

Tagungsbeitrag zu:

Jahrestagung der DBG/BGS, Kommission VI

Titel der Tagung:

„Erd-Reich und Boden-Landschaft“

Veranstalter:

BGS und DBG, August 2019, Bern

Erosionsatlas Hessen

*Klaus Friedrich¹, M. Schmanke¹,
B. Tetzlaff², T. Vorderbrügge¹*

Einleitung

In Hessen wird Bodenerosion vor allem durch Niederschlagswasser ausgelöst, während die Erosion durch Wind eine untergeordnete Rolle spielt. Die Hauptfaktoren, die zur Analyse von Bodenerosion durch Wasser betrachtet werden müssen, sind Klima, Topographie, Bodenzustand, Bodenbedeckung und Bodenbearbeitung.

Neben den „Abtragsprozessen durch Wasser, Wind oder Eis“ (Duttmann et al., 2011: 198) ist vor allem aber die Bearbeitungserosion zu nennen, der ein hoher Anteil an der heute vorliegenden Umverteilung von Bodensubstraten zuzuschreiben ist (Van Oost et al., 2006). Die Bodenkartierung in Hessen weist systematisch Erosions- und Akkumulationsböden aus, die einen hohen Zusammenhang insbesondere zu Prozessen der Bearbeitungserosion aufzeigen.

Die Bewertung der potenziellen Bodenerosion ist für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen eine wichtige Datengrundlage (Agrarumweltmaßnahmen, Anträge zu Grünlandumbruch, Bauleit- und Planfeststellungsverfahren, Beratung in der Wasser- und Landwirtschaft u.v.m). Der Bodenerosionsatlas Hessen 2018 löst die bisherigen landesweiten Einstu-

fungen der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser ab und bietet hochaufgelöste Szenarien für unterschiedliche Anbaukonstellationen auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche.

Datengrundlagen und Methodik

Um die Erosionsgefährdung auf Ackerflächen zu bewerten und somit eine Grundlage zur gezielten Bekämpfung von Bodenerosion zu erhalten, gibt es unterschiedliche Modelle. Ein weit verbreitetes, empirisches Erosionsmodell ist die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) nach Schwertmann et al. (1987), die aus der Universal Soil Loss Equation (USLE) von Wischmeyer & Smith (1978) hervorging. Mit der ABAG lässt sich ein „langjährig zu erwartender mittlerer, flächenhafter Bodenabtrag durch Regen“ abschätzen (DIN 19708), wobei folgende Einflussfaktoren in die Berechnung eingehen:

$$A = R * K * S * L * C * P$$

Für den Erosionsatlas Hessen wurden diese Faktoren bestimmt, der langjährig zu erwartende, mittlere Bodenabtrag berechnet und in Erosionsgefährdungsklassen eingestuft. Eine Ausnahme bildet der P-Faktor, der auf Grund fehlender Informationen über evtl. getroffene Erosionsschutzmaßnahmen (z. B. Konturpflügen oder Minimalbodenbearbeitung) für Ackerschläge nicht ermittelt werden konnte. Er geht mit dem Faktor 1 in die Berechnung ein.

Die Grundlage für die zu betrachtende Kulisse bildet eine Bodennutzungskategorisierung des „Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem“ (InVeKoS) von 2011 bis 2016 (alle gültig codierten Flächen). Hier wurden aneinandergrenzende Schläge zu einem Feldblock zusammengefasst. Durch Wege werden Feldblöcke immer getrennt. Auf dieser Flächenkulisse wurden die einzelnen oben genannten Erosionsfaktoren bestimmt. Veränderungen an der Abgrenzung der bewirtschafteten Schläge und

¹ Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden
Kontakt: klaus.friedrich@hlug.hessen.de

² Forschungszentrum Jülich, IBG 3,
Wilhelm Johnen Straße, 52428 Jülich

der angebauten Kulturen werden in zukünftigen Versionen berücksichtigt, können aber nicht jährlich fortgeschrieben werden.

Kartendarstellungen der einzelnen Faktoren und Szenarien sind im Bodenviewer Hessen unter der Rubrik "Erosionsatlas 2018" verfügbar.

R-Faktor

Der R-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) schätzt regional differenziert die Erosivität der Niederschläge. Niederschlag bewirkt durch seine Aufprallenergie eine Loslösung von Bodenpartikeln, die dann mit dem Oberflächenabfluss transportiert werden können (Schwertmann et al., 1987). Entscheidend sind dabei die Niederschlagsintensität und -menge. Nach Schwertmann et al. wird das Produkt aus der gemessenen, maximalen 30-minütigen Niederschlagsintensität und der Energie aller erosiver Regenereignisse (>10 mm) pro Jahr aufsummiert und ein langjähriges Mittel gebildet. Mit daraus abgeleiteten Regressionsgleichungen lässt sich der R-Faktor regionenspezifisch berechnen.

Die Berechnung in Hessen erfolgte mit einer Regressionsgleichung gemäß Verknüpfungsregel 3.11 Formel b der Methodendokumentation Bodenkunde (BGR, 2000). Als Niederschlagsinput für den R-Faktor wurden aus Niederschlagsmessstationen interpolierte Rasterdaten (1 x 1 km Raster) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Eingangsgröße ist der langjährige, mittlere Sommer-niederschlag (NSo in mm), gebildet aus den mittleren Monatsniederschlägen der Monate Mai bis Oktober.

$$R = 0,141 \cdot \text{NSo} - 1,48 \text{ [-]} \quad (r = 0,961)$$

Anschließend erfolgte eine Mittelwertbildung des R-Faktors für die aktuelle Gebietskulisse auf Gemarkungsebene.

K-Faktor

Der Bodenerodierbarkeitsfaktor (K-Faktor) wird nach den Gleichungen 3 bis 6 der DIN 19708 (2017) ermittelt. Die zur Verfügung stehenden Bodendaten der BFD50, 2. Auflage repräsentieren für den Grenzsichthorizont Bodenarten, Humusgehaltsstufen und Steingehaltsstufen. Für den K-Faktor wurden folgende Teilfaktoren bestimmt:

Kb der bodenartabhängige Anteil des K-Faktors

Kh der humusgehaltsabhängige Anteil des K-Faktors

Ks der grobbodenabhängige Anteil des K-Faktors

Die Bodenart, der Humus- und Grobbodengehalt (Grundlage für Kb, Kh und Ks) sind weitgehend statische Größen, während Aggregatgröße und die Wasserdurchlässigkeit des Oberbodens im Jahresverlauf sehr stark variieren. Für letztere liegen zeitlich und räumlich nur punktuelle Untersuchungen vor, so dass auf diese Parameter für eine landesweite Betrachtung verzichtet werden muss. Die Berechnung des K-Faktors in Hessen erfolgt somit durch:

$$K = K_b \cdot K_h \cdot K_s$$

Als Datengrundlage zur Berechnung des K-Faktors werden die flächendeckend vorliegenden Bodenflächendaten von Hessen 1 : 50.000 (BFD50, 2. Aufl.; HLNUG 2018) eingesetzt. Für jede Bodenflächeneinheit stehen hier Angaben zur Bodenart, Humus- und Grobbodengehaltsklasse zur Verfügung, die wie folgt nach den Kennwerttabellen und Formeln der DIN 19708 (2017) eingestuft werden. Sofern für die Bodeneinheit verfügbar, wird das Leitprofil für ackerbauliche Bodennutzung für die Berechnung des K-Faktors verwendet. Steht für die Bodeneinheit nur ein Bodenleitprofil für Grünland zur Verfügung, so wird dieses zur Berechnung herangezogen.

S-Faktor

Der S-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) beschreibt den Einfluss der Hangneigung auf das Erosionsgeschehen. Je steiler der Hang, desto früher setzt Oberflächenabfluss ein, der Bodenmaterial transportieren kann. Zudem erreicht das abfließende Wasser bei größerer Hangneigung eine höhere Fließgeschwindigkeit, was die Transportkapazität des Abflusses steigert. Somit sind steilere Hänge grundsätzlich durch eine höhere Erosionsgefahr gekennzeichnet als flachere.

Das hoch aufgelöste Digitale Geländemodell (DGM) zeigt aufgrund seiner Detailgenauigkeit mikromorphologische Strukturen wie bspw. Bearbeitungsspuren (i.d.R. Winteraufnahmen). Um diese zeitlich begrenzten mikromorphologischen Oberflächenformen auszugleichen, wurde das DGM einer Tiefpassfilterung unterzogen. Hierzu wurde mit Hilfe der Software SAGA, Version 2.0.4, der sog. Gauß-Filter auf das DGM angewendet, wobei die Einstellungen Standardabweichung 50, Suchmodus Kreis und Suchradius 2 gewählt wurden. Damit werden die kleinräumig heterogenen Bereiche gezielt geglättet ohne die grundsätzliche Oberflächenform zu verändern. Anschließend erfolgte die Berechnung des S-Faktors nach DIN 19708 (2017). Eingangsgröße ist die Hangneigung (α in Grad), die aus dem Digitalen Geländemodell Hessen (HVBG 2013) mit einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m abgeleitet wurde.

$$S = -1,5 + [17 / (1 + e^{2,3-6,1 \cdot \sin \alpha})]$$

L-Faktor

Der L-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) ist ein Maß für die Auswirkung der Hanglänge auf das Erosionsgeschehen. Bei langen Hängen ohne Abflussbarrieren sammelt sich im Hangverlauf mehr oberflächlich abfließendes Wasser. Die Abflussgeschwindigkeit erhöht sich ebenfalls. Durch beide

Effekte steigt die Transportkapazität des Abflusses und so auch die Erosionsgefahr mit zunehmender Hanglänge.

Die Berechnung des L-Faktors in Hessen erfolgte in Anlehnung an DIN 19708 (2017). Eingangsgröße ist die erosionswirksame Hanglänge l (in m). Diese Größe muss nach den definierten Kriterien der DIN im Gelände erhoben werden. Für eine landesweite Berechnung des L-Faktors wurde mittels GIS eine spezifische Hanglänge für jede Rasterzelle ermittelt und als alternative Eingangsgröße für die Modellierung verwendet. Hierzu wurde die Einzugsgebietsgröße jeder Rasterzelle aus dem Digitalen Geländemodell Hessen (HVBG (2013) mit einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 m² mit dem Algorithmus Deterministic-Infinity (TARBOTON, 1997) ermittelt. Dieser erlaubt die divergierenden- bzw. konvergierenden Abflussprozesse mit einzubeziehen. Als lokales Einzugsgebiet wurde der Flächenbereich bis zu einer Unterbrechung durch einen Weg, Straße u.a. definiert (Grundlage: InVeKoS). Aneinandergrenzende Schläge wurden zu einem Feldblock zusammengefasst. Die „spezifische Hanglänge“ ergibt sich aus der Einzugsgebietsgröße jeder Rasterzelle (hangaufwärts bis zur Abgrenzung des Feldblocks) durch Division mit der Seitenlänge der Rasterzelle von 5 m.

Der L-Faktor berechnet sich nach:

$$L = (0,046 \cdot l)^m$$

Der Hanglängenexponent m ist von der Hangneigung abhängig und nimmt bei einer Neigung α ab 4° den Wert 0,5 an. In flachem Gelände ergibt sich m aus $1,2 \cdot \sin \alpha^{1/3}$.

C-Faktor

Der Bewirtschaftungsfaktor „C“ der ABAG bewertet relativ die schützende Wirkung der Acker- und Grünlandvegetation für den Oberboden im Vergleich zu einem vegetationslosen Acker.

Tabelle 1: Kulturspezifische C-Faktoren

Quelle: zusammengestellt nach a Meyer (2000), b TLL (2007), c Nitsch et al. (2001) und d Stumpf & Auerswald (2006), weitere nach Expertenwissen abgeleitet - **Auszug**

angebauter Kultur gemäß InVeKoS	C-Faktor
Getreide	
Hartwinterweizen	0,10
Dinkel ^a	0,12
Winterweizen (Weichweizen) ^b	0,12
Sommerweizen (Weichweizen) einschließlich Hartweizen ^b	0,14
Roggen ^b	0,16
Sommergerste	0,17
Hafer	0,14
Mais	
Körnermais ^b	0,35
Silomais ^b	0,35
Leguminosen	
Gemüseerbsen ^b	0,20
Acker-, Puff- und Pferdebohnen zur Körnergewinnung	0,30
Ölsaaten	
Winterraps (00) und Winterrüben zur Körnergewinnung ^b	0,10
Sommerraps (00) und Sommerrüben zur Körnergewinnung ^b	0,10
Sonnenblumen zur Körnergewinnung	0,32
Sojabohnen	0,30
Ackerfutter	
Futterhackfrüchte (z. B. Futterrüben)	0,32
Klee ^b	0,03
Klee gras ^b	0,03
Luzerne ^b	0,03
Gras ^b	0,03
Klee-Luzerne-Gemisch ^b	0,03
Hackfrüchte	
Speisekartoffeln/sonstige Kartoffeln ^b	0,29
Zuckerrüben ^b	0,32
Sonderkulturen - Gartenbau	
Gemüse (Freiland)	0,24
Heil- und Gewürzpflanzen	0,32
Küchenkräuter	0,20
Artischocken	0,20
Sonderkulturen Baumschulen	
Kern- und Steinobst	0,03
Streuobst	0,03
Beerenobst	0,03
Sonstige Obstanlagen (z. B. Haselnuss, Holunder)	0,03
Baumschulen nicht für Beerenobst	0,03
Beerenobst zur Vermehrung	0,03
Weihnachtsbäume	0,13
Grünland	
Dauergrünland ^b	0,004
Grünland aus der Produktion genommen ^b	0,004

Hierbei wird zugrunde gelegt, dass Pflanzenbewuchs und Erntereste in Abhängigkeit von der Art der Bodenbearbeitung, der Fruchtfolge, der Vegetationsentwicklung und des Bedeckungsgrades die Aufprallenergie von Niederschlägen mildern und das Gefüge des Oberbodens stabilisiert.

Grundsätzlich wären somit bei einer landesweiten, flächenhaften Betrachtung die unterschiedlichen Vegetations- bzw. Entwicklungsphasen und der unterschiedliche Bodenbedeckungsgrad der einzelnen Ackerkulturen in den verschiedenen Regionen eines Landes bei der Bewertung zu berücksichtigen. Die hierfür benötigten Informationen liegen aber für eine landesweite, parzellenscharfe Auswertung nicht vor.

Das jeweilige System der Bodenbearbeitung (z. B. wendend oder nichtwendend) und Bodenbewirtschaftung (z. Bsp. Häufigkeit und Zeitpunkt der Befahrung) in Abhängigkeit von der angebauten Ackerfrucht bleibt aufgrund der landesweiten Betrachtung ebenfalls für die vorliegende Bewertung unberücksichtigt.

Die Berechnung des C-Faktors nach Schwertmann et al. (1987) erfordert grundsätzlich sehr detaillierte und raumzeitlich hochaufgelöste Informationen über die angebauten Kulturen und die Art der Bewirtschaftung und Bearbeitung. Informationen über die angebauten Ackerkulturen können der jährlich aktualisierten Schlagkartei (InVeKoS) entnommen werden. Vergleichbar mit den Studien von Meyer (2000) und TLL (2007) wurde den Ackerschlägen in Hessen ein kulturspezifischer C-Faktor (siehe Tab. 1) zugewiesen. Dabei wurde eine wendende Bodenbearbeitung angenommen.

Um eine langfristige Aussage treffen zu können, müssen die typischen Fruchtfolgen auf den Ackerschlägen bekannt sein. Dazu wurden die C-Faktoren der verfügbaren Einzeljahre 2011 bis 2016 gemittelt. Ackerschläge, für die keine

mindestens dreijährig ununterbrochene Zeitreihe verfügbar war, wird der Gemarkungsmittelwert der C-Faktoren für den genannten Zeitraum zugewiesen.

Für den Zeitraum von 2011 bis 2016 wurden im InVeKoS mehr als 250 verschiedene Kulturen angeführt. Die hohe Zahl an Kulturen ergibt sich zum einen durch die sogenannte Umcodierung innerhalb des InVeKoS während der Jahre 2011 bis 2016 (verschiedene Codes - gleiche Frucht). Zum anderen aber auch aus dem Bestreben heraus, auch für Kulturen, die nur auf wenigen Flächen in Hessen angebaut werden, einen C-Faktor bereit zu stellen. Für alle im InVeKoS angeführten Kulturen wird deshalb ein C-Faktor geführt.

Die Spanne des C-Faktors reicht von 0,004 (Dauergrünland) bis zu 0,66 (Spargel). Die C-Faktoren sind immer in Relation zu einer Schwarzbrache zu sehen. Ihr wird ein C-Faktor von 1,00 zugewiesen.

Über den Anbau bzw. den Ersatz von Kulturen mit hohem C-Faktor (Mais) durch Kulturen mit geringem C-Faktor (Wintergetreide) wird die Erosionsgefährdung bzw. der potenzielle Bodenabtrag stark beeinflusst. Um einen guten Eindruck über die Sensitivität des C-Faktors und die Wirkung eines Wechsels im Anbau bestimmter Kulturen zu erlangen, wurde die Erosionsgefährdung nach ABAG mit zwei Szenarien berechnet.

Auswertungsergebnisse zur Bodenerosionsgefährdung durch Wasser (ABAG)

Die Klassifikation der Bodenerosionsgefährdung (E) durch Wasser erfolgt gemäß DIN 19708 (2017) mit den Erosionsgefährdungsklassen „E0 - keine bis sehr gering“ bis „E6 - extrem hoch“. Allerdings wurde die höchste Klasse („E6 – extrem hoch“) nochmals in 3 Unterklassen (E6.1 bis E6.3) aufgeteilt, um auch in den Mittelgebirgsregionen für alle

Szenarien eine hohe visuelle Differenzierung zu gewährleisten.

Um die lokale und regionale Situation bewerten zu können und Auswirkungen unterschiedlicher Kulturen auf die Erodierbarkeit aufzuzeigen, wurden der potenzielle Bodenabtrag für die lokal spezifische Fruchtfolge, wie auch Szenarien für eine Reihenkultur (Mais) und eine Winterfrucht (Winterweizen) bestimmt.

Bodenabtrag auf Basis von Fruchtfolgen

Das Ergebnis in Abb. 1 (Hessen) und 2 (Ausschnitt) zeigt den langjährigen, mittleren Bodenabtrag in Form von Erosionsgefährdungsklassen bei wendender Bearbeitung und auf Basis einer Fruchtfolge. Als repräsentativer C-Faktor wurde der Mittelwert der C-Faktoren für die Bewirtschaftungsjahre 2011 bis 2016 verwendet. Bei Flächen, für die weniger als 3 Jahre Informationen zur angebauten Frucht vorliegen, wurde der Gemarkungsmittelwert für den angegebenen Zeitraum herangezogen.

Bei der Berechnung der Szenarien werden Änderungen in der Bewirtschaftung und den Anbaukulturen über die Jahre nicht erfasst. Hier werden spezifische Bewirtschaftungen mit jeweils einer Kultur betrachtet, um abschätzen zu können, wie sensitiv der Bodenabtrag von dieser abhängt. Es wurden Kultur-Szenarien mit hoher und geringer Erosionsneigung berechnet. Bei den Szenarien wurden neben den ackerbaulich genutzten Flächen auch Grünland und Sonderkulturen bewertet. Damit kann eine Umnutzung auf ihre Erosionsanfälligkeit interpretiert werden.

Bodenabtrag bei Maisanbau

Das Ergebnis in Abb. 3 zeigt den langjährigen, mittleren Bodenabtrag in Form von Erosionsgefährdungsklassen unter der Annahme, dass flächendeckend Mais angebaut wird. Flächenmäßig hat der Maisanbau in Hessen in den ver-

gangenen Jahren stetig zugenommen. Nach HSL (2018) ist eine Zunahme vom 29 % gegenüber 2010 zu verzeichnen. Der Maisanbau begünstigt in der Regel die Bodenerosion erheblich, was sich auch in einem hohen C-Faktor von 0,35 ausdrückt. Die Betrachtung des „Bewirtschaftungsszenario Maisanbau“ stellt hinsichtlich der Bodenerosionsgefährdung somit eine „worst-case“-Situation dar.

Bodenabtrag bei Winterweizenanbau

Das Ergebnis in Abbildung 4 zeigt den langjährigen, mittleren Bodenabtrag in Form von Erosionsgefährdungsklassen unter der Annahme, dass flächendeckend Winterweizen angebaut wird. Winterweizen repräsentiert mit 34% der Ackerfläche (HSL, 2018) eine in Hessen flächenmäßig weit verbreitete Ackerkultur und ist im Gegensatz zum Maisanbau deutlich weniger erosionsgefährdend (C-Faktor 0,12).

Die Szenarien bieten somit einen Einblick in die bewirtschaftungsbezogene Erosionsanfälligkeit. Beide Szenarien werden in der Beratung genutzt, um bspw. Risiken beim Umbruch von Grünland aufzuzeigen.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Bodenerosionsatlas Hessen ermöglicht eine landesweite, teilschlagspezifische Beurteilung der potenziellen Eroderbarkeit durch Wasser.

Die Ergebnisse geben die Standortrelationen gemäß den Geländeerfahrungen

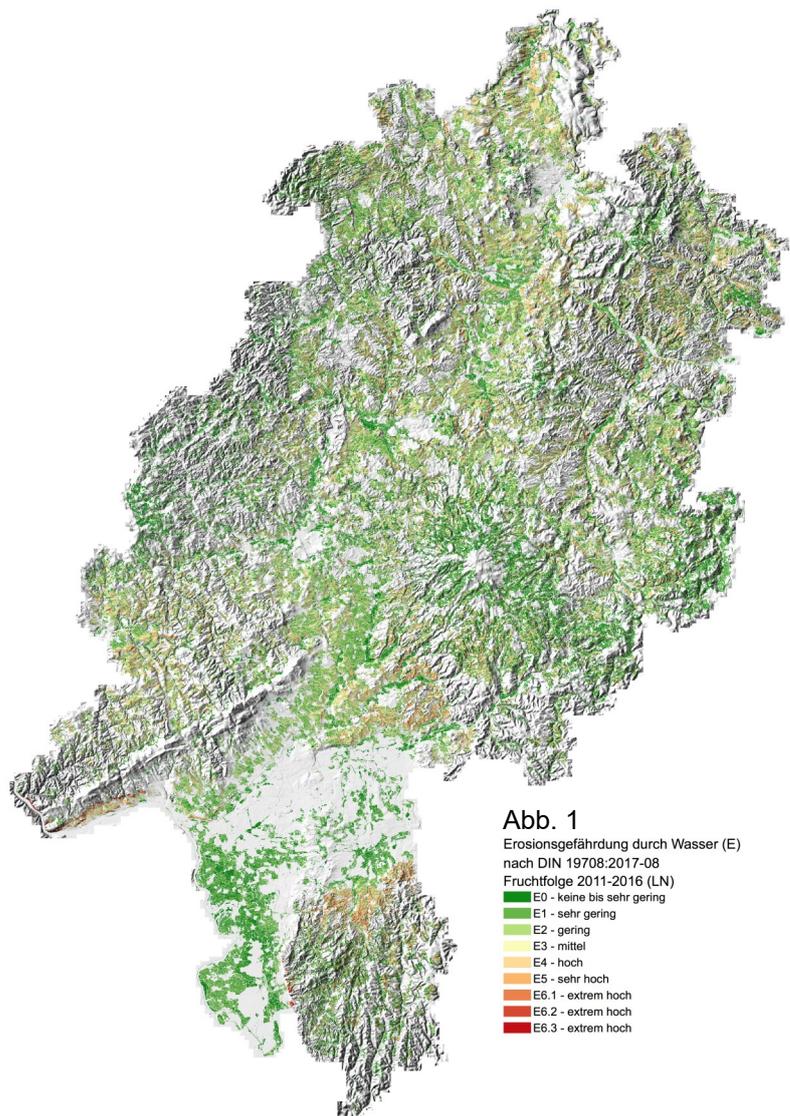


Abb. 1
Erosionsgefährdung durch Wasser (E)
nach DIN 19708:2017-08
Fruchtfolge 2011-2016 (LN)

- E0 - keine bis sehr gering
- E1 - sehr gering
- E2 - gering
- E3 - mittel
- E4 - hoch
- E5 - sehr hoch
- E6.1 - extrem hoch
- E6.2 - extrem hoch
- E6.3 - extrem hoch

wieder und sind anhand von Erosionsereignissen gut nachvollziehbar. Eine Messung von tatsächlichen Umlagerungen und eine Eichung z.B. der Höhe der berechneten Austräge liegt nicht vor. Die Daten eignen sich daher vorrangig für die Bewirtschaftungs- bzw. Erosionsberatung, Bewertung von Grünlandumbruch, Bildung von Kulissen für Umweltmaßnahmen und Kompensation, unterschiedliche Planungsfragestellungen u. a.

Zukünftig soll die Abgrenzung der Hanglänge noch verbessert werden. Dabei sollen Dauerkulturen bei der Be-



Abbildung 2: Erosionsgefährdung auf Grundlage der Fruchtfolge 2011-2016

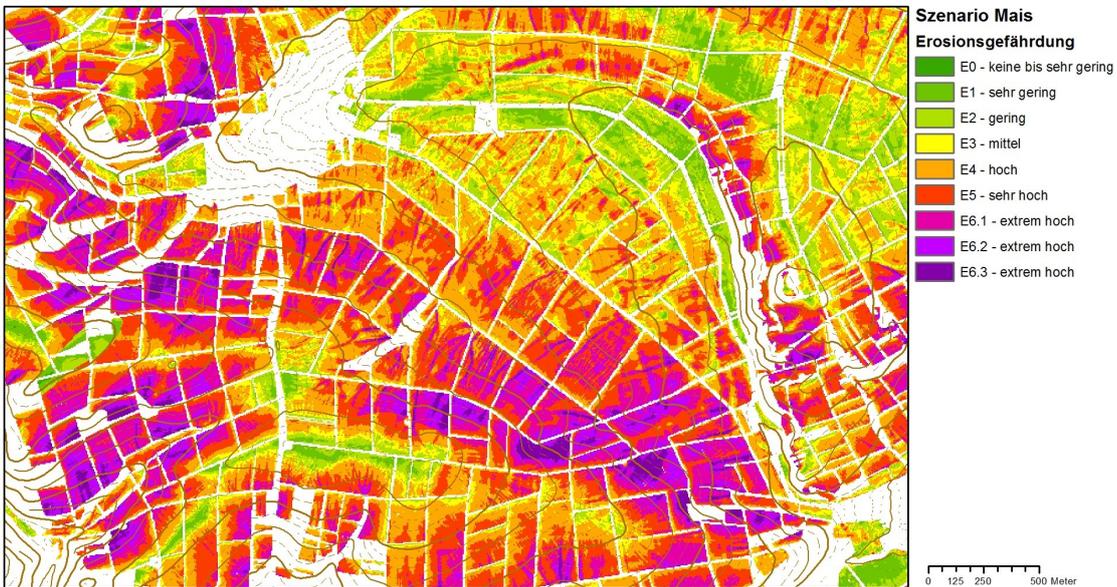


Abbildung 3: Erosionsgefährdung, Szenario Mais

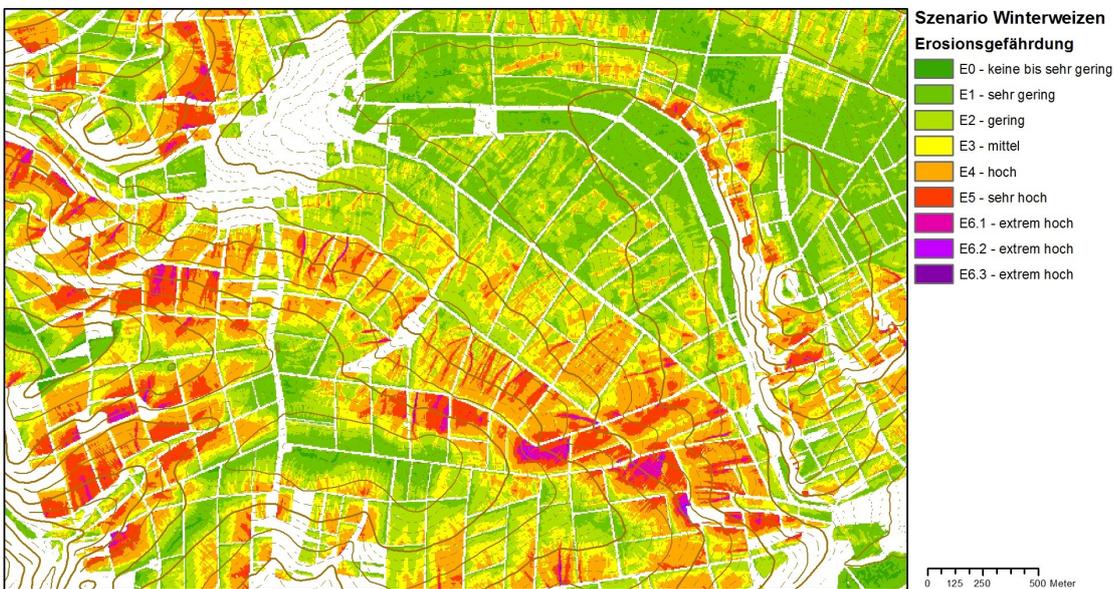


Abbildung 4: Erosionsgefährdung, Szenario Winterweizen

rechnung der Abflussbahnen Berücksichtigung finden. Der R-Faktor soll neu bearbeitet werden. Derzeit ist noch unklar ob eine Ableitung des R-Faktors aus Radolandaten substantiell geeignet ist.

Weiter Informationen sind im Internet verfügbar:

Dokumentation:

<https://www.hlnug.de/?id=8569>

MapApps:

<https://bodenviewer.hessen.de>

Geplante Dienste:

<https://www.hlnug.de/?id=537>

Schlüsselworte: Bodenerosion, Erosionsatlas, ABAG, Erosionsbewertung

Literatur

AUERSWALD, K. (1998): BODENEROSION DURCH WASSER. IN: RICHTER, G. [HRSG.]: Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems; Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2000): Methodendokumentation Bodenkunde. Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. 2. Aufl. Geologisches Jahrbuch Sonderhefte Reihe G - SG1; Stuttgart: Schweizerbart.

DIN 19708:2017-08 (2017): Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Deutsches Institut für Normung e.V.; Berlin.

DUTTMANN, R., BACH, M. & HERZIG, A. (2011): Bodenerosion durch Wasser. IN: BLUME, H.-P., HORN, R. & THIELE-BRUHN, S. [HRSG.]: Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung - Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Aufl.; Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

HLNUG, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2018).– Bodenflächendaten 1 : 50.000 Hessen (BFD50), 2. Aufl.; Wiesbaden.

HSL, Hessisches Statistisches Landesamt (2018): Bodennutzung in Hessen 2017; Wiesbaden.

HVBG (2013): ATKIS DGM5 - Digitales Geländemodell (Gitterweite 5 m); Datenstand 22.2.2013

MEYER, M. (2000): Entwicklung und Modellierung von Planungsszenarien für die Landnutzung im Gebiet der Bornhöveder Seenkette. Dissertation; Kiel.

NITSCH, J., NAST, M., PEHNT, M., TRIEB, F., RÖSCH, CH. & KOPFMÜLLER, J. (2001). Schlüsseltechnologie Regenerative Energien – Teilbericht im Rahmen des HGF-Projektes „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“. DLR-Inst. für Technische Thermodynamik und FZ Karlsruhe, Inst. f. Technikfolgenabschätzung.

SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & KAINZ, M. (1987): Bodenerosion durch Wasser; Stuttgart: Ulmer.

STUMPF, F. & AUERSWALD, K. (2006): Hochaufgelöste Erosionsprognosekarten von Bayern Wasserwirtschaft (7-8): 70-74.

TARBOTON, D. G. (1997): A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. In: Water Resources Research (2/33): 309-319.

TETZLAFF, B., FRIEDRICH, K., VORDERBRÜGGE, T., VERREECKEN, H. & WENDLAND, F. (2013): Distributed modelling of mean annual soil erosion and sediment delivery rates to surface waters. In: Catena 102 (1): 13–20.

TLL, THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2007): VERSTOLA Modellprojekt „Verminderung der Stoffaustragsgefahr durch Wassererosion von landwirtschaftlich genutzten Flächen“ (VERSTOLA-Projekt) der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL).

Toy, T. J., Foster, G. R. & Renard, K. G. (2002): Soil Erosion. Processes, Prediction, Measurement, and Control; New York: John Wiley & Sons.Ad

VAN OOST, K., GOVERS, G., DE ALBA, S. & QUINE, T. A. (2006): Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. – In: Progress in Physical Geography 30 (4): 443–466.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. In: U.S. Department of Agriculture [Hrsg.]: Agriculture Handbook. Bd. 537; Washington.