

Saisonale und räumliche Variabilität der Niederschlags-erosivität in der Schweiz

Simon Schmidt¹, Christine Alewell¹, Panos Panagos² und Katrin Meusbürger¹

¹Umweltgeowissenschaften, Universität Basel, Bernoullistrasse 30, CH-4056 Basel, Schweiz

²European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Via E. Fermi 2749, I-21027 Ispra, Italien

Zusammenfassung

Eine der treibenden Kräfte der Wassererosion ist die Niederschlagserosivität, die als Produkt der Energie eines erosiven Niederschlagsereignisses und der maximalen Niederschlagsintensität innerhalb 30 Minuten quantifiziert wird. In Erosionsmodellen wie der Universal Soil Loss Equation (USLE) und der revidierten Version (RUSLE) geht die Erosivität als R-Faktor ein. Um zeitgleich die stark ausgeprägte räumliche aber auch saisonale Variabilität zu erfassen, wurde der R-Faktor auf monatlicher Skala modelliert. Langjährige monatliche R-Faktoren basieren auf Messdaten von 87 Schweizer Niederschlagsmessstationen mit einer Auflösung von 10 Minuten über einen mittleren Messzeitraum von 19.5 Jahren. Ein stufenweises lineares Regressionsmodell (stepwise GLM) und eine leave-one-out cross-validation (LOOCV) selektieren hochaufgelöste Kovariaten, die die raum-zeitlichen Muster der R-Faktoren erklären. Die über die entsprechenden Regressionsgleichungen vorhergesagten monatlichen R-Faktoren sind mit den dazugehörigen Residuen zu 12 R-Faktor-Karten kombiniert. Die Residuen selbst sind über ordinary kriging interpoliert (Regression-Kriging). Als räumliche Kovariaten gehen verschiedene Niederschlagsgrößen wie Schneehöhen, Radar- und Bodenbeobachtungen des Niederschlags (CombiPrecip), tägliche alpine Niederschläge (EURO4M-APGD) und monatliche Niederschlagssummen (RhiresM) ein. Aus einem digitalen Höhenmodell (SwissAlti3D) sind Geländehöhe und Hangneigung als erklärende Variablen abgeleitet. Die Gegenüberstellung der 12 monatlichen R-Faktor-Karten zeigt, dass die Sommermonate (Juni, Juli, und August) von höchster Erosivität geprägt sind. Insbesondere die Südalpen (Kanton Tessin), die Bergzonen der Nordalpen und Teile der Talzone weisen in diesem Zeitraum hohe R-Faktoren auf. Zwischen Juni und September wird ein Anteil von 62 % an der Jahresniederschlagserosivität der Schweiz registriert. Die Identifikation von Regionen und Zeiträumen erhöhter Erosivität ermöglicht einen zielgerichteten Erosionsschutz und ein besseres Verständnis der Dynamiken von Erosionsprozessen innerhalb eines Jahres.

Abstract

One major controlling factor of water erosion is rainfall erosivity, which is quantified as the product of total storm energy of an erosive rainfall event and a maximum 30 min intensity. Rainfall erosivity is expressed as the R-factor in erosion models like the Universal Soil Loss Equation (USLE) and its revised version (RUSLE). R-factors were modelled on a monthly scale to catch simultaneously the highly spatial as well as temporal variability. The observations of a network with 87 precipitation gauging stations with a 10 min temporal resolution and a mean observation length of 19.5 years were used to calculate long-term monthly mean R-factors. Stepwise generalized linear regression (GLM) and leave-one-out cross-validation (LOOCV) select high resolution covariates which explain the spatial and the temporal patterns of R-factors within a month. The predicted R-factors of the regression equation and the corresponding residues are combined to 12 R-factor maps. The residues itself are interpolated by ordinary-kriging (regression-kriging). As spatial covariates, a variety of precipitation indicator data has been used such as snow depths, radar and ground observations of precipitation (CombiPrecip), daily alpine precipitation (EURO4M-APGD), and monthly precipitation sums (RhiresM). Elevation and slope are derived from a digital elevation model (SwissAlti3D) as explanatory variables. The comparison of the 12 monthly rainfall erosivity maps showed highest rainfall erosivity in summer (June, July, and August). In particular, the southern Alps (Canton Ticino), the alpine area of the northern Alps and parts of the valley region are affected by high R-factors during that period. The 4 months from June to September have a share of 62 % of the total annual R-Factor of Switzerland. The identification of regions and time slots with increased erosivity enables the introduction of selective erosion control and a better knowledge about dynamics of erosion processes within a year.

Keywords: rainfall erosivity, R-factor, Erosivität, dynamic erosion modelling, C-factor

1. Einleitung

In der Schweiz wird seit vielen Jahren Bodenerosionsforschung betrieben. Zahlreiche Forschungsarbeiten haben den Bodenabtrag durch Wasser auf Schweizer Böden gemessen (KONZ et al. 2012; ALEWELL et al. 2014), kartiert (MOSIMANN et al. 1990; PRASUHN 2011, 2012) und modelliert (GISLER et al. 2011; PRASUHN et al. 2013). Seit den 50er Jahren kann eine Zunahme der Erosionsgefährdung sowohl für die landwirtschaftliche Nutzfläche (WEISSHAIDINGER und LESER 2006) als auch für die alpinen Grünlandflächen (MEUSBURGER und ALEWELL 2008) nachgewiesen werden. Nach MOSIMANN et al. (1991) sind circa 20 % des Schweizer Kulturlands durch Wassererosion gefährdet. Die damit verbundenen jährlichen finanziellen Aufwendungen belaufen sich auf schätzungsweise 53 Millionen Schweizer Franken (LEDERMANN 2012). Unter dem Aspekt zukünftiger Klimaszenarien mit einer zu erwartenden Zunahme der Niederschlagshäufigkeit und -intensität werden die Gefährdung der Böden durch Wassererosion und die damit verbundenen Kosten weiter ansteigen (FUHRER et al. 2006). Ein Trend erhöhter Niederschlagserosivität ist bereits heute in den Monaten zwischen Mai und Oktober ersichtlich (MEUSBURGER et al. 2012). Niederschlag kann generell als die treibende Kraft im Erosionsprozess gesehen werden da er über die Prozesse der raschen Befeuchtung sowie der Planschwirkung der Tropfen direkten Einfluss auf die Mobilisierung von Bodenmaterial hat, aber gleichzeitig auch Transportmedium des Materials ist. In den empirischen Erosionsmodellen Universal Soil Loss Equation (USLE) und Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (RENARD et al. 1997; FOSTER et al. 2013) fließt die Wirkung des Niederschlags auf Böden in Form der Niederschlagserosivität als R-Faktor ein. Die weiteren Erosionsfaktoren der USLE und RUSLE sind Bodenbedeckung C, Bodenerodierbarkeit K, Hanglänge und Hangneigung LS, und Schutzmassnahmen P. Der langjährige Bodenabtrag durch Wasser kann über die Multiplikation dieser 5 Faktoren errechnet werden (SCHWERTMANN et al. 1987). Neben der unmittelbaren Quantifizierung des Bodenabtrags können aus den individuellen Faktoren wichtige Aussagen abgeleitet werden.

Aufgrund der hohen klimatischen Kontraste in der Schweiz, die im Wesentlichen durch die Topographie bedingt sind, resultiert eine räumliche und zeitliche Variabilität des Wetters. Diese Variabilität hat zur Folge, dass bestimmte räumliche aber auch zeitliche Muster in der Verteilung der Niederschlagserosivi-

tät entstehen. MEUSBURGER et al. (2012) wies auf die starke Saisonalität und räumliche Variation hin, allerdings wurden diese Muster der R-Faktoren für die Schweiz nicht kartographisch erfasst. Der R-Faktor für die Schweiz wurde bisher entweder als langjähriger Faktor (FRIEDLI 2006; GISLER et al. 2011; MEUSBURGER et al. 2012; PRASUHN et al. 2013) oder als saisonale Mittelwerte auf Landesebene (PANAGOS et al. 2015) berechnet. Hochaufgelöste Datensätze von MeteoSchweiz (z. B. CombiPrecip) und Swisstopo (z. B. SwissAlti3D) ermöglichen inzwischen die Berechnung der Niederschlagserosivität auf monatlicher Ebene. Durch die Kartierung monatlicher R-Faktoren kann eine Identifikation von zeitlichen Fenstern und Regionen hoher R-Faktoren zusammen mit raum-zeitlicher Vegetationsdynamiken (niedrige oder instabile Vegetationsbedeckungen) als Entscheidungshilfe im Boden- und Naturschutz dienen, um Bodenerosion, Hochwasser und Naturkatastrophen zielgerichtet vermeiden und bekämpfen zu können.

Um ein verbreitertes Verständnis über die Dynamiken des R-Faktors zu erlangen, werden in dieser Arbeit die raum-zeitlichen Muster der Niederschlagserosivität in der Schweiz untersucht, indem (i) monatliche R-Faktor-Karten auf Basis eines Regression-Kriging-Ansatzes mit hochaufgelösten Kovariaten erstellt und (ii) die raum-zeitlichen Variationen der Niederschlagserosivität in der Schweiz analysiert werden.

Die vorliegende Studie ist als Erweiterung der Berechnung langjähriger R-Faktoren der Schweiz durch MEUSBURGER et al. (2012) zu sehen. Eine ausführlichere Beschreibung der vorliegenden Forschung ist in SCHMIDT et al. (2016) veröffentlicht.

2. Material und Methoden

2.1. Berechnung der Niederschlagserosivität (R-Faktor)

Die Niederschlagserosivität wird im Erosionsmodell RUSLE als R-Faktor ausgedrückt und durch das Produkt der gesamten Energie eines erosiven Niederschlagsereignisses und seiner maximalen Intensität innerhalb 30 Minuten quantifiziert (BROWN und FOSTER 1987, WISCHMEIER und SMITH 1978). Die Festlegung des Grenzwertes eines erosiven Niederschlagsereignisses folgt der Definition von RENARD et al. (1997) unter Modifikation durch MEUSBURGER et al. (2012).

Die Niederschlagsenergie (e_r , MJ ha⁻¹ mm⁻¹) eines jeden Zeitintervalls wird durch die Niederschlagsintensität (i_r , mm h⁻¹) während dieser Zeitspanne aus-

gedrückt und wie folgt berechnet:

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05i_r)] \quad (1)$$

Die Ereignisniederschlagserosivität (EI_{30}) ergibt sich aus dem Produkt der Niederschlagsenergie (e_r) eines erosiven Ereignisses und seiner maximalen Niederschlagsmenge (v_r , mm) während einer Zeiteinheit r unter Berücksichtigung der maximalen Niederschlagsintensität innerhalb 30 Minuten (I_{30} , mm h⁻¹).

$$EI_{30} = \left(\sum_{r=1}^k e_r v_r \right) I_{30} \quad (2)$$

Die monatliche Niederschlagserosivität (R_{mo} , MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹) ist der Mittelwert der aufsummierten Ereignisniederschlagserosivität (EI_{30}) über den Zeitraum eines Monats:

$$R_{mo} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k \quad (3)$$

Wobei n der Anzahl an Jahren mit der Anzahl der erosiven Ereignisse (m_j) innerhalb eines bestimmten

Monats j entspricht. k ist der Index eines Einzelerignisses mit seiner entsprechenden Ereignisniederschlagserosivität.

Schnee, Schneeschmelze und Niederschlag auf gefrorenem Boden (Temperaturgrenzwert von 0 °C) werden nicht im R-Faktor berücksichtigt (RENARD et al. 1997).

2.2. Niederschlagsmessnetz

Die monatlichen R-Faktoren wurden aus Niederschlagsmessungen von 87 automatischen Messstationen mit Messintervallen von 10 Minuten abgeleitet. Mit einer mittleren Messperiode von 19.5 Jahren pro Station wird das vorgeschlagene Minimum der Beobachtungszeit (15 Jahre) zur Berechnung des R-Faktors erfüllt (FOSTER et al. 2013). Die Stationen decken alle landwirtschaftlichen Zonen der Schweiz ab (Abbildung 1). Um den Einfluss des Schnees auszuschliessen sind ausserdem Temperaturen in stündlicher Auflösung für 71 Stationen erfasst oder von der nächstgelegenen Stationen abgeleitet (16 Stationen, Distanz < 20 km).

2.3. Datensätze und Kovariaten

In einem Land mit abgelegenen Hochgebirgsregionen wie der Schweiz ist für die Regionalisierung der punktuell an den Messstationen erfassten R-Faktoren

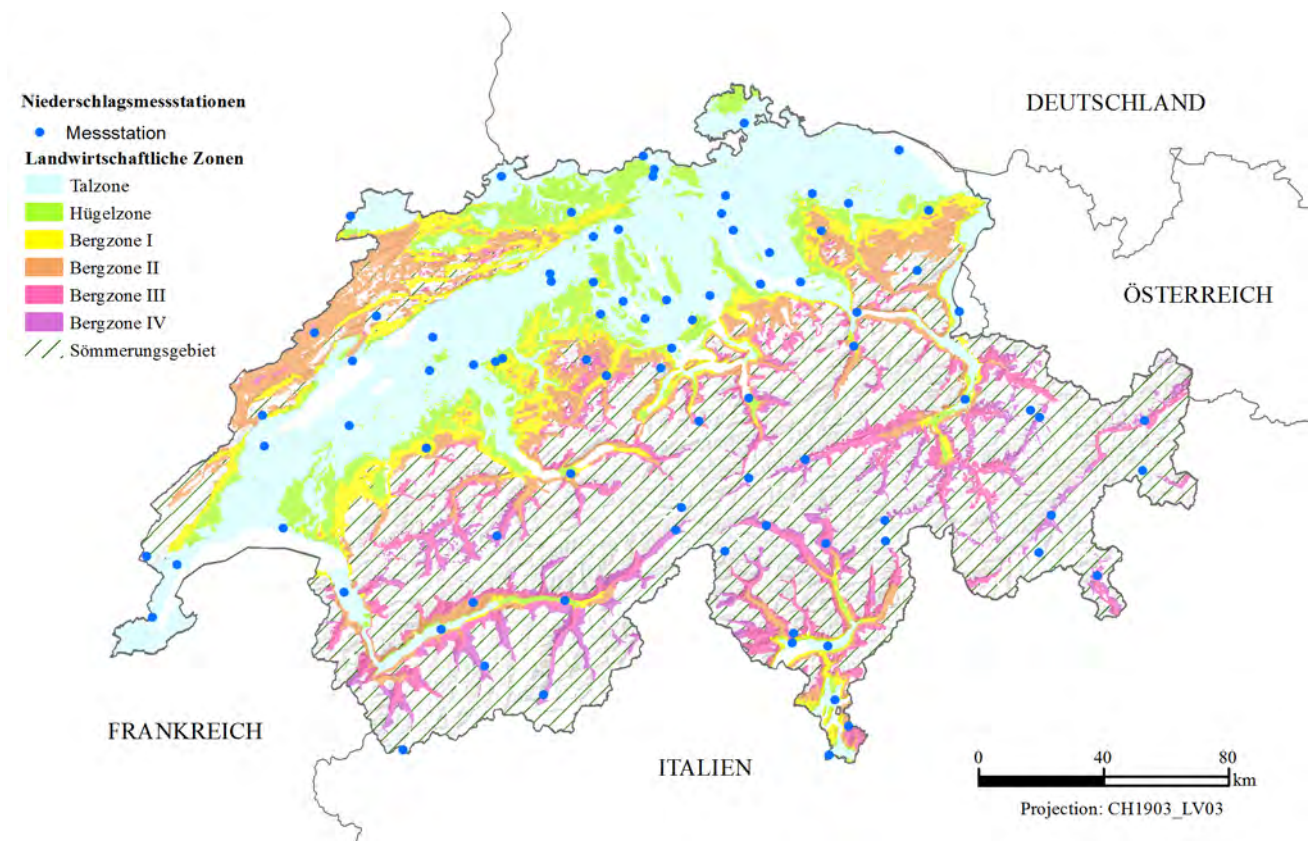


Abbildung 1: Landwirtschaftliche Zonen (Bundesamt für Landwirtschaft BLW) und Standorte der 87 Messstationen.

eine Vielzahl an erosionsbeeinflussenden Kovariaten notwendig. Hauptsächlich wird die Niederschlags-erosivität durch Niederschlagsparameter und Relief gesteuert (MEUSBURGER et al. 2012; PANAGOS et al. 2015, 2016b).

Daher gehen in die Berechnung als Annäherung an den Schnee als steuernde Grösse stündliche Schneehöhen (an 58 Stationen, stündliche zeitl. Auflösung, Zeitraum 1988–2010, MeteoSwiss) ein. Diese wurden als langjährige mittlere monatliche Schneehöhen zusammengefasst und interpoliert (IDW). Niederschlagsparameter werden durch stündliche CombiPrecip-Daten (geostatistische Kombination von Punktmessungen an 150 Stationen und drei C-Band Radar-Beobachtungen, 1 km räuml. Auflösung, Zeitraum 2005–2015, SIDERIS et al. 2014) ausgedrückt, die zu vieljährigen monatlichen Mittelwerten aggregiert sind. Darüber hinaus stammen langjährige mittlere Tagesniederschlagssummen auf Monatsebene vom Datensatz EURO4M-APGD (5 km räuml. Auflösung, Zeitraum 1971–2008, ISOT-

TA et al. 2014). Langjährige mittlere monatliche Niederschlagssummen sind aus RhiresM (1 km räuml. Auflösung, Zeitraum 1961–2015, METEOSWISS 2013) gemittelt. Reliefgrößen wie Geländehöhe und Hangneigung sind aus dem digitalen Höhenmodell SwissAlti3D (Swisstopo) mit einer Auflösung von 2 m extrahiert. Mit den hochaufgelösten Datensätzen liegt eine Informationsgrundlage vor, die in dieser Detaildichte bisher nicht in Europäische (PANAGOS et al. 2015, 2016a) oder Schweizer (MEUSBURGER et al. 2012) R-Faktor-Modellierungen Eingang gefunden hat.

2.4. Regionalisierung der monatlichen R-Faktoren für die Schweiz

Modellierungen zeigen, dass eine Kombination aus einem Regressionsmodell und einer Kriging-Interpolation der Residuen (Regression-Kriging) gut geeignet ist, um Niederschlagserosivität zu modellieren (HANEL et al. 2016, MEUSBURGER et al. 2012, ANGULA-MARTÍNEZ und BEGUERÍA 2009).

Tabelle 1: Regressionsgleichungen der 12 Monate und entsprechende Bestimmtheitsmasse R^2 , mittlere quadratische Fehler RMSE und ausgeschlossene Ausreisserstationen

Monat	Regressionsgleichung	R^2	RMSE (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ month ⁻¹)	ausgeschlossene Ausreisser
Januar	$R_{Jan} = 2.101 - 4.150 \cdot \text{CombiPrecip}_{Jan} - 0.006 \cdot \text{Schneehöhe}_{Jan} + 0.017 \cdot \text{Rhires}_{Jan} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.52	6.98	Method
Februar	$R_{Feb} = 2.702 - 13.812 \cdot \text{CombiPrecip}_{Feb} - 0.007 \cdot \text{Schneehöhe}_{Feb} + 0.019 \cdot \text{Rhires}_{Feb} + 0.211 \cdot \text{EURO4M-APGD}_{Feb} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.53	12.96	Monte Generoso, Napf, Säntis
März	$R_{Mär} = 2.534 - 7.735 \cdot \text{CombiPrecip}_{Mär} - 0.006 \cdot \text{Schneehöhe}_{Mär} + 0.018 \cdot \text{Rhires}_{Mär} + 0.170 \cdot \text{EURO4M-APGD}_{Mär} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.49	13.10	C. du G. St-Bernard, Säntis
April	$R_{Apr} = 2.330 - 3.319 \cdot \text{CombiPrecip}_{Apr} - 0.008 \cdot \text{Schneehöhe}_{Apr} + 0.023 \cdot \text{Rhires}_{Apr} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe} - 0.019 \cdot \text{Hangneigung}$	0.65	21.01	C. du G. St-Bernard, Säntis, Weissfluhjoch
Mai	$R_{Mai} = 2.965 + 2.072 \cdot \text{CombiPrecip}_{Mai} - 0.002 \cdot \text{Schneehöhe}_{Mai} + 0.015 \cdot \text{Rhires}_{Mai} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.60	73.39	Davos, C. du G. St-Bernard,
Juni	$R_{Jun} = 3.890 + 0.014 \cdot \text{Rhires}_{Jun} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.58	126.03	C. du G. St-Bernard
Juli	$R_{Jul} = 3.926 + 5.710 \cdot \text{CombiPrecip}_{Jul} + 0.251 \cdot \text{EURO4M-APGD}_{Jul} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.66	138.77	Monte Generoso, C. du G. St-Bernard, Stabio
August	$R_{Aug} = 3.627 + 0.010 \cdot \text{Rhires}_{Aug} + 0.194 \cdot \text{EURO4M-APGD}_{Aug} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.47	330.16	C. du G. St-Bernard, Stabio
September	$R_{Sep} = 2.760 + 2.243 \cdot \text{CombiPrecip}_{Sep} + 0.539 \cdot \text{EURO4M-APGD}_{Sep} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.64	81.91	C. du G. St-Bernard, Stabio
Oktober	$R_{Okt} = 2.753 + 0.0161 \cdot \text{Rhires}_{Okt} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.62	81.60	Piz Corvatsch, C. du G. St-Bernard, Stabio
November	$R_{Nov} = 2.665 + 3.787 \cdot \text{CombiPrecip}_{Nov} - 0.034 \cdot \text{Schneehöhe}_{Nov} + 0.166 \cdot \text{EURO4M-APGD}_{Nov}$	0.10	55.72	Piz Corvatsch, C. du G. St-Bernard, Säntis
Dezember	$R_{Dez} = 2.437 + 0.013 \cdot \text{Rhires}_{Dez} - 0.001 \cdot \text{Geländehöhe}$	0.26	177.65	C. du G. St-Bernard

CombiPrecip = Kombination von Bodenstations- und Radarmessungen des Niederschlags

Rhires = monatliche Niederschlagssummen

EURO4M-APGD = alpine Tagesniederschlagssummen

Für die Regionalisierung der monatlichen R-Faktoren an den 87 Stationen der Schweiz wird daher ein Regression-Kriging-Ansatz verfolgt (HENGL et al. 2004, 2007). Über ein allgemeines lineares Modell (generalized linear model, GLM; GOTWAY und STROUP 1997) wird eine Regression zwischen den an den 87 Standorten berechneten monatlichen R-Faktoren (R_{mo}) und den hochaufgelösten Kovariaten durchgeführt. Das GLM stellt eine Beziehung zwischen R-Faktoren (Zielvariable) und Kovariaten her um die Niederschlagserosivität mit der bestmöglichen Auflösung der Kovariaten abzuschätzen (ODEH et al. 1995, MCBRATNEY et al. 2000). Im zweiten Schritt des Regression-Kriging werden die Residuen des GLM über ordinary kriging interpoliert (MCBRATNEY et al. 2000, HENGL et al. 2004) und die vorausberechneten R-Faktoren des GLM mit den entsprechenden Residuenkarten aufsummiert. Durch diese Kombination kann der Standardfehler der R-Faktor-Karte berücksichtigt werden. Für jeden Monat wird das Regression-Kriging wiederholt um 12 individuell errechnete R-Faktor-Karten zu erhalten.

Zusätzlich wird eine leave-one-out cross-validation (LOOCV) zur weiteren Qualitätskontrolle hin-

zugefügt (EFRON und TIBISHIRANI 1997). Für jedes der 12 GLM werden über eine automatisierte stufenweise Auswahl (stepwise feature selection) signifikante Kovariaten (α -to-enter 0.1; KUTNER et al. 2005) gewählt. In der Berechnung bleiben Ausreisser (Bonferroni-adjusted outlier test) und Beobachtungen mit hohem Einfluss (Cook's distance) unberücksichtigt. Die Anpassungsgüte des Modells (goodness-of-fit) wird über das Bestimmtheitsmass (R^2), den mittleren quadratischen Fehler (RMSE), und die Devianz beschrieben. In der Fehlerdiagnose des Regressionsmodells wird die Normalverteilung, die Homoskedastizität, der variance inflation factor (vif), und die Autokorrelation bewertet. Die Regionalisierung der R_{mo} sind mit dem R-package «caret» (v6.0-68) und in ESRI ArcGIS (v10.2.2.) umgesetzt.

2.5. Summenkurven der täglichen R-Faktoren

Die R-Faktoren eines jeden Tages im Jahr sind über den Messzeitraum (durchschnittlich 19.5 Jahre) je Station gemittelt und zu jährlichen R-Faktor-Summenkurven kumuliert. Tagessummen von Stationen innerhalb einer landwirtschaftlichen Zone werden zu mittleren Werten zusammengefasst. Die landwirtschaftlichen Zonen repräsentieren vor allem Einheiten ähnlicher Landnutzung, Relief, und Hang-

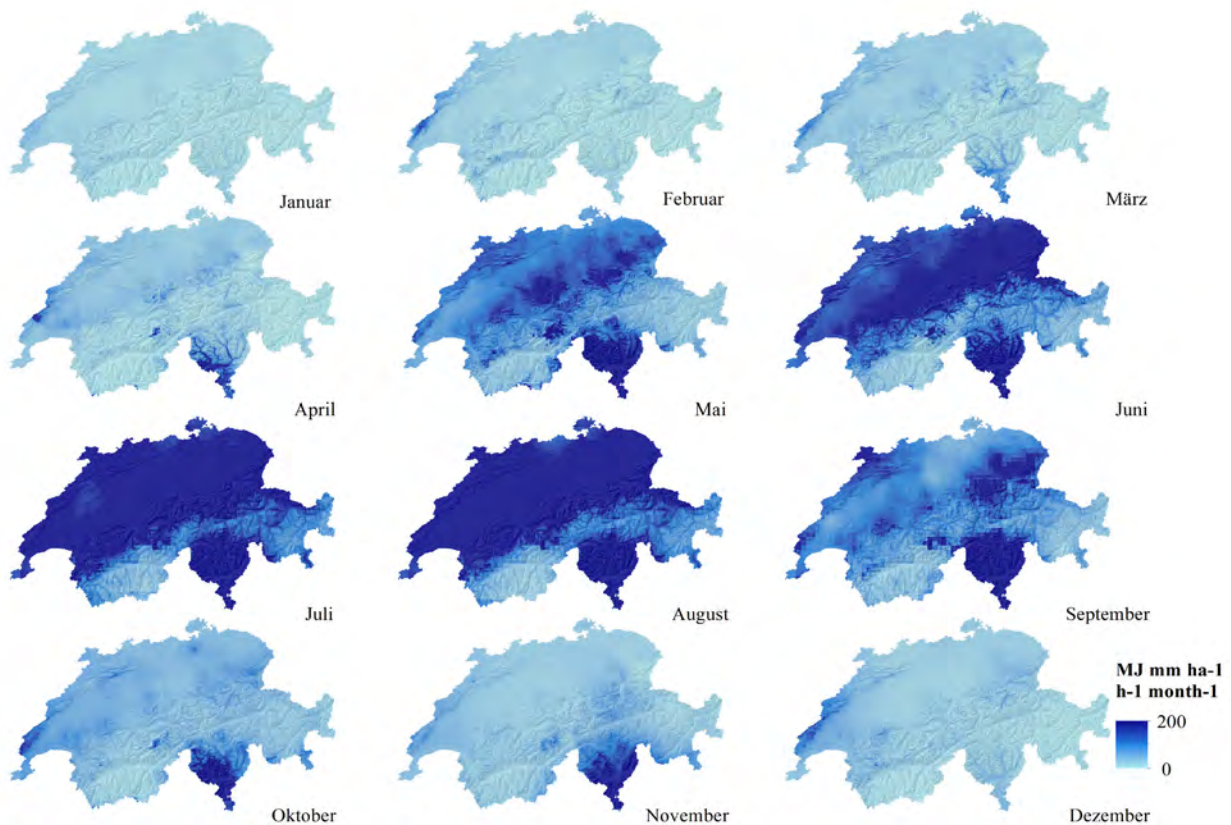


Abbildung 2: Monatliche R-Faktor-Karten der Schweiz (einheitliche Farbstreckung von 0 bis 200 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹) berechnet über Regression-Kriging

neigungsklasse. Als Ergänzung können SCHMIDT et al. (2016) Summenkurven für die biogeographischen Regionen der Schweiz entnommen werden.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Monatliche R-Faktor-Karten der Schweiz

Alle Kovariaten sind mindestens für einen Monat im stepwise GLM signifikant ($p < 0.1$) und können die R_{mo} erklären. Die Berechnungen eines jeden Monats basieren auf einer automatisierten Auswahl an Kovariaten entsprechend des Akaike information criterion (AIC). Tabelle 1 zeigt die Auswahl der Kovariaten in den entsprechenden Regressionsgleichungen sowie R^2 und RMSE nach Monat. Pro Monat wurden ein bis drei Ausreiser ausgeschlossen.

Zur Vergleichbarkeit der raum-zeitlichen Muster sind die Farbskalen der monatlichen R-Faktor-Karten (Abbildung 2) einheitlich zwischen 0 und 200 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹ gestreckt, obgleich die absoluten Werte im Sommer weitaus höher liegen (Tabelle 2).

Die zeitlichen Muster der Regionalisierung der modellierten R_{mo} zeigen eine hohe jahreszeitliche Dynamik mit niedrigsten nationalen Mittelwerten im Januar (10.5 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹) und höchsten

Tabelle 2: Monatliche nationale R-Faktoren (R_{mo}) in MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹

Monat	Minimum	Maximum	Mittelwert
Januar	0.2	71.3	10.5
Februar	0.0	247.3	13.5
März	0.0	179.0	20.1
April	0.2	1014.4	28.8
Mai	8.3	1717.8	120.2
Juni	3.6	1262.1	174.8
Juli	12.6	1481.1	255.4
August	8.3	1994.9	263.5
September	6.8	6107.9	147.7
Oktober	5.7	977.0	57.0
November	4.9	357.1	41.6
Dezember	1.3	234.4	24.9

Werten im August (263.5 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹). Wie die Übereinstimmung der R-Faktor-Karten im Sommer mit der Karte der extremen 100jährigen Punktniederschläge (SPREAFICO und WEINGARTNER 2005) zeigt, sind hohe sommerliche R_{mo} mit Extremniederschlägen der Schweiz kongruent. Diese R-Faktoren resultieren auch aus den Gewitterzyklen in der Schweiz, die am Ende des Frühlings (Mai) einsetzen und bis zum Herbstbeginn (Septem-

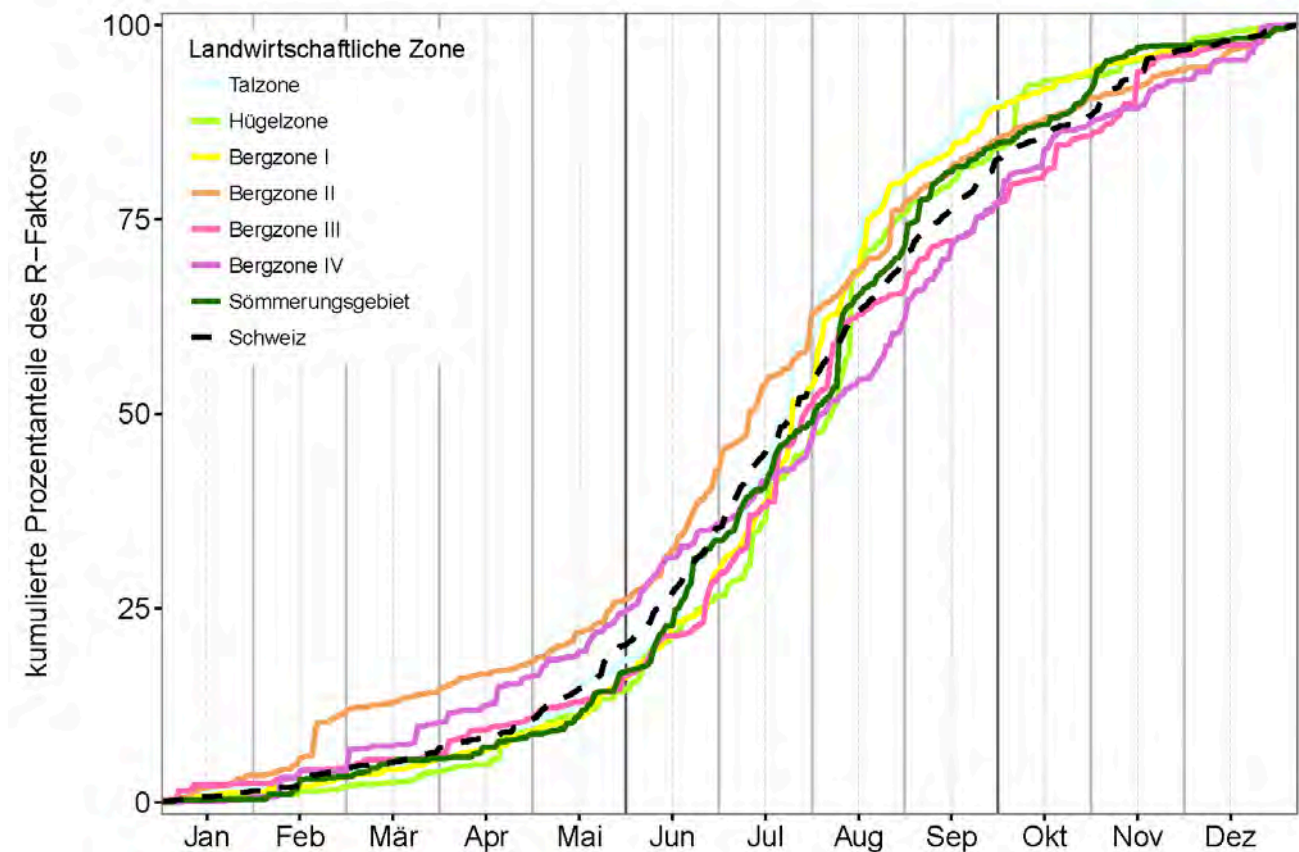


Abbildung 3: Summenkurve der täglichen R-Faktoren für die landwirtschaftlichen Zonen der Schweiz

ber) anhalten (VAN DELDEN 2001, PERROUD und BARDER 2013, NISI et al. 2016, PUNGE und KUNZ 2016). Ab September zeigt sich national eine Abnahme der Erosivität.

Räumliche Muster erhöhter Erosivität im Frühling sind in den Bergzonen I und II sowie der Sömmerungsgebiete im Bereich des Jura, in den Bergzonen der westlichen und östlichen Teilen der Nordalpen sowie in den südlichen landwirtschaftlichen Zonen des Kantons Tessins zu beobachten. Hohe winterliche R_{mo} kommen durch orographische Niederschläge zustande, die aus Tiefdruckgebieten Nordeuropas und nordwestlicher Fronten entstehen. In den Frühlingsmonaten ist eine Zunahme der Erosivität im Tessin beobachtbar. Das leicht verfrühte Einsetzen der Gewitterperiode an der Südflanke der Alpen bewirkt hier intensivere Regenfälle und damit höhere R_{mo} . Im Sommer sind insbesondere die Südalpen, Bergzonen der Nordalpen und Teile der Talzone von hoher Erosivität geprägt. Sommergewitter haben vor allem im alpinen Bereich hohen Einfluss auf erosive Ereignisse. An der Südflanke der Alpen kommt hinzu, dass orographische Regenfälle, verursacht durch das Aufsteigen warmer feuchter Luftmassen aus dem Mittelmeerraum zu intensivem Abregnen führen (SCHWARB et al. 2001, PERROUD und BARDER

2013). Im Herbst deutet sich besonders in der Nordschweiz ein schneller Rückgang der Erosivität an. Ganzjährig weisen die Tal-, Bergzonen, und Sömmerungsgebiete der Kantone Wallis und Graubünden die niedrigsten R-Faktoren auf, was durch die geringere Konvektion und damit schwächere Niederschlagserosivität begründet ist.

3.2. Summenkurven der täglichen Erosivität

Abbildung 3 präsentiert die kumulierten Summenkurven der täglichen R-Faktoren gemittelt nach landwirtschaftlichen Zonen und auf Landesebene. Die grösste Steigung der Kurve für die Schweiz liegt innerhalb des Zeitfensters von Anfang Juni bis Ende September mit einem Anteil von 62 % an der Jahressumme der Niederschlagserosivität.

Generell beschreiben die Kurven aller Zonen einen ähnlichen Trend mit höchsten Anteilen (Steigungen) im Jahresabschnitt Juni–September. Die Zonen Bergzone I (72.8 %) und Talzone (71.7 %) haben in dieser Periode jeweils über zwei Drittel Anteil an der Jahressumme der Erosivität. Dieser hohe Anteil der Niederschlagserosivität innerhalb relativ kurzer Zeit (4 Monate) kann grossen Einfluss auf die Gefährdung des Bodens durch Wassererosion haben, da er vor allem in diesen landwirtschaftlich gepräg-

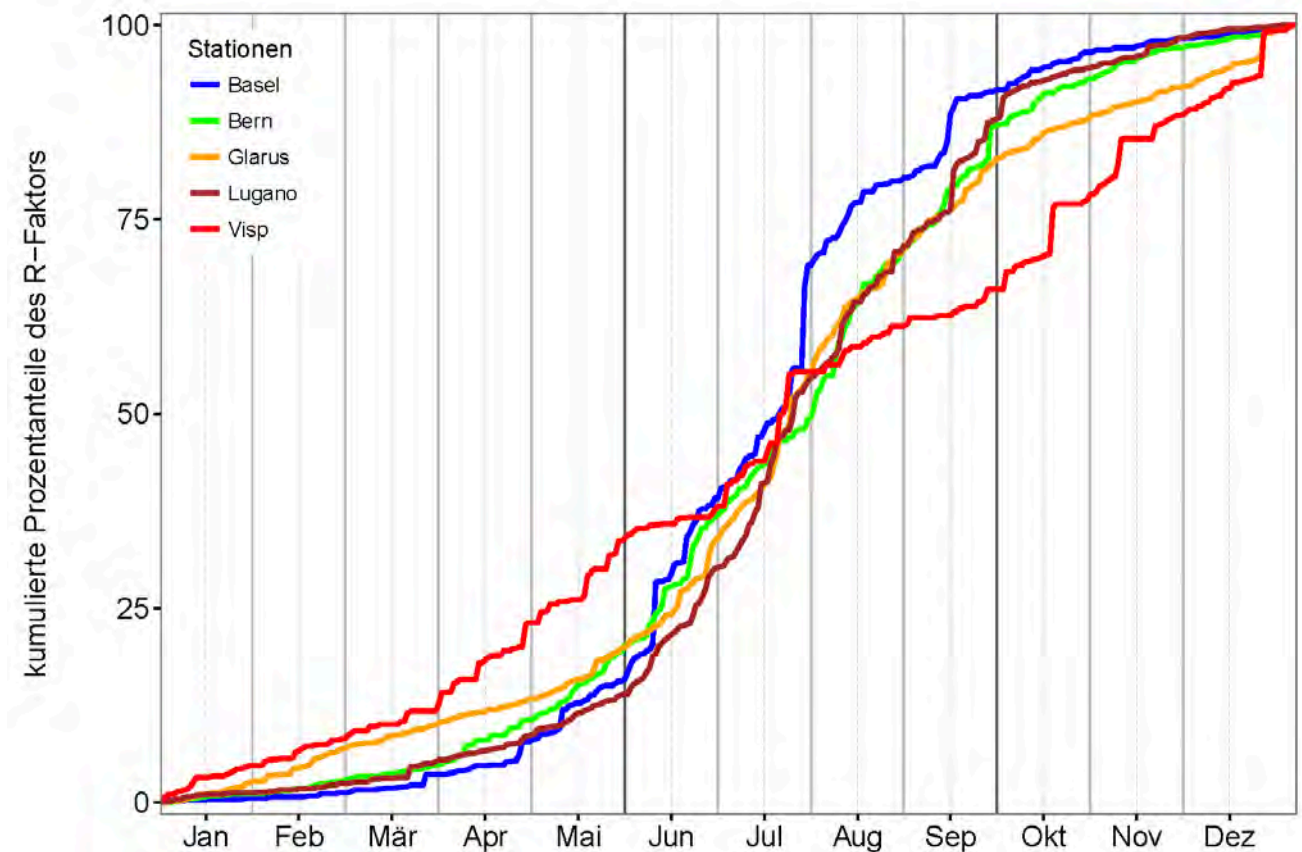


Abbildung 4: Summenkurve der täglichen R-Faktoren für ausgewählte Stationen der Schweiz

ten Zonen auf niedrige (nach Ernte von Getreide, Karotten, etc.) und instabile Vegetationsbedeckung (nach Spätsaat) trifft (HARTWIG und AMMON 2011, WELLINGER et al. 2006, TORRIANI et al. 2007, PRASUHN 2011). Zudem können die hohen Erosivitätsraten auch bei Vorerntefeldfrüchten (z. B. Getreide, Mais) zu einer Beschädigung durch Umknicken der Halme führen. Böden sind an den Rändern des Zeitfensters (Mai und September) oftmals bereits wassergesättigt und damit stärker erodierbar.

Die Summenkurven einzelner Stationen (Basel, Bern, Glarus, Lugano, Visp) verschiedener Schweizer Landesteile sind in Abbildung 4 gegenübergestellt.

Die Stationen Basel und Lugano haben zwischen Juni und September die höchste Steigung mit 74.0 resp. 76.1 Prozentanteilen. In Visp im Wallis zeigt sich entsprechend der ganzjährig gleichmässigen Erosivität (vgl. Abbildung 2), dass die Niederschlagserosivität relativ gleichförmig über das Jahr verteilt ist. MOSIMANN et al. (1990) berechnet für die Messstation Bern einen Anteil von 80 % für die 6-Monats-Periode von April bis September. Dieser Anteil an der Jahressumme kann mit der aktuellen Messreihe (1988–2010) von Bern bestätigt werden (82.9 %, Abbildung 4).

Zur Berechnung des relativen Bodenabtrags als Komponente des RUSLE C-Faktors (WISCHMEIER und SMITH 1978, RENARD et al. 1997) sind kumulierte R-Faktoren für bestimmte Jahresabschnitte der Entwicklungszustände von Kulturen erforderlich. Die Summenkurven ermöglichen, Anteile des R-Faktors am Jahres-R-Faktor mit täglicher Auflösung zu bestimmen. Über die Berechnung des C-Faktors hinaus können mittels der anteiligen R-Faktoren jahreszeitliche Zeitfenster identifiziert werden, in welchen die Kurve eine verhältnismässig hohe Steigung und damit der R-Faktor in dieser Periode einen hohen Einfluss besitzt. Die Kombination der Erosivitätsanteile und monatlichen R-Faktor-Karten mit zeitlich variablen C-Faktoren ermöglicht eine hochaufgelöste Abschätzung zeitlicher aber auch räumlicher Erosionsmuster für die Schweiz, in denen eine hohe Erosivität auf geringe oder instabile Vegetationsbedeckung trifft.

4. Schlussfolgerungen

Die präsentierte Modellierung visualisiert zeitgleich die räumliche und zeitliche Variation der Niederschlagserosivität in der Schweiz. Die raum-zeitliche Kartierung der monatlichen R-Faktoren ermöglicht die Identifikation von Regionen, in denen ganzjährig eine nur geringe Erosivität zu erwarten ist (Wallis,

Graubünden), aber auch jener Regionen wie etwa der Talzone, die nur in bestimmten Monaten durch erhöhte R-Faktoren gefährdet ist.

Intensive Regenfälle sind im August für die höchste Erosivität (mittlerer monatlicher R-Faktor für die Schweiz $263.5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ month}^{-1}$) verantwortlich. Räumliche Muster der Erosivität im Sommer weiten sich vornehmlich auf die Südalpen (Kanton Tessin), die Bergzonen der Nordalpen und Teile der Talzone aus. Ein Grossteil der jährlichen R-Faktor-Summe (62 %) beschränkt sich in der Schweiz auf die Zeitspanne zwischen Juni und September.

Das Verständnis der Dynamiken des R-Faktors in der Schweiz ermöglicht das zielgerichtete und zeitlich dynamische Management von Landwirtschaft, Trockenperioden und die Kontrolle von Naturkatastrophen (z. B. Hochwasserschutz, Hangrutschgefährdung). Massgeblich sind die Ergebnisse jedoch für den Bodenschutz von grosser Relevanz. Landwirte können zielgerichtet Erosionsschutzmassnahmen einführen oder Fruchtfolgen verändern. Durch dieses Eingreifen wird der Einfluss des Regens auf die Böden und Vegetation minimiert und gleichzeitig die Bodenstabilität und bedeckung in gefährdeten Zeiträumen erhöht. Selektiver Erosionsschutz kann damit nicht nur Bodenschutz optimieren, sondern auch die direkten Kosten der Erosion vermindern, da die finanziellen Aufwendungen der Einführung von Schutzmassnahmen auf ein notwendiges Minimum reduziert werden.

Danksagung

Die Forschungsarbeit wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Projektnummer N222-0350) finanziert. Ausserdem bedanken sich die Autoren bei MeteoSchweiz, Swisstopo und den Kantonen Luzern, Bern und St. Gallen für die zur Verfügung gestellten Daten.

Literatur

- ALEWELL, C., MEUSBURGER, K., JURETZKO, G., MABIT, L., and M.E. KETTERER, 2014: Suitability of 239+240Pu and 137Cs as tracers for soil erosion assessment in mountain grasslands. *Chemosphere* 103, 274–280.
- ANGULO-MARTÍNEZ, M., and S. BEGUERÍA, 2009: Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records. *Journal of Hydrology* 379, 1-2, 111–121.
- BROWN, L., and G. FOSTER, 1987: Storm Erosivity Using Idealized Intensity Distributions. *Transactions of the ASAE* 30, 2, 379–386.
- EFRON, B., and R. TIBSHIRANI, 1997: Improvements on Cross-Validation. *Journal of the American Statistical Association* 92, 438, 548–560.

- FOSTER, G.R., YODER, D.C., WEESIES, G.A., MCCOOL, D.K., MCGREGOR, K.C., und R. BINGNER (2013): Draft User's Guide, Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE-2). Washington, 355 S.
- FRIEDLI, S. (2006): Digitale Bodenerosionsgefährdungskarte der Schweiz im Hektarraster – Unter besonderer Berücksichtigung des Ackerlandes. Bern, 112 S.
- FUHRER, J., BENISTON, M., FISCHLIN, A., FREI, C., GOYETTE, S., JASPER, K., und C. PFISTER, 2006: Climate Risks and Their Impact on Agriculture and Forests in Switzerland. *Climatic Change* 79, 1-2, 79–102.
- GISLER, S., LININGER, H.P., und V. PRASUHN, 2011: Erosionsrisikokarte im 2x2-Meter-Raster (ERK2). *Agrarforschung Schweiz* 2, 4, 148–155.
- GOTWAY, C.A., und W.W. STROUP, 1997: A Generalized Linear Model Approach to Spatial Data Analysis and Prediction. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 2, 2, 157–178.
- HANEL, M., MÁČA, P., BAŠTA, P., VLNAS, R., und P. PECH, 2016: Rainfall erosivity factor in the Czech Republic and its Uncertainty. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–24.
- HARTWIG, N.L., und H.U. AMMON, 2002: Cover crops and living mulches. *Weed Science* 50, 6, 688–699.
- HENGL, T., HEUVELINK, G., und D. ROSSITER, 2007: About regression-kriging. *Computers & Geosciences* 33, 10, 1301–1315.
- HENGL, T., HEUVELINK, G., und A. STEIN, 2004: A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120, 1-2, 75–93.
- ISOTTA, F., FREI, C., WEILGUNI, V., PERČEC T., M., LASÈGUES, P., RUDOLF, B., PAVAN, V., CACCIAMANI, C., ANTOLINI, G., RATTO, S., MUNARI, M., MICHELETTI, S., BONATI, V., LUSSANA, C., RONCHI, C., PANETTIERI, E., MARIGO, G., und G. VERTAČNIK, 2014: The climate of daily precipitation in the Alps. *International Journal of Climatology* 34, 5, 1657–1675.
- KONZ, N., PRASUHN, V., und C. ALEWELL, 2012: On the measurement of alpine soil erosion. *CATENA* 91, 63–71.
- KUTNER, M.H., NACHTSHEIM, C., NETER, J., und W. LI (2005): Applied linear statistical models. 5. Auflage, McGraw-Hill, Boston, 1396 S.
- LEDERMANN, T. (2012): Multiple Implications of Soil Erosion and Conservation on Arable Farm Land in the Swiss Midlands. Bern, 208 S.
- MCBRATNEY, A.B., ODEH, I.O.A., BISHOP, T.F.A., DUNBAR, M.S., und T.M. SHATAR, 2000: An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 3-4, 293–327.
- METEOSWISS (2013): Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products – Monthly and Yearly Precipitation: RhiresM and RhiresY. Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Zürich, 4 S.
- MEUSBURGER, K., und C. ALEWELL, 2008: Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland). *Natural Hazards and Earth System Science* 8, 3, 509–520.
- MEUSBURGER, K., STEEL, A., PANAGOS, P., MONTANARELLA, L., und C. ALEWELL, 2012: Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 1, 167–177.
- MOSIMANN, T., CROLE-REES, A., MAILLARD, A., NEYROUD, J.-A., THÖNI, M., MUSY, A., und W. ROHR (1990): Bodenerosion im Schweizerischen Mittelland. Nationales Forschungsprogramm Nutzung des Bodens in der Schweiz, Liebefeld-Bern, 262 S.
- MOSIMANN, T., MAILLARD, A., MUSY, A., NEYROUD, J.-A., RÜTTIMANN, M., und P. WEISSKOPF (1991): Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Nationales Forschungsprogramm Nutzung des Bodens in der Schweiz, Liebefeld-Bern, 187 S.
- NISI, L., MARTIUS, O., HERING, A., KUNZ, M., und U. GERMANN, 2016: Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142, 697, 1590–1604
- ODEH, I., MCBRATNEY, A.B., und D.J. CHITTLEBOROUGH, 1995: Further results on prediction of soil properties from terrain attributes. *Geoderma* 67, 3-4, 215–226.
- PANAGOS, P., BALLABIO, C., BORRELLI, P., und K. MEUSBURGER, 2016b: Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *CATENA* 137, 161–172.
- PANAGOS, P., BALLABIO, C., BORRELLI, P., MEUSBURGER, K., KLIK, A., ROUSSEVA, S., TADIĆ, M., MICHAELIDES, S., HRABALÍKOVÁ, M., OLSEN, P., AALTO, J., LAKATOS, M., RYMSZEWICZ, A., DUMITRESCU, A., BEGUERÍA, S., und C. ALEWELL, 2015: Rainfall erosivity in Europe. *The Science of The Total Environment* 511, 801–814.
- PANAGOS, P., BORRELLI, P., SPINONI, J., BALLABIO, C., MEUSBURGER, K., BEGUERÍA, S., KLIK, A., MICHAELIDES, S., PETAN, S., HRABALÍKOVÁ, M., OLSEN, P., AALTO, J., LAKATOS, M., RYMSZEWICZ, A., DUMITRESCU, A., PERČEC TADIĆ, M., DIODATO, N., KOSTALOVA, J., ROUSSEVA, S., BANASIK, K., und C. ALEWELL, 2016a: Rainfall Erosivity: Conversion Factors for Different Time Resolutions and Regional Assessments. *Water* 8, 4, 119.
- PERROUD, M., und S. BADER (2013): Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 86 S.
- PRASUHN, V., 2011: Soil erosion in the Swiss midlands. *Geomorphology* 126, 1-2, 32–41.
- PRASUHN, V., 2012: On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. *Soil and Tillage Research* 120, 137–146.
- PRASUHN, V., LINIGER, H., GISLER, S., HERWEG, K., CANDINAS, A., und J.P. Clément, 2013: A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as strategic policy support system. *Land Use Policy* 32, 281–291.

PUNGE, H.J., and M. KUNZ, 2016: Hail observations and hailstorm characteristics in Europe. *Atmospheric Research* 176-177, 159–184.

RENARD, K.G., FOSTER, G., WEESIES, G., MCCOOL, D.K., und D.C. YODER (1997): Prediction Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook 703*, United States Department of Agriculture, Washington, 407 S.

SCHMIDT, S., ALEWELL, C., PANAGOS, P., and K. MEUSBURGER, 2016: Regionalization of monthly rainfall erosivity patterns in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 4359–4373.

SCHWARB, M., DALY, C., FREI, C., und C. SCHÄR (2001): Mean Seasonal Precipitation throughout the European Alps 1971-1990. In: WINGARTNER, R. (Hrsg.): *Hydrological Atlas of Switzerland*. Universität Bern, Bern.

SCHWERTMANN, U., VOGL, W., und M. KAINZ (1987): *Bodenerosion durch Wasser*. Ulmer, Stuttgart, 64 S.

SIDERIS, I., GABELLA, M., and U. GERMANN (2014): The CombiPrecip experience: development and operation of a real-time radar-raingauge combination scheme in Switzerland. *International Weather Radar and Hydrology Symposium*, 2014, Washington.

SPREAFICO, M., und R. WEINGARTNER (2005): *Hydrologie der Schweiz*. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Bern, 138 S.

TORRIANI, D.S., CALANCA, P., SCHMID, S., BENISTON, M., and J. FUHRER, 2007: Potential effects of changes in mean climate and climate variability on the yield of winter and spring crops in Switzerland. *Climate Research* 34, 59–69.

VAN DELDEN, A., 2001: The synoptic setting of thunderstorms in western Europe. *Atmospheric Research* 56, 1-4, 89–110.

WEISSHAIDINGER, R., und H. LESER (2006): Switzerland. In: BOARDMAN, J. und POESEN, J. (Hrsg.): *Soil erosion in Europe*. Wiley-Interscience, S. 231–244.

WELLINGER, R., BUSER, H.-P., KRAUSS, J., and R. THEILER, 2006: Karotten: Anbau, Erntezeitpunkt und Lagerung. *Agrarforschung Schweiz* 13, 10, 412–417.

WISCHMEIER, W.H., und D.D. SMITH (1978): *Predicting rainfall erosion losses – A Guide to Conservation Planning*. *Agriculture Handbook 537*, U.S. Gov. Print. Off, Washington, 58 S.