



Doctoral Thesis

Prediction of critical source areas for diffuse herbicide losses to surface waters

Author(s):

Frey, Martin P.

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005925265> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 18291

Prediction of critical source areas for diffuse herbicide losses to surface waters

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
MARTIN P. FREY
Dipl. Umwelt-Natw. ETH
born 19 March 1977
citizen of Luzern - Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Reichert, examiner
Dr. C. Stamm, co-examiner
Prof. Dr. R. Schulin, co-examiner
Prof. Dr. A. Bronstert, co-examiner
Dr. P. Sweeney, co-examiner

2009

Summary

Field studies have shown that diffuse herbicide losses from agricultural fields to surface waters often originate from only a limited part of a given catchment. These critical source areas (CSA) are characterized by the occurrence of fast flow processes like surface runoff or macropore flow to tile drains. A reliable identification of CSA offers promising options for mitigation measures to reduce diffuse herbicide pollution of surface waters.

We tested the predictability of locating CSA with the physically based hydrological water balance model SMDR (Soil Moisture Distribution & Routing). The study area was a small agricultural catchment in Switzerland in which herbicide transport to surface waters had been investigated in field studies and a large spatial variability of herbicide losses was detected. SMDR was adapted to the local conditions by implementing a model for artificial drains and considering the connectivity to the stream.

The analysis of the connectivity revealed that surface runoff from a large part (66%) of the study area cannot directly reach the stream network. Small scale topographic barriers often interrupt the overland flow. The surface connectivity could be assessed using terrain analysis based on a high-resolution (2 m) digital elevation model (DEM). A high resolution DEM is mandatory for this analysis. Using a DEM with a resolution of 25 m leads to a large overestimation of the surface connected area because important topographic features like functional barriers are overlooked. Surface runoff from unconnected areas infiltrates in local sink areas. If the sink area is drained, surface runoff can still reach the stream via preferential flow paths (macropores in vertical and drains in lateral directions).

For a practical application, prior model parameters were assessed based on generally available data. The resulting simulated discharge agreed well with the measured values. The spatial distribution of CSA and predicted runoff processes can explain the spatial variability of the measured herbicide losses. The main losses are predicted for surface connected areas prone to overland flow; additionally, drained sinks are also

identified as potential risk areas.

Topography was the main determinant for the spatial distribution of CSA, and not soil properties. Topography predicts CSA mainly along the stream. Furthermore, the prediction of CSA locations is sensitive to parameters describing the lower boundary of the soil, the spatial extent and the efficiency of the drainage system.

However, our predictions of CSA locations involve large uncertainties since the knowledge of the model parameters is coarse due to limited data availability. Besides parameter uncertainties, model structure uncertainty also plays an important role. We investigated to what extent river discharge data can improve the prediction of CSA locations by constraining parameter values.

Bayesian inference was applied to combine the prior knowledge used in the first study with river discharge data. To consider the effect of model structure and input uncertainty on calculated river discharge, we formulated the likelihood function with an autoregressive error model additive to the river discharge calculated by the deterministic hydrological model. Despite using such an error model, the residual analysis indicated remaining model structure deficits.

With additional improvements of the model structure we were able to reduce the model structure bias to a significant extent. Furthermore, in combination with the discharge data, the uncertainty in the prediction of CSA locations was substantially reduced.

In a final step, we compared the CSA locations predicted by six different approaches. Despite their conceptual differences, the spatial agreement in the prediction of risk areas was surprisingly high. Approaches relying on soil data or topography led to similar results indicating that topography is reflected in the soil distribution in this landscape. Overall, topography is the most important source of information for practical applications, since it allows for assessment of the connectivity and saturated areas prone to fast flow processes and is relatively easy to detect at a larger scale.

Zusammenfassung

Felduntersuchungen haben gezeigt, dass diffuse Herbizidabschwemmungen aus der Landwirtschaft in Oberflächengewässer nur von einem kleinen Bereich des Einzugsgebiets stammen. Diese so genannten Risikogebiete sind dadurch gekennzeichnet, dass dort schnelle hydrologische Abflussprozesse wie Oberflächenabfluss und Makroporenfluss zum Drainagesystem auftreten können. Eine zuverlässige Identifizierung solcher Risikoflächen würde es erlauben, effektive Massnahmen zur Reduzierung von Herbizideinträgen in die Oberflächengewässer umzusetzen.

Wir haben untersucht, inwiefern solche Risikogebiete mit einem physikalisch basierten hydrologischen Wasserbilanzmodell (Soil Moisture Distribution & Routing) vorhergesagt werden können. Unser Untersuchungsgebiet war ein kleines landwirtschaftliches Einzugsgebiet in der Schweiz, in dem der Herbizidtransport in das Oberflächengewässer vorgängig in Feldstudien untersucht worden war. Dabei zeigten diese Untersuchungen eine grosse räumliche Variabilität der Herbizidabschwemmung. Um die lokalen Begebenheiten zu berücksichtigen, haben wir das hydrologische Modell erweitert und zusätzlich den Abfluss durch das Drainagesystem und die Konnektivität zum Oberflächengewässer explizit berücksichtigt.

Untersuchungen zur Konnektivität haben gezeigt, dass der Oberflächenabfluss von einem grossen Teil des Einzugsgebietes (66%) nicht direkt in das Gewässersystem gelangen kann, weil kleinräumige topographische Barrieren den Abfluss verhindern. Die Konnektivität innerhalb des Einzugsgebietes konnte mittels Geoinformationssystemanalysen der Oberfläche basierend auf einem hoch aufgelösten Geländemodell (2 m) abgeschätzt werden. Analysen basierend auf einem Geländemodell mit einer Auflösung von nur 25 m führten zu einer grossen Überschätzung des oberflächlich verbundenen Gebietes, weil entscheidende topographische Hindernisse darin nicht abgebildet waren. Oberflächenabfluss aus nicht verbundenen Gebieten fliesst in lokale Senken, wo das Wasser in den Boden infiltriert. Wenn die Senke künstlich drainiert ist, kann der Oberflächenabfluss das Oberflächengewässer über präferentielle Fliesswege immer noch vergleichsweise schnell erreichen. In vertikaler Richtung führen Makro-

poren zu präferentiellem Fluss, für den lateralen Transport ist das Drainagesystem verantwortlich.

Um die Praxistauglichkeit des Modells zu testen, wurde das Modell für eine erste Vorhersage basierend auf allgemein zugänglichen Daten parametrisiert. Die daraus resultierenden simulierten Abflussdaten stimmten gut mit den gemessenen Werten überein. Zudem kann die vorhergesagte räumliche Verteilung von Risikogebieten, bzw. Abflussprozessen, die räumliche Variabilität der Herbizidverluste erklären. Der grösste Teil der Verluste stammt von Gebieten, die anfällig für Oberflächenabfluss sind und zusätzlich oberflächlich direkt mit dem Bach verbunden sind. Darüber hinaus wurden auch drainierte Senken als potentielle Risikogebiete identifiziert.

Die räumliche Ausdehnung der Risikogebiete wurde hauptsächlich durch die Topographie bestimmt; Bodeneigenschaften waren weniger wichtig. Risikogebiete befinden sich grösstenteils entlang des Baches. Die Modellierung von Risikogebieten ist sensitiv auf Modellparameter, welche den unteren Rand des Bodenhorizontes beschreiben und auf Parameter, die die räumliche Ausdehnung sowie die Effizienz des Drainagesystems bestimmen.

Die räumliche Vorhersage von Risikogebieten beinhaltet allerdings grosse Unsicherheiten, da viele Modellparameter auf Grund limitierter Datenverfügbarkeit nur ungenau bestimmt werden können. Neben der Parameterunsicherheit spielt auch die Unsicherheit der Modellstruktur eine wichtige Rolle. Wir haben untersucht, inwiefern gemessene Abflussdaten helfen können, die räumliche Vorhersage von Risikogebieten zu verbessern, indem sie die Unsicherheit von Modellparametern eingrenzen.

Eine Bayes'sche Inferenz wurde verwendet, um vorhandenes Wissen aus der ersten Studie mit Abflussdaten zu kombinieren. Um den Effekt der Modellstruktur und der Inputunsicherheit auf den berechneten Abfluss zu berücksichtigen, haben wir die Likelihood-Funktion mit einem autoregressiven Fehlermodell für den simulierten Abfluss des hydrologischen Modells ergänzt. Trotz Fehlermodell zeigte die Residuenanalyse jedoch Defizite in der Modellstruktur.

Durch zusätzliche Verbesserungen in der Modellstruktur konnten wir den Modellstrukturfehler signifikant reduzieren. In Kombination mit einer Kalibrierung basierend auf den Abflussdaten konnte auch die räumliche Unsicherheit in der Risikogebietsvorhersage substantiell reduziert werden.

In einem letzten Schritt haben wir die räumlichen Vorhersagen von Risikogebieten von 6 verschiedenen Modellen verglichen. Trotz ihrer konzeptionellen Unterschiede zeigten diese Modelle eine überraschend grosse Übereinstimmung in der räumlichen Vorher-

sage, unabhängig davon, ob der Modellansatz auf der Bodenkarte oder der Topographie basiert. Dieser Zusammenhang weist darauf hin, dass sich die Topographie auch in der räumlichen Verteilung der Bodentypen widerspiegelt. Für praktische Anwendungen ist die Topographie eine sehr nützliche Informationsquelle. Sie erlaubt es, die Konnektivität abzuschätzen. Gleichzeitig hilft sie aber auch gesättigte Gebiete, die zu schnellen Abflussprozessen neigen, zu identifizieren und kann zudem relativ einfach grossflächig bestimmt werden.