

DISS. ETH NO. 21898

**PARTICIPATORY LAND-USE DECISION MODELING WITH BAYESIAN NETWORKS**

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

presented by

ENRICO CELIO

MSc in Geography, Universität Zürich

born on 16.12.1980  
citizen of Quinto TI and Zürich ZH

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Adrienne Grêt-Regamey  
Prof. Dr. Thomas Koellner  
Dr. Eric Koomen

2014

## Summary

Land-use change occurs worldwide at different rates and thus influences the provision and quality of ecosystem goods and services, such as biomass production, pollination, flood regulation capacity, and the identification with a certain landscape. While land-use change is one driver of the supply of these goods and services, in turn, land-use change is driven by direct and indirect causes that mutually interact, forming complex socio-ecological systems. The understanding of such systems is key for a sustainable development of ecosystem goods and services in spatial planning processes. Identifying drivers, their importance, and their influence characteristics enables strategic planning. In these systems, local actors as owners or managers of land are one important driver. Therefore, the goal of this thesis is to elaborate on the integration of actors (local/regional/cantonal decision-makers) into land use modeling (LUM) to enhance the understanding and credibility of the model and its output. To cope with diverse sources of influence on land use and its inherent uncertainty, the modeling approach was based on the implementation of Bayesian networks (BNs) in a spatially explicit manner. The objectives were approached in five papers completed during this PhD project:

**Paper I** presented the set-up process and the validation and evaluation of modeling outputs. Furthermore, the spatially explicit updating of the BN was introduced. The core of the approach consists of three BNs for the land-use sectors of agriculture, forestry, and settlement, which calculate for each time step the probability of land-use occurrence. The results showed the importance of different drivers of land-use change. The generated modeling outputs, envisioned as the probability of land-use occurrence, can enable decision-makers to obtain insights into land-use change processes.

Validation is a crucial part of a model building process. Whereas in Paper I the quantitative approach mainly focused on using allocation and quantity disagreement as indicators, in **Paper II**, the focus was on subjective (qualitative) validation. This paper showed the result of a validation workshop with experts elaborating on three exercises: (1) BN validation, (2) validation of the probabilities of land-use occurrence in different time steps, and (3) the validation of simulated land-use maps framed by scenario story lines. Subjective validation showed that experts understood the mechanisms of the modeling framework and could assess the BNs and the model output maps.

A first application of the modeling framework (**Paper III**) focused on the role of local actors. The possibility of incorporating local actors' characteristics in the modeling approach was the foundation for the quantification of farmers' influence on land-use change processes. We analyzed different scenarios based on the probabilities of land-use occurrence to find the influence of local actors for the model outputs. Two farmer types were defined (production-oriented, ecology-oriented), and comparisons showed that local actors were more important in terms of future land-use change than changing from the present to a new agricultural policy scheme.

Whereas Paper III has shown the importance of local actors for land-use change, in **Paper IV**, we further investigated their decision-making and the relation to the policy scheme. In a questionnaire, farmers were asked to judge decision-making factors for their importance to decision-making regarding their farms. To differentiate between a farmer's individual characteristic and the policy scheme, two case study areas in different countries were chosen, and identical questionnaires were used to investigate a farmer's perceptions of his decision-making. Results revealed that respective policy schemes may explain certain characteristics of decision-making

## SUMMARY

---

perceptions; the differentiation into full-time and part-time farmers was particularly valuable for gaining insights into the relation of policy scheme and decision-making.

The LUM approach applied in this thesis shows land-use change as raster maps. Maps are valuable to gain an overview of a study area, but the emotional components inherent in landscapes are suppressed. By contrast, 3D visualizations are more easily understood because they are closer to the real perception of a landscape. Therefore, raster maps were visualized in 3D and used in an interactive survey tool to find preferences for future landscapes and today's feasible policy measures (**Paper V**). Besides participants' preferences for landscape visualizations and policy measures, the specific set up of the tool revealed the trade-off process between different policy mixes. Results showed how respondents change their choice for specific policy measures if they are forced to trade one policy mix for another.

The main results of this thesis provide insights for further development of the modeling approach as well as for a more productive integration of quantitative modeling into spatial planning and landscape development processes.

## Zusammenfassung

Landnutzungsveränderungen kommen weltweit mit unterschiedlicher Geschwindigkeit vor und beeinflussen die Bereitstellung der Qualität und Menge von Ökosystemleistungen, wie beispielsweise die Biomassenproduktion, die Bestäubung, Überschwemmungsregulierungskapazität und die Identifikation mit einer bestimmten Landschaft. Während die Landnutzungsveränderung ein Einflussfaktor für das Angebot von Ökosystemleistungen darstellt, wird sie gleichzeitig von direkten und indirekten Treibern beeinflusst. Diese Treiber interagieren zusätzlich miteinander und es ergeben sich komplexe sozio-ökologische Systeme. Das Verständnis von derartigen Systemen ist wichtig für eine nachhaltige Entwicklung der Ökosystemleistungen in Raumplanungs- und Landschaftsentwicklungsprozessen. Durch die Identifikation der Treiber, deren Wichtigkeit und die Art wie die Treiber auf die Landnutzung wirken, können strategische Überlegungen in die Raumplanung einfließen. In diesen Systemen sind die lokalen Akteure als Eigentümer oder Bewirtschafter des Landes zentral. Das Ziel dieser Arbeit war es deshalb, an der Integration der Akteure (lokale, regionale, kantonale Entscheidungsträger) in die Landnutzungsmodellierung zu arbeiten. Damit wird das Verständnis des Systems, die Glaubwürdigkeit der Modellierungsmethodik und des Modellierungoutputs verbessert. Um mit den sehr unterschiedlichen Arten von Einflüssen auf die Landnutzung und den darin enthaltenen Unsicherheiten umzugehen, wurden Bayes'sche Netzwerke als Modellierungsgrundlage gewählt. Die Arbeit besteht aus fünf Artikeln:

In **Artikel I** wird der Setup Prozess, die Validierung und Evaluation des Modellierungoutputs gezeigt. Zudem wurde das räumlich-explizite Updating eingeführt. Der Kern des Ansatzes bilden drei Bayes'sche Netzwerke für die Landnutzungssektoren Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Siedlung. Die Netzwerke berechnen für jeden Zeitschritt die Auftretenswahrscheinlichkeiten für die Landnutzungsklassen. Die Resultate zeigten, dass die Wichtigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren bezüglich der Landnutzungsveränderung. Die produzierten Modellierungsergebnisse – betrachtet als Auftretenswahrscheinlichkeiten – erlauben es Entscheidungsträgern die Landnutzungsveränderungsprozesse besser zu verstehen.

Die Validierung der Ergebnisse ist ein entscheidender Teil eines Modellbildungsprozesses. Während im Artikel I hauptsächlich die quantitativen Ansätze mittels „allocation“ und „quantity disagreement“ im Zentrum standen, beleuchtet **Artikel II** die subjektive (qualitative) Validierung. Der Artikel zeigt die Resultate eines Validierungworkshops, in welchem Experten an drei Aufgaben arbeiteten: (1) die Validierung der Bayes'schen Netzwerke, (2) die Validierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten in unterschiedlichen Zeitschritten und (3) die Validierung der simulierten Landnutzungskarten, welche Szenario-Handlungslinien abbildeten. Die subjektive Validierung zeigte, dass die Experten die Mechanismen des Modellierungsansatzes verstanden und fähig waren die Bayes'sche Netzwerke und die modellierten Landnutzungsszenarien zu beurteilen.

Eine erste Anwendung des Modellierungsansatzes (**Artikel III**) fokussierte auf die Rolle der lokalen Akteure bei Landnutzungsveränderungen. Die Möglichkeit die Charakteristika der lokalen Akteure in den Modellierungsansatz aufzunehmen war die Grundlage für die Analyse des Einflusses der Landwirte in Landnutzungsveränderungsprozessen. Dazu wurden unterschiedliche Szenarien auf der Basis der Auftretenswahrscheinlichkeiten der Landnutzungskategorien analysiert. Es wurden zwei Typen von Landwirten definiert (produktions-orientierte, Ökologie-orientierte) und die Vergleiche zeigten, dass der Einfluss der lokalen Akteure grösser war als ein Wechsel zu einer neuen Agrarpolitik, wenn das Ausmass der Landnutzungsveränderung als Indikator gewählt wird.

Da in Artikel III die Wichtigkeit der lokalen Akteure für Landnutzungsveränderungen gezeigt werden konnte, wurde in **Artikel IV** die Entscheidungen der Landwirte weiter untersucht. Insbesondere interessierte, wie ein Zusammenhang zu den übergeordneten Politikstrukturen hergestellt werden kann. In einem Fragebogen wurden die Landwirte zur Wichtigkeit von Einflussfaktoren auf ihr Entscheidungsverhalten auf ihrem Betrieb befragt. Um zwischen der individuellen Charakteristik eines Akteurs und der Politikstruktur zu unterscheiden wurden zwei Fallstudiengebiete in unterschiedlichen Ländern gewählt (südliches Illinois, U.S.A. und das Einzugsgebiet der Kleinen Emme, Kanton Luzern). Es wurde ein identischer Fragebogen versandt, um die Wahrnehmung der Landwirte zu ihrem Entscheidungsverhalten zu untersuchen. Die Resultate zeigten, dass die jeweilige Politikstruktur einige Charakteristika der Wahrnehmung des Entscheidungsverhaltens der Landwirte qualitativ erklären kann. Wertvoll für den Erkenntnisgewinn war v.a. die Unterscheidung zwischen Haupterwerbs- und Nebenerwerbslandwirten.

Der Landnutzungsmodellierungsansatz dieser Arbeit zeigt die Landnutzungsveränderungen als Rasterkarten. Karten sind wertvoll, um sich einen Überblick über ein Studiengebiet zu verschaffen, sie können aber die Emotionen, welche durch Landschaften geweckt werden schlecht transportieren. Hingegen werden 3D Visualisierungen einfacher verstanden, da sie näher bei der tatsächlichen Wahrnehmung der Landschaft liegen. Deshalb wurden die Rasterkarten in 3D visualisiert und in einem interaktiven Befragungswerkzeug genutzt, um Präferenzen für zukünftige Landschaften und heutige Politikmassnahmen zu erfragen (**Artikel V**). Neben den Präferenzen für die Landschaftsvisualisierungen und den Politikmassnahmen, konnte das Werkzeug auch die Abwägungsprozesse zwischen unterschiedlichen Politikkombinationen offen legen. Die Resultate zeigten, wie die Teilnehmenden ihre Wahl der spezifischen Politikmassnahmen verändern, wenn sie zu einer Anpassung ihrer Politikmassnahmen-Konfiguration gezwungen werden.

Die Resultate der Arbeit geben Hinweise, wie derartige Modellierungsansätze weiterentwickelt und quantitative Modellierungen produktiver in Raumplanungs- und Landschaftsentwicklungsprozessen eingesetzt werden können.