



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Erosionsschutz Bayern Radargestützte Erosionsprognose Teil I

Methodenentwicklung
und Validierung der ABAG



Schriftenreihe

3
2019
ISSN 1611-4159

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz
Lange Point 12, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Agraroeekologie@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 71-3640

1. Auflage: Juni 2019

Druck: ES-Druck, 85354 Freising-Tüntenhausen

Schutzgebühr: 10,00 Euro

© LfL



Erosionsschutz Bayern
Radargestützte Erosionsprognose
Teil I
- Methodenentwicklung und Validierung
der ABAG -

F. K. Fischer^{1,2,3}, K.Auerswald², H.Maier³,
R.Brandhuber¹

¹Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising

²Technische Universität München, Freising

³Deutscher Wetterdienst, Freising

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	13
2 Projektziele	16
3 Grundlagen	18
3.1 Allgemeine Bodenabtragungsgleichung	18
3.2 Daten- und Berechnungsgrundlage	18
3.3 RADOLAN zur Berechnung der R-Faktoren.....	21
4 Material und Methoden	25
4.1 Räumliche und zeitliche Eigenschaften erosiver Regen	25
4.2 Validierung der ABAG	26
4.3 Effekte der zeitlichen und räumlichen Auflösung und der Messmethode des Niederschlags auf die Regenerosivität	29
5 Ergebnisse	31
5.1 Räumliche und zeitliche Eigenschaften erosiver Regen	31
5.2 Validierung der ABAG	34
5.3 Effekte der zeitlichen und räumlichen Auflösung und der Messmethode der Niederschlagsdaten auf die Regenerosivität	39
5.3.1 Effekte der zeitlichen Auflösung.....	39
5.3.2 Effekte der räumlichen Auflösung und der Niederschlagsmessmethoden.....	41
5.3.3 Positionseffekte	43
6 Diskussion	45
7 Schlussfolgerungen und Ausblick	47
Literaturverzeichnis	49

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1: Standorte der 17 Regenschreiber, deren Niederschlagsmessungen zur Berechnung der R-Faktoren für Bayern von Rogler & Schwertmann (1981) verwendet wurden.....	15
Abb. 2: Langjährig mittlere monatliche R-Faktoren-Anteile (Balken) nach Schwertmann et al. (1990) und die Entwicklung des Relativen Bodenabtrags (%) in den Kulturen Sommerweizen (durchgezogene Linie) und konventionell angebautem Mais mit Pflugeinsatz (lang gestrichelte Linie) und Mais mit Mulchsaat (kurz gestrichelte Linie) im Zeitraum von der Bodenbearbeitung für die Saatbettbereitung bis zur Ernte.....	20
Abb. 3: Standorte der 17 Wetterradare des Deutschen Wetterdienstes (Kreuze) in Deutschland mit den 150 km Radien (Kreise) der maximalen Erfassungsbereiche zur Niederschlagsmessung; ausgewertet wird nur ein Radius von 128 km.....	23
Abb. 4: Prinzip der Niederschlagsmessung mittels Wetterradar. Das Wetterradar sendet Radarimpulse aus und empfängt die reflektierte Radarstrahlung. Mit charakteristischen Reflektivität-Regenintensität-Beziehungen kann die Regenintensität ermittelt werden.....	23
Abb. 5: Beispiel einer Niederschlagsverteilung eines Ereignisses innerhalb eines 1 x 1 km ² -großen Pixels (Rahmen des Quadrates) und Lage einer möglichen Ombrometermessstelle (schwarzer Punkt) innerhalb eines Pixels. Je dunkler die Blaufärbung ist, desto größer ist hier die Niederschlagsmenge. (Verändert nach Fiener & Auerswald, 2009).....	25
Abb. 6: Verteilung der dokumentierten Feldstücke aus den Befliegungen in den Jahren 2011 und 2012.	26
Abb. 7: Musterbeispiele zur Klassifizierung der Erosionsschäden nach Kistler et al., 2013.	28
Abb. 8: Verteilung der 12 Ombrometer (blaue Punkte) innerhalb einer 1 x 1 km ² Fläche, die zur Erzeugung der ‚Pseudo-Radardaten‘ verwendet wurden. Die eingezeichneten Polygone kennzeichnen die Flächenanteile, für welche die jeweils darin befindlichen Ombrometer repräsentativ sind.	30
Abb. 9: Tageszeitliche Verteilung der maximalen Regenintensitäten (98%-Quantile).....	31
Abb. 10: Niederschlagsmenge (oben) und entsprechende Erosivität R_e (unten) am 12.05.2011 im Untersuchungsgebiet.....	33
Abb. 11: Jahreserosivität R gemittelt aus den Jahreserosivitäten von 2011 und 2012 im Untersuchungsgebiet.....	34
Abb. 12: Mittlerer berechneter Bodenabtrag ($t\ ha^{-1}$) je Klasse visuell geschätzter Erosionsschäden.	35
Abb. 13: Berechnete Bodenabträge und visuell klassifizierte Erosionsschäden gemittelt für die Feldstücke je Teilgruppierung der Faktoren C, P, S, L, R und K. Die Buchstaben repräsentieren jeweils die Datenpunkte. Die Größe der Buchstaben gibt die relative Anzahl der Feldstücke je Teilgruppierung an. Die durchgezogene Linie entspricht der gemeinsamen Regressionsgerade aller sechs Faktoren ($r^2 = 0,93$, $n = 88$). Die Färbung dient der besseren Unterscheidung der Faktoren.	36
Abb. 14: Maisfeld mit erosionsschützender Mulchauflage. (Foto: M. Kistler)	38
Abb. 15: Maisfeld ohne erkennbare Mulchbedeckung. (Foto: M. Kistler).....	38

-
- Abb. 16: **a)** $I_{\max 30}$ -Kriterium in Abhängigkeit der zeitlichen Auflösung τ ermittelt aus Ombrometer- (blaue Punkte) und Radardaten (rote Quadrate) zur Bestimmung der Anzahl erosiver Ereignisse wie bei höchster zeitlicher Auflösung. Die schwarzen Linien geben die Gleichungen 6.1 und 6.2 wieder. Das Kriterium der Niederschlagsmenge für erosive Ereignisse bleibt unabhängig der zeitlichen Auflösung bei $> 12,7$ mm, wie von Wischmeier & Smith (1959, 1978) definiert, da die Niederschlagsmenge weitgehend unabhängig von der zeitlichen Auflösung ist. **b)** Zeitliche Skalierungsfaktoren für R_e oder R in Abhängigkeit der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Niederschlagsdaten (blaue Punkte: ‚punktuelle‘ Ombrometerdaten; rote Quadrate: 1×1 km² Radardaten). Die schwarzen Linien zeigen die Gleichungen 7.1 – 7.2b.40
- Abb. 17: Fehler, die zur Unterschätzung der maximalen 30-Minuten-Intensität ($I_{\max 30}$) aufgrund zeitlicher Auflösungen > 1 min führen, am Beispiel von 30 min und 60 min Auflösung. Bei Auflösungen ≤ 30 min ergibt die Unterschätzung von $I_{\max 30}$ allein durch den Intensitätsunterschied der nicht überlappenden Zeitintervalle (kariertes Bereich) und bei Auflösungen > 30 min zusätzlich durch die Abschwächung der Intensität durch den zusätzlichen Zeitabschnitt des Intervalls (gestrichelter Bereich).41
- Abb. 18: Räumlicher Skalierungsfaktor s für R , um von der jeweiligen, räumlichen Auflösung und Messmethode der Niederschlagsdaten auf die punktuelle Ombrometer-Skala zu skalieren. Die Zunahme des Skalierungsfaktors s folgt der Gleichung $s = 1 + 0,35 * \mu + 0,092 * \sigma^{3/4}$, wobei σ die Rasterweite in km ist und μ die Variable für die Methode. Für Ombrometerdaten ist $\mu = 0$ und für 1×1 km² Radardaten ist $\mu = 1$42
- Abb. 19: Vergleich 16-jährig mittlerer Erosivitäten R berechnet aus den RADOLAN-Daten einzelner Rasterpixel und aus punktuellen Niederschlagsmessungen der räumlich entsprechenden Ombrometer (schwarze Punkte in schwarzen Quadraten). Die blauen Punkte zeigen jeweils die Erosivitäten der einzelnen 16 Jahre der ‚Pixel-Punkt-Paare‘. Diese verdeutlichen die starke Variabilität der Erosivität, die von Jahr zu Jahr und von Paar zu Paar auftritt. Die Steigung der durchgezogenen Linie entspricht dem räumlichen Skalierungsfaktor für R basierend auf RADOLAN. Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1-Linie.43
- Abb. 20: Erosivitäten einzelner Ereignisse R_e basierend auf RADOLAN- und Ombrometerdaten für 19.944 Regenereignisse, die sowohl auf punktueller als auch auf 1×1 km²-Skala als erosiv eingestuft wurden. Die Achsen sind logarithmisch skaliert. Die gestrichelte Linie ist die 1:1-Linie.44
- Abb. 21: Erosivitäten einzelner Regenereignisse R_e auf Basis der Pseudo-Radar-Daten und auf Basis der 12 Ombrometer. Dunkelblaue Punkte zeigen die Mittelwerte von R_e der 12 Ombrometer pro Regenereignis, das über dem 1×1 km²-Pixel registriert wurde. Die hellblauen Kreise zeigen R_e der einzelnen Ombrometer jeweils im Vergleich zu R_e des Pseudo-Radar-Pixels.45

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Übersicht der in diesem Projekt verwendeten Radarniederschlagsprodukte des Deutschen Wetterdienstes.....	22
Tab. 2: Überblick der untersuchten Effekte und der dafür verwendeten Niederschlagsdaten.....	29
Tab. 3: Minimum, Mittelwert und Maximum der absoluten und relativen Gradienten (Änderung pro km) der Regenmenge und der Ereigniserosivität R_e aus den geostatistischen Auswertungen aller 170 Ereignistage.....	32
Tab. 4: Berechnete Bodenabträge und visuell klassifizierte Erosionsschäden gemittelt für jeweils 15 verschiedene Kulturgruppen mit 95%-Vertrauensbereich (95% VB) um den Mittelwert. Zu jeder Kulturgruppe wurden n Feldstücke zugeordnet.....	37

Zusammenfassung

Bodenerosion wird häufig durch konvektive Regen verursacht. Diese konvektiven Regen treten lokal begrenzt und mit hoher Variabilität auf. Für bisherige Abschätzungen der Bodenabträge wurden Regenerositäten basierend auf Niederschlagsmessungen von Ombrometern (Regenschreibern) verwendet. Die Regenerosität quantifiziert das Potential eines Regens, Bodenerosion zu verursachen. Ombrometer zeichnen jedoch nur den Niederschlag direkt an der Messstelle auf. Aufgrund der starken Variabilität erosiver Konvektionsregen, besteht eine große Unsicherheit zwischen den gemessenen Intensitäten eines Ombrometers und den tatsächlich erosionswirksamen Intensitäten in der Fläche. Neuerdings liefern Niederschlagsmessungen mit Wetterradaren flächendeckend Intensitäten. Die Kombination aus flächendeckend messenden Radaren und punktuell, quantitativ hochwertig messenden Ombrometern liefert der Deutsche Wetterdienst mit dem Produkt RADOLAN (RADarOnLineANeichung). Dieses Niederschlagsprodukt ist für ganz Deutschland mit einer Auflösung von 1 x 1 km² und 60 min für den Zeitraum von 2001 bis heute verfügbar und wird stündlich ergänzt. RADOLAN bietet somit grundsätzlich die Möglichkeit, zum einen Erosion unmittelbar nach dem Ereignis nachvollziehen und quantifizieren zu können und zum anderen auch langfristig mittlere Bodenabträge abschätzen zu können. RADOLAN-Daten sind zwar flächendeckend, jedoch ist die räumliche und zeitliche Auflösung geringer als die der Ombrometermessungen. Die Güte der Erosionsabschätzung und –prognose mit RADOLAN wurde innerhalb des Projektes geprüft. Dazu wurden drei Kernfragen bearbeitet: 1) Können RADOLAN-Daten grundsätzlich zur Berechnung und Untersuchung von Regenerositäten verwendet werden und sind solche Daten hilfreich oder gar notwendig in der Erosionsforschung? 2) Können ereignisspezifische und langfristig mittlere Bodenabträge zuverlässig mit der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) abgeschätzt werden, unter Verwendung der institutionell verfügbaren Daten und mit RADOLAN berechneten Erosivitäten? 3) Welche Effekte auf die Erosivität haben Niederschlagsdaten, deren räumliche und zeitliche Auflösung geringer ist als die punktuelle und 1 min Auflösung der Ombrometer?

Für die erste Kernfrage wurde ein RADOLAN-Datensatz von zwei Jahren eines 86 x 181 km²-großen Gebietes verwendet. Der Datensatz wurde bezüglich räumlicher und zeitlicher Variabilität der Niederschlagsmengen und der Erosivitäten potentiell erosionswirksamer (erosiver) Niederschlagsereignisse ausgewertet. Die räumliche Variabilität wurde mittels geostatistischer Methoden bestimmt. Die Auswertungen zeigten, dass erosive Niederschlagsereignisse mit ausgeprägten Gradienten der Niederschlagsmengen (3,5% Änderung pro km) und noch deutlicheren Gradienten der Erosivität (13,3% pro km) auftreten. Im Mittel erstrecken sich erosive Regenzellen nur über 74% der gesamten Ausbreitung der Regen. Erosive Regen treten also noch kleinräumiger auf als die Regenereignisse an sich. Das kleinräumige Muster der Erosivitäten zeigte sich auch noch in der räumlichen

Variabilität der zweijährig mittleren Jahressumme der Erosivitäten. Weiterhin wurde festgestellt, dass das tageszeitliche Muster der höchsten Intensitäten erosiver Regen sehr gut mit dem durchschnittlichen Tagesgang allgemeiner Regen übereinstimmt. Höchste Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten maximaler Intensitäten sind am späten Nachmittag (~16 Uhr UTC). Die höchste Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von mindestens sechsstündigen Niederschlagspausen ist in den frühen Morgenstunden. Solche Pausen trennen definitionsgemäß Regenereignisse voneinander und beeinflussen somit das Auftreten und die Dauer erosiver Regen. Das erste Teilprojekt zeigte, dass aufgrund der starken räumlichen Variabilität der Regenerosivität flächendeckende Niederschlagsdaten, wie RADOLAN, in der Erosionsforschung genutzt werden sollten.

Für die zweite Kernfrage wurden Erosionsschäden landwirtschaftlicher Flächen mit Hilfe von Luftbildern manuell klassifiziert und mit den berechneten Bodenabträgen verglichen. Die Zuverlässigkeit der visuellen Schadensklassifizierungen wurde durch die gute Übereinstimmung unabhängig wiederholter Klassifizierungen bestätigt. Auf Basis von insgesamt 8.100 Feldstücken korrelierten die Schadensklassifizierungen signifikant positiv mit den berechneten Bodenabträgen. Je stärker der klassifizierte Erosionsschaden war, desto höher waren die berechneten Abträge. Diese Beziehung konnte jeweils mit allen sechs Faktoren der ABAG nachvollzogen werden. Jedoch bewirkte insbesondere der R-Faktor, die Erosivität, Unstimmigkeiten zwischen den berechneten Abträgen und den visuell klassifizierten Erosionsschäden. Dennoch zeigten die Auswertungen des zweiten Teilprojektes insgesamt, dass die ABAG mit den institutionell verfügbaren Daten und den RADOLAN-Daten die Bodenabträge im Mittel großer Datensätze, also langer Zeitreihen oder großer Untersuchungsgebiete, aussagekräftig abschätzt, jedoch nicht Einzelerosionsereignisse weniger Feldstücke.

Einen Beitrag zur Erklärung der großen Unsicherheit einzelfallspezifischer Erosionsberechnungen lieferte die Bearbeitung der dritten Kernfrage. Dazu wurden mehr als 2 Mio. erosive Regenereignisse ausgewertet. Ursprünglich 1 min aufgelöste Ombrometer- und 5 min aufgelöste Radarniederschlagsdaten wurden zu Zeitreihen geringerer zeitlicher Auflösung aggregiert. Die originalen und aggregierten Zeitreihen wurden hinsichtlich der Erosivität der Ereignisse ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass die maximale 30-Minuten-Intensität ($I_{\max 30}$) mit abnehmender zeitlicher Auflösung der Niederschlagsdaten zunehmend unterschätzt wird. Zum einen muss deshalb das $I_{\max 30}$ -Kriterium zur Definition erosiver Ereignisse in Abhängigkeit der zeitlichen Auflösung der Daten angepasst werden. Zum anderen muss die Erosivität mit einem Faktor in Abhängigkeit der zeitlichen Auflösung skaliert werden um die Unterschätzung gegenüber der Erosivität basierend auf 1 min Daten zu kompensieren. Diese Faktoren sind abhängig von der räumlichen Auflösung der Daten. Des Weiteren wurden Erosivitäten einzelner Ereignisse und 16-jährig mittlere Erosivitäten aus ‚punktuellen‘ Ombrometerdaten mit den Erosivitäten aus zeitlich entspre-

chenden Radarniederschlagsdaten räumlich zugeordneter 1 x 1 km² Radarrasterpixel verglichen. Die Auswertungen zeigten, dass punktuell ermittelte Erosivitäten teils stark von den flächenbezogenen Erosivitäten aus 1 x 1 km² gemittelten Intensitäten abweichen. Dieses Erkenntnis trägt dazu bei, die Unstimmigkeiten visuell klassifizierter Erosionsschäden und berechneter Bodenabträge zu erklären. Für langfristige Abschätzungen der Abträge ist jedoch von Bedeutung, dass Erosivitäten mit abnehmender räumlicher Auflösung zunehmend unterschätzt werden im Vergleich zu Erosivitäten aus Ombrometerdaten. Die Unterschätzung der Erosivität mit 1 x 1 km² RADOLAN-Daten wird dabei nicht nur durch die geringere räumliche Auflösung verursacht, sondern auch bedeutend durch die Unterschiede der Messmethoden Radar und Ombrometer. Insgesamt bedingen die Erkenntnisse zu den Effekten der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Niederschlagsdaten, dass bei der Ermittlung von Erosivitäten mit 1 x 1 km², 60 min RADOLAN-Daten Folgendes berücksichtigt wird:

- Das $I_{\max 30}$ -Kriterium muss von 12,7 mm h⁻¹ auf 5,79 mm h⁻¹ herabgesetzt werden.
- Die berechneten Erosivitäten müssen mit 1,9 zur zeitlichen Skalierung und mit 1,48 zur räumlichen Skalierung inklusive Methodeneffekt multipliziert werden.

Insgesamt liefern die Ergebnisse des Projektes einen wichtigen Beitrag zur Erosionsforschung und damit auch für Strategien zur Erosionsminderung in der Landwirtschaft und deren Evaluierung, auch mit Blick auf den Gewässerschutz. Es wurde gezeigt, dass Erosivitäten, und damit auch Bodenabträge, großer Datensätze mit RADOLAN-Daten zuverlässig abgeschätzt werden können. Dafür müssen die empfohlenen Berechnungsvorschriften berücksichtigt werden. Für Einzelereignisse muss dennoch die hohe Variabilität der Erosivität innerhalb eines Rasterpixels der Radardaten berücksichtigt werden.

Abschließend war es möglich, die Karte der Erosivitäten für ganz Deutschland zu aktualisieren. Dies geschah auf Basis eines 17-jährigen RADKLIM-Datensatzes, der auf den RADOLAN-Daten aufbaut und sie weiter verbessert. Weiterhin konnten Analysen des Jahresgangs der Erosivität und der Änderungen der Erosivitäten seit den 1970er Jahren durchgeführt werden. Da der 17-jährige RADKLIM-Datensatz erst im Laufe des Jahres 2018 verfügbar wurde und diese Arbeiten nach Ende der eigentlichen Projektlaufzeit im Rahmen der Fortführung der Dissertation Fischer (2018) an der TU München erfolgten, werden die Auswertungen und Ergebnisse dazu in „Radargestützte Erosionsprognose, Teil II Veränderungen der Regenerosivität seit 1970.“ (Ebertseder et al., 2019b) aufgeführt.

1 Einleitung

Ausgelöst durch erosive Regen können von ackerbaulich genutzten Flächen jährlich mehrere Tonnen Boden je Hektar abgetragen werden. Für Bayern lag das Mittel auf Basis der Ackerflächennutzung von 2008 bei $3,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Für einzelne Landkreise war der mittlere jährliche Bodenabtrag jedoch weit höher ($6 - 8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (Brandhuber & Treisch, 2012; Treisch & Brandhuber, 2012). Die Erosion des Bodens verursacht dabei starke Schäden sowohl auf den erodierten Flächen (,onsite‘) als auch abseits dieser (,offsite‘) (Auerswald, 1991). ,Onsite‘ kann Erosion zu kurzfristigen Schäden unter anderem durch Freilegung oder Vertiefung von Saaten oder Entwurzelung von Pflanzen führen. Langfristig können beispielsweise die Bodenfunktionen gefährdet werden, da der Abtrag von Oberboden Bodenstrukturen zerstört. Dies kann wiederum die Wasserhaltekapazität und Nährstoffverfügbarkeit des Bodens mindern. Dies kann auch langfristig die Ertragsfähigkeit des Bodens (Bakker et al., 2007) und somit auch den Wert des Bodens (z.B. Mal et al., 2015) verringern. Häufig landet der erodierte, nährstoffreiche Boden in aquatischen Ökosystemen. Dort kann das Gleichgewicht des Ökosystems massiv und irreversibel gestört werden. Der Eintrag von Sediment kann die Fließdynamik und somit die Habitateigenschaften des Gewässers ändern. Ablagerungen der Sedimente erfordern ein regelmäßiges Ausbaggern von Flüssen und Stauseen, um den Hochwasserschutz und die Energiegewinnung sicherzustellen. Der Eintrag von Feinsedimenten geht auch unmittelbar mit dem Eintrag von Nährstoffen und Schadstoffen einher und damit mit deutlichen Folgen für das Ökosystem (Stewart et al., 1975). Vor allem Stickstoff und Phosphor können zur Eutrophierung und damit zum Kollaps von Ökosystemen führen (Carpenter et al., 1998).

Enorme Onsite und Offsite Schäden wurden in Bayern beispielsweise 2016 durch einige starke Erosionsereignisse verursacht. Auslöser dafür war eine langanhaltende Großwetterlage, die in Mitteleuropa einige heftige Starkregen verursachte. Die Ereignisse wurden für Bayern unter anderem auch unter Einbindung dieses Projektes dokumentiert (Brandhuber et al., 2017).

Um Erosion und die damit einhergehenden Onsite und Offsite Schäden zu vermindern, wurden Modelle entwickelt, um das Erosionspotential einer Fläche zu ermitteln. Eines der bekanntesten und meist angewandten Modelle ist die „Universal Soil Loss Equation“ von Wischmeier und Smith (1978), welche für die USA entwickelt und von Schwertmann et al. (1990) zur Anwendung in Bayern/ Deutschland angepasst wurde und als „Allgemeine Bodenabtragungsgleichung“ (ABAG) bekannt ist. Mit diesem Modell lässt sich der langjährig mittlere Bodenabtrag durch Flächen- und Rillenerosion abschätzen. Der Bodenabtrag wird mit dem Produkt aus sechs Faktoren abgeschätzt. Diese Faktoren berücksichtigen die langjährig mittlere Regenerosivität am Standort (R-Faktor), die Standorteigenschaften des Feldstückes, d.h. Erodierbarkeit des Bodens (K-Faktor), Hangneigung (S-Faktor) und

Hanglänge (L-Faktor), die Fruchtfolge und Anbauweise (C-Faktor) und dauerhafte Erosionsschutzmaßnahmen (P-Faktor). Die Regenerosivität beschreibt das Potential eines Regens, Bodenpartikel zu lösen und abzutragen. Die R-Faktoren für Bayern basieren bisher auf Auswertungen mehrjähriger (10 – 12 Jahre) Niederschlagsmessreihen überwiegend aus den 1960er / 70er Jahren von insgesamt 17 meteorologischen Messstationen (Rogler & Schwertmann, 1981; Abb. 1). Zum Zeitpunkt der Entwicklung der ABAG bedeutete die Auswertung der Niederschlagsmessungen bezüglich der Regenerosivität einen erheblichen Aufwand, weshalb sich auf die genannte Datenauswahl beschränkt wurde. Auf Basis der punktuell ermittelten R-Faktoren konnten mittels Korrelation mit langjährig mittleren Sommerniederschlagsmengen flächendeckende R-Faktoren für ganz Bayern geschätzt werden. Die so ermittelten R-Faktoren werden bis heute in der ABAG verwendet. Die geringe Anzahl der Messstationen und die sehr begrenzte Länge der Messreihen sind insofern kritisch zu bewerten, da erosive Regen zumeist kleinräumig und mit hoher räumlicher Variabilität der Regenintensität und hoher zeitlicher Variabilität auftreten (Fiener & Auerwald, 2009; Rogler & Schwertmann, 1981). Jahre mit überdurchschnittlich hoher Erosivität treten selten auf, prägen aber die mittlere Erosivität und damit den mittleren Bodenabtrag deutlich. Um einen robusten Mittelwert zu erhalten, werden deshalb meist Messreihen von mehr als 20 Jahren für die Ermittlung von R-Faktoren mit Stationsdaten empfohlen (Chow, 1953; Wischmeier, 1959). Hinzu kommt, dass auf Grund des bereits ablaufenden Klimawandels besonders zu erwarten ist, dass Zahl und Ausmaß von Starkregen zugenommen haben (Burt et al. 2016; Fiener et al. 2013) und damit die Karte von Rogler & Schwertmann (1981) veraltet ist.

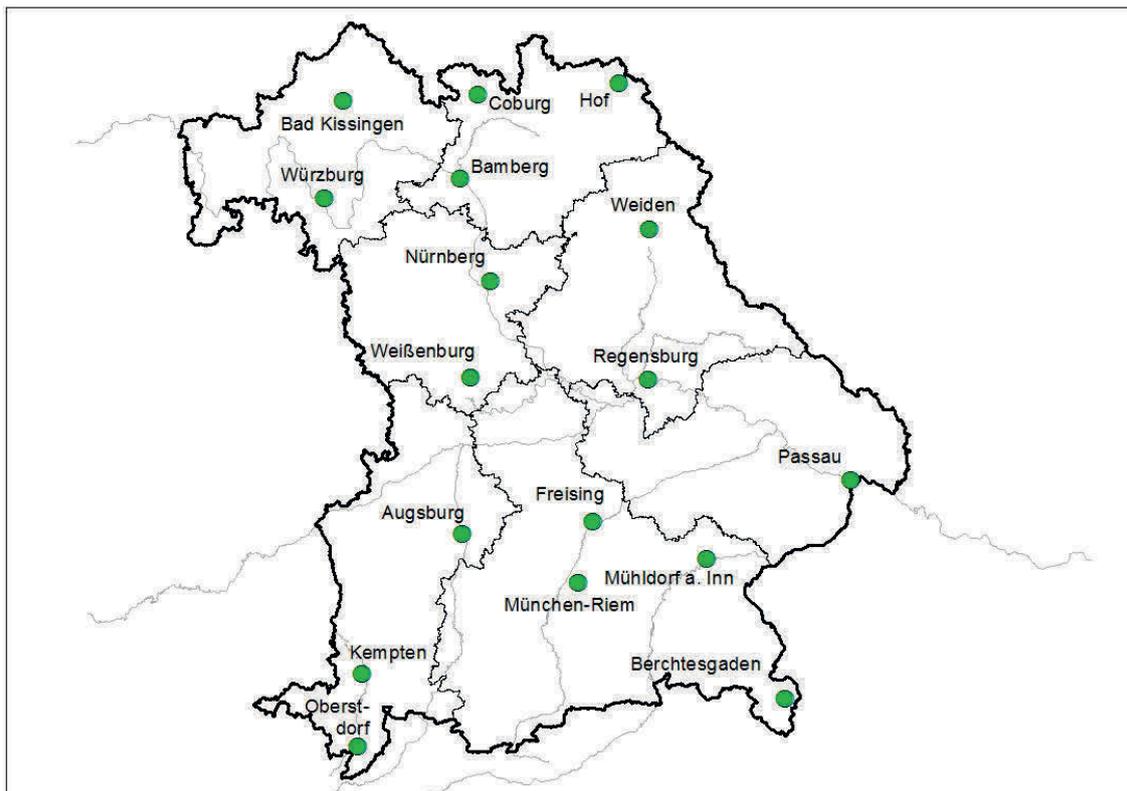


Abb. 1: Standorte der 17 Regenschreiber, deren Niederschlagsmessungen zur Berechnung der R-Faktoren für Bayern von Rogler & Schwertmann (1981) verwendet wurden.

Eine neue, vielversprechende Möglichkeit R-Faktoren robust und zuverlässig abzuschätzen, könnten nun 16-jährige Messreihen von flächendeckend ermittelten Niederschlägen mittels Wetterradar bieten. Die mit insgesamt 17 Radarstationen in Deutschland gemessenen Niederschläge liegen mit einer Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ und 5 min vor und werden stündlich an Bodenniederschlagsmessungen von über 1000 Stationen angeeicht und vom Deutschen Wetterdienst (DWD) für real-time-Prognosen z.B. in der Wasserwirtschaft zur Verfügung gestellt (RADOLAN – RADARonLine-ANEichung, Bartels et al., 2004; Winterrath et al., 2017). Regelmäßig werden die RADOLAN-Daten unter Zuhilfenahme weiterer Messstationen des Bodenniederschlags (insgesamt etwa 4400) und aufwändiger Reanalysemethoden weiter verbessert und in einen klimatologischen Datensatz (RADKLIM) überführt. RADKLIM-Daten stehen seit kurzem ab 2001 mit einer Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ und 60 min flächendeckend für Deutschland zur Verfügung. Beide Datensätze bieten erstmalig die Möglichkeit Regenerosivität räumlich hoch aufgelöst zu untersuchen. RADOLAN-Daten kommen insbesondere für aktuelle Prognosen oder den Vergleich mit aktuellen Schäden in Frage, während die RADKLIM-Daten dafür geeignet sind die Karte der R-Faktoren für Bayern/ Deutschland zu aktualisieren. Ziel ist es damit, die langjährig mittleren Bodenabträge robuster abschätzen zu können. Die dafür notwendigen Teilziele können Kapitel 2 des Projektberichtes entnommen werden. Kapitel 3 gibt einen Überblick

zum ABAG-Modell und den dafür zur Verfügung stehenden Daten und Informationen zu RADOLAN-Daten und deren Vor- und Nachteile für die Verwendung von Erosivitätsberechnungen. In Kapitel 4 werden die Methoden und Daten beschrieben, die für die Teilziele des Projektes verwendet wurden und Kapitel 5 erläutert die Ergebnisse, die wiederum in Kapitel 6 gemeinsam diskutiert werden. Kapitel 7 schließt mit Schlussfolgerungen und einem Ausblick ab. Die nach Abschluss des Projektes vom DWD fertig gestellte und inzwischen 17-jährige (2001-2017) Messreihe des RADKLIM-Datensatz konnte abschließend dazu verwendet werden, den Jahresgang der Regenerosivität und die Karte der Regenerosivität zu aktualisieren. Die Auswertungen und Ergebnisse dazu können „Radargestützte Erosionsprognose, Teil II Veränderungen der Regenerosivität seit 1970.“ (Ebertseder et al., 2019) entnommen werden.

2 Projektziele

Für das Ziel, RADOLAN-Daten zur Berechnung der langjährig mittleren Bodenabträge zu verwenden, wurde das Projekt in drei Teilprojekte aufgeteilt.

Im ersten Teilprojekt wurden die räumlichen und zeitlichen Eigenschaften erosiver Regen, also potentiell erosionswirksamer Regen, untersucht. Die Analyse räumlicher Muster der Erosivität einzelner Regenereignisse war bisher mit punktuellen Stationsdaten nur eingeschränkt möglich, konnte aber nun auf Basis der Radarniederschlagsdaten umfangreich durchgeführt werden. Dazu wurden alle erosiven Ereignisse innerhalb eines Gebiets von ~ 15.000 km² in zwei Jahren (2011 und 2012) mit RADOLAN-Daten ausgewertet.

Im zweiten Teilprojekt wurde die Gültigkeit der ABAG unter Verwendung der Daten, die der LfL zur Verfügung stehen, geprüft. Zugleich wurde überprüft, ob die RADOLAN-Datengeeignet sind, die Bodenabträge einzelner Ereignisse abzuschätzen. Dazu wurden einerseits Luftbilddokumentationen und Interpretationen von Erosionsschäden unter anderem aus dem Projekt „Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen“ von Kistler et al. (2013) verwendet und andererseits Bodenabträge einzelner erosiver Regenereignisse in den Jahren 2011 und 2012 mittels ABAG berechnet. Die Erosivitäten der einzelnen Ereignisse wurden mit RADOLAN-Daten bestimmt.

Im dritten Teilprojekt wurden die Effekte auf die Regenerosivität ermittelt, die sich durch die Verwendung von Radarniederschlagsdaten mit einer Auflösung von 1 x 1 km² und 60 min gegenüber der Verwendung von Stationsdaten aus punktuellen (~ 200 cm²), 1 min Messungen ergeben. Dies war notwendig, da die Erosivitäten durch die geringere räumliche und zeitliche Auflösung der Radardaten gegenüber den Ombrometerdaten unterschätzt werden. Für die Korrektur der Unterschätzung der Erosivität wurden notwendige Skalierungsfaktoren ermittelt. Diese berücksichtigen auch Effekte durch die unterschiedlichen Messmethoden Ombrometer und Radar.

Die Ergebnisse aller drei Teilprojekte wurden in folgenden Artikeln in Fachzeitschriften veröffentlicht:

- 1) Fischer, F., Hauck, J., Brandhuber, R., Weigl, E., Maier, H., Auerswald, K., 2016. Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 72-80. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.03.024.
- 2) Fischer, F., Kistler, M., Brandhuber, R., Maier, H., Treisch, M., Auerswald, K., 2018. Validation of official erosion modelling based on high-resolution radar rain data by aerial photo erosion classification. *Earth Surface Processes and Landforms* 43, 187-194. DOI: 10.1002/esp.4216.
- 3) 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>.

Die Ergebnisse innerhalb des Projektberichtes sind eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Artikel. Demnach können weitere und detaillierte Informationen den Fachartikeln entnommen werden.

Ein weiterer Artikel, der auf Basis dieses Projektes entstand, auf den aber innerhalb des Abschlussberichtes weniger eingegangen wird, ist:

Auerswald, K., Fischer, F.K., Kistler, M., Treisch, M., Maier, H., Brandhuber, R., 2018. Behavior of farmers in regard to erosion by water as reflected by their farming practices. *Science of the Total Environment* 613-614, 1-9. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.003.

Ein fünfter Artikel entstand erst nach Abschluss des Projektes:

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. DOI: 10.5194/hess-23-1819-2019.

Der Artikel von Auerswald et al. (2019) hat grundsätzliche Bedeutung für die zukünftige Erosionsprognose in Bayern, da darin eine aktualisierte Karte der Regenerosivität enthalten ist. Deswegen werden die wesentlichen Ergebnisse daraus in einem weiteren Band der LfL-Schriftenreihe dargestellt (Ebertseder et al., 2019).

3 Grundlagen

3.1 Allgemeine Bodenabtragsgleichung

Die ABAG (Schwertmann et al., 1990) ist die deutsche Anpassung der USLE (Wischmeier & Smith, 1978), mit der sich der langjährig mittlere Bodenabtrag A in $\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ aus dem Produkt von sechs Faktoren berechnen lässt:

$$A = R \times K \times S \times L \times C \times P. \quad (1)$$

Die sechs Faktoren berücksichtigt den Einfluss der Regenerosivität (R in $\text{N h}^{-1} \text{a}^{-1}$), Bodeneigenschaften (K in $\text{t h N}^{-1} \text{ha}^{-1}$), Hangneigung (S), erosiven Hanglänge (L), Bewirtschaftung (C) und permanenten Erosionsschutzmaßnahmen (P).

In der Standardanwendung quantifiziert der R-Faktor die im langjährigen Mittel zu erwartende Erosionskraft aller erosiven Regen eines Jahres. Der K-Faktor gibt die Erosionsanfälligkeit eines Bodens als jährlichen Abtrag des Bodens pro Einheit des R-Faktors unter Standardbedingungen an. Diese Standardbedingungen sind definiert durch eine Standardparzelle mit $22,1 \text{ m} \times 1,87 \text{ m}$ Fläche, 9% Neigung und dauerhafter Schwarzbrache. Die Faktoren L , S , C und P sind dimensionslos und für die Standardparzelle gleich 1 definiert. Der L-Faktor gibt den Bodenabtrag eines Hanges beliebiger Länge relativ zum Abtrag eines Hanges mit Standardlänge ($22,1 \text{ m}$) unter sonst gleichen Bedingungen an. Die Faktoren S , C und P sind nach analogem Prinzip definiert.

3.2 Daten- und Berechnungsgrundlage

Das Verfahren zur Berechnung der R-Faktoren von Wischmeier & Smith wurde von Schwertmann et al. (1990) mit leichten Modifikationen für Bayern übernommen. Die Erosivität eines einzelnen Ereignisses (R_e) ergibt sich demnach aus dem Produkt der maximalen 30-min Intensität ($I_{\max 30}$) und der kinetischen Energie (E_{kin}) des Regens:

$$R_e = E_{\text{kin}} \times I_{\max 30}. \quad (2)$$

Die kinetische Energie eines Regens ergibt sich aus der Summe der kinetischen Energie einzelner Intervalle i gleicher Niederschlagsintensität I in Abhängigkeit von I_i (Gl. 3.1-3.3). Die Niederschlagsmenge N der einzelnen Intervalle wird als Faktor N_i berücksichtigt.

$$E_i = (11,89 + 8,73 * \log_{10} I_i) * N_i * 10^{-3} \quad \text{für } 0,05 < I_i < 76,2 \text{ mm h}^{-1} \quad (3.1)$$

$$E_i = 0 \quad \text{für } I_i < 0,05 \text{ mm h}^{-1} \quad (3.2)$$

$$E_i = 28,33 * N_i * 10^{-3} \quad \text{für } I_i > 76,2 \text{ mm h}^{-1} \quad (3.3)$$

Niederschlagsereignisse grenzen sich voneinander durch mindestens sechsstündige Niederschlagspausen ab. Nach Wischmeier & Smith (1978) werden Ereignisse als erosiv eingestuft, wenn $I_{\max 30}$ größer als $12,7 \text{ mm h}^{-1}$ ist oder die Gesamtniederschlagsmenge min-

destens 12.7 mm beträgt. Diese Grenzwerte wurden nach Schwertmann et al. (1990) auf 10 mm h⁻¹ bzw. 10 mm festgelegt. In den Teilprojekten 1 und 2 werden die Grenzwerte nach Schwertmann et al. (1990) verwendet, im Teilprojekt 3 die international anerkannten Grenzwerte von Wischmeier & Smith (1978).

Die langjährig mittlere Jahreserosivität R berechnet sich aus der Mittelung der jährlichen Summen der Erosivität R_e aller erosiven Ereignisse n eines Jahres für m Jahre:

$$R = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n R_{e,i} \right)_j / m . \quad (4)$$

Innerhalb des Projektes wurden alle R-Faktoren auf Basis von RADOLAN-Daten oder aktuellen Ombrometerdaten berechnet. Welche Niederschlagsdaten in den jeweiligen Teilprojekten verwendet wurden, kann Kapitel 4 entnommen werden.

Resultierend aus einer Vielzahl von Auswertungen wurden Verfahren entwickelt, um die Faktoren K , S und L für Bayern feldstück-spezifisch einfach aber robust ermitteln zu können (u.a. Kagerer & Auerswald, 1997). Die K -Faktoren beruhen auf Bodendaten von Kartierungen zur Bodenschätzung in den 1930er bis 1960er Jahren. Diese kleinräumig (50 m) erhobenen Bodendaten liegen digital mit einer Auflösung von 5 x 5 m² vor und können mit validierten Modellen (Auerswald, 1986; Auerswald & Elhaus, 2013; Auerswald et al., 2014; Auerswald et al., 2016a; Auerswald et al., 2016b) gemäß DIN 19708 (DIN, 2005) zur Berechnung der K -Faktoren verwendet werden. Die S -Faktoren basieren auf einem digitalen Höhenmodell mit einer räumlichen, lateralen Auflösung von 5 x 5 m² und werden nach dem ursprünglichen Verfahren nach Wischmeier & Smith (1978) ermittelt. Die L -Faktoren basieren ebenso auf dem digitalen Höhenmodell. Gemäß DIN 19708 berücksichtigt der L -Faktor nicht nur die Hanglänge eines einzelnen Feldstückes, sondern auch die Hangformen, die wiederum einen Einfluss auf die Erosionsanfälligkeit des Feldes haben (Wischmeier, 1974; Flacke et al., 1990). Die Erosionsgefahr von Hängen, die am Oberhang konkav und am Unterhang konvex geformt sind, ist beispielsweise höher als von umgekehrt geformten Hängen. Für die Ermittlung der L -Faktoren steht ein Werkzeug für ArcGIS (Geoinformationssystem-Software) zur Verfügung, das die genannten Zusammenhänge berücksichtigt (uismedia).

Die C -Faktoren für typische Fruchtfolgen von Bayern können dem Standardwerk von Schwertmann et al. (1990) entnommen werden, C -Faktoren für Sonderkulturen aus weiterer Literatur, wie beispielsweise Auerswald & Kainz (1998). Grundsätzlich ergibt sich der C -Faktor aus dem Jahresgang des Relativen Bodenabtrags (RBA) und dem Jahresgang der relativen Jahreserosivitätsanteile. Der RBA berücksichtigt die sich im Jahresverlauf ändernde Bodenbedeckung durch lebende Pflanzen und tote Biomasse (Mulch) und die unterschiedliche Erosionsanfälligkeit des Bodens in Abhängigkeit der Bewirtschaftungsart (z.B. mit Pflugfurche, konservierend,...). Hohe C -Faktoren ergeben sich für Kulturen, deren Entwicklung in Perioden mit hohen relativen Jahreserosivitätsanteilen gering ist. Dies

ist beispielweise für Mais der Fall. In den Monaten Mai und Juni tritt in Bayern knapp 40% der Jahreserosivität auf und in dieser Zeit ist die Bodenbedeckung durch die Kultur aufgrund der langsamen Entwicklung der Pflanzen sehr gering (Abb. 2). Deutlich geringere C-Faktoren für Mais ergeben sich bei konservierender Bodenbearbeitung statt konventioneller Bodenbearbeitung mit regelmäßigem Pflugeinsatz. Bei konservierender Bewirtschaftung ist der Boden durch tote Biomasse vor dem Aufprall der Regentropfen geschützt. Zudem sind die Bodenaggregate durch das Unterlassen bzw. die Reduzierung der Bodenbearbeitung stabiler.

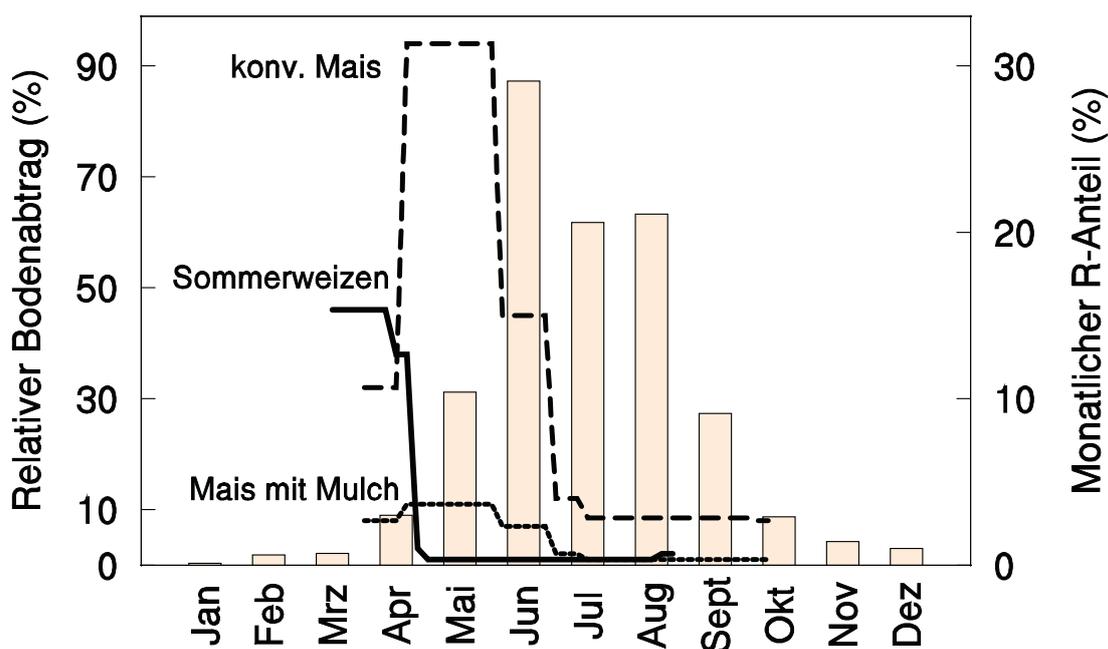


Abb. 2: Langjährig mittlere monatliche R-Faktoren-Anteile (Balken) nach Schwertmann et al. (1990) und die Entwicklung des Relativen Bodenabtrags (%) in den Kulturen Sommerweizen (durchgezogene Linie) und konventionell angebautem Mais mit Pflugeinsatz (lang gestrichelte Linie) und Mais mit Mulchsaat (kurz gestrichelte Linie) im Zeitraum von der Bodenbearbeitung für die Saatbettbereitung bis zur Ernte.

Die P-Faktoren werden nach der Methode der RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1990) auch für Bayern hergeleitet (Auerswald, 1992) und sind an die hiesigen klimatischen Bedingungen angepasst. Eine Regionalisierung war nicht erforderlich. Der P-Faktor ergibt sich maßgeblich aus der Bewirtschaftungsrichtung und der Hangneigung. Eine Bodenbearbeitung quer zum Hang kann am stärksten bei Hangneigungen von 5 - 10% erosionsmindernd wirken. Dabei sind aber auch die Höhen der Kämme, die durch die Bodenbearbeitung entstehen, entscheidend für die Effektivität der Minderung. Die Effektivität ist hoch bei gepflügten Feldern, da durch das Pflügen Kämme von 7,5 - 12,5 cm Höhe entstehen, die die Wasserspeicherung erhöhen und den Abfluss mindern. Bei fein bereiteten Saatbetten sind die Kämme < 2,5 cm. Diese haben keine erosi-

onsmindernde Wirkung. Demnach unterscheiden sich auch Kulturen in der erosionsmindernden Effektivität der Querbearbeitung. Kulturen, die in Dämmen angebaut werden, wie Kartoffeln, erreichen die niedrigsten P-Faktoren, da die Höhenunterschieden zwischen Damm und Mulde groß ($> 12,5$ cm) sind. Diese Dämme können den Abfluss deutlich bremsen. Im Gegensatz dazu erreichen Getreidekulturen nur Dämme von 2,5 cm, die kaum effektiv mindern. Die beschriebenen Erosionsminderungen durch Querbewirtschaftung sind jedoch nur gültig, solange eine kritische Hanglänge nicht überschritten ist. Ist die Hanglänge überschritten, wirkt die Querbewirtschaftung nicht mehr erosionsmindernd. Diese kritische Hanglänge ist wiederum von der Hangneigung abhängig. Mit zunehmender Hangneigung verkürzt sich die kritische Hanglänge. Innerhalb des Erosionsatlas wurde bei Querbewirtschaftung für P ein Faktor von 0,85 angenommen (Kagerer & Auerswald, 1997; Treisch & Brandhuber, 2012). Die unterschiedlichen Effekte der jeweiligen Kulturen werden indirekt über den C-Faktor berücksichtigt.

3.3 RADOLAN zur Berechnung der R-Faktoren

Das Niederschlagsprodukt RADOLAN (RADarOnLineAneichung) des Deutschen Wetterdienstes ist ein Komposit aus Niederschlagsmessungen von insgesamt 17 Wetterradaren (Abb. 3) und knapp 2.000 Ombrometern (Regenschreibern) (Bartels et al., 2004). Die von den Wetterradaren alle 5 min ausgesendeten Radarstrahlen werden von Regentropfen reflektiert (vgl. Abb. 4). Die Niederschlagshöhe kann durch charakteristische Beziehungen mit der Radarreflektivität, also der Rückstrahlung, ermittelt werden. Die räumliche Auflösung des Produktes ist 1° Azimut und 125 m bis 250 m in Richtung des Radarstrahles. Die Daten werden dann zu einem deutschlandweiten Mosaik mit 1100 km Nord-Süd-Ausdehnung und 900 km Ost-West-Ausdehnung und einer Auflösung von 1×1 km² zusammengesetzt. Da jegliche Objekte, wie beispielsweise Flugzeuge, hohe Gebäude oder orographische Erhöhungen, die Radarstrahlung reflektieren, entstehen zum einen Dämpfungseffekte in einzelnen Sektoren, sogenannte Speichen, und zum anderen Fehlmessungen in einzelnen Pixeln des Kompositgitters, sogenannte Clutter. Diese Fehler können mit routinierten Algorithmen teilweise behoben werden. Das korrigierte Radarniederschlagsprodukt wird als RY Produkt bezeichnet und hat eine Auflösung von 5 min und 1×1 km². Jedoch gibt es weitere Unsicherheiten der radarbasierten Niederschlagsmessung. Beispielsweise können Fehler durch die mit zunehmender Entfernung zum Radar ansteigende Höhe des Radarstrahls oder durch die Abschattung von Niederschlagszellen durch größere Zellen entstehen. Dadurch können Niederschläge verfehlt oder falsch gemessen werden. Um diese Fehler zu korrigieren werden die Radarniederschlagsmessungen an Bodenniederschlagsmessungen angeeicht. Die Aneichung erfolgt bei einer zeitlichen Auflösung von 60 min. Für das in Echtzeit zur Verfügung stehende Produkt RADOLAN werden mittlerweile ca. 1.200 Ombrometer zur Aneichung verwendet. Dieses Niederschlagsprodukt, auch

als ‚RW‘ bezeichnet, steht mit einer Auflösung von 60 min und 1 x 1 km² seit 2005 zur Verfügung. Zusätzlich wird jährlich der gesamte Radardatensatz (ab 2001) mit erweiterten und verbesserten Algorithmen und mit der Hinzunahme von weiteren, mehr als 1.000 Ombrometern zur Aneichung neu überarbeitet (Winterrath et al., 2017). Der überarbeitete Datensatz, ebenfalls mit einer Auflösung von 1 x 1 km² und 60 min, wird im Folgenden als RADKLIM bezeichnet. Alle drei Produkte, RY, RW und RADKLIM wurden innerhalb des Projektes verwendet (Tab. 1). Ein weiteres Produkt, das hinzukommen wird, ist die Kombination aus RY-Produkt und RW-Produkt. Diese sogenannten YW-Daten entstehen durch rekursive Aneichung der RY-Daten mit den RW-Daten. Während der Projektlaufzeit waren diese Daten noch nicht offiziell verfügbar, wurden aber für einen Teildatensatz eigens erzeugt.

Tab. 1: Übersicht der in diesem Projekt verwendeten Radarniederschlagsprodukte des Deutschen Wetterdienstes.

Produkt- bezeichnung	Auflösung		Aneichung an Ombrometer
	zeitlich	räumlich	
RY	5 min	1 x 1 km ²	Nein
RW	60 min	1 x 1 km ²	Ja
RADKLIM	60 min	1 x 1 km ²	Ja
YW	5 min	1 x 1 km ²	Ja, indirekt

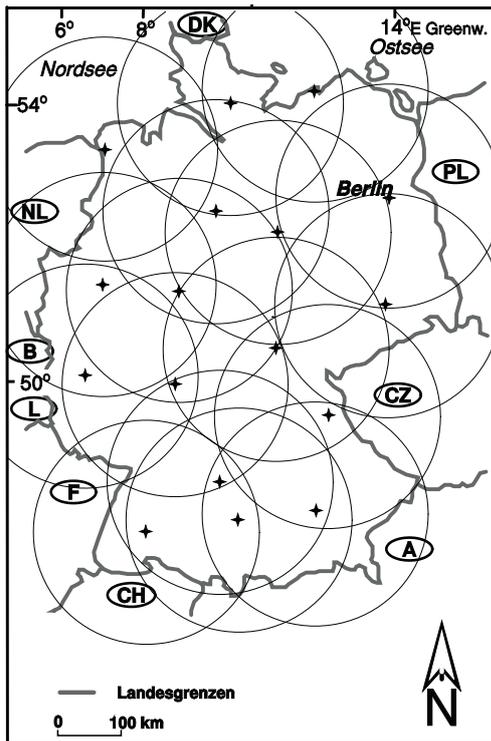


Abb. 3: Standorte der 17 Wetterradare des Deutschen Wetterdienstes (Kreuze) in Deutschland mit den 150 km Radien (Kreise) der maximalen Erfassungsbereiche zur Niederschlagsmessung; ausgewertet wird nur ein Radius von 128 km.

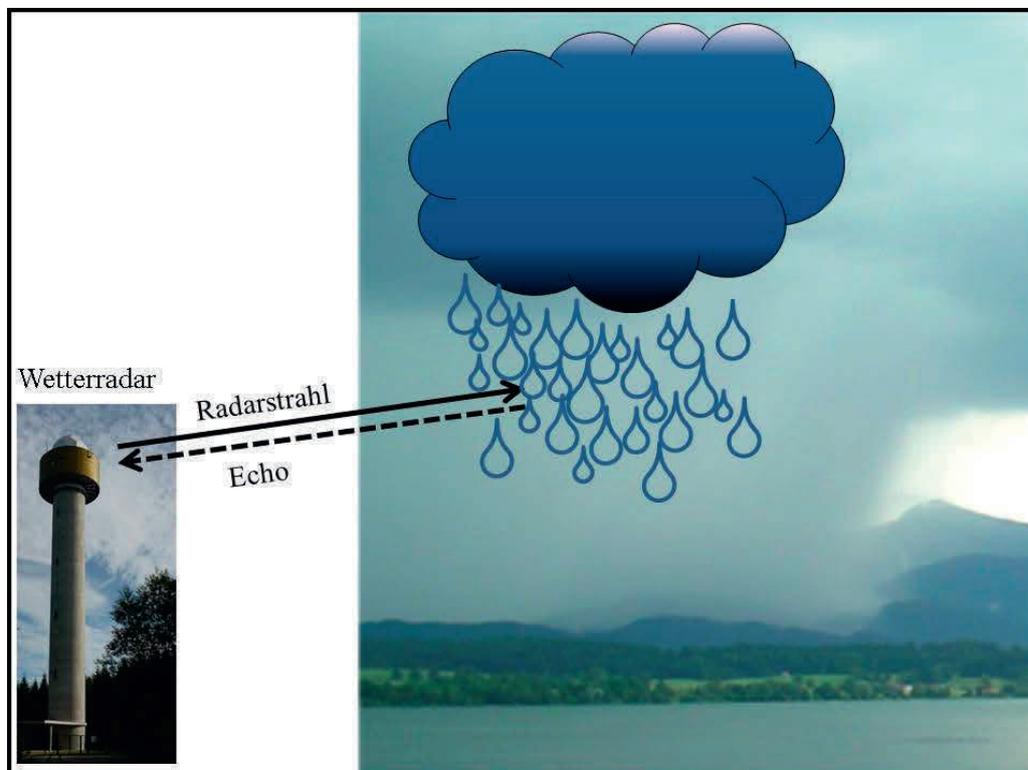


Abb. 4: Prinzip der Niederschlagsmessung mittels Wetterradar. Das Wetterradar sendet Radarimpulse aus und empfängt die reflektierte Radarstrahlung. Mit charakte-

ristischen Reflektivität-Regenintensität-Beziehungen kann die Regenintensität ermittelt werden.

Die flächendeckenden Niederschlagsdaten von RADOLAN bieten den Vorteil, dass Raum-Zeit-Muster der Regenerosivität umfangreich auch von einzelnen Ereignissen untersucht werden können. Dies war bisher auf Basis von Stationsmessungen aufgrund kleiner Datensätze nicht umfangreich möglich. Es gibt nur wenige geeignete Datensätze, da der langfristige Betrieb von mehreren dichten Messnetzen mit wenigen 100 m Abstand der Ombrometer aufwendig ist. Die routinemäßig betriebenen Ombrometerstationen stehen relativ weit voneinander entfernt und liefern nur punktuelle Informationen der Ereignisse. So können mit Messungen benachbarter Stationen auch häufig starke Erosionsschäden nicht vollständig nachvollzogen werden, da der gemessene Niederschlag vom tatsächlichen Niederschlag auf dem Feldstück abweicht. Dieses Problem tritt vor allem bei stark erosiven Gewitterregen auf, deren Zellen kleinräumig sind und mit starken Niederschlagsgradienten auftreten (Fiener & Auerswald, 2009). Mit RADOLAN-Daten können unmittelbar und flächendeckend Gebiete mit Starkregenereignissen identifiziert und mögliche Erosionsereignisse analysiert und dokumentiert werden. Jedoch liefern Radarniederschlagsmessungen über $\sim 1 \text{ km}^2$ gemittelte Intensitäten. Damit gehen räumliche Gradienten von Starkregen, die bereits innerhalb von 1 km^2 auftreten, verloren. Daraus ergibt sich, dass auch die tatsächlich aufgetretenen maximalen Intensitäten innerhalb eines $1 \times 1 \text{ km}^2$ Pixels nicht wiedergegeben werden können. Von einem Ombrometer könnten sie jedoch erfasst werden, je nach Position des Regenmessers innerhalb des räumlichen Musters der Regenzelle. Deshalb können Regenintensitäten, und demnach auch die Erosivitäten R_e , eines RADOLAN-Pixels und eines darin befindlichen Ombrometers deutlich voneinander abweichen. Diese Abweichungen von R_e werden hier als ‚Positionseffekt‘ bezeichnet. Die Abweichungen der Intensitäten sind bei kurzen Zeitintervallen, beispielsweise 5-min oder 60-min Messungen, stärker als bei langen Zeitintervallen, wie beispielsweise Tagesniederschlägen. Dies hat zur Folge, dass sich insbesondere auch $I_{\max 30}$, ermittelt aus RADOLAN-Daten eines Pixels, und $I_{\max 30}$, ermittelt aus der Messung eines Ombrometers innerhalb des Pixels, stark unterscheiden können. Die Abweichungen von R_e sind deutlich größer als die der Niederschlagsintensitäten an sich, da bei der Berechnung von R_e die Regenintensität doppelt berücksichtigt wird, einmal in $I_{\max 30}$ und einmal in E_{kin} . Abb. 5 zeigt beispielhaft die Niederschlagsverteilung eines Ereignisses innerhalb eines 1 km^2 -großen Pixels. Je nach Position der Ombrometerstation und je nach Niederschlagsmuster innerhalb des Pixels misst die Station Niederschlagsintensitäten, die höher, niedriger oder gleich der gemittelten Niederschlagsintensität des Pixels ist.

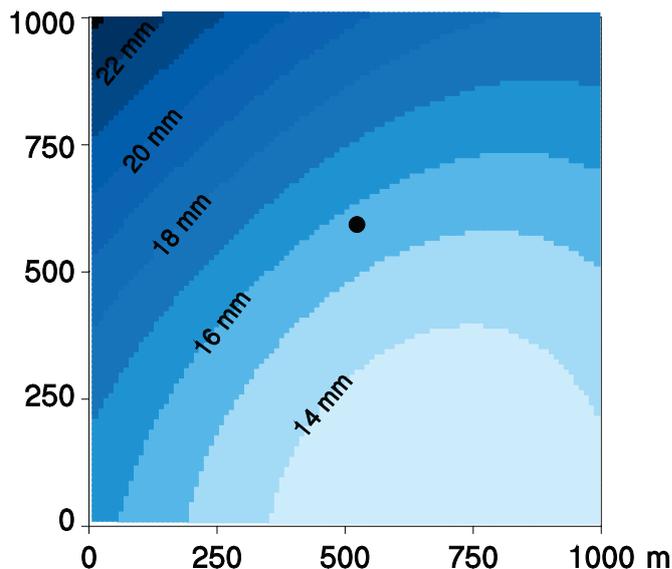


Abb. 5: *Beispiel einer Niederschlagsverteilung eines Ereignisses innerhalb eines 1 x 1 km²-großen Pixels (Rahmen des Quadrates) und Lage einer möglichen Ombrometermessstelle (schwarzer Punkt) innerhalb eines Pixels. Je dunkler die Blaufärbung ist, desto größer ist hier die Niederschlagsmenge. (Verändert nach Fiener & Auerwald, 2009)*

Die Jahreserosivität R wird jedoch mit RADOLAN im Vergleich zu Ombrometerdaten konsequent unterschätzt. Dies liegt daran, dass die maximalen Niederschlagsintensitäten, gemessen für 1 x 1 km² mit RADOLAN über mehrere Jahre hinweg, nie die Maxima der analog dazu mit Ombrometern punktuell gemessenen maximalen Niederschlagsintensitäten erreichen können. Daraus resultiert die Notwendigkeit, R-Faktoren für diese Unterschätzung zu korrigieren, wenn sie mit flächig-gemittelten Niederschlägen berechnet wurden. Eine weitere Unterschätzung der R-Faktoren auf Basis von RADOLAN wird zusätzlich durch die zeitliche Auflösung von 60 min verursacht. Für $I_{\max 30}$ kann nur die maximale 60-min Intensität eines Ereignisses bestimmt werden. Diese kann sich jedoch sehr deutlich vom tatsächlichen $I_{\max 30}$ unterscheiden, da eine konstante Intensität innerhalb des 60-min Intervalls angenommen werden muss. Die Niederschlagsmenge des 60-min Intervalls kann jedoch auch innerhalb eines wesentlich kürzeren Zeitraums und damit mit wesentlich höherer Intensität gefallen sein (Abb. 17). Da E_{kin} auch von der Intensität abhängt, wird auch E_{kin} des Ereignisses unterschätzt.

4 Material und Methoden

4.1 Räumliche und zeitliche Eigenschaften erosiver Regen

Zur Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der Regenerosivität wurden RY (5 min) und RW (60 min) RADOLAN-Daten eines Untersuchungsgebietes von 86 x 181 km² Größe (überwiegend Tertiärhügelland) und eines Zeitraum von 2 Jahren

(2011 und 2012) verwendet. Die RY Daten wurden rekursiv mit RW Daten korrigiert um auch auf 5-minütiger Auflösung angeeichte Radarniederschlagsdaten zu erhalten (vergleichbar mit den zukünftig beim DWD verfügbaren YW-Daten). Die verwendeten Daten wurden mit unabhängigen Daten des Agrarmeteorologischen Messnetzes validiert. Die R-Faktoren wurden gemäß Schwertmann et al. (1990) berechnet. Tageszeitliche Muster wurden sowohl für die Eintrittswahrscheinlichkeit von mindestens sechsständigen Niederschlagspausen und von $I_{\max 30}$, als auch für maximale Niederschlagsintensitäten ermittelt. Die räumlichen Muster wurden für die Niederschlagsmengen N und Erosivitäten R_e einzelner Ereignisse und für die Jahreserosivitäten R_{2011} und R_{2012} und die zweijährig mittlere Jahreserosivität $R_{11/12}$ ermittelt. Dazu wurden Semivarianz-Analysen durchgeführt. Diese ermöglichen, die Größe erosiver Regenzellen und die Abweichungen der Niederschlagsmenge bzw. der Erosivität je Distanzeinheit (km) innerhalb der Regen-/ Erosivitätszelle zu bestimmen. Diese Abweichungen je km Distanz werden hier als Gradienten bezeichnet.

4.2 Validierung der ABAG

Zur Validierung der ABAG wurden berechnete Bodenabträge einzelner Feldstücke mit Erosionsschadensklassifizierungen aus verzerrungsfreien Luftbildern (Orthofotos) verglichen. Dafür wurden mit insgesamt ca. 2.500 Luftbildern Erosionsschäden von 8.100 Feldstücken ausgewertet. Die Bilder wurden im Rahmen der Arbeit von Kistler et al. (2013) aufgenommen und dafür bereits erstmalig für Erosionseinschätzungen verwendet. Die Luftbilder wurden durch Befliegungen wenige Tage nach dem Auftreten erosiver Regen in den Jahren 2011 und 2012 aufgenommen (Abb. 6).

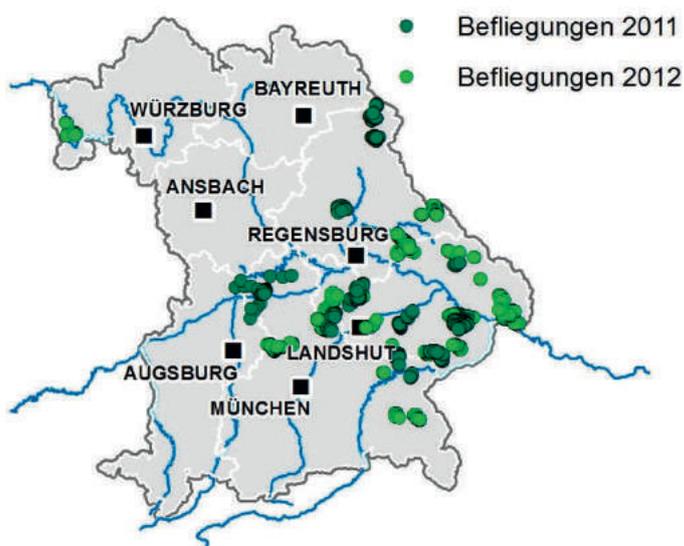


Abb. 6: Verteilung der dokumentierten Feldstücke aus den Befliegungen in den Jahren 2011 und 2012.

Die dokumentierten Feldstücke wurden jeweils einer von vier Erosionsschadensklassen zugeordnet: Klasse 0 für Feldstücke ohne erkennbare Schäden, Klasse 1 für geringe Schäden (<10% der Fläche betroffen), Klasse 2 für deutliche Schäden (10 - 30%) und Klasse 3 für erhebliche Schäden (> 30%) (vgl. Abb. 7). In einem ersten Durchgang wurden alle 8100 Feldstücke bewertet. In drei weiteren Durchgängen wurden jeweils zufällig ausgewählte Feldstücke nochmals unabhängig von der ersten Bewertung neu klassifiziert. Am Ende gab es für 6.140 Feldstücke eine Bewertung, für 1.399 zwei Bewertungen, für 517 drei Bewertungen und für 45 insgesamt vier Bewertungen. Die Güte der Klassifizierungsmethode wurde mit dem Nash-Sutcliffe-Effizienzmaß (Nash & Sutcliffe, 1970) ermittelt. Die Nash-Sutcliffe-Effizienz liegt zwischen 0 und 1, wobei 1 eine vollständige Übereinstimmung der Klassen bedeuten würde. Zum Vergleich mit den feldstückspezifisch berechneten Bodenabträgen wurde jeweils der Median aller Klassifizierungen je Feldstück verwendet. Daraus ergaben sich auch die Klassen 0,5, 1,5 und 2,5. Zusätzlich wurden Abweichungen innerhalb der Mehrfachklassifizierungen auf Zusammenhänge mit Standortbedingungen geprüft. Zur Prüfung der Signifikanz solcher Zusammenhänge wurde Spearmans Korrelationskoeffizient ρ oder der 95%-Vertrauensbereich (95%-VB) verwendet.



Klasse 1: geringer Schaden



Klasse 2: deutlicher Schaden



Klasse 3: erheblicher Schaden

Abb. 7: *Musterbeispiele zur Klassifizierung der Erosionsschäden nach Kistler et al., 2013.*

Zur Berechnung der Bodenabträge der einzelnen Ereignisse wurde Gleichung 1 angepasst zu

$$A = R_e \times K \times S \times L \times c_{RBA} \times P, \quad (5)$$

indem der R-Faktor mit R_e , der Erosivität des entsprechenden einzelnen Ereignisses und der C-Faktor durch den RBA (c_{RBA}) ersetzt wurde (Wischmeier & Smith, 1978). Der Faktor R_e wurde wie in Teilprojekt 1 berechnet und den entsprechenden Feldstücken zugeordnet. Der RBA zum Zeitpunkt des Ereignisses konnte größtenteils der Literatur entnommen werden (Auerswald, 1985a, 1985b; Auerswald & Kainz, 1998; Schwertmann et al., 1990). Die Werte der Faktoren K , S , L und P je Feldstück konnten wie in Kapitel 3.2 beschrieben ermittelt werden. Die Bodenabträge wurden für alle Ereignisse zwischen der letzten Bodenbearbeitung und der Aufnahme des Luftbildes aufsummiert und mit den zugeordneten Schadensklassen verglichen. Die Güte der Korrelation zwischen berechneten Bodenabträgen und visuell klassifizierten Erosionsschäden wurde mittels Regression bewertet. Ebenso wurde die Gültigkeit der Parametrisierung der sechs einzelnen Faktoren geprüft. Weiterhin wurden die 68 Kulturen zu 15 Gruppen zusammengefasst und die mittleren klassifizierten und berechneten Bodenabträge je Gruppe ermittelt.

4.3 Effekte der zeitlichen und räumlichen Auflösung und der Messmethode des Niederschlags auf die Regenerosivität

Zur Ermittlung der Effekte der zeitlichen und räumlichen Auflösung von Niederschlagsdaten auf die Regenerosivität wurden Zeitreihen von bis zu 16 Jahren (2001 - 2016) von Ombrometern und RADOLAN-Pixeln verwendet (Tab. 2).

Tab. 2: Überblick der untersuchten Effekte und der dafür verwendeten Niederschlagsdaten.

Untersuchte Effekte	Messmethodik	Zeitliche Auflösung	Räumliche Auflösung	Anzahl der Stationen / Pixel	Zeitraum	Anzahl der Ereignisse
Positionseffekt und räumliche Auflösung	Ombrometer	60 min	„punktuell“	115	16 Jahre	29.610
	Radar	60 min	1 x 1 km ²	115	16 Jahre	25.884
Räumliche Auflösung und Messmethode	Ombrometer	1 min	„punktuell“	12	4 Jahre, Apr. – Okt.	542
	Radar	60 min	1 x 1 km ²	480 x 10 ³	2 Monate	1,9 x 10 ⁶
Zeitliche Auflösung	Ombrometer	1 min	„punktuell“	17	16 Jahre	4.599
	Radar	5 min	1 x 1 km ²	17	16 Jahre	3.924

Zur Untersuchung der zeitlichen Skaleneffekte wurden Ombrometerdaten mit 1 min Auflösung zu 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 80 min, 100 min und 120 min Auflösungen aggregiert. Ebenso wurden 5 min YW-Daten von RADOLAN-Pixeln zu Zeitreihen mit Auflösungen > 5 min aggregiert. Für jedes Pixel bzw. Ombrometer wurde R für jeweils alle zeitlichen Auflösungen berechnet. Dabei wurden für die Auswertung mit 1 min Daten Ereignisse nach den Kriterien von Wischmeier & Smith (1978) als erosiv definiert, also Ereignisse mit $N \geq 12,7$ mm oder $I_{\max 30} > 12,7$ mm h⁻¹. Für alle anderen Auflösungen wurde das Kriterium für $I_{\max 30}$ so gewählt, dass die gleiche Ereignisanzahl wie mit der jeweils feinsten Auflösung erreicht wurde. Dieser Schritt war notwendig, da durch die Unterschätzung von $I_{\max 30}$ mit zeitlichen Auflösungen > 1 min auch die Anzahl der erosiven Ereignisse unterschätzt werden würde. Der zeitliche Skalierungsfaktor für R ergab sich aus dem mittleren Verhältnis von R ermittelt auf Basis der höchsten zeitlichen Auflösung und R ermittelt auf Basis der jeweils geringeren zeitlichen Auflösung.

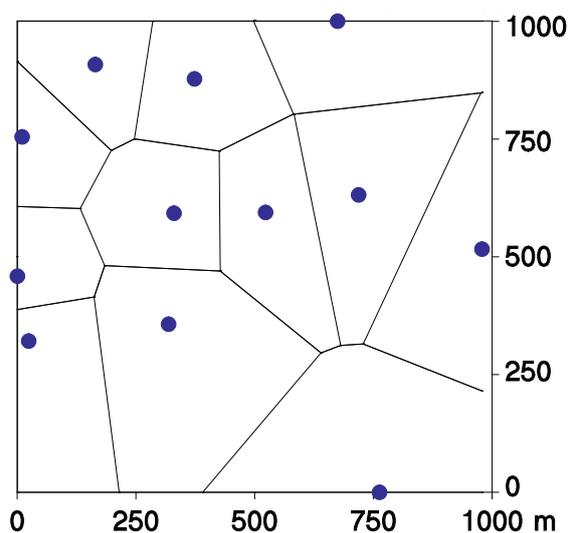


Abb. 8: Verteilung der 12 Ombrometer (blaue Punkte) innerhalb einer 1 x 1 km² Fläche, die zur Erzeugung der ‚Pseudo-Radardaten‘ verwendet wurden. Die eingezeichneten Polygone kennzeichnen die Flächenanteile, für welche die jeweils darin befindlichen Ombrometer repräsentativ sind.

Der räumliche Effekt für Auflösungen ≤ 1 km² wurde mit Hilfe manuell erstellter flächiger Niederschlagsdaten ermittelt. Dazu standen Niederschlagsmessungen von insgesamt 12 Ombrometern der Zeiträume April bis Oktober der Jahre 1994 – 1997 zur Verfügung (Fiener & Auerswald, 2009). Alle 12 Ombrometer operierten innerhalb einer Fläche von 1 x 1 km² (Abb. 8). Mittels Thiessen-Polygon-Methode wurde für jedes Zeitintervall (1 min) der Niederschlag aller 12 Ombrometer gemittelt. Die so manuell erzeugten 1 x 1 km² Niederschlagsdaten werden im Folgenden als ‚Pseudo‘-Radardaten bezeichnet. Zusätzlich wurden Pseudo-Radardaten mit 0,5 x 0,5 km² Auflösung erstellt. Der Effekt der räumlichen Skala wurde aus dem mittleren Verhältnis von R , gemittelt aus R aller

Ombrometer innerhalb der Fläche, und R basierend auf den Pseudo-Radardaten, bestimmt. Ebenso wurde der Effekt von RADOLAN auf R aus dem mittleren Verhältnis von R basierend auf Ombrometerdaten und R basierend auf RADOLAN-Daten ermittelt. Die Abweichung der Skalierungsfaktoren für $1 \times 1 \text{ km}^2$ aus RADOLAN und Pseudo-Radardaten ergab den Effekt, der durch die Unterschiede der Messmethoden Ombrometer und Radar verursacht wird. Zusätzlich wurden RADOLAN-Daten zu Zeitreihen mit räumlicher Auflösung $> 1 \text{ km}^2$ aggregiert. Diese manuell aggregierten Zeitreihen wurden verwendet um Skalierungsfaktoren für räumliche Auflösungen von bis zu $18 \times 18 \text{ km}^2$ zu erlangen.

Die Positionseffekte wurden aus den geometrischen Mitteln der Verhältnisse der Einzelerositäten R_e basierend auf Ombrometerdaten und R_e basierend auf RADOLAN ermittelt. Dabei wurden die Effekte getrennt für R_e basierend auf Ombrometerdaten größer bzw. kleiner als R_e basierend auf RADOLAN bestimmt. Die Positionseffekte geben für ein einzelnes Ereignis die mittlere Spannweite von R_e an, die innerhalb eines $1 \times 1 \text{ km}^2$ RADOLAN-Pixels zu erwarten ist.

5 Ergebnisse

5.1 Räumliche und zeitliche Eigenschaften erosiver Regen

An insgesamt 170 Tagen der Jahre 2011 und 2012 trat in mindestens einem der 15.000 $1 \times 1 \text{ km}^2$ Radarrasterpixel des Untersuchungsgebietes ein erosiver Regen auf. Diese Regen zeigten ein deutliches Muster der Regenintensitäten im Tagesverlauf (Abb. 9). Dieses Muster wurde ebenso von den Auftretswahrscheinlichkeiten von $I_{\max 30}$ abgebildet. So war die höchste Auftretswahrscheinlichkeit für $I_{\max 30}$ am späten Nachmittag (gegen 16 Uhr UTC, also 17 Uhr Ortszeit).

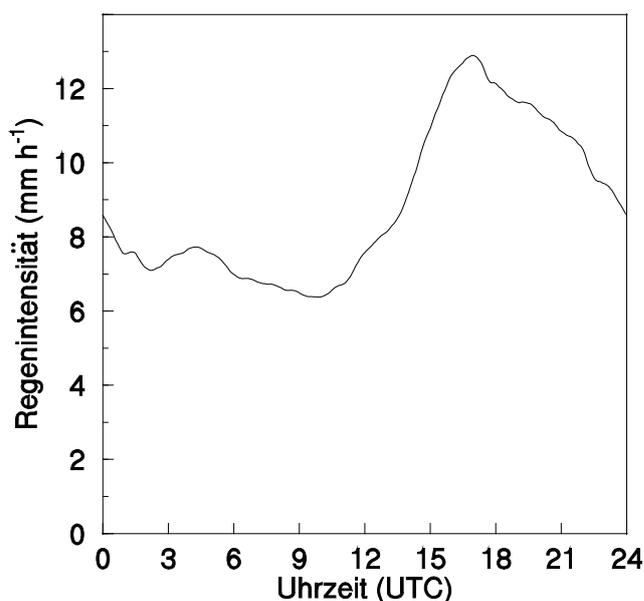


Abb. 9: Tageszeitliche Verteilung der maximalen Regenintensitäten (98%-Quantile).

Für 24% aller Pixel und Tage mit erosiven Regen wurden die Regen durch mindestens sechsstündige Niederschlagspausen unterbrochen und somit in zwei getrennte Ereignisse unterteilt. Die Niederschlagspausen traten am häufigsten in den Morgenstunden auf. Meist erfüllte nur eines der beiden getrennten Ereignisse eines Tages die Kriterien eines erosiven Regens. Die erosive Niederschlagsmenge war dadurch im Schnitt um 25% geringer als die Niederschlagsmenge des ganzen Tages. Etwa 36% der erosiven Regen dauerten über Mitternacht hinweg an. Die erosive Niederschlagsmengen konnten dadurch höher sein als die Tagesniederschlagsmengen. Die Effekte der Niederschlagspausen und der Regendauer über Mitternacht hinweg waren entgegengerichtet, sodass zumindest innerhalb dieses Teilprojektes mit den Niederschlagsmessungen einzelner Tage, abgetrennt um Mitternacht, gerechnet werden konnte.

Die Gradienten (Änderung pro km) der Einzelerositäten R_e waren deutlich stärker ausgeprägt als die der entsprechenden Niederschlagsmengen N (Tab. 3; Beispiel siehe Abb. 10). Während der Gradient für R_e relativ zum Mittelwert von R_e 13,3% pro km betrug, war der relative Gradient der Niederschlagsmenge nur 3,5% pro km. Dies war zum einen dadurch bedingt, dass die Gebietsgröße der erosiven Zelle mit 9,7 km Durchmesser im Mittel kleiner war als die der gesamten Niederschlagszelle mit 13,2 km. Zum anderen ergab sich der stärkere Gradient durch die höhere Variabilität innerhalb der erosiven Zelle (Teilvariationskoeffizient 77%) im Vergleich zur Niederschlagszelle (Teilvariationskoeffizient 26%).

Tab. 3: *Minimum, Mittelwert und Maximum der absoluten und relativen Gradienten (Änderung pro km) der Regenmenge und der Ereigniserosität R_e aus den geostatistischen Auswertungen aller 170 Ereignistage.*

		Gradient	relativer Gradient
Regenmenge N	Einheit	$\text{mm d}^{-1} \text{ km}^{-1}$	$\% \text{ km}^{-1}$
	Min	0,03	0,3
	Mittel	0,43	3,5
	Max	1,97	14,3
Erosivität R_e	Einheit	$\text{N h}^{-1} \text{ km}^{-1}$	$\% \text{ km}^{-1}$
	Min	0,01	0,8
	Mittel	0,59	13,3
	Max	3,09	51,1

Die Gradienten der Jahreserosivitäten R_{2011} und R_{2012} ($1,8 \text{ N h}^{-1} \text{ km}^{-1}$ bzw. $1,4 \text{ N h}^{-1} \text{ km}^{-1}$) übertrafen nochmals den mittleren Gradienten der Einzelerositäten R_e , bedingt durch die räumliche Überlagerung von erosiven Regenzellen verschiedener Tage. Der Gradient der mittleren Erosivität beider Jahre R war nur leicht geringer ($1,2 \text{ N h}^{-1} \text{ km}^{-1}$) als der Gradient der Einzeljahre. Über zwei Jahre hatte sich innerhalb des $\sim 15.000 \text{ km}^2$ großen Untersuchungsgebietes noch kein Muster ausgeprägt (Abb. 11). Die Jahreserosivität variierte räumlich stark, so dass Gebietsabschnitte mit weit überdurchschnittlicher Jahreserosivität

direkt neben Abschnitten mit unterdurchschnittlicher Jahreserosivität. Für das Untersuchungsgebiet ist hingegen zu erwarten, dass sich die Verteilung von R angleicht und sich nur ein leichter Gradient mit steigendem R in Richtung Nordosten des Untersuchungsgebiets ausprägt aufgrund der dorthin ansteigenden Orographie. Da ein solches Muster noch nicht ansatzweise nach zwei Jahren erkennbar war, wurde deutlich, dass wesentlich mehr Jahre nötig sind, bis R flächendeckend nicht mehr durch Einzeljahre geprägt ist.

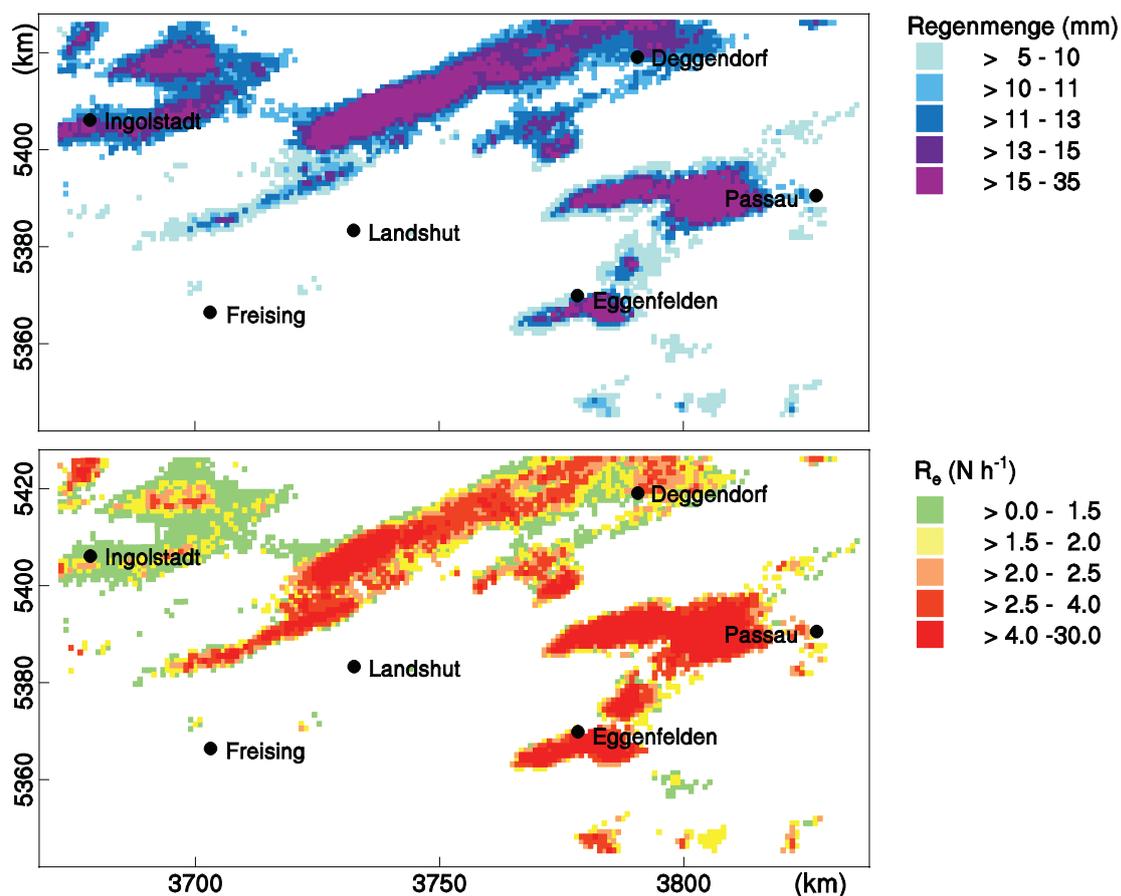


Abb. 10: Niederschlagsmenge (oben) und entsprechende Erosivität R_e (unten) am 12.05.2011 im Untersuchungsgebiet.

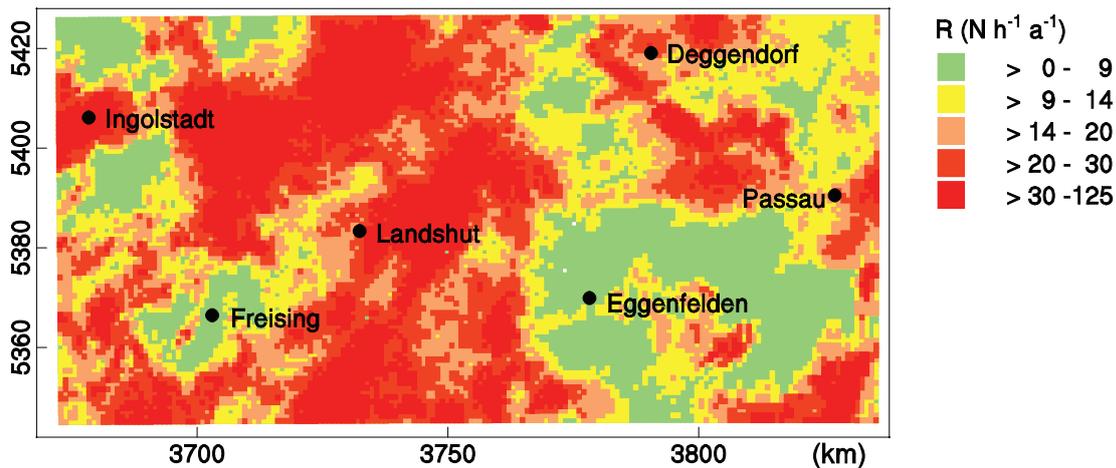


Abb. 11: Jahreserosivität R gemittelt aus den Jahreserosivitäten von 2011 und 2012 im Untersuchungsgebiet.

5.2 Validierung der ABAG

Die Evaluierung der visuellen Klassifizierungen der Erosionsschäden mittels Luftbildern ergab eine hohe Güte der Klassifizierungen. Die Klassifizierungen der drei Wiederholungen stimmten weitgehend gut mit den Klassifizierungen der ersten, vollständigen Runde überein (Nash-Sutcliffe-Effizienz 0,70 – 0,76). Der mittlere Fehler der Mehrfachklassifizierungen lag zwischen -0,03 und 0,23. Die Klassifizierungen der Erosionsschäden konnten somit zur Validierung der ABAG verwendet werden. Dennoch gab es Zusammenhänge zwischen Abweichungen der Klassifizierungen eines Feldstückes und dessen Eigenschaften. Die Abweichungen nahmen zu mit zunehmender Erosionsanfälligkeit der Kulturen ($p < 0,001$), mit zunehmender Feldstückgröße ($\rho = 0,1$, $p < 0,001$) und zunehmender maximaler Hanglänge ($\rho = 0,1$, $p < 0,001$). Hingegen waren die Abweichungen auch auf den weniger erosionsanfälligen Feldstücken mit Mulch höher als auf Feldstücken ohne Mulch ($p < 0,0001$). Ein Grund dafür könnte die Heterogenität auf dem Luftbild sein, die durch Mulch verursacht wird und dadurch das Erkennen der Erosionsspuren erschwert. Von nicht allen Beurteilern einheitlich berücksichtigt wurden vermutlich Erosionsanzeichen um das Feldstück herum. Die Abweichungen der Klassifizierungen waren höher, wenn der Oberflächenabfluss aus benachbarten Feldstücken in das Feld eintrat ($p = 0,02$), oder, wenn sich Sedimente in angrenzenden Gräben absetzten ($p < 0,001$).

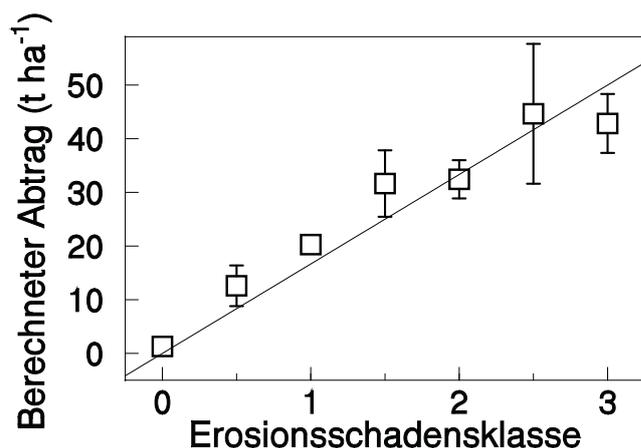


Abb. 12: Mittlerer berechneter Bodenabtrag ($t\ ha^{-1}$) je Klasse visuell geschätzter Erosionsschäden.

Die visuell klassifizierten Erosionsschäden und die berechneten Bodenabträge korrelierten signifikant miteinander (Abb. 12). Der mittlere berechnete Bodenabtrag stieg von $1\ t\ ha^{-1}$ in Klasse 0 auf $43\ t\ ha^{-1}$ in Klasse 3 an. Innerhalb der Erosionsklassen variierte der berechnete Bodenabtrag jedoch deutlich. Dies war vor allem in den Zwischenklassen 0,5, 1,5, 2,5 der Fall (vgl. 95% VB in Abb. 12), da die Anzahl der Feldstücke, die diesen Klassen zugeordnet wurden, insgesamt nur 1% aller Feldstücke entsprach. Hingegen waren 75% der 8.100 Feldstücke in Klasse 0, 13% in Klasse 1, 6% in Klasse 2 und 3% in Klasse 3. Dennoch war auch in diesen Klassen die Variabilität der Abträge enorm. Die Standardabweichungen betragen zwischen $7\ t\ ha^{-1}$ in Klasse 0 und bis zu $46\ t\ ha^{-1}$ in Klasse 3.

Keiner der sechs Faktoren der ABAG verursachte gerichtet unstimmige Zusammenhänge zwischen den berechneten und den visuell klassifizierten Bodenabträgen (Abb. 13). Die Zusammenhänge zwischen den berechneten und visuell klassifizierten Bodenabträgen waren für die Faktoren S , L , c_{RBA} und P eng (Abb. 13a und b). Dies zeigte eine hohe Güte der Parametrisierung der Faktoren S , L , c_{RBA} und P und den engen Zusammenhang von Bewirtschaftung und Feldgeometrie mit den berechneten und auch den beobachteten Bodenabträgen.

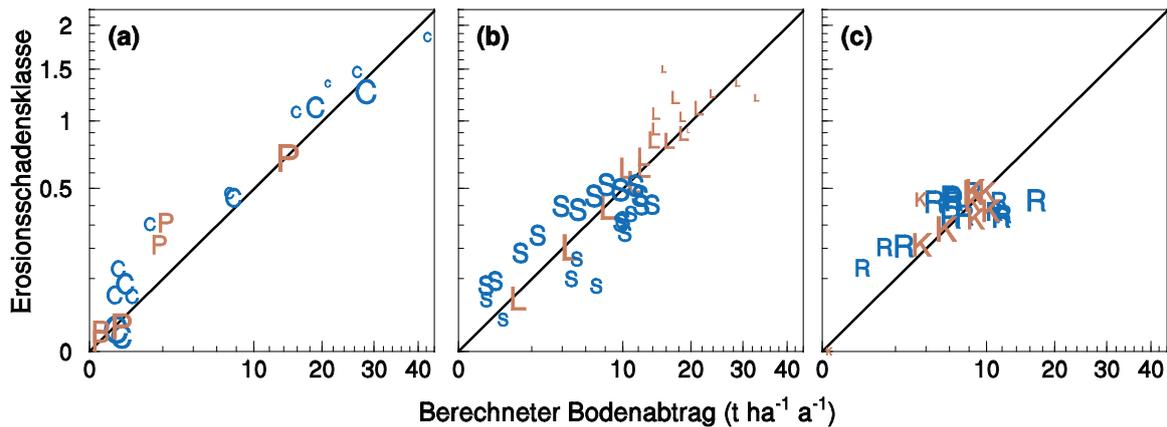


Abb. 13: Berechnete Bodenabträge und visuell klassifizierte Erosionsschäden gemittelt für die Feldstücke je Teilgruppierung der Faktoren C, P, S, L, R und K. Die Buchstaben repräsentieren jeweils die Datenpunkte. Die Größe der Buchstaben gibt die relative Anzahl der Feldstücke je Teilgruppierung an. Die durchgezogene Linie entspricht der gemeinsamen Regressionsgerade aller sechs Faktoren ($r^2 = 0,93$, $n = 88$). Die Färbung dient der besseren Unterscheidung der Faktoren.

Für die Faktoren K und R war der Zusammenhang zwischen berechneten und visuell klassifizierten Bodenabträgen schwach. Für den K-Faktor lässt sich der schwache Zusammenhang durch die geringe Spannweite und Variabilität der Bodenerodibilität innerhalb des Untersuchungsgebietes erklären. Dadurch gibt es auch keinen Zusammenhang der K-Faktoren mit der Bodennutzung und somit auch nicht ausgeprägt mit den Bodenabträgen. Der schwache Zusammenhang klassifizierter und berechneter Bodenabträge nach Gruppierung der R-Faktoren wurde vermutlich durch die räumliche Auflösung der R_e zugrunde liegenden RADOLAN-Daten verursacht. Im Gegensatz zu den Auflösungen der Eingangsdaten der anderen Faktoren, ist die Auflösung der Niederschlagsdaten für den R-Faktor deutlich geringer als die mittlere Größe der Feldstücke. Ca. 20 Feldstücke können bei einer mittleren Feldstückgröße von 5,7 ha innerhalb eines 1 x 1 km² Rasterpixels liegen. Trotz theoretisch identischer standort- und nutzungsbedingter Erosionsanfälligkeit der Feldstücke können diese von unterschiedlich starker Erosion betroffen sein, da auch innerhalb von 1 km² deutliche Niederschlagsgradienten auftreten können (Kapitel 5.1; Fiener & Auerswald, 2009). Da jedoch die räumliche Auflösung der RADOLAN-Daten eine einheitliche Regenintensität und somit einheitliche Erosivität für das gesamte 1 x 1 km² Rasterpixel bedingt, wird für alle Feldstücke der gleiche Abtrag berechnet. Dadurch können Unstimmigkeiten zwischen berechneten und visuell klassifizierten Erosionsschäden verursacht werden. Diese Erklärung bestätigten auch die Ergebnisse der dritten Teilstudie dieses Projektes (siehe 5.3).

Tab. 4: Berechnete Bodenabträge und visuell klassifizierte Erosionsschäden gemittelt für jeweils 15 verschiedene Kulturgruppen mit 95%-Vertrauensbereich (95% VB) um den Mittelwert. Zu jeder Kulturgruppe wurden n Feldstücke zugeordnet.

Kultur	Mittlerer berechneter Bodenabtrag (t ha ⁻¹)	95% VB	Mittlere Erosions- schadensklasse	95% VB	n
Hopfen	42,2	14,9	1,9	0,5	32
Hopfen (mit Untersaat)	26,5	7,7	1,5	0,4	18
Sojabohne	21,0	22,8	1,4	0,7	10
Mais	28,3	1,8	1,3	0,1	1509
Mais (Mulchsaat)	18,9	1,8	1,1	0,1	526
Rüben&Kartoffeln	15,8	5,0	1,1	0,3	36
Rüben & Kart. (Mulchsaat)	7,2	2,8	0,5	0,2	34
Raps	7,7	2,1	0,4	0,1	275
Erbsen & Ackerbohnen	1,4	0,4	0,3	0,1	56
Hafer	0,3	0,1	0,1	0,1	143
Wintergerste	0,5	0,1	0,1	<0,1	495
Wintertriticale	0,6	0,1	0,1	0,1	96
Sommergerste	0,2	0,1	0,1	<0,1	242
Winterweizen	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	1007
Grünland	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	3463

Die Reihenfolge der 15 Kulturgruppen nach den gemittelten Erosionsstärken war für die visuell klassifizierten und für die berechneten Bodenabträge sehr ähnlich (Tab. 4). Stärkste Erosion mit $> 20 \text{ t ha}^{-1}$ trat demnach auf den Feldern mit Hopfen, Sojabohnen und Mais auf. Dabei war die Erosionsstärke im Durchschnitt für Hopfen, Mais und Rüben und Kartoffeln mit Unter-/ Mulchsaat deutlich geringer als ohne. Der erosionshemmende Effekt scheint jedoch für Hopfen und Mais in der Praxis, gemäß den Klassifizierungen, geringer zu sein als der berechnete, theoretische Effekt durch Mulch gemäß der Parametrisierung. Demnach ist anzunehmen, dass die Mulchbedeckung in der Praxis noch geringer als angenommen war. Für 34% aller Felder mit Mulchsaat wurde die Mulchbedeckung vor Ort erhoben (vgl. Abb. 14 und Abb. 15). Mit diesen Erhebungen konnte ein signifikanter, positiver Zusammenhang zwischen den geschätzten Mulchbedeckungen und den visuell klassifizierten Bodenabträgen aufgezeigt werden ($\rho = 0,09$, $p < 0,001$). Je dichter die Mulchbedeckung war, desto geringer waren die Erosionsschäden. Dies verdeutlichte wie wichtig eine dichte Mulchbedeckung für die Effektivität des Erosionsschutzes durch Mulchsaat ist.



Abb. 14: Maisfeld mit erosionsschützender Mulchauflage. (Foto: M. Kistler)



Abb. 15: Maisfeld ohne erkennbare Mulchbedeckung. (Foto: M. Kistler)

Die Erosion auf den Feldstücken mit Sommer- oder Wintergetreidekulturen war im Allgemeinen gering, sowohl beurteilt nach den visuell klassifizierten als auch nach den berechneten Bodenabträgen. Ausschlaggebend hierfür ist die gute Bedeckung des Bodens

während den Monaten Mai bis August, in denen erosive Regen überwiegend auftreten (Abb. 2).

Eine weitere Auswertung der Datensätze dieses Teilprojektes konnte außerdem aufzeigen, welche praktikablen Möglichkeiten zur Minderung der Erosionsgefahr noch nicht vollständig genutzt werden (Auerswald et al., 2018). Zu den Möglichkeiten in Gebieten mit standortbedingt erhöhter Erosionsgefahr, beispielweise durch starkes Gefälle, gehören eine verstärkt eingesetzte Mulchsaat mit gezielt hoher ($\geq 30\%$) Mulchbedeckung, kleine Feldstückgrößen bzw. Unterteilung der Feldstücke durch Anbau unterschiedlicher Kulturen, Anbau von Kulturen mit geringem Erosionspotential und konsequente Querbewirtschaftung der Flächen.

5.3 Effekte der zeitlichen und räumlichen Auflösung und der Messmethode der Niederschlagsdaten auf die Regenerosivität

5.3.1 Effekte der zeitlichen Auflösung

Mit abnehmender zeitlicher Auflösung τ der Niederschlagsdaten wurde die Anzahl der erosiven Niederschlagsereignisse zunehmend unterschätzt. Um dieser Unterschätzung entgegenzuwirken, wurde das $I_{\max 30}$ -Kriterium zunehmend herabgesetzt (Abb. 16a). Die $I_{\max 30}$ -Kriterien ermittelt aus Ombrometer- und $1 \times 1 \text{ km}^2$ Radardaten stimmten gut überein. Die Kriterien beider räumlicher Skalen korrelierten signifikant ($r^2 = 0,9858$, $n = 9$) bei einer Steigung der Regressionsgerade von 1,0067. Das $I_{\max 30}$ -Kriterium nahm unabhängig der räumlichen Auflösung mit abnehmender zeitlicher Auflösung τ bis 30 min schwächer ab als für Auflösungen $\tau \geq 30 \text{ min}$ (Gl. 6.1 und 6.2; Abb. 16a).

$$\text{Krit}(I_{\max 30}) = -0,59 * \tau^{0,5} + 13,23 \quad \text{für } \tau \leq 30 \text{ min} \quad (6.1)$$

$$\text{Krit}(I_{\max 30}) = 147 * \tau^{0,79} \quad \text{für } \tau \geq 30 \text{ min} \quad (6.2)$$

Die unterschiedliche Abnahme des $I_{\max 30}$ -Kriteriums für Auflösungen mit Zeitintervallen kürzer und länger als 30 min wird durch einen weiteren Effekt in der Bestimmung von $I_{\max 30}$ verursacht, der bei Auflösungen $> 30 \text{ min}$ hinzukommt (Abb. 17). Dieser Fehler entsteht durch die Zeitabschnitte, die zusätzlich zu den gesuchten 30 min hinzukommen (gestrichelter Bereich in Abb. 17). Diese Abschnitte verursachen eine Abschwächung der Intensität des gesamten Zeitintervalls. Dieser Effekt wird erst deutlich bei Zeitintervallen, die länger als das gesuchte 30 min Intervall sind. Der Effekt nimmt dann mit abnehmender Auflösung zu. Hingegen ergibt sich für alle zeitaggregierten Niederschlagsmessungen ein Fehler für $I_{\max 30}$ durch den Unterschied der Intensitäten der nicht überlappenden zeitlichen Abschnitte des korrekten und des angenommenen 30-min-Intervalls maximaler Intensität (kariierter Bereich in Abb. 17).

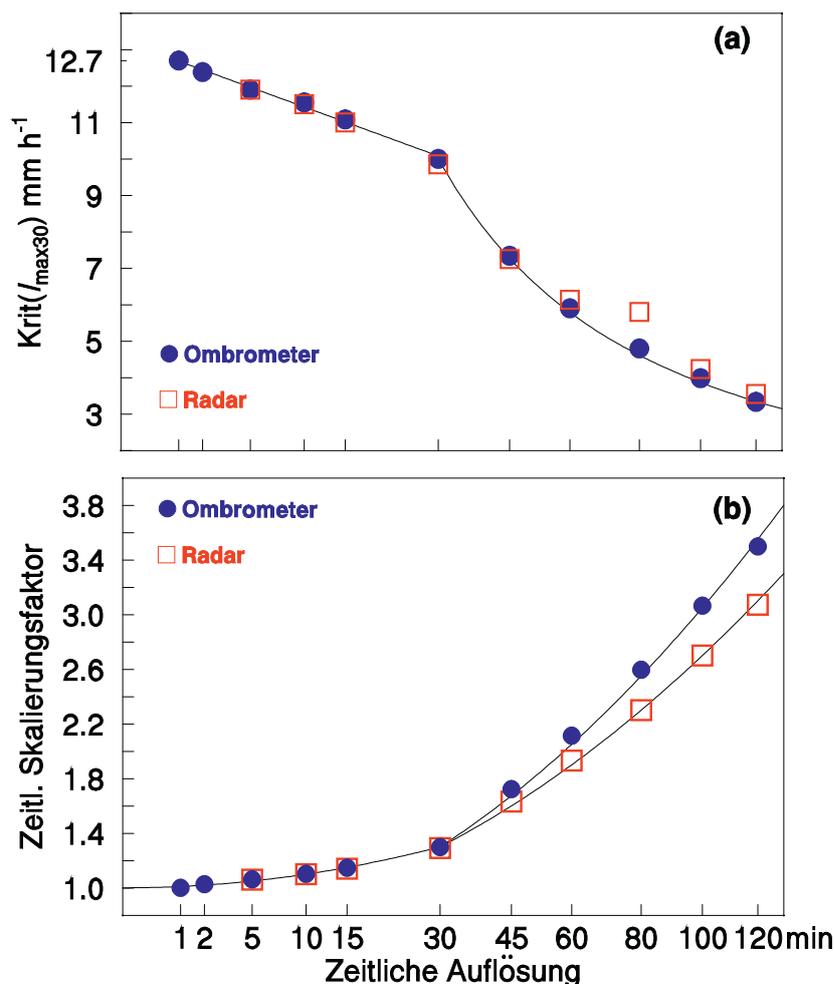


Abb. 16: **a)** $I_{\max30}$ -Kriterium in Abhängigkeit der zeitlichen Auflösung τ ermittelt aus Ombrometer- (blaue Punkte) und Radardaten (rote Quadrate) zur Bestimmung der Anzahl erosiver Ereignisse wie bei höchster zeitlicher Auflösung. Die schwarzen Linien geben die Gleichungen 6.1 und 6.2 wieder. Das Kriterium der Niederschlagsmenge für erosive Ereignisse bleibt unabhängig der zeitlichen Auflösung bei $> 12,7$ mm, wie von Wischmeier & Smith (1959, 1978) definiert, da die Niederschlagsmenge weitgehend unabhängig von der zeitlichen Auflösung ist.

b) Zeitliche Skalierungsfaktoren für R_e oder R in Abhängigkeit der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Niederschlagsdaten (blaue Punkte: ‚punktuelle‘ Ombrometerdaten; rote Quadrate: $1 \times 1 \text{ km}^2$ Radardaten). Die schwarzen Linien zeigen die Gleichungen 7.1 – 7.2b.

Auf Basis der angepassten $I_{\max30}$ -Kriterien ergab sich mit abnehmender zeitlicher Auflösung eine zunehmende Unterschätzung von R_e bzw. R . Der zeitliche Skalierungsfaktor (t), der diese Unterschätzung ausgleicht, steigt demnach mit abnehmender zeitlicher Auflösung τ an (Abb. 16b, Gl. 7.1 - 7.2b).

$$t = \frac{\tau}{100} + 1 \quad \text{für } \tau \leq 30 \text{ min und ‚punktuelle‘ oder } 1 \times 1 \text{ km}^2 \text{ Auflösung (7.1)}$$

$$t = \frac{\tau}{40} + 0,55 \text{ für } \tau \geq 30 \text{ min und ‚punktuelle‘ Auflösung oder (7.2a)}$$

$$t = \frac{\tau}{50} + 0,70 \text{ für } \tau \leq 30 \text{ min und } 1 \times 1 \text{ km}^2 \text{ Auflösung (7.2b)}$$

Der Anstieg ist für Auflösungen < 30 min flacher als für Auflösungen > 30 min. Für Auflösungen > 30 min ist der Anstieg abhängig von der räumlichen Skala der Niederschlagsdaten. Mit zeitlichen Auflösungen > 30 min ist die Unterschätzung von R_e bzw. R auf punktueller Skala (Ombrometer) stärker, und der Skalierungsfaktor somit größer als bei $1 \times 1 \text{ km}^2$ Auflösung der Niederschlagsdaten. Das unterschiedliche Verhalten für Auflösungen < 30 min und > 30 min ist wieder bedingt durch den zusätzlichen Fehler in der Bestimmung von $I_{\max 30}$ mit Niederschlagsdaten einer Auflösung > 30 min. Jedoch ist dieser Fehler schwächer ausgeprägt bei $1 \times 1 \text{ km}^2$ Auflösung im Vergleich zur ‚punktuellen‘ Auflösung. Dies ist vermutlich dadurch verursacht, dass Regenzellen länger in einem $1 \times 1 \text{ km}^2$ Pixel verweilen als über einer Ombrometermessstelle. Die Glättung der Intensitäten bei Auflösungen > 30 min gegenüber höchster zeitlicher Auflösung ist dadurch bei $1 \times 1 \text{ km}^2$ Radardaten geringer als bei Ombrometerdaten.

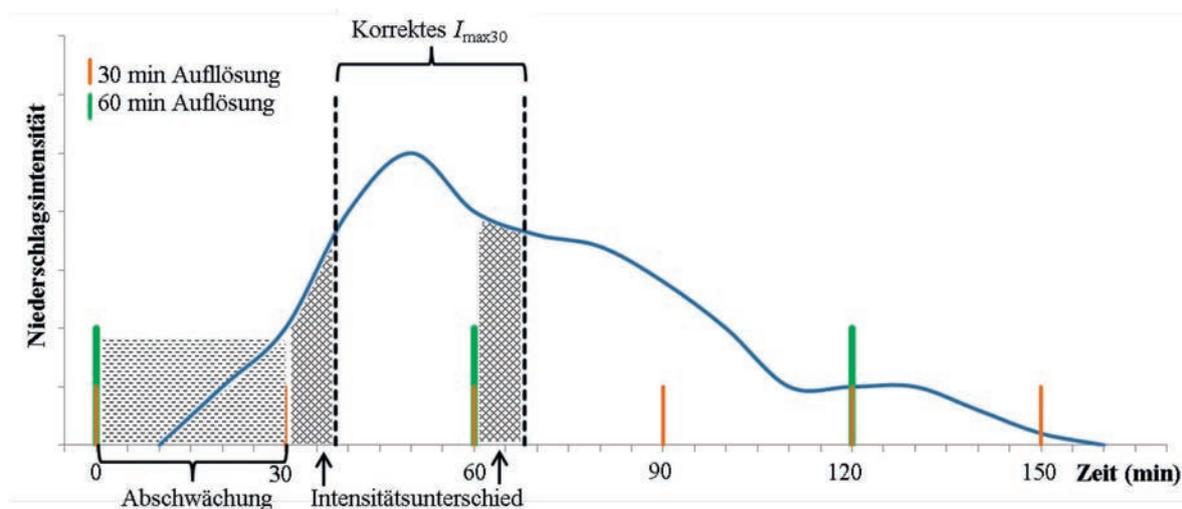


Abb. 17: Fehler, die zur Unterschätzung der maximalen 30-Minuten-Intensität ($I_{\max 30}$) aufgrund zeitlicher Auflösungen > 1 min führen, am Beispiel von 30 min und 60 min Auflösung. Bei Auflösungen ≤ 30 min ergibt die Unterschätzung von $I_{\max 30}$ allein durch den Intensitätsunterschied der nicht überlappenden Zeitintervalle (kariertes Bereich) und bei Auflösungen > 30 min zusätzlich durch die Abschwächung der Intensität durch den zusätzlichen Zeitabschnitt des Intervalls (gestrichelter Bereich).

5.3.2 Effekte der räumlichen Auflösung und der Niederschlagsmessmethoden

Mit abnehmender räumlicher Auflösung σ der Niederschlagsdaten ergab sich eine zunehmende Unterschätzung von R und damit ein steigender räumlicher Skalierungsfaktor

s(Abb. 18). Der Anstieg der Skalierungsfaktoren erfolgt kontinuierlich über alle räumlichen Auflösungen hinweg, jedoch mit einem Versatz in Abhängigkeit der Messmethode der Niederschlagsdaten. Die räumlichen Skalierungsfaktoren für $1 \times 1 \text{ km}^2$ ermittelt mit dem Pseudo-Radardatensatz und einem RADOLAN-Datensatz wichen um 0,35 voneinander ab. Diese Abweichung ergibt sich aus den unterschiedlichen Methoden der Niederschlagsmessung mit Ombrometer und Radar. Die Ermittlung von Niederschlagsdaten aus Radardaten unterliegt noch einigen Verfahrensschritten, die zur zusätzlichen Unterschätzung der Niederschlagsintensitäten führen. Probleme bereiten beispielsweise zunehmende Dämpfungseffekte mit zunehmender Entfernung der Regenzone vom Wetterradar oder die diversen Eich- und Korrekturfunktionen, die zwischen der Radar-Messungen und den Endprodukten wie RY oder RW liegen, die allesamt Intensitätsspitzen kappen. Dies bewirkt eine stärkere Unterschätzung von R aus Radarniederschlagsdaten gegenüber R aus Ombrometermessungen als mit manuell generierten $1 \times 1 \text{ km}^2$ Pseudo-Radardaten, die diese Dämpfungseinflüsse auf Intensitätsspitzen nicht enthalten.

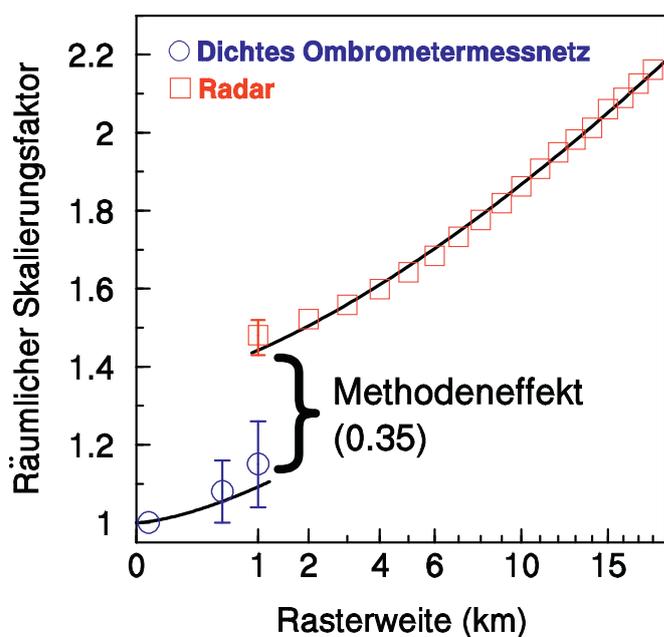


Abb. 18: Räumlicher Skalierungsfaktor s für R , um von der jeweiligen, räumlichen Auflösung und Messmethode der Niederschlagsdaten auf die punktuelle Ombrometer-Skala zu skalieren. Die Zunahme des Skalierungsfaktors s folgt der Gleichung $s = 1 + 0,35 * \mu + 0,092 * \sigma^{3/4}$, wobei σ die Rasterweite in km ist und μ die Variable für die Methode. Für Ombrometerdaten ist $\mu = 0$ und für $1 \times 1 \text{ km}^2$ Radardaten ist $\mu = 1$.

Im speziellen Fall der RADOLAN-Daten wurde ein Faktor für R von 1,48 zur räumlichen Skalierung inklusive Berücksichtigung des Methodeneffekts ermittelt (vgl. Steigung der durchgezogenen Linie in Abb. 19). Der 95%-VB dieses Faktors reicht von 1,43 bis 1,52 basierend auf den 16-jährig mittleren Erosivitäten. Die Streuung der Verhältnisse punktu-

eller und $1 \times 1 \text{ km}^2$ -skaliger Erosivitäten einzelner Jahre war deutlich stärker ausgeprägt (vgl. blaue Punkte in Abb. 19).

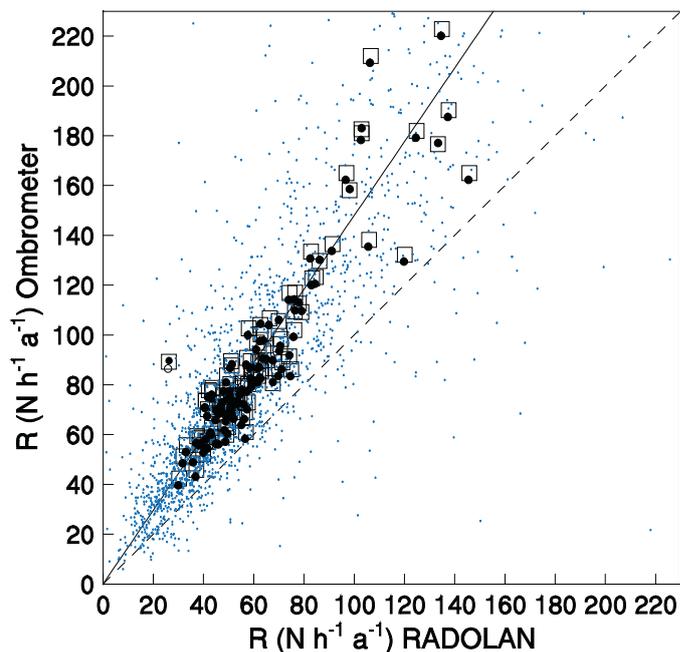


Abb. 19: Vergleich 16-jährig mittlerer Erosivitäten R berechnet aus den RADOLAN-Daten einzelner Rasterpixel und aus punktuellen Niederschlagsmessungen der räumlich entsprechenden Ombrometer (schwarze Punkte in schwarzen Quadraten). Die blauen Punkte zeigen jeweils die Erosivitäten der einzelnen 16 Jahre der ‚Pixel-Punkt-Paare‘. Diese verdeutlichen die starke Variabilität der Erosivität, die von Jahr zu Jahr und von Paar zu Paar auftritt. Die Steigung der durchgezogenen Linie entspricht dem räumlichen Skalierungsfaktor für R basierend auf RADOLAN. Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1-Linie.

5.3.3 Positionseffekte

Es wurden insgesamt 35.124 erosive Einzelereignisse beim Vergleich von 115 Ombrometermessungen mit den entsprechenden Radarpixeln einer 16-jährigen Zeitreihe festgestellt. Davon waren nur 57% sowohl auf Basis der Ombrometermessung als auch auf Basis der Radarmessung erosiv. Etwa 16% der Ereignisse wurden nur auf Basis der Radardaten und 27% nur auf Basis der Ombrometerdaten als erosiv eingestuft (Tab. 2). Die Erosivitäten R_e der Ereignisse, die nur auf punktueller Skala bzw. nur bei $1 \times 1 \text{ km}^2$ Skala erosiv waren, waren im Mittel $2,9 \text{ N h}^{-1}$ ($\text{SD} \pm 4,9 \text{ N h}^{-1}$) bzw. $2,9 \text{ N h}^{-1}$ ($\text{SD} \pm 5,6 \text{ N h}^{-1}$) stark, wiesen aber Maxima von 156 N h^{-1} bzw. 180 N h^{-1} auf. Dies bedeutet, dass im Einzelfall die Abweichung innerhalb eines Quadratkilometers durch die räumliche Heterogenität des Erosionsereignisses bis zum Zweifachen der Jahreserosivität betragen kann.

Für 74% der Ereignisse, die sowohl mit Ombrometer- als auch Radarmessung als erosiv eingestuft wurden (19.944 Ereignisse; Abb. 20), waren die Erosivitäten R_e berechnet mit punktuellen Niederschlagsmessungen höher als mit $1 \times 1 \text{ km}^2$ Radarmessungen berechnet

(Punkte oberhalb der 1:1-Linie in Abb. 20). Für diese Fälle wurde ein mittlerer Positionseffekt von 1,54 (95%-VB $\pm 0,01$) ermittelt. Für die umgekehrten Fälle, also Erosivität R_e auf Basis der Radardaten höher als auf Basis der Ombrometerdaten (Punkte unterhalb der 1:1-Linie in Abb. 20), ergab sich ein mittlerer Positionseffekt von 0,72 (95%-VB $\pm 0,01$).

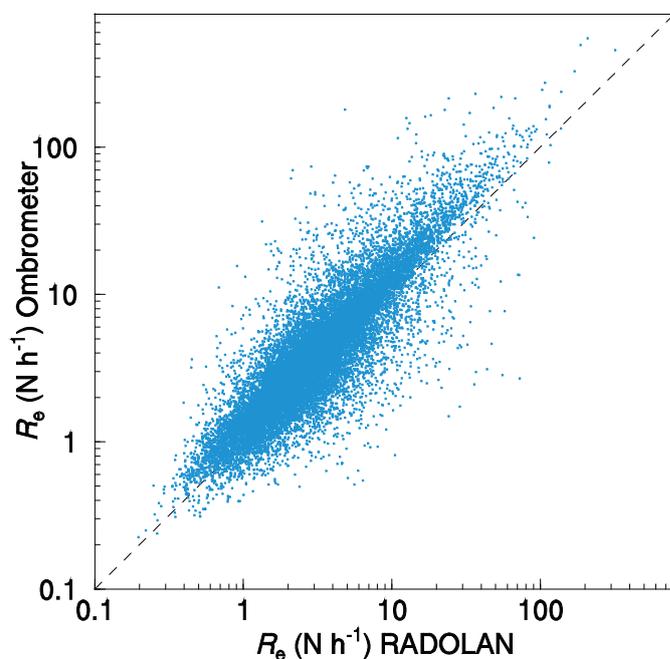


Abb. 20: Erosivitäten einzelner Ereignisse R_e basierend auf RADOLAN- und Ombrometerdaten für 19.944 Regenereignisse, die sowohl auf punktueller als auch auf $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Skala als erosiv eingestuft wurden. Die Achsen sind logarithmisch skaliert. Die gestrichelte Linie ist die 1:1-Linie.

Die Positionseffekte, die mit den RADOLAN-Daten ermittelt wurden, beinhalten auch den Methodeneffekt. Dennoch zeigte auch das dichte $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Messnetz der zwölf Ombrometer ähnlich starke Effekte für einzelne Ereignisse. Die erosiven Regenereignisse wiesen innerhalb der $1 \times 1 \text{ km}^2$ Fläche starke Gradienten auf. So registrierten benachbarte Ombrometer kein bzw. sehr starke Erosivitäten R_e für dasselbe Niederschlagsereignis (vgl. Rechteck in Abb. 21). Im Mittel variierten die Erosivitäten R_e der einzelnen Ombrometer für dieselbe Niederschlagszelle über der $1 \times 1 \text{ km}^2$ Fläche um 68%.

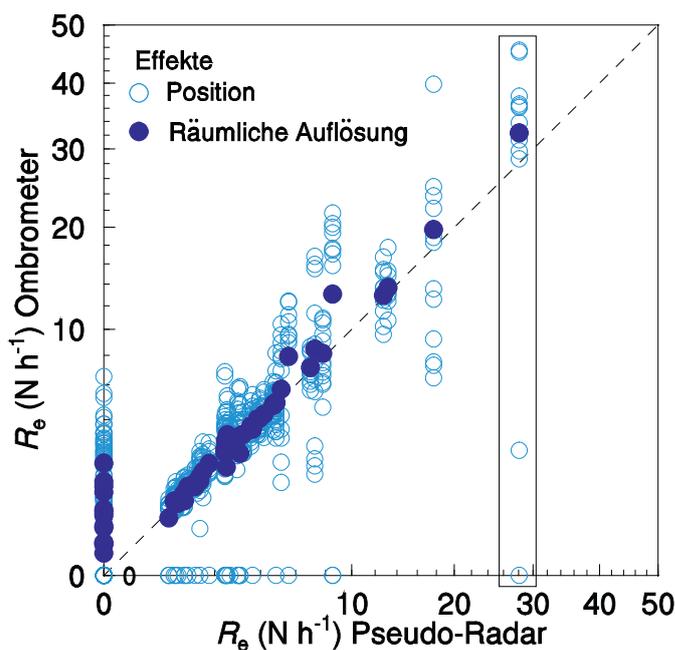


Abb. 21: Erosivitäten einzelner Regenereignisse R_e auf Basis der Pseudo-Radar-Daten und auf Basis der 12 Ombrometer. Dunkelblaue Punkte zeigen die Mittelwerte von R_e der 12 Ombrometer pro Regenereignis, das über dem $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Pixel registriert wurde. Die hellblauen Kreise zeigen R_e der einzelnen Ombrometer jeweils im Vergleich zu R_e des Pseudo-Radar-Pixels.

6 Diskussion

Die starken Gradienten der Regenerosivität, wie sie im ersten Teilprojekt aufgezeigt wurden, verdeutlichen die Notwendigkeit und auch den großen Vorteil der RADOLAN-Daten. Bisher konnten Erosivitäten auf Ereignisbasis noch nicht in diesem Umfang untersucht werden. Sehr dichte Ombrometermessnetze sind rar, da der Betriebsaufwand hoch ist und nur lange Zeitreihen ausreichend Ereignisse zur aussagekräftigen Interpretation liefern. Jedoch haben sowohl Teilprojekt 2 als auch 3 gezeigt, dass auch solche Messnetze zur Erfassung der hohen kleinräumigen Variabilität der erosiven Regen und der Erosivität wichtig sind.

Die großen Unterschiede zwischen der Ereigniserosivität R_e eines RADOLAN-Pixels und R_e eines darin befindlichen Ombrometers sind sowohl positiv als auch negativ und variieren von Ereignis zu Ereignis enorm. Diese Unterschiede sind nicht nur durch den Methodeneffekt verursacht. Ähnliche Ergebnisse lieferten auch die Auswertungen des manuell aggregierten Pseudo-Radar-Pixels und dessen Ombrometer. In nicht unerheblichen Anteilen aller Fälle waren Ereignisse auf Basis einer der beiden Messmethoden gar nicht erosiv. Jedoch waren die aufgezeichneten Erosivitäten der jeweils anderen Messmethode dann

meist schwach. Die hohe Variabilität innerhalb der $1 \times 1 \text{ km}^2$ -großen Pixel erklärt auch, weshalb die Schätzung der Abträge tatsächlicher Erosionsereignisse mit RADOLAN-Daten für Einzelfälle sehr unsicher war (Teilprojekt 2). Die Variabilität der berechneten Abträge innerhalb der einzelnen Abtragsklassen war enorm. Eine gute Übereinstimmung der visuell klassifizierten und berechneten Bodenabträge konnte erst durch die Vielzahl an Feldstücken erreicht werden.

Die gute Übereinstimmung der visuell klassifizierten und der berechneten Bodenabträge konnte die Gültigkeit der ABAG unter Verwendung der institutionell verfügbaren Daten aufzeigen. Es konnte kein Hinweis gefunden werden, dass die in Bayern verwendete Parametrisierung der Faktoren der ABAG einen gerichteten Fehler aufweist (eine Einschränkung hierzu deutet sich im Anhang 2 an).

Auf Grund der großen Variabilität innerhalb eines Radar-Pixels können sowohl RADOLAN-Daten zur Abschätzung der Bodenabträge als auch Erosionsklassifizierungen mit Luftbildern entweder nur für ein großes Untersuchungsgebiet oder für einen langen Zeitraum genutzt werden. Für Einzelereignisse hilft RADOLAN hingegen zum Auffinden von Gebieten mit aktuellen Erosionsereignissen oder zur groben Abschätzung der Bodenabträge unter Berücksichtigung des sehr weiten Schwankungsbereichs.

Da die ABAG jedoch vorrangig zur Prognose der langjährig mittleren Bodenabträge entwickelt wurde, sind vor allem die langjährig mittleren Erosivitäten von Bedeutung. Die berechneten Skalierungsfaktoren und die Anpassungen des $I_{\max 30}$ -Kriteriums sollten robust genug sein, um die Unterschätzung von R unter Verwendung der RADOLAN-Daten mit 60 min und $1 \times 1 \text{ km}^2$ Auflösung im Vergleich zu R der Ombrometer mit 1 min Auflösung zuverlässig zu kompensieren. Die Skalierungsfaktoren werden auch zukünftig von Bedeutung sein, da zum einen die Verwendung der 5-min YW-Daten zur Berechnung von R aufgrund des enormen Rechenaufwandes nicht sobald möglich sein wird. Zum anderen sind die Skalierungsfaktoren wichtig, da selbst durch technischen Fortschritt nur der Methodeneffekt, jedoch nicht der Effekt durch die räumliche Auflösung behoben werden kann. Das Projekt konnte somit insgesamt den Weg zur Neuberechnung der R-Faktoren auf Basis der RADOLAN-Daten bereiten. Die Auswertung und Interpretation der neuen R-Faktoren-Karte konnte im Rahmen der begrenzten Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden (siehe Anhang 1), ebenso nicht die Ermittlung des Jahresgangs der Regenerosivität auf Basis der RADOLAN-Daten (siehe Anhang 2). Letztere gehen in den C-Faktor ein und sind deshalb wichtig, um die relative Erosionsanfälligkeit verschiedener Kulturen und Fruchtfolgen richtig zu bewerten und entsprechend beraten zu können.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die radargestützte, flächendeckende Niederschlagsmessung bietet enorme Vorteile für die Erfassung der Regenerosivität. Diese Vorteile ergeben sich vor allem wegen der kleinen Ausdehnung und der starken Variabilität von erosiven Niederschlagszellen, die mit Ombrometermessungen nicht erfasst werden können. Daher wird die Auswertung der radargestützten Niederschlagsmessung zu einer wesentlich verbesserten und aktuelleren Karte der Regenerosivität führen. Dies wird in der Folge die Qualität der Erosionsprognosen wesentlich verbessern.

Gleichzeitig lässt sich mit der radargestützten Niederschlagsmessung auch der Jahresgang der Regenerosivität besser als bisher erfassen und bei sich änderndem Klima aktuell halten. Dies wird zu einer verbesserten Bewertung der Erosionsanfälligkeit verschiedener Kulturen, Bewirtschaftungsverfahren und Fruchtfolgen führen. Daraus ergibt sich eine verbesserte Erosionsschutzberatung.

Schließlich erlaubt die radargestützte Niederschlagsmessung auch eine Erosionsprognose für kurze Zeiträume, z.B. für eine gerade abgelaufene Vegetationsperiode („Hindcast“ statt „Forecast“). Die dafür notwendigen Modifizierungen des Berechnungsverfahrens wurden hier erstmals in Bayern (und in Deutschland) eingesetzt.

Bevor die radargestützte Niederschlagsmessung aber für die genannten Zwecke eingesetzt werden kann, musste der Einfluss der abweichenden Messmethode und der abweichenden räumlichen und zeitlichen Skalen der Messung im Vergleich zu konventionellen Niederschlagsschreiberaufzeichnungen bestimmt werden. Dabei ergab sich ein sehr großer Einfluss der beiden Skalen und der Messmethode. Dies ist bei der Auswertung der radargestützten Niederschlagsmessung zu berücksichtigen. Durch die hier erarbeiteten Korrekturfaktoren wird dies erstmals möglich. Wegen der grundsätzlichen Bedeutung und des starken Einflusses dieser Korrekturfaktoren, war sicherzustellen, dass diese Korrekturfaktoren wissenschaftlich abgesichert und akzeptiert sind. Daher wurde ein entsprechendes Manuskript bei einer führenden hydrologischen Zeitschrift eingereicht (Fischer et al., 2018). Erst als die Begutachtung abgeschlossen und damit das Verfahren zur Ermittlung der Korrekturfaktoren gesichert war, konnte darauf aufbauend, eine neue Karte der Regenerosivität und ein neuer Jahresgang der Regenerosivität berechnet werden. Diese können daher Teil II der Auflage „Radargestützte Erosionsprognose“ (Ebertseder et al., 2019b) entnommen werden.

Ebertseder et al. (2019) zeigten signifikante Änderungen gegenüber den bisherigen Planungsgrundlagen auf. Die Regenerosivität hat sich durch den Klimawandel gegenüber den jetzigen Planungsgrundlagen um etwa 60% erhöht. Dies bedeutet, dass auch der Bodenabtrag gegenüber den bisherigen Prognosen um 60% höher ist. Das Raummuster hat sich dagegen nicht geändert, kann nun aber stärker differenziert werden.

Der Jahresgang der Regenerosivität weist nun höhere Anteile in den Wintermonaten auf. Dies führt zu deutlich höheren prognostizierten Abträgen bei Kulturen, die im Winter nur wenig Bedeckung haben, wie z.B. der Winterweizen, für den sich die erwarteten Abträge etwa verdoppeln. Aber selbst für Reihenkulturen wie Mais dürften die Abträge höher sein als bisher erwartet, wenn die Winterperiode vor oder nach der Reihenkultur nicht durch Zwischenfrüchte geschützt ist. Da die meisten Kulturen – wenn auch unterschiedlich – schlechter eingestuft werden als bisher, erhöhen sich auch die C-Faktoren der Fruchtfolgen.

Der Vergleich der radargestützten Erosionsprognose mit Luftbildkartierungen von Erosionsschäden zeigte eine ausgezeichnete Übereinstimmung, wenn mehrere ähnliche Flächen gemittelt wurden, so dass die nicht erfassbare kleinräumige (< 1 km) Variabilität der Regenerosivität ausgeglichen wurde. Das an der Landesanstalt für Landwirtschaft installierte, auf der ABAG aufbauende Instrumentarium ist offenbar gut für eine Erosionsprognose geeignet. Es zeigte sich allerdings auch, dass die Anstrengungen der landwirtschaftlichen Praxis zur Erosionsminderung deutlich verstärkt werden müssen.

Literaturverzeichnis

Auerswald, K., 1985a. Beurteilung der Erosionsanfälligkeit von Mais bei unterschiedlichen Anbauverfahren. *Journal of Agronomy and Crop Science* 154, 45-55.

Auerswald, K., 1985b. Erosionsgefährdung unter Zuckerrüben und Sommergerste. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 155, 34-42.

Auerswald, K., 1986. Einstufung der Bodenerodibilität (K-Faktor) nach dem Klassenbeschrieb der Reichsbodenschätzung für Südbayern. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 27, 344-351.

Auerswald, K., 1991. Onsite- und Offsite-Schäden durch Bodenerosion. In: *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit*. Band 3. Bodenerosion. *Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 205, 76-81.

Auerswald, K., 1992. Verfeinerte Bewertung von Erosionsschutzmaßnahmen unter deutschen Anbaubedingungen mit dem P-Faktor der Allgemeinen Bodenabtrags (ABAG). *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* 33, 137-144.

Auerswald, K., Elhaus, D., 2013. Ableitung der Bodenerodierbarkeit K anhand der Bodenart. *Bodenschutz* 4, 109-113.

Auerswald, K., Elhaus, D., Martin, W., 2016a. Wassererodierbarkeit von Böden der Bodenart Sand (Ss). *Bodenschutz* 2, 42-45.

Auerswald, K., Kainz, M., 1998. Erosionsgefährdung (C-Faktor) durch Sonderkulturen. *Bodenschutz* 3, 98-100.

Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., Elhaus, D., 2014. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena* 118, 220-225. DOI: 10.1016/j.catena.2014.01.008.

Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., Elhaus, D., 2016b. Corrigendum to "Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling" [*Catena* 118 (2014) 220-225]. *Catena* 139, 271. DOI: 10.1016/j.catena.2015.05.026.

Auerswald, K., Fischer, F.K., Kistler, M., Treisch, M., Maier, H., Brandhuber, R., 2018. Behavior of farmers in regard to erosion by water as reflected by their farming practices. *Science of the Total Environment* 613-614, 1-9. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.003.

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. DOI: 10.5194/hess-23-1819-2019.

Bakker, M.M., Govers, G., Jones, R.A., Rounsevell M.D.A., 2007. The effect of soil erosion on Europe's crop yields. *Ecosystem* 10, 1209-1219. DOI: 10.1007/s10021-007-9090-3.

Bartels, H., Weigl, E., Reich, T., Lang, P., Wagner, A., Kohler, O., Gerlach, N., 2004. MeteoSolutions GmbH, Projekt RADOLAN: Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer) DWD. Verfügbar unter: http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LAWA/Vorhaben_des_ehemaligen_Ausschusses_Daten/DK_5.68/RADOLAN_Abschlussbericht_2006.pdf.

Brandhuber, R., Treisch, M., 2012. Bodenabtrag in Abhängigkeit von der Maisanbaufläche in Bayern: Vergleich 2005 mit 2011. Tagungsband zu den 7. Marktredwitzer Bodenschutztagen, S. 136-141.

Brandhuber, R., Treisch, M., Fischer, F., Kistler, M., Maier, H., Auerswald, K., 2017. Starkregen, Bodenabschwemmungen und Sturzfluten im Mai und Juni 2016: Landwirtschaft und Maisanbau. Dokumentation. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Agrarökologie, Freising.

Burt, T., Boardman, J., Foster, I., Howden, N., 2016. More rain, less soil: Long-term changes in rainfall intensity with climate change. *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 563-566.

Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., Smith, V.H., 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.*, 8, 559-568. DOI: 10.2307/2641247.

Chow, V.T., 1953. Frequency analysis of hydrologic data with special application to rainfall intensities. University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin 414. Verfügbar unter <http://hdl.handle.net/2142/4107>.

DIN – Deutsches Institut für Normierung, 2005. DIN 19708: 2005-02 Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Berlin, Germany.

Ebertseder, F., Fischer, F. K., Winterrath, T., Maier H., Brandhuber R., Auerswald, K., 2019. Radargestützte Erosionsprognose, Teil II Veränderungen der Regenerosivität seit 1970. LfL-Schriftenreihe (in Vorbereitung).

Fiener, P., Auerswald, K., 2009. Spatial variability of rainfall on a sub-kilometre scale. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 848-859.

-
- 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 resolved and adjusted radar rain data. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 72–80.
- Fischer, F., Kistler, M., Brandhuber, R., Maier, H., Treisch, M., Auerswald, K., 2018. Validation of official erosion modelling based on high-resolution radar rain data by aerial photo erosion classification. *Earth Surface Processes and Landforms* 43, 187–194. DOI: 10.1002/esp.4216.
- 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>.
- Flacke, W., Auerswald, K., Neufang, L., 1990. Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena* 17, 383–397.
- Kagerer, J., Auerswald, K., 1997. Erosionsprognose-Karten im Maßstab 1:5000 für Flurbereinigungsverfahren und Landwirtschaftsberatung. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau. Freising, Germany.
- Kistler, M., Brandhuber, R., Maier, H., 2013. Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen – Ergebnisse einer Feldstudie. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Schriftenreihe ISSN 1611-4159.
- Mal, P., Hesse, J.W., Schmitz, M., Garvert, H., 2015. Konservierende Bodenbearbeitung in Deutschland als Lösungsbeitrag gegen Bodenerosion. *Journal für Kulturpflanzen* 67, 310–319. DOI: 10.5073/JFK.2015.09.02.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In *Agriculture Handbook Issue 703*. US Department of Agriculture: Washington, DC.
- Rogler, H., Schwertmann, U., 1981. Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte Bayerns. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 22, 99–112.
- Schwertmann, U., Vogl, W., Kainz, M., 1990. *Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen*, 2. Auflage. Ulmer: Stuttgart.

Stewart, B.A., Wischmeier, W. H., Woolhiser, and others, 1975. Control of water pollution from cropland: Vol. I, a manual for guideline development; Vol. II, an overview. U.S. Department of Agriculture, ARS-H-5-1 and ARS-H-5-2.

Treich, M., Brandhuber, R., 2012. Neuberechnung des Erosionsatlas von Bayern. Tagungsband zu den 7. Marktredwitzer Bodenschutztagen, S. 185-189.

Uismedia. ArcGIS Tool zur Berechnung des L-Faktors, Benutzer-Handbuch - Version 1.0. Bad Schussenried.

Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2017. Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag. Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst, Offenbach/M.

Wischmeier, W.H., 1959. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. Soil Science Society of America Proceedings 23, 246–249.

Wischmeier, W.H., 1974. New developments in estimating water erosion. In: Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Soil Conservation Society of America, New York.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. In Agriculture Handbook, Issue 537. US Department of Agriculture: Washington, DC.

