

Identification of critical source areas for herbicide transport to surface waters

Doctoral Thesis

Author(s):

Doppler, Tobias Michael

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010060609>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 21535

Identification of critical source areas for herbicide transport to surface waters

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
TOBIAS MICHAEL DOPPLER
Dipl. Umwelt-Natw. ETH
born 08 October 1980
citizen of Bättwil SO

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Paolo Burlando, examiner
Dr. Christian Stamm, co-examiner
Prof. Dr. Jan Seibert, co-examiner

2013

Summary

In areas with mainly agricultural land use, the pollution of streams with herbicides remains a problem in many countries including Switzerland. The limit of a maximum concentration of $0.1 \mu\text{gL}^{-1}$ per single compound in surface waters, fixed by Swiss law, can often not be achieved during the application periods. This leads to a threat for the aquatic ecosystems. Under Swiss (climatic) conditions, the main part of the herbicide pollution stems from diffuse sources when herbicides are washed off the fields and transported to the streams. Field studies have shown that herbicide losses can be generated on a relatively small proportion of a catchment. These areas are called *critical source* or *contributing areas*. This spatial heterogeneity offers the possibility for efficient mitigation measures to reduce diffuse pollution because actions on a small proportion of the area could significantly reduce the herbicide input to the stream.

This thesis aimed at assessing and improving the predictability of critical source areas for herbicides. More specifically, the goals were to:

1. improve the process understanding of herbicide mobilization and transport at catchment scale, especially in areas with artificial drainage;
2. quantify the spatial variability of herbicide losses in an agricultural test catchment at the scale of individual fields;
3. test the predictability of critical source areas with a dynamic, spatially distributed hydrological model.

Saturation excess overland flow was a major mobilization and transport process in previous studies in the Swiss Plateau. The spatial variability of soil water regimes was therefore the main driver for the spatial heterogeneity in herbicide transport to the stream. To increase the spatial data availability, we tested how one can make use of spatial data on the soil water regime that is contained in conventional soil maps to improve the prediction of CSAs. The approach we chose was a combination of field experiment and modeling. We performed

controlled herbicide applications and sampled the stream and the drainage system at several locations to quantify spatial differences in herbicide loss behavior. Simultaneously, we monitored different hydrological variables in the experimental catchment to relate soil water regimes to the observed herbicide loads. For the prediction of critical source areas we focused on the prediction of areas prone to saturation excess overland flow. We worked with a dynamic, spatially distributed hydrological model. The model has a lumped and conceptual representation of the unsaturated zone and a spatially distributed, process based representation of the saturated zone. To validate the spatial model predictions we estimated the duration of soil saturation based on soil morphological attributes. This approach allowed a judgement of the predictive capabilities of the model.

The field experiment showed that both, infiltration excess and saturation excess overland flow, can be important processes for herbicide mobilization and transport. Under the particular weather conditions of the study period, infiltration excess dominated the losses in absolute terms. Furthermore, our results showed that in areas with little surface connectivity - that is where surface runoff from the fields can not directly enter the stream but is retained in topographic depressions - maintenance manholes of the drainage system and road and farmyard storm drains can be relevant input pathways. In addition, our results demonstrated that sorption can influence herbicide transport through macropores despite the short residence time during fast transport. Stronger sorbing compounds were retained more during preferential flow than less sorbing compounds.

The observed spatial variability of herbicide loss rates was not as large as it was expected based on the large variability of soil water regimes in the catchment, thus suggesting that the spatial variability of herbicide losses is not the same everywhere. Even more important, the ranking of the losses from the fields was not the same in all the events. This means that the location of critical source areas is not necessarily temporally stable but that it can change with rain events. Site specific management makes sense only in areas with high variability, while area-wide mitigation measures should rather be considered in areas with little variability.

A prediction of areas prone to saturation excess overland flow is nonetheless still promising because the location of these areas is assumed to be more stable in time. The quantification of the frequency of soil saturation based on soil morphological attributes compares well with piezometric measurements. These estimates can be used as an additional spatially distributed data set on soil water regimes. The quantitative estimates were used as validation data for the spatial model predictions.

However, the model results of this study were not accurate enough for the prediction of CSAs caused by saturation excess overland flow. Groundwater level dynamics and the

spatial pattern of soil saturation were not correctly reproduced by the model. There are indications that a more detailed representation of the coupling between the unsaturated and the saturated zone is needed. Furthermore, the spatial resolution and the representation of the drainage system seem to be crucial for an accurate groundwater level prediction especially in drained areas. By means of such a more complex model it might be possible to accurately predict CSAs. However, while complex models are very useful for research, they may not be useful for practical applications due to the complexity of the model setup, the excessive data requirements and the high computational demand. And finally, small scale features, such as plowing direction and the properties of field edges, which can not be reasonably implemented into models often dominate the loss behavior.

Overall, this study provides a number of arguments why the CSA concept is difficult to implement successfully in practice. The spatial variability of herbicide loss rates can be too low; in such cases area-wide mitigation measures are more promising. Furthermore, the location of CSAs can change between rain events. In addition, a certain and accurate model prediction of CSAs only based on available data does not seem to be feasible due to the high data requirements of an accurate enough model and the uncertainty associated with its predictions.

Nevertheless, the extent of the results allows to derive a few recommendations for the reduction of diffuse pollution. Reductions can be achieved

1. by limiting the occurrence of infiltration excess overland flow by means of erosion control measures which are well established in agriculture.
2. by preventing overland flow from directly entering the stream or a shortcut to the stream (manholes, stormdrains). Land management should aim, for instance, at a soil path for all water before it enters the stream.
3. by site specific management, meaning that critical source areas are taken out of crop rotation or planted with less intensive crops. In this case the identification of critical source areas requires field visits by experts and communication with the local farmers. In this respect one can take advantage of maps that can help to identify potential risk zones, among which the most important are i) an erosion risk map, ii) a drainage map (including manhole and storm drain locations), iii) a map of surface connectivity, iv) a soil map (possibly with soil saturation duration estimates), and v) a map of the topographic wetness index.

Zusammenfassung

In Regionen mit mehrheitlich landwirtschaftlicher Landnutzung ist die Verschmutzung von Fließgewässern mit Herbiziden auch in der Schweiz nach wie vor ein Problem. In den Applikationsperioden wird die gesetzlich festgelegte Maximalkonzentration von $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ pro Substanz häufig überschritten. Dies führt zu einer Gefährdung der aquatischen Ökosysteme.

Unter schweizer Bedingungen stammt die Gewässerbelastung mit Herbiziden hauptsächlich aus diffusen Quellen; d.h. die Herbizide werden während Regenereignissen von den Feldern weggeschwemmt und ins Gewässer transportiert. Frühere Felduntersuchungen haben gezeigt, dass der Grossteil der Herbizidbelastung von einem relativ kleinen Teil des Einzugsgebiets stammen kann. Diese Flächen werden *beitragende Flächen* oder *critical source areas* genannt. Diese räumliche Heterogenität ermöglicht effiziente Schutzmassnahmen, da Eingriffe auf einem kleinen Teil der Fläche die Herbizidbelastung im Gewässer signifikant reduzieren können.

Das Ziel dieser Arbeit war es die Vorhersagbarkeit von beitragenden Flächen zu beurteilen und zu verbessern. Die drei Hauptziele waren dabei:

1. die Prozesse bei der Mobilisierung und beim Transport von Herbiziden besser zu verstehen, speziell in künstlich entwässerten Gebieten;
2. die räumliche Variabilität der Herbizidverluste in einem Test-Gebiet auf Feld-Skala zu quantifizieren;
3. die Vorhersagbarkeit von beitragenden Flächen mit einem dynamischen, räumlich verteilten hydrologischen Modell zu testen.

In früheren Feldstudien im Schweizer Mittelland war Sättigungs-Oberflächenabfluss der wichtigste Mobilisierungs- und Transportprozess für Herbizide. Die räumliche Variabilität des Bodenwasserhaushalts war deshalb ein Hauptfaktor um die räumliche Verteilung des Herbizidtransports ins Fließgewässer zu erklären. Konventionelle Bodenkarten enthalten Informationen zum Bodenwasserhaushalt. Wir haben untersucht inwiefern man diese

Information nutzen kann um die Verfügbarkeit räumlicher Daten zur Vorhersage von beitragenden Flächen zu verbessern. Dazu haben wir eine Kombination aus Feldexperiment und Modellstudie gewählt. In einem kleinen Einzugsgebiet wurden kontrolliert Herbizide ausgebracht. Danach wurden an mehreren Stellen im Bach und im Drainagensystem Proben genommen um die räumlichen Unterschiede im Herbizidtransport zu quantifizieren. Gleichzeitig wurden verschiedene hydrologische Grössen gemessen um den Bodenwasserhaushalt mit den beobachteten Herbizidverlusten in Beziehung zu setzen. Bei der Vorhersage von beitragenden Flächen haben wir uns auf die Vorhersage von Flächen konzentriert die zu Sättigungs-Oberflächenabfluss neigen. Wir arbeiteten mit einem dynamischen, räumlich verteilten hydrologischen Modell. Die ungesättigte Zone wurde im Modell konzeptuell und räumlich aggregiert dargestellt während die gesättigte Zone räumlich verteilt und prozessbasiert abgebildet wurde. Die räumlichen Modellvorhersagen wurden an, aus der Bodenkarte geschätzten, Bodensättigungsdauern validiert.

Das Feldexperiment hat gezeigt, dass beide Mechanismen, Infiltrationsüberschuss- und Sättigungs - Oberflächenabfluss, wichtige Mobilisierungs- und Transportprozesse für Herbizide sein können. Unter den Wetterbedingungen in der Studienperiode wurden die Herbizidverluste von Infiltrationsüberschuss - Oberflächenabfluss dominiert. Ausserdem hat die Feldstudie gezeigt, dass Schächte des Drainagensystems und Strassen- und Hofplatzenwässerungen wichtige Eintragswege sein können. Dies trifft insbesondere in Gebieten mit geringer Oberflächenkonnektivität zu, d.h. in Regionen wo Oberflächenabfluss nicht direkt ins Gewässer gelangt, sondern in topographischen Senken zurückgehalten wird. Die Resultate zeigen ausserdem, dass das Sorptionsverhalten der Herbizide deren Transport durch Makroporen beeinflusst. Trotz der kurzen Aufenthaltszeit während dem Transport durch Makroporen wurden stärker sorbierende Substanzen stärker zurückgehalten als schwächer sorbierende Substanzen.

Die beobachtete räumliche Variabilität der Herbizidverlusten war deutlich geringer als sie aufgrund der Heterogenität des Bodenwasserhaushalts erwartet wurde. Offensichtlich ist die räumliche Variabilität der Herbizidverluste nicht in allen Regionen gleich gross. Ausserdem waren die Felder mit den höchsten Verlusten nicht in allen Regenereignissen die gleichen; die Reihenfolge änderte sich mit den Regenereignissen. Das heisst, dass die Lage von beitragenden Flächen zeitlich nicht konstant sein muss. Eine an den Standort angepasste Bewirtschaftung zur Reduktion der Herbizidbelastung ist nur in Regionen mit grosser räumlicher Variabilität und zeitlich stabilen räumlichen Mustern sinnvoll. In Regionen mit geringer Variabilität bieten sich eher Flächendeckende Massnahmen zur Reduktion der Herbizidbelastung an.

Die Schätzungen der Bodensättigungsdauern aus der Bodenkarte stimmen gut mit den Pie-

zometermessungen überein. Diese Schätzungen wurden - als zusätzliche räumliche Daten zum Bodenwasserhaushalt - zur Modellvalidierung verwendet.

Die Modellresultate dieser Studie waren allerdings nicht exakt genug für die Vorhersage von beitragenden Flächen, die durch Sättigungs - Oberflächenabfluss verursacht werden. Die Dynamik der Grundwasserstände und deren räumliche Verteilung wurden vom Modell nicht korrekt wiedergegeben. Die Resultate deuten darauf hin, dass eine detailliertere Abbildung der Prozesse am Übergang zwischen der gesättigten und der ungesättigten Zone notwendig ist. Auch eine feine räumliche Auflösung sowie die Art der Implementierung der Draingen scheinen wichtig zu sein für eine exakte Prognose der Grundwasserstände. Mit solch einem komplexeren Modell könnte es möglich sein beitragende Flächen verlässlich vorherzusagen. Allerdings sind komplexe Modelle - die für die Forschung zweifellos wichtig sind - nicht unbedingt nützlich für praktische Anwendungen. Dies liegt am Aufwand solche Modelle aufzusetzen, am grossen Datenbedarf und an der benötigten Rechenleistung. Ausserdem können kleinskalige Details wie die Pflugrichtung oder die Beschaffenheit von Feldrändern, die nicht vernünftig modelliert werden können, das Herbizidtransportverhalten dominieren.

Insgesamt zeigt diese Studie eine Reihe von Gründen auf weshalb es schwierig ist das Konzept der beitragenden Flächen für Herbizidtransport in Oberflächengewässer in der Praxis anzuwenden. Einerseits kann die räumliche Variabilität so klein sein, dass eher flächendeckende Massnahmen sinnvoll erscheinen. Andererseits kann sich die Lage der beitragenden Flächen von Regenereignis zu Regenereignis verschieben. Eine sichere und exakte Modellvorhersage für beitragende Flächen, die nur auf vorhandenen Daten basiert, scheint ausserdem nicht realistisch. Dies liegt am hohen Datenbedarf und den Unsicherheiten die mit der Modellvorhersage verbunden sind.

Aus den Resultaten dieser Studie können trotzdem Empfehlungen zur Reduktion der Gewässerbelastung mit Herbiziden abgeleitet werden. Die wichtigsten Empfehlungen sind:

1. Das Auftreten von Infiltrationsüberschuss-Oberflächenabfluss sollte durch Erosionsschutzmassnahmen vermindert werden.
2. Die Bewirtschaftung sollte darauf abzielen, dass Oberflächenabfluss nicht direkt ins Gewässer oder einen Kurzschluss zum Gewässer (Unterhaltsschächte, Strassenentwässerung) gelangt sondern eine Bodenpassage durchmacht bevor er ins Gewässer gelangt.
3. In Situationen wo standortspezifische Bewirtschaftung sinnvoll ist, sollten beitragende Flächen weniger intensiv bewirtschaftet werden. Für eine verlässliche Identifizierung der beitragenden Flächen sind Feldbegehungen durch Experten sowie Gespräche

mit den Landwirten der Region notwendig. Karten können helfen potentielle beitragende Flächen zu identifizieren. Die wichtigsten Karten in diesem Zusammenhang sind i) eine Erosionsrisikokarte, ii) eine Drainagenkarte (mit Unterhaltschächten und Strassenentwässerung), iii) eine Karte der Oberflächekonnektivität, iv) eine Bodenkarte (falls möglich mit Schätzungen der Bodensättigungsdauern), und v) eine Karte des topographischen Bodenfeuchte-Index.