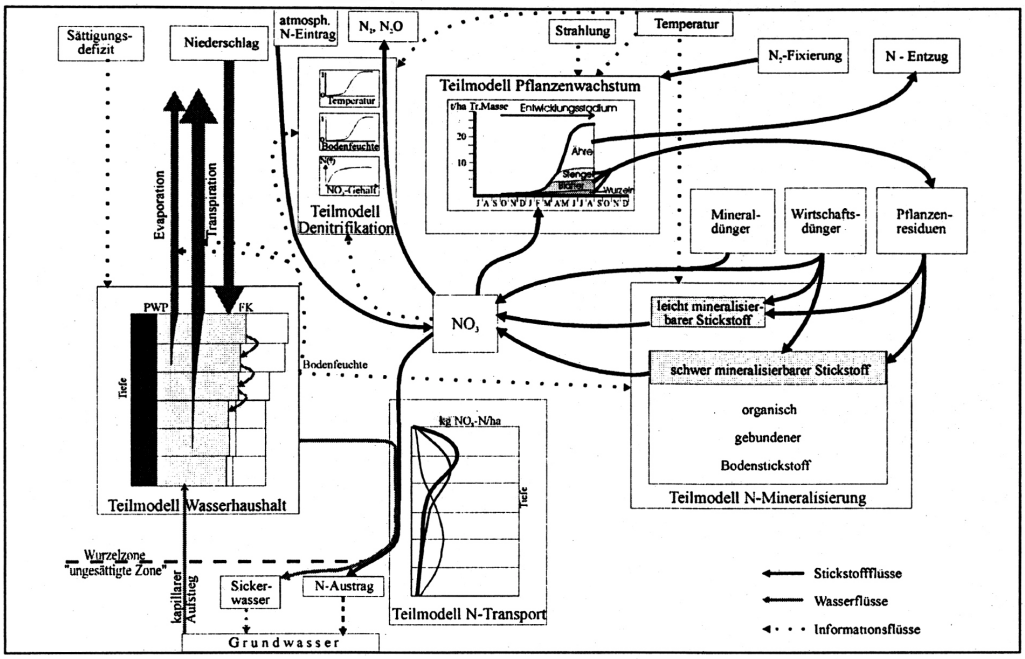



**Abb. 1:** Schema des Stickstoff-Simulationsmodells.

## 2.2 Datengrundlagen

*2.2.1 Bodendaten*

Für die flächenhafte Simulation wurde die vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung erarbeitete Bodenkarte des Gebiets mit den dazugehörigen Profilbeschreibungen verwendet. Für die Simulation wurde die digitalisierte Bodenkarte mittels eines GIS (ARC/INFO) mit der digitalisierten Karte der Feldgrenzen verschnitten.

Die Humusgehalte für die einzelnen Schläge der Wasserschutzzonen waren auf Grund einer flächendeckenden Untersuchung im Herbst 1991 vorhanden. Für das erweiterte Gebiet wurden die Humusgehalte auf der Basis der in der Schutzzone vorliegenden Werte für jede Kartiereinheit geschätzt.

*2.2.2 Daten zur Flächennutzung und Bewirtschaftung.*

Daten zur Flächennutzung wurden von der Bezirksstelle Bremervörde der Landwirtschaftskammer Hannover erhoben. Die Angaben standen flächendeckend für das Gebiet der Wasserschutzzone für die Anbaujahre 1990 bis 1996 mit Ausnahme des Jahres 1993 zur Verfügung. Dabei wurde in den Jahren 1995 und 1996 keine weitere Differenzierung in den Anbaugruppen Winter- und Sommer-Getreide mehr vorgenommen. Die Angaben bezogen sich

jedoch ausschließlich auf die Hauptkulturen, so daß ein möglicher Zwischenfruchtanbau hieraus nicht ersichtlich wurde.

Anläßlich von bereits 1992 durchgeführten Modellrechnungen wurden für das Gebiet der Schutzzone eine flächendeckende schlagspezifische Fragebogenerhebung zu Landnutzung und Bewirtschaftung durchgeführt. Neben den Angaben zu den Haupt- und Zwischenfruchtarten der Jahre 1990 - 1992 waren auch Informationen zur üblichen Fruchtfolge abgefragt worden. Aus diesen Angaben wurde versucht, schlagspezifisch die Lücken in der Fruchtfolge hinsichtlich der Hauptfrucht 1993 sowie eines möglichen Zwischenfruchtanbaus zwischen Ernte 1992 und Aussaat 1996 zu schließen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß häufig die sich in der Realität ergebenen Fruchtfolgen nicht mit den in 1992 geplanten Fruchtfolgen übereinstimmten.

Für das erweiterte Gebiet östlich der Schutzzone III lagen mit Ausnahme des Anbaujahrs 1996 keinerlei Informationen über die Landnutzung vor. Für 1996 wurde die Anbauverteilung in dem erweiterten Untersuchungsgebiet durch eine eigene Nutzungskartierung im Juni 1996 vor Ort ermittelt. Ausgehend von dieser Nutzungsverteilung in 1996 wurden auf der Basis von Fruchtfolgen innerhalb der Schutzzone die Fruchtfolgen der einzelnen Flächen für die Jahre 1990 bis 1995 geschätzt. Die mittleren Nutzungsverhältnisse in den Wasserschutzzonen incl. des erweiterten Untersuchungsgebiets sind für den Gesamtzeitraum in Abb. 2 aufgeführt.

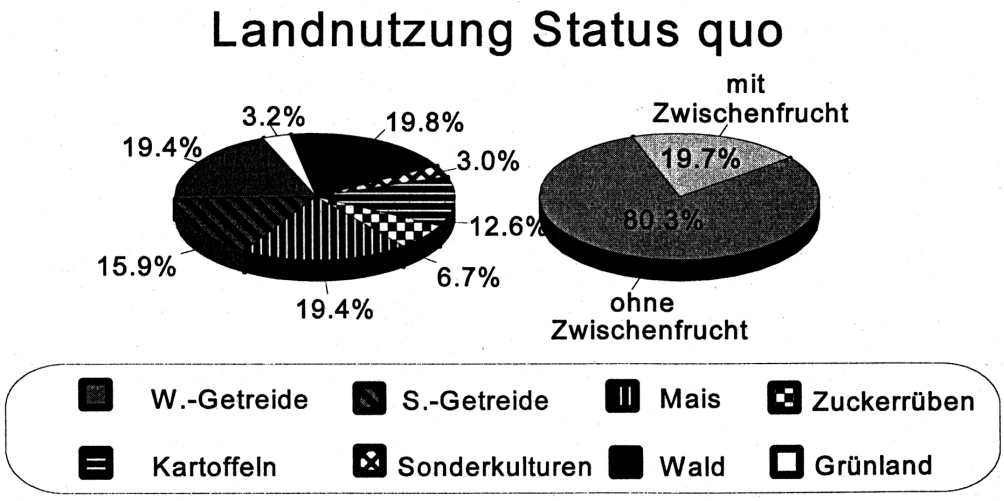



**Abb. 2:** Mittlere Anbauanteile (1990 - 1996) im Untersuchungsgebiet Scheeßel (Wasserschutzzonen und erweitertes Einzugsgebiet)

An Hand der 1992 erhobenen Fragebogendaten konnten die Bewirtschaftungsdaten (Aussaat- und Erntetermine, Düngerapplikationen, Verbleib der Ernterückstände, Ertragshöhe) der Jahre 1990 und 1991 schlagspezifisch ermittelt werden. Weiterhin standen Angaben der Bezirksstelle Bremervörde der Landwirtschaftskammer Hannover zur durchschnittlichen Stickstoffdüngung der einzelnen Anbaukulturen für die Jahre 1994 bis 1996 zur Verfügung.

Aus diesen Angaben und den schlagspezifischen Angaben aus 1990/91 wurden für die einzelnen Anbaukulturen verschiedene Düngeschemata entwickelt. Für die Simulation der Periode 1990/91 wurden die schlagspezifischen Düngungsangaben verwendet. In den Folgejahren wurden die der jeweiligen Durchschnittsdüngung der einzelnen Kulturen entsprechenden Düngungsschemata verwendet.

Für Grünland lagen keine Angaben zur N-Düngung im Untersuchungsgebiet vor. In der Gebietssimulation des Status quo wurde von einem Düngungsniveau von 15 $m^3$ Gülle und 67 kg N/ha Mineraldüngung ausgegangen. Für die Modellrechnungen wurden 3 Schnitte im Jahr angenommen.

Für die Aussaat- und Erntetermine wurden aus den Angaben aus 1990 bis 1992 mittlere Termine für die einzelnen Kulturarten abgeleitet, die für den gesamten Zeitraum verwendet wurden.

Für die Simulation wurden die im Herbst 1990 flächendeckend für die Schläge in der Schutzzone bestimmten $N_{min}$-Gehalte als Anfangswert verwendet. Da für das erweiterte Gebiet keine Angaben vorlagen, wurden dort Werte angenommen, die auf Schlägen mit vergleichbaren Bodenverhältnissen und gleicher Fruchtfolge in der Schutzzone gemessen worden waren. Gleiches gilt für die Erträge der Anbaufrucht 1990, die bei der Simulation lediglich als Vorfrucht in die Simulation eingeht. Somit ist eine Angabe über die Ertragshöhe zur Berechnung der mineralisierbaren N-Menge in den Ernterückständen notwendig.

*2.2.3. Witterungsdaten*

Für die Simulationen wurden Witterungsreihen von 1986 bis 1996 der Klimahauptstation Bremen des Deutschen Wetterdienstes verwendet.

Innerhalb des Simulationszeitraums traten sehr extreme Witterungsverhältnisse auf. Besonders erwähnenswert ist die sehr ausgeprägte Trockenperiode im Sommer 1992, die einen deutlichen Effekt auf das Wachstum einiger Kulturen in der Simulation zur Folge hat. Sehr feucht waren dagegen die beiden Folgejahre, bei denen es auf den leichten Standorten auch während der Vegetationsperiode zu einer nennenswerten Sickerwasserbildung kam.

## 3. Ergebnisse der Simulation

### 3.1. Berechnung des Status quo

*3.1.1 Vergleich gemessener und simulierter $N_{min}$-Gehalte im Schutzgebiet.*

Seit 1990 fanden auf den Schlägen des Wasserschutzgebiets im Frühjahr, Sommer und Herbst Nmin-Untersuchungen statt. Ein Vergleich der Simulation mit Meßwerten auf einzelnen Schlägen ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die vorangegangene Bewirtschaftung genau bekannt ist. Dieses ist jedoch nur für die Untersuchungen des Jahres 1991 hinreichend erfüllt, da nur hier mit annähernd realer Bewirtschaftung simuliert werden konnte. Der Vergleich gemessener und berechneter Nmin-Gehalte für den Herbst 1991 zeigt für die Einzelwerte eine nur mäßige Korrelation (r= 0.51). Ursachen der relativ geringen Korrelation sind neben Modellvereinfachungen vor allem ungenaue Angaben zu Zwischenfrüchten und Düngeterminen sowie die Verwendung von mittleren Nährstoffgehalten und Aussaat- bzw. Ernteterminen. Daneben spielt eine Rolle, daß innerhalb von Schlägen nicht nur unterschiedliche Bodenkartiereinheiten vorkommen, sondern auch innerhalb der Einheiten mit einer erheblichen Heterogenität zu rechnen ist.

Mittelt man die Ergebnisse der Messungen und Simulationen differenziert nach Vorfrüchten (Abb. 3a) bzw. nach Jahren (Abb 3b), so ist festzustellen, daß durch die Modellierung die Unterschiede zwischen den Anbaukulturen und den einzelnen Jahren gut nachvollzogen werden. Entsprechend den sehr unterschiedlichen Witterungsverläufen ergibt sich in den einzelnen Betrachtungszeiträumen ein sehr differenziertes Bild der Austragssituation. Die höchsten Auswaschungsverluste treten im Simulationszeitraum 1992/93 auf, wobei hier die Sommerungskulturen, vor allem Mais und Kartoffeln, sehr negativ in Erscheinung treten. Ursache hierfür ist die sehr lange Trockenperiode im Sommer 1992, die vor allem den Mais in seiner Hauptwachstumsphase deutlich beeinträchtigt hat. Durch die Schädigung der Sommerungskulturen werden im Modell relativ hohe Restnitratgehalte im Herbst 1992 simuliert (siehe Abb. 3b), die durch die nachfolgenden hohen Niederschläge im Winterhalbjahr 92/93 ausgewaschen werden. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch die extrem hohen Niederschläge im Sommerhalbjahr, die auch während der Vegetationsperiode zur Bildung von Sickerwasser und damit zum N-Austrag führen. Durch die relativ günstigen Wachstumsbedingungen und die N-Verluste während der Vegetationsperiode ergeben sich im Sommer nur relativ geringe $N_{min}$-Werte (siehe Abb. 3b), so daß trotz sehr hoher Winterniederschläge nur eine relativ geringe Menge an Stickstoff ausgetragen wurde. Daraus resultiert, daß die Nitratkonzentration in der Simulationsperiode 1993/94 den niedrigsten Wert innerhalb des Simulationszeitraums annimmt.

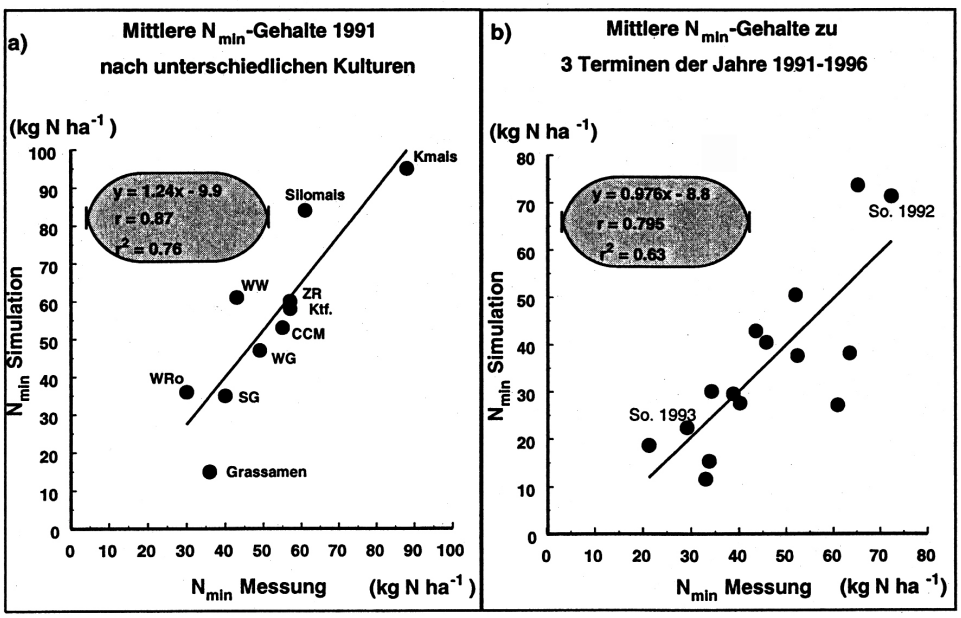


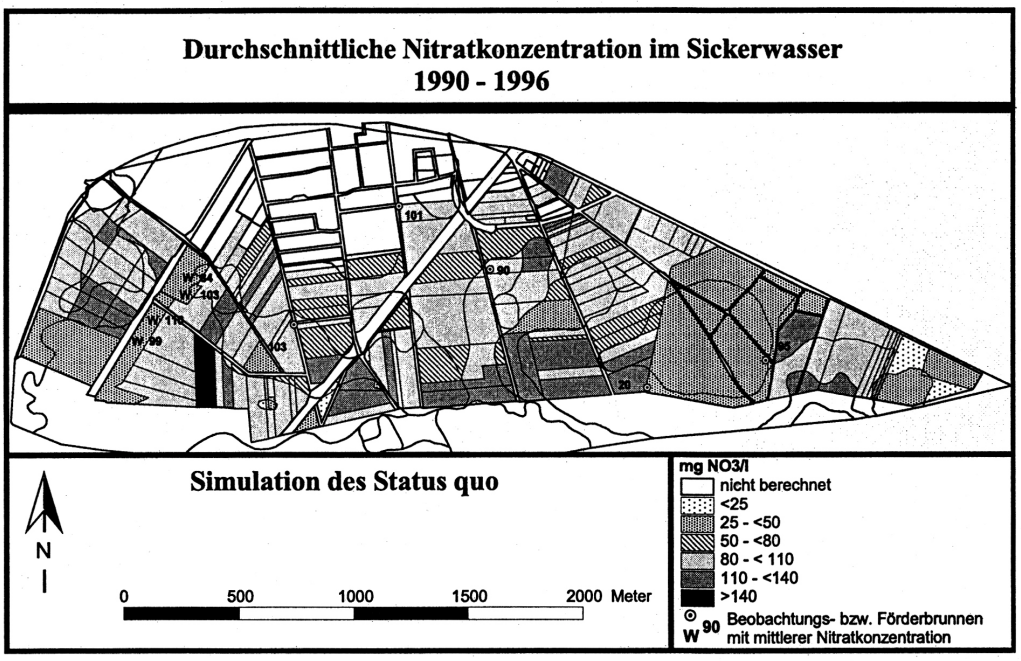

**Abb. 3:** Vergleich mittlerer gemessener und simulierter Nmin Gehalte für a) unterschiedliche Vorfrüchte im Herbst 1991 und b) für 5 unterschiedliche Jahre mit jeweils 3 Terminen (Frühjahr, Sommer, Herbst)

*3.1.2 Flächenberechnung der Belastungssituation.*

Für die Waldfläche konnte lediglich eine grobe Schätzung der Sickerwassermenge und des N-Austrags für den Gesamtzeitraum vorgenommen werden, da keinerlei Informationen zu Bestandesalter und Zusammensetzung vorlagen. Als mittlere Sickerwasserspende wurde ein Wert von 250 mm angesetzt, der etwas unter dem simulierten Wert von Grünland liegt. Beim N-Austrag wurde davon ausgegangen, daß ein atmosphärischer Eintrag von 30-40 kg N/ha jährlich anzusetzen ist (Meesenburg et al., 1994). Nach Untersuchungen von Dise & Wright (1995) in 65 bewaldeten Wassereinzugsgebieten in ganz Europa, erscheint die Annahme eines jährlichen N-Austrags von 20 kg N/ha unter den vorliegenden Gegebenheiten als vertretbar. Daraus resultiert eine mittlere Sickerwasserkonzentration von 35 mg $NO_3$/l.

Für den Gesamtzeitraum 1990 bis 1996 ergibt sich für den Bereich des Schutzgebiets eine

mittlere Nitratkonzentration im Sickerwasser von 91 mg $NO_3$/l. Vor allem durch den insgesamt höheren Waldanteil liegen die Werte für das Gesamtgebiet mit 318 mm Sickerwasser, 61 kg N/ha N-Auswaschung und einer mittleren Nitratkonzentration von 86 mg $NO_3$/l etwas niedriger. Die räumliche Verteilung der Sickerwasserkonzentrationen zeigt die Karte 2. Die mittleren Konzentrationen der Beobachtungsbrunnen im oberen Bereich des Aquifers zeigen, daß die Simulation die Situation realistisch darstellt.




**Karte 2**

Abb. 4 zeigt die Situation für das Gesamtgebiet anhand sogenannter Gebietskennlinien. Während die dünnere Linie die flächenmäßige Verteilung der Nitratkonzentrationen auf den einzelnen Flächen im Gesamtgebiet darstellt, wird mit der dicken Linie eine sogenannte Belastungsfunktion (Richter et al., 1996) abgebildet. Ihr Endpunkt (bei 100% der Fläche) entspricht der flächengewichteten Mischkonzentration des Gebiets.

In der derzeitigen Situation liegen im Gesamtgebiet kaum mehr als ein Viertel der Flächen unterhalb des Trinkwassergrenzwerts von 50 mg $NO_3$/l. Dabei handelt es sich im wesentlichen um die Wald-, Brach- und Grünlandflächen. Der weitaus größte Teil der Flächen (ca. 60 %) weist Nitratkonzentrationen im Bereich 80 - 120 mg $NO_3$/l auf, etwa 10 % der Flächen

übersteigen auch diese Konzentration. Die Spitzenkonzentration beträgt 145 mg $NO_3$/l.
Aus der Belastungsfunktion wird deutlich, daß etwa 65% der Flächen für die Überschreitung des tolerierbaren Grenzwertes im Gesamtgebiet verantwortlich sind.

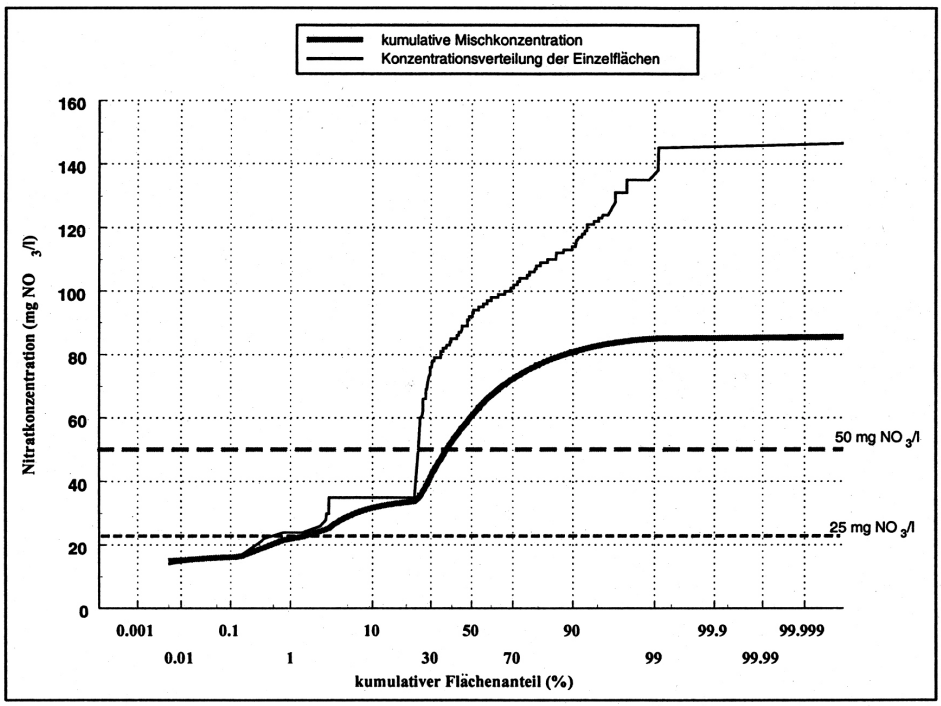



**Abb. 4.:** Kumulative Häufigkeit und Belastungsfunktion der Nitratkonzentration im Sickerwasser des gesamten Untersuchungsgebiets für den Status quo.

### 3.2. Szenariorechnungen zur Reduktion der Nitratbelastung

*3.2.1 Umstellung der Fruchtfolge unter Beibehaltung der bisherigen Ackerfläche*

Ausgehend von der bisherigen Fruchtfolge auf den einzelnen Schlägen wurde im wesentlichen durch eine einfache Umstellung einzelner Fruchtarten in der Reihenfolge bzw. durch Ersatz nicht "passender" Früchte eine neue Fruchtfolge geschaffen, die zu einer möglichst langen Bedeckungszeit der Böden führen sollte. Dabei wurden konsequent Kombinationen von spät räumenden Ackerfrüchten (Zuckerrüben, Mais, Kartoffeln) mit nachfolgenden Sommerungen vermieden, da in diesen Fällen kein Zwischenfruchtanbau mehr möglich ist. Für diese Kulturen wurden als Folgefrüchte nur Wintergetreidearten zugelassen, die zumindest noch etwas

Stickstoff vor dem Winter aufnehmen. Nach Getreide wurde in der Regel eine winterharte Zwischenfrucht mit anschließender Sommerung gewählt. Eine derartige Umgestaltung der Fruchtfolge hat für die Betriebe den Vorteil gegenüber einem neuen Spektrum von Früchten, daß keine Umstellung in der Verfahrenstechnik notwendig ist. Als weitere Maßnahme wurde für die Kulturen ein Düngungsschema gewählt, welches in etwa den Entzug für ein durchschnittliches Ertragsniveau abdeckt.Die Umstellung der Fruchtfolge in diesem Szenario "FFA" führt im wesentlichen zu einem Rückgang von Silomais um ca 6% zugunsten von Wintergetreide. Nahezu verdoppelt (39.7 %) hat sich dagegen der Flächenanteil beim Zwischenfruchtbau.

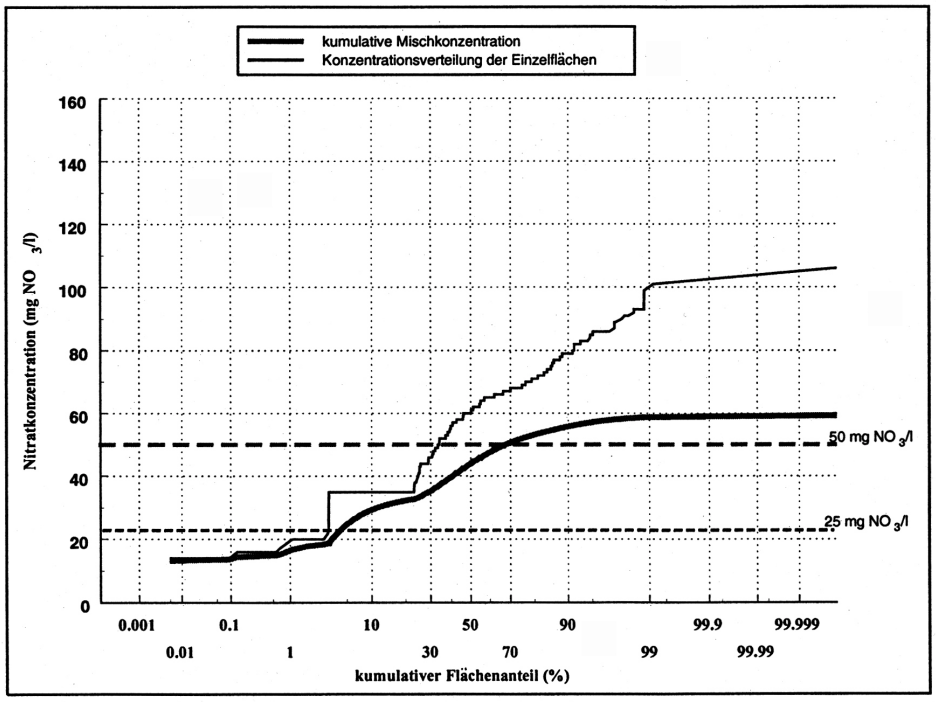


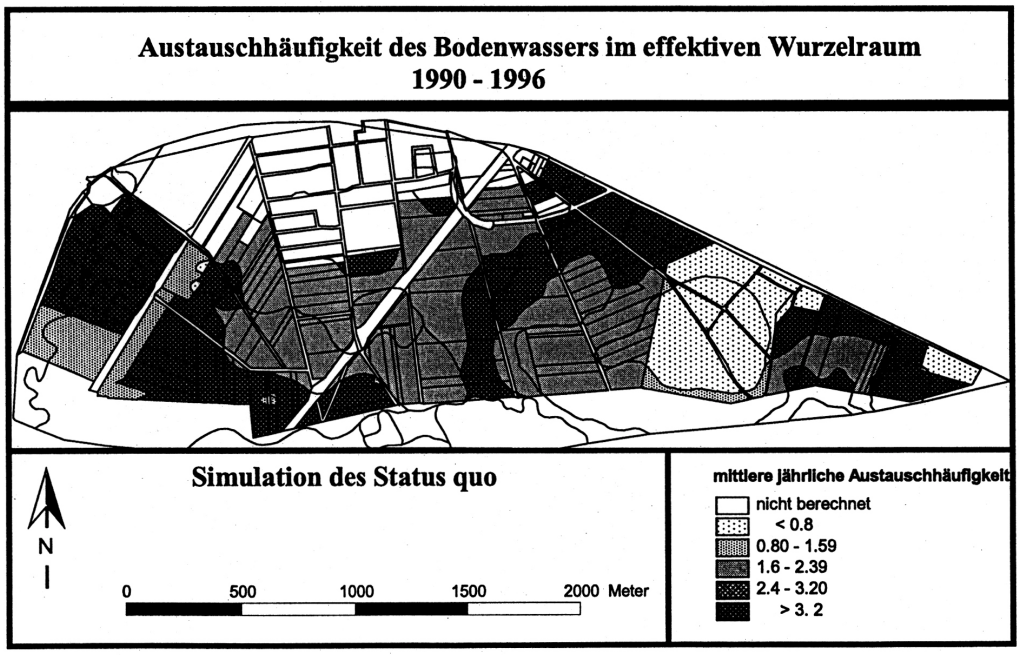

**Abb. 5:** Kumulative Häufigkeit und Belastungsfunktion der Nitratkonzentration im Sickerwasser des gesamten Untersuchungsgebiets für das Szenario FFA

In den Gebietskennlinien der Abb. 5 wird deutlich, daß allein durch die vorgenommene Umstellung des Ackerbaus bei nur geringfügiger Veränderung der Anbauverhältnisse eine

deutlicheReduzierung der Sickerwasserbelastung erreicht werden konnte. Während der Anteil von Flächen mit Nitratkonzentrationen unter 50 mg $NO_3$/l auf 30% anstieg, wurden gleichzeitig die Flächen mit sehr hohen Nitratkonzentrationen deutlich saniert, so daß lediglich noch Spitzenwerte von knapp über 100 mg $NO_3$/l auftreten. Die Gesamtbelastung des für das Gesamtgebiet anfallenden Sickerwassers sinkt auf 59 mg $NO_3$/l. Die mittlere Sickerwasserspende wird nur unwesentlich auf 316 mm reduziert.

*3.2.2 Abgestufte Umwandlung von Ackerland in Grünland.*

Auf der Basis der umgestellten Bewirtschaftung FFA wurden weitere Szenarien zur abgestuften Umwandlung einzelner Ackerflächen in Grünland berechnet. Hierfür wurden 2 Umwandlungskategorien mit unterschiedlicher Priorität unterschieden. Als Kriterium hierfür wurde die aus der Simulation abgeleitete Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (Karte 3) verwendet sowie die hierzu in engem Zusammenhang stehende Höhe der N-Austräge der einzelnen Bodeneinheiten bei gleicher Nutzung. Dabei wurden lediglich für den Bereich des Schutzgebiets Umnutzungsprioritäten vergeben.




**Karte 3**

Bei einer Umnutzung der Flächen in der Kategorie 1 (Szenario GL1) steigt der Grünlandanteil auf knapp 14% an. Eine weitere Verschiebung im Anbauverhältnis der Ackerkulturen tritt kaum auf. Durch die Umwandlung weisen nunmehr ca. 40% der Flächen Nitratkonzentrationen unterhalb des Grenzwerts auf, weniger als 1 % der Fläche weist noch Konzentrationen über 90 mg $NO_3$/l auf (Abb. 6). Sie spielen jedoch keine entscheidene Rolle bei der Bildung des Gebietsmittelwerts, der mit 54 mg $NO_3$/l immer noch knapp über dem Grenzwert liegt. Dieses Überschreiten wird durch weniger als 10% der Fläche bewirkt.

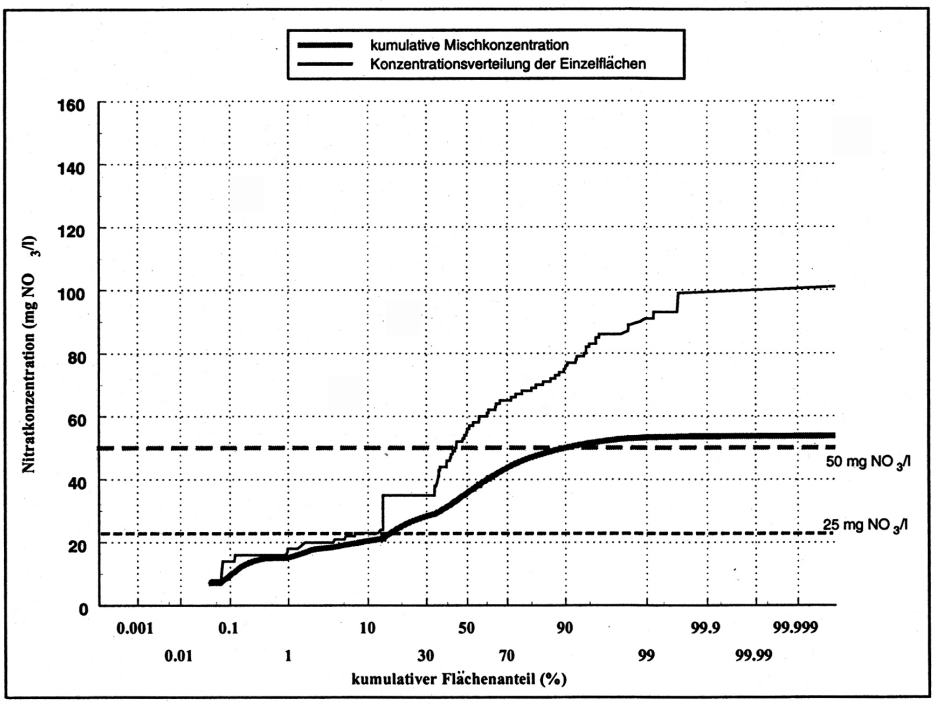



**Abb. 6**: Kumulative Häufigkeit und Belastungsfunktion der Nitratkonzentration im Sickerwasser des gesamten Untersuchungsgebiets für das Szenario GL1.

Bei der weiteren Umwandlung von Ackerflächen der Kategorie 2 (Szenario GL2) werden weitere 13 % der Gebietsfläche zu Grünland.

Die in Abb. 7 dargestellte Gebietskennlinie weist nunmehr eine Unterschreitung des Trinkwassergrenzwerts durch den Gebietsmittelwert der Sickerwasserkonzentration auf. Der Anteil von Flächen, die den Grenzwert übersteigen sinkt auf 40%. Als flächengewichtetes

Gebietsmittel ergibt sich für das Schutzgebiet eine Nitratkonzentration des gebildeten Sickerwassers von 39 mg $NO_3$/l bzw. 46 mg $NO_3$/l für das Gesamtgebiet. Damit dürfte ein ausreichender Anteil der Ackerfläche zur Sanierung des Grundwassers umgewandelt sein.

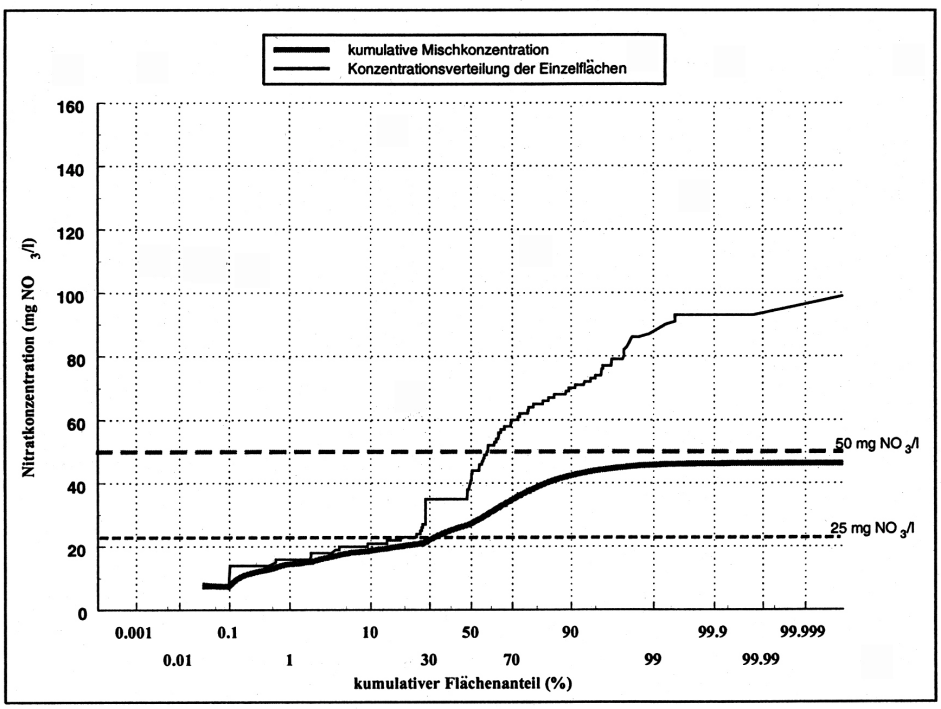
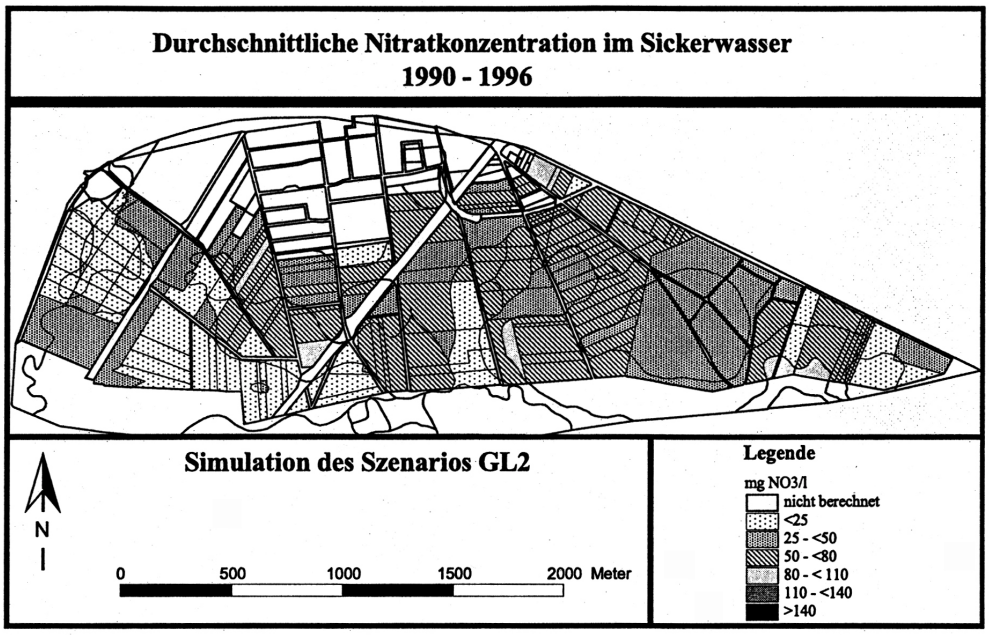



**Abb. 7:** Kumulative Häufigkeit und Belastungsfunktion der Nitratkonzentration im Sickerwasser des gesamten Untersuchungsgebiets für das Szenario GL2

Auf Karte 4 ist abschließend die Situation für das Gebiet, wie sie sich aus den Simulationen des Szenarios GL2 ergibt noch einmal dargestellt. Die verbleibenen Inseln höherer Konzentration sind in erster Linie noch ein Effekt eines hohen Anfangsnitratgehalts.




**Karte 4**

## 4. Schlußfolgerungen und Empfehlungen

Die mit dem Modell berechneten Szenarien zeigen, daß zum einen noch ein erhebliches Reduktionspotential im Rahmen der bisherigen Landnutzung besteht. Aus der Fruchtfolgesituation des Status quo wird jedoch auch deutlich, daß Anbauentscheidungen weniger nach Fruchtfolgegesichtpunkten getroffen werden, sondern vielmehr kurzfristige Reaktionen auf spezifische Marksituationen darstellen. So werden oft beispielsweise reine Sommerungsfruchtfolgen beobachtet, die hinsichtlich der Auswaschungsgefahr sehr kritisch zu beurteilen sind. Durch das Szenario FFA wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, bei weitgehender Beibehaltung des Anbauspektrums eine deutliche Verminderung der Nitratbelastung des Aquifers zu erreichen.

Für eine Unterschreitung des Grenzwerts sind jedoch unter den gegebenen Standortbedingungen weitergehende Maßnahmen im Sinne einer Umwandlung von Ackerland in Grünland notwendig sind.

Die Ergebnisse der Szenarien sowie der Berechnung des Status quo sind noch einmal in Tab. 13 zusammengefaßt.

**Tab. 1:** Simulierte mittlere jährliche Sickerwassermengen, N-Austräge und Nitratkonzentrationen für verschiedene Landnutzungsszenarien im Wasserschutzgebiet Scheeßel im Zeitraum 1990-1996. (in Klammern = Gesamtgebiet).

| | **Sickerwasser (mm)** | **N-Austrag (kg N/ha)** | **Nitratkonzentration (mg $NO_3$/l)** |
|---|---|---|---|
| **Status quo** | 324 (318) | 66 (61) | 91 (86) |
| **Szenario FFA** | 316 (312) | 45 (42) | 63 (59) |
| **Szenario GL1** | 306 (306) | 36 (37) | 52 (54) |
| **Szenario GL2** | 294 (299) | 26 (31) | 39 (46) |

## 5. Literatur


**DISE, N. B. a. R. F. WRIGHT (1995)**: Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. For. Ecol Mange. 71, 153 - 161.

**KERSEBAUM, K. C. (1995):** Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. Ecological Modelling **81**, 145 - 156.

**KERSEBAUM, K. C., C. McVOY, A. FILIUS u. T. STRECK (1993):** Stoffdynamik stillgelegter landwirtschaftlicher Flächen - Risikoabschätzung im Vergleich zur intensiven Nutzung aus der Sicht des Bodenschutzes. UBA-Texte **54/93**, 99 S.

**KERSEBAUM, K. C. u. J. RICHTER (1991):** Modelling nitrogen dynamics in a soil- plant system with a simple model for advisory purposes. Fertilizer research **27**, 273 - 281.

**MEESENBURG, H., K. J. MEIWES u. R. SCHULTZ-STERNBERG (1994) :** Entwicklung der atmogenen Stoffeinträge in niedersächsische Waldbestände. Forst u. Holz, **49**, 236 - 238.

**NLÖ(1993):** Nitrat im Grundwasser - Fallbeispiele. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 137 Seiten.

**RICHTER, G. M, A. J. BEBLIK u. J. RICHTER (1996):** Nitrataustrag aus Ackerböden ins Grundwasser unterschiedlich belasteter Trinkwasser-Einzugsgebiete Niedersachsens. Abschlußbericht F+E Vorhaben BEO 0339121C.

Andreas J. Beblik (*iBUG* / Braunschweig) 13 Seiten, 4 Abb.

# *Minerva* - Simulation des Wasser- und Stickstoffhaushalts zur Prognose standort- und pflanzengerechter N-Düngung

## 1 Einleitung

Dieser Artikel beleuchtet überblickshaft die wichtigsten Aspekte des N-Haushaltsmodells MINERVA. Nach einigen Bemerkungen zur Modellentwicklung (Seite 1) werden die fachlichen Grundlagen des Modells (Seite 2) vorgestellt und dessen typische Anwendungsbereiche erläutert (Seite 4). Einige Anwendungsfälle (Seite 6) illustrieren die Aussagemöglichkeiten dieses Verfahrens, zu dessen praktischem Nutzen (Seite 7) und noch vorhandenen Schwachpunkten (Seite 8) anschließend Stellung genommen wird. Ein Anhang (Seite 9) enthält Literaturhinweise und listet die notwendigen Eingabedaten auf.

### 1.1 Motivation

Außer vom Wasserangebot hängt die Bestandsentwicklung vor allem von Menge und zeitlicher Verteilung des pflanzenverfügbaren Stickstoffs ($N_{min}$) ab. Parallel zur Einführung der $N_{min}$-Methode (SCHARPF & WEHRMANN, 1975) in die landwirtschaftliche Beratungspraxis wurden - im Forschungsbetrieb - bereits moderne Simulationstechniken als Beratungsalternative entwickelt. Diese Ansätze leisten- auf naturgesetzlicher Grundlage - eine ausreichend genaue Prozeßbeschreibung der Wasser- und Stickstoffdynamik und beschreiben daraufhin verschiedene Zustände (u.a. $N_{min}$, Bodenfeuchte, Pflanzenmasse) in Abhängigkeit des Standortes, der Bewirtschaftung und der aktuellen Witterung. Entsprechende Präzision bei der Modelldefinition und Datenerhebung vorausgesetzt, können unabhängig von festen Meßterminen für beliebige Tage oder Perioden (z.B. klassische Düngetermine) pflanzenbaulich interessante Aussagen zum Bodenzustand abgeleitet werden.

### 1.2 Modellgeschichte

Im deutschsprachigen Raum wurden - bald nach Einführung der Personalcomputer - schon erste Simulationsstudien in Agrarökosystemen durchgeführt. Wichtige Impulse gingen hier von der Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Jörg Richter (vormals: Uni Hannover; jetzt: TU Braunschweig) aus. Nach anfänglich kurzfristigen Rechnungen für vegetationsfreie Monate (Winterbrache; NUSKE, 1983) konnten die Simulationen mit dem Modell HERMES (KERSEBAUM, 1989) bereits in die Vegetationsperiode ausgedehnt werden, da dieses ein spezifisches Wachstumsmodell für Winterweizen enthielt. Hiermit wurden - vor allem in Niedersachsen - bereits erste Prognoserechnungen zur N-Düngung angestellt.

Im wesentlichen auf diesen Grundlagen erfolgte die Weiterentwicklung dieses Modellkonzeptes mit breiteren Anwendungsmöglichkeiten (Fruchtarten, externe Datenbanken, Kopplung mit Geographischem Informationssystem) und einer modernen, benutzerfreundlichen Programmoberfläche unter dem Namen MINERVA (BEBLIK & RICHTER, 1996).

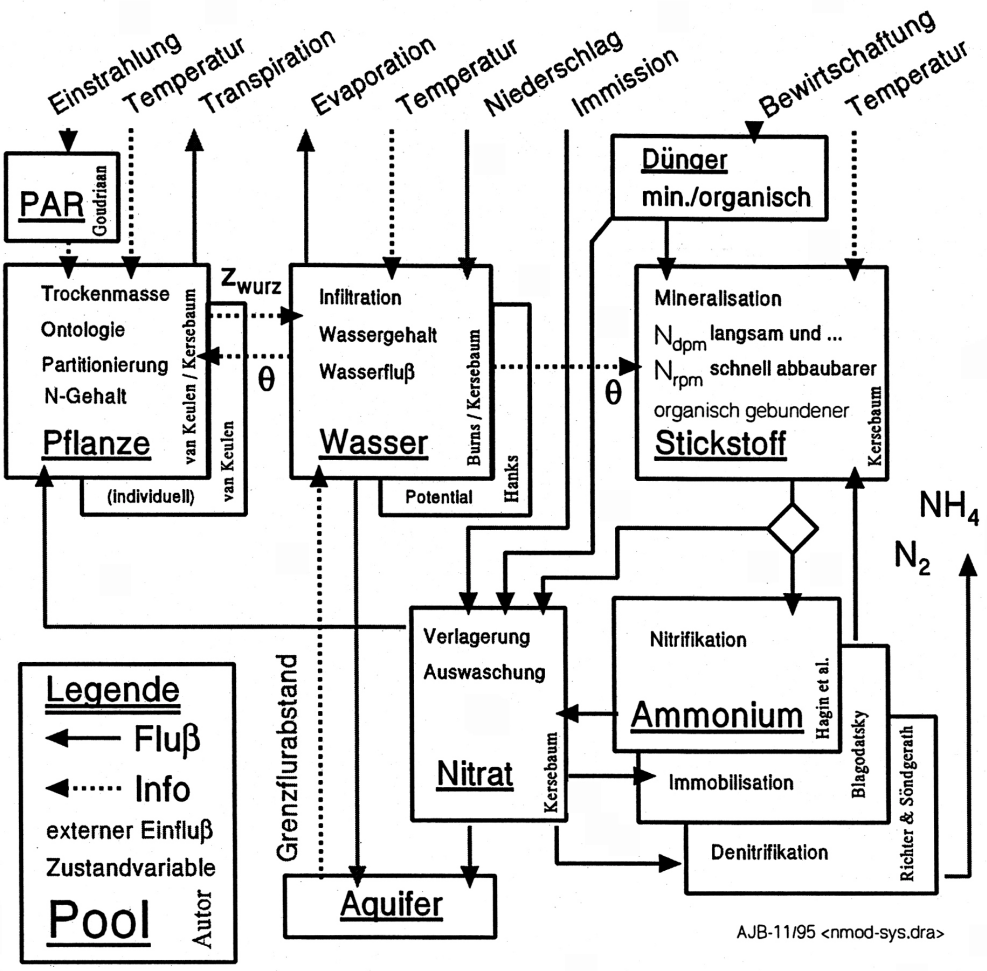



**Abbildung 1**: Struktur des N-Haushaltsmodells MINERVA

## 1.3 Anwendungsziele

Durch seinen modularen Aufbau dient es in der landwirtschaftlichen Beratungspraxis vor allem der Abschätzung von Stickstoffvorräten im aktuellen Vegetationsbestand. Im Rahmen von Forschungsanwendungen werden Details der N-Dynamik (z.B. temporäre N-Immobilisation in mikrobieller Biomasse) erforscht und führen zur systemimmanenten Verbesserung der Beratungsgrundlagen.

Dieses anwendungsreife Modellwerkzeug bietet landwirtschaftlichen Fachberatern und engagierten Landwirten die Möglichkeit, bei einem vertretbaren Aufwand an moderner Rechentechnik (PC, breitenverfügbare Daten) für die meisten mitteleuropäischen Hauptkulturarten (Getreide, Hackfrucht, Raps) das Nährstoffangebot und den N-Bedarf praxisgerecht, witterungs- und standortspezifisch zu prognostizieren.

## 2 Modellkonzept

Im Kern des N-Haushaltsmodells MINERVA erfolgt die Simulation des Systems 'Boden-Pflanze-Atmosphäre' zwischen Bestandsoberfläche und der Unterkante des durchwurzelten Bodens. Für ein statisches Bodenprofil (Datenmindestanforderung: Bodenart und Humusgehalt je Schicht) wird durch tägliche Witterungsdaten der Modellantrieb in Form von Energie- (Lufttemperatur, Globalstrahlung) und Wasserangebot (Niederschlag, Verdunstung) vorgegeben. Unter Beachtung der Wechselwirkung 'aller beteiligten Prozeßgrößen' errechnet MINERVA die Änderung der Stoffvorräte (Wasser, Stickstoff, Pflanzentrockenmasse) und die an Transformation und Transport gebundenen Systemverluste (z.B. Sickerwasser, Nitrataustrag, $NH_3$-Auswehung) im Tagesschritt.

Aus Gründen der Datenverarbeitung wird die Bodensäule in gleichmächtige Tiefenabschnitte (Kompartimente) geteilt, denen meßbare Eigenschaften zugewiesen werden. In den folgenden Abschnitten 'Wasser-Stickstoff-Pflanze' werden jeweils kurz die wichtigsten Einflußgrößen und Ergebnisse vorgestellt.

### 2.1 Teilbereich 'Wasser'

In MINERVA wird aufgrund der täglichen Witterungsereignisse das Verdunstungs- bzw. Infiltrationspotential an der Bestandes- bzw. Bodenoberfläche errechnet. Diese maximale Änderung des Bodenwasserhaushalts bewirkt eine von der aktuellen Wurzelverteilung abhängige Wasserentnahme aus verschiedenen Tiefen (Evapo- und Transpiration) bzw. die Ein- und Durchsickerung des überstauenden Wassers in die kaskadierten Bodenkompartimente. Dabei regelt das durch Bodenart determinierte Porenvolumen (Permanenter Welkepunkt, Feldkapazität, Gesamtporenvolumen) den Fluß. Sollten aktuelle Bodenwasserzustände die o.g. Potentiale nicht decken, wird bei überschüssiger Evaporation mit kapillarem Aufstieg und bei Überstau eine kurzfristige oberirdische Wasserspeicherung (Muldenrückhalt) berechnet.

### 2.2 Teilbereich 'Stickstoff'

Der pflanzenverfügbare Stickstoff stammt aus mineralischen oder organischen Düngemaßnahmen, dem Lufteintrag (Immission) oder 'entsteht' durch Mineralisation des Humus. Die Berechnung der potentiell mineralisierbaren N-Menge basiert auf einer vom Tongehalt abhängigen Stickstoff-Fraktionierung. Danach ist ein großer Teil des gesamten bodeneigenen Stickstoffs ($N_{total}$) nicht verfügbar (inert). Zwischen 13 und 15% des N-Vorrats werden dem langsam verfügbaren N-Pool zugeordnet. Aus Pflanzenresten und organischer Düngung wird dieser langsame sowie ein schnell abbaubarer N-Pool mit Stickstoff angereichert. Beide Pools unterliegen einer temperatur- und feuchteabhängigen Abbaufunktion, die als wichtigster Grundgedanke die Qualität dieses Modells ausmacht.

Mit dem (Evapo)-Transpirationsstrom erfolgt der Transport des Stickstoffs - in Form von Nitrat - in die Pflanzenmasse. Der konvektive Transport mit dem Porenwasserstrom sowie die Diffusion führen zur Verlagerung des wasserlöslichen Nährstoffs in tiefere Profilabschnitte bis zur vorgegebenen Auswaschungstiefe (normalerweise: Unterkante des durchwurzelbaren Bodens). Die N-Vorräte stehen entsprechend der zuvor beschriebenen Wasserströme in tiefenabhängiger Wechsel-

wirkung mit der aktuellen Vegetation. Wenn auch der eigentliche Umsatz der N-Pools über die Stufen der Ammonifikation und Nitrifikation erfolgt und teilweise auch durch N-Immobilisation kompensiert wird, vereinfacht MINERVA diesen Umsatzprozeß in der Standardeinstellung - ohne wesentliche Qualitätseinbußen - auf den Effekt der Netto-Mineralisation.

### 2.3 Teilbereich 'Pflanze'

Die Simulation der Bestandseigenschaften bedient sich eines physikalisch begründeten, jedoch vereinfachten Bildes von Pflanzen (VAN KEULEN, 1982). Die Vegetation wird in 4 Kompartimente (Wurzel, Blatt, Halm, Speicherorgan) unterteilt und in seiner phänologischen (ec-Stadium), massenmäßigen Entwicklung sowie seines Nährstoffgehaltes modelliert. Spezifische Wachstumsparameter (z.B. Vernalisationsanspruch) werden dabei ebenso wie Stickstoff- und Wassermangel berücksichtigt und erlauben den phasenspezifischen N-Entzug aus dem Boden wiederzugeben.

Dieser Ansatz ist so allgemein, daß sowohl verschiedene einjährige Kulturpflanzen als auch perennierende Bestände (z.B. Gras) damit simuliert werden können. Die artspezifischen Modellparameter wurden aus der Literatur, durch eigene Forschungen und durch Kooperation mit landwirtschaftlichen Versuchseinrichtungen zusammengetragen und ausführlich getestet.

### 2.4 Datentechnik

Damit die Anwendung und Weiterentwicklung des Modells auch außerhalb der Entwicklergruppe erfolgen kann, wurde MINERVA in der portierbaren Programmiersprache (Ansi-C) entwickelt, mit grafischen Benutzeroberflächen für verschiedene Betriebssysteme (DOS, Microsoft Windows, Unix) ausgestattet und sämtliche Modellparameter und Steuergrößen in externen Datenbanken (dBase-Format) gehalten. Die Benutzer können die Modellgrundlagen durch Ergänzung oder Anpassung der externen Daten (z.B. Vorfrucht-Parameter) selbst beeinflussen oder können auch durch Übernahme weiterer Wachstumsmodell-Parameter den Anwendungsbereich des Modells vergrößern.

Im Beratungsbetrieb arbeitet der Benutzer mit einer AckerSchlagKartei, die sämtliche prozeßrelevanten Bearbeitungsmaßnahmen (Aussaat, Düngung, Ernte, Bodenbearbeitung) eines Ackerschlages verwaltet. Für diesen Standort wird auf Knopfdruck eine Simulation durchgeführt, die je nach Grundeinstellung unter dem Aspekt der nachträglichen Analyse der Wasser- und Stickstoffdynamik oder der Prognose des Nährstoffbedarfs erfolgt.

## 3 Simulationsverfahren

Während das Modell MINERVA eigentlich 'nur' die Prozesse in einem Agrar-Ökotop modelliert, können seine Aussagen bzw. die Anwendung unter verschiedenen Aspekten gesehen werden.

### 3.1 á-posteriori-Simulation

Falls mit analytischem Interesse z.B. die Ursache einer bestimmten Ertragssituation

untersucht werden soll, bietet das N-Haushaltsmodell die nachträgliche (á-posteriori) Simulation der Dynamik an. Dazu müssen die realen Randbedingungen (Wetter, Bewirtschaftung) und natürlich das Bodenprofil definiert bzw. bereitgestellt werden. Nach Abwicklung der Simulation liegen die Tageswerte wählbarer Zustandsgrößen (z.B. $N_{min}$-Gehalt je Schicht; Körnertrockenmasse, o.ä.) in einer Ergebnisdatenbank. Diese lassen sich mit den modelleigenen Software-Hilfsmittel in Form von Tiefenprofilen oder Zeitverläufen - auch im Vergleich zu realen Meßwerten - darstellen.

Besonderes interessant ist hierbei die Möglichkeit, nicht oder schwer meßbare Aussagen (z.B. Nitrataustrag aus der Wurzelzone, Nährstoffmangelsituation) zu visualisieren und nachzuweisen. Daraufhin lassen sich - z.B. durch Variieren der Bewirtschaftungsangaben - Optimierungen der Dünge- oder Anbaustrategie iterativ erarbeiten.

### 3.2 **á-priori-Simulation**

Mit der Möglichkeit der witterungsabhängigen Modellierung von Pflanzenwachstum und Nährstoffaufnahme bietet sich MINERVA auch zur vorausschauenenden (á-priori) Simulation an. Besonders bei Kulturen, die üblicherweise in mehreren Gaben gedüngt werden (z.B. Wintergetreide) erlaubt die wiederholte Vorausberechnung des Stickstoffbedarfs für verschiedene Wachstumsphasen (z.B. 'zum Schossen', 'zum Ährenschieben') einen genaue Anpassung der N-Düngung an das aktuelle Aufnahmevermögen und den N-bedarf der Pflanzenbestände. Damit lassen sich - gesteuert durch verschiedene Strategievorgaben - sowohl ertragsneutrale Düngestrategien mit der Versuch eines möglichst geringeren Stickstoffaufwandes oder auch gezielte, unterhalb des Maximalertrags angestrebte Bestandsführungen (z.B. in Wasserschutzgebieten) erreichen.

Die Grundlage dieser á-priori-Simulation ist in Abb.2 skizziert. Bis zum aktuellen Datum (Beratungstermin) wird das Agrarökosystem auf Grundlage des tatsächlichen Wetters und der erfolgten Bewirtschaftungsmaßnahmen simuliert. Mit dem Erreichen des Beratungstermins steuert standorttypisches Prognosewetter, das aus vergleichbaren Situationen (z.B. Daten früherer Jahre) abgeleitet ist, den weiteren Modellverlauf. Die Berechnung bricht beim Erreichen vorgegebener markanter Entwicklungsphasen die Prognose ab und bilanziert den zwischenzeitlichen pflanzentypischen N-Bedarf seit dem Beratungstermin. Abzüglich der natürlichen Bodenfruchtbarkeit (Netto-Mineralisation) ergibt sich die notwendige Stickstoff-Düngermenge, welche - in vernünftige Gaben gesplittet - nun zur Düngung empfohlen wird.

Durch Variation des Prognosewetters (z.B. wüchsig, Trockenstreß, o.ä.) lotet der Berater mit einem gewissen Ermessensspielraum die sinnvolle Düngemenge aus, verbucht diese in der Ackerschlagkartei und veranlaßt die Düngung der Ackerfläche. Rechtzeitig vor dem durch Prognoserechnung errechneten Bemessungszeitraum (z.B. 'bis Ährenschieben') ist die Beratung zu wiederholen und ggf. eine weitere, wiederum an den dann aktuellen Witterungsverlauf angepaßte Düngung zu errechnen.

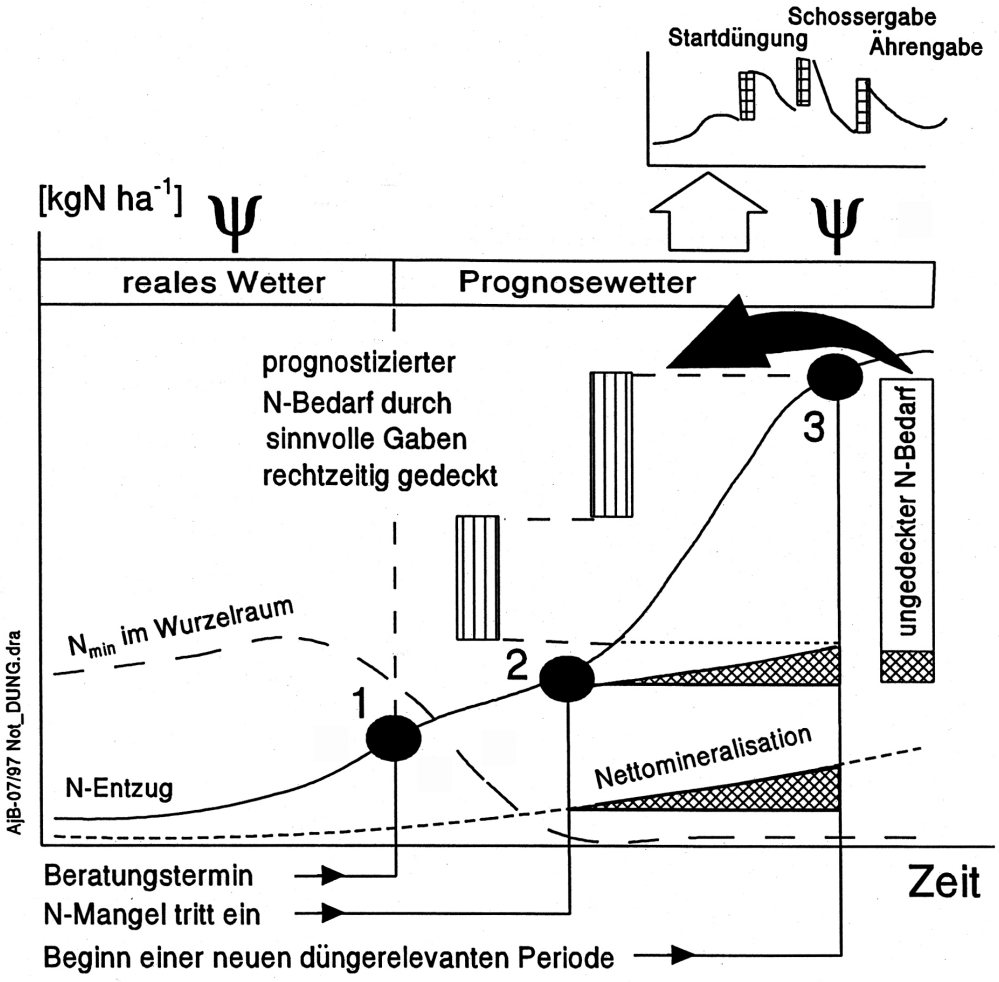



**Abbildung 2**: Methodik zur Ableitung des N-Bedarfs mittels Prognoserechnung

### 3.3 **Bewirtschaftungsvarianten**

Wendet man das Modell auf einen mehrjährigen, u.U. auch fiktiven Bewirtschaftungsablauf (z.B. Fruchtfolge) an, so können auch die überjährigen N-Kreisläufe untersucht werden. Beispielsweise 'erkennt' MINERVA aufgrund der Bewirtschaftungsangaben zum Erntetermin, welche N-Mengen durch Verbleib der Pflanzenresiduen (z.B. Stroh, Rübenblatt) auf dem Acker verbleiben. Mit dem zuvor dargestellten Konzept der N-Pools resultieren daraus recht präzise Vorhersagen der N-Nachlieferung aus diesen Vorfruchtresiduen, wiederum auch in Abhängigkeit der Witterung mit zeitlichem Verlauf.

Mit dieser Simulationstechnik lassen sich 'optimale Fruchtfolgen' gestalten, indem z.B. Aussaattermine oder auch Fruchtwechsel variiert werden, bis eine über die gesamte Rotation günstige Ertrags- und/oder Austragssituation erreicht wird. Hier 'ersetzt' das Modell in gewisser Weise die klassische landwirtschaftliche Versuchsanlage. Jedoch darf an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, daß zu mindestens

für eine gewisse Zukunft die realen Anbauversuche unbedingt notwendig sind, um derartige Modellanwendungen prüfen und verbessern zu können. Insbesondere langfristig angelegte Studien (z.B. Dauerbeobachtungsflächen, Dauerversuche) stellen eine wichtige Grundlage für weitere Modellverbesserungen dar.

### 3.4 Gebietsbezogene Anwendung

Mit dem Übergang vom Punkt (bzw. Einzelschlag) zu einem landschafts- oder einzugsgebietsbezogenen Modellierung finden diese Modellansätze auch außerhalb der landwirtschaftlichen Beratungspraxis Anwendung. Da wir das Modell MINERVA in originärer Form auch auf dieser großräumigen Skala anwenden, kommt es zu synergetischen Effekten bei der Modellanwendung und -entwicklung. Einerseits nutznießen die gebietsbezogenen Fragestellungen von dem mit hoher Präzision am Schlag entwickelten Modellkonzept. Andererseits trägt das vielfältige Anwenden der punktbezogenen Ansatzes zur fortwährenden Prüfung der Modellfunktionen bei, erlaubt dadurch die Überprüfung und gibt ggf. Hinweise zur Verbesserung von Teilmodellen.

## 4 Anwendungsfälle

MINERVA ist zusammen mit dem Vorläufer HERMES schon an weit über 1000 Einzelstandorten angewandt worden und dabei mit zahlreichen Meßdaten abgeglichen. In der Quintessenz erweist sich dieser Modellansatz sowohl für die natürlicherweise leichter modellierbaren Löß-Standorte als auch für Sande und Niedermoore als anwendbar. Bislang wurde - vereinfachend - davon ausgegangen, daß für den einzelnen Schlag die Hangneigung keinen weiteren Einfluß auf die Modellaussagen hat. Die folgenden Fälle sind mit diesen Grundannahmen gerechnet worden und bestätigen die Praxistauglichkeit exemplarisch. Im Abschnitt 'Entwicklungsbedarf' werden noch auf aktuellere Modellanwendungen angesprochen.

### 4.1 Modellvalidierung

In den Jahren bis 1989 bestätigte Kersebaum für zahlreiche Standorten (vor allem in der weiteren Umgebung Hannovers) die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Meßwerten. Eine Studie in drei niedersächsischen Wasserschutzgebieten (Geest, Börde, Hügelland) wurde zwischen 1992 und 1996 von RICHTER & BEBLIK (1996) durchgeführt, diente dabei gleichfalls zur weiteren Validierung des Modells HERMES wie auch zur Überprüfung des weiterentwickelten Modells MINERVA. Weitere Versuche erfolgten in Kooperation mit der landwirtschaftlichen Offizialberatung (Niedersachsen, Baden-Württemberg) und interessierten landwirtschaftlichen Betrieben und Versuchseinrichtungen (Bayern, Rheinland-Pfalz, Brandenburg, Sachsen, Schleswig-Holstein, Hessen).

### 4.2 internationaler Vergleich

Anhand von veröffentlichten Datenreihen von internationalen Forschergruppen wird in einem ständigen Entwicklungsprozeß die Modelltestung und -entwicklung fortgesetzt. Diese Untersuchungen sind besonders deshalb interessant, weil dadurch gegenüber den landwirtschaftlichen Versuchsanlagen oft noch präzisere (z.B. Teilernten im Abstand von 2 - 3 Wochen) und umfangreichere Beobachtungen (z.B. Sickerwassermessung) beigetragen werden. Dadurch konnten beispielsweise

sorgfältig überprüfte Modellparameter für Raps (BEBLIK ET AL., 1996) und Mais erarbeitet werden. Durch Kooperation mit verschiedenen Fachkollegen im In- und Ausland erfolgt zur Zeit die Modelltestung für Kartoffeln (Niedersachsen, Schottland), Grasbestände (Erzgebirge, Niederlande) und Hartweizen (Italien).

## 4.3 NLÖ-Studie

Das Niedersächsische Umweltministerium förderte in einem vom NLÖ koordinierten Pilotprojekt ebenfalls die Validierung des Modells MINERVA. In den Jahren 1994 bis 1996 wurden an etwa 50 Einzelstandorten praxisübliche und modellgestützte

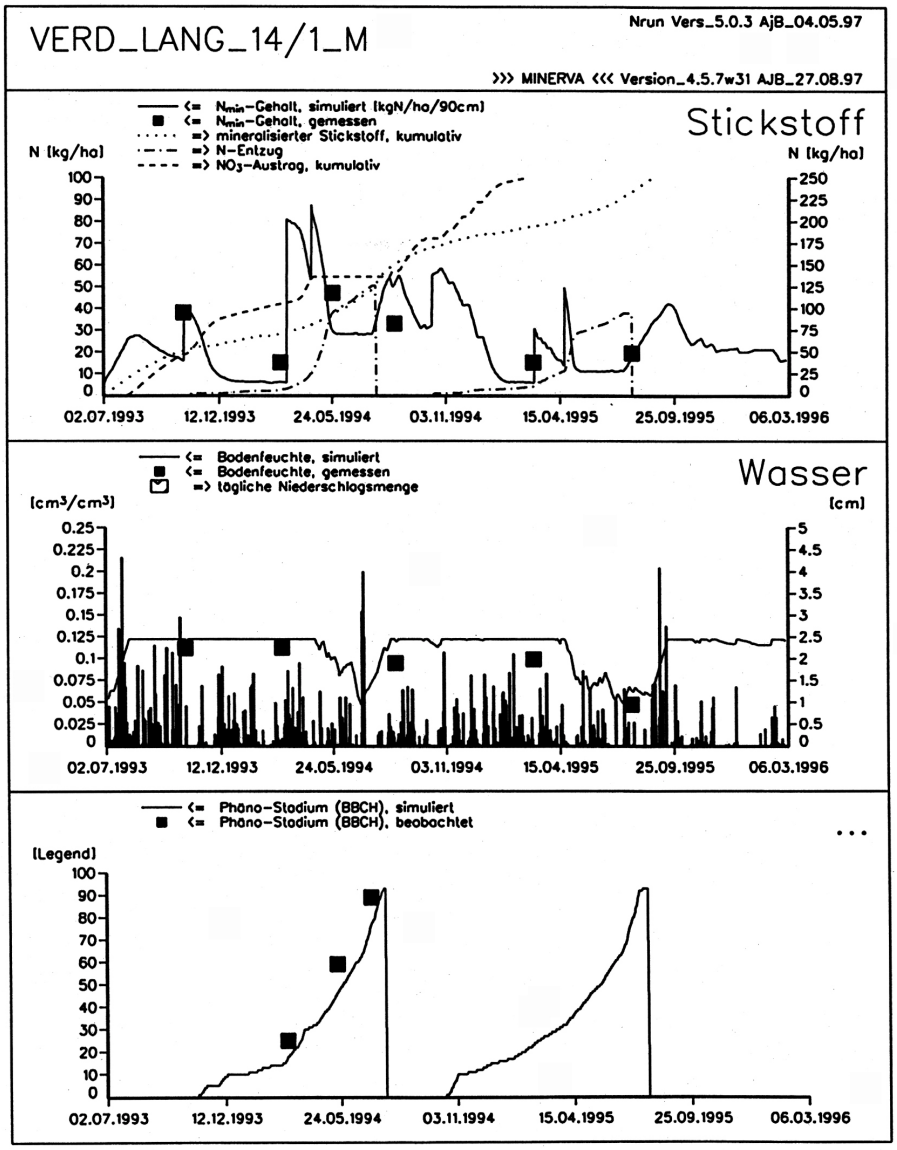



**Abbildung 3**: Simulationsverlauf (Stickstoff, Wasser, Bestandsentwicklung) an einem norddetuschen Geeststandort (Langenberg / Kreis Verden) nach Silomais (1993)

Beratungsmethoden verglichen (BEBLIK ET AL., 1997). Je nach Ausstattungsgrad der örtlichen Beraterteams wurden die Testflächen als Exaktversuch mit 4-facher Wiederholung (lateinische Quadrate) oder Streifenversuch (parallele Bewirtschaftung von Praxisschlägen) angelegt und hinsichtlich Stickstoffaufwand, Ertrag und Qualität des Erntegutes verglichen. Ergänzend wurde für die jeweiligen Standorte auch die 'verborgene Größe' Nitrataustrag simuliert. Abb. 3 zeigt wichtige Größen des Wasser- und Stickstoffhaushalts für einen typischen Sandstandort des untersuchten Datenkollektivs (Kreis Verden).

In der Gesamtheit dieser Versuche dominierte die Kombination von Wintergetreide auf sandigen Standorten, vielfach mit Veredlungswirtschaft verbunden. Dabei war bei nicht signifikant unterschiedlichen Durchschnittserträgen aufgewandte N-Dünger in der MINERVA-Variante um ca. 50 kg $N \cdot ha^{-1}$ niedriger als praxisüblich. Die Gegenüberstellung von ökonomischen Kriterien (N-Ertrag : N-Aufwand) und ökologischer Belastung (N-Austrag : N-Ertrag) erlaubt dabei zwar den gebietsübergreifenden und fruchtart-unabhängigen Vergleich der Beratungsmethoden (ökologisch-ökonomische Effizienz) und ergab ebenfalls eine tendenziell bessere, aber nur schwer zu bewertende Präferenz für die Modellvariante. Es zeigte sich dennoch, daß in gewissen Situationen auch noch suboptimale Empfehlungen aus der Modellanwendung resultierten.

### 4.4 **aktuelle Praxisversuche**

Seit 1996 wurden daher in Kooperation zwischen dem ***iBUG*** und der Landwirtschaftskammer Hannover (LWK Hannover, 1998) u.a. auch weitere Versuche auf den niedersächsischen Versuchsgütern durchgeführt. Die Beratung nach MINERVA erfolgte für verschiedene Wintergetreide sowie Kartoffeln und wurde anderen Beratungsansätzen (z.B. $N_{min}$-Sollwert) gegenübergestellt. Dabei konkurrierte das Simulationsmodell trotz geringerer Kenntnis der Standortqualität erfolgreich mit den Varianten der langjährig praktizierenden Versuchsfeldbetreiber (siehe auch Beitrag von Dr. Lehrke an gleicher Stelle).

Im Auftrag verschiedener Gebietskörperschaften (Braunschweig, Göttingen, Lüneburg) wurden weitere Praxistests des Modells MINERVA durchgeführt. In einer außergewöhnlich günstigen Situation (nach kaltem Winter 1996) konnte in einem Streifenversuch (5 Winterweizenstandorte; Northeim) in der MINERVA-Variante gegenüber der betriebsüblichen Beratung mit etwa 50% des N-Aufwandes (80 kg $N \cdot ha^{-1}$) im Durchschnitt 98 % des Vergleichsertrages (91 $dt \cdot ha^{-1}$) erzielt werden. Die Einsparung von mehr als 70 kg $N \cdot ha^{-1}$ war also nicht ertrags- oder qualitätsmindernd und bedeutet einen beachtlichen Gewinn für die Rohwasserqualität. (siehe Abb. 4)

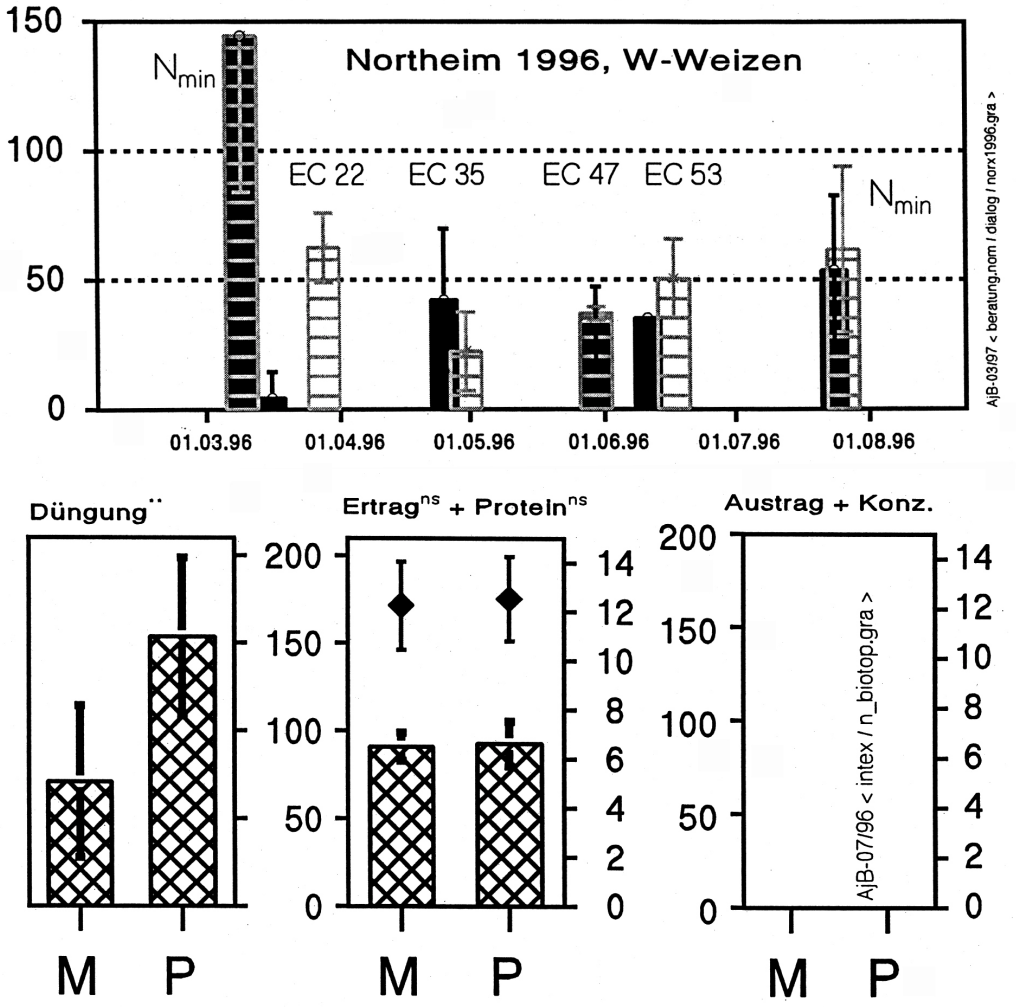



**Abbildung 4**: Düngetermine und -mengen bei praxisüblicher N-Düngung ('P' bzw. Horizontalschraffur) und MINERVA-Empfehlung ('M' bzw Vollfläche) an 5 Standorten mit Winterweizen (Kreis Northeim, Harzvorland) sowie Mittelwerte des Gesamt-N-Aufwandes (Düngung), des Kornertrags (Ertrag) und Eiweißgehalts im Korn (◆). [Säulen: kg N·ha$^{-1}$; Symbol ◆: % Rohprotein]

## 5 Beratungspraxis

Das Modells MINERVA empfiehlt sich aufgrund von Erfahrungen bei Beratungsfällen und innerhalb von Fortbildungsmaßnahmen der Land- und Wasserwirtschaft in folgenden Punkten als hilfreiches Instrument.

### 5.1 Verständnisgewinn 'Nährstoffkreislauf'

Durch sorgfältige Analyse von standortbezogenen Simulationen wächst das Verständnis für die Stickstoff-Dynamik, insbesondere die N-Mineralisation im Jahreslauf und auch für die düngungsinduzierten Nährstoffausträge aus der Wurzelzone. Durch 'simulierten Zwischenfruchtanbau' kann beispielsweise der Nutzen im

Hinblick auf die Wassergewinnung optimiert werden und so auch weitere Argumente und praktische Einsichten in diesem Entscheidungsfeld beitragen.

### 5.2 Über- und Minderversorgung aufdecken

Bei ausreichend genauer Parametrisierung der fruchtart-spezifischen Vegetationsentwicklung lassen sich Optimierungen der Nährstoffversorgung erarbeiten. In vielen Praxisfällen konnte sogar eine signifikante Einsparung von N-Mineraldünger ohne Ertragsverlust erreicht werden.

### 5.3 Frühjahrs-$N_{min}$ ohne Meßaufwand

Die zur $N_{min}$-Sollwertdüngung notwendige Bestimmung des $N_{min}$-Gehalts vor Vegetationsbeginn erfolgt oftmals unter hohem zeitlichen Druck (nach Schneeschmelze und vor Vegetationsbeginn). Der Einsatz von Simulationsmodellen bewirkt- bei gut geführten Ackerschlagkarteien - in den meisten Fällen die Entschärfung des Meßaufwandes und bietet eine u.U. sogar zuverlässigere Grundlage für die Bemessung des N-Bedarfs, weil die potentielle Nachlieferung aus Vorfruchtresiduen implizit ausgewiesen wird.

### 5.4 dynamische Bestandesführung

Nicht nur bei außergewöhnlichem Witterungsverlauf bietet der Einsatz eines Simulationsmodells genauere Angaben über den wahrscheinlichen Wachstumsverlauf sowie die Ertragsentwicklung. Durch mehrfache, phasenweise betriebene Simulation des N-Bedarfs kann z.B. das Risiko einer Spät- oder sogenannten 'Qualitätsdüngung' deutlicher kalkuliert werden. Besonders auf leichten Standorten führt die Aus- bzw. Einwaschung bereits erfolgter Stickstoffdüngungen u.U. zur Mangelversorgung junger Bestände. Hier kann ein simuliertes, tiefendifferenziertes Profil der Nährstoffverteilung bei der Bestandesführung wichtige Hinweise geben.

## 6 Entwicklungsbedarf

Trotz der bereits über 15-jährigen Entwicklungzeit der hier vorgestellten Modellfamilie (MINERVA, HERMES) besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf.

### 6.1 Pflanzenbau

Erst in den letzten Jahren wurde der Einsatz von MINERVA für die N-Bedarfsprognose eines breiteren Spektrums von Kulturarten möglich. Bei der Parametrisierung des Wachstumsmodells zeigte sich die generelle Eignung dieses Ansatzes. Jedoch müssen pflanzenbauliche Aspekte (z.B. möglichst wenig Überfahrten, keine Düngegaben nach ec 49, o.ä.) sowie Gesichtspunkte des Wasserschutzes noch stärker berücksichtigt und getestet werden.

Die noch unzulänglich erprobten Modellparameter für Mais, Kartoffeln und Zuckerrüben sind unbedingt im landwirtschaftlichen Versuchswesen zu kontrollieren und ggf. daraufhin zu korrigieren. Hierbei sollten - soweit relevant - wenigstens Unterschiede zwischen frühen- und späten Sorten abgebildet werden.

Neue - konservierende - Methoden der Bodenbearbeitung (z.B. pfluglose Bestellung) verändern die Bodeneigenschaften sowohl im Hinblick auf den Wassertransport als

auch hinsichtlich der Stickstoff-Mineralisation. Hier sind dringend Versuche zum Einfluß langfristiger Bearbeitungsruhe auszuwerten oder anzustellen.

### 6.2 Prozesse

Einige Prozesse der N-Dynamik (z.B. Verschiebung des Humusgleichgewichts bei Krumenvertiefung, N-Immobilisation bei Stroheinarbeitung, $N_2$-Fixierung bei Leguminosen) sind noch nicht oder nicht ausreichend genau dargestellt. Diese Verfeinerungen können nur auf Basis sehr 'dichter' Datensätze hoher Präzision untersucht und validiert werden.

### 6.3 Relief

Viele Ackerstandorte in hängigen Lagen sind lateralen Transportprozessen unterworfen. Dabei kann z.B. durch Oberflächenabfluß ein wesentlicher Anteil der potentiellen Infiltration dem Bodenprofil verlorengehen. Bodenabtrag und -anlagerung beeinflußt den Standort nachhaltig und müßte ggf. berücksichtigt werden.

### 6.4 Gebietsbezogene Simulation

Außerhalb des konventionellen, ackerbaulichen Bereichs sind sowohl für Grünlandstandorte als auch andere landwirtschaftliche Nutzflächen (z.B. Varianten der Stillegung, extensive Bewirtschaftung, ökologische Landwirtschaft) Untersuchungen notwendig. Gerade bei der pauschalen Verordnung von Rahmenbedingungen könnte die Landbewirtschaftung aufgrund anbaubedingter Zwänge undurchführbar werden. Hier wäre - unter Beachtung vernünftiger räumlicher Vernetzung von Belastungs- und Entlastungszonen - auf dem Maßstab größerer Gebiete eine zukunftsfähige Landbewirtschaftung zu entwickeln.

## 7 Anhang

### 7.1 Literatur

Beblik, A.J.; A. Willenbockel & J. Richter (1997): *Modellrechnung: Nitrataus-waschung aus dem Boden.* Braunschweig (iBUG). 66 pp. [*im Rahmen des Pilotvorhabens 'Landwirtschaftliche Bodennutzung und Grundwasserschutz in ausgewählten Wasserschutzgebieten Niedersachsens*].

Beblik, A.J.; T. Lickfett & T. Harden (1996): *A multicase optimization procedure for fitting plant growth parameters in the SUCROS based N dynamics model MINERVA. - Usability studies for simulation of oilseed rape growth on farming plots.* **In:** Diekkrüger, B.; O. Heinemeyer & R. Nieder (eds.): Transactions of the 9th Nitrogen Workshop, pp. 79-82. Braunschweig, September 1996 (TU).

Kersebaum, K.C. (1989): *Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden.* Hannover (Universität). 141 pp. *[Dissertation*].

LWK Hannover (1998): *EU-Projekt 'Umweltgerechte Landbewirtschaftung'. Versuchsbericht 1997.* Hannover (Popp). 60 pp. [*gefördert durch Nds. Min. f. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie die Europäische Union*].

Nuske, A. (1983): *Ein Modell für die Stickstoff-Dynamik von Acker-Lößböden im*

*Winterhalbjahr - Messungen und Simulationen.* . Hannover (TU). *[Dissertation]*.

Richter, G.M. & A.J. Beblik (1996): *Nitrataustrag aus Ackerböden ins Grundwasser unterschiedlich belasteter Trinkwasser-Einzugsgebiete Niedersachsens.* Braunschweig (TU BS - IfGG). 235 pp. [*Abschlußbericht zum F+E-Vorhaben BEO FKz. 0339121C*].

Richter, G.; A.J. Beblik & K.C. Kersebaum (1993): *Modellierung des Nitrataustrags - Beratungsinstrument für den GW-Schutz in Niedersachsen.* **In:** Mittlg. d. Dtsch. Bodenkdl. Ges.**68**: 115-118.

Scharpf, H.C. & J. Wehrmann (1975): *Die Bedeutung des Mineralstickstoffvorrates des Bodens zu Vegetationsbeginn für die Bemessung der N-Düngung zu Winterweizen*. **In:** Landwirtschaftliche Forschung **40**: 259-274.

van Keulen, H.; F.W.T. Penning de Vries; Drees & E. M. (1982): *A summary model for crop growth.* **In:** Penning de Vries, F.W.T. & H.H. van Laar [eds.]: Simulation of plant growth and crop production. pp. 87-97. Wageningen (pudoc). [Sucros-Model].

## 7.2 Eingabedaten

Das hier skizzierte Modellkonzept basiert auf breitenverfügbaren Daten zum Modellantrieb (tägliche **Wetterdaten**: Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer, Verdunstung), Standortausstattung (**Bodenprofil** mit -art und Humusgehalt; Lage) sowie zur Bewirtschaftung (**Früchte**: Arten, Termine, Saat- bzw. Erntemengen; **Düngung**: Art, Menge, Einarbeitung). Eine ausführliche Liste kann vom Autor angefordert werden.

## 7.3 Ausgabedaten

Im N-Haushaltsmodell MINERVA werden mehr als 100 Zustandsgrößen aus den Bereichen 'Wasserhaushalt', 'Stickstoffhaushalt' und 'Pflanzenentwicklung' simuliert. Einige beziehen sich auf den Standort als ganzes (aktuelle Körnertrockenmasse); andere sind über das Bodenprofil differenziert (z.B. $N_{min}$ je Kompartiment). Die thematische Auswahl und der Umfang der Ausgabedateien kann vom Nutzer flexibel angepaßt werden.

Die wichtigsten Ausgabegrößen mit Bezug
zum **Wasserhaushalt** sind Infiltration, Bodenfeuchte, Grundwasserneubildung, Beregnungsbedarf,
zum **Stickstoffhaushalt** sind $N_{min}$, N-Mineralisation, N-Entzug, $NO_3$-Austrag, Denitrifikation, N-Bedarf,
zur **Bestandsentwicklung** sind phänologisches Stadium (ec), Pflanzentrockenmasse, Blattflächenindex, Ertragsdaten.

## 7.4 Bezugsmöglichkeiten

Das Modell MINERVA wird vom Institut für Boden- und Gewässerschutz (***iBUG***) in D-38104 Braunschweig (Postfach 14 19) entwickelt und vertrieben. Zu Testzwecken kann dort eine zeitlich befristete Demo-Version kann angefordert werden.

**Landwirtschaftskammer Hannover**
**Bezirksstelle Braunschweig**

**Braunschweig, 14.07.1998**

**Dr. Ulrich Lehrke**
**Th. Beiß-Delkeskamp**

# Praktische Erfahrungen mit dem N-Haushaltsmodell Minerva Version 4.X für Windows (Stand Frühjahr 1997)

Die Bezirksstelle Braunschweig der Landwirtschaftskammer Hannover wendet das Simulationsmodell Minerva seit 1996 an. Zur Überprüfung der Eignung in der Düngeberatung als Ergänzung zur Nmin – Sollwertmethode wurden zahlreiche Exakt- und Streifenversuche durchgeführt. U. A. wurde das Modell auch in der Wasserschutzgebietszusatzberatung sowie im Rahmen des EU-Projekts Umweltgerechte Landbewirtschaftung angewendet.
Die Simulationsrechnungen bezogen sich bislang vornehmlich auf W. Weizen. In Zusammenarbeit mit dem IBUG wurden allerdings auch erste Erfahrungen in W. Gerste und Zuckerrüben gesammelt.
Die ersten Ergebnisse der Versuche zeigen, daß nach Empfehlung des Simulationsmodells im Vergleich zur Sollwertvariante vergleichbare Erträge erzielt werden konnten. Bei Weizen konnten allerdings häufig nicht die vom Markt geforderten Eiweißgehalte erzielt werden. Bei der Verteilung fiel auf, daß die Düngung im Frühjahr vor allem nach der Vorfrucht Zuckerrüben deutlich verzögert verabreicht wurde. Dadurch ergaben sich teilweise leichte N-Mangelsymptome. Das Programm setzt dagegen einen Düngeschwerpunkt im Schossen, in der Phase der größten N-Aufnahme des Getreides. Im Durchschnitt wurden 4 (2 – 5) Teilgaben appliziert.
Desweiteren wurden fiktive Simulationsrechnungen vorgenommen, um die Güte des Pflanzenwachstumsmodells und des Mineralisationsmodells zu überprüfen. Es ergaben sich teilweise unschlüssige Ergebnisse, so war der Gesamt N-Entzug auf einem identischen Standort mit identischer Witterung bei einem spät gedrillten Rübenweizen immer höher, als bei einem früh gedrillten Stoppelweizen. Dies ließ sich auch nicht durch ein hohes N- Angebot beeinflussen. Die systemeigenen sortenspezifischen Boniturdateien lassen nur geringen Spielraum um die Darstellung des Wachstumsmodells zu präzisieren. Auch die in den Systemdatenbanken N_BIOX und N_CROPS angelegten unterschiedlichen WW-Intensitätsstufen führen noch zu keinen verbesserten Ergebnissen.
Bei dem Mineralisationsmodell ist anzumerken, daß die teilweise hohen Nmin Frühjahrswerte (bis 80 kg N/ha) von dem Programm nur unzureichend simuliert

wurden (zumeist lagen Unterschätzungen vor), die Bodenfeuchte wurde in fast allen Fällen korrekt abgebildet. Die N-Nachlieferung (bei idealen Wetter 300-500 g N/ha /Tag) erscheint in einem plausiblen Rahmen. Abzuraten ist von den Teilmodellen (insbesondere N-Immobilisation nach S.A.Blagodatsky), die in der vorliegenden Version noch nicht hinreichend implementiert sind und durchaus zu Schutzverletzungen unter Windows führen.
Die größten Möglichkeiten der Manipulation des Simulationslaufs bilden die Wetterdaten und das Bodenprofil. Daraus ergibt sich konkret die Forderung einer Wetterstation in unmittelbarer Nähe (max 10 km Entfernung) und einer genauen Erfassung des Bodenprofils, Untersuchung auf Humusgehalt, Nmin, Bodenfeuchte und Lagerungsdichte.
Praktische Probleme traten immer wieder durch sehr niedrige Düngeempfehlungen auf, die von uns solange ignoriert wurden bis eine praxistaugliche Menge (mind. 40 kg N/ha) erreicht wurde. Die Ausbringungstechnik setzt hier Grenzen und es ist ökonomisch und ökologisch kritisch zu hinterfragen, ob diese geringen Mengen die häufigeren Überfahrten rechtfertigen. Auch der Spätdüngung im Wintereroggen (1 Woche nach der betriebsüblichen) müßte zeitlich ein Limit (z.B. ec 51) gesetzt werden. Aus diesen Bemerkungen ergeben sich die Wünsche nach einer Präzisierung der Pflanzenwachstumsmodelle, incl. sortenspezifische Anpassung über jeweilige Boniturdateien, die Möglichkeit reduzierte oder erhöhte N-Aufnahme abzubilden und einer stärkeren Praxisorientierung der Düngeempfehlungen. Eine exaktere Wiedergabe der ec-Stadien würde auch eine bessere Einschätzung des Pflanzenwachstumsmodells ermöglichen. In diesem Jahr lagen die Düngeempfehlungen von Minerva deutlich unter den Nmin-Sollwertempfehlungen ( bis zu 30% ), obwohl das Programm laut Ergebnisprotokollen ähnlich hohe Mineralisationsraten wie 1997 berechnet. Nach der Höhe der Ährendüngung im Winterweizen zu urteilen, wird der in der Steuerdatei festgelegte Qualitätsanspruch nicht hinreichend erfüllt. Mit den derzeitig verfügbaren Dokumentationen des Programms wird der Anwender nicht optimal unterstützt und ist oft auf seine Experimentierfreudigkeit angewiesen. Wünschenswert wäre eine Dokumentation, die auch die Beziehungen der einzelnen Module und Teilmodelle und deren Einfluß auf die Simulation darstellt. In der uns vorliegenden Version traten zudem Probleme bei der grafischen Darstellung der Ergebnisse auf, die dafür zuständige Datei nrun.cfg behielt die geforderten Ausgabeparameter nicht korrekt. Es war auch nicht möglich Boden- und Bewirtschaftungsdaten von einen Standort auf einen anderen zu übertragen, dies führt zu einem beachtlichen Zeitbedarf für die Eingabe.
Das Programm kann einen Beitrag zur Unterstützung der Beratung liefern, bedarf aber einer Plausibilitätskontrolle und Überprüfung am Bestand, sowie einer ausführlichen Dokumentation und in Teilbereichen anwenderfreundliche Möglichkeiten zur Durchsetzung von standortspezifischen Anbauzielen, z.B. der Qualitätssicherung im Winterweizen.

# III. Zusammenfassung der Diskussionsergebnisse

Neben den Fachbeiträgen bildete die anschließende Diskussion den eigentlichen Schwerpunkt der Veranstaltung, in der neben Fragen zum Dateninput und zur Prognosegenauigkeit, primär konkrete Anwendungsmöglichkeiten und die Praxisreife der unterschiedlichen Modellansätze für die Zwecke der landwirtschaftlichen Zusatzberatung erörtert sowie Anforderungen an zukünftige Modellentwicklungen formuliert wurden.

Es wurde deutlich, dass die vorgestellten Modelle für sehr unterschiedliche Fragestellungen und Zielsetzungen zum Einsatz kommen können. Während das sog. „Misch-zellenmodell" für planerische Zwecke auf Landesebene, wie z.B. die Abschätzung der Nitrataustragsgefährdung als Grundlage für Grundwasserschutzmaßnahmen, genutzt werden kann, werden mit Hilfe eines anderen, noch in Entwicklung befindlichen, Modells die Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den $NO_3$-Austrag ermittelt. In einem weiteren Modellansatz werden durch ein regressionsanalytisches Verfahren auf der Basis langjähriger $N_{min}$-Ergebnisse und den zugehörigen Wetterdaten Nmin-Werte prognostiziert, was zu einer deutlichen Reduzierung des Probenumfangs führen könnte.

Sowohl für das „Mischzellenmodell" als auch für das regressionsanalytische Verfahren wurde Kritik hinsichtlich der mangelnden Berücksichtigung der aktuellen Bewirtschaftung und der damit im Zusammenhang stehenden N-Dynamik im Boden geäußert. Nach Ansicht einzelner Teilnehmer besteht hier noch Klärungs- und ggf. Erweiterungsbedarf. Eine Anwendung der genannten Modelle in der Praxis findet derzeit noch nicht statt.

Darüber hinaus wurden Modelle demonstriert, die bei Fragen des Schutzgebietsmanagements und der landwirtschaftlichen Beratung zum Einsatz kommen. Konkret sind hier Extensivierungsszenarien zur Reduzierung der $NO_3$-Konzentration im Grundwasser einerseits und schlagbezogene Düngeempfehlungen andererseits zu nennen.
Hinsichtlich ihrer Aussagegenauigkeit und Prognosefähigkeit konnte gezeigt werden,

dass durch eine stetige Weiterentwicklung der Modelle eine zunehmende Annäherung zwischen gemessenen und berechneten Werten realisiert werden konnte. Ferner wurde deutlich, dass mit einem erhöhten Anspruch an die Aussagefähigkeit der Modelle auch die Komplexität des Modellaufbaus steigt.

Die für Extensivierungsszenarien und zur Düngeberatung eingesetzten Modelle bestehen aus zahlreichen Teilmodellen z.B. zum Pflanzenwachstum, zur Wasserbewegung und zur N-Mineralisierung sowie ergänzenden Teilmodellen. Alle diese Teilmodelle sind mit entsprechend umfangreichen Hintergrunddateien verknüpft.

Seitens der Modellierer wurde betont, dass der modulare Aufbau dieser Modelle den Vorteil bietet, bei Bedarf eine Modellerweiterung durchzuführen, um somit eine optimale Anpassung an den Standort zu erreichen. Im konkreten Fall setzt dies beim N-Haushaltsmodell Minerva allerdings voraus, dass entsprechende Boden- und Wetterdaten vorliegen. Da diese i.d.R. verfügbar sind, kann eine standortspezifische Modellanpassung mit vertretbarem Aufwand erfolgen.

Von den Nutzern wurde die Einsatzmöglichkeit des N-Haushaltsmodells Minerva in der Düngeberatung als positiv beurteilt. Hervorgehoben wurde in diesem Zusammenhang die Empfehlung zu einer geringen oder gar keiner N-Startgabe zu Vegetationsbeginn, was zu einer optimierten Anpassung der Düngungsmaßnahmen an den Pflanzenbedarf führt und dem Gedanken eines aktiven Grundwasserschutzes Rechnung trägt.

Als erschwerend bei der Einführung des Modells Minerva in die Praxis wurde jedoch u.a. eine aufwendige Einarbeitung in das Programm sowie Düngeempfehlungen < 40 kg/ha, die ein häufigeres Überfahren des Schlages erforderlich machen, hervorgehoben.

Insgesamt wurde das Modell Minerva von den Nutzern als wichtiges Instrument bei der Düngeberatung eingeschätzt, das in Kombination mit begleitenden Untersuchungen (z.B. Nitracheck, Chlorophyllmeter) zur Reduzierung des Düngereinsatzes bei gleichbleibendem Ertragsniveau beitragen kann und zudem zu einer spürbaren Sensibilisierung der Landwirte hinsichtlich ihrer Düngegewohnheiten geführt hat.

In Bezug auf den Komplex „N-Nachlieferung“ wurden seitens der Nutzer Defizite sowohl für Moor- und Sandböden mit intensiver organischer Düngung als auch für Forststandorte aufgezeigt. Hierzu kam von den Modellierern der Hinweis, daß diese Themen bereits in unterschiedlichen Forschungsprojekten berücksichtigt werden, mit Ergebnissen kurzfristig aber noch nicht gerechnet werden könne.

Trotz der begrenzten Auswahl an vorgestellten Modellen konnte die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten demonstriert werden, wobei sehr unterschiedliche Maßstabsebenen angesprochen wurden (Landesebene - Ackerschlagebene).

In der Zusammenfassung wurde seitens des NLÖ unterstrichen, dass es zukünftig darauf ankommen wird, die bisherigen Ansätze im Hinblick die relevanten Fragen des Grundwasserschutzes weiterzuentwickeln. Dies sollte speziell unter dem Aspekt und dem langfristigen Ziel geschehen, eine Verknüpfung der verschiedenen Maßstabsebenen bei entsprechenden landesplanerischen Fragestellungen im Bereich Landwirtschaft - Grundwasserschutz zu realisieren. Diese „integrative“ Vorgehensweise könnte sich insbesondere vor dem Hintergrund eines effizienz- und erfolgsorientierten Grundwasserschutzes als zukunftsweisend herausstellen.

# IV. Anhang

**- entfällt -**