

Konrad MIEGEL und Birgit ZACHOW

## **Abbau von Stickstoff-Bilanzüberschüssen durch modellgestützte Düngeempfehlung**

**Reduction of nitrogen surpluses by using of a nitrogen balance model to determine fertilizer recommendations**

### **Abstract**

The fulfillment of European Water Framework Directive (WFD) belongs to the most important tasks of actual water management. The goal of WFD is a good state of all waters and groundwater bodies. One of the most serious problems to fulfill WFD in the state Mecklenburg-Vorpommern is the contamination of waters by nitrate, which is caused by too high rates of fertilizer application on agriculturally used areas. The determination of optimum rates and dates of application suffers from lack of information about weather conditions and soil intern processes during the vegetation period. Models like MINERVA, which are able to simulate these processes and plant growth, are suited tools to fill this gap of information. MINERVA was comprehensively tested at several sites in Mecklenburg-Vorpommern. The basis were measurements of elements of soil water and soil nitrate balance at the lysimeter station Groß Lüsewitz and at several agricultural research stations, the analysis of plant parameters as well as the use of MINERVA under conditions of farmer practice. The results show that the determination of fertilizer amounts by MINERVA is a suited strategy to save fertilizer and to reduce nitrate leaching into groundwater and surface waters.

**Keywords:** agriculture, fertilizer, water management, soils, nitrates, leaching, water balance, modeling

### **1 Einleitung**

Zu den wichtigsten aktuellen Aufgaben der Wasserwirtschaft gehört die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) der Europäischen Union bis zum Jahr 2015. Ziel der Wasserrahmenrichtlinie ist das Erreichen eines ökologisch und chemisch guten Zustandes aller Oberflächengewässer und eines guten Zustands aller Grundwasserkörper in Bezug auf ihre chemische Beschaffenheit und ihren Wasserhaushalt. Abweichungen von dieser Zielstellung werden lediglich bei künstlichen und schwer beeinträchtigten Gewässern zugelassen, deren Überführung in einen guten Zustand mit einem volkswirtschaftlich nicht vertretbaren Aufwand verbunden wäre.

Neben der ungenügenden Strukturgüte vieler Fließgewässerabschnitte gehört die Gewässerbelastung mit den Pflanzennährstoffen Stickstoff und Phosphor zu den schwerwiegendsten Problemen bei der Umsetzung der WRRL im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern. Während die punktuellen Nährstoffeinträge seit Beginn der 90er Jahre durch den Bau und die Rekonstruktion von Kläranlagen drastisch verringert werden konnten, stellen gegenwärtig die Einträge aus diffusen Quellen die Hauptbelastung dar. So ermittelte Pagenkopf (2001) z. B. durch Anwendung des Modells MONERIS (Behrendt et al. 1999) im Einzugsgebiet der Warnow (ohne Unterwarnow, Gebietsgröße 3067 km<sup>2</sup>, Zeitraum 1995 bis 1999) einen Anteil der diffusen Quellen an der Gesamtfracht von 94% beim Stickstoff und 90% beim Phosphor. Demnach wird Stickstoff überwiegend über Dränagen und über den Grundwasserpfad in die Oberflächengewässer eingetragen. Bei Phosphor dominiert der Eintrag durch Erosion, über den Grundwasserpfad und aus urbanen Gebieten.

Mehl (2003) verglich im Einzugsgebiet der Beke, einem Teileinzugsgebiet der Warnow (Gebietsgröße 313 km<sup>2</sup>), die Modellergebnisse von Pagenkopf (2001) mit Stickstoff-Frachten, die auf der Grundlage umfassender Messungen ermittelt worden sind, und weist in diesem Gebiet einen Anteil der diffusen Quellen an der Gesamtfracht von immerhin 98% aus. Die Ergebnisse machen deutlich, dass die jährlichen Frachten aufgrund unterschiedlicher Witterungsverläufe beträchtlichen Schwankungen unterworfen sind.

Daneben ist eine klare räumliche Differenzierung zwischen den untersuchten Teilgebieten der Beke zu erkennen, für die vor allem Unterschiede in den Bodenverhältnissen und unterschiedliche Anteile an landwirtschaftlichen Nutzflächen verantwortlich sind. So weist das Zwischeneinzugsgebiet des Mittellaufes mit einer Fläche von 61,7 km<sup>2</sup> und dem größten Anteil landwirtschaftlicher Nutzflächen im Gebiet mit 22 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> die größte mittlere Jahresfracht der Jahre 1995 bis 2003 auf, wobei sich das relativ feuchte Jahr 2002 mit 55,1 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> und das relativ trockene Jahr 2003 mit 12,7 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> noch deutlich unterscheiden. Der Mittelwert 22 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> entspricht bei einer mittleren Abflussspende von 5,5 l s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> einer Nitratkonzentration von 56,2 mg l<sup>-1</sup>, die nicht nur ökologisch bedenklich ist (Gewässereutrophierung), sondern daneben den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert für Trinkwasser von 50 mg l<sup>-1</sup> übertrifft. Zur räumlichen Differenzierung bei den Frachten tragen außerdem Zehr- und Retentionsvorgänge im Unterlauf der Beke bei.

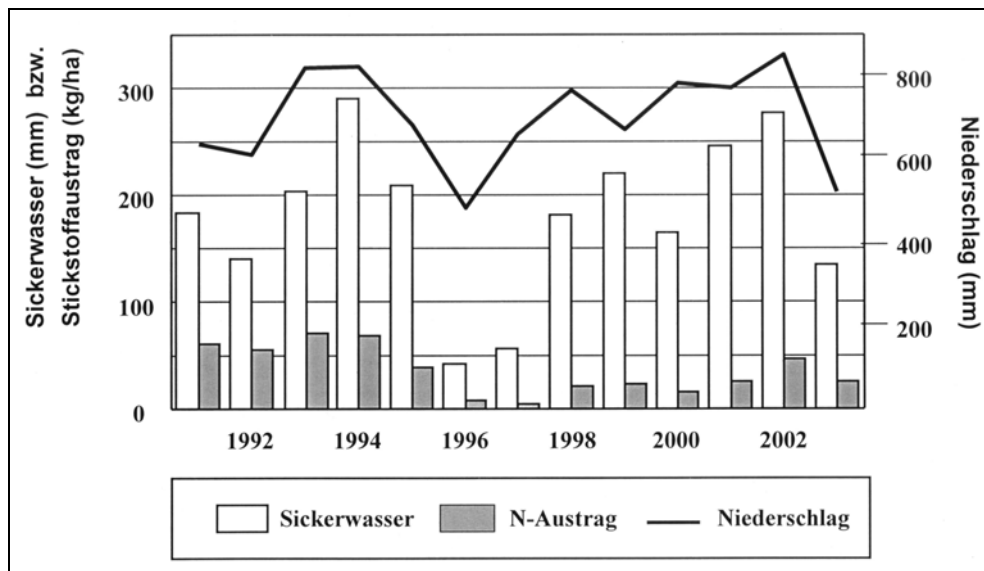
Die Hauptursache für die Belastung der Gewässer mit Nitrat-Stickstoff, der hier im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen soll, stellen N-Bilanzüberschüsse in der Landwirtschaft dar, die pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche überwiegend zwischen 50 bis 100 kg N a<sup>-1</sup> betragen. In ATV-DVWK (2001) wird darauf verwiesen, dass die Bilanzüberschüsse in der Bundesrepublik Deutschland zwar seit 1988 von ca. 130 kg auf 85 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> verringert werden konnten, diese aber noch weit über dem vertretbaren Rahmen von 10 bis 40 kg ha<sup>-1</sup> liegen, wenn man von Sickerwassermengen im Bereich von 100 bis 350 mm a<sup>-1</sup> ausgeht. Demzufolge sind das Erreichen und die nachhaltige Bewahrung guter Gewässerzustände in Bezug auf Stickstoff nur durch Reduzierung der N-Bilanzüberschüsse in der Landwirtschaft möglich. Dies erfordert – wie nachfolgend gezeigt werden soll – einvernehmliche Strategien von Land- und Wasserwirtschaft.

## 2 Schwierigkeiten bei der Stickstoffbedarfsermittlung

Worin liegt das Problem bei der Festlegung aktueller Düngergaben unmittelbar vor und während der Vegetationsperiode? Bei der gegenwärtigen Praxis der Stickstoffbedarfsanalyse (SBA) gehören Frühjahrsanalysen zum mineralischen Stickstoffgehalt  $N_{\min}$  im Boden und die Ertragserwartung zu Beginn der Vegetationsperiode zu den wichtigsten Ausgangsinformationen (Schweder et al. 2004). Diese Herangehensweise ist weitgehend statisch und mit objektiven Schwierigkeiten verbunden, die dem handelnden Landwirt nicht angelastet werden dürfen, da ihm wichtige Informationen über den sehr dynamischen Bodenstickstoffhaushalt während der Vegetationsperiode nicht zur Verfügung stehen. Dazu gehören Angaben zur tatsächlichen Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf und damit einhergehend zur tatsächlichen N-Aufnahme durch die Pflanzen, zu den Stickstoffverlusten sowie zur Stickstoffnachlieferung des Bodens durch Mineralisation. Die N-Aufnahme wird durch die Transpiration der Pflanzen gesteuert. Verluste entstehen hauptsächlich durch Austrag aus der durchwurzelteten Bodenzone mit dem Sickerwasser. Die bodeninternen Umwandlungsprozesse zwischen den einzelnen Stickstoffkompartimenten hängen von der Bodentemperatur und damit indirekt auch von der Bodenfeuchte ab.

Die Ausführungen machen deutlich, dass das Prozessgeschehen des Bodenstickstoffhaushalts (N-Aufnahme durch die Pflanzen, Mineralisation, N-Auswaschung) ganz entscheidend vom Bodenwasserhaushalt (Verdunstung, Bodenfeuchte, Sickerwasserbildung) und damit vom Witterungsgeschehen während der Vegetationsperiode geprägt wird. In Abb. 1 ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen der jährlichen Niederschlagsmenge und dem jährlichen N-Austrag dargestellt. Darüber hinaus kann nachgewiesen werden, dass bei gleichen Jahresmengen des Niederschlags allein Unterschiede der innerjährlichen Niederschlagsverteilung erhebliche Unterschiede bei der N-Auswaschung hervorrufen können. Die  $N_{\min}$ -Beprobung im Frühjahr stellt angesichts dieser witterungsabhängigen Prozessdynamik lediglich eine Momentaufnahme dar.

Zu hohe Düngergaben, die durch die Pflanze nicht aufgenommen werden können, verbleiben nach der Ernte im Boden. Der resultierende Stickstoffüberschuss ist in den nachfolgenden Wintermonaten, welche die jährliche Hauptphase der Grundwasserneubildung darstellen, zwangsläufig auswaschungsgefährdet. Ähnliches gilt auch für Entwicklungsphasen der Pflanze, in denen einzelne Düngergaben den aktuellen N-Bedarf übertreffen und/oder zu früh ausgebracht werden. Treten während solcher Phasen Starkniederschläge auf, sind Auswaschungsverluste und Ertragseinbußen die mögliche Folge. Vermutlich sind es derart negative Erfahrungen, die dazu führen, dass in der landwirtschaftlichen Praxis vielfach mit Sicherheitszuschlägen in Bezug auf die nach SBA empfohlenen Gaben gearbeitet wird. Aufgrund der Unkenntnis über die tatsächlichen Prozessabläufe in der aktuellen Vegetationsperiode wie die bodeninterne N-Nachlieferung durch Mineralisierung ist es mit der gegenwärtig praktizierte Form der Bedarfsermittlung nicht möglich, zur Reduzierung der bestehenden N-Bilanzüberschüsse in ausreichendem Umfang beizutragen.



**Abb. 1** Zusammenhang zwischen jährlicher Niederschlagsmenge und jährlichem N-Austrag

Verbesserungen bei der Festlegung einzelner Düngergaben (Höhe, Aufteilung auf die Einzelgaben und Ausbringungstermine) können nur dann erreicht werden, wenn die dargestellten Abhängigkeiten zwischen Pflanzenentwicklung und Witterungsverlauf Berücksichtigung finden. Geeignete Instrumente stellen in diesem Sinne Simulationswerkzeuge des Bodenstickstoff- und Bodenwasserhaushalts dar, die vor und während der Vegetationsperiode zum Einsatz kommen, um den aktuellen Düngerbedarf zu bestimmen.

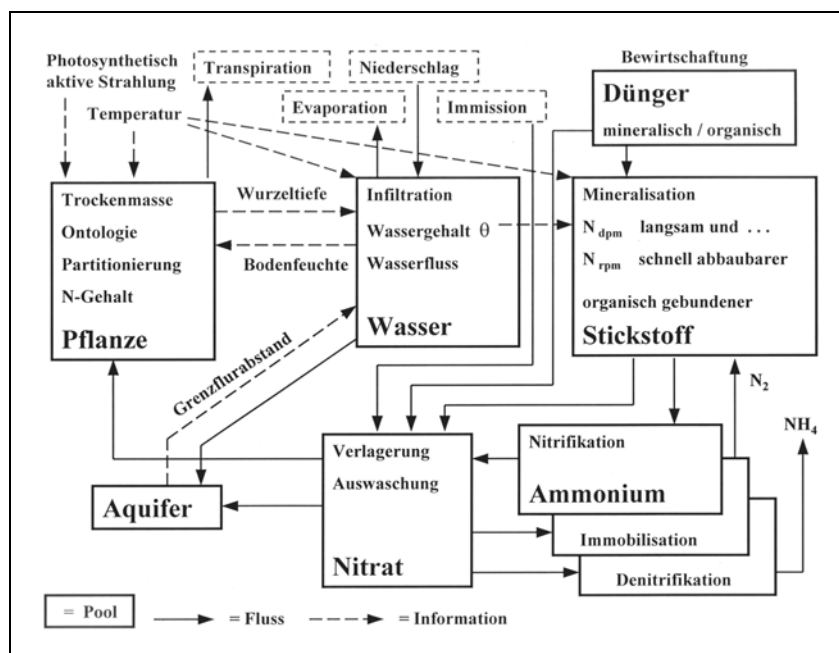
Wenn weiter oben einvernehmliche Konzepte gefordert worden sind, dann folgt daraus für die Ermittlung optimaler Düngergaben: Gemeinsames Ziel von Land- und Wasserwirtschaft muss die optimale Pflanzenentwicklung bei gleichzeitiger Vermeidung von N-Bilanzüberschüssen sein. Optimale Pflanzenentwicklung ist gleichzusetzen mit bestmöglicher Ausnutzung des im Boden vorhandenen mineralischen Stickstoffs  $N_{min}$  und mit hohen Erträgen, der gleichzeitige Abbau von N-Bilanzüberschüssen mit der Minimierung des N-Austrags und damit der Gewässerbelastung. Modellszenarios mit dem in den USA entwickelten Modell LEACHM (Hutson & Wagenet 1992) zeigen, dass Düngergaben, die zur Unterversorgung der Pflanzen führen, nicht nur Mindererträge, sondern im Vergleich zur optimalen Pflanzenversorgung höhere N-Austräge verursachen, obwohl weniger gedüngt wird. Einseitige Restriktionen bei den N-Gaben sind folglich auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht nicht zielführend.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Das Stickstoffhaushaltsmodell MINERVA

Ein modernes, praxisorientiertes Simulationsmodell, das insbesondere im Bundesland Niedersachsen bereits mit Erfolg eingesetzt worden ist, um standort- und betriebsfallbezogen optimale Düngergaben zu ermitteln, ist das vom iBUG (Institut für Boden- und Gewässerschutz Braunschweig) vertriebene Modell MINERVA (Richter et al. 1993). MINERVA erlaubt die Vorhersage des standort- und witterungsspezifischen N-Bedarfs von Pflanzenbeständen durch Simulation von Wasser-, Stickstoffhaushalt und Pflanzenwachstum und damit die Vorausberechnung von Höhe und Zeitpunkt der Düngergaben für verschiedene Wachstumsphasen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der aktuellen Bewirtschaftungsmaßnahmen und des tatsächlichen Witterungsverlaufs.

In Abb. 2 ist die Modellstruktur von MINERVA dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit dem Modell alle wesentlichen Prozesse des Bodenstickstoff- und Bodenwasserhaushalts und ihre Verknüpfungen abgebildet werden. MINERVA basiert auf dem Ansatz von Kersebaum (1989) für geschichtete Böden, der durch Engel et al. (1993) ausführlich beschrieben worden ist.



**Abb. 2** Modellstruktur von MINERVA (verändert nach Beblík 2001)

Der Wasserhaushalt der Bodenschichten wird über einen einfachen Speicheransatz dargestellt. Parameter sind die charakteristischen Wassergehalte beim permanenten Welkepunkt und bei Feldkapazität. Sickerwasserbildung tritt auf, wenn die Feldkapazität überschritten wird. Bei der Bestimmung der potenziellen Verdunstung bildet der Blattflächenindex den Ausgangspunkt, der seinerseits aus der oberirdischen Pflanzentrockenmasse und der entwicklungsabhängigen Blattfläche ermittelt wird. Die Aufteilung der berechneten Transpiration auf die Bodenschichten erfolgt in Abhängigkeit von der Wurzelverteilung und der Bodenfeuchte.

Elemente der Simulation des Bodenstickstoffhaushalts sind die Stickstoffmineralisation, die Nitrifikation, die Immobilisation unter Berücksichtigung der mikrobiellen Biomasse, die Denitrifikation, die Ammonifikation, die Stickstoffimmision und der Nitrattransport. Bei der Mineralisation werden zwei unterschiedlich schnell abbaubare Fraktionen unterschieden, ein stabilerer N-Pool, der die organische Substanz und Wurzelresiduen umfasst, und die schnell abbaubaren N-Verbindungen (u.a. leicht abbaubare Ernterückstände). Dabei kommen kinetische Reaktionsgleichungen 1. Ordnung mit Reaktionskoeffizienten zur Anwendung, die von der Bodentemperatur und Bodenfeuchte abhängen. Die Berechnung des Nitrattransports beruht ausgehend von der Konvektions-Dispersionsgleichung auf einem expliziten Finite-Differenzen-Verfahren.

Die Simulation der Entwicklung der Pflanzentrockenmasse mit dem Teilmodell Pflanze, das auf dem Modell SUCROS (van Keulen et al. 1982) basiert, erfolgt in Abhängigkeit von der photosynthetisch aktiven Strahlung. Es werden sowohl einzelne Pflanzenorgane wie Wurzel, Blatt, Stängel und Speicherorgan als auch wichtige Phasen der Pflanzenentwicklung wie Bestockung, Schossen, Ährenschieben und Reife unterschieden. Die Steuerung dieser Phasen wird über Temperatursummen vorgenommen. In jeder Phase teilt das Modell die neu gebildete Pflanzentrockenmasse auf die einzelnen Pflanzenteile auf. Die N-Aufnahme ist durch N-Konzentrationsfunktionen begrenzt. Sie hängt zudem von der Wasseraufnahme und N-Verfügbarkeit im Boden ab, d.h. sie wird bei Unterschreiten kritischer N-Gehalte und bei Wassermangel gehemmt. Die ermittelte Blattfläche ist für die Strahlungsaufnahme und damit die tägliche Assimilation entscheidend. Weiterhin können berücksichtigt werden: pflanzeninterne Umlagerungen, Absterberaten, Mineralisation absterbender Wurzeln und herunterfallender Blätter.

MINERVA enthält außerdem Bausteine für die Verwaltung von Bewirtschaftungsdaten. Es werden meteorologische Daten sowie Boden- und Bewirtschaftungsparameter verwendet, die routinemäßig verfügbar sind. Bis zum ersten Beratungstermin wird mit realen Wetterdaten simuliert und bei der Ermittlung der ersten genauso wie bei späteren Düngergaben mit standorttypischem Prognosewetter der Folgewochen gearbeitet, welches aus langjährigen Klima-beobachtungen abzuleiten ist. Vor weiteren Beratungsterminen wird das Modell mit aktuellen Wetterdaten nachgeführt, wodurch bei der Prognose von Zeitpunkten des Eintritts von N-Mangel und bei der Ermittlung des N-Bedarfs wie angestrebt das reale Witterungs- und Prozessgeschehen und der aktuelle Status des Bodenstickstoffhaushalts berücksichtigt werden können.

### **3.2 Datenerfassung für die Modellerprobung**

Die Übertragung von Modellen wie MINERVA von Regionen, in denen sie entwickelt und erfolgreich erprobt worden sind, auf andere Gebiete ist aufgrund empirischer Ansätze und Parameter, die zur Anwendung kommen, in der Regel nicht ohne weiteres möglich. So führten erste Versuche, MINERVA in Mecklenburg-Vorpommern einzusetzen, zu vollkommen unbefriedigenden Ergebnissen bei der Simulation von Verdunstung, Sickerwasserbildung und damit auch Stickstoff-Auswaschung. Insbesondere der Verdunstungsansatz und das Pflanzenwachstumsmodell spiegelten die Realität nur ungenügend wider.

Aus diesem Grund wurde am Institut für Umweltingenieurwesen der Universität Rostock in den zurückliegenden 3 Jahren ein Forschungsvorhaben bearbeitet, das auf die Überprüfung von MINERVA bezüglich seiner Anwendbarkeit in M-V und auf die Ableitung regional gültiger Modellparameter zielte. Entsprechend sind methodische Grundlagen erarbeitet worden, um MINERVA in Mecklenburg-Vorpommern flächendeckend in die land- und wasserwirtschaftliche Praxis einführen zu können. Dieses Vorhaben, an dem die Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei M-V und mit A.J. Beplik einer der Modellentwickler selbst als Kooperationspartner mitwirkte, ist dankenswerterweise durch das Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommerns gefördert worden.

Als Grundlage für die Modellerprobung dienten umfassende Daten zum Bodenwasser- und Bodenstickstoffhaushalt sowie zum Witterungsgeschehen, die an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz erfasst worden sind. Des Weiteren wurden Parzellenversuche an 3 Versuchsstationen der Landesforschungsanstalt durchgeführt, an denen besonderer Wert auf Pflanzenuntersuchungen zur Anpassung des Wachstumsmodells und auf den exakten Ertragsvergleich zwischen SBA und Düngung nach Modellprognose mit MINERVA gelegt worden ist. Nicht zuletzt konnten durch die Landesforschungsanstalt fünf landwirtschaftliche Betriebe gewonnen werden, die auf Teilflächen die Düngeempfehlungen durch das Modell MINERVA unter Praxisbedingungen erprobten. Insgesamt wurden durch diese 9 Standorte unterschiedliche Regionalklimata und Bodenverhältnisse Mecklenburg-Vorpommerns berücksichtigt.

Die Lysimeteranlage besteht aus 6 wägbaren Lysimetern mit einer Oberfläche von je  $1 \text{ m}^2$  (Abb. 3), die monolithische Bodenkörper mit 2,1 m Mächtigkeit enthalten und unterirdisch auf Waagen aufgestellt sind (Abb. 4). Die stündliche Erfassung des Niederschlags, der Sickerwassermenge am Auslauf der Lysimetergefäße und der Gewichtsänderung als Maß für die Änderung der Wasserspeicherung erlaubt die Ermittlung stündlicher Verdunstungswerte durch einfache Bilanzierung des Bodenwasserhaushalts.



**Abb. 3** Lysimeteranlage Groß Lüsewitz



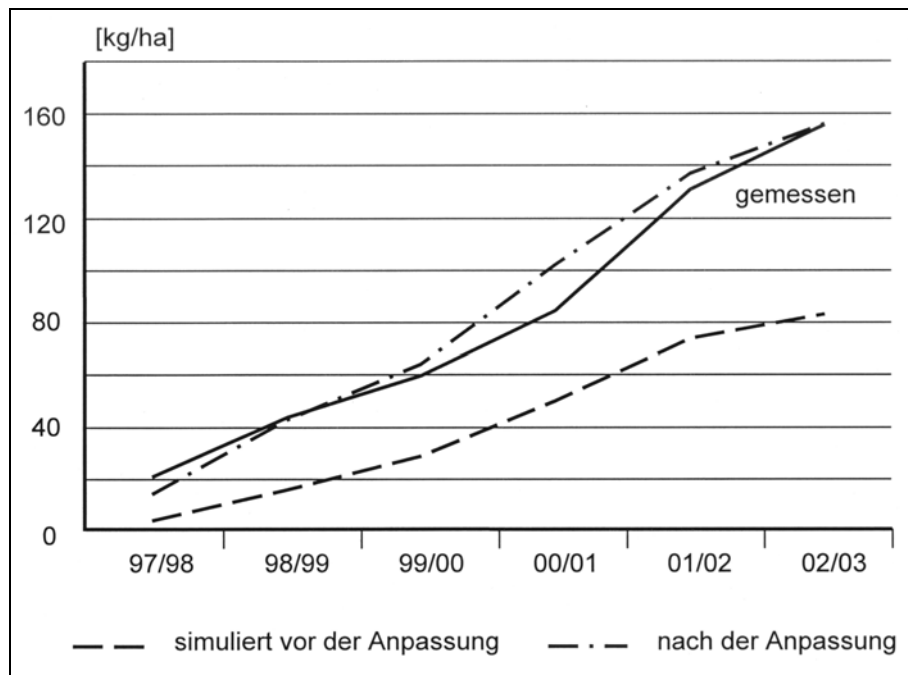
**Abb. 4** Blick auf ein Lysimeter mit Balkenwaage im Keller der Lysimeteranlage

#### 4 Ergebnisse

Nach erfolgreicher Anpassung von MINERVA an die Standortverhältnisse M-V's (Tab. 1 und Abb. 5) wurden im Versuchsjahr 2004 mit dem Modell erfolgversprechende Ergebnisse bei den Fruchtarten Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps und Silomais erzielt. Da nicht an jedem Feldversuchsstandort alle Fruchtarten angebaut worden sind, konnten für die Auswertungen 23 Kombinationen Fruchtart/Versuchsstandort herangezogen werden.

**Tab. 1** Modellergebnisse vor und nach der Anpassung von MINERVA an die Standortverhältnisse in Mecklenburg-Vorpommern

	<b>Mittelwerte 1997 bis 2003 von 6 Lysimetern am Standort Groß Lüsewitz</b>		
	gemessen	simuliert vor der Parameteranpassung	simuliert nach der Parameteranpassung
jährliche Verdunstung in mm	515	421	501
jährliche Versickerung in mm	204	282	208
jährlicher N-Austrag in kg ha <sup>-1</sup>	26	14	26



**Abb. 5** Vergleich von Modellergebnissen vor und nach der Anpassung von MINERVA anhand des kumulativen N-Austrages aus der durchwurzelten Bodenzone

Beeindruckend sind die Einsparungen beim Düngeraufwand, die bei 74 % der Kombinationen zwischen 20 und 55 kg N ha<sup>-1</sup> lagen. Einsparungen unter 20 kg waren in 2 Fällen zu verzeichnen. In 4 Fällen lag die Düngergabe nach MINERVA über der nach SBA. Die durchschnittlichen Ergebnisse sind fruchtartenspezifisch in Tab. 2 zusammengefasst. Zur Verringerung der N-Verluste durch Auswaschung trugen nicht nur die reduzierten Düngergaben bei, ganz entscheidend waren auch die optimierten Ausbringungstermine.

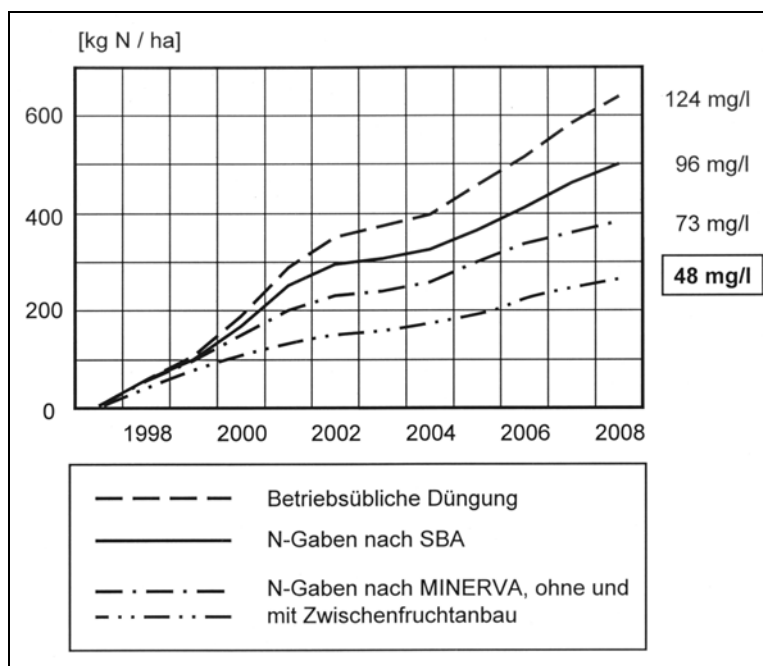
**Tab. 2** Durchschnittliche Ergebnisse der Anwendung von MINERVA zur Ermittlung optimaler Düngergaben im Vergleich zur gegenwärtig praktizierte N-Bedarfsanalyse (SBA)

	Düngeempfehlung [kg N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ] Differenz MINERVA zu SBA	Ertrag [%] MINERVA relativ zu SBA
<b>2004</b>		
Wintergerste	- 20	99
Winterroggen	0	101
Winterweizen	- 40	97
Silomais	- 15	102
Winterraps	- 35	99

Die Erträge bei der Düngung nach MINERVA im Vergleich zu SBA unterschieden sich durchschnittlich nicht. Vereinzelt kam es jedoch beim Winterweizen und Winterraps zu deutlicheren Abweichungen, d.h. in 4 Fällen

ergaben sich Mindererträge und in 3 Fällen Mehrerträge von mehr als 2 % im Vergleich zu SBA. Insgesamt ist jedoch zu beachten, dass unabhängig von der Düngungsvariante, sowohl kleinräumig als auch zwischen den Standorten erhebliche Ertragsunterschiede zu verzeichnen sind, durch welche sich solche Schwankungen wenigstens teilweise erklären lassen. Hauptursache hierfür dürften vor allem Bodenunterschiede sein. Problematisch sind bei der Düngung nach MINERVA lediglich die erzielten Proteingehalte beim Qualitätsweizen, die nicht dem geforderten Standard entsprechen.

Szenariorechnungen mit MINERVA über einen Simulationszeitraum von 12 Jahren zeigen (Abb. 6), dass sich die Effekte unterschiedlicher Düngestrategien bei mehrjährigem Einsatz noch deutlicher auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser auswirken als beim Vergleich von Einzeljahren. So ergab sich bei der betriebsüblichen Düngung eine mittlere Nitratkonzentration im Sickerwasser von  $124 \text{ mg l}^{-1}$ , die den Grenzwert von Trinkwasser ( $50 \text{ mg l}^{-1}$ ) deutlich übertrifft. Bereits die Düngung nach SBA schnitt mit durchschnittlich  $96 \text{ mg l}^{-1}$  wesentlich besser ab. Durch Düngempfehlung nach MINERVA könnte laut Modellaussage die mittlere Nitratbelastung darüber hinaus auf  $73 \text{ mg l}^{-1}$  gesenkt werden. Kombiniert man in dafür geeigneten Jahren die Düngempfehlung nach MINERVA zusätzlich mit Zwischenfruchtanbau, dann erhält man am Standort Groß Lüsewitz mit  $48 \text{ mg l}^{-1}$  insgesamt eine mittlere Nitratbelastung im Sickerwasser, die unter dem oben genannten Grenzwert für Trinkwasser liegt. Winterharte Zwischenfrüchte konservieren gewissermaßen überschüssigen Bodenstickstoff, der nach der Vegetationsperiode im Boden verbleibt.



**Abb. 6** Vergleich des kumulativen N-Austrags bei unterschiedlichen Düngungsstrategien und mittlere Nitratkonzentrationen im Sickerwasser

## 5 Ausblick

Die Untersuchungsergebnisse machen deutlich, dass Modelle wie MINERVA nicht nur für die Kurzfristbewirtschaftung, d.h. für die Festlegung optimaler Düngergaben und Düngezeitpunkte, eingesetzt werden können. Darüber hinaus lassen sich mit solchen Werkzeugen auch Strategien einer ressourcenschonenden Langfristbewirtschaftung entwickeln, die u.a. das Düngungsregime, den Einsatz unterschiedlicher Fruchtarten und die Fruchtfolgegestaltung betreffen. Eine Simulation von Szenarios zur Fruchtfolgegestaltung zeigt z.B., dass durch Elimination der Feldfrüchte Kartoffel und Mais aus der Fruchtfolge die Stickstoffverluste beträchtlich gesenkt werden können (Tab. 3). Beide Fruchtarten erfordern hohe Düngergaben. Bei der flach wurzelnden Kartoffel kommt hinzu, dass diese nicht in der Lage ist, den in tiefere Bodenschichten verlagerten oder dort durch Mineralisierung freigesetzten Stickstoff aufzunehmen, so dass dieser nach der Vegetationsperiode unweigerlich auswaschungsgefährdet ist.

**Tab. 3** Vergleich von zwei verschiedenen Fruchtfolgen durch Modellsimulation mit MINERVA über 8 Jahre (WR = Winterroggen, WRa = Winterraps, WW = Winterweizen, WG = Wintergerste, Ka = Kartoffel, SM = Silomais)

	<b>Fruchtfolge 1</b> <b>Ka-WR-WRa-SM-WW-WR</b>	<b>Fruchtfolge 2</b> <b>WG-WR-WRa-WG-WW-WR</b>
mittlere jährliche Düngermenge [kg ha <sup>-1</sup> ]	160	160
kumulativer N-Austrag [kg ha <sup>-1</sup> ]	368	134
mittlere NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Konzentration im Sickerwasser [mg l <sup>-1</sup> ]	131	44

Beschränkt man die Betrachtungen nicht auf den landwirtschaftlichen Einzelschlag, dann lassen sich im Sinne der WRRL durch den Modelleinsatz auch Bewirtschaftungsempfehlungen für ganze Gewässereinzugsgebiete ableiten. Die Mischung landwirtschaftlicher mit anderen Nutzungen (z.B. Wald) sowie die Wirkung von Retentionseffekten im Untergrund und in Oberflächengewässern führen gebietsbezogen in der Regel zu deutlich geringeren mittleren Einträgen je Hektar und zu geringeren Nitratkonzentrationen, als dies im Sickerwasser von Einzelschlägen der Fall ist. Überschreiten die Stoffeinträge dennoch kritische Grenzwerte, dann muss auf der Grundlage von Modellszenarios im Einzugsgebiet u.a. über Nutzungsänderungen und Nutzungseinschränkungen nachgedacht werden.

Die damit verbundenen Aufgaben und Probleme lassen sich nicht allein durch land- und wasserwirtschaftliches Handeln bewältigen. Sie erfordern darüber hinaus geeignete politische Rahmenbedingungen und Steuerungsinstrumente, die bei resultierenden Interessenskonflikten für einen angemessenen Ausgleich sorgen und Landwirte stärker unterstützen, die sich (z.B. wie dargestellt durch optimalen Düngemiteleinsetz) für eine ressourcen- und umweltschonende Landbewirtschaftung einsetzen.

## Literatur

- ATV-DVWK (2003) Diffuse Stoffeinträge in Gewässer – Landwirtschaft. ATV-DVWK-Information, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 19 p
- Beblik AJ (2001) Technische Dokumentation des Stickstoffhaushaltsmodells MINERVA sowie seiner funktionalen Erweiterung zum mesoskaligen Einzugsgebietsmodell MesoM. iBUG Braunschweig / BTU Cottbus, 157 p
- [http://www.hydrologie.tu-cottbus.de/deutsch/projekte\\_d/meson/mine\\_ori.htm#MINERVA](http://www.hydrologie.tu-cottbus.de/deutsch/projekte_d/meson/mine_ori.htm#MINERVA)
- Behrendt H, Huber P, Kornmilch M, Opitz D, Schmoll O, Scholz G, Uebe R (1999) Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. UBA-Texte 75/99
- DüVO (1997) Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen (DüVO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. Juli 1997 (BGBl. I S. 1835)
- Engel Th, Klöcking B, Priesack E, Schaaf Th (1993) Simulationsmodelle zur Stickstoffdynamik. Agrar-informatik 25, E. Ulmer-Verlag
- Hutson JI, Wagenet RJ (1992) Leaching Estimation and Chemistry Model (LEACHM), a process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Dept. of Agronomy, Cornell University, Ithaca, N.Y.; Continuum Vol. 2, New York State Water Resources, Inst., Cornell Univ., Ithaca / New York
- Kersebaum KCh (1989) Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden. Dissertation, Universität Hannover
- Mehl D (2003) Schadstoffuntersuchungen Nitrat im Einzugsgebiet der Beke. Endbericht im Auftrag des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur Rostock, 60 p
- Pagenkopf WG (2001) Aktuelle Nährstoffbilanzierung für Teilgebiete der Warnow. Unveröffentlichte Studie im Auftrag der biota Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH, Bützow, 56 p
- Richter GA, Beblík AJ, Kersebaum KC (1993): Modellierung des Nitrataustrags – Beratungsinstrument für den GW-Schutz in Niedersachsen. Mittlg. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 68: 115-118
- Schweder P, Kape H-E, Boelcke B (2004) Düngung – Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis, Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.), 228 p
- <http://www.mv-regierung.de/lm/doku/duengebroschuere.pdf>
- van Keulen H, Penning de Vries FWT, Drees EM (1982) A summary model for crop growth. – In: Penning de Vries and van Laar (eds.) Simulation of plant growth and crop production, 87-97
- WRRL (2000) Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt der EG Nr. L 327/1 vom 22.12.2000

## Autoren:

Prof. Dr. Konrad Miegel  
Dipl.-Math. Birgit Zachow

Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Institut für Umweltingenieurwesen  
Universitätsplatz 1  
D-18051 Rostock

Email: [konrad.miegel@uni-rostock.de](mailto:konrad.miegel@uni-rostock.de)  
[birgit.zachow@uni-rostock.de](mailto:birgit.zachow@uni-rostock.de)