

# Klimawandel und Bodenerosion

## Neue Erkenntnisse zur Regenerosivität und Konsequenzen für die Abschätzung der Erosionsgefährdung

Dirk Elhaus, Tanja Winterrath, Karl Auerswald und Franziska Fischer

### Dirk Elhaus

Diplomstudium der Geographie an der Universität Kiel, seit 1987 beim Geologischen Dienst NRW Mitarbeiter im Fachbereich Fachinformationssystem Bodenkunde mit den Schwerpunkten vorsorgender Bodenschutz, Bodenerosion und Bodenphysik

### Dr. Tanja Winterrath

Studium der Physik an der Universität Bremen; seit 2008 in der Abteilung Hydro-meteorologie des Deutschen Wetterdienstes beschäftigt. Schwerpunkte: radarbasierte Niederschlagsanalysen und -vorhersagen sowie radarbasierte Niederschlagsklimatologie.

### Prof. Dr. Karl Auerswald

Studium der Agrarwissenschaften an der TU München; Forschung zur Bodenerosion seit 1981; weitere Forschungsschwerpunkte: Graslandökologie und Isotopenökologie

### Dr. Franziska Fischer

Studium der Umweltplanung und Ingenieurökologie und Promotion an der TU München; jetzt am Bayerischen Landesamt für Umwelt im Referat Grundwasserschutz

### Zusammenfassung

Die Regenerosivität wurde aus 17-jährigen Radar-Niederschlagsaufzeichnungen mit 1-km<sup>2</sup>-Auflösung für ganz Deutschland neu berechnet. Bei stark verbesserter Datendichte und Detailtreue zeigte sich ein ähnliches Raummuster wie bei der bisher verwendeten Karte. Allerdings sind die aktuellen Werte der Erosivität wesentlich höher als früher. Dieser Anstieg wurde durch einen großen Satz von Ombrometer-Daten seit den 1960-er Jahren bestätigt. Die Erosivität steigt mit einer Rate von 10 % in sechs Jahren an. Aufgrund der projizierten Intensivierung und Häufung extremer Niederschläge ist ein weiterer Anstieg der Erosivität zu erwarten. Sie ist daher keine zeitliche Konstante mehr, sondern muss regelmäßig aktualisiert werden. Um Planungssicherheit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird vorgeschlagen bis zur nächsten Aktualisierung die mittlere Erosivität für das Zentraljahr 2025 zu verwenden. Diese Werte sind ca. doppelt so hoch wie bisher, und damit verdoppelt sich auch der prognostizierte Bodenabtrag. Die Daten stehen sowohl mit 1-km<sup>2</sup>-Auflösung als auch als Gemeindemittelwerte zur Verfügung. Auch die Jahresverteilung der erosiven Niederschläge hat sich verändert. Die Winterperiode hat jetzt ein stärkeres Gewicht als früher. Auch diese Daten stehen zur Verfügung. Eine Neuberechnung der relativen Erosionsgefährdung der verschiedenen Kulturen und Fruchtfolgen (C-Faktoren) basierend auf der aktualisierten Jahresverteilung steht noch aus.

**Schlüsselwörter:** Bodenerosion durch Wasser, Regenerosivität, R-Faktor, Allgemeine Bodenabtragungsgleichung, Wetterradar, Klimawandel

### Summary

A 17-yr record of radar rain data with 1 km<sup>2</sup> spatial resolution was used to derive a new map of rain erosivity for contiguous Germany. The data showed an increase in rain erosivity due to climate change, which was confirmed by a large data set of ombrometer measurements since the 1960s. Due to projected intensification and increase in extreme precipitation further increase in erosivity can be expected. As a consequence, rain erosivity as defined in the USLE is not a constant any more but has to be updated regularly. We propose using the mean erosivity of a pivotal year 2025 until the

next update to assure comparability of erosion predictions. Erosivities for this pivotal year and in consequence (predicted) soil losses are about twice as high as the values that were in use until 2019. Erosivity is available at 1 km<sup>2</sup> resolution or as community mean. Proceeding climate change also altered the seasonal distribution of erosivity. A larger fraction is allocated to winter months now. These data are available as well. A recalculation of the erosion potential of different crops and crop rotations (C factor) based on this updated seasonal distribution is still missing.

**Keywords:** soil erosion by water, rain erosivity, R factor, universal soil loss equation, weather radar, climate change

## 1. Übersicht

Der R-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) quantifiziert die gebietsspezifische Erosionswirksamkeit des Niederschlags. Er wird aus zeitlich hochauflösenden Niederschlagszeitreihen als langjähriger (> 10 Jahre) Mittelwert ermittelt. Um zu regionalen Aussagen zu kommen, nutzte man bisher den engen statistischen Zusammenhang zwischen dem R-Faktor und der Höhe des Sommerniederschlags. Dieses Vorgehen ist nicht mehr gerechtfertigt, da aktuelle Untersuchungen zum Klimawandel in Deutschland [1, 2] eine Veränderung in der Charakteristik von Starkregen belegen.

Seit 2001 betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) 17 Radar-Stationen zur flächendeckenden und kontinuierlichen Niederschlagsmessung [3]. Die Daten werden automatisiert kalibriert und stehen flächendeckend und räumlich hochauflösend für ganz Deutschland zur Verfügung. Sie sind eine aktuellere Grundlage, um den R-Faktor und seinen Jahresgang zu ermitteln.

Das Verfahren und die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt und in ihrer Konsequenz für die Ableitung der Bodenerosion durch Wasser diskutiert. Ausführlichere Darstellungen finden sich an anderer Stelle [4, 5, 6].

## 2. Einleitung

### 2.1 Die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung

Im Vollzug des Bodenschutzgesetzes, in der Agrarförderung und der landwirtschaftlichen Beratung ist die ABAG zur Abschätzung der Erosion durch Wasser als Methode allgemein anerkannt. Ursprünglich als empirische Faktorengleichung in den 1950er Jahren in den USA als Universal Soil Loss Equation (USLE) entwickelt [7] wurde sie in den 1980er Jahren auf mitteleuropäische Verhältnisse angepasst [8]. Dort hat sich die ABAG bewährt, was sich u. a. auch darin zeigt, dass sie seit 2005 als DIN vorliegt und dort zuletzt 2017 aktualisiert wurde [9]. Die ABAG hat folgende Form:

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P$$

Dabei ist

- A der langjährig zu erwartende mittlere Bodenabtrag, in t/(ha·a);
- R der Oberflächenabfluss- und Regenerosivitätsfaktor, in N/(h·a);
- K der Faktor für die Bodenerodierbarkeit durch Wasser, in (t·h)/(ha·N);
- S der Hangneigungsfaktor;
- L der Hanglängenfaktor;
- C der Bodenbedeckungs- und Bodenbearbeitungsfaktor;
- P der Faktor zur Berücksichtigung von Erosionsschutzmaßnahmen.

Der R-Faktor ist die mittlere Jahressumme der Erosivität der Einzelereignisse, die sich durch Multiplikation der aufsummierten kinetischen Energiedichte mit der maximalen 30-minütigen Intensität ergibt, wobei erosive Ereignisse wiederum durch Schwellenwerte definiert sind. Die Einheit des R-Faktors in Newton pro Stunde und Jahr entsteht durch Verknüpfen und Kürzen der Einheiten der kinetischen Energiedichte ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ ), der Intensität ( $\text{mm}/\text{h}$ ) und des Jahres (a).

Entsprechend der DIN [9] ist die natürliche Erosionsgefährdung ( $E_{\text{nat}}$ ) das Produkt der Faktoren  $R$ ,  $K$ , und  $S$ ; bei der Erosionsgefährdung ( $E$ ) werden zusätzlich die durch die Flächennutzung gesteuerten Faktoren  $L$  (erosionswirksame Hanglänge),  $C$  (Bodenbedeckung und Bodenbearbeitung) sowie  $P$  (Erosionsschutzmaßnahmen) berücksichtigt.

## 2.2 R-Faktor

Niederschlag ist der Auslöser für Bodenerosion durch Wasser. Durch die kinetische Energie des auf den Boden aufprallenden Regentropfens werden einzelne Bodenpartikel von Bodenaggregaten gelöst und an der Bodenoberfläche verspritzt. Oberflächlich abfließendes Wasser transportiert diese Bodenpartikel bei ausreichendem Gefälle hangabwärts, wobei weiteres Bodenmaterial abgesichert werden kann. Die absolute Menge des Regens und die Intensität des Niederschlags steuern diesen Prozess.

Die Auswertung von 8.000 Parzellenmessjahren zeigte, dass im Mittel erosionswirksame Niederschläge eine Niederschlagsmenge von mindestens 12,7 mm (= 5 Inch) oder eine Niederschlagsintensität von mehr als 12,7 mm/h aufweisen [10]. Aus Vereinfachungsgründen und um der ABAG eine höhere Akzeptanz im deutschen Raum zu verschaffen, wurde dieser Zahlenwert von Schwertmann et al. [8] auf 10 mm bzw. 10 mm/h festgesetzt, ohne dass es dazu weitere wissenschaftliche Untersuchungen gegeben hat. Dieser Wert wurde auch in der DIN [9] übernommen. In der wissenschaftlichen Literatur wird der experimentell abgesicherte Grenzwert von 12,7 mm bzw. 12,7 mm/h verwendet. Dieser Wert wurde auch bei folgenden Auswertungen verwendet.

Aus zeitlich hochauflösenden Niederschlagszeitreihen lässt sich die Erosionswirksamkeit von Niederschlägen berechnen. Dieses als Regenerosivität bezeichnete Energiemaß wird über das Jahr aufaddiert. Bei der Mittelung mehrjähriger Zeitreihen erhält man dann einen zuverlässigen Wert für die Erosionswirksamkeit des Niederschlags im Betrachtungszeitraum. Diese Rechengröße geht als R-Faktor in die ABAG ein. Einzelheiten der Berechnung sind in Kap. 3.2 beschrieben. Mithilfe von Regressionsgleichungen, die den engen Zusammenhang zwischen der Höhe des Sommerniederschlags und dem R-Faktor nutzen, wurden in der Vergangenheit Karten zur regionalen Verteilung des R-Faktors abgeleitet [9, 11].

Diese Regressionsgleichungen betrachten den R-Faktor abhängig von der Höhe des Sommerniederschlags. Verschiebungen des Niederschlagsgeschehens hin zu mehr Starkregenereignissen, bei in der Summe konstanten Niederschlagsmengen, können dadurch erst bei einer Überprüfung der Regressionsgleichungen mit

langjährigen und aktualisierten Zeitreihen abgebildet werden.

Bei den R-Faktor-Karten, die auf diese Weise abgeleitet wurden, entsteht eine zusätzliche Ungenauigkeit dadurch, dass die aus den zeitlich hochauflösenden Niederschlagsdaten berechneten R-Faktoren für ein größeres Areal, z. B. ein Bundesland, gemittelt werden und tatsächlich vorhandene räumliche Unterschiede durch die Regression nicht erfasst werden können. Auch eine Zunahme erosionswirksamer Niederschläge im Winterhalbjahr kann auf diese Weise nicht erfasst werden.

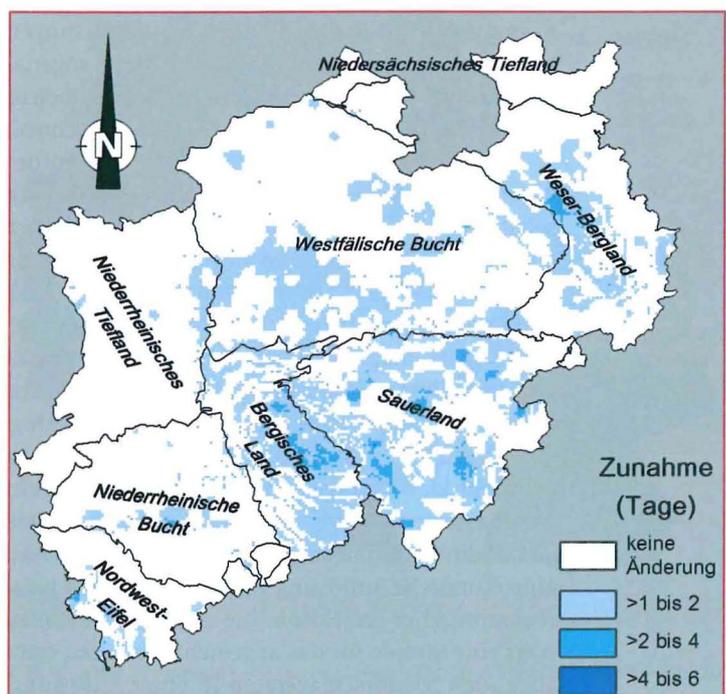
Mit hoher Wahrscheinlichkeit bewirkt der Klimawandel insgesamt eine überproportionale Zunahme an Starkregenereignissen sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr, verglichen mit den Niederschlagssummen. So haben die Tage mit Starkniederschlägen in NRW in der Klimanormalperiode 1981 bis 2010, verglichen mit dem Zeitraum 1951 bis 1980, deutlich zugenommen (Abbildung 1).

## 2.3 Einfluss des Klimawandels auf die Niederschlagserosivität

Im Rahmen des Klimawandels wird eine Zunahme der globalen Temperatur beobachtet und auch für die weitere Zukunft projiziert. Unter einer Temperaturzunahme verändert sich die Niederschlagscharakteristik. Wir erwarten eine Zunahme der erosiven Niederschläge:

1. Entsprechend der Clausius-Clapeyron-Gleichung steigt der Sättigungsdampfdruck mit 7 % pro Kelvin Temperaturerhöhung. Warme Luft kann also mehr Feuchtigkeit aufnehmen und abregnen. Aufgrund verstärkter dynamischer Prozesse sowie einer Verschiebung der Niederschlagscharakteristik von stratiform zu konvektiv kann die Zunahme der Niederschlagsintensität sogar noch größer sein und 14 % pro Kelvin betragen. Diese Zunahmen werden in

Abbildung 1  
Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Starkniederschlagstage mit > 20 mm/d in Nordrhein-Westfalen in der Klimanormalperiode 1981–2010 im Vergleich zu 1951–1980 (Auswertung: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Datengrundlage: DWD).



(© <https://www.klimaatlas.nrw.de/Niederschlagskenntage-Artikel>, abgerufen am 28.04.2019)

einem Temperaturbereich von etwa 12 °C bis 22 °C beobachtet [12].

2. Bei gleicher Lebensdauer der Wolken steigt mit der Intensität auch die Niederschlagsmenge. Aufgrund der verstärkten dynamischen Prozesse kann Feuchtigkeit aus einer größeren Fläche eingehen, so dass auch die Niederschlagsmenge mit mehr als 7 % pro Kelvin ansteigen kann [12].
3. Einige Beobachtungen zeigen bereits eine Zunahme der extremen (erosiven) Niederschlagsereignisse (Abbildung 1 und [2]), und auch Klimaprojektionen deuten auf häufigere Tage mit hohen Niederschlagsmengen in der Zukunft hin [13].
4. Veränderungen der globalen Temperaturverhältnisse haben Einfluss auf die Stabilität der Wetterlagen. Es gibt Hinweise darauf, dass Wetterlagen persistenter werden und damit auch die Dauer extremer Wetterlagen – sowohl trockener als auch feuchter – zunimmt [14].

Bei der Berechnung des R-Faktors gehen diese Aspekte kombiniert ein und lassen daher eine starke und kontinuierliche Zunahme des R-Faktors erwarten.

### 3. Ableitung der Regenerosivität auf der Grundlage von Regenradarmessungen

#### 3.1 Die Radarklimatologie des Deutschen Wetterdienstes

Seit 2001 betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) ein deutschlandweites Messnetz aus 17 Wetterradargeräten, das die Intensität der Niederschläge kontinuierlich flächendeckend erfasst und damit geeignet ist, die Regenerosivität ereignisbasiert abzubilden [3]. Wetterradare senden elektromagnetische Impulse aus und messen die an den Hydrometeoren zurückgestreute und reflektierte Strahlung. Diese ermöglicht unter der Annahme einer Tropfengrößenverteilung die Abschätzung der Niederschlagsintensität im Messvolumen. Um die abgeleiteten Werte zu quantifizieren, werden die flächenhaften Informationen des Radars mit den Punktmessungen der Niederschlagsstationen verknüpft. Diese sogenannte „Aneichung“ erfolgt seit Juni 2005 im Echtzeitbetrieb im Rahmen von RADOLAN für den Hochwasserschutz [15].

Basierend auf dem RADOLAN-Verfahren wurde eine Reprozessierung der radarbasierten Niederschlagsabschätzung für die Jahre 2001 bis 2017 durchgeführt. Die klimatologische Nachberechnung erlaubte die Verwendung zusätzlicher Stationsdaten sowie eine umfangreiche Fehlerkorrektur zur Optimierung der quantitativen Niederschlagsabschätzung. Mit diesem RADKLIM-Datensatz liegt nun erstmals ein deutschlandweiter, flächendeckender Niederschlagsdatensatz zur Verfügung, der nahezu alle Starkniederschlagsereignisse beinhaltet, auch jene kleinräumigen Ereignisse, die bei der rein stationsbasierten Messung oftmals nicht erfasst werden, da sie kein Ombrometer treffen [3, 16]. Der Datensatz hat eine räumliche Auflösung von 1 km x 1 km in polarstereographischer Projektion. Die zeitliche Auflösung beträgt eine Stunde für das angeeichete Produkt; es liegen aber auch Niederschlagsraten in einer Auflösung von fünf Minuten vor.

#### 3.2 Die Bestimmung des R-Faktors auf Basis der Radardaten

Der RADKLIM-Datensatz ermöglicht eine flächendeckende Bestimmung des R-Faktors auf der Basis aktueller Niederschlagsdaten. Die Berechnung erfolgte in Anlehnung an [9] bzw. [10]. Ein erosives Ereignis wurde dabei über die Schwellwerte 12,7 mm für den Gesamtniederschlag sowie 12,7 mm/h für die maximale Niederschlagsintensität im 30-Minuten-Intervall definiert. Eine Pause von mindestens sechs Stunden und damit zwei getrennte Ereignisse wurde angenommen, wenn in fünf aufeinanderfolgenden Stunden weniger als 0,1 mm fielen, weil angenommen werden kann, dass in der letzten Stunde des ersten Regens bereits die Regenpause begann und bis in die erste Stunde des zweiten Regens dauerte.

Die kinetische Energiedichte E eines Ereignisses berechnet sich aus den folgenden Formeln:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

mit  $E_i = 0$  für  $I_i < 0,05$   
 $E_i = \{11,89 + (8,73 \cdot \log I_i)\} \cdot N_i \cdot 10^{-3}$  für  $0,05 \leq I_i \leq 76,2$   
 $E_i = 28,33 \cdot N_i \cdot 10^{-3}$  für  $I_i > 76,2$ .

- und  $E_i$  – kinetische Energie des Niederschlags im Zeitabschnitt i, in kJ/m<sup>2</sup>  
 $I_i$  – Intensität des Niederschlags im Zeitabschnitt i, in mm/h  
 $N_i$  – Niederschlagshöhe im Zeitabschnitt i, in mm  
 $n$  – Anzahl der Zeitschritte eines unabhängigen Ereignisses.

Der betrachtete Zeitabschnitt i entspricht der minimal verfügbaren zeitlichen Auflösung der auf den Radardaten basierenden Niederschlagszeitreihen. Der R-Faktor eines Niederschlagsereignisses ergibt sich über das Produkt der kinetischen Energie des Ereignisses mit der maximalen 30-Minuten-Niederschlagsintensität:

$$R_j = E \cdot I_{30}$$

mit  $I_{30}$  – maximale 30-Minuten-Niederschlagsrate, in mm/h  
 $R_j$  – R-Faktor eines Regenereignisses j, in N/h.

In die Bestimmung der Niederschlagserosivität gingen die Stundensummen ein, da eine bessere Qualität der angeeichten Daten zu erwarten ist und die räumliche und zeitliche Variabilität auf Grund der mit 17 Jahren für eine Extremwertanalyse noch recht kurzen Zeitreihe hoch ist.

Um sowohl der Unterschätzung durch die Verwendung einer stündlichen Auflösung sowie der Vergleichbarkeit zwischen den Volumenmittelwerten einer Radarmessung und einer Punktmessung einer Messstation Rechnung zu tragen, wurden Skalierungsfaktoren entwickelt [4] und hier angewendet.

Der mittlere Jahres-R-Faktor R ergibt sich aus der Summe aller Ereignis-R-Faktoren dividiert durch die Anzahl der betrachteten Jahre:

$$R = (1/n_a) \cdot \sum_{j=1}^m R_j$$

mit  $R$  – mittlerer jährlicher R-Faktor, in N/(h · a)  
 $n_a$  – Länge der Zeitreihe, in a  
 $m$  – Anzahl der erosiven Niederschlagsereignisse der Zeitreihe.

Der R-Faktor ergibt sich aus dem Mittelwert der aufsummierten Erosivitäten der Ereignisse der 17 Einzeljahre. Aufgrund der kurzen Zeitreihe und der hohen räumlichen Auflösung ist das pixelbasierte Ergebnis stark von extremen Ereignissen beeinflusst. Mittels Winsorisieren [17] wurden daher die extremen Jahre gefiltert und anschließend biaskorrigiert, um die Gebietsmittelwerte zu erhalten. Zusätzlich wurde mittels Kriging geostatistisch geglättet. Details sind in [5] dargestellt.

#### 4. Ergebnisse und Konsequenzen

Die Regenerosivität kommt in der ABAG an zwei Stellen zum Tragen:

- ▶ in ihrer absoluten Größe wird sie durch den R-Faktor abgebildet;
- ▶ die relative Verteilung der Regenerosivität über das Jahr wird bei der Berechnung von C-Faktoren berücksichtigt;

Beide Aspekte werden im Folgenden dargestellt.

##### 4.1 Historische Veränderung des R-Faktors

Die bisherigen Auswertungen betrachteten den R-Faktor als einen im zeitlichen Mittel konstanten Standortfaktor, dessen Größe nur von der Lage in der Fläche abhängig war. Nach den aktuell vorliegenden Untersuchungen zum R-Faktor bekommt er eine zeitliche Komponente. Die auf der Basis der RADKLIM-Daten für den Zeitraum 2001 bis 2017 berechneten R-Faktoren zeigen eine starke Zunahme der Erosivität verglichen mit älteren Auswertungen (Abbildung 2), die nahtlos anschließt an den Trend, der sich aus R-Faktoren von Stationsdaten ergibt. Diese Zunahme ist nicht methodisch bedingt und erklärt sich auch nicht mit einer allgemeinen Zunahme der Sommerniederschläge, sondern ist mit hoher Wahrscheinlichkeit das Resultat einer grundlegenden Veränderung der Niederschlagscharakteristik, die ihre Ursache u.a. in einer veränderten Temperaturverteilung in der Atmosphäre hat.

Zwischen 1962 und 2009, dem Zentraljahr der RADKLIM-Daten, hat sich der R-Faktor ungefähr verdoppelt, Aktuell steigt er jährlich um 2%. Versucht man, diesen jährlichen Anstieg um 2% durch eine Verringerung der Hanglänge zu kompensieren, was nach den Modellvorstellungen der ABAG möglich ist, müssten die Felder alle fünf Jahre in Gefällrichtung um 20% verkürzt werden. Das ist erheblich, zumal der Trend zu größeren Feldern geht [18].

Um bei zukünftigen Auswertungen zum Erosionsgeschehen dieser Dynamik des R-Faktors Rechnung zu tragen, muss angegeben werden, auf welches Zentraljahr sich die R-Faktor-Auswertung und damit auch die Erosionsprognose bezieht. Das Zentraljahr bezeichnet dabei das mittlere Ursprungsjahr der Messdaten, das für die Auswertung herangezogen wird. Für die Neuauflage einer Erosionskulisse sollte z. B. das Zentraljahr für die Berechnung der R-Faktoren so gewählt sein, dass es dem Veröffentlichungsdatum der Erosionskulisse entspricht.

Der Zunahme des R-Faktors muss auch bei Beratungen zur Anbauplanung in der Landwirtschaft Rechnung

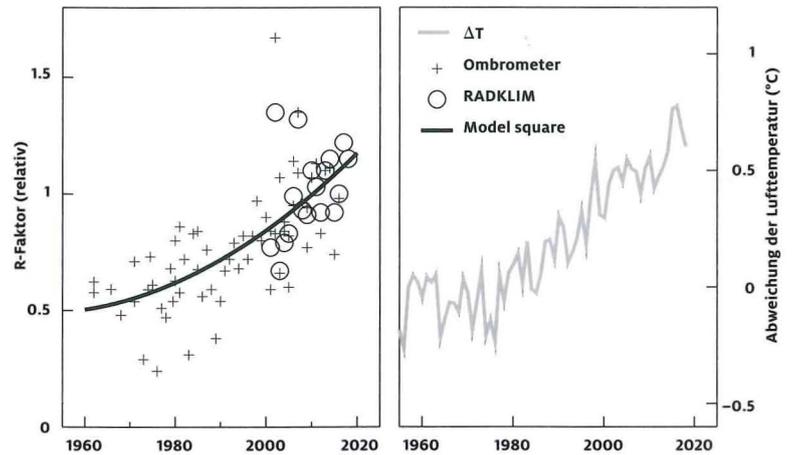


Abbildung 2

**Links:** R-Faktoren aus Radarniederschlägen (Kreise) oder von Ombrometerstationen (Kreuze) relativ zum mittleren R-Faktor 2001 bis 2018 in Abhängigkeit vom mittleren Ursprungsjahr (= Zentraljahr). Die Kreuze sind Mittelwerte von mindestens 50 Stationsjahren, die Kreise sind Mittelwerte von 452.503 Pixeln. Die schwarze Linie ist eine quadratische Regression.

**Rechts:** Die Abweichung der globalen Lufttemperatur vom globalen Mittelwert 1961 bis 1990.

getragen werden. Um zu vermeiden, dass sich jedes Jahr andere Bodenabträge ergeben, weil ein anderes Zentraljahr gewählt wurde, wird vorgeschlagen, einheitlich das Zentraljahr 2025 zu verwenden, sofern nicht wesentliche Gründe dagegen sprechen. Bei einem üblichen Prognosezeitraum von 10 Jahren ergibt sich das Jahr 2025 als Zentraljahr für die kommende Dekade. Diese Festlegung vereinfacht das Verfahren und gewährleistet eine Vergleichbarkeit. Die Karte des R-Faktors (Abbildung 3)

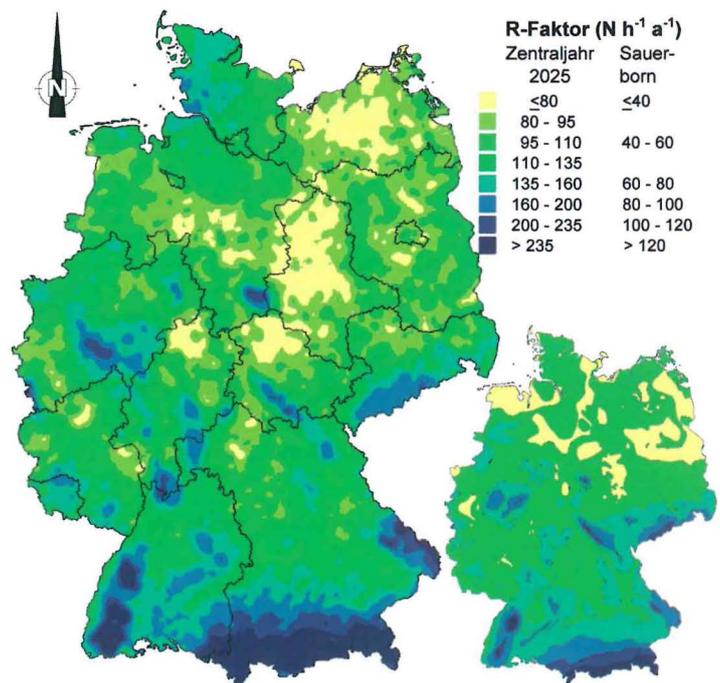


Abbildung 3

Auf RADKLIM-Daten basierende Karte der Regenerosivität, berechnet für das Zentraljahr 2025, und zum Vergleich die bisher verwendete Karte aus Sauerborn [11], die überwiegend auf Daten aus den 1960er und 1970er Jahren beruht (kleines Bild).

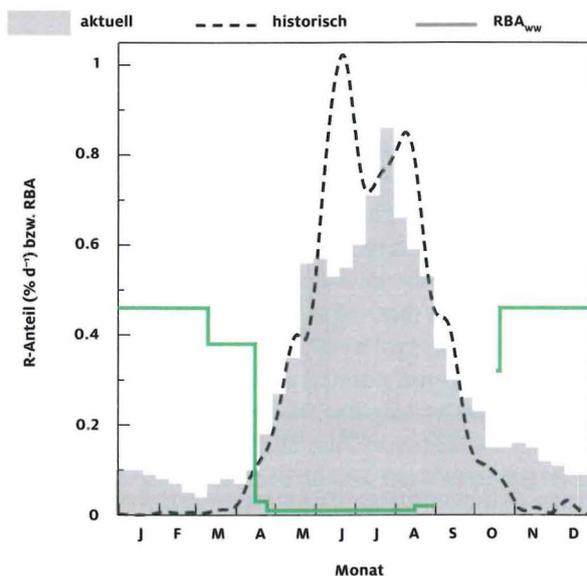


Abbildung 4 Jahresgang der Regenerosivität berechnet aus RADKLIM-Daten („aktuell“) und nach DIN [9] („historisch“). Die Tageswerte des aktuellen Jahresgangs können für die Berechnung von C-Faktoren als Tabelle dem Anhang von [5] entnommen werden. Der C-Faktor ergibt sich aus der Multiplikation mit dem Relativen Bodenabtrag RBA, der für Winterweizen als grüne Linie eingetragen ist.

wurde daher bereits mit Hilfe des Trends aus Abbildung 2 für das Zentraljahr 2025 umgerechnet. Diese Werte werden auch im Planungstool ABAG interaktiv verwendet [19], das deutschlandweit zur Verfügung steht. Das Zentraljahr 2025 sollte z. B. auch für die Neuauflage einer Erosionskulisse gewählt werden, damit eine Vergleichbarkeit zwischen Bundesländern gewährleistet ist, selbst wenn die Erosionskulissen in unterschiedlichen Jahren veröffentlicht werden.

Kulturperiode		Erläuterungen
Kennung	Definition	
1a	Bodenbearbeitung bis Saatbett, wendend	Zeit zwischen wendender Bodenbearbeitung (Wendepflug, Schälpflug o. Ä.) und Aussaat der folgenden Frucht
1b	Bodenbearbeitung bis Saatbett, nicht wendend	Tritt an die Stelle von Periode 1a, wenn statt wendender Bodenbearbeitung flaches Einmischen der Ernterückstände mit Grubber oder Fräse tritt. Mindestbodenbedeckung nach Einmischen 50 %. Bei Direktsaat entfällt Periode 1 vollständig
2	Saatbett bis 10 % Bodenbedeckung	Zeit von der Saatbettbereitung bis zu einer Bodenbedeckung von 10 % durch die Kulturpflanze
3	10 % bis 50 % Bodenbedeckung	Zeit von 10 % bis 50 % Bodenbedeckung
4	50 % bis 75 % Bodenbedeckung	Zeit von 50 % bis 75 % Bodenbedeckung
5	75 % Bodenbedeckung bis Ernte	Zeit von 75 % Bodenbedeckung bis zur Ernte
6	Ernte bis Bodenbearbeitung	Für diese Periode gibt es folgende Möglichkeiten: – Liegenlassen von Stoppeln und Stroh bis Bodenbearbeitung, – flaches Einarbeiten von Stoppeln und Stroh bis Bodenbearbeitung, – Einarbeiten von Stoppeln und Stroh mit Grubber und anschließender Gründüngung (ohne feines Saatbett).

Tabelle 1: Einteilung der Kulturperioden (DIN 19708)

## 4.2 Räumliche Variation des R-Faktors

Abbildung 3 zeigt die neue Karte des R-Faktors basierend auf den RADKLIM-Daten [5, 6] und im Vergleich dazu die R-Faktor-Karte von Sauerborn [11]. Die räumliche Verteilung des R-Faktors in beiden Karten ist ähnlich. Die Strukturen spiegeln im Großen und Ganzen die Topographie Deutschlands wider. Eine leichte relative Zunahme ist im Bereich der deutschen Bucht zu verzeichnen. Generell zeigt die radarbasierte Karte mehr Strukturen, was auf die höhere räumliche Auflösung der Daten zurückzuführen ist. Schaut man sich hingegen die Absolutwerte der R-Faktoren an, so liegen die neuen Werte im Mittel doppelt so hoch wie die Werte nach [11].

## 4.3 Jahresgang des R-Faktors und C-Faktor

Der Bodenabtrag wird durch den Anbau von Kulturpflanzen und die Art der Bodenbearbeitung beeinflusst. In der ABAG wird dies durch den C-Faktor berücksichtigt. Zwei Gesichtspunkte sind zu beachten:

- ▶ je mehr die Pflanzen den Boden bedecken, desto besser ist der Boden gegen erosive Niederschläge geschützt, weil die Niederschlagsenergie durch die Pflanzendecke reduziert wird;
- ▶ die Art der Bodenbearbeitung verändert die Rauigkeit der Bodenoberfläche und damit die Menge und Geschwindigkeit des abfließendes Wassers.

Um die schützende Wirkung der Pflanzendecke abschätzen zu können, benötigt man phänologische Informationen zur Vegetationsentwicklung und zum mittleren Jahresgang der Erosivität. Abbildung 4 veranschaulicht den relativen Jahresgang der Erosivität. Auch der Jahresgang hat sich gegenüber den bisher für die C-Faktor-Berechnung verwendeten Daten verändert. Ein wesentlich größerer Anteil der Jahreserosivität fällt nun in den Monaten November bis März. Dies bedeutet gleichzeitig, dass der Anteil der Monate Mai bis September geringer geworden ist, da die Summe aller Monate 100 % ergeben muss.

Um den Einfluss der Vegetation ermitteln zu können, wird die Vegetationsentwicklung in unterschiedliche Kulturperioden eingeteilt.

Diesen Kulturperioden werden Relative Bodenabträge für verschiedene Kulturpflanzen und Anbauverfahren zugewiesen. Kennt man den kalendarischen Beginn der einzelnen Kulturperioden, lassen sich regionale C-Faktoren für einzelne Kulturpflanzen und für Fruchtfolgen berechnen, indem die Relativen Bodenabträge für die einzelnen Kulturpflanzen mit dem Jahresgang der Regenerosivität verknüpft werden. Die Einzelheiten dieses Verfahrens sind in [9] beschrieben. Da dieses Verfahren recht aufwendig ist, greift man in der Praxis häufig vereinfachend auf Tabellenwerte zurück, die in den 1980er bis 1990er entwickelt worden sind. Diese Tabellenwerte sollten zukünftig angepasst werden, da

- ▶ die in den Standardwerken (z. B. DIN [9]) verwendeten Tabellen basieren auf [8], die im Wesentlichen auf Beobachtungen und Erfahrungen im bayrischen Tertiärhügelland wiedergeben; die dort vorgefundenen Anbaubedingungen müssen nicht denen entsprechen, die in anderen Regionen angetroffen werden;

- ▶ die Anbauverfahren sich weiterentwickelt haben;
- ▶ die geänderten Temperaturverhältnisse und die damit verbundenen Verschiebungen in der Vegetationsentwicklung nicht berücksichtigt sind;
- ▶ sich die Verschiebungen im Jahresgang der Erosivität auf den C-Faktor auswirken (s. Abbildung 4.2);

Die Zunahme der Erosivität in den Wintermonaten führt bei den meisten Kulturen zu einer Zunahme des Bodenabtrags, da viele Kulturpflanzen während der Winterzeit in einem Vegetationszustand verharren, in dem die Bodenoberfläche kaum durch die Vegetation abgedeckt ist und die Bodenbedeckung somit kaum Schutz gegen Erosion bietet. Dies ist in Abbildung 4 gut zu erkennen, in der zusätzlich zum Jahresgang der Regenerosivität auch der Jahresgang der Relativen Bodenabträge von Winterweizen eingetragen ist. Gerade in den Zeiten, in denen der Relative Bodenabtrag hoch ist, die Flächen also in einem erosionsanfälligen Zustand sind, hat der Anteil der Regenerosivität gegenüber den alten Planungsgrundlagen deutlich zugenommen. In der Summe führt dies dazu, dass der C-Faktor für Winterweizen um 122 % höher ist als früher. Neben der Steigerung des C-Faktors ist bei der Vorhersage des Bodenabtrags auch die Steigerung des R-Faktors um den Faktor 2 zu berücksichtigen, so dass für den Winterweizen mit einer Zunahme des Bodenabtrags auf mehr als das Vierfache des Wertes auszugehen ist, verglichen mit dem Wert, der sich nach den in den Standardwerken veröffentlichten Tabellen berechnet. Das Beispiel zeigt, dass es notwendig ist, die C-Faktoren an die sich durch den Klimawandel ändernden Rahmenbedingungen anzupassen. Dies beinhaltet

auch eine Berücksichtigung des Temperaturanstiegs (s. Abbildung 2) und der damit verbundenen Verschiebung der Kulturperioden (vgl. Tabelle 1).

## 5. Zusammenfassung

- ▶ Die bisherigen Ansätze, Karten zur räumlichen Verteilung des R-Faktors mithilfe von Regressionsgleichungen abzuleiten, können die sich ändernde Niederschlagscharakteristik als Folge des Klimawandels nur unzureichend abbilden.
- ▶ Der RADKLIM-Datensatz liefert eine neue hochaufgelöste Grundlage für die Berechnung der Niederschlagserosivität.
- ▶ Stations- und radarbasierte Messungen zeigen eine Zunahme des R-Faktors um derzeit 2 % pro Jahr. Werte für zukünftige R-Faktoren sind mit einem entsprechenden Faktor zu ermitteln.
- ▶ Für die Anwendung in der Praxis wird die Verwendung des Zentraljahrs 2025 empfohlen.
- ▶ Die Zunahme der relativen Erosivität im Winter führt zu einer Erhöhung des C-Faktors.
- ▶ Im Rahmen des Klimawandels wird eine weitere Zunahme der Niederschlagserosivität erwartet.

## 6. Glossar

- ▶ Hydrometeor bedeutet wörtlich übersetzt „in der Luft schwebendes Wasser“. Darunter werden alle Formen kondensierten Wassers einschließlich Eis (z. B. Schnee, Graupel) in der Atmosphäre verstanden.
- ▶ Die Clausius-Clapeyron-Gleichung kommt aus der Thermodynamik und beschreibt die Abhängigkeit



# Umweltrecht systematisch: alle Gebiete, alle Themen

## Grundzüge des Umweltrechts

Herausgegeben von Prof. Dr. iur. Eckard Rehbinder, Frankfurt/Main,  
und Prof. Dr. iur. Alexander Schink, Bonn

5., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2018,  
XXXVI, 1.386 Seiten, fester Einband, € (D) 174,-  
ISBN 978-3-503-17721-9

**ESV** ERICH  
SCHMIDT  
VERLAG

*Auf Wissen vertrauen*

Online informieren und bestellen:

 [www.ESV.info/17721](http://www.ESV.info/17721)

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG · Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin · Tel. (030) 25 00 85-265 · Fax (030) 25 00 85-275 · [ESV@ESVmedien.de](mailto:ESV@ESVmedien.de) · [www.ESV.info](http://www.ESV.info)

des Sättigungsdampfdrucks von der Temperatur. Sie sagt aus, dass Luft pro Kelvin Temperaturzunahme 7 % mehr Wasserdampf aufnehmen kann.

- ▶ Stratiforme Niederschläge entstehen durch großflächige Abkühlungsprozesse, z. B. großräumige Hebungprozesse im Bereich von Fronten. Die Niederschläge sind im Allgemeinen räumlich und zeitlich ausgedehnt.
- ▶ Bei Konvektion steigen warme Luftmassen in der Atmosphäre auf. Durch starke Konvektion, z. B. wenn sich die Atmosphäre oberhalb der stark aufgeheizten bodennahen Luftschichten an einem Sommerabend abkühlt, können sich so lokal heftige Niederschläge bilden.
- ▶ Ein Ombrometer (griechisch ombros für Regen) bezeichnet ein Instrument zur Messung des Niederschlags in einem bestimmten Zeitintervall. Eine andere Bezeichnung ist ein Niederschlags- oder Regenschirm.
- ▶ Beim Winsorieren werden zunächst die beobachteten Werte der Größe nach sortiert. Die Ausreißer am Anfang und Ende der Folge werden durch weniger extreme Werte ersetzt.
- ▶ Beim 90-prozent winsorisierten Mittelwert werden die 5 Prozent niedrigsten Datenwerte durch das 5-Prozent-Quantil und die 5 Prozent höchsten Datenwerte durch das 95-Prozent-Quantil ersetzt. Dadurch wird Einfluss von Ausreißern auf den Mittelwert reduziert.
- ▶ Bias-Korrektur: Das Bias bezeichnet einen systematischen Fehler gegenüber der beobachteten Realität. Mit Hilfe der Bias-Korrektur können z. B. statistische Maßzahlen, die nur den zufälligen Fehler ausgleichen, den tatsächlichen Messwerten angepasst werden.
- ▶ Kriging bezeichnet in der Geostatistik ein Interpolationsverfahren, das die räumliche Varianz von Messwerten berücksichtigt, um zu einer räumlichen Verteilung von Werten zu gelangen. Der fehlende Wert wird aus Messwerten in der Umgebung so abgeleitet, dass die Schätzfehlervarianz möglichst gering ist.

**Literatur**

[1] Breyer, P., Gehrmann, J., Grothues, E., Hädicke, A., Höke, S., König, H., Lutz, W., Michels, C., Müller, N., Petrak, M., Seidenstücker, C., Werking-Radtke, J., Stempelmann, I. und Ziegler C. (2016): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen – Ergebnisse aus dem Monitoringprogramm. LANUV-Fachbericht 74

[2] Mueller, E. N. und Pfister, A. (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe, *J. Hydrol.*, 411, 266-278.

[3] Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E. und Becker, A. (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Nr. 251.

[4] Fischer, F. K., Winterrath, T. und Auerswald, K. (2018): Temporal- and spatial-scale and positional effects on rain erosivity derived from point-scale and contiguous rain data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 6505-6518, <https://doi.org/10.5194/hess-22-6505-2018>.

[5] Auerswald, K., Fischer, F. K., Winterrath, T. und Brandhuber, R. (2019): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 1819-1832, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>.

[6] Auerswald, K., Fischer, F. K., Winterrath, T., Elhaus D., Maier H., Brandhuber R. (2019): Klimabedingte Veränderung der Regenerektivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen. In: Bachmann G., König W., Utermann J. (Hrsg.) *Bodenschutz, Ergänzenes Handbuch der Maßnah-*

men und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser (Loseblattsammlung), 4090, 21 S., Berlin, Erich Schmidt Verlag.

[7] Wischmeier, W. H. und Smith, D. D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning, *Agricult. Handb.*, 537: 58 S., 20 Tab.; Washington (United States Depart. Agricul.).

[8] Schwertmann, U., Vogl, W. und Kainz, M. (1990): *Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*, 2. Aufl.: 64 S., 8 Abb., 18 Tab.; Stuttgart (Ulmer).

[9] DIN (2017): DIN 19708:2017-08, *Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG*, Berlin, Beuth-Verlag.

[10] Wischmeier W. H. (1959): A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation, *Soil Science Society of America Proceedings* 23, 246-249.

[11] Sauerborn, P. (1994): Die Erosivität der Niederschläge in Deutschland. Ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion durch Wasser in Mitteleuropa. *Bonner Bodenkundliche Abhandlungen*, 13.

[12] Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E. J., Lenderink, G. und Roberts, N. M. (2014): Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall, *Rev. Geophys.*, 52, 522-555, <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>.

[13] Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C., Mohr, V., Radtke, K., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Toussaint, F., Warrach-Sagi, K. und Woldt, M. (2017): *ReKlIEs-De Ergebnisbericht*, World Data Center for Climate (WDCC) am DKRZ. [https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKlIEsDe\\_Ergebnisbericht](https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKlIEsDe_Ergebnisbericht).

[14] Mann, M. E., Rahmstorf, S., Kornhuber, K., Steinman, B. A., Miller, S. K., Petri, S. und Coumou, D. (2018): Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification, *Sci. Adv.*, 4:eaat3272.

[15] Winterrath, T., Rosenow, W. und Weigl, E. (2012): On the DWD quantitative precipitation analysis and nowcasting system for real-time application in German flood risk management, *Weather Radar and Hydrology (Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011)*, IAHS Publ. 351.

[16] Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Lengfeld, K., Walawender, E., Weigl, E. und Becker, A. (2018): *RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar-data, one-hour precipitation sums (RW)* [https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM\\_RW\\_V2017.002](https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002).

[17] Dixon, W. J. und Yuen, K. (1974): Trimming and winsorization: A review, *Statistical Papers*, 15, 157-170.

[18] Heißenhuber, A., Haber, W. und Krämer C. (2015): *Umweltprobleme in der Landwirtschaft, UBA-Texte 28/2015*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

[19] Brandhuber, R., Auerswald, K., Lang, R., Müller, A. und Treisch, M. (2018): *ABAG interaktiv, Version 2.0*, [https://www.lfl.bayern.de/app/abag\\_interaktiv/](https://www.lfl.bayern.de/app/abag_interaktiv/), Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.

**Anschriften der Autoren**

**Dirk Elhaus**  
 Fachinformationssystem Bodenkunde  
 Geologischer Dienst NRW  
 De-Greif-Str. 195, 47803 Krefeld

**Dr. Tanja Winterrath**  
 Hydrometeorologie  
 Deutscher Wetterdienst  
 Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main

**Professor Dr. Karl Auerswald**  
 Lehrstuhl für Grünlandlehre  
 Technische Universität München  
 85354 Freising-Weihenstephan

**Dr. Franziska Fischer**  
 Lehrstuhl für Grünlandlehre  
 Technische Universität München  
 85354 Freising-Weihenstephan

**Florian Ebertseder**  
 Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz  
 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft  
 Lange Point 6, 85354 Freising

**Dr. Harald Maier**  
 Agrarmeteorologie  
 Niederlassung Weihenstephan  
 Deutscher Wetterdienst  
 Alte Akademie 16, 85354 Freising

**Robert Brandhuber**  
 Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz  
 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft  
 94099 Ruhstorf an der Rott

# 04.19

# Bodenschutz

24. Jahrgang  
4. Quartal 2019  
42234

**Erhaltung, Nutzung und Wiederherstellung  
von Böden**

[www.BODENSCHUTZdigital.de](http://www.BODENSCHUTZdigital.de)

Herausgegeben vom Bundesverband Boden e.V.



## **Bodenkundliche Wissenschaft trifft bodenkundliche Praxis**

Georg Guggenberger, Ernst Gehrt und  
Johannes Müller

## **Prognose großmaßstäbiger Bodenkarten in Sachsen**

Markus Möller, Michael Steininger,  
Daniel Wurbs, Bernd Siemer, Ruth Hoffmann  
und Arnd Bräunig

## **Bodenzustandskataster für Auengebiete im Kreis Viersen**

Carolin Kaufmann-Boll und Bernd Steinweg

## **Klimawandel und Bodenerosion**

Dirk Elhaus, Tanja Winterrath,  
Karl Auerswald und Franziska Fischer

