



Doctoral Thesis

## Life cycle assessment of Swiss agriculture under climate change and the impacts of water use on aquatic biodiversity

**Author(s):**

Tendall, Danielle

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009962954> →

**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. 21419

**LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SWISS AGRICULTURE UNDER CLIMATE  
CHANGE AND THE IMPACTS OF WATER USE ON AQUATIC BIODIVERSITY**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

DANIELLE TENDALL

Master of Science MSc in Environmental Sciences and Engineering

Swiss Federal Institute of Technology Lausanne

18.03.1986

citizen of Vernay

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Stefanie Hellweg

Prof. Dr. Olaf Christen

Dr. Gérard Gaillard

Dr. Stephan Pfister

2013

## ABSTRACT

Climate change is expected to affect agriculture worldwide in the coming century, provoking decreases in yields in many regions. In parallel, an increasing global world population will increase demand for food production. By 2050, Switzerland is expected to face dryer and hotter summers, and decreased yields, in the productive lowland regions. Switzerland has a political target of agricultural self-sufficiency, and therefore has an interest in maintaining yields; farmers also need to maintain their revenue at a profitable level. Swiss agriculture should therefore adapt to climate change, through management changes at the farm scale and new policies and incentives at the regional and national scale. To respect environmental targets, these adaptation strategies should also avoid increasing environmental impacts. This thesis used life cycle assessment to assess the environmental impacts of Swiss agricultural adaptation scenarios to climate change at the farm and regional scale for two regions in Switzerland. One important adaptation option identified is the increased use of river water for irrigation, which may affect aquatic biodiversity. As there was no existing satisfactory method to assess these impacts, we developed a new impact assessment method. The new method uses species-discharge relationships and is applicable over large spatial regions. In order to investigate a potential causal impact pathway, an alternative assessment approach was also developed using river water temperature modeling. We additionally assessed the use of groundwater and the riparian shading of the river as alternative or complimentary watershed management options.

Our main findings show that under the future climate scenarios, agricultural productivity for human consumption is expected to decrease if farmers are left to economically optimize their farms, and most environmental impacts relative to productivity will increase, resulting in a decrease in environmental efficiency. In order to maintain productivity at a regional scale, agriculture would make intensive use of water for irrigation. A major trade-off between yields and aquatic biodiversity is therefore found in Swiss agricultural adaptation to climate change. It is therefore recommended that aquatic biodiversity impacts be considered in assessments of agriculture under future climate scenarios. Potential species loss in one case study region reached 8% of species in the studied catchment, in contrast with the low water stress index currently attributed to the region. In general, other impacts per amount produced (such as global warming potential) decrease if future productivity is maximized, whereas strategies leading to a minimization of environmental impacts cause a large drop in productivity. In particular, policies directly targeting the restriction of water use for irrigation are very efficient at reducing impacts on aquatic biodiversity, however, they result in a decrease in productivity. Decreasing yields may lead to

increases in imports and environmental impacts induced at the sites of production. Outcomes are largely sensitive to policy choices as well as climate change, and there is therefore a high potential for policy-makers to influence and mitigate the effects of climate change on agricultural productivity and the associated environmental impacts. At the farm scale, outcomes vary according to region and farm type, and policies should be tailored to these differences. The balance between mitigated aquatic biodiversity impacts and agricultural productivity should involve multiple management options, including options beyond agricultural management (such as water resource management options, e.g. use of groundwater, riparian shading of rivers). Any single approach is not sufficient to avoid all impacts, and a mitigation strategy should involve a combination of options (other options include limitation of irrigation through crop choice and intensity management, channel restoration, provision of biodiversity shelters, and use of lake water for irrigation).

The assessment of impacts of river water withdrawals on aquatic biodiversity using species-discharge relationships is sensitive to the spatial resolution used: consideration of the location of withdrawals within a river basin (as proposed here) significantly affected the magnitude of impact. The inclusion of additional taxa is highly relevant if considering absolute rather than relative potential species loss. Absolute potential species loss, weighted with an indication of species vulnerability, was proposed here, and is recommended in order to provide a relationship with an absolute reference such as global species extinction. Further aspects that influence the magnitude of potential impacts are the use of region-specific species-discharge relationships and the choice of regression function used to model the relationship. The developed impact assessment method has a high potential for developing characterization factors across broad spatial extents. However, it is not recommended for local assessments and watershed management (since this may require more spatial and temporal detail in order to assess the benefits of specific mitigation measures), and cannot prove the existence of a causal relationship between species richness and in-stream discharge. The assessment of impacts of river water withdrawals on aquatic biodiversity using a deterministic river water temperature model, on the other hand, was found to be better adapted to local watershed management decision-making, and models a causal relationship. The level of detail required was however not considered adequate for broad spatial coverage (such as encountered in life cycle assessment), despite efforts to minimize computational and data requirements. Outcomes may be highly site-specific, with temperature changes in the case study river shown to be of little concern compared to changes in discharge per se.

We highly recommend the consideration of water use impacts in the life cycle assessment of agriculture in the context of climate change. In particular, the location of withdrawals within a basin and impacts on aquatic biodiversity are key parameters. Agricultural adaptation and watershed management should make use of complimentary solutions in order to ensure the fulfilling of multiple goals (such as economic profitability, food productivity and maintenance of environmental quality). Finally, extended consequences of regional scale decisions in a broader national and international context, as well as the social implications of adaptation strategies, should be investigated in future in order to provide a complete sustainability assessment of agricultural adaptation to climate change.

## ZUSAMMENFASSUNG

Es ist zu erwarten, dass der Klimawandel im kommenden Jahrhundert die Landwirtschaft weltweit betreffen und zu Ertragsabnahmen in vielen Regionen führen wird. Gleichzeitig wird eine erhebliche Zunahme der Weltbevölkerung prognostiziert, was zu einem erhöhten Bedarf an Nahrungsmitteln führen wird um die Ernährungssicherung für alle zu garantieren. In der Schweiz ist davon auszugehen, dass trockenere und heissere Sommer bis 2050 in den hochproduktiven Flachlandgebieten zu niedrigeren Erträgen führen werden. Angesichts des Selbstversorgungsziels der Schweiz ist diese Entwicklung umso verheerender und eine Erhaltung der gegenwärtigen Erträge wäre von grossem Interesse. Gleichzeitig haben Landwirte Interesse daran, ihr Einkommen auf profitabilem Niveau zu halten. Die Schweizerische Landwirtschaft sollte sich daher durch Anpassungen auf Ebene der landwirtschaftlichen Betriebsführung, sowie durch politische Strategien und Anreize auf regionaler und nationaler Ebene dem Klimawandel anpassen. Dabei ist darauf zu achten, dass diese Anpassungsstrategien nicht zu erhöhten Umweltauswirkungen führen und damit andere Umweltziele gefährden. Diese Dissertation hat die Umweltauswirkungen von Anpassungsstrategien der Schweizerischen Landwirtschaft auf den Klimawandel auf Betriebs- und regionaler Ebene anhand der Methode der Ökobilanzierung für zwei Fallstudien in verschiedenen Regionen der Schweiz analysiert. Eine wichtige identifizierte Möglichkeit zur Anpassung an den Klimawandel ist eine erhöhte Nutzung der Fliessgewässer für Bewässerungszwecke, wobei mit einem Einfluss auf die aquatische Biodiversität zu rechnen ist. Da eine befriedigende Methode zur Abschätzung solcher Auswirkungen zu Beginn dieser Dissertation nicht existierte, wurde basierend auf Arten-Abfluss Kurven eine Methode entwickelt, die räumlich breit anwendbar sein sollte. Parallel dazu wurde eine alternative Methode entwickelt, die einen kausalen Zusammenhang zwischen der modellierten Wassertemperatur und möglichen Umweltauswirkungen herstellt. Zusätzlich wurde auch die Nutzung von Grundwasser anstelle von Flusswasser und die Beschattung des Flusses als alternative oder komplementäre Wasserbewirtschaftungsoptionen analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Produktion von Nahrungsmitteln unter zukünftigen klimatischen Bedingungen abnehmen wird, wenn Landwirte ihre Betriebe lediglich ökonomisch optimieren. Auf die Produktivität bezogen hingegen ist zu erwarten, dass die Umweltauswirkungen zunehmen werden und damit die Umwelteffizienz der Produktion insgesamt abnehmen wird. Um die Produktivität auf regionaler Ebene zu erhalten, müsste die Landwirtschaft verstärkt Wasser für Bewässerungszwecke einsetzen. Dies stellt einen massgeblichen Trade-off hinsichtlich der Anpassung der Schweizerischen

Landwirtschaft auf den Klimawandel dar, welcher sich in Form von Auswirkungen auf aquatische Biodiversität zeigen könnte. Daher sollten solche Auswirkungen in Nachhaltigkeitsanalysen von zukünftigen landwirtschaftlichen Systemen berücksichtigt werden. Der potenzielle Artenverlust betrug in einer Fallstudie 8% der vorkommenden aquatischen Arten innerhalb des betrachteten Einzugsgebietes und stand damit gleichzeitig im Gegensatz zum tiefen Wasserstressindex für dieses Gebiet. Mit Ausnahme dieser Auswirkungen des Wasserverbrauchs ist generell davon auszugehen, dass bei einer Maximierung der landwirtschaftlichen Produktivität, die Umweltauswirkungen (wie z.B. das Treibhausgaspotenzial) bezogen auf die produzierte Menge im zukünftigen Klima abnehmen werden (durch die Steigung der Produktion und der Effizienz), wohingegen Strategien zur Minimierung der Umweltauswirkungen eine erhebliche Verringerung in der Produktivität zur Folge haben könnten. Dies kann zu einer Zunahme der Nahrungsmittelimporte und folglich zu einer Verlagerung der Umweltauswirkungen am an den Herstellungsort führen. Da sowohl Politik- als auch Klimaszenarien einen starken Einfluss auf diese Ergebnisse haben, besteht ein grosses Potenzial durch entsprechende politische Massnahmen die Auswirkung des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktivität und die Umwelt zu vermindern. Da auf Betriebsebene die Ergebnisse je nach Gebiet und Betriebstyp variieren, sollten folglich auch bei der Umsetzung politischer Massnahmen lokaler Faktoren berücksichtigt werden. Politische Massnahmen, die direkt auf die Begrenzung der Wasserentnahme abzielen, sind bezüglich der Verminderung der Auswirkungen auf die aquatische Biodiversität sehr effizient. Gleichzeitig resultieren sie jedoch auch in einer Abnahme der Produktivität und lösen den Trade-off zwischen Produktivität und Auswirkungen auf die aquatische Biodiversität nicht. Die simultane Verminderung der Auswirkungen auf die aquatische Biodiversität und die Erhaltung der Produktivität auf regionaler Ebene bedarf also mehrerer, weitgreifender Massnahmen, wie z.B. dem Einsetzen von Grundwasserressourcen und der Flussbeschattung. Ein einzelner Ansatz reicht nicht aus, um alle Umweltauswirkungen zu vermeiden: eine Strategie zur Anpassung an den Klimawandel sollte also eine Kombination mehrerer Massnahmen beinhalten (weitere Massnahmen sind z.B. die Reduktion der Bewässerung durch eine entsprechende Auswahl der Kulturen und Intensitätsmanagement, die Renaturierung von Flüssen, die Bereitstellung von Schutzzonen für Biodiversität und die Nutzung von Seewasser zur Bewässerung).

Die Abschätzung der Auswirkungen der Entnahme von Flusswasser auf die aquatische Biodiversität anhand von Arten-Abfluss Kurven ist ebenfalls abhängig von der räumlichen Auflösung: die Berücksichtigung des Entnahmeorts innerhalb eines Einzugsgebiets (wie in dieser Dissertation vorgeschlagen) hat das Ergebnis signifikant beeinflusst. Die Berücksichtigung zusätzlicher

Indikatorarten ist höchst relevant, wenn die absolute anstelle der relativen Anzahl verlorener Arten betrachtet wird. Die absolute Anzahl potenziell verlorener Arten, gewichtet mittels der Vulnerabilität der Arten, wurde in dieser Dissertation vorgeschlagen und empfiehlt sich, um eine Beziehung zu einer absoluten Referenz, wie dem globalen Artensterben, herzustellen. Weitere Aspekte mit Einfluss auf die modellierten Umweltauswirkungen, sind der Gebrauch von regionalspezifischen Arten-Abfluss Kurven sowie die Wahl der zur Bestimmung der Kurve verwendeten Regressionsfunktion. Obwohl diese Methode zur Wirkungsabschätzung ein hohes Potenzial für die Entwicklung von Charakterisierungsfaktoren für eine breite räumlich Abdeckung bietet, ist die Anwendung auf die Analyse von lokalen Wasserbewirtschaftungen nicht empfohlen (da möglicherweise eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung zu einer adäquaten Abschätzung spezifischer Massnahmen zur Verringerung der Umweltauswirkungen nötig wäre). Hinzu kommt, dass diese Methode keinen kausalen Zusammenhang beweisen konnte. Die Abschätzung der Auswirkungen der Flusswasserentnahmen anhand eines deterministischen Wassertemperaturmodells erscheint im Gegensatz dazu besser auf die Entscheidungsprozesse in der Bewirtschaftung lokaler Wassereinzugsgebiete angepasst zu sein und baut zudem auf einem kausalen Zusammenhang auf. Allerdings limitieren die zur Modellierung benötigten detaillierten Daten den generellen Einsatz dieser Methode auf überregionaler Ebene (z.B. für die Ökobilanzierung) trotz des Versuchs der Vereinfachung der Berechnungen und der dazu benötigten Daten. Dass die Resultate dieses Modells sehr ortsspezifisch sind, zeigt auch das Ergebnis, dass im Fallstudiengebiet Änderungen der Flusstemperatur scheinbar weitaus geringere Auswirkungen zur Folge haben als eine Änderung der Abflussmenge.

Die Betrachtung der Umweltauswirkungen von Flusswasserentnahmen in der Ökobilanzierung landwirtschaftlicher Prozesse im Kontext des Klimawandels wird daher ausdrücklich empfohlen. Wichtig dabei ist es den Entnahmeort innerhalb eines Flusseinzugsgebiets und die Auswirkungen auf die aquatische Biodiversität zu berücksichtigen. Die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel sollte diverse Massnahmen kombiniert einsetzen, um der mehrfachen Zielsetzung gerecht zu werden (wie z.B. Ertragserhaltung, ökonomische Rentabilität und die Erhaltung einer intakten Umwelt). Die Konsequenzen regionaler Entscheidungen in einem breiteren nationalen und internationalen Kontext sollten, ebenso wie die sozialen Auswirkungen dieser Entscheidungen, untersucht werden um in der Zukunft ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalysen für die Landwirtschaft im Kontext des Klimawandels zu ermöglichen.



## RÉSUMÉ

Il est attendu que dans le siècle à venir, le changement climatique affectera l'agriculture à travers le monde, provoquant des baisses de productivité dans de nombreuses régions. En parallèle, une augmentation importante de la population mondiale est projetée. Ceci implique une pression accrue sur la production de nourriture, afin de garantir la sécurité alimentaire pour tous. En Suisse, des étés plus chauds et plus secs sont attendus d'ici 2050 dans les régions productives de plaine, ce qui pourrait amener à des baisses de rendement. Cependant, la Suisse a des objectifs d'autosuffisance partielle en alimentation, et a donc tout intérêt à maintenir ces rendements. Les agriculteurs souhaiteront également maintenir leur revenu à un niveau profitable. Ainsi l'agriculture Suisse doit s'adapter au changement climatique, à travers une modification de la gestion au niveau de la ferme, ainsi qu'un changement de la politique et des incitations au niveau régional et national. Cependant, de telles stratégies d'adaptation doivent également éviter l'augmentation des impacts environnementaux, si les objectifs environnementaux de la Suisse sont également à atteindre.

Cette thèse a ainsi évalué les impacts environnementaux de scénarios d'adaptation de l'agriculture au changement climatique pour deux cas d'étude en Suisse, au niveau de la ferme et de la région, à l'aide d'analyse de cycle de vie. Une option importante d'adaptation est l'utilisation d'eau de rivière pour l'irrigation, ce qui peut négativement affecter la biodiversité aquatique; cependant, aucune méthode satisfaisante n'était disponible pour évaluer de tels impacts. Une méthode adéquate d'évaluation des impacts, applicable à de larges échelles spatiales, a donc été développée dans cette thèse sur la base de la relation entre richesse en espèces et débit en rivière. Une méthode alternative d'évaluation des impacts a également été développée, qui modélise les changements de température de l'eau en rivière causés par les prélèvements d'eau, afin d'explorer un possible mécanisme d'impact spécifique. L'utilisation d'eau d'aquifère ainsi que l'augmentation de l'ombrage de la rivière ont de plus été évalués en tant qu'options alternatives de gestion des ressources en eau du bassin-versant.

Les résultats principaux montrent que si les agriculteurs s'adaptent d'un point de vue purement économique au changement climatique (comportement que l'on peut attendre en l'absence d'autres incitations), la productivité ainsi que l'efficacité environnementale diminuent à l'avenir. Ainsi il y a un besoin d'intervenir par des mesures politiques si l'on veut maintenir la productivité et l'efficacité environnementale dans une région. L'impact de l'utilisation d'eau de rivière sur la biodiversité aquatique constitue le principal conflit avec l'adaptation de l'agriculture Suisse au changement climatique; il est

ainsi recommandé que de tels impacts soient pris en compte lors de l'évaluation de la performance environnementale de l'agriculture sous un climat altéré. La perte potentielle d'espèces aquatiques dans l'un des deux cas d'étude atteint 8% des espèces du bassin-versant, en contradiction avec le bas indice de stress hydrologique observé dans la région. En général, d'autres impacts environnementaux (tels que le potentiel de réchauffement planétaire), rapportés à la quantité produite, diminuent à l'avenir tant que la productivité des systèmes agricoles est maximisée. La minimisation des impacts environnementaux absolus (non-rapportés à la productivité) est quant à elle liée à une baisse marquée de la productivité. Une telle baisse de productivité peut à son tour conduire à une augmentation des importations, et ainsi des impacts causés aux sites de production impliqués. Les résultats sont fortement influencés par de possibles choix politiques, autant que par le changement climatique en soi: ainsi, la politique a un grand potentiel pour influencer et atténuer les impacts du changement climatique sur la productivité agricole et l'environnement. Au niveau de la ferme, les impacts varient selon la région et le type de ferme, indiquant que les mesures politiques devront peut-être intervenir avec une résolution appropriée. Les mesures politiques ciblant spécifiquement la restriction de l'utilisation d'eau au niveau de la ferme sont certes efficaces pour protéger la biodiversité aquatique, mais provoquent une diminution de la productivité et ainsi une hausse des impacts relatifs à la productivité. Ainsi l'atténuation des impacts sur la biodiversité aquatique au niveau régional, tout en maintenant le niveau de productivité agricole, nécessitera des mesures de gestion complémentaires. Des mesures multiples seront sans doute nécessaires, puisqu'une seule mesure (telle que l'utilisation d'eau d'aquifère à la place d'eau de rivière, ou une ombrage accrue de la rivière) ne suffit pas à éviter la totalité des impacts attendus (d'autres options à considérer sont la restriction de l'utilisation d'eau, la limitation du besoin d'irrigation à travers le choix des cultures et la gestion de l'intensité, la renaturation du chenal d'écoulement, le développement d'abris pour la biodiversité, ainsi que l'utilisation d'eau du lac).

L'évaluation des impacts de l'utilisation d'eau de rivière sur la biodiversité aquatique, à l'aide de la relation entre richesse en espèces et débit en rivière, est influencée par la résolution spatiale utilisée: la considération de l'emplacement des extractions d'eau à l'intérieur d'un bassin versant (telle que proposée par cette thèse) affecte l'amplitude des impacts estimés de manière non-négligeable. Si la perte de biodiversité est comptabilisée de manière absolue (et non pas relative à la biodiversité totale présente), la considération de plus nombreux taxons est très pertinente. Cette thèse propose de mesurer la perte absolue de biodiversité en la pondérant par un indice de sa vulnérabilité: cette approche est recommandée afin de considérer la relation avec une référence absolue de perte de biodiversité, telle qu'une extinction globale d'espèces. D'autres éléments qui influencent l'amplitude des

impacts potentiels dans cette méthode sont l'utilisation de relations entre richesse en espèces-débit en rivière régionalisées, ainsi que le choix de la fonction de régression utilisée pour modéliser cette relation. Cette méthode d'évaluation des impacts a un grand potentiel pour le développement de facteurs de caractérisation pour de grandes étendues spatiales, cependant elle n'est pas recommandée pour des évaluations locales et la gestion locale de bassin-versant (puisque ceci peut nécessiter plus de détail spatial et temporel afin d'évaluer des mesures d'atténuation spécifiques); en outre, elle ne s'appuie pas sur une relation de causalité prouvée.

L'évaluation des impacts de l'utilisation d'eau de rivière sur la biodiversité aquatique, à l'aide d'un modèle mécanistique du changement de température de l'eau, est à l'inverse mieux adaptée au soutien de la prise de décision au niveau du bassin-versant local, et s'appuie sur un mécanisme de causalité. Le niveau de détail requis par la méthode n'est cependant pas considéré adapté pour couvrir une large étendue spatiale (telle que rencontrée en analyse de cycle de vie), malgré les efforts pour minimiser les besoins en données et en capacité informatique. Les résultats produits par cette méthode montrent que les impacts peuvent être très localisés. Les changements de température en rivière causés par l'utilisation d'eau pour l'irrigation ne provoquent que de moindres impacts sur la biodiversité aquatique, comparés aux impacts causés par les changements de débit en soi.

Ainsi, dans un contexte de changement climatique, la considération des impacts d'utilisation d'eau sur la biodiversité aquatique dans l'analyse de cycle de vie de l'agriculture est fortement recommandée, avec en particulier la considération de l'emplacement des prélèvements d'eau à l'intérieur d'un bassin versant. L'utilisation de méthodes plus génériques, disponibles à des résolutions spatiales plus grossières, peut être insuffisant pour refléter des impacts importants. L'adaptation agricole et la gestion de bassin-versant devraient prendre en considération de multiples critères environnementaux et être prêts à considérer des combinaisons de solutions complémentaires. A l'avenir enfin, les conséquences nationales et internationales de décisions à l'échelle régionale devraient également être évaluées, ainsi que les implications sociales des stratégies d'adaptation, afin de fournir une évaluation complète de durabilité.