

Stoffverlagerung und Stoffumsatz in einem Wassereinzugsgebiet der Unstrut

S. KNOBLAUCH

Abstract

In a water catchment area of the river unstrut the leaching potential of two different soils were investigated to give recommendations to minimize emissions of nutrients and organic compounds into surface and ground water. The nitrogen leaching risk of the alluvial soil (fluventic eutrochrept) was small because of the optimal water supply from groundwater and the low percolating rate. There are no cause to change the arable land into grasland. But slurry or non-agricultural wastes should not be applied because of the danger of preferential flow of organic compounds. The main N-input into the river caused from vertisols. The reasons therefore are preferential flow about cracks and small amount of plant available water. Water management concepts have to specially developed for these soil group.

1. Zielstellung

Die Unstrut ist mit einem Gesamteinzugsgebiet von 6.367 km² das zentrale Fließgewässer des Thüringer Beckens. Die flachen Auenniederungen dehnen sich aufgrund der Muldenstruktur des Thüringer Beckens bis zu mehreren Kilometern weit aus. Durch Deiche vom Gewässer abgekoppelt und mit Entwässerungssystemen versehen gehören die Auen zu den ertragsstärksten Ackerstandorten. Kapillarer Aufstieg erhöht das Wasserbereitstellungsvermögen, so dass dort auch in Trockenjahren eine rentable Biomasseproduktion möglich ist. Aufgrund der kurzen Fließstrecke bis zum Grundwasser liegt aber die Vermutung nahe, dass Auenstandorte besonders auswaschungsgefährdet sind.

Am Beispiel eines für die Unstrut typischen Wassereinzugsgebietes, wird über die N-Verlagerung und den N-Umsatz im Übergangsbereich ungesättigte Zone/ Grundwasser einer Gley-Vega berichtet. Da Auenniederungen auch aus ihren

Speisungsgebieten mit Nähr- und Schadstoffen befrachtet werden und davon auszugehen ist, dass von dort auch eine direkte Einflussnahme auf das Fließgewässer ausgeht, wurde stellvertretend für das Speisungsgebiet eine flachgründige Tonmergelrendzina in die Untersuchungen einbezogen.

2. Untersuchungsgebiet, Bodeneigenschaften, Bewirtschaftung und Untersuchungsmethoden

Die langjährige Niederschlagssumme beträgt 500 mm, das langjährige Temperaturmittel 8,2°C.

In der Auenniederung haben sich aus fluviatilen Holozänsedimenten Lehm-Vega und Ton-Schwarzgley in verschiedenen Übergangsformen ausgebildet. Die Vegen sind in unmittelbarer Nähe des Flusses verbreitet. Das Areal der aus schluffig-tonigem Substrat hervorgegangenen Gleye schließt sich daran an und wird in südlicher und nordwestlicher Richtung vom Speisungsgebiet umgeben. Unter den schluffig-tonigen Auelehmddecken lagert eine „Riethserie“ aus 2,5 bis 4,5 m mächtigen Torfen/Torfmudden und 2-5 m mächtigen Schluff-/Tonlagen. Darunter folgen geringmächtige pleistozäne Kiese, die jedoch nicht über die gesamte Aue verbreitet sind. Die Basis der Auensedimente bilden bis zu 160 m mächtige Schichten des unteren Keupers.

Ausgangssubstrate der Böden im Speisungsgebiet sind Tonmergel des unteren Keupers und quartäre Lockersedimente, wie Löß und Schotterablagerungen. Neben tiefgründigen Tschernosemen aus Löß und Keuper finden sich Parabraunerden aus Löß, geringmächtige Mergelrendzinen und Pelosole. Ausgewählte Bodeneigenschaften der Untersuchungsstandorte enthält *Tabelle 1*.

Das Untersuchungsgebiet wird fast ausnahmslos ackerbaulich genutzt. Angaben zur Ackerbewirtschaftung der Untersuchungsstandorte zeigt *Tabelle 2*.

Für die Ermittlung der Stoffverlagerung dienten Lysimetermessungen (monolithisch befüllt, A = 2 m², t = 1,3 - 2,5 m) und Modellberechnungen. Die Lysimeter in der Auenniederung sind am unteren Ende mit einem Ventil versehen, dass sich bei aufwärts gerichteten Strömungsverhältnissen öffnet, um den kapillaren Nachschub aus dem Grundwasser sicher zu stellen. Nach Umkehr in einen abwärts gerichteten Wasserfluss schließt das Ventil wieder, damit die Abflussmenge näherungsweise bestimmt werden kann (KNOBLAUCH und ROTH 2000).

In verschiedene Tiefen im ebenso wie die Lysimeter bewirtschafteten Feld eingebaute Saugsonden sollten in der Auenniederung Auskunft über den Vertikalgradienten der Sicker-/Grundwasserbeschaffenheit geben. Begleitende Untersuchungen erstreckten sich auf die Mes-

Tabelle 1: Ausgewählte Bodenkennwerte der Untersuchungsstandorte

	Auenniederung Vega	Speisungsgebiet Tonmergelrendzina
Horizont/ Tiefe (cm)	Ap 0-30, M -53, M-Go -70, Go -90, Go r-140, G(o)r -175, Gr -210	Ap -23, Ah-Cc -34, Cc -73, Cn -120
Körnungsart	Ap/M: Ut4, Tu4, -Gr: Tu3	Ap: Tu2, Ah-Cc: Lt3, Cn: St3
Grob-PV (Vol.-%)	Ap: 22, M-G(o)r: 9 bis 11	Ap: 18, Ah-Cc...Cn: 8
k _v (vertikal) (m/d)	Ap: 0,22; M-Go, 0,04; 1>Gor: 0,01 nFK _{we} pF 2,0 (mm)	Ap: 0,06; Ah-Cc: 0,12; Cc/Cn: 0,01 179 50
C _i (%)	Ap: 1,3; M/M-Go: 0,8; Go/Gor: 1,1; Gr: 0,9	Ap: 2,0; Ah-Cc: 1,3; Cc/Cn: 0,2

Autor: Dr. Susanne KNOBLAUCH, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Naumburger Straße 98, D-07743 JENA

Tabelle 2: Fruchtfolge, N-Düngung und N-Salden der Untersuchungsstandorte

Standort Untersuchungszeitraum	Auenniederung Gley-Vega1997-99	Speisungsgebiet Tonmergelrendzina 1997-99
Fruchtfolge	W.-Weizen, A.-Bohne, S.-Weizen	W.-Weizen, S.-Gerste, W.-Raps
N-Düngung (kg/ha*a)	171 ¹⁾	162
N-Saldo (kg/ha*a)	-1	+43

¹⁾ incl. 258 kg/ha Leguminosen-N durch Ackerbohne im Jahr 1998

sung der Bodenfeuchte und der Grundwasserdynamik sowie die Ermittlung der Bodeneigenschaften, Erträge und Nährstoffsalden. Mit dem nach dem Potentialkonzept arbeitenden Wassertransportmodell HYDRUS (SIMUNEK und VAN GENUCHTEN 1999) wurde der Bodenwasserfluss und damit auch die Abflussmenge aus der ungesättigten Zone berechnet. Die dafür notwendige PET lieferte das an der Lysimeterstation Großbröningen getestete kapazitive Wasserhaushaltsmodell VERD (KOITZSCH und GÜNTHER 1990).

3. Ergebnisse

3.1. Wasserfluss, N-Verlagerung und N-Umsatz in der ungesättigten/gesättigten Zone der Vega in der Auenniederung

Das Grundwasser zeigte im dreijährigen Untersuchungszeitraum eine Schwankungsbreite von 71 bis 167 cm uGOK (Abbildung 1).

Tiefwurzeln Fruchtsorten fanden damit für eine optimale Biomassebildung ein nahezu uneingeschränktes Angebot aus Boden- und Grundwasser vor. Im Jahr 1997 blieb nach Aberntung des Winterweizens ein Bodenfeuchtedefizit von 133 mm zurück. Aus der Wasserbilanz Niederschlag minus Verdunstung standen im geringfügig zu trockenen Win-

terhalbjahr nur 94 mm für die Wiederauffüllung des Bodenfeuchtedefizites zur Verfügung. Das Modell HYDRUS berechnet für den Zeitraum August 1997 bis März 1998 einen kapillaren Aufstieg von 109 mm in die ungesättigte Zone. Obwohl bei Gegenüberstellung der In- und Outputgrößen der Wasserbilanz (Niederschlag, Verdunstung, kapillarer Aufstieg) die Feldkapazität in der ungesättigten Zone weit überschritten sein müsste, kommt es laut Berechnungen des Modells nicht zu einem Abfluss. Abbildung 2 zeigt dies an einem durchgängig aufwärts gerichteten Wasserfluss an der Grenzfläche zwischen Grundwasser und ungesättigter Zone. Das Modell geht offenbar davon aus, dass das Bodenwasserpotential ($-\Psi_m$) auch nach Erreichen eines Bodenwassergehaltes über Feldkapazität noch so klein ist, dass das Grundwasser bestrebt ist, kapillar in die ungesättigte Bodenzone aufzusteigen. Die Sickerwasserbildung beginnt erst bei einem Bodenwassergehalt weit über Feldkapazität. Auch im darauffolgenden Jahr 1998/99 mit einem überdurchschnittlichen Niederschlagsaufkommen zeigt sich, dass kapillarer Aufstieg zwar zum Abbau des Bodenfeuchtedefizites beiträgt, aber keinesfalls um den gleichen Betrag die Abflussmenge erhöht. Einem Bodenfeuchtedefizit von -106 mm stehen die Wasserbilanz aus Niederschlag und Verdunstung von +218 mm, der kapillare Aufstieg von +97 mm und der Abfluss von -88 mm gegenüber. Das mit 116 %

des langjährigen Niederschlages leicht über der Norm liegende Jahr 1999/2000 nimmt mit einem berechneten Abfluss von 34 mm eine Mittelstellung ein.

Der Verlauf der Nitratgehalte im oberflächennahen Grundwasser in 1,9 m Tiefe über den gesamten Untersuchungszeitraum bestätigt, dass es im ersten Untersuchungsjahr 1997/98 tatsächlich zu keinem bedeutsamen Abfluss gekommen sein muss (Abbildung 2). Im Winterhalbjahr 1997/98 war das Grundwasser in dieser Tiefe nahezu nitratfrei. Erst ab Anfang November des Folgejahres 1998/99 zeigte sich übereinstimmend mit den Abflussberechnungen ein deutlicher Anstieg der Nitratwerte. Auch im dritten Jahr 1999/2000 bestätigte die leichte Zunahme der Nitratgehalte den berechneten abwärtsgerichteten Wasserfluss (Abbildung 2). Der trotzdem im Jahr 1997/98 registrierte Anstieg des Grundwassers von 167 auf 135 cm u GOK (Abbildung 1) ist als eine Reaktion auf die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Aue zu werten. In gewissem Umfang könnte auch voraus-eilender Fluss über Makroporen daran beteiligt gewesen sein.

Der Einfluss landwirtschaftlicher Bodennutzung auf die Beschaffenheit des Grundwassers zeigt sich in der Aue an der Sickerwasserqualität im Übergangsbereich von der ungesättigten Zone zum Grundwasser. Im Jahr 1997/1998 gab es keinen Abfluss und damit auch keinen N-Austrag in das Grundwasser, die Schnittstelle zwischen auf- und abwärtsgerichtetem Fluss lag nach den Berechnungen nicht tiefer als 20-30 cm unter GOK. Im Jahr 1998 wies das in 90 cm Tiefe in das Grundwasser übertretende Sickerwasser im Mittel der Abflussperiode 58 mg/l auf (Abbildung 3). Der N-Austrag belief sich bei einer Abflussmenge von 88 mm auf 11,5 kg/ha. Im Folgejahr 1999/2000 enthielt das Sickerwasser im Übergangsbereich zum Grundwasser nur 16 mg/l Nitrat und wurden 1,2 kg/ha aus der ungesättigten Zone in das Grundwasser ausgewaschen. Die höheren Nitratwerte im Jahr 1998 sind im Zusammenhang mit der Mineralisierung der durch Leguminosen akkumulierten leicht abbaubaren organischen Substanz zu sehen. Die geringen Nitratwerte 1999 spiegeln die Auswirkung einer empfehlungskonformen N-Düngung,

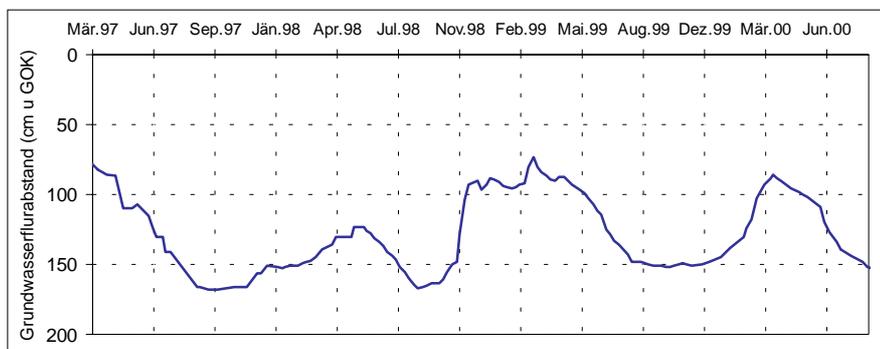


Abbildung 1: Verlauf des Grundwasserflurabstandes während des Untersuchungszeitraumes

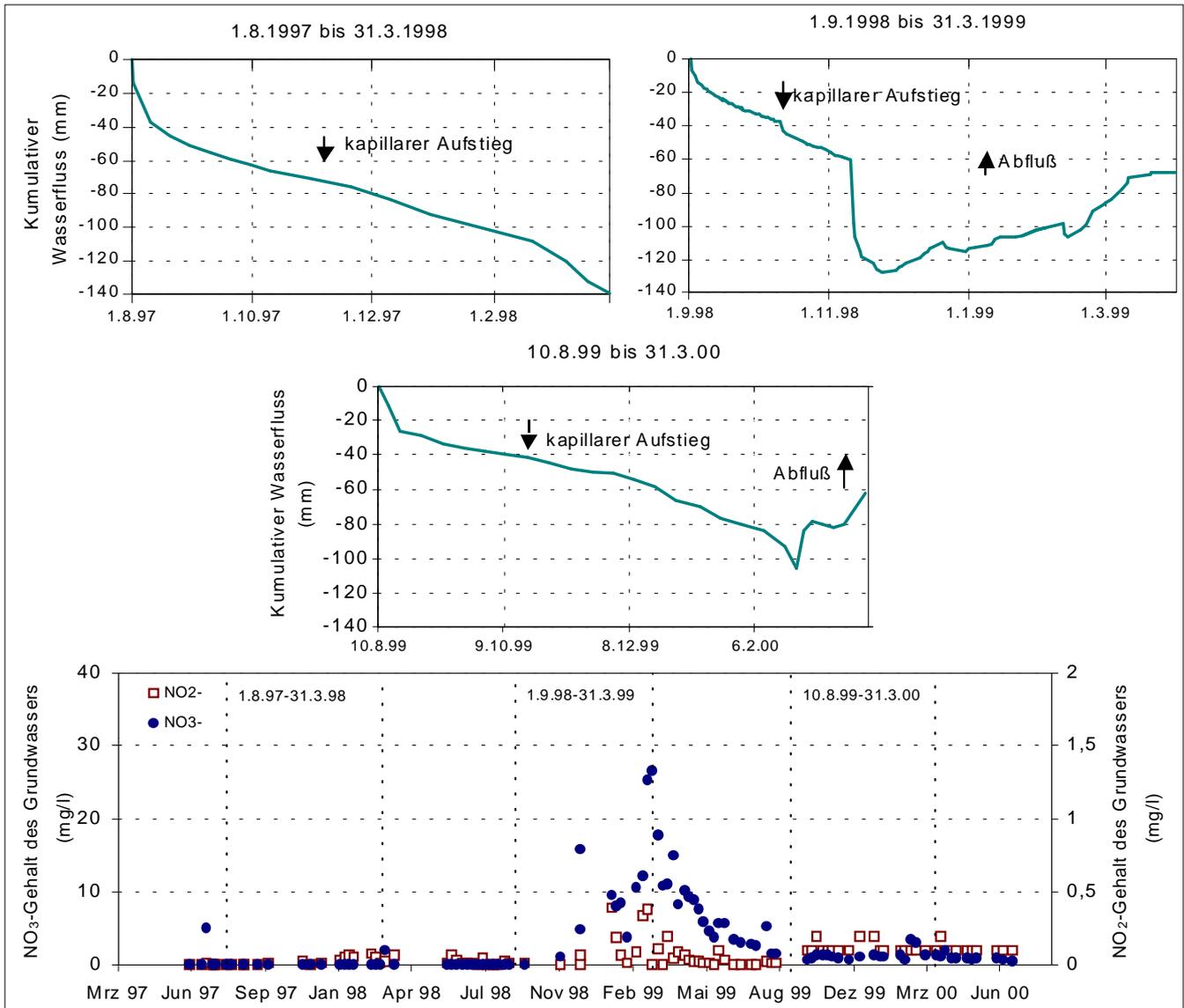


Abbildung 2: Kumulativer Wasserfluss im Übergangsbereich ungesättigte Zone/Grundwasser für die Perioden „Aberntung der Hauptfrucht bis Ende März“ sowie Nitrat- und Nitritgehalte des Grundwassers in 1,9 m Tiefe während des Untersuchungszeitraumes 1997-2000

die sich in Form eines negativen N-Saldos von -77 kg/ha äußerte, wider.

Aus dem in *Abbildung 3* dargestellten Vertikalgradienten der Nitrat- und Nitritgehalte im Boden- und Grundwasser lässt sich bezüglich der N-Verlagerung und des N-Umsatzes folgende Tendenz ableiten:

- Kommt es zu einem Abfluss aus der ungesättigten Zone, gelangt Nitrat in geringer zeitlicher Verzögerung bis in das 2 m tiefe Grundwasser. Daran zeigt sich die Wirksamkeit präferentieller Fließbahnen für die Stoffverlagerung sowohl in der ungesättigten Zone als auch im oberflächennahen Grundwasser.
- Die Absolutwerte der Nitratgehalte gehen mit zunehmender Tiefe signifikant zurück. Diese Tendenz ist als Ergebnis einer Verdünnung durch nahezu nitratfreies Grundwasser zu werten.
- Unmittelbar nach Ankunft des Nitrates in 2 m Tiefe beginnt die heterotrophe Denitrifikation einzusetzen, sichtbar an einem Anstieg der Nitritgehalte. Die dafür notwendige leicht abbaubare organische Substanz stand mit DOC-Gehalten von 10-13 mg/l ausreichend zur Verfügung. Im Übergangsbereich ungesättigte Zone/Grundwasser läuft dieser Prozess erst im Frühjahr ab, nachdem die Temperaturen 5 °C wieder übersteigen (KNOBLAUCH und ROTH 2000). In 2 m Tiefe sorgt offenbar auch der mit dem Grundwasser aufwärts gerichtete Wärmestrom für dauerhaft ausreichende Temperaturen.
- Das oberflächennahe Grundwasser ist bei aufwärts gerichteten Strömungsverhältnissen, d. h. außerhalb der Abflussperioden nahezu nitratfrei. Eine N-Befruchtung der ungesättigten Zone aus dem Grundwasser der Aue findet so gut wie nicht statt.

3.2 N-Austrag aus der Tonmergelrendzina im Speisungsgebiet

Die Abflussmenge betrug im dreijährigen Mittel 61 mm/a. Das in 1,3 m Tiefe unter der Wurzelzone entnommene Sickerwasser enthielt im Mittel der Jahre

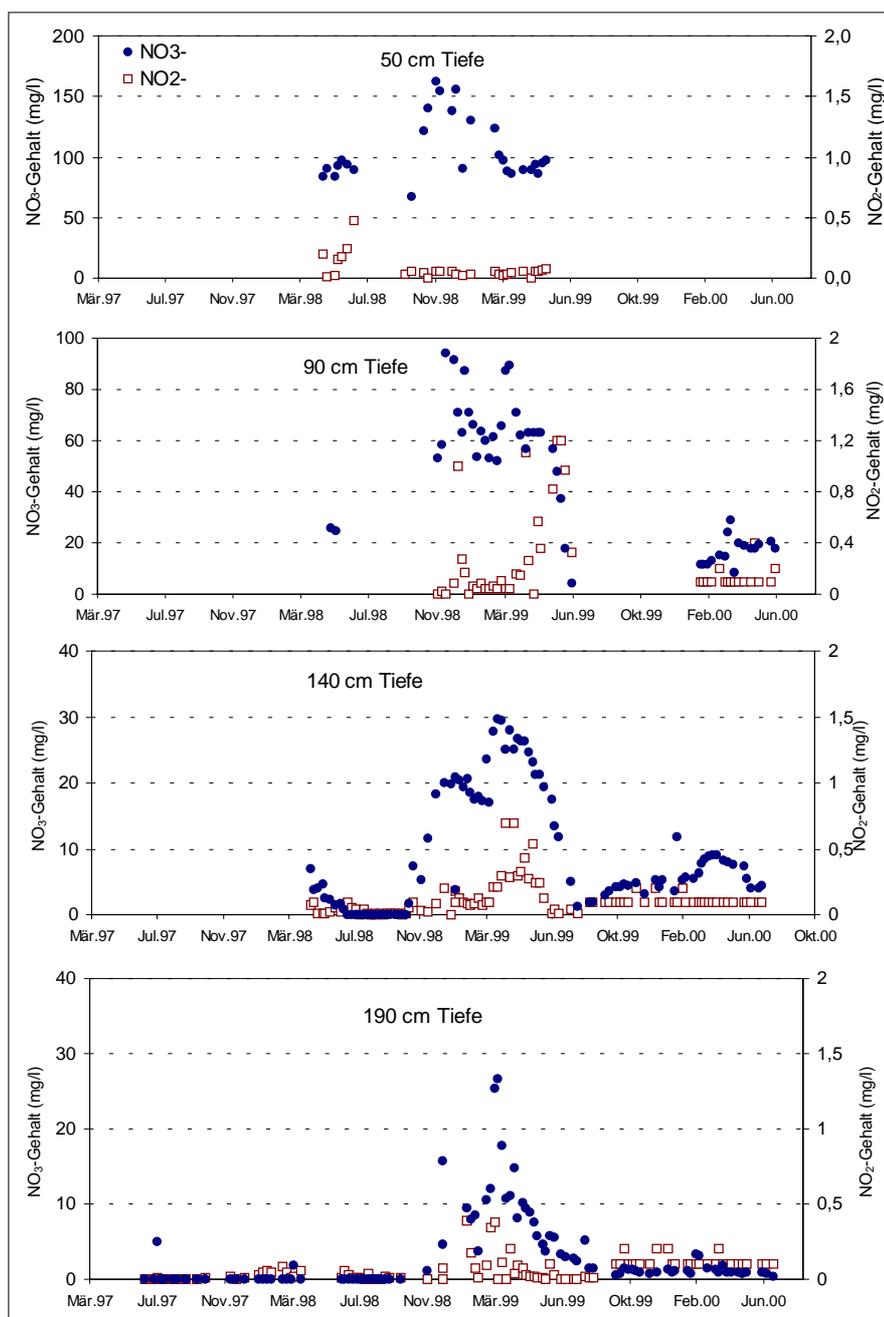


Abbildung 3: Verlauf der Nitrat- und Nitritgehalte im Boden- und Grundwasser einer Gley-Vega mit Ackernutzung

258 mg/l Nitrat. Die Jahresmittel schwankten zwischen 151 und 322 mg/l. Der N-Austrag belief sich auf durchschnittlich 36 kg/ha*a.

Ursachen für die hohen Nitratgehalte sind in einer nicht ordnungsgemäßen Bewirtschaftung, aber auch im standörtlichen N-Verlagerungsrisiko zu suchen. So hätte der dreijährige N-Saldo von +43 kg/ha bei empfehlungskonformer N-Düngung niedriger ausfallen müssen (an Stelle von 174 kg/ha 65 kg/ha N-Düngung im Mittel der drei Untersuchungsjahre). Das standörtliche Verlage-

risiko liegt im geringen pflanzenverfügbaren Bodenwasserdargebot und den in der stark tonhaltigen Matrix ausgebildeten Schrumpfrissen und Tonsteinzwischenräumen begründet.

Wegen ersterem ist die Einhaltung niedriger N-Überschusssalden erschwert, weil der erwartete Ertrag bei Auftreten von Vorsommertrockenheit häufig nicht gebildet wird. Letzteres ist für die schnelle Ableitung von nitratangereichertem Bodenwasser aus der Ackerkrume unter die Wurzelzone verantwortlich.

Eine Nmin-Tiefenbohrung erbrachte bis in 5 m Tiefe Nitrat-Anreicherungen von bis zu 7 kg/ha $\text{NO}_3\text{-N}$ je 10 cm-Bodenzone. Die NH_4 -Gehalte lagen durchwegs auf niedrigem Niveau. Die Ansprache der Bohrstockprobe ließ im Unterboden einen unregelmäßigen Wechsel von dicht bis locker verpackten, meist aber sehr trockenen Tonsteinlagen mit sandig-grusigem Quarzersatz erkennen. Dieser lagenweise Substratwechsel könnte ein Indiz dafür sein, dass Nitrat über vorseilende gesättigte Teilvolumenflüsse (funnel oder fingering flow: KNOBLAUCH 1996) durch den ungesättigten Unterboden geleitet worden ist. Für eine mikrobielle Nitratreduktion sind die Bodenwasserhältnisse in den Tonsteinlagen des unteren Keupers mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht anaerob genug.

4. Diskussion der Ergebnisse

Im untersuchten Wassereinzugsgebiet entwässert der mit Verkarstungen durchsetzte untere Keuper im südlichen Teil des Speisungsgebietes über Bäche direkt in die Unstrut (SOMMER 2000). Das im westlichen und nordwestlichen Teil des Speisungsgebietes gebildete Grundwasser gelangt über einen engen hydraulischen Kontakt mit dem Keuper-Grundwasser im Liegenden der Aue in die quartären Decksedimente der Aue. Beim aufwärts gerichteten Durchströmen der mehrere Meter mächtigen Ton- und Torfmudden wird das aus dem Speisungsgebiet herangeführte Nitrat vollständig abgebaut (SOMMER 2000). Abgesehen von lokal begrenzten Arealen, wo pleistozäne Kiese und Sande zwischen Keuperbasis und „Riethserie“ lagern, gibt es keinen direkten hydraulischen Kontakt der Auenniederung mit der Unstrut, wodurch über eine hohe Verweilzeit der Ablauf der Denitrifikation begünstigt wird (SOMMER 2000). Nur über Entwässerungssysteme gelangt ein Teil des oberflächennahen Grundwassers aus der Aue in das Fließgewässer.

Die Ergebnisse zum N-Verlagerungspotential der Böden zeigen im Zusammenhang mit der Grundwasserdynamik, dass die Hauptbelastung der Fließgewässer mit Stickstoff nicht aus der ackerbewirtschafteten Auenniederung sondern aus dem Speisungsgebiet kommt. Die aus

mineralischen Auensedimenten hervorgegangenen Gley-Vegen sind aufgrund der optimalen pflanzlichen Wasserversorgung und der niedrigen Abflussbildung nur gering verlagerungsgefährdet. Kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser ermöglicht über stabile Erträge und N-Entzüge niedrige N-Überschussalden, die eine wesentliche Voraussetzung für geringe Rest-Nmin-Gehalte im Boden vor Winter darstellen. Aufgrund der niedrigen Abflussmenge ist davon aber nur ein geringer Teil auswaschungsgefährdet. Nach Ankunft des Nitrates im Grundwasser kommt es bei ausreichenden Temperaturen über heterotrophe Denitrifikation zu einem raschen Abbau. Dafür ist aber mit einem Anstieg gasförmiger N-Verluste in die Atmosphäre zu rechnen. Für eine Nutzungsumwidmung von Acker in Grünland oder eine Reduzierung der N-Düngung besteht aus gewässerverträglicher Sicht kein Anlass. Die Ausbringung von Gülle und organischen Reststoffen (Mikroorganismen, organische Schadstoffe) sollte aber aufgrund der nachgewiesenen Neigung zur präferentiellen Stoffverlagerung vermieden werden.

Im Speisungsgebiet sind insbesondere die flachgründigen Pelosole, Mergelrendzinen und Parabraunerden auswaschungsgefährdet, während die tiefgründigen Tschernoseme aus Löß wesentlich günstiger zu beurteilen sind. Auf den Tonmergelrendzinen wird der erwartete Ertrag aufgrund des geringen pflanzenverfügbaren Bodenwasserdargebotes häufig nicht erreicht. Daraus resultieren besonders in Trockenjahren trotz empfehlungskonformer N-Düngung N-Überschussalden. Das in der stark tonhaltigen Matrix ausgebildete Schrumpfrissnetz begünstigt die präferentielle Nitratverlagerung aus der Ackerkrume in den Unterboden. Auf diesen Böden ist besondere Sorgfalt auf die Durchführung ordnungsgemäßer Bewirtschaftung zu legen. Die 1. N-Gabe zu Wintergetreide und -raps könnte gesplittet werden, wobei die 1a-Gabe im Vergleich zur 1b-Gabe

niedriger ausfallen sollte, um präferentielle Nitratverlagerung im Frühjahr bei noch feuchter Bodenmatrix klein zu halten. Gülle sollte ab Ende August nicht mehr ausgebracht werden. Winterbrache ist durch Anbau von Zwischenfrüchten zu vermeiden. Der Umbruch muss aber noch im Spätherbst erfolgen, weil auf diesen Tonböden nach Pflugeinsatz im Frühjahr kein optimales Saatbett mehr hergerichtet werden kann. Mais könnte in Engreihentechnik angebaut werden, da über eine optimalere Abstimmung der Pflanzen- und Düngerverteilung eine bessere Ausnutzung des mineralischen Stickstoffs erreichbar ist. Für die ebenso im Speisungsgebiet verbreiteten tiefgründigen Braunerde-Tschernoseme aus Löß gibt es dagegen keinen Grund, die Bewirtschaftung einzuschränken. Aufgrund der geringen Sickerwasserrate von durchschnittlich 11 mm und des hohen Wasserhaltevermögens wird jährlich nur ein sehr geringer Anteil des Bodenwassers aus der Wurzelzone verdrängt (KNOBLAUCH et al. 1996). Empfehlungskonforme N-Düngung vorausgesetzt, besteht dadurch die Möglichkeit, N-Überschüsse durch pflanzlichen N-Entzug noch aushagern zu lassen und damit die N-Verlagerung zu minimieren. Gleichzeitig erlaubt das hohe pflanzenverfügbare Wasserdargebot über die Erzielung hoher Erträge niedrige N-Überschussalden, so dass es gar nicht erst zur N-Akkumulation im Boden kommen muss.

5. Zusammenfassung

In einem Wassereinzugsgebiet der Unstrut wurde das Verlagerungspotential zweier repräsentativer Böden untersucht, um daraus Schlussfolgerungen für eine gewässerverträgliche Landwirtschaft abzuleiten.

- Auf den grundwassernahen Gley-Vegen in der Auenniederung der Unstrut im Thüringer Becken ist der N-Austrag bei ordnungsgemäßer ackerbaulicher Nutzung gering. Dafür verantwortlich sind die optimale pflanzliche

Wasserversorgung und die geringe Abflussbildung. Für eine Nutzungsumwidmung von Acker- in Grünland besteht aus gewässerverträglicher Sicht kein Grund. Die Ausbringung von Gülle und organischen Reststoffen ist allerdings wegen der Gefahr einer präferentiellen Verlagerung von organischen Schadstoffen zu vermeiden.

- Die Hauptbelastung der Gewässer mit Stickstoff kommt aus dem Speisungsgebiet. Das betrifft insbesondere die flachgründigen Tonmergelrendzinen. Als Ursachen sind das geringe pflanzenverfügbare Wasserdargebot und die präferentielle Nitratverlagerung über das in der stark tonhaltigen Bodenmatrix ausgebildete Schrumpfrissnetz zu sehen. Gewässerverträgliche Bewirtschaftungskonzepte müssen deshalb vor allem für diese Böden entwickelt werden.

Literatur

- KNOBLAUCH, S., D. ROTH und R. GÜNTHER, 1996: N-Austrag aus einer tiefgründigen Braunerde-Schwarzerde (Löß) im Thüringer Becken. In: BAL-Bericht der 6. Lysimetertagung in Gumpenstein, S. 19-22
- KNOBLAUCH, S., 1996: Wasser- und Stofftransport über präferentielle Fließbahnen in Böden - eine Literaturübersicht. In: Zeitschrift für Wasserwirtschaft, 11, S. 598-602
- KNOBLAUCH, S. und D. ROTH, 2000: Sickerwasserqualität und Stoffaustrag aus landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Auenniederung und im Wasserspeisungsgebiet. Abschlussbericht des Teilprojektes 2 des F/E-Vorhabens „Unstrut-revitalisierung“, 116 S.
- KOITZSCH, R. und R. GÜNTHER, 1990: Modell zur ganzjährigen Simulation der Verdunstung und Bodenfeuchte landwirtschaftlicher Nutzflächen mit und ohne Bewuchs. In: Arch. Acker- und Pflanzenbau u. Bodenkde, 12, S. 803-810
- SIMUNEK, J., M. SEJNA und M.Th. VAN GENUCHTEN, 1999: The HYDRUS-2D software package for simulating the two dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, Version 2, U.S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service U.S. Department of Agriculture Riverside, California
- SOMMER, T., 2000: Auswirkungen anthropogener Überprägungen von Flusssauen auf deren Grundwasserdynamik und -beschaffenheit am Beispiel der Unstrutau (Thüringen) Diss.A, Jena, im Druck

