



Schlussbericht GLOWA-ELBE 9511/203019

TLL 2

Untersuchungen über die Nähr- und Schadstoffverlagerung aus unterschiedlich bewirtschafteten Böden in einem Flusseinzugsgebiet der Unstrut

Kurztitel: Bodenwasser

Einzelantrag der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zum SP „Unstrut“ im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „GLOWA-ELBE“
Teilleistung (TLL 2 „Bodenwasser“)

Bearbeiter: Dr. S. Knoblauch

I.1 Aufgabenstellung

Gegenstand des TP Unstrut sind Untersuchungen zur Auswirkung globaler Veränderungen des Klimas und agrarpolitischer Rahmenbedingungen auf den Agrarsektor und den Wasser- und Stoffhaushalt im agrarisch intensiv genutzten Einzugsgebiet der Unstrut im mitteldeutschen Trockengebiet. Ein wesentlicher methodischer Ansatz für die Abbildung der Veränderungen der Gewässergüte, der Stofffrachten und des Wasserdargebotes sind gebietsbezogene Modelle.

Ziel des TTP Bodenwasser ist es, begleitend zu den Modellberechnungen mit Messungen der Bodenlösung und des Grundwassers die Herkunft und Transportpfade von Nährstoffen aus landwirtschaftlicher Nutzung in einem typischen Einzugsgebiet der Unstrut umfassend zu charakterisieren. Ein besonderer Aspekt stellen dabei die Dynamik der Stoffflüsse und –umsetzungen unter den Bedingungen einer Auenniederung dar.

Die Untersuchungen wurden im F/E-Vorhaben „Elbe-Unstrutrevitalisierung“ begonnen und mit vertiefenden Detailmessungen im F/E-Vorhaben „Glowa-Unstrut“ fortgesetzt. Im Ergebnis stehen zwei- bis sechsjährige Messreihen zur Verfügung, auf deren Grundlage

- gebietsbezogenen Modelle, insbesondere ArcEgmo validiert,
- ackerbaulich genutzte Böden hinsichtlich ihrer Verlagerungsdisposition mit geeigneten pedo-hydrologischen Kriterien charakterisiert und klassifiziert werden können und damit
- Folgeabschätzungen von Klimaänderungen in Modellrechnungen standortdifferenziert präzisiert werden können und
- notwendige Maßnahmen für die Verminderung der Stoffbefrachtung der Gewässer standortdifferenziert abgeleitet werden können.

Eine weitere Aufgabe des TP Unstrut-Bodenwasser besteht darin, für die Randbedingung einer standortoptimierten Düngung im Modell ArcEgmo die Böden im Einzugsgebiet der Unstrut auf der Grundlage von Leitbodenprofilen der Bodengeologischen Konzeptkarte in Klassen unterschiedlichen Ertragspotentials einzustufen.

I.2 Voraussetzungen

- Das Untersuchungsgebiet liegt mit einem mittleren Niederschlagsdargebot von 500mm und einem langjährigen Temperaturmittel von 8,5 °C im mitteldeutschen Trockengebiet und charakterisiert landwirtschaftlich geprägte Stoffflüsse mit geringen bis mittleren Abfluss- und Stoffmengen, dafür aber mittleren bis hohen Stoffkonzentrationen. In der Auenniederung haben sich aus fluviatilen schluffig-lehmigen bis schluffig-tonigen Holozänsedimenten Lehm-Vegen und Schwarogleye ausgebildet. Entwässerungsgräben leiten das oberflächennahe Grundwasser ab und ermöglichen ackerbauliche Nutzung. Im Speisungsgebiet dominieren Tschernoseme, Parabraunerden und Mergel-Rendzinen aus Löß und Verwitterungsprodukten des unteren Keupers. Das Untersuchungsgebiet kann als repräsentativ für das ackerbaulich genutzte Einzugsgebiet der Unstrut bezeichnet werden.
- Als Untersuchungsstandorte dienen in der Auenniederung Vega, Gley-Vega und Gley mit deutlich unterschiedlichen Substrat- und Grundwasserverhältnissen und im Speisungsgebiet Tonmergel-Rendzina und Braunerde-Tschernosem (lÖ) mit deutlich unterschiedlichen Substrat- und Ertragsverhältnissen. Für letzteren stehen langjährige Messreihen der Lysimeterstation Großobringen, die sich unter etwa vergleichbaren Witterungsverhältnissen (550mm Niederschlag, 8,2 °C Lufttemperatur) im Randbereich des Thüringer Beckens etwa 100 km südöstlich befindet zur Verfügung. Die Auenböden bilden einen von der Unstrut in nordöstlicher Richtung verlaufenden Transekt. Auf den Standorten Gley-Vega und Tonmergel-Rendzina sind die Messungen des Vorläufer-Projektes fortgesetzt worden. Die Standorte Vega und Gley sind im F/E-Vorhaben „Glowa-Unstrut“ neu eingerichtet worden, um die Repräsentativität der Aussagen über die Stoffflüsse in einem Einzugsgebiet zu erhöhen.
- Das Grundwasser aus dem Speisungsgebiet entlastet in die Auenniederung, gelangt lokal aber auch direkt über Vorfluter in die Unstrut (Sommer 2000). In der Auenniederung trifft das Keuper-Grundwasser unter den Auelehm- und tondecken auf eine mehrere Meter mächtige Riethserie aus Torfen/Torfmudden und Schluff-/Tonlagen, die in 7...8 m Tiefe von geringmächtigen Kiesen abgelöst wird. Die Basis der Auensedimente bilden bis zu 160 m mächtige Schichten des unteren Keupers. Da die Sohle des Fließgewässers Unstrut unter der Quartärunterkante liegt, ermöglichen die geringmächtigen pleistozänen Schotter in der Auenniederung eine hydraulische Interaktion zwischen dem Keuper-Grundwasser aus dem Speisungsgebiet und der Unstrut.

- Für die Ermittlung der Stoffflüsse in der ungesättigten Zone sind in der Auenniederung und im Speisungsgebiet Lysimeter und Saugsondenmessplätze eingerichtet worden. In der Auenniederung dienen Lysimeter mit einer Oberfläche von 2m^2 und einer Tiefe von 2...2,5 m für die Abschätzung der Abflussmenge und in verschiedene Tiefen der ungesättigten Zone/ des oberflächennahen Grundwasserbereiches eingebaute Saugsonden aus keramischen Material und Kunststoff für die Abbildung des Vertikalgradienten der Sicker- und Grundwasserbeschaffenheit. Im Speisungsgebiet sind auf der Tonmergelrendzina Lysimeter mit einer Oberfläche von 2m^2 und einer Tiefe von 1,3m in dreifacher Wiederholung eingebaut. Der tiefgründige Braunerde-Tschernosem befindet sich in den Lysimetern der Versuchsstation Großobringen. Die Lysimeter weisen eine Oberfläche von 2m^2 , eine Tiefe von 2,5 m auf, sind monolithisch befüllt, für die Erfassung aller Wasserhaushaltsgrößen kontinuierlich wägbare und zur Vermeidung von Oaseneffekten inmitten eines Feldschlages installiert. Begleitende Untersuchungen erstrecken sich im Untersuchungsgebiet auf die Messung der Bodenfeuchte, des Grundwasserflurabstandes sowie die Erfassung der bodenchemischen und physikalischen Eigenschaften, Erträge, Pflanzenentzüge und Nährstoffsalden.
- Mit dem Wassertransportmodell HYDRUS 2D 2.0 (Simunek et al. 1999) wird der Wasserfluss im Bereich ungesättigte Zone/ oberflächennahes Grundwasser unter der Randbedingung eines variablen Grundwasserflurabstandes in Tagesschritten berechnet und daraus der Abflusszeitraum und die Abflussmenge aus der ungesättigten Zone in das Grundwasser abgeschätzt. Die für die obere atmosphärische Randbedingung notwendige Eingangsgröße der potentiellen Evapotranspiration liefert das an der wägbaren Lysimeteranlage Großobringen validierte Wasserhaushaltsmodell VERD (Koitzsch & Günther 1989).
- Detaillierte Untersuchungen erstreckten sich in den Jahren 2002 und 2003 auf die Markierung des sickerwassergebundenen Transportpfades mit den konservativen Tracersubstanzen Br^- und Cl^- auf der Vega und dem Gley. Die Tracer wurden jeweils zu Beginn des hydrologischen Winterhalbjahres, am 25.10.2001 und 23.10.2002 ausgebracht. KBr wurde mit einer Aufwandmenge von 25 g/m^2 in 4mm Wasser gelöst appliziert, CaCl_2 mit einer Aufwandmenge von 476 g/m^2 in fester Form auf den Messparzellen verteilt. Für die Identifizierung der biochemischen Herkunft der N-Verbindungen in den Auensedimenten wurden Sickerwasserproben und mit Hilfe einer Rammkernbohrung Bodenproben aus verschiedenen Tiefen der Auensedimente entnommen und für die Analyse der $^{14/15}\text{N}$ sowie ^{18}O -Isotopenzusammensetzung von Nitrat und Ammonium an das UFZ Halle-Leipzig, Dr. Strauch übergeben.

I.3 Planung und Ablauf

- Ausgangssituation zu Beginn des Projektes im Mai 2000:
Lysimeter und Saugsondenmessplätze auf der Gley-Vega, der Tonmergelrendzina und dem Braunerde-Tschernosem
- November 2000 ... März 2001:
Inspektion der Messsysteme und Ersatz verschlissener Schlauchverbindungen
- Mai/ Juli 2001:
Einrichtung der Saugsonden-Messplätze auf der Vega und dem Gley
- 23.10.2001: Ausbringung des Br^- -Tracers
- 25.10.2002: Ausbringung des Cl^- -Tracers
- September 2002:
 - o Rammkernbohrung und Probenahme der Auensedimente
 - o Herstellung von Bodeneluaten im Labor der TLL
 - o Analyse der Isotopenzusammensetzung durch das UFZ Leipzig-Halle
- November 1997 Oktober 2003: Durchführung des Messprogramms, insbesondere wöchentliche Probenahme von Bodenwasser und Depositionen

I.4 Anknüpfung an wissenschaftlich und technischen Stand

- Die Messungen der Stoffströme knüpfen an die im F/E-Vorhaben „Unstrutrevitalisierung“ begonnenen Untersuchungen an.
- Für die Bestimmung von Ammonium und Phosphat, von denen erwartet wurde, dass sie unter anaeroben Verhältnissen im oberflächennahen Grundwasserbereich vorkommen wurden neu entwickelte Saugsonden aus Kunststoff der Fa. Sitec eingesetzt.

- Für die Berechnung des Wasserflusses unter der Bedingung grundwassernaher Verhältnisse wurde das international anerkannte Wassertransportmodell Hydrus 2D mit dem Bearbeitungsstand 1999 eingesetzt.
- Die Installation der Saugsonden erfolgte in Anlehnung an das DVWK-Merkblatt 217/1990 „Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzenmethode“
- Die Lysimeteranlagen erfüllen die wesentlichen Mindestanforderungen, wie ausreichende Oberfläche für die Etablierung eines Pflanzenbestandes mit typischer Bestandesstruktur, ausreichende Tiefe für ein uneingeschränktes Wurzelwachstum, Aufstellung unter natürlichen Grundwasser- und mikroklimatischen Verhältnissen und vergleichbare Bewirtschaftung in der Umgebung.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- DGFZ Dresden mit Messungen der Grundwasserdynamik und –beschaffenheit im Untersuchungsgebiet
- UFZ Halle-Leipzig für die Analyse und Interpretation der Isotopenzusammensetzung der N-Verbindungen

II Darstellung

II.1 Ergebnisdarstellung

1. Die N-Austräge aus ackerbaulicher Nutzung variieren im Mittel der Jahre auf den Böden in der Auenniederung zwischen 5 und 24 kg/ha und im Speisungsgebiet zwischen 2 und 30 kg/ha. Damit korrespondierend schwanken die N-Salden aus Zufuhr über Düngung und Abfuhr mit dem Erntegut zwischen 2 und 25 kg/ha in der Auenniederung und 7 und 26 kg/ha im Speisungsgebiet. Obwohl es sich auf zwei der fünf Standorte nur um zweijährige Messwerte handelt, zeigt die Gegenüberstellung einen engen Zusammenhang zwischen N-Saldo der Bewirtschaftung und N-Austrag.
2. Die Nitratkonzentration des Sickerwassers bewegt sich in der Auenniederung im Mittel der Jahre 2002 und 2003 mit 30...74 mg/l auf den Vegen und 67 mg/l auf dem Gley in einem engen Bereich. Auf der Tonmergel-Rendzina im Speisungsgebiet liegt die Nitratkonzentration mit 118 mg/l mehrfach höher. Die langjährigen Messreihen bestätigen die Unterschiede zwischen den Böden in der Auenniederung und im Speisungsgebiet mit 40 mg/l auf der Gley-Vega und 182 mg/l auf der Tonmergelrendzina. Dennoch erbringen langjährige Messreihen auf dem tiefgründigen Braunerde-Tschernosem mit durchschnittlich 71 mg/l ähnliche niedrige Werte wie auf den Vegen in der Auenniederung.
3. Eine der Ursachen für die Unterschiede in der N-Verlagerung sind in der Bewirtschaftung zu suchen. Der N-Saldo ist nicht immer das Ergebnis einer empfehlungskonformen N-Düngung und damit auch die gemessenen N-Austräge. Das trifft insbesondere auf die Tonmergel-Rendzina mit dem höchsten N-Saldo und N-Austrag zu.
Auf den beiden langjährig beobachteten Standorten Gley-Vega und Tonmergelrendzina mit N-Austrägen von 5 und 30 kg/ha wurden im Mittel der Jahre 139 und 151 kg/ha N ausgebracht, dv. jeweils 32 und 21 kg/ha in organischer Form. In beiden Fällen war die N-Düngung nicht empfehlungskonform und überschritt mit 31 und 44 kg/ha die N-Düngeempfehlung. Die Fruchtfolgen waren etwa vergleichbar. Nach einer Blattfrucht (Winterraps, Ackerbohne) folgte in der Regel zweimal Getreide. Auf beiden Standorten gab es Jahre mit höheren N-Hinterlassenschaften entweder durch Blattfrüchte mit hohen Rest-N-Mengen oder durch Zugabe von Gülle zur Strohhotte. Obwohl die Fruchtfolge und die Höhe der N-Düngung in etwa vergleichbar waren zeigen sich beträchtliche Unterschiede in der Höhe des N-Saldos. Offenbar war die Ertragserwartung und damit der pflanzliche N-Entzug auf der Vega unterschätzt worden, während auf der Tonmergelrendzina davon ausgegangen werden kann, dass die Ertragserwartung und die daraus abgeleitete N-Düngeempfehlung zutrafen. Die Gegenüberstellung zeigt, wie wichtig es für die Minimierung der N-Verlagerung ist, die Höhe der N-Düngung an die Ertragserwartung des Standortes auszurichten.
4. Das Grundwasser zeigt auf der in Flussnähe verbreiteten Vega eine Amplitude von 90...234 cm uGOK, auf der im Transekt folgenden Gley-Vega von 77...160 cm uGOK und auf dem

Gley im flussferneren Auenbereich von 27...128 cm uGOK. Entwässerungselemente sind auf der Vega der Fluss Unstrut und auf der Gley-Vega und dem Gley bis in 2m Tiefe einschneidende Entwässerungsgräben.

5. Die in das Grundwasser eintretenden Abflussmengen variieren in Abhängigkeit von der Tiefe des Grundwasserflurabstandes. Im zweijährigen Beobachtungszeitraum 2002 und 2003 beläuft sich die Abflussmenge auf der Vega auf 47 mm, auf der Gley-Vega auf 91 mm und auf dem Gley auf 160 mm. Unter der Idealvorstellung einer Pfropfenströmung (piston flow), bei der alle wassergefüllten Poren $< 50\mu\text{m}$ (Feldkapazität) am Wasserfluss beteiligt sind, resultieren daraus Austauschraten von 10 %, 26 % und 66 %. Die beiden Untersuchungsjahre 2002 und 2003 spiegeln abflussreiche Verhältnisse wider. Im langjährigen Mittel liegt die Abflussmenge auf der Gley-Vega mit 55 mm und einer Schwankung von 0 ...116mm/a sowie einer mittleren Austauschrate von 15 % deutlich unter dem zweijährigen Wert. Im Speisungsgebiet beläuft sich die Abflussmenge auf der Tonmergel-Rendzina im Mittel der Jahre 2002 und 2003 auf 114 mm. Im langjährigen Mittel sind es 75 mm. Daraus ergibt sich eine Austauschrate von 30 %. Für den tiefgründigen Braunerde-Tschernosem weisen langjährige Messreihen im südöstlichen Randbereich des ackerbaulich genutzten Einzugsgebietes der Unstrut im Mittel von elf Jahren eine Abflussmenge von 11 mm und damit eine Austauschrate von 2 % aus. Die Bestimmung der Austauschrate deutet daraufhin, dass unter den geringen Niederschlagsverhältnissen das Bodenwasser und darin gelöste Verbindungen nicht nur im Speisungsgebiet sondern auch auf den Vegen in der Auenniederung über mehrere Jahre in der Wurzelzone bleibt.
6. Die Grundwasserdynamik in der Auenniederung wird wesentlich durch die Druckverhältnisse des Keuper-Grundwassers im Speisungsgebiet bestimmt. Das zeigt sich insbesondere im abflussreichen Jahr 2003 an einem nahezu parallelen Verlauf der Grundwasserganglinien im Keuper und in den Auensedimenten. Ein Teil des in die Auensedimente aus dem Speisungsgebiet eintretenden Grundwassers entlastet infolge der Druckwirkung des Keuper-Grundwassers in die Entwässerungsgräben. Das aus dem Speisungsgebiet herangeführte Nitrat gelangt mit dem aufsteigenden Grundwasserstrom in die mineralischen und organischen Ton- und Torfmudden und wird dort vollständig denitrifiziert. Der aufwärtsgerichtete Grundwasserstrom kann somit eine Verdünnung der Nitratkonzentration des Bodenwassers aus der ungesättigten Zone der Auenböden herbeiführen.
7. Eine Nmin-Tiefenaufnahme der unter den mineralischen Auensedimenten lagernden Riethserie aus Ton- und Torfmudden erbrachte im dauerhaft wassergesättigten Bereich unterhalb 1,4 m auf dem Gley und 2,5 m auf der Gley-Vega mit 10...40 kg/ha/dm erhebliche Anreicherungen an Ammonium-N. Die Gehalte an organischer Substanz reichen von 2,6 % im schluffigen Ton des Gr-Horizontes bis über 35 % in den organischen Torfmudden. Die stärkste Ammonium-Anreicherung zeichnete sich in den mineralischen Tonmudden ab, wo die organische Substanz mit einem C/N-Verhältnis von 12 am besten bioverfügbar ist. Die Beprobung des Grundwassers in verschiedenen Teufen der Auensedimente erbrachte über dem Liegenden des unteren Keupers in 6 m Tiefe eine mittlere Nitratkonzentration von 35 mg/l (Sommer 2000), die als Folge des Grundwasser-Zuflusses aus dem Speisungsgebiet zu werten ist. In den darüber anstehenden Auensedimenten in 3,5 ... 2,5 m Tiefe war das Grundwasser nitratfrei. Dafür stiegen die Ammoniumkonzentrationen analog zur oben dargestellten Bodenuntersuchung deutlich an. Maximal wurden im Bereich der Tonmudden 0,8 mg/l gemessen. Auf dem Gley mit einer Grundwasseramplitude von 27...128 cm uGOK war aufgrund der unterhalb 1,4 m Tiefe anstehenden Torfmudden eine Ammonium-Befrachtung der Entwässerungsgräben erwartet worden. Die Messungen zeigen aber, dass die Ammoniumkonzentrationen in 1,4 m Tiefe im Mittel der beiden Untersuchungsjahre mit 0,198 mg/l und in 0,9 m Tiefe im Gro-Horizont mit 0,134 mg/l gerade noch unter dem Grenzwert für Oberflächengewässer 0,2 mg/l liegen, auch wenn vereinzelt Maximalwerte von bis zu 0,99 mg/l in 1,4 m Tiefe und 0,83 mg/l in 0,9 m Tiefe beobachtet werden konnten. Da das oberflächennahe Grundwasser selbst auf den Gleyen, wo die Torfmudden bis in den Entwässerungsbereich der Gräben anstehen, nur geringe Ammonium-Konzentrationen aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Oberflächengewässer kaum mit Ammonium aus den Auensedimenten befrachtet werden. Festgestellte erhöhte Ammonium-Konzentrationen im Fließgewässer Unstrut sind eher im Zusammenhang mit kommunalen Zuflüssen zu sehen. Aus der Markierung des Bodenwasserflusses geht auch hervor, dass der abwärtsgerichtete Wasserfluss so gut wie nicht in die tiefer gelegenen Auensedimente vordringt und damit die NH_4 -Anreicherung in den Auensedimenten kaum die Folge eines Nitratstromes aus der Bewirtschaftung der Auenniederung sein kann, dafür aber mit hoher Wahrscheinlichkeit die des Nitratzuflusses aus dem Speisungsgebiet.

8. Die festgestellten Unterschiede in der Nitratkonzentration des Sickerwassers und des N-Austrages aus der Wurzelzone sind nicht nur auf die Bewirtschaftung, sondern auch auf die Verlagerungsdisposition der Standorte zurückzuführen. Wesentliche Kriterien, die das beschreiben können sind :
- die Austauschrate des Bodenwassers,
 - die Art der Abflussbildung/ das Abflussregime (flow regime type),
 - das pflanzenverfügbare Bodenwasser und
 - das Substrat.

Auf den Auenstandorten kommt der Einfluss des Grundwassers hinzu. Von der Verlagerungsdisposition hängt es ab, mit welchem Bewirtschaftungsregime niedrige N-Verlagerungen erreicht werden können und wie hoch der unvermeidbare N-Austrag dann noch ist. Der unvermeidbare N-Austrag bestimmt wesentlich den anzustrebenden N-Saldo, mit dem der Landwirt seinen Produktionsprozess überprüfen kann. Das Abflussregime und im weiteren Sinne die Verlagerungsdisposition eines Standortes entscheiden darüber, mit welchem Bewirtschaftungsregime Stoffverlagerungen minimiert werden können. Ergebnisse aus Modellrechnungen können auf der Grundlage von pedohydrologischen Kriterien oder Parametern der Stoffverlagerung auf Plausibilität geprüft und präzisiert werden.

8.1. Abflussregime der Standorte

8.1.1. Vega in der Auenniederung

Auf der Vega beginnt die Abflussbildung unter niederschlagsreichen Verhältnissen Anfang Januar, kann sich aber in niederschlagsnormalen Jahren bis in das Frühjahr hinauszögern. Die Markierung des Bodenwassers zeigt, dass vor Abflussbeginn präferentieller Fluss bis in den oberflächennahen Grundwasserbereich, in 1,4m Tiefe vorkommt. Zu Beginn des Abflusses aus der ungesättigten Zone in das Grundwasser ist das Grundwasser aber häufig schon von >2m auf <1m uGOK angestiegen. Das zuvor in 90 und 140cm Tiefe gesammelte Wasser ist damit Grundwasser, das mit dem in der jeweiligen Bodenzone vorhandenen und über präferentiellen Fluss herangeführten Nitrat angereichert ist. Mit einer Abflussmenge von 10mm werden im niederschlagsnormalen Jahr 2002 bei einer mittleren Nitratkonzentration von 4 mg/l nur 0,08 kg/ha aus der ungesättigten Zone in das Grundwasser verfrachtet. Es ist aber anzunehmen, dass durch das auf- und wiederabwärtsströmende Grundwasser die N-Fracht höher anzusetzen ist, indem Nitrat aus dem unteren Teil der Wurzelzone herausgelöst wird. Das zeigt sich an einem raschen Rückgang der Nitratkonzentration des in 140 und 90cm Tiefe gesammelten Grundwassers bevor der abwärtsgerichtete Fluss einsetzt. Im darauffolgenden Jahr kommt es unter niederschlagsreichen Verhältnissen im Zusammenhang mit einer Abflussmenge von 84 mm zu einer mehrfach höheren Nitratkonzentration von 82 mg/l und N-Fracht von 15,6 kg/ha.

Aufgrund der geringen Austauschrate des Bodenwassers kann es auf den grundwasserfernen Vegen bei sehr geringen N-Austrägen über mehrere Jahre zu einer Anreicherung von Nitrat in der Wurzelzone kommen, das aber in niederschlagsreichen Jahren über den abwärtsgerichteten Bodenwasserfluss und das auf- und wieder abwärtsströmende Grundwasser unter der Entwässerungswirkung des Flusses in höheren Mengen auswaschungsgefährdet ist. Die Amplitude der N-Austräge zwischen den Jahren kann deshalb groß sein.

8.1.2. Gley in der Auenniederung

Auf dem Gley beginnt die Abflussperiode aus der ungesättigten Zone bereits Anfang November, nachdem auch hier der Grundwasserpegel schon auf 90 und 60cm Tiefe uGOK angestiegen ist. Kurze Zeit danach steigt die Nitratkonzentration in 90cm Tiefe von Null auf 10...15 mg/l. Der parallel hierzu beobachtete Anstieg der Br^- - und Cl^- - Konzentration deutet daraufhin, dass die Nitratzufuhr in Verbindung mit dem Wasserfluss aus der Wurzelzone zu sehen ist. Darunter bleibt das Grundwasser nahezu unbeeinflusst durch den Wasserfluss aus der ungesättigten Zone. Weder der applizierte Tracer noch Nitrat können in 140cm Tiefe identifiziert werden. Die nur geringe Zunahme der Tracerkonzentration in 90cm Tiefe weist daraufhin, dass nur ein geringer Teil des Wasserflusses aus der ungesättigten Zone in diese Tiefe gelangt, wenn auch von einem Verdünnungseffekt durch das aufwärtsströmende Grundwasser ausgegangen werden kann. Die Entwässerungsgräben senken den Grundwasserpegel bis auf 80cm uGOK. Es kann deshalb angenommen werden, dass die in 50cm Tiefe gemessene Nitratkonzentration den Nitratfluss aus der ungesättigten Zone charakterisiert, der zu einem großen Anteil den Entwässerungsgräben zugeleitet wird. Im Unterschied zur Tiefe 50cm geht die Nitratkonzentration in 90cm Tiefe im Frühjahr auf nahe Null zurück, was aufgrund der zu diesem Zeitpunkt noch anaeroben Verhältnisse auf Denitrifikation zurückgeführt werden kann. In

früheren Untersuchungen konnte auf der Gley-Vega an einem Anstieg der NO_2 -Konzentration gezeigt werden, dass Denitrifikation im wesentlichen erst nach Überschreiten einer Bodentemperatur von 5°C beginnt und im Winterhalbjahr bei geringeren Temperaturen vermutlich weniger von Bedeutung ist (Knoblauch 2003). Bevor diese Temperaturverhältnisse erreicht werden, ist auf dem Gley der überwiegende Teil des Abflusses aber schon abgeschlossen.

Die Untersuchung der P-Fractionen im Boden erbrachte unterhalb der Ackerkrume mit zunehmender Tiefe ein Anstieg des Gehaltes an oxalatlöslichem P. Die P_{ox} -Fraktion gilt als der labile, nachlieferbare P-Pool und charakterisiert im wesentlichen den an Fe/Al-Oxiden und – Hydroxiden gebundenen P sowie den über Fe/Al-Brückenbindungen an der organischen Substanz komplexiert vorliegenden P. Aufgrund der hohen P_{ox} -Gehalte war unter der Bedingung anaerober Verhältnisse eine erhöhte P-Konzentration im Abfluss erwartet worden, denn nach Welp et al. (1983) kann Fe(II)-Phosphat in redoximorphen Böden unter anaeroben Verhältnissen in Lösung gehen, insbesondere dann, wenn in sulfatreichen Sedimenten, wie sie hier vorliegen, unter reduzierenden Bedingungen H_2S gebildet wird und nach Reduktion Fe(II)-oxide in Eisensulfide umgewandelt werden. Die sequentielle Fraktionierung nach Kurnies erbrachte aber nur geringe Anteile von Al-/Fe-gebundenem P, dafür aber einen hohen Anteil an organisch gebundenem P. Allerdings nimmt auch die Löslichkeit organisch gebundenen P mit Absinken des Redoxpotentials zu. Trotzdem lagen die TDP-Konzentrationen (total dissolved phosphorus) in 140cm Tiefe mit durchschnittlich $0,0174 \text{ mg/l}$ auf sehr niedrigem Niveau. Das traf auch auf die Tiefe 90cm mit $0,0108 \text{ mg/l}$ zu. Ursachen für die geringen Konzentrationen werden in Bindungen an Ca, CO_3 oder Tonminerale gesehen. Zumindest weist die Bestimmung der P-Fractionen nach Kurnies auf einen hohen Anteil an Ca gebundenem P.

8.1.3. Tonmergelrendzina im Speisungsgebiet

Der Abflussbeginn ist in niederschlagsreichen Jahren Anfang November, kann sich aber in trockenen Jahren bis Mitte Januar hinauszögern. Hohe Konzentrationen und N-Austräge kommen im Zusammenhang mit hohen und niedrigen Abflussmengen vor und lassen sich nicht mit dem Jahres-N-Saldo erklären. Häufig zeigt sich allerdings innerhalb einer Abflussperiode mit zunehmender Abflussmenge ein Rückgang der Nitratkonzentration. Der im Jahr 2002 eingesetzte Br^- -Tracer konnte wenige Wochen nach seiner Aufbringung im Bodenwasser in 1,3m Tiefe nachgewiesen werden. Mit der Bestimmung der Summenkurve war es möglich, das tatsächlich am Wasserfluss beteiligte Porenvolumen abzuschätzen. Bei einer ideal durchströmten gesättigten Bodenschicht entspricht das theoretische Verweilzeitvolumen dem durchströmten Porenvolumen, d.h. dem Volumen an Poren kleiner Feldkapazität ($p\text{F } 2,0$) (Russow et al. 1996). Nach der mathematischen Statistik ist das Verweilzeitvolumen das statistische Mittel einer Verteilung, d.h. der Schwerpunkt der Austragskurve und entspricht dem 50%-Wert der Summenkurve. Für die Tonmergelrendzina wird dieser Wert nach Abfluss von 229mm erreicht. Gemessen am theoretischen Porenvolumen bei Feldkapazität von 460mm würden damit nur 50% des Porenvolumens am Wasser- und Stofffluss beteiligt sein. Das weist daraufhin, dass der Boden entweder nicht bis Feldkapazität aufgefüllt wird und/ oder ein hoher Anteil des Wasserflusses über präferentielle Fließbahnen abgeleitet wird und die Austauschhäufigkeit mit 60% höher ist als angenommen. Trotzdem ist davon auszugehen, dass hohe Konzentrationen in Jahren mit hohen Abflüssen die Folge von Anreicherungen von N-Überschuss-Salden in trockenen Jahren sind. Der frühe Tracerdurchbruch und das geringe Verweilzeitvolumen des Tracers weisen aber auch daraufhin, dass Nitrat über bevorzugte Fließbahnen aus der Ackerkrume bis unter die Wurzelzone verlagert wird.

8.1.4. Braunerde-Tschernosem im Speisungsgebiet

Auf dem Braunerde-Tschernosem folgen im Verlauf von elf Jahren auf fünf Jahre mit geringen Abflussmengen von 3...8mm vier Jahre ohne Sickerwasserbildung. Im elften Jahr kommt es zu einer ungewöhnlich hohen Abflussspende von 94mm. Tiefwurzelnde Fruchtarten können in niederschlagsarmen Jahren Bodenfeuchtedefizite von bis 240mm hinterlassen. Selbst unter normalen Niederschlagsverhältnissen bleibt für die Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers aus der Differenz Niederschlag minus Verdunstung nur ein Wasserbilanz-Überschuss von 100mm übrig. Das bedeutet der Bodenwasserspeicher ist in vier von elf Jahren zu Vegetationsbeginn nicht vollständig aufgefüllt. Unter der Annahme einer Pfropfenströmung bewegt sich das Bodenwasser bei einer mittleren Sickerwassermenge von 10mm jährlich nur wenige Zentimeter abwärtsgerichtet. Vorseilender Fluss über Makroporen ist vermutlich weniger von Bedeutung aufgrund der hohen kapillaren Leitfähigkeit des schluffig-lehmigen Substrates und des Nadelstichporengefüges. Begünstigt ist der Rückhalt vorseilender Flüsse dadurch, dass nicht in jedem Winterhalbjahr der Unterboden Feldkapazität erreicht. Bodenwasser und

darin gelöste Verbindungen bleiben somit über viele, vermutlich mehrere Jahrzehnte in der Wurzelzone zurück und können von der Folgefrucht noch aufgenommen werden.

8.2. Verlagerungsdisposition der Standorte

Das standörtliche Verlagerungsrisiko der tiefgründigen Vegen und Braunerde-Tschernoseme ist gering. Begünstigt durch die hohe Verweilzeit des Bodenwassers, die gleichmäßige Porengrößenverteilung und das Nadelstichporengefüge ist von einem vorwiegendem Matrixfluss auszugehen. Unter dieser Annahme wird das Bodenwasser aufgrund der niedrigen Abflussmengen jährlich nur zu einem geringen Anteil ausgetauscht und das darin enthaltene Nitrat kann in den Folgejahren noch von der Pflanze aufgenommen werden kann. Aufgrund des hohen pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers und in der Auenniederung zusätzlich kapillaren Aufstieges aus dem Grundwasser sind über stabile Erträge und N-Entzüge geringe N-Überschuss-Salden realisierbar. Der unvermeidbare N-Austrag ist deshalb auf diesen Böden gering und damit auch der anzustrebende N-Überschuss-Saldo. Die Einhaltung niedriger N-Überschuss-Salden ist für die Realisierung möglichst niedriger Nitratkonzentrationen aber auch notwendig. Auf den Vegen ist dem sickerwassergebunden N-Austrag allerdings noch eine N-Fracht hinzuzurechnen, die das Grundwasser aus dem unteren Bereich der Wurzelzone herauslöst.

Der Gley ist hinsichtlich seiner Verlagerungsdisposition mittelmäßig einzustufen. Bei einer Austauschrate von 66% wird jährlich ein hoher Anteil des Bodenwassers mit den darin gelösten Verbindungen ausgetauscht. Die N-Fracht ist mittel bis hoch. Das bis in den oberflächennahen Bereich ansteigende Grundwasser begünstigt aber, dass der Bodenwasserabfluss stark verdünnt und damit die Nitratkonzentration des Abflusses vermindert wird. Das aufströmende Grundwasser sorgt dafür, dass die Nitratfracht aus der Bewirtschaftung der Auenniederung in die Gräben abgeleitet wird und gasförmige N-Verluste über Denitrifikation weniger von Bedeutung sind. Die Grundwassernähe kann in feuchten Jahren über Sauerstoffmangel in der Wurzelzone zu Ertragsdepressionen und damit unvermeidbaren N-Überschuss-Salden führen. In niederschlagsarmen Jahren können dagegen trockenheitsbedingte Wuchseinschränkungen durch Aufnahme von Grundwasser kompensiert werden. Der unvermeidbare N-Austrag ist aber aufgrund der hohen Austauschrate des Bodenwassers im mittleren Bereich anzusiedeln und weist daraufhin, dass auch der anzustrebende N-Überschuss-Saldo nicht wesentlich unter 30 kg/ha*a liegen kann.

Die Tonmergel-Rendzina gehört zu den Standorten mit dem höchsten Verlagerungsrisiko. Ursachen dafür sind im Abflussregime, dem hohen Anteil präferentiellen Flusses am Gesamtabfluss und in dem geringen pflanzenverfügbaren Wasserdargebot zu suchen. In Trockenjahren wird der erwartete Ertrag nicht gebildet und bleiben N-Überschuss-Salden zurück. Das am Wasserfluss beteiligte Porenvolumen ist geringer als erwartet und damit auch die Verweilzeit von Nitrat im Boden. Der unvermeidbare N-Austrag liegt wie auf dem Gley im mittleren Bereich und der anzustrebende N-Überschuss-Saldo kann auch hier nicht wesentlich unter 30 kg/ha liegen.

9. Im untersuchten Einzugsgebiet kommt die Haupt-N-Fracht im wesentlichen nicht aus der Auenniederung, sondern zu einem größeren Teil aus dem Speisungsgebiet. Aus Gründen einer Verminderung der Nährstoffbefrachtung der Gewässer ist deshalb in der Auenniederung eine Umwidmung von Ackerland in extensives Grünland nicht notwendig. Vielmehr kommt es darauf an, in der Auenniederung und im Speisungsgebiet die landwirtschaftliche Nutzung in Abhängigkeit vom Abflussregime der Standorte gewässerverträglich zu gestalten.
10. Unter der Randbedingung des von Gerstengarbe (2003) bestimmten Klimaszenarios 58 nimmt der Niederschlag im Untersuchungsgebiet im Winterhalbjahr leicht zu, insbesondere in den Monaten Oktober, Februar und März. Nach Modellberechnungen von Klöcking (2003) geht die Grundwasserneubildung aber zurück. Die höheren Niederschläge im Februar und März speisen aufgrund gleichzeitig zunehmender Temperaturen und einer damit einhergehenden Verfrühung des Vegetationsbeginns offenbar eher die Evapotranspiration als die Grundwasserneubildung. Ertragseinbuße aufgrund geringerer Niederschläge im April und Juni werden für die beiden geprüften Böden Tonmergelrendzina und Braunerde-Tschernosem für eine Fruchtfolge mit dominierenden Anteilen an Winterweizen, Winterraps, Sommer- und Wintergerste im Mittel der Jahre kaum erwartet, weil davon ausgegangen wird, dass die geringeren Niederschläge im April durch höhere im März kompensiert werden und Trockenheit im Juni aufgrund temperaturbedingt früherer Abreife der Getreide- und Rapsbestände geringere Auswirkungen zeigt als erwartet. Für das Gesamt-Einzugsgebiet der Unstrut wird allerdings für Gebiete, die jetzt schon unter Trockenstress leiden eine Verschärfung der Situation vorausgesagt. Die ver-

änderte Niederschlagsverteilung äußert sich auch in einer Zunahme der Niederschläge im Juli und August. Mit einer prognostizierten Abnahme der Grundwasserneubildung wird in der untersuchten Auenniederung ein Rückgang des mittleren Grundwasserpegels um 25 cm erwartet.

11. Für das Untersuchungsgebiet bedeutet der Rückgang des Grundwasserpegels, dass der positive Effekt des Grundwassers für die Ertragsbildung in der Auenniederung abnimmt. Die Vegen werden vergleichbar den tiefgründigen Lößböden mit ihrem hohen pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher aber immer noch die Gunststandorte bleiben. Auf den Gleyen und den Tonmergel-Rendzinen kann die Ertragsbildung aufgrund der substratbedingt geringeren pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge weitaus stärker dem Einfluss längerer Trockenperioden ausgesetzt sein. Um N-Überschuss-Salden trotzdem im tolerablen Bereich zu halten, werden sich hieraus besondere Anforderungen an das Düngemanagement ergeben.

Mit der prognostizierten Verringerung der Grundwasserneubildung sollte sich auch der N-Austrag vermindern. Da gleichzeitig aber auch die Temperaturen und damit die Mineralisierung ansteigen und sich die innerjährliche Verteilung der Niederschläge ändert zeigen Modellberechnungen standortabhängig eine Zunahme der N-Austräge. Geringere Grundwasserneubildung lässt andererseits erwarten, dass über eine Verringerung der Austauschraten ein größerer Anteil des im Boden akkumulierten Stickstoffs im Folgejahr noch durch die Pflanze aufgenommen werden kann und damit das N-Verlagerungsrisiko sinkt. Voraussetzung ist aber, dass der Boden-Nmin-Gehalt im Frühjahr bei der N-Düngungsbemessung berücksichtigt wird. Wenn allerdings auf sehr trockene Jahre häufig sehr feuchte Jahre folgen, ist die Transformation von mineralischen N in das Folgejahr begrenzt. Auch unter diesem Aspekt sind Anpassungen in der Düngestrategie erforderlich.

Inwiefern Starkniederschläge auf ausgetrocknete Böden im Sommer eine bevorzugte N-Verlagerung hervorrufen, wird davon abhängen, zu welchem Anteil das Niederschlagswasser den Oberflächenabfluss speist, wieviel mineralischer Stickstoff in der Wurzelzone ist und welcher Porenraum am Fluss teilnimmt. In den Untersuchungen führte ein Starkniederschlag von 27 mm im Juli 2002 nur auf dem Gley zu einem Abfluss aus der Wurzelzone. Die Nitratkonzentration war mit 20...25 mg/l aber niedrig. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass der Boden-Nmin-Gehalt unter dem abreifenden Winterrapsbestand gering war oder das Bodenwasser aufgrund der geringen kapillaren Leitfähigkeit des stark tonhaltigen Substrates viel mehr die zahlreich vorkommenden Grobporen als die feineren Poren, in denen die Mineralisierung u.U. intensiver abläuft durchströmt hat. Dem Abflussregime eines Bodens wird für die Stoffverlagerung und -befruchtung der Gewässer unter veränderten klimatischen Verhältnissen, insbesondere bei einer Zunahme von Starkregenereignissen eine besondere Bedeutung zukommen. Vorseilender Fluss kann je nachdem, ob oberflächlich abgelagerte Stoffe mitgerissen werden oder welcher Porengrößenbereich durchflossen wird eine Verdünnung des Bodenwasserflusses oder eine bevorzugte Verlagerung von Stoffen mit sich bringen.

Der Rückgang des Grundwasserpegels könnte auf den Gleyen in sehr trockenen Jahren dazu führen, dass ein größerer Teil des N-Flusses in das Grundwasser gelangt bevor der Grundwasserpegel die Entwässerungstiefe der Gräben erreicht. Das könnte bei ausreichenden Temperaturen dazu führen, dass gasförmige N-Verluste durch Denitrifikation zunehmen.

II.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse

- Die gewonnenen Erkenntnisse über das Abflussregime und die N-Verlagerungsdisposition der Böden im Einzugsgebiet der Unstrut werden in der geplanten thematischen Karte der Verlagerungsdisposition landwirtschaftlich genutzter Böden Thüringens verarbeitet werden.
- Auf der Grundlage der experimentell ermittelten Verlagerungsdisposition können näherungsweise unvermeidbare N-Austräge und davon abhängig tolerable N-Salden für Standorte, die ein ähnliches Verlagerungsverhalten aufweisen abgeleitet werden.
- Die Messreihen der Sicker- und Grundwasserbeschaffenheit stellen im Zusammenhang mit den erfassten Bodeneigenschaften, Erträgen, Pflanzenentzügen, Grundwasserständen und Angaben zur Bewirtschaftung wertvolles Datenmaterial für die Weiterentwicklung, Parametrisierung und Validierung von Modellen dar.
- Modellergebnisse können auf der Grundlage der ausgewiesenen pedohydrologischen Verlagerungskriterien und Abflussregime der Böden auf Plausibilität geprüft werden.

II.3 Veröffentlichungen

- Steffi Knoblauch: Dynamik der Stickstoffverlagerung in einem Flusseinzugsgebiet der Unstrut und Schlussfolgerungen für die Landnutzung. In: Landnutzung und Landentwicklung 44, 2003
- Steffi Knoblauch, Ingrid Pflieger: Untersuchungen über den sickerwassergebundenen P-Austrag aus landwirtschaftlich genutzten Böden Thüringens. In: VDLUFA-Kongressband, 2003, im Druck
- Beate Klöcking, Bernhard Ströbl, Steffi Knoblauch, Uta Maier, Bernd Pfützner and Andreas Gericke: Development and allocation of land use scenarios in agriculture for hydrological impact studies. In: Physics and Chemistry of the Earth 28, 2003, 1311...1321

Anlage

III Erfolgskontrollbericht

III.1 Nebenergebnisse

- Mit den Untersuchungen konnten die thüringenweit auf landwirtschaftlich genutzten Flächen verteilten Bodenwassermessstellen um typische Böden aus dem Einzugsgebiet der Unstrut erweitert werden, wodurch die Repräsentativität der Aussagen über den Einfluss landwirtschaftlicher Nutzung auf die Stoffbefrachtung der Gewässer verbessert werden konnte.

III.2 Erfindungen/ Schutzrechtsammlungen

entfällt

III.3 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

- Mit der Charakterisierung der Verlagerungsdisposition von Böden können Risiken aus landwirtschaftlicher Nutzung für die Gewässer sichtbar gemacht und davon abhängig standortangepasste Maßnahmen abgeleitet werden.
- Auf dieser Grundlage sind betriebswirtschaftliche Kalkulationen über die Kosten von Gewässerschutzmaßnahmen möglich.
- Die Annahme, dass Auenniederungen aufgrund der Nähe zum Grundwasser besonders auswaschungsgefährdet sind konnte nicht bestätigt werden. Aus Gründen einer Verminderung der Nährstoffbefrachtung der Gewässer ist in der Auenniederung eine Umwidmung von Ackerland in extensives Grünland nicht notwendig. Vielmehr kommt es darauf an, gleichermassen in der Auenniederung und im Speisungsgebiet die landwirtschaftliche Nutzung in Abhängigkeit vom Abflussregime der Standorte gewässerverträglich zu gestalten.

III.4 Wissenschaftlich/ technische Erfolgsaussichten

- Die Anwendbarkeit der pedohydrologischen Kriterien Austauschrate des Bodenwassers, Abflussregime, pflanzenverfügbares Bodenwasser und Substrat kann für die Bewertung der N-Verlagerungsdisposition von Böden bestätigt werden.

III.5 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Für eine möglichst vollständige Erfassung der In- und Outputfaktoren der N-Bilanz können die Untersuchungen zu den wassergebundenen Stoffflüssen durch Messungen gasförmiger N-Verluste erweitert werden.
- Die Lysimeteruntersuchungen werden auf einem der Standorte in Form einer Bodenwassermessstelle der TLL weitergeführt.

III.6 Arbeiten ohne Lösung

entfällt

III.7 Präsentationsmöglichkeiten

entfällt (im Rahmen des Gesamtprojektes)

III.8 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

- Die Kostenplanung wurde im Verwendungsnachweis vom 10.09.2003 an Frau Lehmann-Lulliel und Frau Haneberg (PIK) durch die TLL Jena dokumentiert.
- Die Fertigstellung eines gemeinsamen Abschlussberichtes des Teilprojektes „Unstrut“ wird zum 30.11.2003 erfolgen und eine Anzeige zur Terminveränderung des F/E-Vertrages ist am 24.10.2003 durch die TLL dem PIK zugesandt worden.

Literatur

Koitzsch, R. & 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, 803-810

Russow, R., S. Knappe und H.Förstel, 1996: Vergleich der Wasser- und Anionenbewegung in einem landwirtschaftlich genutzten Sandlöß-Braunerde und Löß-Braunerde-Boden an Hand von Lysimeteruntersuchungen, In: BAL-Bericht der 6. Lysimetertagung, 15-18

Simunek, J., M. Ejna, T.M. van Genuchten, 1999 : The Hydrus-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multile solutes in variably-saturated media. – Version 2, U.S. Salinity Laboratory Agricultural research Service U.S. Departement of Agriculture Riverside, California.

Sommer, T., 2000: Auswirkungen anthropogener Überprägungen von Flussauen auf deren Grundwasserdynamik und –beschaffenheit am Beispiel der Unstrut (Thüringen). – Dissertation, Jena

Knoblauch, S., 2003: Dynamik der Stickstoffverlagerung in einem Flusseinzugsgebiet der Unstrut und Schlussfolgerungen für die Landnutzung. In: Landnutzung und Landentwicklung 44

Welp, G., U. Herms, G. Brümmer, 1983: Einfluss von Bodenreaktion, Redoxbedingungen und organischer Substanz auf die Phosphorgehalte der Bodenlösung. In: Z. Pflanzenernährung. Bodenkde, 146, 38..52