

Carbon dynamics along an initial soil chronosequence in the forefield of the Damma glacier, Switzerland

Doctoral Thesis

Author(s):

Guelland, Kathi

Publication date:

2012

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007575005>

Rights / license:

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

Diss. ETH No. 20312

**CARBON DYNAMICS ALONG AN INITIAL SOIL CHRONOSEQUENCE IN THE
FOREFIELD OF THE DAMMA GLACIER, SWITZERLAND**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

KATHI GUELLAND

Dipl. Geogr., Friedrich-Schiller-University Jena, Germany

born September 29, 1980
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ruben Kretzschmar, examiner

Dr. Frank Hagedorn, co-examiner

Prof. Dr. Stefano M. Bernasconi, co-examiner

Prof. Dr. Michael Schmidt, co-examiner

2012

Summary

Over the last decades the impacts of climate change and global warming have become obvious across the planet. One well-recognized effect of rising temperatures is the melting of glaciers worldwide. In the Swiss Alps alone, 90 % of the glaciers have exhibited a strong negative mass balance over the last 15 years. One result of the deglaciation is the genesis of new initial ecosystems. The role of this process in the terrestrial carbon (C) cycle is still little known. Assuming greatest C accumulation in soils during initial soil formation, young soils could become a C sink. Consequently, an improved knowledge of the development of C cycling during the first decades of soil formation becomes very important for the evaluation if initial soils are sources or sinks for atmospheric carbon dioxide (CO₂).

The overall aim of this thesis was to improve the understanding of initial soil C cycling along glacier forefields. The focus was on the development of soil C fluxes (soil respiration and Dissolved Organic Carbon leaching) linked to C pools, or rather C sources with increasing soil formation and ecosystem genesis. The field investigations were set in the granitic Damma glacier forefield, Central Swiss Alps. The studies were conducted as a part of the interdisciplinary 'BigLink' project linking climate change, weathering, soil formation and ecosystem evolution. Due to the glacier movements with two re-advances, the field site is naturally divided in three age groups bordered by two terminal moraines: <20 years, 58 to 78 years, and 110 to 128 years. The objectives addressed in the present thesis were: (I) to quantify soil C fluxes (soil respiration and DOC leaching) and their changes with soil formation in an Alpine glacier forefield (II) to disentangle sources and drivers of soil C fluxes with initial ecosystem formation in glacier forefields, and to quantify the fractions of its different components and (III) to develop a laboratory approach which allows the detection of retained litter-derived DO¹⁴C and its spatial distribution in intact soil columns, and to link these insights to initial soil development and weathering.

To achieve the first objective (I) of the thesis, soil C fluxes were explored in relation to initial soil formation and ecosystem development during a three-year period (**Chapter 2**). Soil C fluxes increased clearly with increasing site age from 9 to 168 g C m⁻² yr⁻¹, which was closely linked to accumulation of soil C and the development of a vegetation cover. Climatic conditions influenced clearly soil CO₂ effluxes as the major C flux at initial soil formation stages. Soil temperature was the main driver for seasonal variations of soil respiration; approximately 62-70 % of the annual CO₂ efflux was respired during the short

alpine summer season. In contrast to soil temperature, a clear relationship between soil moisture and total soil respiration was not found (**Chapter 3**). But the lacking response of litter decomposition found in a $\delta^{13}\text{C}$ litter experiment led to the assumption that litter decomposition became site-specifically moisture-limited due to the small-scale heterogeneity along the glacier forefield. DOC leaching at 10 cm depth was approximately 20 times smaller than soil CO_2 efflux but increased as well with soil formation from 0.4 to 7.4 g DOC m^{-2} (**Chapter 2**). A strong rise of the ratio of soil organic carbon (SOC) to iron (Fe) and aluminium (Al) oxides strongly suggested that the increasing DOC leaching with site age results from a faster increase of the DOC source, the soil organic matter (SOM), than of the DOC sink, reactive mineral surfaces. However, findings from a $\delta^{13}\text{C}$ litter experiment (**Chapter 3**) indicated that DOC retention could, indeed, increase with an increasing amount of Fe and Al oxides along the glacier forefield depending on the origin of DOC. The DOC from the added litter got strongly retained with passage through the mineral soil because of its lower biodegradability and higher affinity to mineral soils. To disentangle the main sources of soil C fluxes during initial soil formation in glacier forefields, and to quantify their contributions to total C fluxes depending on the site ages (II), we analysed radiocarbon signatures of soil respired CO_2 , then removed aboveground vegetation by clipping (**Chapter 2**) and traced the 'new' litter derived soil C fluxes by adding a $\delta^{13}\text{C}$ -enriched litter (**Chapter 3**). The sources of soil CO_2 effluxes changed along the glacier forefield. For the most recently deglaciated sites, radiocarbon-based age estimates indicated ancient (pre-bomb, i.e. before 1950) C to be the dominant source of soil-respired CO_2 . With further succession (58 to 78 years) the contribution of new plant-fixed C amounted to 90 %, while heterotrophically respired C from accumulated 'older' SOM became more and more important at the oldest sites again. Litter-derived C contributions to total soil CO_2 effluxes did not change systematically with soil age. These results can be mainly attributed to the influence of soil moisture conditions at a local scale. But the relative high fraction of litter-derived soil CO_2 confirmed a dominant heterotrophic driven soil respiration at the recently deglaciated sites. To gain a detailed insight into C retention, the spatial distribution of retained litter-derived DO^{14}C was mapped by developing a new methodical approach (III). Retained C could be detected at a resolution of 250 μm in radio-autographs after the undisturbed soil columns of two different initial ecosystems were labelled with DO^{14}C . The autoradiographic method in combination with a DOC leaching experiment was first applied. This methodical approach can be a basis for the quantification of retained plant-derived DOC and conclusions regarding the role of

plant-derived DOC for build-up and stabilisation of SOM in weakly-developed soils (**Chapter 4**).

In conclusion, the findings of this thesis indicate that the C storage of our initial ecosystem has become less efficient during its further genesis. Soil C fluxes increased continuously along the forefield, while the total ecosystem C accumulation decreased relatively to the soil C fluxes. Overall, C losses from soil by soil respiration and DOC leaching increased from 9 ± 1 to 70 ± 17 and further to 168 ± 68 g C m⁻² yr⁻¹ at <10, 58-78, and 110-128 years old sites. However, total ecosystem C stocks increased from 0.2 to 1.1 kg C m⁻² from young to intermediate sites and to 3.1 kg C m⁻² at old sites. This implies that the ecosystem evolved from a dominance of C accumulation in the initial phase, to one with a relatively high turnover, i.e. a high throughput system. The relative high C accumulation as compared to soil C fluxes is most probably a characteristic feature of initial soil formation on freshly exposed rocks.

Zusammenfassung

Die von Klimawandel und Erderwärmung hervorgerufenen globalen Veränderungen sind während der letzten Jahrzehnte deutlich sichtbar geworden. Eine offensichtliche Folge steigender Temperaturen ist das weltweite Abschmelzen der Gletscher. Allein in den Schweizer Alpen haben 90 % der Gletscher seit den letzten 15 Jahren eine negative Massenbilanz. Ein Ergebnis der sukzessiven Abschmelze der Eismassen ist die Genese initialer Ökosysteme, deren Rolle und Feedback im terrestrischen Kohlenstoffkreislauf noch wenig bekannt sind. Unter der Annahme, dass die größte Kohlenstoff- (C-) Akkumulation in Böden während der ersten Phase der Bodenbildung stattfindet, wären diese jungen Böden folglich eine Kohlenstoffsenke. Detaillierte Erkenntnisse über die Entwicklung des C-Kreislaufes in den ersten Jahrzehnten der Bodenbildung sind folglich sehr wichtig für die Quantifizierung von jungen Böden als Quellen oder Senken atmosphärischen Kohlendioxids (CO₂).

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war es, das Wissen über den initialen Bodenkohlenstoffkreislauf entlang von Gletschervorfeldern zu vertiefen. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Erforschung der Entwicklung von C-Flüssen im Boden (Bodenatmung und Auswaschung des gelösten organischen Kohlenstoffs - kurz DOC-Auswaschung), die in Beziehung zu den sich veränderten C-Beständen bzw. C-Quellen mit voranschreitender Bodenbildung und Ökosystemgenese gesetzt wurden. Die Felduntersuchungen wurden entlang des granitischen Vorfelds des Damma Gletschers in den Schweizer Zentralalpen durchgeführt. Aufgrund von Gletscherbewegungen mit zwei Eisvorstößen während der letzten 160 Jahre ist das Damma Gletschervorfeld auf natürliche Weise in drei Altersgruppen (<20 Jahre, 58 bis 78 Jahre und 110 bis 128 Jahre) unterteilt, die jeweils von zwei Endmoränen abgegrenzt werden. Die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit bestanden darin: (I) C-Flüsse im Boden (Bodenatmung und DOC-Auswaschung) und deren Veränderungen mit voranschreitender Bodenbildung im alpinen Gletschervorfeld zu quantifizieren; (II) C-Quellen und Einflussparameter der C-Flüsse in Böden initialer Ökosystem zu detektieren sowie deren jeweiligen Anteile an den Gesamtflüssen zu quantifizieren und (III) einen neuen Laboransatz, der einen DO¹⁴C-Bodensäulenversuch mit Autoradiographie verknüpft, zu entwickeln, um in intakten Bodensäulen die Adsorption von gelöstem DOC an aktiven Mineraloberflächen nachzuweisen.

C-Flüsse im Boden wurden über einen Zeitraum von drei Jahren im Hinblick auf initiale Bodenbildung und Ökosystemgenese entlang des Damma Gletschervorfelds gemessen

(**Kapitel 2**). Die C-Flüsse im Boden stiegen mit zunehmendem Bodenalter von 9 auf 168 $\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ an, was wiederum eng mit der Akkumulation von C im Boden und der zunehmenden Vegetationsbedeckung verbunden war. Es konnte zudem gezeigt werden, dass klimatische Parameter einen deutlichen Einfluss auf die Bodenatmung als grössten C-Fluss im Boden hatten. Die Bodentemperatur war der Haupteinflussfaktor auf saisonale Schwankungen der Bodenatmung, ca. 62-70 % der jährlichen CO_2 -Flüsse wurden während des kurzen alpinen Sommers veratmet. Im Gegensatz zu den Bodentemperaturen konnte keine eindeutige Beziehung zwischen Bodenatmung und Bodenfeuchte nachgewiesen werden (**Kapitel 3**). Geringe Mineralisierungsraten applizierter Streu eines $\delta^{13}\text{C}$ -Tracerexperiments unterstrichen jedoch die Annahme, dass die Zersetzung der Streu und somit Bodenatmung aufgrund der kleinräumigen Heterogenität des Gletschervorfeldes an einzelnen Messpunkten durch relative Trockenheit eingeschränkt war. Im Vergleich zur Bodenatmung war die DOC-Auswaschung während des Sommers in 10 cm Tiefe ca. um das 20-fache geringer, stieg aber ebenso mit zunehmenden Bodenalter von 0.4 auf 7.4 g C m^{-2} an (**Kapitel 2**). Der starke Anstieg des Verhältnisses zwischen organischem Bodenkohlenstoff (SOC) und sekundären Eisen (Fe)- und Aluminium (Al)-Oxiden verdeutlichte, dass die mit zunehmenden Bodenalter ansteigende DOC-Auswaschung durch eine schnelle Zunahme von organischer Bodensubstanz (SOM) als DOC-Quelle beeinflusst war. Die Bildung von reaktiven Mineraloberflächen durch Verwitterung, die als DOC-Senken fungieren, war im Vergleich zur SOC Akkumulation während des betrachteten Zeitraums von ca. 130 Jahren Bodengenese zu gering. Das $\delta^{13}\text{C}$ -Tracerexperiment zeigte allerdings erhöhte DOC-Retentionen mit zunehmenden Fe- und Al-Oxiden in Abhängigkeit von der DOC-Quelle. Streubürtiges DOC wurde aufgrund seiner geringeren biologischen Abbaubarkeit und der hohen Affinität im Mineralboden stark adsorbiert (**Kapitel 3**). Um die wichtigsten Quellen der Boden-C-Flüsse in Gletschervorfeldern aufzuschlüsseln und ihre jeweiligen Anteile an den Gesamt-C-Flüssen in Abhängigkeit vom Bodenalter (II) zu quantifizieren, wurde zunächst das Radiokohlenstoffalter von bodenbürtigen CO_2 gemessen. Anschliessend wurde oberirdische Vegetation durch „Clipping“ entfernt (**Kapitel 2**) und die „neuen“ C-Flüsse im Boden durch die Analyse hinzugefügter $\delta^{13}\text{C}$ -angereicherter Streu verfolgt (**Kapitel 3**). Die Quellen der Bodenatmung veränderten sich entlang des Gletschervorfeldes. Die auf der Radiokohlenstoffdatierung basierenden Altersschätzungen ergaben, dass an den zuletzt enteisten Standorten alter (pre-bomb, d.h vor 1950), heterotroph assimilierter C die dominierende Quelle für die Bodenatmung war. Mit

voranschreitenden Bodenalter und Ökosystemgenese (58 bis 78 Jahre) nahm der Anteil an durch Pflanzen assimilierten C bis zu 90 % der Gesamtbodenatmung ein, während die Bodenatmung an den ältesten Standorten im Gletschervorfeld mehr und mehr von heterotroph veratmeten C aus angesammelter, „älterer“, organischer Bodensubstanz dominiert wurde. Der Anteil von streubürtigem C an der Gesamtbodenatmung veränderte sich nicht systematisch mit dem Bodenalter. Dies konnte vor allem auf die räumlich kleinskalige Unterschieden in der Bodenfeuchte zurückgeführt werden. Der relativ hohe Anteil an streubürtigem C an der Gesamtbodenatmung bestätigte jedoch, dass die heterotrophe Bodenatmung an den jüngsten Standorten dominierte. Um einen detaillierten Einblick in die C-Retention zu erhalten, wurde die räumliche Verteilung von streubürtigem DO^{14}C mittels der Anwendung eines methodischen Ansatzes (III) detektiert. Der in intakten Bodensäulen fixierte streubürtige C konnte mit einer Auflösung von 250 μm in Autoradiographien sichtbar gemacht werden. Dazu wurden Bodensäulen zweier initialer Ökosysteme zuvor mit DO^{14}C angereichert. Ein autoradiographische Ansatz wurde hier erstmals erfolgreich in Kombination mit einem DOC-Auswaschungsexperiment angewendet. Dieser methodische Ansatz kann als Grundlage zur Quantifizierung von im Boden zurückgehaltenen, pflanzenbürtigem DOC und für Rückschlüsse auf dessen Rolle beim Aufbau und Stabilisieren von SOM in schwach entwickelten Böden dienen (**Kapitel 4**).

Aus dieser Arbeit kann geschlussfolgert werden, dass im initialen Ökosystem des Damma Gletschervorfeldes die C-Akkumulation im Laufe seiner Entwicklung weniger effizient wurde. Während die C-Flüsse kontinuierlich mit zunehmendem Bodenalter anstiegen, nahm die C-Akkumulation im gesamten Ökosystem relativ zu den Boden-C-Flüssen ab. Die C-Vorräte im Ökosystem stiegen mit Ökosystemgenese von 0.2 auf 1.1 kg C m^{-2} zwischen jungen und mittel alten Böden bzw. auf 3.1 kg C m^{-2} an den alten Standorten an. Im Gegensatz dazu erhöhten sich Boden-C-Flüsse von 9 ± 1 auf 70 ± 17 und folgend auf $168 \pm 68 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ bei <10, 58-78 und 110-128 Jahre alten Böden. Dies implizierte, dass das initiale Ökosystem von einer dominanten C-Akkumulation in der Anfangsphase zu einem System mit relativ hohem C-Umsatz, d.h. mit hohem C-Durchsatz, umkippt. Daher kann die anfänglich relativ hohe C-Akkumulation im Vergleich zu den noch niedrigen Boden-C-Flüssen als ein charakteristisches Merkmal initialer Bodenbildung auf frisch freigelegtem Gestein bezeichnet werden.