

Influence de la fumure organique et minérale sur le lessivage des éléments nutritifs

Ernst Spiess, Volker Prasuhn et Werner Stauffer,
 Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich
 Renseignements: Ernst Spiess, e-mail: ernst.spiess@art.admin.ch, tél. +41 44 377 73 49



Lysimètres à Berne-Liebefeld avec pois protéagineux et blé d'automne. (Photo: ART)

Introduction

Outre la volatilisation de l'ammoniac et la dénitrification, le lessivage des nitrates est la voie la plus importante de pertes d'azote (N) provenant de l'agriculture. Selon Heldstab *et al.* (2011), entre 27 000 et 41 000 t d'azote ont été lessivés dans les sols agricoles en Suisse en 2005. Le lessivage est influencé par un grand nombre de facteurs, dont les principaux sont la hauteur et la répartition des précipitations, la capacité de rétention d'eau du sol, l'évapotranspiration (influence des conditions météorologiques et de la culture), la fumure, la minéralisation de la matière organique du sol (influence du travail du sol et de la teneur en humus) et l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes. Dans la fumure, outre la quantité d'éléments nutritifs, le

moment et le procédé d'épandage, le type d'engrais joue également un rôle essentiel.

La plupart des exploitations agricoles en Suisse épandent non seulement des engrais minéraux, mais aussi du fumier et du lisier dans les grandes cultures. Une fumure exclusivement à base d'engrais minéraux (p. ex. dans les exploitations de grandes cultures sans production animale) ou exclusivement à base d'engrais de ferme (p. ex. dans les exploitations de grandes cultures avec élevage intensif de porcs et de volaille ou dans l'agriculture biologique) modifie-t-elle le lessivage des éléments nutritifs? Un essai avec des lysimètres pendant un assolement de sept ans a permis d'étudier les éventuelles différences entre trois procédés: fumure exclusivement minérale (= min), exclusivement organique (= org) et mixte organique-minérale (= org-min).

Matériel et méthodes

Lysimètres

L'essai a été mis en place de 2002 à 2009 sur neuf lysimètres du site de Berne-Liebefeld (Furrer et Stauffer 1980). Il s'agit de lysimètres non monolithiques d'une surface de 1 m² et d'une profondeur de 1,50 m. Pour mesurer l'eau d'infiltration, des augets basculeurs ont été utilisés selon le principe de Joss-Tognini. La taille des lysimètres utilisés permet d'obtenir des quantités d'eau d'infiltration de plus de 100 litres par mois. C'est pourquoi un dispositif a été mis au point permettant de prélever un petit échantillon proportionnel à l'écoulement (Furrer et Stauffer 1980). La quantité d'eau d'infiltration a été relevée chaque mois. Les échantillons pour l'analyse chimique ont été prélevés au même rythme.

Sol

En 1982, les neufs lysimètres ont été remplis de sol du site de Berne-Liebefeld (tabl. 1). Le sol a été placé en respectant les couches et le volume, et recompacté selon la densité mesurée sur le terrain. Les propriétés du sol brun lessivé sont typiques du Plateau suisse.

Assolement

De 1982 à 2000, les lysimètres ont été utilisés dans différents essais. Au printemps 2001, des pommes de terre ont été plantées pour rééquilibrer le sol et, après leur récolte, un mélange trèfle-graminées a été semé. En 2002, l'essai sur la fertilisation a débuté avec un assolement sur sept ans (maïs-ensilage – blé d'automne 1 – betteraves sucrières – blé d'automne 2 – pois protéagineux – orge d'automne – prairie temporaire). La prairie temporaire a été semée après la récolte de l'orge et rompue deux printemps plus tard peu avant le semis de maïs. Après le blé d'automne 1, du radis oléifère hybride non résistant au gel a été semé (*Raphanus sativus* x *Brassica oleracea*). Le blé d'automne 2 a été suivi de choux chinois hivernants (*Brassica chinensis* x *Brassica rapa*; Spiess *et al.* 2011). Le produit de la récolte de ces deux cultures dérobées a été extrait du lysimètre en octobre. Des relevés de rendement ont été effectués sur tous les produits et sous-produits végétaux obtenus. Leur teneur en azote et

Tableau 1 | Propriétés du sol contenu dans le lysimètre (terre végétale avant le début de l'essai en 2001, couche du sous-sol après la fin de l'essai en 2009)

	Argile (%)	Silt (%)	Sable (%)	pH _{H2O}	C _{org} (%)	N _{tot} (%)
Terre végétale	17	25	58	6,2	1,3	0,17
Couche du sous-sol	14	21	65	8,1	0,3	0,07

Résumé L'influence du type de fertilisation sur la quantité d'eau d'infiltration et sur le lessivage des éléments nutritifs durant un assolement a été étudiée au moyen de lysimètres, de 2002 à 2009, sur le site expérimental de Berne-Liebefeld. Une fumure exclusivement organique a permis d'obtenir des rendements végétaux légèrement supérieurs à une fumure exclusivement minérale ou à une fumure mixte organique et minérale. Cela s'explique sans doute entre autres par le fait qu'un essai lysimétrique permet une gestion optimale des engrais de ferme. Par contre, les trois procédés de fertilisation ne se différenciaient que très peu en ce qui concerne la quantité d'eau d'infiltration, la concentration de nitrates dans l'eau d'infiltration et la quantité d'éléments nutritifs lessivés. Ce dernier a été davantage influencé par les conditions climatiques et par la culture mise en place. Une durée d'essai plus longue aurait probablement permis de différencier davantage les procédés, étant donné l'arrière-effet de l'azote organique. Cet arrière-effet devrait entraîner de légères hausses des rendements au fil des ans, mais aussi une augmentation des pertes par lessivage due à une minéralisation plus importante de l'humus.

en sels minéraux a également été analysée, de façon à calculer les éléments nutritifs prélevés par les plantes.

Travail du sol

En général, le sol était travaillé manuellement à 20 cm de profondeur avant les cultures principales et à 10 cm avant les cultures dérobées. Lorsqu'aucune culture dérobée ne suivait la culture principale, la parcelle restait en friche jusqu'au travail du sol pour la prochaine culture principale (champ récolté ou envahissement par les mauvaises herbes).

Fertilisation

La fertilisation s'est basée sur les recommandations de fumure des stations fédérales de recherche en vigueur à l'époque (Flisch *et al.* 2001). La fumure azotée était répartie en plusieurs apports dans les cultures principales. L'essai a tenté de fertiliser tous les procédés avec la même quantité d'azote disponible (tabl. 2). Dans le procédé minéral, l'azote a été épandu sous forme de nitrate d'ammoniac, le phosphore sous forme de supertriple, et le potassium sous forme de Patentkali et de Kali 60. Dans le procédé mixte organique-minéral, du fumier a été épandu dans le maïs-ensilage, dans les betteraves à

Tableau 2 | Fertilisation dans les trois procédés pendant toute la durée de l'assolement (en kg ha⁻¹ an⁻¹)

Procédé	N _{tot}	N _{sol}	P	K	Ca	Mg
Min	123	123	36	156	21	28
Org-min	157	112	41	193	50	37
Org	213	102	26	305	76	25

N_{tot} = azote total; N_{sol} = azote soluble (notamment ammonium).

sucre et dans la prairie temporaire. Du lisier a été épandu dans le maïs-ensilage, ainsi que sur la prairie temporaire. Par contre, les céréales, les pois protéagineux et les cultures dérobées ont reçu une fumure exclusivement minérale.

Dans le procédé organique, les betteraves sucrières ont été fertilisées avec du fumier, les céréales ainsi que la première culture dérobée avec du lisier et le maïs-ensilage, la prairie temporaire et la deuxième culture dérobée avec du lisier et du fumier. Le plan de fumure s'est basé sur la teneur indiquée pour les engrais minéraux et sur les résultats des analyses d'éléments nutritifs pour le fumier et le lisier.

Précipitations

Jusqu'en juin 2006, les quantités de précipitations indiquées provenaient de la station de MeteoSuisse, distante de 300 m. Après le déplacement du site expérimental, elles provenaient du site de Berne-Zollikofen, situé à 7,5 km. Les sommes annuelles étaient calculées du 1^{er} avril de l'année en cours jusqu'au 31 mars de l'année suivante. Sur les sept années, les précipitations s'élevaient en moyenne à 1046 mm par année et variaient entre 867 mm (2003/04) et 1274 mm (2006/07; fig. 1).

Résultats et discussion

Rendements

Les rendements dans les lysimètres étaient en général élevés (tabl. 3). C'est le maïs ensilage qui a dépassé le plus la moyenne de l'agriculture suisse. Les conditions d'exploitation optimales et l'effet d'oasis dû à la petite

surface du lysimètre (1 m²) ont largement contribué aux rendements végétaux élevés.

Le procédé organique a entraîné les rendements les plus élevés. Les apports de lisier et de fumier étant essentiellement basés sur la teneur en ammonium, le procédé organique a reçu moins de phosphore (P) et nettement plus de potassium (K) que les deux autres procédés (tabl. 2), où l'emploi exclusif ou complémentaire d'engrais minéraux a permis une fertilisation plus ciblée. L'apport plus important de potassium dans le procédé organique devrait avoir influencé le niveau des rendements vu les teneurs plutôt faibles du sol en potassium. Dans des essais de plusieurs années avec des lysimètres dans des grandes cultures, Gutser et Dosch (1996) mais aussi Ryser et Pittet (2000) ont observé des rendements aussi élevés avec une fumure minérale qu'avec une fumure mixte minérale et organique.

Les bons rendements obtenus dans cet essai avec la fumure organique sont certainement aussi liés à la gestion des engrais de ferme. En effet, il est plus facile de les gérer dans le cadre d'un essai que dans la pratique agricole, car les coûts et le temps requis ont une importance moindre. Dans la pratique, il est souvent difficile d'estimer correctement la quantité et la teneur en éléments nutritifs des engrais de ferme (Menzi *et al.* 1994). Les teneurs du lisier notamment peuvent varier considérablement. Pour le fumier, l'estimation du volume et du poids spécifique est complexe. Dans un essai en revanche, les engrais de ferme sont pesés avant l'épandage et les teneurs en éléments nutritifs sont analysées en laboratoire. Dans la pratique, les parcelles sont exploitées avec des machines lourdes et dans des conditions météorologiques défavorables avec compactage du sol, tandis que dans les lysimètres, toutes les mesures culturales sont effectuées à la main et dans de bonnes conditions météorologiques. Grâce à une meilleure structure du sol, le lisier pénètre plus rapidement dans le sol et le fumier peut être enfoui immédiatement après l'épandage, ce qui réduit les pertes d'ammoniac. Cette gestion optimale des engrais de ferme permet une plus grande efficacité de l'azote minéral et organique.

Tableau 3 | Rendements des différentes cultures principales et cultures dérobées des trois procédés de fumure (en dt de matière fraîche ha⁻¹; valeurs en italique en dt de matière sèche ha⁻¹)

Procédé	PTP	ME	BA1	CD1	BS	BA2	CD2	PP	OA	PTA	PT1
	2002	2002	2003	2003	2004	2005	2005	2006	2007	2007	2008
Min	13	259	59	54	910	71	23	47	78	24	112
Org-min	8	250	63	45	933	75	24	45	73	36	155
Org	10	259	57	56	1043	81	41	48	71	34	180

PP = pois protéagineux; PT1 = 1^{ère} année d'exploitation principale de la prairie temporaire; PTA = semis de la prairie temporaire en automne; PTP = exploitation de la prairie temporaire au printemps avant le semis de maïs; ME = maïs-ensilage; OA = orge d'automne; BA1 = blé d'automne 1; BA2 = blé d'automne 2; CD1 = culture dérobée 1; CD2 = culture dérobée 2; BS = betteraves sucrières.

Le prélèvement d'éléments nutritifs par les plantes était le plus élevé dans le procédé organique, pour tous les éléments nutritifs (tabl. 4). Ce phénomène est dû aux rendements supérieurs et, dans le cas du potassium, aux teneurs plus élevées de cet élément – notamment dans les végétaux comme l'herbe, la paille de blé et les fanes de betteraves sucrières.

Formation d'eau d'infiltration

La quantité d'eau d'infiltration dépendait largement de la hauteur des précipitations (fig. 1a). La quantité d'eau d'infiltration était la plus élevée lors des deux années de précipitations maximales (2002/03 et 2006/07), et à son minimum lors des deux années sèches (2003/04 et 2004/05). Il est frappant de constater que les fluctuations annuelles de la quantité d'eau d'infiltration étaient presque deux fois plus élevées que pour les précipitations. Hormis la culture en place, la température (p. ex. canicule de l'été 2003) et les variations des réserves d'eau du sol au cours de l'année jouent également un rôle. La plupart des années, les quantités d'eau d'infiltration enregistrées dans le procédé organique étaient légèrement supérieures à celles des deux autres procédés, bien que les rendements et les prélèvements d'éléments nutritifs aient tendance à être plus élevés.

Concentration en nitrates de l'eau d'infiltration

Les concentrations en nitrates ont considérablement varié d'une année à l'autre, avec des valeurs comprises entre 10 mg NO₃⁻ L⁻¹ en 2003/04, années à faibles précipitations, et près de 100 mg NO₃⁻ L⁻¹ en 2006/07, années à fortes précipitations (fig. 1b). Outre les précipitations, la culture avait également une influence considérable sur la concentration en nitrates. Pendant trois années sur sept, et en moyenne sur toute la durée de l'essai, la valeur de tolérance pour l'eau potable (40 mg NO₃⁻ L⁻¹) a été dépassée dans tous les procédés. Il faut toutefois préciser que les concentrations en nitrates ont été mesurées dans l'eau d'infiltration à une profondeur de 1,50 m et non dans un captage d'eau potable. Parmi les trois procédés, c'est le procédé organique-minéral qui présentait la valeur la plus élevée en moyenne.

Tableau 4 | Prélèvement d'éléments nutritifs par les plantes dans les procédés pendant toute la durée de l'assolement (en kg ha⁻¹ an⁻¹)

Procédé	N	P	K	Ca	Mg
Min	228	39	210	92	32
Org-min	250	43	241	101	33
Org	263	45	302	111	34

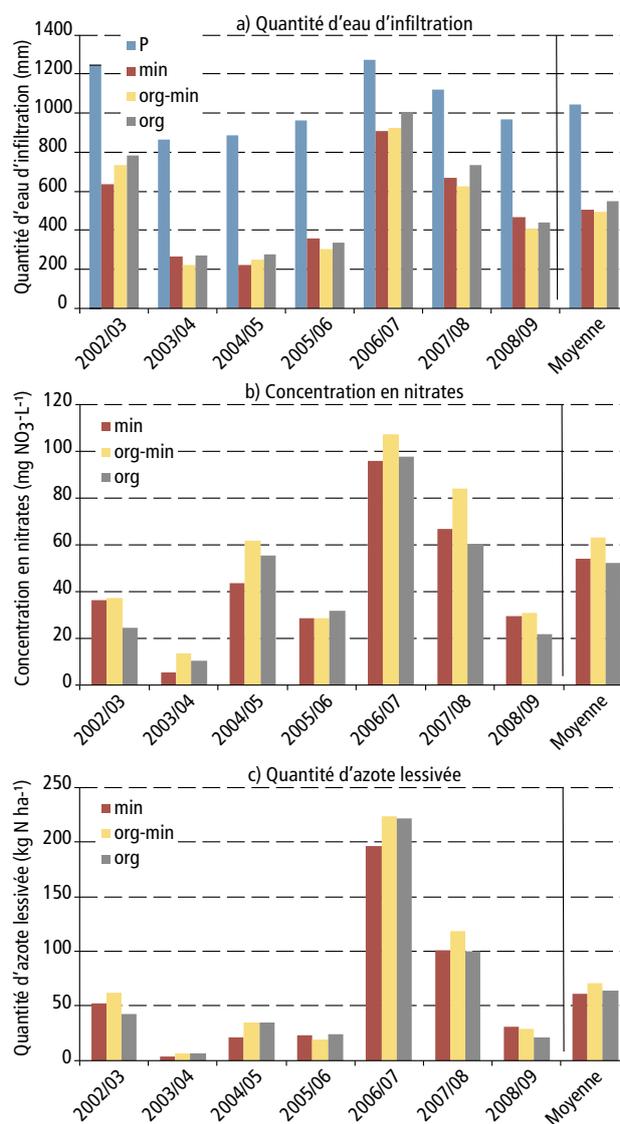


Figure 1 | Quantités d'eau d'infiltration, concentrations en nitrates et quantités d'azote lessivées dans les trois procédés et précipitations (P) durant les sept années d'essai.

Quantité d'azote lessivé

Les fluctuations annuelles étaient plus importantes pour la quantité d'azote lessivée que pour la quantité et la concentration en nitrates de l'eau d'infiltration. En 2006/07, environ 200 kg N ha⁻¹ ont été lessivés, soit presque 40 fois plus d'azote qu'en 2003/04 (5 kg N ha⁻¹; fig. 1c). Les plus grandes pertes d'azote ont été mesurées durant l'année à plus fortes précipitations, et avec une combinaison culturale exposée aux risques de lessivage (pois protéagineux – orge d'automne). C'est aussi en 2006–07 que la quantité d'eau d'infiltration et la concentration en nitrates étaient les plus élevées. Par contre, la quantité de nitrates lessivés était réduite les années à faibles précipitations et où la couverture végétale était suffisante en hiver (prairie temporaire et cultures dérobées; Spiess *et al.* 2011). Les pertes par lessi-

Tableau 5 | Quantités de potassium, calcium et magnésium lessivées dans les trois procédés (en kg ha⁻¹ an⁻¹). Moyenne des sept années d'essai

Procédé	Potassium	Calcium	Magnésium
Min	3,4	265	9,7
Org-min	2,7	279	10,1
Org	2,2	234	10,8

vage étaient sans doute légèrement plus élevées dans cet essai lysimétrique que dans la pratique, car la minéralisation de l'azote était plus importante du fait de la structure favorable du sol. La teneur en humus légèrement en baisse dans le procédé minéral en dépit d'un bon assolement indique également une forte minéralisation.

Les quantités d'azote lessivées sur l'ensemble de l'essai étaient relativement similaires dans les trois procédés de fertilisation. Pour le potassium, le calcium et le magnésium, les différences entre les procédés étaient également minimales (tabl. 5). Ryser et Pittet (2000) ont obtenu des résultats similaires dans un essai avec fumure minérale et fumure organique-minérale, mais le lessivage des nitrates était légèrement supérieur dans le procédé organique minéral. Gutser et Dosch (1996) ainsi que Thomsen et Christensen (1999) ont aussi trouvé des pertes de nitrates plus importantes avec une fumure organique minérale par rapport à une fumure exclusivement minérale. Thomsen et Christensen ont expliqué le lessivage plus élevé par l'azote organique contenu dans le lisier, qui n'est pas parvenu à augmenter le rendement de l'orge cultivée pendant dix ans en monoculture.

Arrière-effet de l'azote organique

L'effet de l'azote est plus difficile à estimer dans les engrais organiques que dans les engrais minéraux. Après l'épandage, une partie de l'azote minéral peut se volatiliser sous forme d'ammoniac. La majeure partie de l'azote organique gagne les réserves du sol et fait augmenter les teneurs en humus, sachant qu'il peut s'écouler des décennies avant que la teneur en humus ne se rééquilibre (Gutser et Dosch 1996). L'humus ne se minéralise que lentement au fil des années et des décennies. A Rothamsted, en Angleterre, une parcelle de l'essai longue durée «Hoosfield» a été fertilisée avec du fumier pendant 20 ans, de 1852 à 1871, puis n'a plus été fertilisée. Plus de 100 ans après le dernier apport d'engrais, cette parcelle contenait toujours plus d'humus que la parcelle témoin qui n'avait jamais été fertilisée (Jenkinson *et al.* 1991). Lorsque l'azote issu des engrais organiques et lié dans l'humus se minéralise au bout de plusieurs années, les plantes en assimilent une partie. C'est pourquoi il est probable que l'effet de l'azote contenu

dans un engrais organique augmente légèrement, même plusieurs dizaines d'années après l'épandage. Dans le cas d'une fumure organique, Gutser et Dosch (1996), ainsi que Vullioud *et al.* (2006) ont observé que plus leurs essais sur le terrain duraient longtemps, plus les rendements augmentaient et mieux l'azote était exploité grâce à l'arrière-effet de l'azote organique.

La minéralisation de l'azote organique ne suit toutefois pas toujours les besoins des plantes de manière synchrone (Dahlin *et al.* 2005). Elle se produit souvent en automne, ce qui peut accroître considérablement le lessivage de l'azote en hiver (Hofer et Jäggli 1975). Si une quantité toujours plus importante d'azote organique est minéralisée du fait de l'augmentation des teneurs en humus, les pertes par lessivage devraient aussi s'accroître légèrement au fil du temps. C'est le cas aussi des pertes par dénitrification. Dans le cadre d'un essai en plein champ, une parcelle de maïs a été fertilisée avec du lisier pendant huit ans. La neuvième année, elle n'a reçu aucun apport en lisier. Malgré tout, les émissions de N₂O étaient plus élevées que dans le procédé témoin qui n'avait jamais reçu d'apports de lisier (Gutser *et al.* 2010). Tous ces résultats montrent que si cet essai lysimétrique avait duré plus longtemps, les rendements et les quantités d'éléments nutritifs lessivés dans les procédés de fumure auraient pu être davantage différenciés. Avec la fumure organique, les rendements et les pertes par lessivage auraient probablement légèrement augmenté.

Conclusions

- Au cours d'un essai lysimétrique de sept ans, des rendements végétaux légèrement plus élevés ont été obtenus avec une fumure exclusivement organique par rapport à une fumure exclusivement minérale ou une fumure mixte (organique et minérale). Les bons rendements obtenus avec la fumure organique sont probablement dus au fait qu'un essai à petite échelle permet une gestion optimale des engrais de ferme.
- Le volume d'eau d'infiltration, sa concentration en nitrates et les quantités d'azote, de potassium, de calcium et de magnésium lessivés ont beaucoup fluctué d'une année à l'autre, essentiellement en raison de la culture mise en place et des différentes conditions climatiques.
- Le type d'engrais n'a que peu influencé la formation d'eau d'infiltration et le lessivage des éléments nutritifs. Il est probable qu'avec une durée de l'essai plus longue, l'arrière-effet de l'azote organique entraîne une légère augmentation des rendements des cultures végétales, mais aussi une augmentation des quantités de nitrates lessivés, à cause des teneurs plus importantes en humus dans la fumure organique. ■

Riassunto

Effetto della concimazione organica e minerale sul dilavamento delle sostanze nutritive

Tra il 2002 e il 2009 si è studiato presso l'impianto lisimetrico di Berna-Liebefeld, l'influsso di forme di concimazione sulla loro percolazione nelle acque freatiche ed il dilavamento di elementi nutritivi in una parcella sottoposta a rotazione colturale. La concimazione puramente organica ha fornito rese vegetali leggermente superiori a quelle raggiunte con una concimazione puramente minerale o organico-minerale. Tale differenza potrebbe essere stata influenzata dall'uso dei lisimetri e dalla conseguente ottimale gestione del concime aziendale. Tuttavia, i tre metodi di concimazione si differenziavano soltanto in maniera marginale per quanto concerne la loro percolazione nelle acque freatiche, le concentrazioni di nitrati contenuti in essa ed il carico di sostanze nutritive dilavate. Sono state, al contrario, le condizioni climatiche ed il tipo di coltura ad avere un impatto maggiore su tali fattori. Se la sperimentazione fosse stata condotta su un arco di tempo maggiore, si sarebbero riscontrate maggiori differenze tra i metodi di concimazione, dovute al protrarsi dell'azione dell'azoto organico. Quest'ultima da un lato determina lievi aumenti di resa nel corso degli anni, ma dall'altro comporta anche un aumento delle perdite dovute a dilavamento a causa di una maggiore mineralizzazione dell'humus.

Bibliographie

- Dahlin S., Kirchmann H., Kätterer T., Gunnarsson S. & Bergström L., 2005. Possibilities for improving nitrogen use from organic materials in agricultural cropping systems. *Ambio* **34**, 288–295.
- Flisch R., Sinaj S., Charles R. & Richner W., 2009. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). *Agrarforschung* **16** (2), 1–100.
- Furrer O. J. & Stauffer W., 1980. Die neue Lysimeteranlage der Forschungsanstalt Liebefeld-Bern. *Jb. Schweiz. Naturforsch. Ges., Wiss. Teil* **1**, 53–57.
- Gutser R. & Dosch P., 1996. Cattle-slurry – ¹⁵N turnover in a long-term lysimeter trial. *Fertilizers and environment* (Eds. C. Rodriguez-Barrueco). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 345–350.
- Gutser R., Ebertseder T., Schraml M., von Tucher S. & Schmidhalter U., 2010. Stickstoffeffiziente und umweltschonende organische Düngung. *KTBL-Schrift* **483**, 31–50.
- Heldstab J., Reutemann J., Biedermann R. & Leu D., 2010. Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. *Umwelt-Wissen* **1018**, Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne, 128 p.
- Hofer H. & Jäggi F., 1975. Probleme bei der umweltgerechten Anwendung von Düngemitteln. *Mitt. Schweiz. Landw.* **23**, 89–111.
- Jenkinson D. S., 1991. The Rothamsted long-term experiments: are they still of use? *Agron. J.* **83**, 2–10.

Summary

Influence of organic and mineral fertilizers on nutrient leaching

Between 2002 and 2009 the influence of fertilizer type on drainage water formation and nutrient leaching was investigated in one crop rotation at the Bern-Liebefeld lysimeter station. Slightly higher crop yields were obtained with purely organic fertilizer than with pure mineral or organic-mineral fertilizers. One of the reasons for this may be that optimum manure management is possible in a lysimeter trial. However the three fertilizer methods differed only slightly in amounts of drainage water, drainage water nitrate concentrations and leached nutrient loads. These were much more strongly influenced by climatic conditions and the crop cultivated. A greater differentiation between the treatments could presumably have been achieved with a longer trial period because of the long-term after-effects of organic nitrogen. On the one hand these after-effects produce slight yield increases over the years, but on the other hand an increase in leaching losses can be expected owing to greater humus mineralization.

Key words: drainage water, fertilization, leaching, lysimeter, nitrate.

- Menzi H., Besson J.-M. & Frick R., 1994. Specific norm values: a tool to optimize nutrient efficiency of manure and to reduce ammonia emissions. In: *Animal waste management* (Ed. J. Hall). Proc. of the 7th technical consultation on the ESCORENA network on animal waste management, Bad Zwischenahn (D), 17–20 Mai 1994, FAO, Rome, *REUR Technical Series* **34**, 345–350.
- Ryser J.-P. & Pittet J.-P., 2000. Influence du sol et de la fumure sur les cultures et le drainage des éléments fertilisants. *Revue suisse Agric.* **32**, 159–164.
- Spies E., Prasuhn V. & Stauffer W., 2011. Einfluss der Winterbegrünung auf Was-serhaushalt und Nitratauswaschung. In: *Bericht über die 14. Gumpensteiner Lysimetertagung*. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irnding, 213–215. Accès: http://www.raumberg-gumpenstein.at/c/index.php?option=com_docman&Itemid=100139&task=doc_download&gid=4383&lang=de [7.6.2011].
- Thomsen I. K. & Christensen B. T., 1999. Nitrogen conserving potential of successive ryegrass catch crops in continuous spring barley. *Soil Use Manage.* **15**, 195–200.
- Vulliod P., Neyroud J.-A. & Mercier E., 2006. Efficacité de différents apports organiques et d'un engrais minéral azoté à Changins (1976–2004). *Revue suisse Agric.* **38**, 173–183.