



Wasser- und Stickstoffverlagerung im Jahresverlauf

Christian GYSI, Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau (FAW), CH-8820 Wädenswil

In einem begehbaren Tunnel unterhalb eines Gemüsefeldes wurde der Wasser- und Stofftransport in einem natürlich gelagerten Boden von der Bodenoberfläche bis zum Grundwasserspiegel im Jahresverlauf gemessen. Pro Hektare gingen während eines Jahres unter dem Gemüsefeld 100 kg Stickstoff, unter Dauerbrache 300 kg Stickstoff als Auswaschungsverluste verloren. Zwei Drittel des verfügbaren Stickstoffes stammte aus der Mineralisierung der organischen Substanz, ein Drittel aus mineralischen Düngern.

fürten zu bedeutenden Auswaschungsverlusten zu Beginn des Winters. Im Verlaufe der Untersuchungsperiode betrug die Transpiration etwa einen Drittel, die Evaporation etwa einen Viertel, die Auswaschung etwa die Hälfte der Niederschläge (Tab. 1).

Zur Verminderung von Stickstoffverlusten muss die Düngung dem Nährstoffbedarf der Pflanzen im Verlaufe der ganzen Vegetationsentwicklung optimal angepasst werden. Stickstoff ist ein äusserst mobiler Nährstoff, der mit dem Wasser im Boden transportiert wird. Ein vertieftes Verständnis der Wasser- und Stickstoffverlagerung im Bodenprofil soll daher zu einer Verbesserung der Düngungsempfehlungen beitragen.

sekultur gering und hauptsächlich auf eine Regenperiode vor dem 13. Oktober zurückzuführen. Die hohen Niederschläge nach der Ernte des Kabis am 5. November 1988 sättigten den Boden vollständig und

Geringere N-Verluste durch Gemüsekultur

Dauerbrache und Gemüseparzelle unterschied sich zu Beginn der Untersuchungs-

Dauerbrache erhöht Wasserverluste

Die volumetrischen Wassergehalte bewegten sich zwischen 20% bei sehr trockenem Boden und um 35% bei Feldkapazität (Abb. 2). Zu Beginn der Untersuchungsperiode war der Wassergehalt unter der Dauerbrache deutlich höher als im Gemüsefeld, das am 28. Juni 1988 mit Kabissetzlingen bepflanzt wurde. Der geringere Wassergehalt unter Kabis ist auf den Wasserbedarf der Vorkultur Kopfsalat zurückzuführen. Unter Dauerbrache war die Evaporation während der gesamten Untersuchungsperiode geringer als der Niederschlag, so dass während der ganzen Periode Wasser aus der Durchwurzelungszone verloren ging. Ohne Pflanzen wurde etwa die Hälfte der Niederschläge auf der Dauerbrache verdunstet, die andere Hälfte ausgewaschen (Tab. 1).

Unter der Kabiskultur trocknete der Boden im Verlaufe der Entwicklung der Kultur aus, obwohl im Durchschnitt während der Kabiskultur pro Tag etwa 3 mm Niederschlag fiel. Der Wasserverlust durch Auswaschung war im Verlaufe der Gemü-

Tab. 1. Massenbilanz Wasser in mm vom 14. Juni 1988 bis zum 14. März 1989 für die obersten 60 cm des Bodenprofiles

Bilanzierungsgrösse	Dauerbrache		Kabiskultur	
	mm	%	mm	%
Import (= 100%)				
Niederschlag und Bewässerung	575	100	575	100
Export				
Transpiration	0	0	173	30
Evaporation	282	49	139	24
Auswaschung	314	55	284	50

Die Massenbilanz ist nicht ausgeglichen wegen Gehaltsänderungen zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende.



Abb. 1. Beziehungen Boden - Pflanze. Genauere Kenntnisse über den Stickstoffkreislauf sind notwendig zur Optimierung der Düngung im Hinblick auf eine Verminderung des Nitrataustrages ins Grundwasser und eine Minimierung des Nitratgehaltes in den Produkten.

Wassergehalt in Vol%

Stickstoffverteilung in kg pro ha

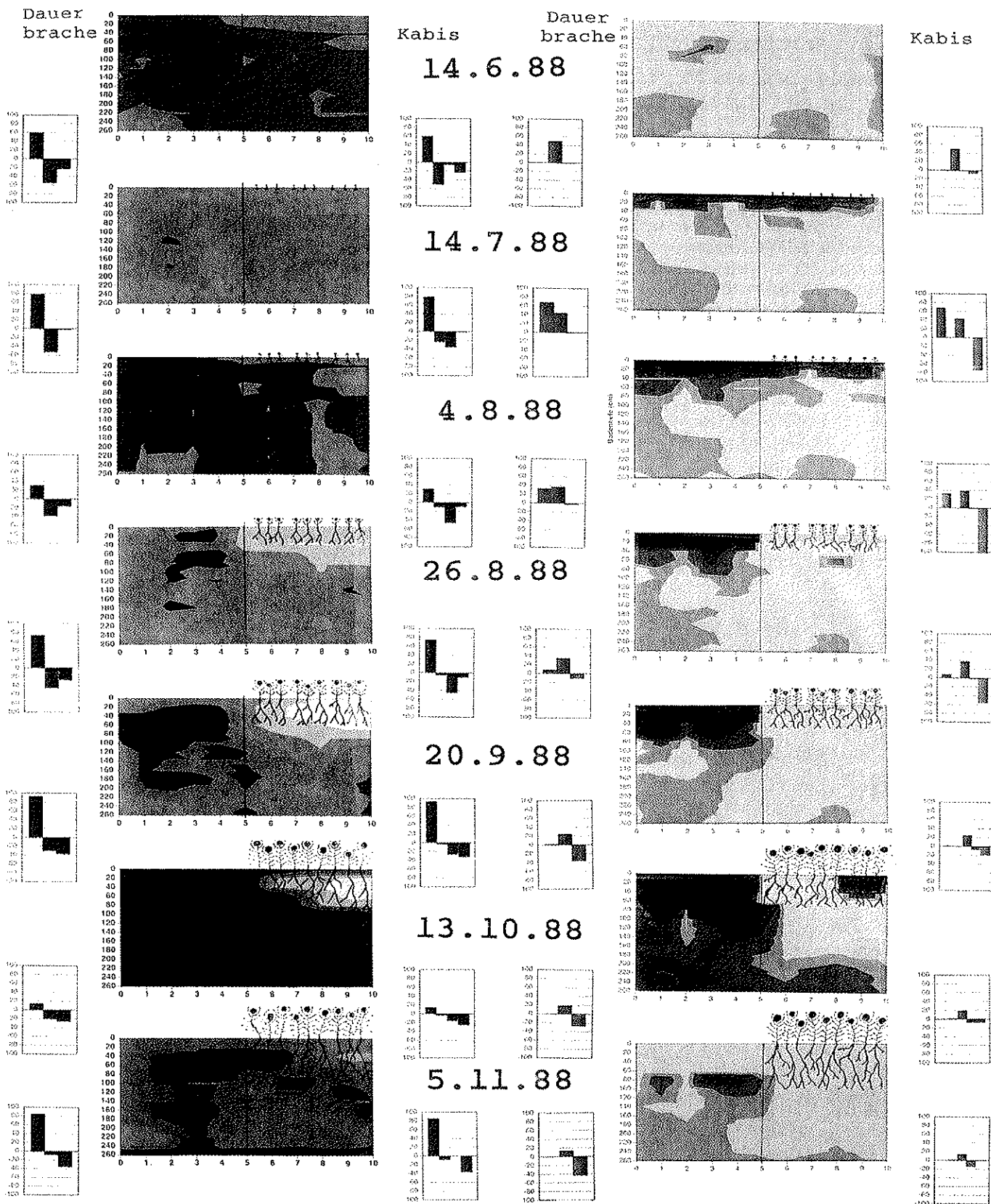
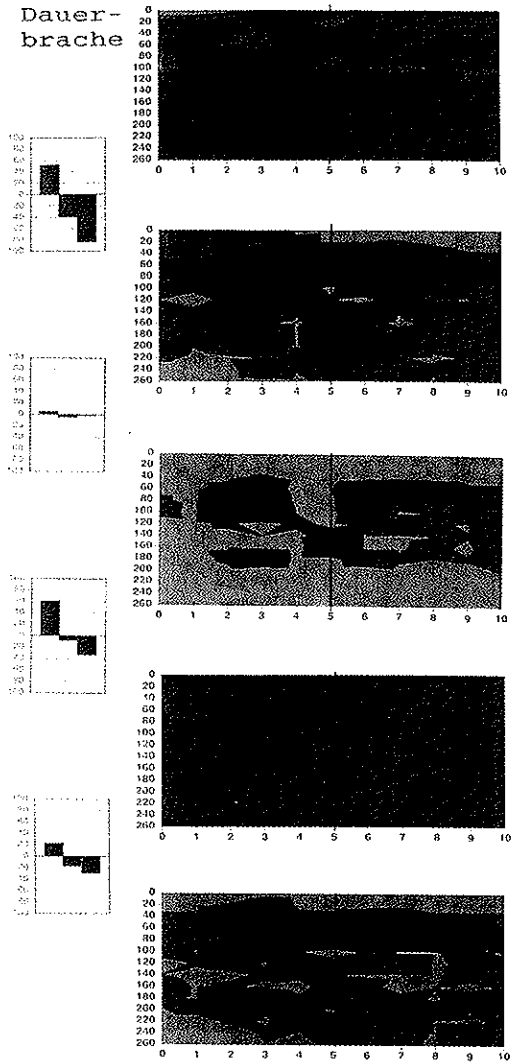
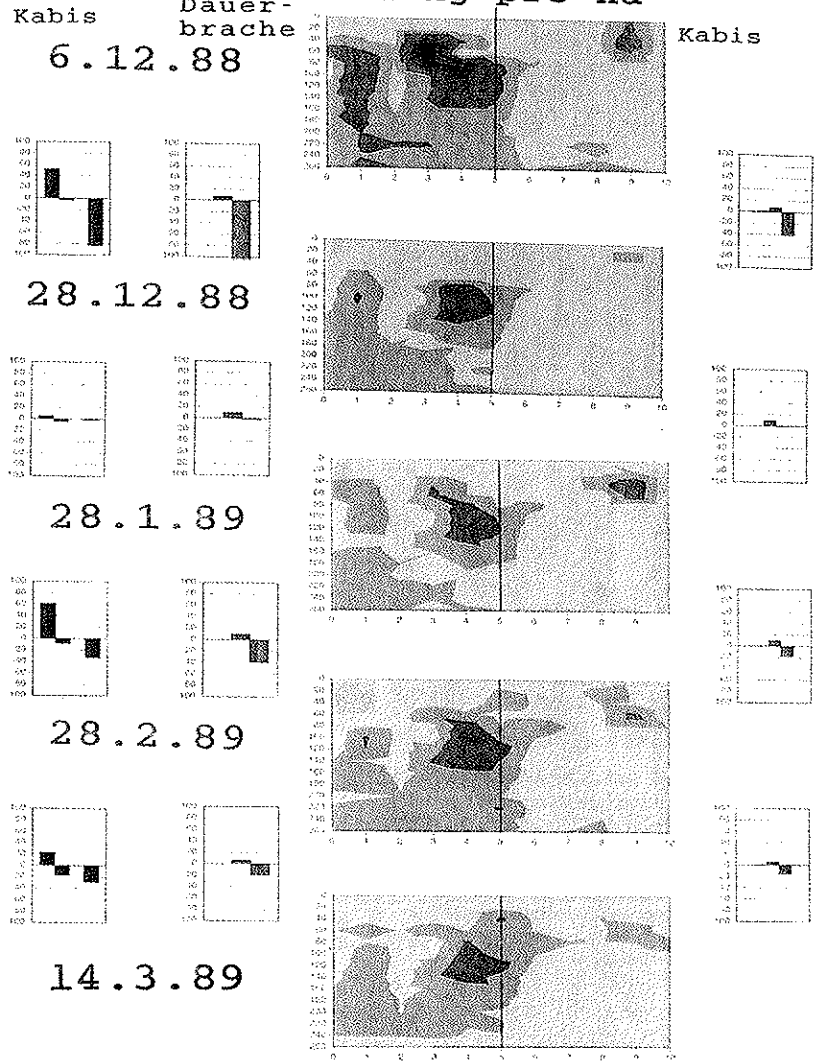


Abb. 2. Zeitliche Veränderung des Wasser- (Volumenprozent) und Stickstoffgehaltes (kg Nitratstickstoff pro ha und 20 cm Bodenschicht) während einer Kabiskultur und dem darauf folgenden Winter unter Dauerbrache (linke Seite des Bodenprofils) im Vergleich zum Gemüsefeld (rechte Seite des Bodenprofils). Zu den Untersuchungsdaten sind in einem Bodenprofil (12 m Länge und 2,6 m Tiefe) Flächen gleicher Gehalte an Wasser und Stickstoff aufgezeichnet (Daten aus dem Messtunnel). Zwischen den Untersuchungsdaten sind für Dauerbrache und für die Gemüseparzelle die Importe und Exporte für Wasser (Import: Niederschlag und Bewässerung; Export: Evaporation, Transpiration, Auswaschung) und Stickstoff (Import: Düngung, Ernterückstände, Stickstoffmineralisierung; Export: Auswaschung, Entzug) als Balkendiagramme dargestellt (Daten aus dem Stickstoffmodell für die Bodentiefe von 0 bis 60 cm).

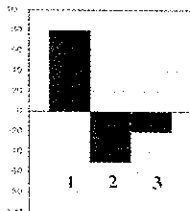
Wassergehalt in Vol%



Stickstoffverteilung in kg pro ha

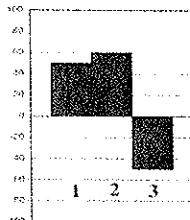


Dauerbrache



Import in mm:
1. Niederschlag

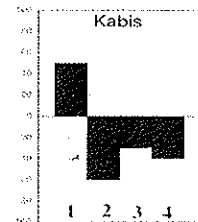
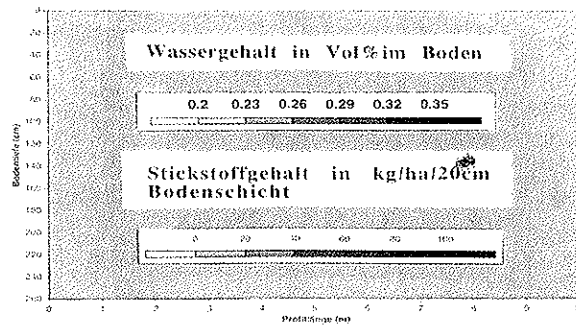
Export in mm:
2. Evaporation
3. Auswaschung



Import in kg pro ha:
1. Düngung
2. N-Mineralisierung

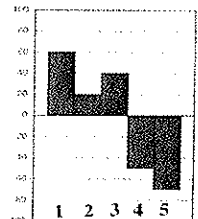
Export in kg pro ha:
3. Auswaschung

Legende



Import in mm:
1. Niederschlag

Export in mm:
2. Evaporation
3. Transpiration
4. Auswaschung



Import in kg pro ha:
1. Düngung
2. Ernterückstände
3. N-Mineralisierung

Export in kg pro ha:
4. Auswaschung
5. Entzug

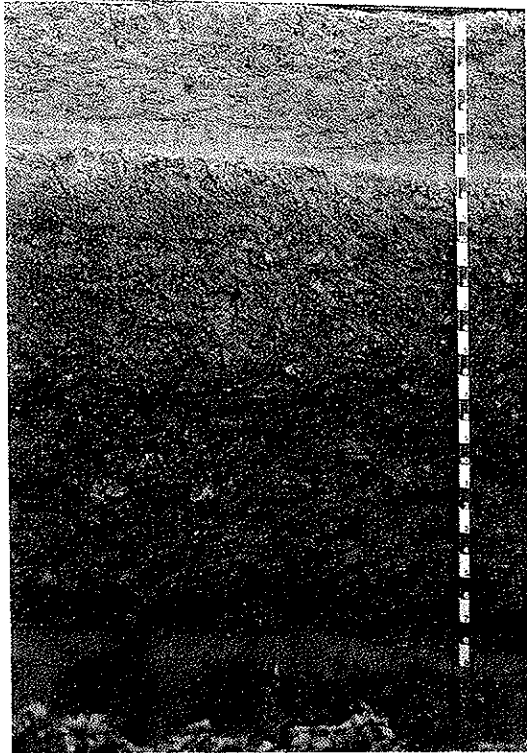


Abb. 3. Intensiver Gemüsebau wird oft auf unseren besten Böden betrieben, die in Stadtnähe häufig zugleich der Trinkwassergewinnung dienen. Bodenprofil des Versuchsstandortes vor dem Einbau des Messtunnels. Eine kolluviale Kalkbraunerde ist einer Parabraunerde überlagert. Unterhalb der Pflugtiefe in etwa 30 cm Tiefe ist eine verdichtete Bodenschicht zu erkennen.

periode nur unwesentlich im Stickstoffgehalt (Abb. 2). Hohe Temperaturen und eine genügende Bodenfeuchtigkeit führten in beiden Parzellen während der Kultur des Kabis zu Stickstofffreisetzungen in der Grössenordnung von insgesamt über 250 kg N/ha. Eine mineralische Düngung mit 110 kg N/ha erfolgte am 26. Juli 1988. Unter Dauerbrache wurde nun im Verlaufe des Herbstes und Winters nahezu 300 kg Stickstoff pro ha ausgewaschen (Tab. 2). Der Stickstoffgehalt in 0 bis

Glossar

Auswaschung: Verlust von Wasser und den darin gelösten Nährstoffen in Bodentiefen unterhalb der durchwurzelten Bodenschichten.

Bebrütungsversuch: Laborversuch zur Feststellung der maximal möglichen Stickstoffmineralisierung. Der Boden wird während mehrerer Wochen bei optimaler Temperatur und Feuchtigkeit bebrütet, so dass der organisch gebundene Stickstoff durch Mikroorganismen in mineralische Form überführt wird.

Bodenlösung: Wasser im Boden und die darin gelösten Nährstoffe.

Bodenwasserspannung: Saugspannungskraft die aufgewendet werden muss, um dem Boden Wasser zu entziehen.

Evaporation: Wasserverdunstung von der Bodenoberfläche.

Felddesorptionskurve: Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Bodens und der Bodenwasserspannung direkt im Versuchsfeld gemessen - also nicht wie meistens üblich im Labor.

Feldkapazität: Wassergehalt des Bodens drei Tage nach Wassersättigung. Die Grobporen des Bodens werden durch die Schwerkraft während dieser Zeit weitgehend entleert.

Makroporen: Grobe Bodenporen wie Regenwurmgänge, Wurzelkanäle und Klüfte, in denen Wasser sehr schnell verlagert werden kann.

Mikroporen: Feinporen des Bodens, in denen das Bodenwasser zurückgehalten und langsam verlagert wird.

Saugkerze: Tonkörper, der im Boden vergraben werden kann und über den die Bodenlösung kontinuierlich aus dem Boden abgesaugt und dann auf Nährstoffe untersucht werden kann.

Stickstoffmineralisierung: Umwandlung von organisch gebundenem Stickstoff durch Mikroorganismen in mineralischen, pflanzenverfügbaren Stickstoff.

Tensiometer: Gerät zur Messung der Bodenwasserspannung und - indirekt über die Desorptionskurve - des Wassergehaltes im Boden.

Transpiration: Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes.



60 cm war im Frühling 1989 in beiden Parzellen wieder im Bereich von 0-20 kg N/ha und 20 cm Schicht angelangt. Demgegenüber entzog die Kabiskultur dem Boden nicht nur die mineralisch gedüngte Stickstoffmenge, sondern auch einen grossen Teil des mineralisierten Stickstoffes. Die Stickstoffauswaschung über Winter betrug nach der Kabiskultur etwa 100 kg N/ha oder einen Drittel im Vergleich zur Dauerbrache (Tab. 2). Der Stickstoffverlust sollte im Bereiche von

Abb. 4. Gesamtansicht des Gemüsefeldes von Heinz Eymann, Gemüsebau in Winkel bei Büllach. Zur Messung der Stoffflüsse im Untergrund wurde ein zwölf Meter langer, begehbare Tunnel quer zur Bearbeitungsrichtung unter das Gemüsefeld gebaut. Sichtbar ist der Einstieg zum Messtunnel und die vordere, während der ganzen Versuchsdauer brach liegende Hälfte des Versuchsfeldes.



Tab.2. Massenbilanz Stickstoff in kg N pro ha für die obersten 60 cm des Profiles vom 14. Juni 1988 bis zum 14. März 1989

Bilanzierungsgrösse	Dauerbrache		Kabiskultur	
	kg N/ha	%	kg N/ha	%
Import (= 100 %)				
Nettomineralisierung	253	70	256	69
Düngung	110	30	110	30
Ernterückstände	0	0	5	1
Export				
Nährstoffenzug durch Kultur	0	0	272	73
Auswaschung	292	80	106	29

Die Massenbilanz ist nicht ausgeglichen wegen Gehaltsänderungen zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende.



Trinkwassereinzugsgebieten kleiner sein als 50 kg N/ha, das heisst, die Stickstoffdüngung müsste noch genauer als im vorliegenden Versuch dem Bedarf der Pflanze und der voraussichtlichen Stickstofffreisetzung angepasst werden.

Stofftransporte

Transport von Stoffen findet im Boden hauptsächlich in den Bodenporen statt. In Wasser lösliche Stoffe - Nährstoffe sowie Schadstoffe - werden im Boden vor allem durch den Wasserfluss verlagert. Ein Teil des Niederschlages gelangt über die Grobporen oder Makroporen (Regenwurmgänge, Wurzelkanäle und Klüfte) sehr schnell in tiefere Bodenschichten, während sich der grössere Teil langsam in den Feinporen oder Mikroporen des Bodens bewegt

Abb. 5. Innenansicht des Messtunnels.

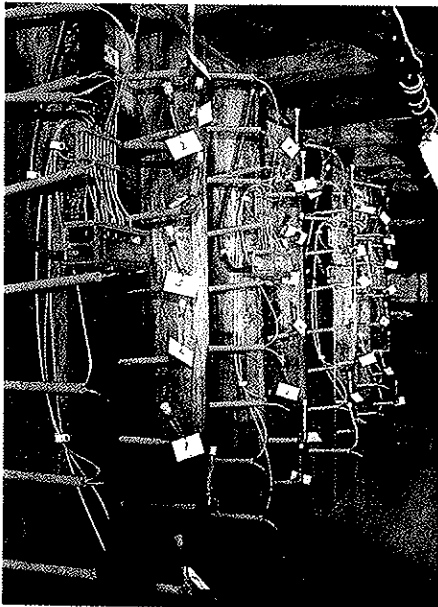


Abb. 6. In verschiedenen Tiefen des Oberbodens wurden mit Tensiometern und Saugkerzen Veränderungen im Wasser- und Nitratgehalt gemessen. Die Niederschläge wurden direkt auf dem Versuchsfelde mit Regenmessern aufgefangen.

Messen des Stofftransportes im heterogenen Untergrund eines Gemüsefeldes

Zur Eichung und Überprüfung eines Stickstoffmodelles (Gysi 1990) wurden zwischen 1987 und 1989 Feldversuche in einem Gemüsefeld bei Bülach durchgeführt. Die eine Hälfte des Versuchsfeldes wurde mit verschiedenen Gemüsen bepflanzt; die andere Hälfte blieb während der gesamten Versuchsdauer ohne Bepflanzung brach liegen, wurde aber gleich bearbeitet und gedüngt wie die Gemüseparzelle. Ein Bodenprofil von 12 m Länge und einer Tiefe von 2,6 m, quer zur Bearbeitungsrichtung des Feldes gelegen, wurde mit Tensiometern und Saugkerzen in einem Raster von 1 m Horizontalabstand und 20 cm Vertikalabstand ausgerüstet (Roth 1989). Die Bodenwasserspannung und der Nitratgehalt in der Bodenlösung wurde in monatlichen Abständen gemessen. Der volumetrische Wassergehalt wurde aus der Bodenwasserspannung anhand einer im Felde gemessenen Desorptionskurve errechnet; aus der Nitratkonzentration der Bodenlösung wurde sodann die Menge an Nitratstickstoff in jeder 20 cm Bodenschicht berechnet. In Anbetracht der räumlichen Variabilität des untersuchten Bodenprofils ist die Berechnung des volumetrischen Wassergehaltes aus einer Felddesorptionskurve als eine erste Annäherung zu betrachten. Zur Abschätzung der Netto-Stickstoffmineralisierung wurde ein Bebrütungsversuch durchgeführt. Der Ertrag und der Stickstoffentzug der Kulturen wurde zu verschiedenen Zeitpunkten während der Kulturzeit gemessen. Die Veränderungen der aus der Saugspannung errechneten Wassergehalte (Volumenprozent) und der Stickstoffgehalte (kg Nitratstickstoff pro Hektare in einer 20 cm Bodenschicht) sind in der Abb. 2 als Flächen gleicher Gehalte im ganzen Bodenprofil als Zeitvariable dargestellt. Die zwischen den Untersuchungsdaten festgestellten Veränderungen sind als Import-Export Bilanz für den untersuchten Standort separat für die Dauerbrache und die Kabiskultur als Balkendiagramme aufgeführt. Die Daten stammen aus dem Stickstoff-Simulationsprogramm (Gysi 1990), wobei als Auswaschung eine Verlagerung von Wasser und Stickstoff in eine Bodenschicht tiefer als 60 cm, also unter die Durchwurzelungstiefe, angenommen wurde. Das Modell differiert gegenüber gemessenen Daten um bis zu 10% für Wassergehalte und um bis zu 25% bei den Stickstoffgehalten.

Detaillierte Methodenbeschreibung siehe Roth 1989 und Gysi 1990. Gegen Einsendung von fünf 3,5 Inch Disketten können die Originaldaten des gesamten Feldexperimentes als Macintosh Excel File beim Autoren angefordert werden.

Abbildungen 1, 3 bis 7 illustrieren die Versuchsdurchführung.



Schnelle Infiltration Langsame Infiltration

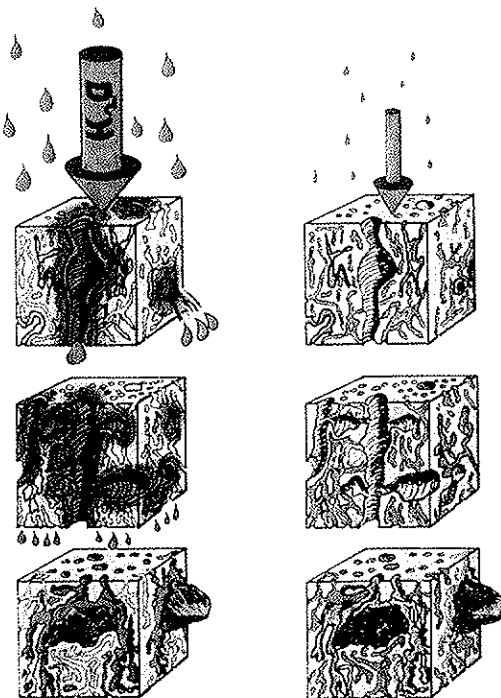


Abb. 7. Schematische Darstellung der schnellen und langsamen Infiltration von Wasser in den Boden. Ein Teil des Niederschlages gelangt über Grobporen, wie Regenwurmgänge, Wurzelkanäle und Klüfte, sehr schnell in tiefere Bodenschichten, während sich der meist grössere Teil langsam durch die Feinporen des Bodens bewegt. Der Anteil der Wasserbewegung durch die Grob- oder Feinporen hängt ab von den Bodeneigenschaften des Standortes, dem Wassergehalt des Bodens und der Intensität des Niederschlages (Schema J. Flüthler).

(Abb. 7). Der Anteil des Niederschlages, welcher schnell verlagert wird, hängt ab von der Art des Bodens (Ton, Schluff, Sandanteil; Ausbildung des Porensystemes durch Mikroorganismen und Bodentiere), der Intensität des Niederschlages und dem Wassergehalt des Bodens vor dem Niederschlag. Am Standort Bülach kann abgeschätzt werden, dass etwa zehn Prozent des Niederschlagswassers mit den darin gelösten Stoffen durch Makroporenfluss rasch in Bodenschichten unterhalb des Wurzelraumes verlagert und damit der Nutzung durch die Pflanze entzogen werden.

Rasche Stickstoffverlagerung kann am Beispiel der Stickstoffverteilung unter Dauerbrache zwischen dem 20. September und 13. Oktober illustriert werden: Während dieser Periode fielen auf die weitgehend gesättigte Dauerbrachfläche 90 mm Niederschläge. Schon nach drei Wochen trat in Bodentiefen unterhalb 2 m

eine deutliche Erhöhung der Nährstoffkonzentration auf, die bis zum folgenden Untersuchungsdatum aus dem beprobten Bodenprofil verschwunden war, das heisst konkret, durch Auswaschung verloren ging (Auswaschung aus Bereichen tiefer als 0,6 m werden durch das Stickstoffmodell nicht erfasst und erscheinen daher nicht in der Darstellung der Import-Export Bilanz).

Langsamer Stofftransport kann im Zentrum des Bodenprofils unter Dauerbrache in etwa 1,4 m Bodentiefe beobachtet werden. Die Wassergehalte sind in diesem Bereich immer verhältnismässig hoch, die Stickstoffgehalte aber gering. Eine dicht gelagerte Bodenzone mit wenig Grobporen kann diese Beobachtung erklären. Stickstoff umfliesst diese wenig durchlässige Zone. Aus der Darstellung vom 13. Oktober ist zudem ersichtlich, dass sich Stickstoff aus der Zone mit hohem Gehalt unter Dauerbrache vor allem in tieferen Bodenschichten nach rechts unter das Gemüsefeld bewegt. Diese seitliche Bewegung stimmt mit der leichten Hangneigung im Felde überein.

Düngung dem Pflanzenbedarf anpassen

Unter Dauerbrache werden bedeutende Stickstoffmengen, vor allem im Herbst und Winter ausgewaschen. Durch eine Gemüsekultur mit einem hohen Nährstoffbedarf kann die Stickstoffauswaschung auch bei einem hohen Stickstoffangebot aus Stickstoffmineralisierung und mineralischer Düngung zwar nicht ganz verhindert, aber deutlich verringert werden.

Diese Aussage gilt nur dann, wenn die mineralische Düngung dem Bedarf der Pflanzen angepasst wird. Das Stickstoffangebot an die Pflanze stammt im vorliegenden Beispiel zu zwei Dritteln aus der Stickstoffmineralisierung - die vom Produzenten nicht kontrolliert werden kann - und zu einem Drittel aus der mineralischen Düngung. Die Bemessung einer bedarfsgerechten mineralischen Düngung muss sich folglich nach der Menge des mineralisierten Stickstoffes richten, die anhand einer Bodenuntersuchung mit Schnellmethoden abgeschätzt werden kann. Stickstoffmodelle sollten als Ergänzung oder Ersatz der Bodenuntersuchungen bis zur Praxistauglichkeit weiter entwickelt werden.

DANK

Michael Gysi danke ich für die Bearbeitung der Abbildungen, dem Migros Genossenschaftsbund, der Migros Zürich und dem Kantonalen Amt für Wasserbau, Zürich, für die finanzielle Unterstützung des Projektes. Professor J. Flüthler, Institut für terrestrische Ökologie ETHZ, danke ich für die Durchsicht des Manuskriptes.

LITERATUR

Gysi Ch. 1990. Nitrogen dynamics in a vegetable field in Switzerland - an attempt at modelling and measurement of the nitrogen cycle. I. A soil-plant model for the nitrogen cycle. *Zeitschrift f. Pflanzenern., Bodenkd.* 153, 181-187. II. Validation of the nitrogen model versus field data. *Zeitschrift f. Pflanzenern., Bodenkd.* 153, 189-196.

Gysi Ch. 1991. Optimierung der Stickstoffdüngung im Gemüsebau und Belastung des Grundwassers. *Landwirtschaft Schweiz* 4 (10), 539-546.

Roth K. 1989. Stofftransport im wasserungesättigten Untergrund natürlicher, heterogener Böden unter Feldbedingungen. Dissertation ETH Zürich, Nr. 8907.

RÉSUMÉ

Transport d'eau et lessivage d'azote au courant d'une année

Un tunnel creusé sous un champ en production maraîchère a permis de mesurer le transport d'eau et d'azote de la surface du sol vers la nappe phréatique. La perte d'azote par lessivage se chiffre à 100 kg N par ha et année sous la culture maraîchère et à 300 kg N par ha et année sous le champ en jachère permanente. Deux tiers de l'azote assimilable proviennent de la minéralisation de la matière organique, un tiers de la fumure minérale. Une amélioration du conseil de fumure doit tenir compte de l'azote assimilable dans le sol, déterminé par une analyse de sol rapide (N-min).

SUMMARY

Water transport and leaching of nitrogen over the year

A tunnel underneath a vegetable field allowed to investigate water and nitrogen transport from the soil surface to the groundwater.

Nitrogen losses due to leaching amounted to 100 kg N per ha and year under the vegetable field compared to 300 kg N per ha and year under a permanent fallow field. Mineralisation of the organic matter contributed two thirds, mineral fertilizer one third of the available nitrogen. An improved fertilizer recommendation thus has to rely upon measurements of available nitrogen assessed by quick tests (N-min).

KEY WORDS: Water transport, nitrogen leaching, vegetables, field experiment, nitrogen cycle.