

Identification des surfaces qui contribuent démesurément à la pollution des eaux

Martin Frey¹, Nadine Konz², Christian Stamm¹ et Volker Prasuhn²

¹Eawag, 8600 Dübendorf

²Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich

Renseignements: Christian Stamm, e-mail: christian.stamm@eawag.ch, tél. +41 58 765 55 65



L'écoulement des eaux sur les surfaces herbagères intensives entraîne un important ruissellement de phosphore. (Photo: ART)

Introduction

Les produits phytosanitaires (PP) utilisés dans l'agriculture et les éléments fertilisants, notamment le phosphore (P) et l'azote (N), peuvent s'écouler en dehors des parcelles par ruissellement ou lessivage et venir contaminer les eaux. Les PP peuvent perturber les organismes sensibles qui vivent dans les eaux et un apport excessif d'éléments fertilisants entraîne l'eutrophisation des lacs. Les sédiments issus de l'érosion des sols peuvent colmater le fond des eaux, c'est-à-dire boucher les pores et détruire ainsi les zones de reproduction des poissons.

L'agriculture recherche des mesures pour limiter la contamination des eaux; des mesures qui soient à la fois

très efficaces, peu coûteuses, et qui entraînent le moins de restrictions possibles de la production agricole. La thèse selon laquelle seule une petite partie d'un bassin versant contribue à l'écoulement pendant des précipitations (Hewlett et Hibbert 1967) ouvre donc des perspectives intéressantes. Comme les substances contaminant les cours d'eau sont essentiellement transportées par l'eau, il est relativement évident que la pollution des eaux par des substances étrangères est également due à une partie seulement du bassin versant. Ce concept offre la possibilité d'agir de manière ciblée sur un petit nombre de surfaces déterminées et d'obtenir une amélioration considérable de la contamination des eaux, sans imposer de charges supplémentaires à l'ensemble des surfaces agricoles.

Dans la littérature scientifique, cette thèse est largement répandue. Les surfaces avec un gros potentiel de pertes sont appelées «surfaces contributrices» (*critical source areas, contributing areas* ou *hydrologically sensitive areas*). Les surfaces sont déclarées «contributrices», lorsqu'elles sont hydrologiquement actives et reliées au réseau hydrographique et qu'il existe en plus une source de substances lessivables.

Le risque de perte de substances dépend largement du mode d'exploitation appliqué. On distingue le risque actuel, qui dépend de l'assolement, de la fumure, du travail du sol et d'autres facteurs similaires, du risque potentiel, spécifique au site (sol, relief, climat, réseau hydrographique).

L'Office fédéral de l'environnement OFEV a mandaté Agroscope Reckenholz-Tänikon ART et l'Eawag pour étudier dans quelle mesure les connaissances actuelles permettent d'utiliser le concept de surfaces contributrices pour les éléments fertilisants, les produits phytosanitaires et l'érosion dans l'agriculture suisse, dans le but de minimiser la contamination des eaux par des sources diffuses. Afin d'appliquer le concept dans la vulgarisation agricole et le contrôle, les surfaces contributrices doivent pouvoir être déterminées de manière fiable avec les données disponibles. C'est pourquoi les instruments utilisés pour identifier les surfaces contri-

butrices sont indiqués, ainsi que les bases de données nécessaires. Ces instruments ont été appliqués à titre exemplaire dans quatre exploitations tests. Ces expériences ont permis d'établir des recommandations quant à la marche à suivre à l'avenir.

Matériel et méthodes

Instruments permettant de cartographier les surfaces contributrices

Modèle d'érosion AVErosion

Les modèles de pronostics sont les plus avancés dans le domaine de l'érosion. Il existe un grand nombre d'études sur l'évaluation de ces outils. Des approches simples permettant d'estimer les surfaces contributrices sont basées sur l'équation universelle des pertes de sol (*Universal Soil Loss Equation, USLE*). Le modèle AVErosion, actuellement employé en Suisse, en est inspiré. Il a permis d'établir une carte des risques d'érosion à haute résolution pour tout le territoire (Gisler *et al.* 2010).

Indice P

Il existe également différents outils pour calculer les pertes de phosphore des surfaces contributrices. L'indice P, développé aux Etats-Unis, est très répandu et est utilisé aujourd'hui sous une forme adaptée dans de nombreux pays (Gburek et Sharpley 1998). Il permet de classer les caractéristiques spatiales relatives au risque de transfert et aux sources de phosphore en catégories de risques, à les pondérer et à les assembler. L'indice obtenu peut être utilisé pour comparer la vulnérabilité de différentes parcelles.

Produits phytosanitaires

A ce jour, il n'existe pas d'indices pour les pertes de produits phytosanitaires du même type que l'indice P. Comme les processus de transfert du phosphore et des produits phytosanitaires sont très similaires, il est possible de se référer aux expériences faites dans le domaine du phosphore. Les surfaces présentant des risques potentiels de ruissellement des produits phytosanitaires sont des surfaces hydrologiquement actives. Il existe plusieurs approches pour différencier ce type de surfaces (Agnew *et al.* 2006; Srinivasan et McDowell 2009). La méthode consistant à subdiviser le risque de transfert en un risque d'écoulement dû à la saturation et un risque d'écoulement lié à un dépassement de la capacité d'infiltration est très prometteuse. Le risque dû à la saturation est représenté par l'indice topographique (Beven et Kirkby 1979), qui reflète la situation dans le relief et le risque lié à l'infiltration par la carte pédologique. Sur la base d'informations sur les sols et le relief, une méthode similaire permet d'établir quels processus d'écoulement (*domi-*

Résumé ■ Les sédiments issus de l'érosion ainsi que le ruissellement de produits phytosanitaires et d'éléments fertilisants provenant de l'agriculture polluent nos cours d'eau. Différentes études de terrain indiquent que les surfaces dont sont issues ces émissions sont limitées dans l'espace. Le phosphore, les produits phytosanitaires et les sédiments contaminent les eaux principalement à la suite d'un écoulement rapide qui se produit sur un petit pourcentage de la surface agricole. Ces surfaces dites contributrices représentent en moyenne environ 20 % de la surface agricole. C'est pour l'érosion que le concept de surfaces contributrices est le mieux défini, car les sédiments sont très faciles à identifier après des précipitations. Pour le phosphore, ce concept est surtout utilisé à l'étranger, mais n'est confirmé que par un petit nombre de mesures. Les données sont encore plus rares pour les produits phytosanitaires. Le concept ne convient pas pour l'azote. Il existe différents instruments pour identifier les surfaces contributrices. Dans cette étude, quelques-uns de ces instruments ont été testés dans quatre exploitations. Les agriculteurs ont estimé que l'identification des surfaces contribuant à l'érosion était réaliste. Les surfaces contributrices de l'érosion et du ruissellement ne se recoupent souvent pas. L'identification des surfaces contributrices est limitée par le manque d'informations géographiques. La Suisse ne dispose d'informations sur les sols avec une résolution suffisamment élevée que pour un petit nombre de zones.

nant runoff processes, DRP) sont à craindre, et où (Schmocker-Fackel *et al.* 2007). Les surfaces présentant un risque de ruissellement pour les produits phytosanitaires réagissent rapidement et déclenchent un écoulement en surface ou par des drainages. En Suisse, il existe déjà une carte DRP complète pour le canton de Zurich.

Résultats et discussion

Réflexions sur la dynamique et le bilan massique

Des mesures sur le terrain montrent que le phosphore, les produits phytosanitaires et les sédiments se déversent principalement dans les eaux pendant les gros écoulements. Ce sont surtout les processus d'écoulement rapides (ruissellement en surface ou transport par pores grossiers dans les drainages) qui sont en cause. Ces processus se produisent de manière isolée géographiquement. Au contraire, l'azote gagne les eaux de surface principalement avec l'écoulement de base alimenté par les eaux souterraines. ➤

A partir de réflexions simples sur le bilan massique, il est possible d'estimer grossièrement l'extension minimale des surfaces contributrices pour les différents éléments. Des mesures effectuées dans les bassins hydrologiques montrent que souvent de grandes quantités – parfois plus de 30 % de la quantité d'azote utilisée dans le bassin hydrologique – peuvent être retrouvées dans l'effluent. Pour le phosphore en revanche, les pertes sont généralement de l'ordre de 3 à 5 % seulement, et pour les produits phytosanitaires, elles étaient même souvent en-dessous de 1 % de la quantité épanchée. Le ruissellement de phosphore et de produits phytosanitaires peut donc se limiter à une petite partie du bassin hydrologique. Pour l'azote par contre, la surface contributrice est sans doute relativement grande. La contamination par l'azote est donc un problème de surface, qui ne peut souvent pas être résolu par un management adapté appliqué à une petite partie de la zone.

Analyse des études de terrain disponibles

Erosion

Il n'est pas facile d'attribuer les pertes de matières mesurées dans l'effluent à des surfaces contributrices dans le bassin versant. C'est avec l'érosion que l'identification réussit le mieux, car les traces de ce phénomène sont encore bien visibles après des précipitations (fig. 1). L'étude longue durée sur l'érosion dans la région de Friesenberg montre que la partie de la surface touchée par l'érosion représentait en moyenne environ 16 % par an (Prasuhn *et al.* 2007). Si l'on considère les événements d'érosion individuellement, le pourcentage était souvent nettement plus faible. A l'échelle mondiale, les études sur l'érosion fournissent des valeurs semblables ou plus basses. Si l'on tient compte du lien avec des cours d'eau, le pourcentage de surfaces contributrices diminue encore considérablement, car de petites barrières topographiques suffisent déjà à retenir l'entrée des sédiments dans les eaux.

Phosphore

Contrairement à l'érosion, les pertes de matières dissoutes sont pratiquement impossibles à retracer, car il ne reste plus aucune trace du processus de transport. Il n'existe donc que peu d'études de terrain confirmant empiriquement le concept de surfaces contributrices. Différentes études sur le ruissellement du phosphore en Pennsylvanie (USA) sont néanmoins intéressantes. Comme chez nous, les pertes de phosphore ont lieu pendant un petit nombre de fortes précipitations. En général, l'écoulement se forme principalement à partir du ruissellement superficiel sur des surfaces saturées situées le long des cours d'eau (Gburek et Sharpley 1998). Le



Figure 1 | Les «surfaces contributrices» à la contamination des eaux du fait de l'érosion du sol sont faciles à cartographier sur le terrain. Rigole d'érosion qui aboutit dans une ravine et via cette dernière, dans les cours d'eau. (Photo: Thomas Ledermann, CDE Université de Berne)

phénomène est amplifié si des précipitations importantes tombent sur un sol dont la teneur en eau est déjà élevée. Pour les écoulements moyennement importants qui se produisent chaque année, le pourcentage des surfaces contributrices était d'environ 20 %. Ces surfaces étaient responsables d'environ la moitié des pertes totales de phosphore pendant une série de mesures de dix ans. Pour deux événements extrêmes, toute la zone a pratiquement contribué au ruissellement.

Produits phytosanitaires

La variation géographique des pertes de produits phytosanitaires a été analysée intensivement dans la région du lac de Greifen. Les mesures ont montré que 76 % des pertes provenaient des champs de maïs d'un sous-bassin versant, qui représentent 44 % de la surface cultivée en maïs dans l'ensemble du bassin versant (Leu *et al.* 2004). Une autre étude dans la même région a permis de cerner plus précisément encore les surfaces contributrices (Gomides Freitas *et al.* 2008), montrant que sur quelques ares d'une même parcelle, les pertes pouvaient être jusqu'à 30 fois plus élevées que sur le reste de la parcelle. Ces études ont prouvé que les liaisons hydrologiques entre les différentes parties d'une parcelle et le système hydrologique sont décisives (Frey *et al.* 2009). Des barrières topographiques de petite envergure peuvent ainsi



Figure 2 | Le chemin forme une barrière topographique qui empêche l'eau ruisselant à la surface du champ de s'écouler dans le ruisseau à droite de la route. (Photo: Martin Frey, Eawag)

empêcher que les produits phytosanitaires lessivés ne gagnent les cours d'eau. Dans la région étudiée, seul un tiers de la surface était relié avec les cours d'eau (fig. 2). L'eau retenue se réinfiltrait dans le sol. Dans les sols drainés, une partie peut arriver dans les cours d'eaux par l'intermédiaire des macropores et du drainage.

Dans l'ensemble, selon la littérature scientifique, le concept de surfaces contributrices pour l'érosion, les pertes de phosphore et de produits phytosanitaires, peut être confirmé empiriquement. Les données disponibles indiquent que dans de nombreux cas, environ 80 % des pertes proviennent d'environ 20 % de la surface. Pour l'azote par contre, le problème concerne généralement l'ensemble de la surface.

Evaluation des outils disponibles

Erosion: afin d'estimer la précision du modèle d'érosion AVErosion, les pronostics du modèle ont été comparés avec les séries de mesures d'érosion effectuées pendant dix ans sur 203 surfaces de la région de Frienisberg. Le système a permis d'identifier les surfaces à risque de fortes pertes par érosion.

Phosphore: pour l'évaluation des différents indices de P, la quantité de données disponibles est nettement moins bonne que pour l'érosion. C'est ce que montre notre analyse à partir d'études publiées, résumée dans la figure 3. La figure montre la fiabilité des indices P pour identifier les surfaces contributrices, définies ici comme 20 % des surfaces affichant les taux de pertes les plus élevées. Les études sur des parcelles tests ne considèrent généralement que l'influence de la teneur du sol en phosphore et de la fertilisation, mais pas la qualité des prévisions relatives au risque de transport. Divers travaux indiquent que les incertitudes sont considérables à ce niveau. La connectivité avec les eaux est souvent totalement négligée. Il n'existe pratiquement aucune mesure à l'échelle des parcelles connectées à des

eaux et le nombre de mesures est généralement limité. Pour les pertes de phosphore, il faut distinguer le phosphore particulaire du phosphore dissous. Le phosphore particulaire est un élément du sol qui a été érodé, tandis que le phosphore dissous est lessivé dans la phase aqueuse et est déterminant pour l'eutrophisation des cours d'eau. Comme les prévisions relatives à l'érosion sont très avancées, il est possible d'identifier les surfaces à risque pour le transport de phosphore particulaire.

Produits phytosanitaires: pour les produits phytosanitaires, les prévisions de risque effectuées dans cette étude reposent sur l'indice topographique Topindex et sur la méthode DRP. Les surfaces contributrices calculées de cette manière sont plausibles. Les données disponibles sur les pertes de produits phytosanitaires permettent seulement une évaluation qualitative des approches. Les prévisions de risques selon les deux méthodes (Topindex et DRP) sont représentées à titre d'exemple dans la figure 4 pour un petit bassin versant de la région «Weinland» zurichoise.

Application dans les exploitations tests

Les outils ont été employés dans quatre exploitations tests en Suisse. Les pronostics d'érosion ont été réalisés à l'aide du modèle AVErosion, les prévisions relatives au phosphore à l'aide de l'indice P de Pennsylvanie et les prévisions concernant les produits phytosanitaires à l'aide de l'indice topographique et de la méthode DRP. Afin de vérifier la plausibilité des prévisions, nous avons fait appel aux expériences des agriculteurs, car ils connaissent généralement très bien leurs parcelles en ce qui concerne la saturation du sol par l'eau et l'érosion.

La qualité de la prévision des surfaces contributrices dépend en grande partie des données utilisées. La Suisse dispose d'un modèle digital de terrain couvrant tout le territoire avec un quadrillage de 2x2 mètres. Les données relatives à l'affectation des sols sont également de bonne qualité (Vector25, statistique de superficie). Par

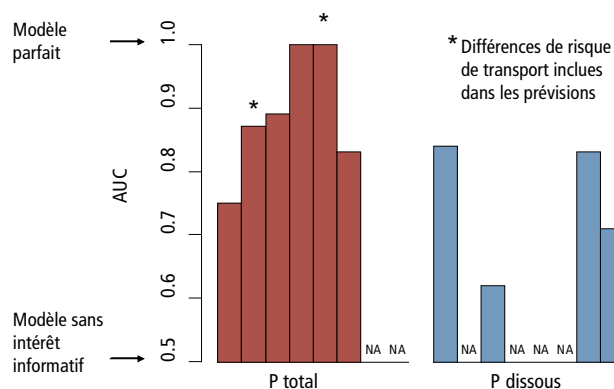


Figure 3 | Evaluation des différents indices pour le phosphore total et le phosphore dissous sur la base des études publiées dans la littérature. NA: aucune valeur disponible; AUC: un label de qualité de la prévision (Area under the curve).

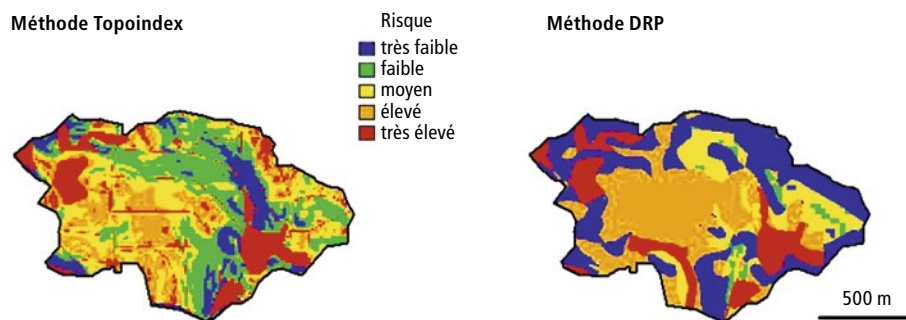


Figure 4 | Prévisions du risque de contamination des eaux par les produits phytosanitaires avec la méthode Topoindex (à gauche) et la méthode DRP (à droite).

contre, les données relatives au sol sont très hétérogènes (par exemple, échelles allant de 1:5000 à 1:200000). Dans toutes les régions, l'étude s'est appuyée sur les meilleures informations disponibles pour les sols. Les prévisions de l'érosion dans l'espace ont été jugées tout à fait réalistes par les agriculteurs. Les prévisions de risques avec l'indice P utilisé sont très liées à l'érosion. De bonnes prévisions de l'érosion permettent donc de faire des pronostics réalistes pour les surfaces exposées au transport de phosphore particulaire. Les parcelles avec ruissellement de phosphore dissous sont cependant sous-évaluées dans l'indice P utilisé. Pour les surfaces classées à risque pour le ruissellement de produits phytosanitaires, il n'y a apparemment pas eu de mauvaise répartition si l'on se réfère aux connaissances des agriculteurs sur la saturation de leur sol par l'eau et les ruissellements éventuellement observés pendant des précipitations.

Avec des données pédologiques à haute résolution, la méthode de l'indice topographique et la méthode DRP donnent des résultats similaires quant aux surfaces à risque de pertes de produits phytosanitaires (comparer avec la figure 4). Lorsque les données pédologiques sont insuffisantes, la différenciation spatiale est très limitée avec la méthode DRP. Les informations topographiques suffisent à identifier la répartition dans l'espace des écoulements superficiels sur les surfaces saturées, mais pas à identifier les écoulements superficiels limités par le phénomène d'infiltration. Pour déterminer de telles surfaces, il faut des données pédologiques de qualité. Ces prévisions restent cependant très incertaines, car elles dépendent beaucoup du mode d'exploitation. La comparaison des surfaces contributrices pour l'érosion, le phosphore et les produits phytosanitaires montre qu'elles ne se recoupent généralement pas. L'érosion et le transport particulaire ont lieu en général dans des terrains à pente raide, tandis que le ruissellement se produit surtout au pied des pentes, là où le terrain est plat.

Conclusions

Application pratique

Pour l'érosion, les pertes de phosphore et de produits phytosanitaires, les surfaces contributrices peuvent être mises en évidence empiriquement. En matière d'exploitation des surfaces, il faut donc veiller à prendre des mesures spécifiques afin de limiter la contamination des eaux par des substances diffuses.

La carte à haute résolution des risques d'érosion, disponible depuis peu pour la surface agricole utile suisse, constitue une étape importante dans cette procédure (Gisler *et al.* 2010). Elle fournit des résultats fiables permettant une évaluation relative du risque d'érosion.

Pour le phosphore et pour les produits phytosanitaires également, les méthodes disponibles peuvent aider à prévoir les surfaces contributrices. Les cartes de risques conviennent très bien pour visualiser le problème. Il est toutefois nécessaire de les adapter aux conditions spécifiques de la Suisse.

Parallèlement au développement de ces méthodes, il est important d'améliorer l'état des données servant à caractériser les propriétés du sol. Toutes les méthodes de pronostic des surfaces contributrices ont besoin d'informations plus précises sur les sols des parcelles. A ce jour, de telles données ne sont disponibles en qualité suffisante que pour un petit nombre de surfaces en Suisse. Actuellement, il n'existe aucune carte pédologique appropriée pour plus de la moitié de la surface agricole utile de la Suisse. Une carte digitale détaillée au 1:5000 n'est disponible que pour 12 % de la surface. Quant aux cartes digitales au 1:10000, il n'en existe que pour 4 % des surfaces.

Les études réalisées dans quatre exploitations tests ont montré que les surfaces contributrices de l'érosion et du ruissellement ne se recoupent pas forcément, ce qui rend difficile de pratiquer un mode d'exploitation spécifique aux surfaces contributrices. L'adaptation de la structure des parcelles dans le cadre d'une collaboration inter-exploitations pourrait permettre de tenir compte de ce type de surfaces dans la pratique agricole. ■

Riassunto
Identificazione di aree che contribuiscono in modo sproporzionato all'inquinamento delle acque

Le immissioni di sedimenti dovute all'erosione e al convogliamento di prodotti fitosanitari e sostanze nutritive provenienti dall'agricoltura inquinano i nostri corsi d'acqua. Diversi studi sul campo evidenziano che queste immissioni provengono da aree circoscritte. In particolare il fosforo, i prodotti fitosanitari e i sedimenti giungono nei corsi d'acqua principalmente a causa del rapido ruscellamento che interessa aree ristrette delle superfici agricole. Queste aree a rischio, le cosiddette *critical source areas* (CSA), rappresentano mediamente il 20 per cento circa della superficie totale. La migliore prova empirica delle CSA esiste in relazione all'erosione, dove le perdite possono essere osservate in seguito a precipitazioni. Per il fosforo questo concetto è ampiamente diffuso soprattutto all'estero, ma è confermato solo da poche misurazioni. Ancora meno dati sono disponibili per i prodotti fitosanitari. Il concetto non è adatto per quanto concerne l'azoto. Per identificare le CSA si può ricorrere a diversi strumenti. Ne abbiamo testati alcuni in quattro aziende. Gli agricoltori hanno valutato realisticamente soprattutto l'identificazione di aree che contribuiscono all'erosione. Le CSA per l'erosione e quelle per il convogliamento spesso non coincidono. L'identificazione di queste aree è limitata dalle scarse informazioni territoriali. Cartine dei suoli con una risoluzione sufficientemente elevata in Svizzera sono disponibili solo per poche regioni.

Bibliographie

- Agnew L. J., Lyon S., Gérard-Marchant P., Collins V. B., Lembo A. J., Steenhuis T. S. & Walter M. T., 2006. Identifying hydrologically sensitive areas: Bridging the gap between science and application. *J. Environ. Manage.* **78** (1), 63–76.
- Beven K. J. & Kirkby M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* **24**, 43–70.
- Frey M. P., Schneider M. K., Dietzel A., Reichert P. & Stamm C., 2009. Predicting critical source areas for diffuse herbicide losses to surface waters: Role of connectivity and boundary conditions. *J. Hydrol.* **365** (1–2), 23–26.
- Hewlett J. D. & Hibbert A. R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: W. E. Sopper and H. W. Lull, Editors, *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon Press, Elmsford, New York, 275–290.
- Gisler S., Linniger H. P. & Prasuhn V., 2010. Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2). Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, et CDE Université de Berne, 117 p.

Summary
Identification of critical source areas for diffuse water pollution

Input into streams due to erosion and runoff of pesticides and nutrients from agricultural fields pose a threat to our water bodies. Field studies indicate that these losses originate from limited parts of a given catchment. This holds especially for fine sediments, pesticides and phosphorus, which are mainly transported by fast flow processes that are generated only on certain locations. These critical source areas (CSAs) seem to cover in many cases about 20 % of the total area. The best empirical evidence for CSAs exists for erosion, where losses can be observed after an erosive event. For P losses, the concept is also used fairly wide-spread in many countries outside Switzerland. However, the empirical data base supporting the concept is rather limited. Even less data exist for pesticides. For nitrogen, the CSA concept is not appropriate. For identifying CSA in space, several tools are available. We have tested some of them on four different test farms. The risk areas for erosion agreed well with the field experience of the local farmers. The risk areas for runoff and erosion did not overlap in many situations. Identifying risk areas in Switzerland is in many situations severely hampered by the coarse soil maps that are available.

Key words: critical source area, water pollution, phosphorus, pesticides, soil erosion.

- Gburek W. J. & Sharpley A. N., 1998. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds. *J. Environ. Qual.* **27** (2), 267–277.
- Gomides Freitas L., Singer H., Müller S. R., Schwarzenbach R. P. & Stamm C., 2008. Source area effects on herbicide losses to surface waters – A case study in the Swiss Plateau. *Agric. Ecosyst. Environ.* **128** (3), 177–184.
- Leu C., Singer H., Stamm C., Müller S. R. & Schwarzenbach R. P., 2004. Variability of herbicide losses from 13 fields to surface water within a small catchment after a controlled herbicide application. *Environ. Sci. Technol.* **38** (14), 3835–3841.
- Prasuhn V., Linniger H., Hurni H. & Friedli S., 2007. Bodenerosions-Gefährdungskarte der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz* **14** (3), 120–127.
- Schmockler-Fackel P., Naef F. & Scherrer S., 2007. Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **11** (2), 891–906.
- Srinivasan M. S. & McDowell R. W., 2009. Identifying critical source areas for water quality: 1. Mapping and validating transport areas in three head-water catchments in Otago, New Zealand. *J. Hydrol.* **379** (1–2), 54–67.