

## Klimabedingte Veränderung der Regenerosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen

K. Auerswald<sup>1)</sup>, F.K. Fischer<sup>1), 2), 3), 4)</sup>, T. Winterrath<sup>5)</sup>, D. Elhaus<sup>6)</sup>,  
H. Maier<sup>3)</sup>, R. Brandhuber<sup>2)</sup>

### Inhaltsübersicht

- |   |  |
|---|--|
| Kurzfassung   | 4. Wiederkehrintervalle<br>außergewöhnlicher Jahre           |
| 1. Einleitung   | 5. Aktualisierung des Jahresgangs<br>der Regenerosivität     |
| 2. Aktualisierung der Karte der Regen-<br>erosivität für das Zentraljahr 2009 | 6. Fazit für Erosionsberechnungen<br>bei Planung und Vollzug |
| 3. Veränderung durch den Klima-<br>wandel                                     | Literaturverzeichnis   |

### Kurzfassung

Die langfristig mittlere Regenerosivität, der sogenannte R-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung, stellt ein Maß für die gebietsspezifische erosionsauslösende Wirkung des Niederschlags dar. Die hier vorgestellte Karte der Erosivität in Deutschland basiert auf flächendeckenden Radar-Niederschlagsdaten (RADKLIM) der Jahre 2001 bis 2017 mit einer räumlichen Auflösung von 1 km<sup>2</sup>.

Das räumliche Muster blieb weitgehend gleich wie bei der bisher benutzten Karte. Allerdings hat die Regenerosivität gegenüber der alten Karte stark zugenommen. Zwischen 1962 und 2017 verdoppelte sich der R-Faktor. Es ist von einem weiteren Anstieg auszugehen. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge des fortschreitenden Klimawandels, wobei wichtige zugrundeliegende meteorologische Mechanismen bereits bekannt sind.

Der Anstieg des R-Faktors beträgt gegenwärtig etwa 10 % in sechs Jahren. Damit ist der R-Faktor kein konstanter Standortfaktor mehr, sondern die langfristig mittlere Regenerosivität ändert sich je nach betrachtetem Zeitraum um ein Zentraljahr, für den eine Abtragsschätzung gemacht werden soll. Für Abtragsprognosen, also nicht-retrospektive Betrachtungen, wird

<sup>1)</sup> Technische Universität München, Freising

<sup>2)</sup> Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Ruhstorf a.d. Rott

<sup>3)</sup> Deutscher Wetterdienst, Freising

<sup>4)</sup> Jetzt: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof

<sup>5)</sup> Deutscher Wetterdienst, Offenbach

<sup>6)</sup> Geologischer Dienst NRW, Krefeld

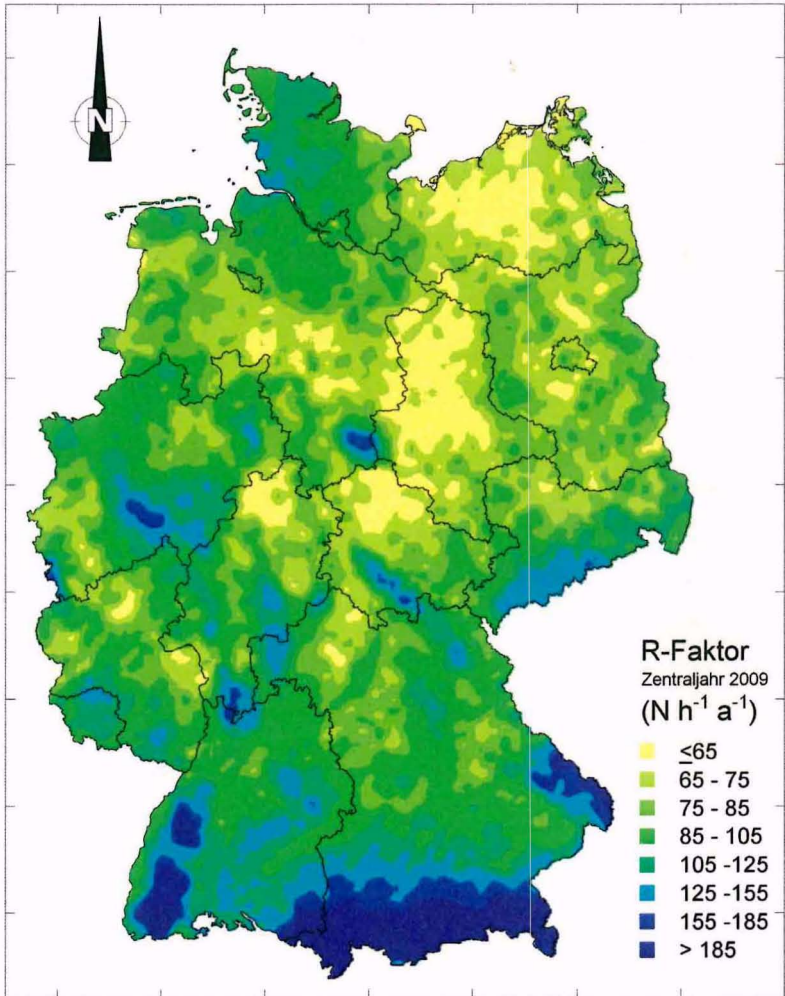
aktuell das Zentraljahr 2025 empfohlen. Dieses Zentraljahr deckt dann etwa den Zeitraum 2020 bis 2030 nach gegenwärtigem Kenntnisstand bestmöglich ab. Die notwendigen Daten, um den R-Faktor für jeden Standort für dieses Zentraljahr schätzen zu können, werden beschrieben.

Außerdem wurde der Jahresgang der Erosivität neu ermittelt, um die erosionsmindernde Wirkung von verschiedenen Kulturen bzw. Fruchtfolgen, quantifiziert im sogenannten C-Faktor, beurteilen zu können. Auch der Jahresgang der Erosivität veränderte sich deutlich. Vermehrt fallen erosive Regen im Winter. Dadurch hat sich beispielsweise der C-Faktor von Winterweizen mehr als verdoppelt, weil Winterweizen über eine lange Periode im Winter den Boden nur unzureichend bedeckt. Ein Schutz der Bodenoberfläche über die Winterperiode ist dadurch noch wichtiger geworden als früher.

## **1. Einleitung**

Die Regenerosivität stellt ein Maß für die gebietspezifische erosionsauslösende Wirkung des Niederschlags dar. Sie hängt von der Anzahl, der Höhe und der Intensität der Einzelniederschläge ab. Da nur wenige Regenereignisse im Jahr erosiv sind und ihre erosive Kraft sehr variabel ist, wird für Planungszwecke normalerweise die langjährig mittlere Jahressumme der Einzelerosivitäten verwendet. Dieser sogenannte R-Faktor wird in der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung ABAG (DIN 2017) benötigt, um den Bodenabtrag an einem Standort berechnen zu können. Er wurde aus langjährigen Niederschlagsmessungen ermittelt, um die hohe Variabilität zwischen einzelnen Jahren auszugleichen (Rogler und Schwertmann 1981, Sauerborn 1994). Das mittlere Ursprungsjahr der Messdaten wird im Folgenden kurz Zentraljahr genannt.

Die Quantifizierung der Erosivität in Deutschland geht auf Rogler und Schwertmann (1981) zurück. Sie hatten Aufzeichnungen von Regenschreibern (Ombrometer) aus den Jahren 1958 bis 1979 in Bayern ausgewertet und daraus die Erosivität berechnet (zur Methodik der Berechnung siehe Rogler und Schwertmann 1981, oder Auerswald et al. 2019). Allerdings standen ihnen nur Regenschreiberaufzeichnungen von 18 meteorologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes DWD zur Verfügung, und an den meisten Stationen war die Zeitreihe nur zehn Jahre lang. Aufgrund einer Korrelation der langjährigen R-Faktoren mit den langjährigen, mittleren Sommerniederschlagssummen konnten jedoch die R-Faktoren auf die gesamte Landesfläche von Bayern interpoliert werden (Rogler und Schwertmann 1981, Schwertmann et al. 1990). Die dabei zugrunde liegende Karte der mittleren Sommerniederschläge beruhte allerdings wieder auf einer Interpolation, so dass bei der Karte von Rogler und Schwertmann (1981) mit einer relativ großen Unschärfe gerechnet werden musste. Ähnlich wurde in anderen Bundesländern vorgegangen (Sauerborn 1994).



**Abb. 1:** Karte der Regenerosivität in Deutschland berechnet aus RADKLIM-Daten (Datenzeitraum 2001 bis 2017; die Werte gelten nur für das Zentraljahr 2009)

Der DWD betreibt ein Messnetz aus Radar-Stationen zur flächendeckenden und kontinuierlichen Niederschlagsmessung. Die Messungen werden in aufwändigen Schritten und mit Hilfe von aktuell weit mehr als 2000 Ombrometer-Messstationen (im Jahr 2001 bis über 4000 Stationen) kalibriert. Sie stehen dann mit 5-minütiger bzw. stündlicher Auflösung und mit einer räumlichen Auflösung von  $1 \text{ km}^2$  flächendeckend für ganz



Deutschland zur Verfügung (452.503 Pixel). Diese sogenannten RADKLIM-Daten (Winterrath et al. 2018) gibt es ab 2001. Sie stellen eine sehr viel bessere und vor allem auch aktuellere Grundlage dar, um die räumliche Differenzierung der Erosivität zu ermitteln, als die bisher verwendeten Daten. Für die Erzeugung einer aktuellen, deutschlandweit einheitlichen, hochauflösenden Karte der Regenerosivität wurden die Daten von 2001 bis 2017 mit dem Zentraljahr 2009 ausgewertet (Auerswald et al. 2019). Hier wird dargestellt,

- (1) wie sich der R-Faktor in Deutschland gegenüber den alten Daten verändert hat (Kapitel 2),
- (2) wodurch diese Veränderung auch weiterhin bewirkt wird (Kapitel 3),
- (3) welche Wiederkehrintervalle bei hohen Jahreserosivitäten erwartet werden können (Kapitel 4) und
- (4) wie sich die Jahresverteilung der Regenerosivität geändert hat (Kapitel 5).

Die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Erosionsberechnung bei Planung und Vollzug werden in den jeweiligen Kapiteln behandelt.

## **2. Aktualisierung der Karte der Regenerosivität für das Zentraljahr 2009**

### **Methodik:**

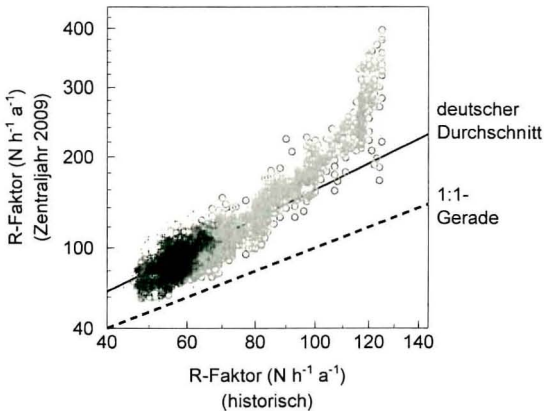
Da die räumliche Variation der Erosivität von einzelnen Ereignissen und in einzelnen Jahren sehr hoch ist (Fischer et al. 2016, 2018), musste ein stark glättendes, dreistufiges Verfahren gewählt werden, um das langfristige zu erwartende regionale Muster herauszuarbeiten. Das dreistufige Verfahren beruht im Wesentlichen darauf, dass 17 Jahre (2001 bis 2017) für die Auswertung herangezogen werden und dass räumlich und zeitlich zwischen den Extremen ausgeglichen wird. Im Einzelnen wurden neben dem 17-jährigen Mittel folgende Schritte der Glättung verwendet: (1) Statt der 5-minütigen Daten wurden die einstündigen RADKLIM-Daten genutzt, weil dies besonders extreme Ereignisse mildert, wobei die von Fischer et al. (2018) erarbeitenden Skalierungsfaktoren verhindern, dass die Regenerosivität durch die geringe zeitliche Auflösung unterschätzt wird. (2) Jahre mit extrem geringer und Jahre mit extrem hoher Erosivität innerhalb des 17-jährigen Datensatzes jedes einzelnen Pixels wurden durch einfaches Winsorisieren (Dixon und Yuen 1974) in ihren Auswirkungen gemildert. Beim Winsorisieren wird der höchste Wert durch den zweithöchsten und der niedrigste durch den zweitniedrigsten ersetzt und erst dann der Mittelwert berechnet. Dadurch werden Ausreißerjahre entfernt. Eine sich anschließende Biaskorrektur stellte sicher, dass dadurch nicht der Gebietsmittelwert verändert wurde. (3) Schließlich wurde noch geostatistisch durch Einbeziehung der Nachbarpixel mittels Kriging (Gräler et al. 2016) geglättet.

### Ergebnisse:

Die auf RADKLIM basierende Karte der Regenerosivität (Abb. 1) zeigt im Wesentlichen das gleiche, von der Orographie geprägte Muster wie die Karte von Sauerborn (1994). Die höchsten Erosivitäten treten im Alpen- und Voralpenraum und im Schwarzwald auf. Aber auch alle anderen Höhenzüge sind gut zu erkennen. Niedrige Erosivitäten sind insbesondere in den unterfränkischen Trockengebieten und in den Regenschattlagen (z. B. Goldene Aue) zu finden.

Neben einer im Detail etwas stärkeren Differenzierung als bei der bisherigen Karte ist der wesentliche Unterschied, dass die Werte der Regenerosivität nun deutlich höher sind. Dieser Anstieg ist real und nicht auf die veränderte Methodik zurückzuführen, wie im nächsten Kapitel gezeigt werden wird.

Im Mittel ist der R-Faktor für das Zentraljahr 2009 (Zeitraum 2001 bis 2017) etwa 60 % höher als in der Karte von Sauerborn (1994). Dies gilt für alle Landschaften gleichermaßen mit Ausnahme der Gebiete, in denen früher der R-Faktor über  $120 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  betragen hatte (vor allem Alpenraum). Beispielhaft ist dies in Abb. 2 für alle Gemeinden in Rheinland-Pfalz und in Bayern gezeigt.



**Abb. 2:** Vergleich der Mittelwerte der historischen Regenerosivität mit der Erosivität für das Zentraljahr 2009 am Beispiel aller Gemeinden in Rheinland-Pfalz (schwarze Kreuze) und aller Gemeinden in Bayern (hellgraue Kreise)

Gemeinden, deren R-Faktor früher über  $120 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  betragen hatte, zeigen einen deutlich stärkeren Anstieg. Alle diese Gemeinden haben wesentliche Flächenanteile an ihrer Gemeindefläche über 850 m über NN. Eine mögliche Ursache ist, dass die Einstufung des R-Faktors in Höhenlagen über 850 m bisher falsch war, da die beiden höchstgelegenen meteorologischen Stationen, die Rogler und Schwertmann (1981) zur Verfügung standen, auf etwa 810 m liegen (Oberstdorf und Kempten).

Die mittleren R-Faktoren aller 401 Landkreise in Deutschland können dem Anhang in Auerswald et al. (2019) entnommen werden. Für alle Gemeinden in Deutschland sind die R-Faktoren für das Zentraljahr 2025 in der App ABAGinteraktiv ([https://www.lfl.bayern.de/appl/abag\\_interaktiv/](https://www.lfl.bayern.de/appl/abag_interaktiv/)) für Erosionsberechnungen hinterlegt. Detailliertere Daten stehen über die beiden folgenden Links zur Verfügung:

[https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM\\_Rfct\\_V2017.002](https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_Rfct_V2017.002) stellt ein Shape-File mit den R-Faktoren für das Zentraljahr 2009 der 16 Bundesländer, der 401 Landkreise und der 11.256 Gemeinden sowie die gesamte Karte im Rasterformat mit einer Auslösung von 1 km<sup>2</sup> im GeoTIFF-Format zur Verfügung (Fischer et al. 2019).

[https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/annual/erosivity/precip\\_radklim/2017\\_002/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/erosivity/precip_radklim/2017_002/) enthält entsprechende Shape-Files mit den ungeglätteten Daten aller Jahre seit 2001 (Winterrath 2019). Diese Jahreskarten werden zukünftig routinemäßig ergänzt. Die Karten beruhen auf 1-h-Radardaten und sind dazu gedacht, mehrjährige Mittelwerte zu berechnen. Da durch diese zeitliche Auflösung viel Information verloren geht, eignen sie sich nicht, um die Erosivität eines einzelnen Jahres kleinräumig zu quantifizieren. Weitere Informationen können den an gleicher Stelle abgelegten README-Dateien entnommen werden.

### **3. Veränderung durch den Klimawandel**

#### **Einführung:**

Wegen der großen Variabilität der Regenerosivität zwischen verschiedenen Jahren werden normalerweise mehrjährige Niederschlagsmessungen ausgewertet und ein mittlerer R-Faktor berechnet. Wischmeier und Smith (1978) nennen einen 20-jährigen Zeitraum, um zu stabilen mittleren Abträgen zu kommen. Weisen die Erosivitäten der einzelnen Jahre neben der statistischen Streuung auch noch einen Trend auf, so gilt der mittlere R-Faktor nur für das Zentraljahr der Niederschlagsmessungen. Für davon abweichende (Zentral-)Jahre, muss zusätzlich der Trend berücksichtigt werden. Dies erschwert die Festlegung des R-Faktors, da der aus Messungen bestimmte R-Faktor immer die Vergangenheit abbildet, während die Allgemeine Bodenabtragsgleichung in vielen Fällen für Planungszwecke und damit für die Zukunft oder für die Beurteilung einer Ist-Situation angewendet wird. Das Zentraljahr der Messungen stimmt dann nicht mehr mit dem Zentraljahr der Anwendung überein und der Trend muss einberechnet werden. Um hier Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird vorgeschlagen, als Zentraljahr für zukünftige Berechnungen das Jahr 2025 zu verwenden. Das deckt etwa den mittleren R-Faktor des Zeitraums 2020 bis 2030 (oder 2015 bis 2035) ab. Durch dieses im Vorfeld festgelegte Zentraljahr wird sichergestellt, dass Aussagen vergleichbar werden. Wenn in einigen Jahren mehr Daten vor-

liegen, können der Trend überprüft und dann ein neues Zentraljahr festgelegt werden.

Im Folgenden wird daher zunächst gezeigt, dass (1) der Trend real ist und nicht auf der veränderten Methodik beruht. Dann wird (2) ein Aktualisierungsfaktor bestimmt, mit dem die R-Faktoren des Zentraljahres 2009 auf das Zentraljahr 2025 umgerechnet und so für Prognosen verwendet werden können. Schließlich wird (3) gezeigt, warum durch den bisher abgelaufenen Klimawandel bereits eine so starke Zunahme des R-Faktors zustande kommen konnte.

### **Methodik:**

Die Datensätze, die verglichen werden, sind zum einen die RADKLIM-R-Faktoren der einzelnen Jahre von 2001 bis 2017. Da dieser Zeitraum zu kurz ist, um einen Trend sicher nachweisen zu können, werden diese Daten durch weitere Daten ergänzt, die aus Ombrometermessungen errechnet wurden. Dies erlaubt gleichzeitig auch einen Vergleich von R-Faktoren in Abhängigkeit von der Messmethodik. Da gerade bei den Ombrometermessungen mit einer enormen Variabilität zu rechnen ist, werden dafür nur solche Datensätze verwendet, bei denen mindestens 50 Ombrometermessjahre vorliegen und gemittelt werden können. Diese Datensätze sind:

- R-Faktoren von 115 über Deutschland verteilten Messstationen von 2001 bis 2016 aus Fischer et al. (2018). Da diese Daten den gleichen Zeitraum wie die Radar-Daten abdecken (außer 2017), erweitern sie den Zeitraum nicht. Sie erlauben aber einen Vergleich von Radar- und Ombrometer-Daten hinsichtlich eines methodenbedingten Bias. Und ihre Streuung gegenüber der Streuung der Radar-Daten erlaubt es, abzuschätzen, wie weit 115 gleichmäßig verteilte Stationen ausreichen, um einen stabilen Jahresmittelwert zu berechnen.
- R-Faktoren von 53 in Nordrhein-Westfalen gelegenen Messstationen von 1973 bis 2007 aus Fiener et al. (2013); da diese R-Faktoren nur die Monate April bis November umfassten, wurden die Werte entsprechend des mittleren Anteils der Monate Dezember bis März um 10 % erhöht.
- Mittlere R-Faktoren der Bundesländer aus Sauerborn (1994); da hier zu wenig Stationen und zu wenig Jahre vorlagen, wurden alle Stationen und Jahre eines Bundeslandes gemittelt. Da die Erhebungszeiträume der verschiedenen Bundesländer und damit die Zentraljahre sich unterschieden, wurde dies bundeslandweise gemacht.

Um verschiedene Datensätze vergleichen zu können, auch wenn sie von unterschiedlichen Stationen bzw. Gebieten stammen, wird die Veränderung über die Zeit immer relativ zum Mittelwert der in Abb. 1 dargestellten, radar-basierten Karte für den Ort der Ombrometermessung angege-



ben. Für die aus Radardaten bestimmten mittleren R-Faktoren eines Jahres war dies der Mittelwert der Karte in Abb. 3 ( $93,8 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ). Für die anderen Daten waren dies die Mittelwerte der jeweiligen Pixel dieser Karte, an denen die Ombrometerstationen standen.

### Ergebnisse:

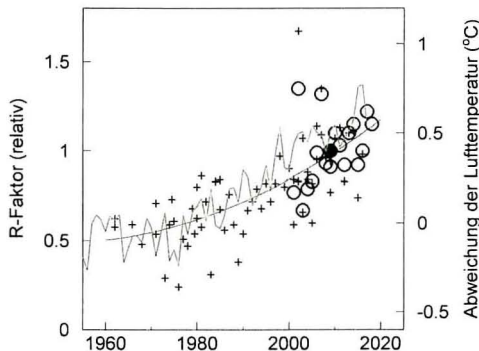
Zu (1): Trägt man die 17 Jahre der Radardaten einzeln (relativ zum 17-jährigen Mittel; Zentraljahr 2009) gegen das Jahr auf, so zeigt sich eine deutliche Zunahme über den vorliegenden Zeitraum (Abb. 3). Allerdings werden 17 Jahre in der Meteorologie als zu kurz angesehen, um einen Trend nachweisen zu können. Nimmt man die Daten der Ombrometerstationen hinzu, wird der Zeitraum 1962 bis 2017 abgedeckt. In einem weiten Zeitfenster überlappen sich die Radar- und die Ombrometerdaten. Dabei ist zwischen beiden Datensätzen kein Unterschied zu erkennen, außer dass die Streuung bei den Ombrometerdaten größer ist. Trotz bis zu 115 Stationsjahren pro Punkt werden die Unterschiede, die durch einzelne, extreme Ereignisse entstehen, weniger gut ausgeglichen als bei den Radar-Daten, bei denen 452.503 Pixel gemittelt wurden. Aber auch bei den Radar-Daten bleiben noch erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Jahren.

Zu (2): Über den gesamten Zeitraum stieg die Regenerosivität stark an. Zwischen 1962 und 2019 hat sie sich in etwa verdoppelt. Der Anstieg ist in den letzten Jahrzehnten stärker als in früheren Jahrzehnten, was sich in einer quadratischen Regression in Abb. 3 ausdrückt. Dieser kontinuierliche Anstieg der Regenerosivität bedeutet aber auch, dass die neuen R-Faktoren, auch wenn sie deutlich höher sind als die historischen, schon nicht mehr aktuell sind, da sie für das Zentraljahr 2009 gelten. Heute müssten noch höhere gelten. Wären nur die letzten 10 Jahre (2008 bis 2017; Zentraljahr 2012,5) ausgewertet worden, wären die mittleren Erosivitäten bereits um 5 % höher, als sie für das Zentraljahr 2009 ausgewiesen sind. Dreieinhalb Jahre Unterschied im Zentraljahr wirken sich also schon deutlich aus. Wertet man nur die letzten fünf Jahre aus (2013 bis 2017; Zentraljahr 2015), sind die mittleren Erosivitäten um 8 % höher. Aus der Regression in Abb. 3 schließlich folgt, dass für das Zentraljahr 2025 bereits um 27 % höhere Erosivitäten als für das Zentraljahr 2009 zu erwarten sind. Die in der Karte von Abb. 1 dargestellten Werte müssen also mit dem Faktor 1,27 aktualisiert werden, damit das Zentraljahr überwiegend einen in der Zukunft liegenden Zeitraum und nicht die Vergangenheit umfasst. Liegt also in der Karte der mittlere R-Faktor für das Zentraljahr 2009 bei  $100 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , so ist für das Zentraljahr 2025 ein Wert von  $127 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  anzunehmen.

Der 95 %-Vertrauensbereich des Zentraljahres 2025 ist relativ groß, da über den letzten Messwert hinaus extrapoliert werden muss. Bei dem vorgeschlagenen Aktualisierungsfaktor von 1,27 kann es sein, dass das



wahre Zentraljahr bereits 2016 ist, also noch in der Vergangenheit liegt (untere 95 %-Vertrauensgrenze). Es kann aber auch sein, wenn die weitere Entwicklung langsamer geht, dass das wahre Zentraljahr statt 2025 erst 2034 ist (obere 95 %-Vertrauensgrenze). Erst wenn eine Reihe weiterer, auf RADKLIM basierender Jahres-R-Karten vorliegen, wird sich das wahre Zentraljahr dieses Aktualisierungsfaktors genauer bestimmen lassen. Dann wird man allerdings auch nicht mehr 2025 als festgelegtes Zentraljahr für Abtragsprognosen verwenden können, sondern muss diese Festlegung entsprechend der Zahl der hinzugekommenen Jahre anpassen. Dadurch wird die Unsicherheit für den dann zu bestimmenden, neuen Aktualisierungsfaktor wohl ebenso groß sein, wie das beim Aktualisierungsfaktor 1,27 der Fall ist. Diese Unsicherheit ist nicht dem Verfahren oder der Datenlage geschuldet, sondern sie entsteht durch die enorme Variabilität des R-Faktors zwischen den Jahren und der Unsicherheit des Trends, der u. a. wesentlich von politischen Entscheidungen abhängen wird.



**Abb. 3:** R-Faktoren aus Radarniederschlägen (Kreise) oder von Ombrometerstationen (Kreuze) relativ zum mittleren R-Faktor 2001 bis 2017 in Abhängigkeit vom mittleren Ursprungsjahr (= Zentraljahr). Die Kreuze sind Mittelwerte von mindestens 50 Stationsjahren, die Kreise sind Mittelwerte von 452.503 Pixeln. Das gefüllte Symbol ist der Referenzpunkt (d.h. der Mittelwert der Jahre 2001 bis 2017). Die dicke schwarze Linie ist eine quadratische Regression. Die unregelmäßige, graue Linie gibt die Abweichung der globalen Lufttemperatur vom globalen Mittelwert 1961 bis 1990 wieder (aus [www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#textpart-1](http://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#textpart-1)).

Zu (3): Der Anstieg der Erosivität über die letzten sechs Jahrzehnte geht einher mit dem Anstieg der Lufttemperatur (Abb. 3). Es ist bekannt, dass mit zunehmender Erwärmung Extremregen stark zunehmen. Auch die Mechanismen werden zunehmend besser verstanden. Eine leicht verständliche Darstellung findet sich bei Rahmsdorf (2018). Hinsichtlich der Jahreserosivität kommen vier Änderungen zusammen und verstärken sich dadurch gegenseitig in ihrer Wirkung:

1. Zunahme der Regenmenge je Ereignis: Bei Niederschlägen ist zunächst zu erwarten, dass die Regenmenge durch die Zunahme des Sättigungsdampfdrucks um etwa 7 % je Grad Erwärmung zunimmt. Dies nennt man CC-Rate nach der zugrunde liegenden physikalischen Gleichung, der Clausius-Clapeyron-Gleichung. Insbesondere bei konvektiven Starkniederschlägen kann die Skalierungsrate aber kurzzeitig (im Stundenbereich) bis zu 14 % pro Kelvin ansteigen (Super-CC-Rate) (Westra et al. 2014). Dies gilt besonders für Temperaturen zwischen etwa 12 °C und 22 °C (Lenderink und van Meijgaard 2008). Ursachen für die Intensivierung der Niederschläge, umfassen eine Verschiebung vom stratiformen zum konvektiven Regime (Haerter und Berg 2009) sowie eine Intensivierung der Wolkendynamik. Dieser Effekt kommt daher, dass durch die höheren Temperaturen der oberflächennahen Luftschichten und vor allem durch die höhere Energiefreisetzung bei der Kondensation der Regentropfen, die Konvektion eine stärkere Sogwirkung entfachen kann (Loriaux et al. 2013, Westra et al. 2014). Die Konvektionszelle saugt dadurch aus einem größeren Gebiet warme, feuchte Luft an. Dadurch steigt die Regenmenge über die CC-Rate.
2. Zunahme der Regenintensität und der Tropfengrößen: Wenn die Regenmenge steigt, steigt bei gleicher Lebensdauer der Zelle auch die Regenintensität. Da aber wegen der höheren Energiefreisetzung die warme Luft schneller aufsteigt (Loriaux et al. 2013), regnet sie auch schneller ab. Dadurch steigt die Regenintensität überproportional. Gleichzeitig können wegen der schneller aufsteigenden Luft kleine Tropfen weniger ausfallen, so dass auch der Tropfendurchmesser steigt (Bürger et al. 2014). Da im R-Faktor Regenmenge und Regenintensität multipliziert werden, verstärken sich beide Effekte in ihrer Wirkung auf die Regenerosivität und der R-Faktor steigt überproportional an.
3. Zunahme des Gewitterpotentials (Mohr und Kunz 2013) und damit Zunahme der erosiven Starkregen (Mueller und Pfister 2011).
4. Verminderte Windgeschwindigkeiten und dadurch stabilere Wetterlagen: Die polaren und subpolaren Gebiete erwärmen sich viel stärker als die Tropen und die Subtropen. Das wird z. B. durch den Rückzug des Eises verursacht oder dadurch, dass sich dünne Schmelzwasserschichten auf dem Eis bilden, wodurch die Albedo gegenüber Schnee stark vermindert wird (Greuell 2000). Die verminderten globalen Temperaturunterschiede wiederum schwächen Winde ab (Coumou et al. 2015). Dadurch bleiben extreme Wetterlagen länger stabil und Hitzeperioden ebenso wie Regenperioden dauern länger an (Coumou et al. 2014, Mann et al. 2018). Was dann passiert, konnte 2016 beim sogenannten Simbach-Ereignis anschaulich beobachtet werden (Brandhuber et al. 2017). Ein im Grunde wenig spektakulärer Regen wollte nicht weichen und hat zwei Tage lang über dem kleinen Simbach-Einzugsgebiet abgeregnet und so Schäden in Milliardenhöhe verursacht. Wä-

ren die Regenzellen innerhalb der zwei Tage nur um 10 oder 20 km weitergewandert, wären vermutlich keine nennenswerten Schäden entstanden.

Alle vier Faktoren sind multiplikativ im R-Faktor verknüpft. Dadurch genügt bereits ein relativ geringfügiger Anstieg der mittleren Temperatur, um so starke Auswirkungen auf den R-Faktor zu haben. Für die Zukunft, besonders wenn die Treibhausgasemissionen nicht bis 2030 halbiert werden, ist daher mit noch wesentlich stärkeren Zunahmen der Erosivität zu rechnen.

### **Zwischenresümee:**

Der wesentliche Unterschied für die Zukunft ist also, dass nicht mehr – wie in der Vergangenheit – ein konstanter mittlerer R-Faktor verwendet werden kann. Vielmehr ist davon auszugehen, dass der langjährig mittlere R-Faktor jedes Jahr zunimmt. Gegenwärtig nimmt der R-Faktor jedes Jahr um knapp 2 % gegenüber dem Zentraljahr 2009 zu. Für das einzelne Jahr scheint die Zunahme gering. In sechs Jahren beträgt sie aber bereits 10 %, in 30 Jahren 50 %. Wenn der Bodenabtrag nicht steigen soll, muss das durch Änderungen beim C-Faktor (Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor) oder beim L-Faktor ausgeglichen werden. Beispielsweise müssten die Felder alle sechs Jahre um 20 % in Gefällrichtung verkleinert werden, um die Zunahme des R-Faktors durch den L-Faktor zu kompensieren. Dies ist erheblich. Zudem läuft die Entwicklung bei den Feldgrößen in die entgegengesetzte Richtung (Zenger und Friebe 2015), so dass der C-Faktor die Entwicklung bei R und L kompensieren muss, wenn der Bodenabtrag nicht zunehmen soll. Wie in Kapitel 5 gezeigt werden wird, hat aber auch der C-Faktor allein durch die Veränderungen in der Jahresverteilung der Regenerosivität bereits zugenommen. Die Fruchtartenwahl und die Wahl des Bearbeitungsverfahrens müssen demnach bereits drei in die gleiche Richtung wirkende Veränderungen kompensieren. Dies ist nur durch eine gegenüber heute sehr viel geringere Bearbeitungsintensität denkbar. Die erfordert eine stärkere Verbreitung von kleegrasbasierten Fruchtfolgen (Zunahme des organischen Landbaus) oder von Direktsaatverfahren.

Der entscheidende Unterschied der Erosivität im Vergleich zu allen anderen erosionsbestimmenden Faktoren der ABAG ist, dass eine Änderung der Erosivität alle Landwirte gleichermaßen betrifft. Eine Kompensation erfordert daher ungleich größere Anstrengungen auf Seiten der Beratung und auf Seiten der Landwirtschaft, als wenn nur einzelne Produktionszweige betroffen sind (z. B. wären durch Änderungen im Zuckerrübenanbau nur die Zuckerrübenbauern und bei denen auch nur die Zuckerrübenflächen betroffen).



Auch die gesellschaftlichen, volkswirtschaftlichen und ökologischen Wirkungen sind ungleich höher, wenn eine Veränderung ganze Einzugsgebiete erfasst und nicht nur Teilflächen darin. Während es normalerweise immer zu Kompensationen zwischen unterschiedlichen Flächen kommt und daher die Gesamtwirkung gedämpft wird, ist dies bei flächendeckenden Änderungen nicht mehr der Fall. Hier können sich die Wirkungen gegenseitig sogar verstärken und so wesentlich stärkere Effekte hervorrufen. Die Zunahme der Rinnen- und Grabenerosion (z. B. Brandhuber et al. 2017), die noch vor 30 Jahren in Bayern praktisch nicht beobachtet wurden, ist ein deutlicher Hinweis auf die Probleme, die durch Veränderungen entstehen, die ganze Einzugsgebiete betreffen. Die Resilienz von Landschaften wird durch großflächige Änderungen offenbar überschritten.

#### **4. Wiederkehrintervalle außergewöhnlicher Jahre**

##### **Einführung:**

Bei großen Schäden wird schnell die Frage gestellt, ob diese durch unangepasste Landnutzung oder durch ein außergewöhnliches Regenereignis verursacht wurden. Um dies beurteilen zu können, ist es notwendig, die Wiederkehrintervalle abzuschätzen, innerhalb derer zu erwarten ist, dass erneut solche Schäden auftreten.

Diese Frage ergibt sich auch aus der Bundes-Bodenschutzverordnung BBodSchV, Anhang 4, die davon ausgeht, dass „... weitere Bodenabträge zu erwarten sind, wenn in den zurückliegenden 10 Jahren bereits mehrfach erhebliche Mengen Bodenmaterial ... abgetragen wurden“. Dies führt zu der Frage, ob auf einer Fläche auch in Zukunft mit hohen Bodenabträgen gerechnet werden kann, oder ob ein beobachteter großer Abtrag auf einen ungewöhnlichen Niederschlag zurückzuführen ist. Da es hier um Bodenabträge geht, genügt es nicht, das statistische Wiederkehrintervall eines einzelnen Regens abzuschätzen, wie dies in der Hydrologie praktiziert wird, sondern es ergeben sich drei Besonderheiten:

1. Statt der Regenmengen muss die Regenerosivität betrachtet werden, da der Bodenabtrag unter sonst gleichen Bedingungen linear mit der Regenerosivität ansteigt, während die Korrelation mit der Regenmenge relativ schwach ist.
2. Da die Regenerosivität einen sehr starken Jahresgang aufweist, müsste die Berechnung zumindest monatsweise getrennt erfolgen. Ein Regen mit einer Erosivität von beispielsweise  $20 \text{ N h}^{-1}$  wäre im Januar ein außergewöhnliches Ereignis, im August wäre so ein Regen dagegen häufig zu erwarten. Je kürzer man den Betrachtungszeitraum macht, umso seltener tritt aber ein Ereignis auf. Bei monatlicher Betrachtung kommt es dann zwangsläufig zu sehr langen Wiederkehrzeiten, selbst im August. Mit den in der Hydrologie verwendeten Jährlichkeiten wären solche Wiederkehrintervalle nicht vergleichbar.

3. Die Radartechnologie einschließlich aller Nachbearbeitungsschritte liefert nur Informationen mit einer Auflösung von  $1 \text{ km}^2$ . Ein außergewöhnliches Ereignis, das beispielsweise nur ein Viertel einer Zelle (und Nachbarzellen) einnimmt, wird dadurch zu einem mittleren Ereignis. Die Aussagekraft bei Einzelereignissen ist daher für kleine Gebiete wie einzelne Felder eingeschränkt.

Aus diesen Gründen werden hier nicht die Wiederkehrintervalle außergewöhnlicher Regenereignisse, sondern die Wiederkehrintervalle von Jahren mit außergewöhnlicher Erosivität betrachtet. Da der DWD jährlich Karten der Regenerosivität des vergangenen Jahres produzieren wird, hat dies den Vorteil, dass sehr einfach ermittelt werden kann, ob das vergangene Jahr ein außergewöhnliches Jahr war. Allerdings ist dies nur mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung möglich, da die Korrekturschritte, um von RADOLAN- zu RADKLIM-Daten zu kommen, aus denen dann die Regenerosivität berechnet wird, einige Monate in Anspruch nehmen.

### **Methodik:**

Die Verwendung von 1-stündigen Niederschlagsdaten glättet sehr stark. Dadurch werden außergewöhnliche Ereignisse in ihrer Stärke unterschätzt und kleine Ereignisse überschätzt. Im langjährigen Mittel gleicht sich dies aus. Dies gilt nicht für eine retrospektive Betrachtung einzelner Jahre. In dem Fall ist es anzuraten, die Erosivität aus Radardaten mit 5-minütiger Auflösung zu berechnen. Die Verwendung 5-minütiger Radardaten ist allerdings deutlich aufwendiger als die Verwendung 1-stündiger Radardaten. Daher wird man für eine erste Einordnung vermutlich auf die 1-stündigen Daten zurückgreifen. Deswegen wurden die Wiederkehrintervalle für beide Fälle berechnet.

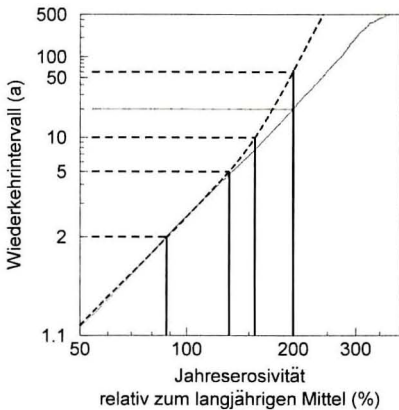
Wegen der Unterschätzung der großen Ereignisse bei Verwendung von 1-stündigen Niederschlagsdaten hängen die Wiederkehrintervalle von der Auflösung der Ausgangsdaten ab. Eine Jahreserosivität von beispielsweise  $300 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  berechnet aus 5-minütigen Daten, hat eine höhere Wiederkehrwahrscheinlichkeit, als wenn sie aus 1-stündigen Daten berechnet worden wäre (Fischer et al. 2018).

Außerdem sind die Wiederkehrintervalle standortsabhängig. An Standorten mit hoher mittlerer Regenerosivität wird ein Jahr mit hoher Regenerosivität weniger außergewöhnlich sein als an Standorten mit geringer Regenerosivität. Daher wurde die Regenerosivität in Prozent des langjährig mittleren R-Faktors an einem Standort für die Berechnung der Wiederkehrintervalle verwendet. Genaueres zum Vorgehen, wie die Wiederkehrintervalle bestimmt wurden, ist bei Auerswald et al. (2019) beschrieben.

**Ergebnisse:**

Die Wiederkehrzeiten können Abb. 4 entnommen werden. Demnach ist mit einer Regenerosivität in Höhe des Mittelwertes an einem Standort (= 100 %) etwa alle zwei Jahre zu rechnen. Ein Beispiel: Der mittlere R-Faktor für das Zentraljahr 2009 im Landkreis Ansbach beträgt  $81 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Mit einem Aktualisierungsfaktor von 1,16 für das Zentraljahr 2019 ergibt sich ein mittlerer R-Faktor von  $94 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Eine Jahresregenerosivität von mindestens  $94 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  ist daher in Ansbach etwa alle zwei Jahre zu erwarten. Dies heißt aber auch, dass im Mittel jedes zweite Jahr niedriger liegt.

Die Einschätzung, dass im Landkreis Ansbach die Jahreserosivität alle zwei Jahre mindestens  $94 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$  beträgt, gilt sowohl wenn man 1-stündige als auch wenn man 5-minütige Radardaten zugrunde legt. Bei mittleren Jahren (ebenso wie bei mittleren Ereignissen) führen beide Auflösungen zu ähnlichen Erosivitäten. In Abb. 4 laufen daher beide Kurven bis etwas zu einem Wiederkehrintervall von fünf Jahren übereinander. Eine Jahreserosivität, die doppelt so hoch ist wie der langjährige Mittelwert, ist dagegen bereits selten. Hier unterscheiden sich die Wiederkehrzeiträume, je nachdem, ob 1-stündige oder 5-minütige Radardaten für die Berechnung verwendet werden. Wenn sich mit 5-minütigen Regendaten das Doppelte der mittleren Jahreserosivität ergibt, beträgt der Wiederkehrzeitraum 20 Jahre. Wird das Doppelte der mittleren Jahreserosivität dagegen aus den stark glättenden 1-stündigen Regendaten errechnet, ist der Wiederkehrzeitraum wesentlich länger. Mit so einem Jahr wäre nur alle 60 Jahre zu rechnen.



**Abb. 4:** Wiederkehrzeiträume der Jahreserosivität einzelner Jahre. Die schwarze, gestrichelte Kurve gilt, wenn die Erosivität eines bestimmten Jahres aus Radardaten mit 1-stündiger Auflösung berechnet wurde. Die graue, durchgezogene Kurve gilt, wenn Radardaten mit 5-minütiger Auflösung zugrunde liegen.



Damit lässt sich indirekt auch beantworten, welches Ereignis ungewöhnlich groß wäre, auch wenn sich nicht direkt Jährlichkeiten angeben lassen. Ein Ereignis müsste mindestens einen R-Faktor von mehr als 150 % der Jahreserosivität haben, um ungewöhnlich zu sein. Nur dann ist zu erwarten, dass durch dieses einzelne Ereignis die Jahreserosivität auf 200 % oder darüber steigt.

Die Aussagen hier gelten für die Erosivität und damit ausschließlich für den Bodenabtrag. Sie gelten nicht für den Abfluss. Damit gelten sie auch nicht für Schäden jenseits des Feldes (Offsite-Schäden), die durch den Abfluss beispielsweise bei Sturzfluten verursacht werden.

## 5. Aktualisierung des Jahresgangs der Regenerosivität

### Methodik:

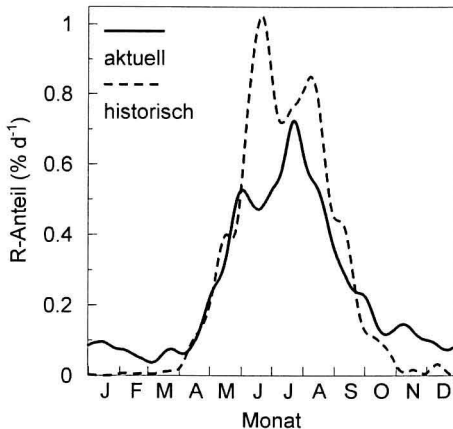
Trotz der großen Zahl an Jahren und der sehr großen Zahl an Pixeln musste auch der Jahresgang der Regenerosivität sehr stark geglättet werden. Nicht an jedem Tag des Jahres fielen in dem 17-jährigen Zeitraum in einem der 452.503 Pixel erosive Regen. Zudem wichen einzelne Tage, an denen extreme Starkregen in vielen Gebieten aufgetreten waren, auch nach Mittelung über die 17 Jahre und über alle Pixel noch von den Vorgänger- und Nachfolgetagen ab. Es muss betont werden, dass die Glättung nicht zu einer Änderung des Jahresgangs führt, da z.B. die Monatsmittelwerte vor und nach der Glättung sehr eng korrelierten (Bestimmtheitsmaß: 99,6 %) und praktisch auf der 1:1-Geraden lagen. Durch das Glätten wird zweierlei erreicht. Der Jahresgang wird zum einen leichter erkennbar. Zum anderen bewirkt bei der Berechnung des C-Faktors die Verschiebung einer Kulturperiode um einen Tag keine extremen, nicht begründbaren Änderungen (zur Berechnung des C-Faktors siehe Auerswald et al. 1986, Schwertmann et al. 1990). Ohne Glättung konnte dies der Fall sein, wenn durch die Verschiebung ein Tag mit starker Häufung von Starkregen in der Vergangenheit noch mit in diese Kulturperiode fiel oder nicht.

Die Glättung folgte den in Tukey (1977) beschriebenen und empfohlenen Verfahren. Um auch am Jahresanfang und -ende glätten zu können, wurden der Jahresgang dreimal aneinanderghängt (wiederholt) und am Ende nur der Jahresgang in der Mitte verwendet. Die Glättung erfolgte zunächst durch Berechnung eines 13-tägigen, gleitenden Medians. Aus diesen Werten wurde dann ein dreitägiger, überspringender Mittelwert („skip mean“) berechnet, bei dem der mittlere Wert für die Mittelwertberechnung ausgelassen wird. Aus den daraus erhaltenen Werten wurde dann ein gleitender, linear gewichteter Mittelwert eines 21-tägigen, zentrierten Fensters berechnet (sogenanntes „Hanning“).

### Ergebnisse:

Der aktualisierte Jahresgang (Abb. 5) zeigt wie schon der Jahresgang bei Rogler und Schwertmann (1981), der auch in DIN (2017) enthalten ist, ein ausgeprägtes Sommermaximum mit einem raschen Anstieg der Regenerosivität von Mitte April bis Mitte Juni. Ein wesentlicher Unterschied tritt allerdings in den Wintermonaten auf. Bisher wurde davon ausgegangen, dass auf diese Monate nur sehr wenig der Jahreserosivität entfällt (Januar bis März trugen z. B. nur 2 % zur gesamten Jahreserosivität bei). Dieser Anteil ist nun deutlich höher (6 % für Januar bis März). Im Gegenzug verringern sich dadurch die Anteile im Hochsommer. Ein Unterschied zwischen verschiedenen Regionen in Deutschland konnte nicht festgestellt werden (Auerswald et al. 2019).

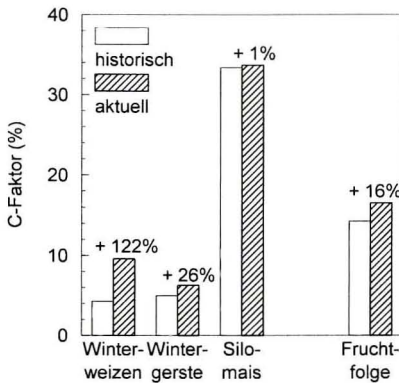
Warum der Jahresgang des R-Faktors so deutlich anders geworden ist, lässt sich nicht mit Sicherheit sagen. Da in manchen Bundesländern auch bisher schon über einen höheren Anteil in den Wintermonaten berichtet wurde (z. B. Hirche 1990), könnte es sein, dass nur das Probenkollektiv von Rogler und Schwertmann (1981) zu klein war oder zu sehr von schneereichen Stationen in den Alpen und Mittelgebirgen dominiert wurde. Es könnte aber auch sein, dass diese Veränderung wiederum dem Klimawandel geschuldet ist. Dafür spricht, dass z. B. Schönwiese et al. (2003) gezeigt haben, dass extreme Winterniederschläge in Deutschland in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts gegenüber der ersten Hälfte des Jahrhunderts um 463 % zugenommen haben. Sommer und Herbst blieben dagegen unverändert.



**Abb. 5:** Jahresgang der Regenerosivität berechnet aus RADKLIM-Daten („aktuell“) und nach DIN (2017) („historisch“). Die Tageswerte des aktuellen Jahresgangs können für die Berechnung von C-Faktoren als Tabelle dem Anhang von Auerswald et al. (2019) entnommen werden.

Um die Auswirkungen des aktualisierten Jahresgangs der Regenerosivität gegenüber dem Jahresgang in DIN (2017) auf die relative Erosionswirkung verschiedener Ackerkulturen, den sogenannten C-Faktor, zu prüfen, wurde der C-Faktor für die Kulturen und die gesamte Fruchtfolge einer dreigliedrigen Fruchtfolge aus Silomais, Winterweizen und Wintergerste berechnet. Dabei wurden einmal der alte Jahresgang und dann der neue Jahresgang der Erosivität verwendet. Die Daten der Kulturentwicklung und die zugehörigen Relativen Bodenabträge wurden der DIN (2017) entnommen.

Der Anteil der Regenerosivität pro Tag ist auch beim aktuellen Jahresgang während der Wintermonate immer noch sehr gering gegenüber den Sommermonaten. Da aber die Kulturen während dieses Zeitraums in ihrer Entwicklung weitgehend verharren, wirkt sich der Unterschied zwischen dem historischen und dem aktuellen Jahresgang doch deutlich auf die C-Faktoren aus. Da Winterweizen für diesen Zeitraum in der Periode „10 % bis 50 % Bedeckung“ bleibt und daher noch einen erheblichen Relativen Bodenabtrag aufweist, hat sich der C-Faktor für Winterweizen gegenüber bisherigen Planungsgrundlagen mehr als verdoppelt (Abb. 6). Zusammen mit dem Anstieg der Regenerosivität bedeutet dies, dass die Abträge unter Winterweizen etwa vierfach höher sind als bisher angenommen. Es ist daher eine Neubewertung der verschiedenen Kulturen notwendig.



**Abb. 6:** Berechneter Teil-C-Faktor für die drei Kulturen einer Winterweizen-Wintergerste-Silomais-Fruchtfolge und C-Faktor der Gesamtfruchtfolge mit dem Jahresgang der Regenerosivität nach DIN (2017; „historisch“) und dem aus RADKLIM-Daten der Jahre 2001 bis 2017 berechneten Jahresgang („aktuell“). Die Zahlen über den aktuellen Balken geben den Anstieg gegenüber den historischen C-Faktoren an.

Auch bei den beiden anderen betrachteten Kulturen, Wintergerste und Silomais, haben die C-Faktoren zugenommen (Abb. 6). Gleiches gilt



wohl für die meisten anderen Kulturen, weil die meisten den Winter in einem relativ erosionsanfälligen Stadium mit wenig Bodenbedeckung überdauern, während die Bedeckung im Hochsommer bei praktisch allen Kulturen hoch ist. Die Zunahme der Erosivität in den Wintermonaten wirkt sich daher in allen diesen Fällen stärker aus als der Rückgang in den Sommermonaten und bewirkt höhere Bodenabträge.

Wegen der Zunahme der Erosion besonders in den Wintermonaten wird es daher wichtiger als in der Vergangenheit, Bewirtschaftungsverfahren zu entwickeln und zu empfehlen, bei denen die Bodenbedeckung im Winter trotz geringer Kulturpflanzenbedeckung hoch bleibt (z.B. durch reduzierte Bodenbearbeitung, abfrierende oder überdauernde Winterzwischenfrüchte und vor allem durch einen verstärkten Anbau von mehrjährigen Kulturen, die auch im Winter den Boden bedecken).

Nachdem der C-Faktor bei allen drei Kulturen der getesteten dreigliedrigen Fruchtfolge zugenommen hat, ist es nicht verwunderlich, dass auch der C-Faktor der gesamten Fruchtfolge gestiegen ist (Abb. 6). Für die Gesamtfruchtfolge bleibt der Anstieg vergleichsweise moderat (+ 16 %), da der Abtrag durch das Maisjahr dominiert wird und bei Mais der Anstieg nicht so ausgeprägt ist wie bei Winterweizen. Allerdings waren bereits in der Vergangenheit die Bodenabträge in vielen Fällen zu hoch. Daher bedeutet dieser Anstieg des C-Faktors ebenso wie der Anstieg des R-Faktors, dass die Anstrengungen hin zu einer erosionsmindernden Bewirtschaftung deutlich verstärkt werden müssen. Dies wird noch deutlich schwerer, wenn die Regenerosivität in Folge des Klimawandels in den nächsten Jahren weiter ansteigt. Eine Reduktion von Treibhausgasemissionen ist daher die vordringlichste Aufgabe. Da die Landwirtschaft über den Einsatz fossiler Energie, Emissionen aus der Tierhaltung und Kohlenstofffreisetzung durch Drainage humusreicher Böden auch selbst wesentlich zu den Treibhausgasemissionen beiträgt, sollten die Emissionen des Landwirtschaftsbereichs schon im Eigeninteresse weitgehend zurückgefahren werden.

## **6. Fazit für Erosionsberechnungen bei Planung und Vollzug**

- Die neue R-Faktoren-Karte gibt die Erosivitäten im Mittel der Jahre 2001 bis 2017 wieder.
- Da der R-Faktor sich durch den Klimawandel kontinuierlich verändert, muss der R-Faktor für den gewünschten Zeitraum einer Abtragsprognose geschätzt werden. Bei Abtragsprognosen, z.B. für aktuelle Bewirtschaftungsempfehlungen oder Landschaftsplanungen, wird empfohlen, die R-Faktoren der neuen Karte mit dem Faktor 1,27 zu multiplizieren. Die Berechnungen gelten dann für das Zentraljahr 2025, also für eine Periode von 2020 bis 2030.

- Berechnungen des C-Faktors sollten die neue Jahresverteilung der Regenerosivität verwenden, da der Anteil der Jahreserosivität in den Wintermonaten gestiegen ist.
- Erosivitäten einzelner Ereignisse können als ungewöhnlich eingestuft werden, wenn sie 150 % der gebietsspezifischen Jahreserosivität übersteigen.

### Literaturverzeichnis

*Auerswald, K., Kainz, M., Vogl, W., 1986. Vergleich der Erosionsgefährdung durch Maisfruchtfolgen (C-Faktor). Bayer. Landw. Jahrb. 63, 3–8.*

*Auerswald, K., Fischer, F. K., Winterrath, T., 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>.*

*Brandhuber, R., Treisch, M., Fischer, F., Kistler, M., Maier, H., Auerswald, K., 2017. Starkregen, Bodenerosion und Sturzfluten. Beobachtungen im Mai/Juni 2016. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 2-2017, 121 S.*

*Bürger, G., Heistermann, M., Bronstert, A., 2014. Towards subdaily rainfall disaggregation via Clausius–Clapeyron. Journal of Hydrometeorology 15, 1303–1311. DOI: 10.1175/JHM-D-13-0161.1*

*Coumou, D., Petoukhov, V., Rahmstorf, S., Petri, S., Schellnhuber, H. J., 2014. Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer. Proc. Natl. Acad. Sci. 111, 12331–12336.*

*Coumou, D., Lehmann, J., Beckmann, J., 2015. The weakening summer circulation in the northern hemisphere mid-latitudes. Science 348, 324–327. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1261768>*

*DIN – Deutsches Institut für Normierung, 2017. DIN 19708:2017-08 Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Berlin, Deutschland.*

*Dixon, W. J., Yuen, K., 1974. Trimming and winsorization: A review. Statistical Papers 15,157-170.*

*Fiener, P., Neuhaus, P., Botschek, J., 2013. Long-term trends in rainfall erosivity—analysis of high resolution precipitation time series (1937–2007) from Western Germany. Agricultural and Forest Meteorology 171–172, 115–123.*

*Fischer, F., Hauck, J., Brandhuber, R., Weigl, E., Maier, H., Auerswald, K., 2016. Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resol-*

ved and adjusted radar rain data. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 72–80.

Fischer, F. K., Winterrath, T., 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>.

Fischer, F. K., Winterrath, T., Junghänel, T., Walawender, E., Auerswald, K., 2019. Mean annual precipitation erosivity (R factor) based on RADKLIM Version 2017.002. [https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM\\_Rfct\\_V2017.002](https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_Rfct_V2017.002).

Gräler, B., Pebesma, E., Heuvelink, G., 2016. Spatio-temporal interpolation using gstat. *The R Journal* 8, 204–218.

Greuell, W., 2000. Melt-water accumulation on the surface of the Greenland ice sheet: effect on albedo and mass balance. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* 82, 489–498.

Haerter, J. O., Berg, P., 2009. Unexpected rise in extreme precipitation caused by a shift in rain type? *Nat. Geosci.* 2, 372–373.

Hirche, D., 1990. Die Erosivität der Niederschläge in Niedersachsen. Diplomarbeit, Univ. Braunschweig, 126 S.

Lenderink, G., van Meijgaard, E., 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nat. Geosci.* 1, 511–514, doi:10.1038/ngeo262.

Loriaux, J. M., Lenderink, G., De Roode, S. R., Siebesma, A. P., 2013. Understanding convective extreme precipitation scaling using observations and an entraining plume model. *J. Atmos. Sci.* 70, 3641–3655, doi:10.1175/JAS-D-12-0317.1.

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

Mohr, S., Kunz, M., 2013. Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe. *Atmospheric Research* 123, 211–228.

Mueller, E. N., 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, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.005.

Rahmsdorf, S., 2018. Warum die globale Erwärmung mehr Extremregen bringt. *neue energie* 08/2018, 50–54.

- Rogler, H., Schwertmann, U., 1981. Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte Bayerns. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 22, 99–112.
- Sauerborn, P., 1994. Die Erosivität der Niederschläge in Deutschland. Ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion durch Wasser in Mitteleuropa. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen 13.
- Schönwiese, C.-D., Grieser, J., Trömel, S., 2003. Secular change of extreme monthly precipitation in Europe. Theoretical and Applied Climatology 75, 245–250.
- Schwertmann, U., Vogl, W., Kainz, M., 1990. Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen, 2. Auflage. Ulmer: Stuttgart.
- Tukey, J. W., 1977. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley: Reading, Mass. (USA).
- Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E. J., Lenderink, G., Roberts, N. M., 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. Rev. Geophys. 52, 522–555, doi:10.1002/2014RG000464
- Winterrath, T., 2019. Jährlicher (2001–2017) R-Faktor [N/h/a] auf Basis der stündlichen Niederschlagszeitreihen der RADKLIM Version 2017.002. [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/annual/erosivity/precip\\_radklim/2017\\_002/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/erosivity/precip_radklim/2017_002/), letzter Aufruf: 21. März 2019.
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Lengfeld, K., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2018. RADKLIM Version 2017.002: Reprozzisierte, mit Stationsdaten angeeichte Radarmessungen (RADOLAN), Niederschlagsstundensummen (RW). DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM\_RW\_V2017.002
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook, Issue 537. US Department of Agriculture: Washington, DC.
- Zenger, X., Friebe, R., 2015: Agrarstrukturentwicklung in Bayern, IBA-Agrarstrukturbericht 2014. LfL-Information, Hrsg. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, [https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/agrarstrukturentwicklung-bayern\\_lfl-information.pdf](https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/agrarstrukturentwicklung-bayern_lfl-information.pdf), letzter Aufruf: 15. Mai 2019.