

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 63 (2022)
Heft: 1

Artikel: Gefährdung unserer Lebensgrundlage durch Bodendegradation : von der Methodenentwicklung zur Quantifizierung
Autor: Vahlensieck, Yvonne / Alewell, Christine
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088050>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Gefährdung unserer Lebensgrundlage durch Bodendegradation – von der Methodenentwicklung zur Quantifizierung

Yvonne Vahlensieck & Christine Alewell

Zusammenfassung

Global stammen 95 % aller Lebensmittel aus dem Boden, doch durch falsche oder zu intensive Nutzung – teilweise verstärkt durch Klimawandel – geht immer mehr wertvoller und nährstoffreicher Oberboden verloren. Das Ausmass der Bodenerosion lässt sich durch Messungen und Modellierungen ermitteln. Hierfür hat die Forschungsgruppe Umweltgeowissenschaften des Departements Umweltwissenschaften der Universität Basel in den letzten Jahren innovative Ansätze und Methoden entwickelt. Dies hilft dabei, die Ursachen und den Verlauf von Bodenerosion global und regional besser zu verstehen sowie Hotspots zu identifizieren. Letztendlich sind diese Erkenntnisse sowohl für Politik wie auch Gesellschaft wichtig, um rechtzeitig gezielte und effektive Gegenmassnahmen treffen zu können.

1 Einleitung: Bodenerosion – ein globales Problem mit weitreichenden Folgen

Die Erosion des Bodens schreitet global immer weiter voran. Die Ursachen dafür sind vielfältig, lassen sich jedoch oft auf landwirtschaftliche Nutzung und den Mangel an stabilisierender Vegetation zurückführen (Borrelli et al. 2017, 2018). Die Konsequenz: Dort, wo Boden verloren geht, fehlen essenzielle Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor für die Produktion von Nahrungsmitteln – ein Verlust, der nur durch den Einsatz von teurem Kunstdünger kompensiert werden kann (Alewell et al. 2020).

Mit zunehmender Bodenerosion schwindet auch die Biodiversität, denn die obere Erdschicht ist Lebensgrundlage für alle Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und auch für uns Menschen (Abb. 1). Gleichzeitig bringt der Eintrag von nährstoffreichem Sediment in die Gewässer das ökologische Gleichgewicht durcheinander, führt zur Eutrophierung und verschlechtert die Wasserqualität.

Adresse der Autorinnen: Yvonne Vahlensieck, CI AcademicServices GmbH, Schaienweg 4, CH-4107 Ettingen; E-Mail: yvonne.vahlensieck@academicservices.ch (Texterstellung); Christine Alewell, Umweltgeowissenschaften, Universität Basel, Bernoullistr. 30, CH-4056 Basel; E-Mail: christine.alewell@unibas.ch



Abb. 1 Bodenerosion in der Schweiz: Flache Erdrutsche im Urserental im Kanton Uri (A) und im Val Piora im Tessin (B).
Fotos: L. Zweifel

Ein besseres Verständnis für die Ursachen, den Fortschritt und die Auswirkungen der Bodenerosion sowie eine Quantifizierung in Raum und Zeit ist von grosser Dringlichkeit. Die Forschungsgruppe Umweltgeowissenschaften des Departements Umweltwissenschaften der Universität Basel beschäftigt sich deshalb mit der Degradation von Böden, Mineralböden wie auch Mooren, und dem Einfluss, den verschiedene Faktoren wie Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Klimawandel darauf haben.

Zum einen entwickeln wir Methoden, um Bodendegradation zu erfassen und über Raum und Zeit zu beobachten. Zum anderen erforschen wir die Konsequenzen von Bodendegradation. Die Untersuchungsmethoden reichen dabei von Mustern stabiler Isotope im Boden, komponentenspezifischen Isotopen als Tracer für Sedimente, Kartierung mit Fernerkundungsdaten bis hin zu Modellierungen.

Unsere Erkenntnisse helfen dabei, die Auswirkungen von Bodenerosion auf die Lebensmittelproduktion, Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt abzuschätzen. Sie sind zudem wichtig, um Gegenmassnahmen gezielt einzusetzen und deren Wirksamkeit zu validieren.

2 Methodenentwicklung zur Messung von Bodenerosion

2.1 “On-site”-Messung durch Plutonium- und Cäsium-Isotope

“On-site”-Messungen ermitteln auf der erodierenden Fläche selbst, wie viel Boden quantitativ verloren geht. Hierfür greift die Bodenwissenschaft auf Radionuklide zurück, die durch Atomwaffentests in den 1950er und 1960er Jahren sowie durch Super-GAU von Atomkraftwerken in die Umwelt gelangt sind (Alewell et al. 2017; Meusburger et al. 2020).

Im Boden binden diese Radionuklide fest an Bodenpartikel und werden durch Erosion gemeinsam mit dem Boden abgetragen. Anhand der Abnahme eines Radionuklids im Boden lässt sich so beispielsweise die Erosionsrate von Ackerland quantifizieren. Als Referenzwert dient dabei die Menge an Radionuklid im ungestörten Boden.

Bisher setzten Forschende für solche Messungen hauptsächlich das Cäsium-Radionuklid ^{137}Cs ein. Aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von etwa dreissig Jahren verschwindet dieses jedoch allmählich aus der Umwelt und ist zudem durch den Eintrag nach dem Super-GAU Tschernobyl sehr heterogen verteilt. In den letzten Jahren richtete sich das Augenmerk deshalb auf zwei Plutonium-Radionuklide ($^{239+240}\text{Pu}$; Alewell et al. 2017). Diese haben eine wesentlich längere Halbwertszeit von tausenden von Jahren und eine Reihe weiterer Vorteile: Im Vergleich zu ^{137}Cs ist die globale Verteilung von $^{239+240}\text{Pu}$ homogener, was die Referenzierung zuverlässiger macht. Zudem ermöglicht inzwischen die Weiterentwicklung der ICP-Massenspektroskopie (Massenspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma) heutzutage eine schnelle und genaue Analyse von Plutonium-Isotopen.

Um aus den gemessenen Werten auf den Grad der Erosion zu schliessen, braucht es ein geeignetes Umrechnungsmodell, das die Abnahme von Radionukliden in Abhängigkeit ihrer Tiefenverteilung im Boden quantitativ in Bodenverluste umrechnet. Aufgrund unterschiedlicher Verteilungsmuster lassen sich die bereits bestehenden Modelle nicht auf alle Radionuklide und nicht auf alle Landnutzungstypen übertragen. Unsere Arbeitsgruppe hat deshalb ein neues Konversionsmodell (MODERN), das auch für Plutonium geeignet ist und das eine gute Anwendbarkeit aufweist, mitentwickelt (Arata et al. 2016; Meusbürger et al. 2016).

Bis heute kam die Messung von Erosion durch $^{239+240}\text{Pu}$ nur probeweise an wenigen Orten zum Einsatz. Wir haben die Methode in Korea und in der Schweiz angewendet. Dank der oben geschilderten Vorteile haben $^{239+240}\text{Pu}$ -Isotope aber das Potenzial, sich in Zukunft mehr und mehr für die Messung von “on-site”-Bodenerosion durchzusetzen.

2.2 “Off-site”-Messung mittels Isotopen in pflanzenspezifischen Fettsäuren

Ein Teil des durch Bodenerosion verlorenen Materials wird als Sediment in Flüssen und Seen eingetragen. Durch eine Analyse von Bestandteilen des Sediments lässt sich nachvollziehen, von welchen Stellen hangaufwärts diese stammen und wo wieviel Bodenerosion stattgefunden hat (Abb. 2). Unsere Forschungsgruppe hat in den letzten Jahren das komponentenspezifische Isotopensignal von pflanzlichen Fettsäuren und einfachen Kohlenwasserstoffen (Alkanen) für solche quantitative “off-site”-Messungen genutzt (Alewell et al. 2016; Hirave et al. 2021).

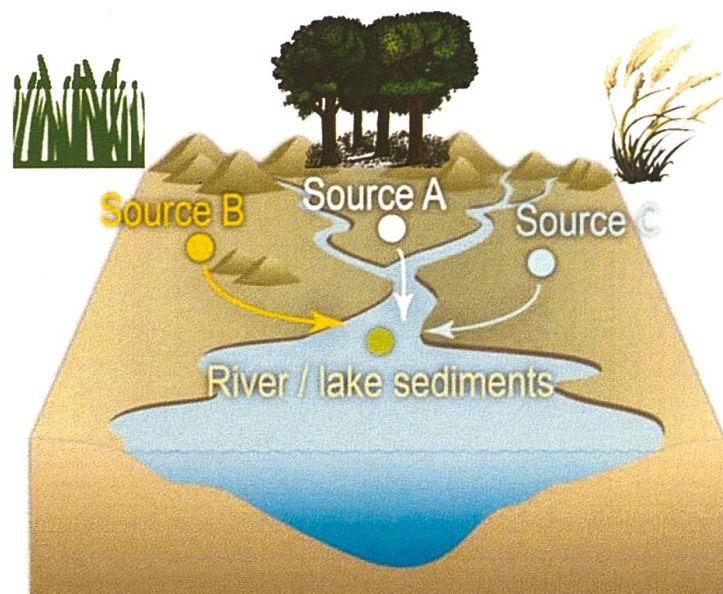


Abb. 2 Boden von verschiedenen Quellen wie Weideland, Wald und Ackerland gelangt durch Bodenerosion in das Sediment von Flüssen und Seen. Da jeder Boden einen spezifischen Isotopen-Fingerabdruck von pflanzlichen Fettsäuren und Alkanen aufweist, kann die Herkunft des Sediments zurückverfolgt und quantifiziert werden.

Quelle: Hirave et al. 2021

Jede Pflanzengemeinschaft – im Wald, auf der Wiese oder auf dem Acker – weist eine charakteristische Zusammensetzung an langkettigen, gesättigten Fettsäuren oder Alkanen auf. Gelangen diese Stoffe beim Absterben der Pflanzen in den Boden und von dort durch Erosion in die Gewässer, so verrät ihre Isotopensignatur wie ein Fingerabdruck die Herkunft des Sediments. Für die Analyse werden Fettsäuren und Alkane aus Sedimentproben zunächst anhand ihrer verschiedenen Kettenlängen im Gaschromatographen aufgetrennt und danach mit Hilfe des natürlichen Kohlenstoff-Isotops ^{13}C im Massenspektrometer identifiziert und quantifiziert. Studien zur Validierung der Methode zeigen, dass die Isotopensignale über lange Zeit stabil bleiben (*Hirave et al. 2020*).

Mit dieser sogenannten komponentenspezifischen Isotopenanalyse untersuchte die Arbeitsgruppe beispielsweise über zwei Jahre die Sedimentfracht des Flusses Enziwigger im Kanton Luzern, der ein Einzugsgebiet von etwa dreissig Quadratkilometern hat (*Alewell et al. 2016*). Hierzu wurden an mehreren Stellen entlang des Flusses Bodenproben von Wald, Weide und Ackerland genommen und deren spezifische Zusammensetzung an pflanzlichen Fettsäuren analysiert. Diese “Fingerabdrücke” wurden mit flussabwärts gesammelten Sedimentproben verglichen (Abb. 2).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei normalem Wasserstand etwa zwei Drittel des Sediments von Ackerböden und Weiden stammte. Nach Hochwasserereignissen trug jedoch überraschenderweise Waldboden den grössten Teil zum Sediment bei. Letzteres wurde in Untersuchungen im Einzugsgebiet des Baldegger Sees bestätigt (*Lavrieux et al. 2019*). Beide Studien deuten darauf hin, dass unter nährstoffreichen Wäldern auf Kalkgestein in Steillage mehr Bodenerosion stattfindet als bisher vermutet (*Alewell et al. 2016; Lavrieux et al. 2019*).

Auch eine Untersuchung in Schottland stellte einen überraschend hohen relativen Anteil von Bodenerosion unter Weidenutzung fest – hier wiesen die Ergebnisse ebenfalls auf eine mögliche Überschätzung des Beitrag von Erosion aus dem Ackerland hin (*Hirave et al. 2021*). Solche Erkenntnisse sind von grosser Bedeutung für zukünftige Entscheidungen über das Landmanagement. Momentan laufen weitere Projekte im Einzugsgebiet des Rheins, des Ibirapuita in Brasilien und des Holnicote in Grossbritannien. Das angestrebte Ziel ist, mit dieser Methode die Bodenerosion auch auf grösseren Skalen zu untersuchen.

2.3 Exkurs: Mit Isotopenanalyse den Zustand von Mooren beurteilen

Die Drainage von Mooren und Feuchtgebieten zerstört weltweit organische Böden, was unter anderem zu einer Verstärkung des Klimawandels führt – denn dadurch wird ein grosser Teil des in den Moorböden gespeicherten Kohlenstoffs in Form von Kohlendioxid freigesetzt. Das Austrocknen von Mooren führt aber auch zum Verlust von Landschaftswasserspeichern und von wertvoller Biodiversität. Deshalb werden Moore heutzutage zum Teil wieder renaturiert.

Den Erfolg solcher Bestrebungen zu dokumentieren, ist eine grosse Herausforderung, da das Vorhandensein moortypischer Pflanzen oft temporär variabel und nicht immer aussagekräftig ist. Gleichzeitig ist eine direkte Messung des Kohlendioxidverlustes sehr arbeits- und kostenintensiv. Wir nutzen Tiefenprofile von Isotopen und Biomarkern als Indikatoren, um Informationen über den Zustand der Moore (drainiert, ungestört natürlich, renaturiert) effizienter und konkreter ermitteln zu können (*Alewell et al. 2011; Groß-Schmölders et al. 2020, 2021*).

Die Grundlage hierfür ist die Hypothese, dass in jeder Schicht des Moors charakteristische Gemeinschaften von Mikroorganismen angesiedelt sind, die sich in natürlichen und drainierten Mooren voneinander unterscheiden. Am Beispiel von nährstoffarmen Mooren finden sich im drainierten Moor im oberen, gut durchlüfteten Akrotelm und dem oberen Teil des Mesotelms (Abb. 3) hauptsächlich Pilzgemeinschaften – während sich im feuchten und sauerstoffärmeren unteren Mesotelm und im Katotelm zunehmend stickstofffixierende Azidobakterien ansiedeln. Diese verstoffwechseln vor allem das schwere Stickstoff-Isotop ^{15}N , während das leichtere ^{14}N bevorzugt

von Pflanzen aufgenommen wird. Im natürlichen Moor – unter weitgehend anoxischen Bedingungen – zeigen die ^{15}N Tiefenprofile dagegen eine weitgehend homogene, undifferenzierte Tiefenverteilung (Abb. 3).

Um diese Hypothese zu testen, wurden Proben von natürlichen, drainierten und renaturierten Mooren in Schweden, Finnland und im Schwarzwald hinsichtlich der Tiefenverteilung der ^{15}N -Isotope und Biomarkern untersucht. Dabei liessen sich die erwarteten Muster der Isotopenprofile nachweisen und mit für die verschiedenen Gruppen von Mikroorganismen spezifischen Biomarkern bestätigen. Die Analyse von mikrobiellen Fettsäuren zeigte zudem, dass der postulierte Wechsel von Pilzen zu Bakterien zwischen dem oberen und unteren Mesotelum stattfindet. Die Untersuchung von stabilen Isotopen stellt also eine zuverlässige, kostengünstige und schnelle Methode dar, um den Zustand von Mooren zu überwachen.

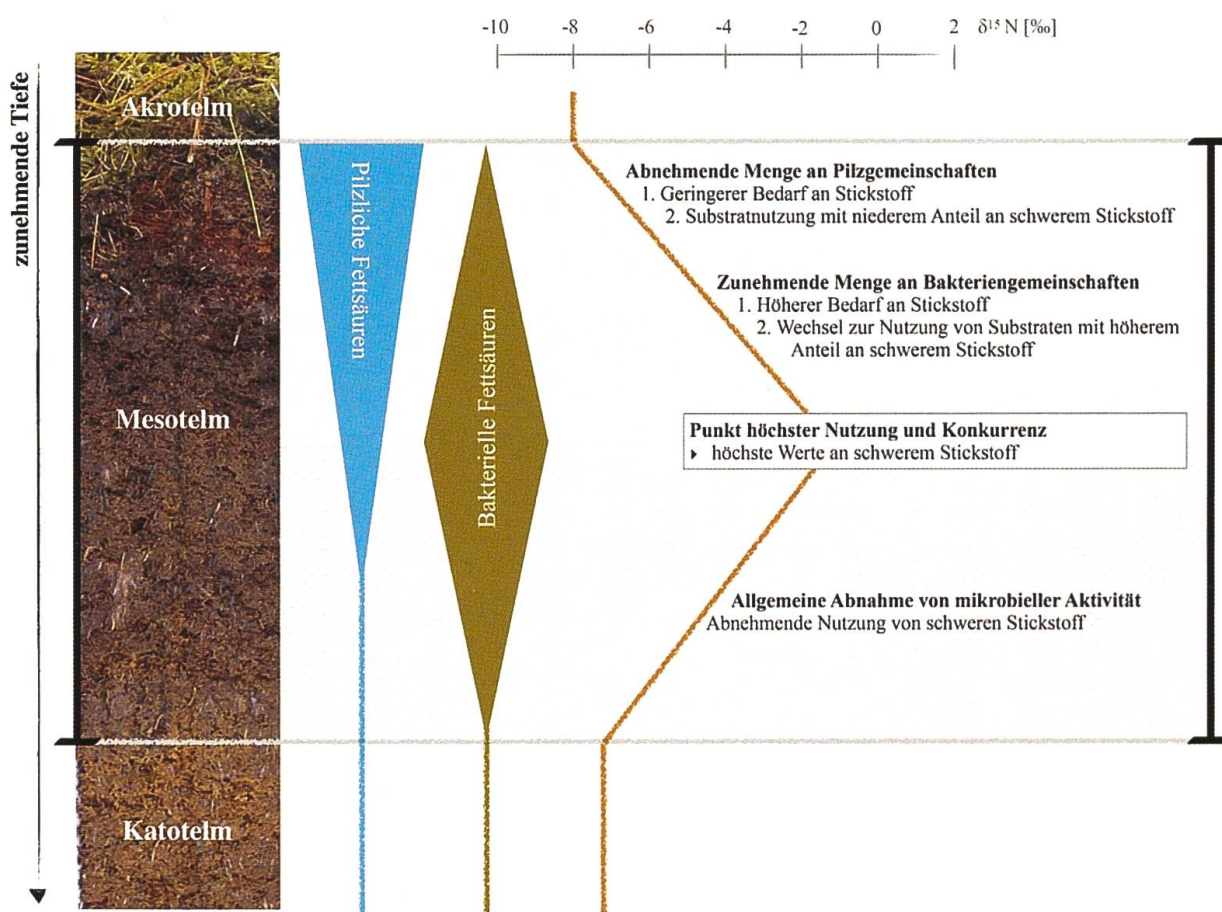


Abb. 3 Hypothese: In trockengelegten nährstoffarmen Moorböden sind im oberen Mesotelum Pilzgemeinschaften (blau) angesiedelt. Mit zunehmender Tiefe nehmen die bakteriellen Gemeinschaften (grün) zu. An der Grenze zwischen oberem und unterem Mesotelum befindet sich die grösste mikrobielle Diversität, und es wird am meisten N verstoffwechselt und damit weniger ^{15}N angereichert (orange Linie). In noch tieferen Schichten (Katotelm) nimmt die mikrobielle Aktivität aufgrund von Sauerstoffmangel wieder ab, und es wird weniger ^{15}N fixiert.
Quelle: Groß-Schmolders et al. 2020

3 Modellierung von Bodenerosion

3.1 Verbesserung der Modelle durch Fernerkundungsdaten

Für gesellschaftliche und politische Entscheidungen zum Bodenschutz, aber auch für die Landnutzung werden gross-skalige Karten benötigt, die das Erosionsrisiko abbilden. Bei dem am häufigsten verwendeten RUSLE-Modell (Revised Universal Soil Loss Equation) werden die fünf wichtigsten Faktoren berücksichtigt: Bodenerodibilität, Regenerosivität, Management der Pflanzendecke, Länge und Steilheit der Hänge und unterstützende Massnahmen (Alewell et al. 2019).

Durch die Hinzunahme von Satellitendaten, Modellen in Geoinformationssystemen und Statistiken ist es uns gelungen, die einzelnen Faktoren des Modells immer mehr zu präzisieren. Heute kann das RUSLE-Modell das Erosionsrisiko global in einer Auflösung von 250 x 250 Metern darstellen (Abb. 4; Borrelli et al. 2017). Für das Jahr 2012 berechnete RUSLE einen weltweiten Verlust an Boden von etwa 36'000 Megatonnen (Borrelli et al. 2017).

Mit dem Modell lässt sich auch die Entwicklung der Bodenerosion über die Zeit verfolgen und vorhersagen. Ein Vergleich der Jahre 2001 und 2012 zeigte auf, dass die Zunahme an landwirtschaftlich genutztem Land ein massgeblicher Treiber ist. Das Modell sagt die grösste Zunahme von Erosion für Länder der Sub-Sahara, Südamerika und Südostasien voraus. Gleichzeitig zeigten Modellierungen unter Nutzung der vorhergesagten Klimawandelszenarien, dass insbesondere die Veränderung des Klimas mit ausgedehnten Trockenperioden, auf die starke Regenfälle folgen, eine drastische Erhöhung der Bodenerosion bewirken wird (Borrelli et al.2020).

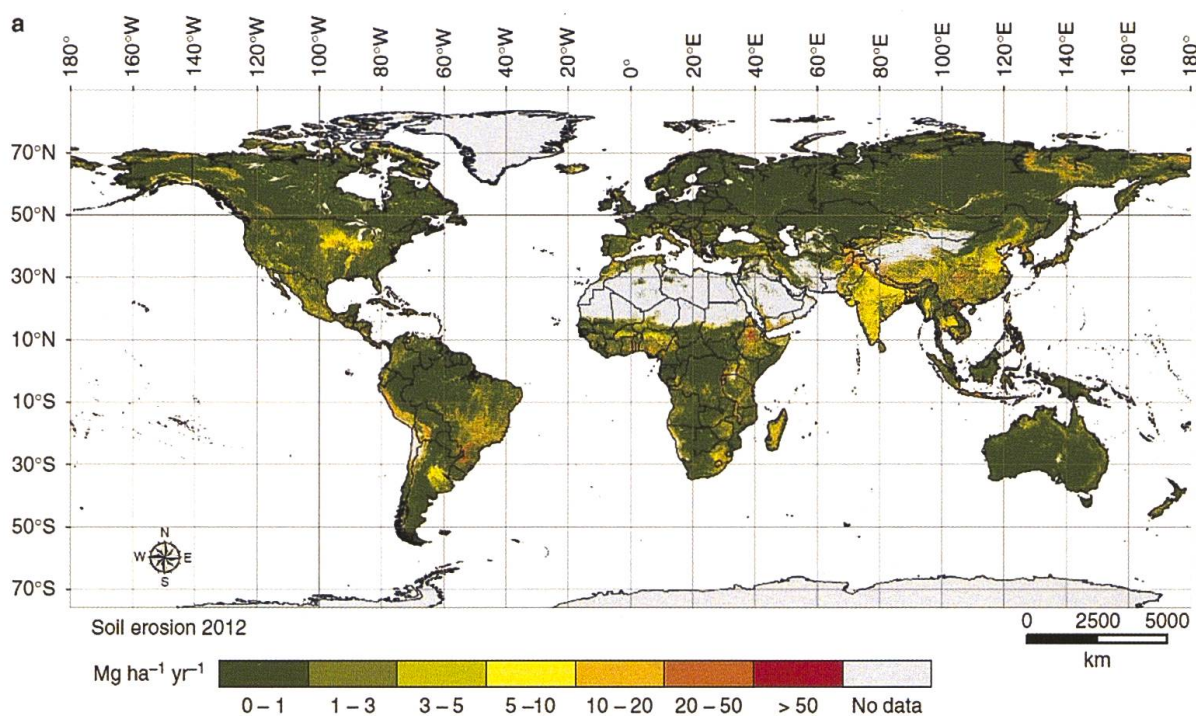


Abb. 4 Globale Modellierung von Erosion im Jahr 2012 in einer Auflösung von 250m x 250m. Hotspots (orange und rot) befinden sich in Sub-Sahara-Afrika, Südamerika und Südostasien.

Quelle: Borrelli et al. 2017

3.2 Anwendung des RUSLE-Modells auf die Schweiz

Dank hochaufgelöster Datensätze kann das RUSLE-Modell die Erosion auf Grünlandflächen der Schweiz in einer Auflösung von 100 x 100 Metern berechnen (Schmidt et al. 2016, 2019). Zudem wurden damit Erosionsprozesse auch höher zeitlich aufgelöst auf Monate, Wochen oder mehrere Tage berechnet.

Eine solche Analyse ergab beispielsweise, dass das Erosionsrisiko im Schweizer Grünland im Sommer insgesamt 48-mal höher ist als im Winter (Abb. 5; Schmidt et al. 2019).

Bei Erosionsbetrachtung in der Schweiz wurde der Beitrag von Weiden und Wiesen bisher unterschätzt: Diese nehmen in der Schweiz knapp ein Drittel der Landesfläche ein, über 70 % davon werden landwirtschaftlich genutzt (Schmidt et al. 2018). Wie das Modell aufzeigt, sind diese Flächen vor allem im Sommer durch Beweidung und Regenfälle besonders anfällig für Bodenerosion. Die Modellierung identifiziert Hotspots und ermöglicht so, zeitlich und örtlich begrenzte Schutzmassnahmen – beispielsweise Einzäunungen oder andere Beweidungsstrategien – zu planen.

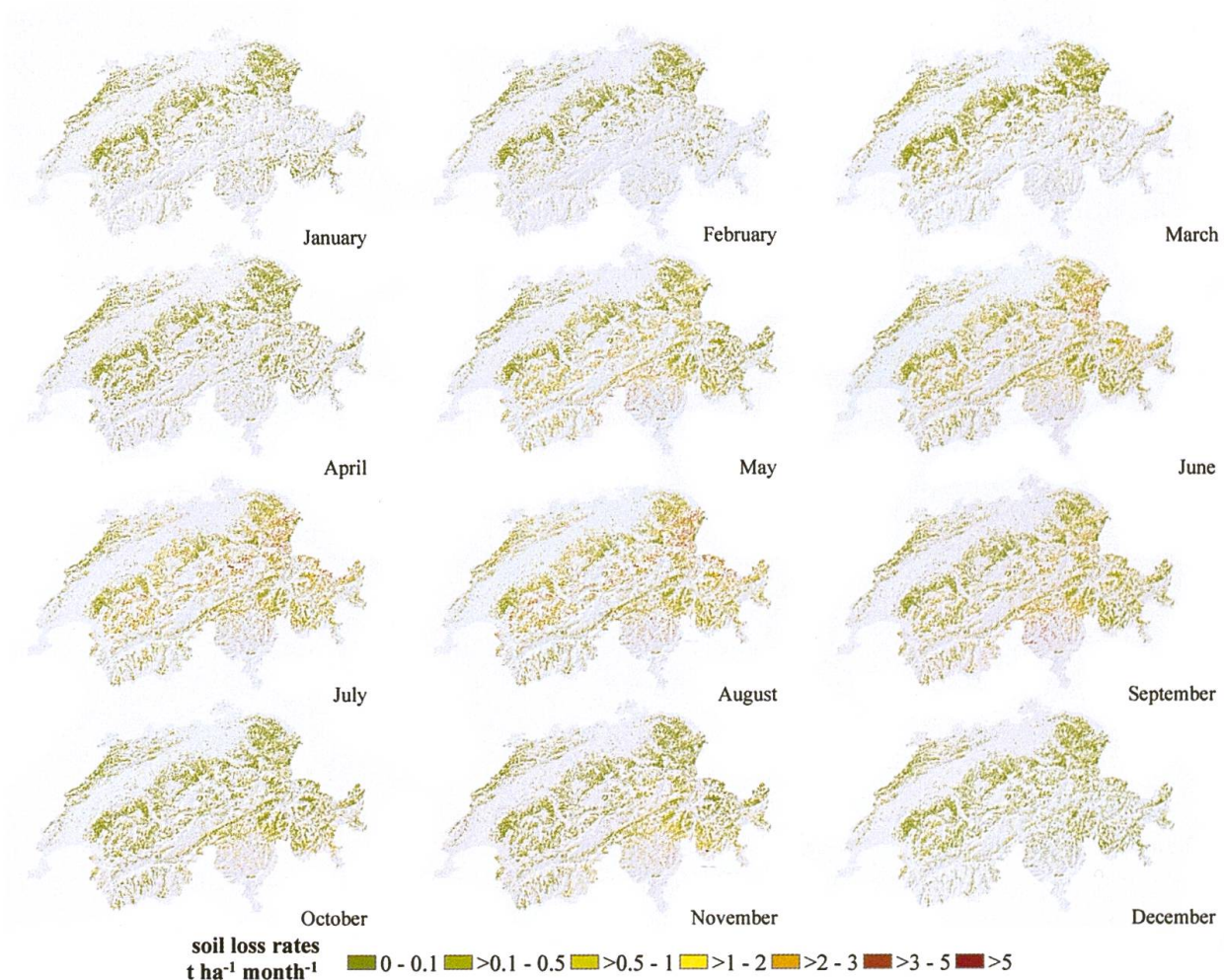


Abb. 5 Modellierung der monatlichen Erosion auf Grünland in der Schweiz. Im Sommer ist der Bodenverlust deutlich höher.
Quelle: Schmidt et al. 2019

3.3 Beobachtung der Bodendegradation mit Fernerkundung in den Alpen

Ein klassischer Ansatz der Fernerkundung, um optische Phänomene auf Luftbildern zu identifizieren, ist die sogenannte Objektbasierte Bildanalyse. Mithilfe einer Software werden die Eigenschaften des Luftbildes ermittelt, welche dann genutzt werden, um Objekte zu kartieren. So werden beispielsweise hellere Stellen auf einer Alpwiese als erodierte Fläche identifiziert (Abb. 6).

Eine erste Analyse für etwa dreissig Quadratkilometer des Urserentals im Kanton Uri, basierend auf fünf Luftaufnahmen in einer Zeitreihe von 2000 bis 2016, zeigte für das Tal eine fortschreitende Bodenerosion auf, wie sie in vielen Alptälern beobachtet wird (Zweifel et al. 2019). Zudem konnte zwischen verschiedenen Ursachen und Formen von Bodenerosion wie Erdbeben, Nutztierhaltung und Landmanagement unterschieden werden (Abb. 6). Während in niedrigeren Lagen hauptsächlich landwirtschaftliche Nutzung für die Bodenerosion verantwortlich ist, scheint in höheren Lagen mehrheitlich der Klimawandel für eine Zunahme von Erosion durch Erdbeben verantwortlich zu sein (Zweifel et al. 2019).

In einem nächsten Schritt wurde die Auswertung von Luftbildern in Zusammenarbeit mit dem Departement für Informatik der Universität Basel (Maxim Samarin, Prof. Dr. Volker Roth) mit Hilfe von Deep Learning Algorithmen modernisiert (Samarin et al. 2020). Dadurch läuft der Prozess automatisiert, beschleunigt und objektiviert ab, womit eine Übertragung der Methoden auf zehn weitere alpine Täler möglich war (Zweifel et al. 2021). In einem vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) geförderten Projekt soll diese Methode nun auf die ganze Schweiz angewendet werden. Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, die Resultate in die landwirtschaftliche Praxis und Politik einfließen zu lassen.

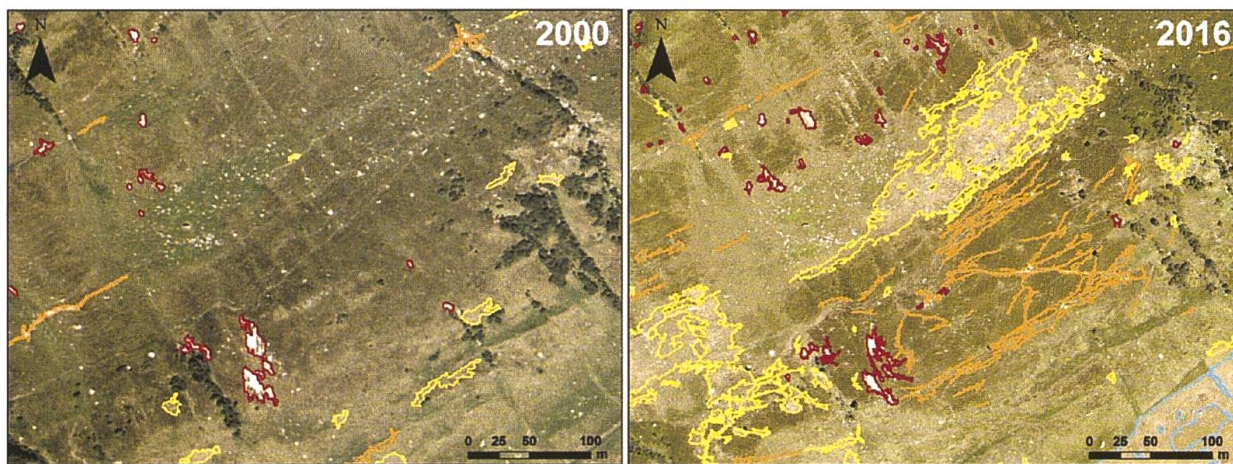


Abb. 6 Zunahme der Bodenerosion im Urserental zwischen 2000 und 2016. Rot: flache Erdbeben, gelb: flächenhafte Erosion, orange: Nutztierspuren, blau: Landmanagementeffekte.

Quelle: Luftbild © Swisstopo, Daten aus Zweifel et al. 2019

4 Phosphorverlust durch Bodenerosion und drohender Phosphormangel

Neben dem Stickstoff ist vor allem der im Boden enthaltene Phosphor eine wichtige Ressource für das Wachstum von Pflanzen – er ist Bestandteil von DNA, RNA und den Phospholipiden der Zellmembran. Anders als Stickstoff, der von Mikroorganismen oder mit dem industriellen Haber-Bosch-Verfahren aus der Luft fixiert werden kann, ist Phosphor eine endliche geologische Ressource. Wird er durch Erosion vom Boden abgeschwemmt und in Flüsse eingetragen, so landet er schlussendlich im Meer und ist zum einen für die Landwirtschaft für immer verloren, zum anderen trägt er zur ungewünschten Nährstoffanreicherung (Eutrophierung) von Flüssen, Seen und Meeren bei.

Phosphor kann dem landwirtschaftlichen Boden durch organische Substanzen wie Gülle und Mist oder aber durch Kunstdünger wieder zugeführt werden. Allerdings sind die natürlichen geologischen Phosphorvorkommen, die sich zu 80 % in Nordafrika befinden, begrenzt. Es ist ungewiss, wie lange diese Vorräte halten werden. Zudem wird Dünger immer teurer; schon jetzt können sich viele Landwirte in ärmeren Regionen der Welt den Zukauf nicht mehr leisten. Die Schweiz – zu 100 % von Phosphorimporten abhängig – hat schon auf den drohenden Phosphormangel reagiert: Ab 2026 muss Phosphor aus allen Abwässern, Klärschlämmen und Abfällen recycelt werden.

Eine weitere Massnahme gegen den drohenden Phosphormangel wäre, die Bodenerosion zu reduzieren und so den Verlust von Phosphor von vorneherein zu verhindern. Hierzu braucht es jedoch verlässliche Informationen darüber, welche Regionen der Erde jetzt und in Zukunft besonders von Phosphormangel betroffen sind. Deshalb hat die Forschungsgruppe Umweltgeowissenschaften in Zusammenarbeit mit einem internationalen Konsortium von Wissenschaftlern eine Karte erstellt, die den Phosphorverlust durch Bodenerosion weltweit kartiert (Abb. 7). Hierfür wurden globale Daten zu Erosionsraten (*Borrelli et al. 2017*; siehe Abschnitt 3.1) mit globalen Daten zum Phosphorgehalt des Bodens (*Ringeval et al. 2017*) kombiniert (*Alewell et al. 2020*).

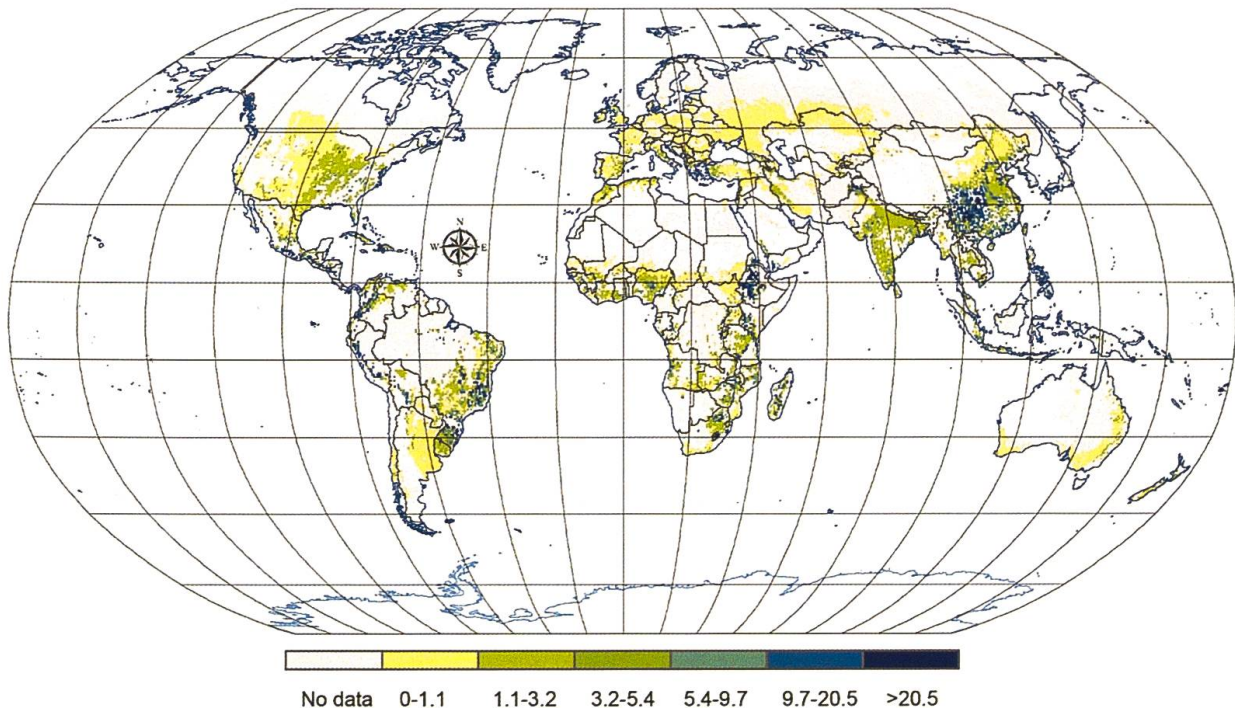


Abb. 7 Hoch aufgelöste Kartierung der weltweiten Phosphorverluste durch Bodenerosion auf Ackerböden (kg pro Hektar und Jahr).
Quelle: Alewell et al. 2020

Anhand der Resultate lassen sich die von Phosphorverlust am meisten betroffenen Regionen identifizieren – die grössten Hotspots befinden sich in Afrika, Südamerika und Asien (Abb. 7; Alewell et al. 2020). Wie weitere Analysen zum Phosphoreintrag und Phosphorverlust in den verschiedenen Ländern zeigen, kann der Phosphormangel in Afrika aufgrund hoher Kosten nicht durch Kunstdünger und wegen mangelnder Infrastruktur und Tierhaltung auch nicht durch organischen Dünger ausgeglichen werden. In Südamerika liesse sich ein grosser Teil des Phosphorverlusts durch verbessertes Management (Gründüngung, organischer Dünger, Erosionsstopp) abfangen.

5 Fazit

Der Boden ist eine der wichtigsten Grundlagen für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln auf unserer Erde. Insbesondere bei einem weiteren Wachstum der globalen Bevölkerung müssen Böden und ihre Nährstoffe, vor allem Phosphor, durch geeignete Bewirtschaftung geschützt werden. Das betrifft in ganz besonderem Masse den Schutz vor Bodenerosion. Letzteres ist nicht nur ein gesellschaftliches und politisches Problem, sondern kann durch Validierung der Methoden und Modelle durch die Wissenschaft unterstützt werden, um Bodenerosion im kleinen und grossen Massstab zu quantifizieren, zu kartieren, Ursachen zu verstehen und zuverlässige Prognosen zu erstellen.

Die Erkenntnisse aus unserer Forschung unterstreichen nicht nur, wie wichtig es ist, jetzt gegen die fortschreitende Bodenerosion vorzugehen. Sie helfen auch, diese Erkenntnisse in die Praxis einfliessen zu lassen. Nur was sichtbar (gemacht) wird, tritt auch in das Bewusstsein, und nur was bewusst ist, wird auch in Politik und Gesetzgebung mit einfliessen. Wie geeignete Schutzmassnahmen aussehen könnten – beispielsweise weniger tiefes oder auch gar kein Pflügen, das Anlegen von Terrassen, Konturpflügen, Gründüngung, Mulchen und der Anbau von Mischkulturen – wissen wir bereits. Die Bodenforschung liefert die nötigen Daten und Informationen, um solche Massnahmen begründet und wirkungsvoll am richtigen Ort einzusetzen.

Literatur

- Alewell C., Birkholz A., Meusburger K., Wildhaber Y.S. & Mabit L. 2016. Quantitative sediment source attribution with compound-specific isotope analysis in a C3 plant-dominated catchment (central Switzerland). *Biogeosciences* 13(5): 1587–1596.
- Alewell C., Borrelli P., Meusburger K. & Panagos P. 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research* 7(3): 203–225.
- Alewell C., Giesler R., Klaminder J., Leifeld J. & Rollog M. 2011. Stable carbon isotopes as indicators for micro-geomorphic changes in peatlands. *Biogeoscience Discussions* 8(1): 527–548.
- Alewell C., Pitois A., Meusburger K., Ketterer M. & Mabit L. 2017. ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu from “contaminant” to soil erosion tracer: Where do we stand? *Earth-Science Reviews* 172: 107–123.
- Alewell C., Ringeval B., Ballabio C., Robinson D.A., Panagos P. & Borrelli P. 2020. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications* 11(1): 4546.
- Arata L., Meusburger K., Frenkel E., A’Campo-Neuen A., Iurian A.R., Ketterer M.E., Mabit L. & Alewell C. 2016. Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) – Part 1: A new conversion model to derive soil redistribution rates from inventories of fallout radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity* 162–163: 45–55.
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L. & Panagos P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications* 8(1): 2013.

- Borrelli P., Robinson D.A., Panagos P., Lugato E., Yang J.E., Alewell C., Wuepper D., Montanarella L. & Ballabio C. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(36): 21994–22001.
- Borrelli P., Van Oost K., Meusburger K., Alewell C., Lugato E. & Panagos P. 2018. A step towards a holistic assessment of soil degradation in Europe: Coupling on-site erosion with sediment transfer and carbon fluxes. *Environmental Research* 161: 291–298.
- Groß-Schmolders M., Klein K., Birkholz A., Leifeld J. & Alewell C. 2021. Rewetting and Drainage of Nutrient-Poor Peatlands Indicated by Specific Bacterial Membrane Fatty Acids and a Repeated Sampling of Stable Isotopes ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$). *Frontiers in Environmental Science* 9(378).
- Groß-Schmolders M., von Sengbusch P., Krüger J.P., Klein K., Birkholz A., Leifeld J. & Alewell, C. 2020. Switch of fungal to bacterial degradation in natural, drained and rewetted oligotrophic peatlands reflected in $\delta^{15}\text{N}$ and fatty acid composition. *SOIL* 6(2): 299–313.
- Hirave P., Glendell M., Birkholz A. & Alewell C. 2021. Compound-specific isotope analysis with nested sampling approach detects spatial and temporal variability in the sources of suspended sediments in a Scottish mesoscale catchment. *Science of the Total Environment* 755.
- Hirave P., Wiesenberg G.L.B., Birkholz A. & Alewell C. 2020. Understanding the effects of early degradation on isotopic tracers: implications for sediment source attribution using compound-specific isotope analysis (CSIA). *Biogeosciences* 17(7): 2169–2180.
- Lavrieux M., Birkholz A., Meusburger K., Wiesenberg G.L.B., Gilli A., Stamm C. & Alewell C. 2019. Plants or bacteria? 130 years of mixed imprints in Lake Baldegg sediments (Switzerland), as revealed by compound-specific isotope analysis (CSIA) and biomarker analysis. *Biogeosciences* 16(10): 2131–2146.
- Meusburger K., Evrard O., Alewell C., Borrelli P., Cinnelli G., Ketterer M., Mabit L., Panagos P., van Oost K. & Ballabio C. 2020. Plutonium aided reconstruction of caesium atmospheric fallout in European topsoils. *Scientific Reports* 10(1): 11858.
- Meusburger K., Mabit L., Ketterer M., Park J.-H., Sándor T., Porto P. & Alewell C. 2016. A multi-radionuclide approach to evaluate the suitability of $^{239+240}\text{Pu}$ as soil erosion tracer. *Science of The Total Environment* 566-567: 1489–1499.
- Ringeval B., Augusto L., Monod H., van Apeldoorn D., Bouwman L., Yang X., Achat D.L., Chini L.P., Van Oost K., Guenet B., Wang R., Decharme B., Nesme T. & Pellerin S. 2017. Phosphorus in agricultural soils: drivers of its distribution at the global scale. *Global Change Biology* 23(8): 3418–3432.
- Samarin M., Zweifel L., Roth V. & Alewell C. 2020. Identifying Soil Erosion Processes in Alpine Grasslands on Aerial Imagery with a U-Net Convolutional Neural Network. *Remote Sensing* 12(24): 4149.
- Schmidt S., Alewell C. & Meusburger K. 2018. Change of permanent grasslands extent (1996-2015) and national grassland dataset of Switzerland. *Data in Brief* 20: 1992–1998.
- Schmidt S., Alewell C. & Meusburger K. 2019. Monthly RUSLE soil erosion risk of Swiss grasslands. *Journal of Maps* 15(2): 247–256.
- Schmidt S., Alewell C., Panagos P. & Meusburger K. 2016. Regionalization of monthly rainfall erosivity patterns in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences* 20(10): 4359–4373.
- Zweifel L., Meusburger K. & Alewell C. 2019. Spatio-temporal pattern of soil degradation in a Swiss Alpine grassland catchment. *Remote Sensing of Environment* 235: 111441.
- Zweifel L., Samarin M., Meusburger K. and Alewell C. 2021. Investigating causal factors of shallow landslides in grassland regions of Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(11): 3421–3437.

