

Lineare Erosion in Niedersachsen – Ergebnisse einer elfjährigen Messreihe zu Ausmaß, kleinräumiger Verbreitung und Ursachen des Bodenabtrags

J. Bug und T. Mosimann

Rill erosion in Lower Saxony – results of an 11-year survey on the expansion, small-scale distribution and cause of soil erosion

1 Einleitung

Bodenerosion durch Wasser ist seit langem als Umweltproblem bekannt (LANG & BORK, 2006) und wird bereits seit den 1930er Jahren erforscht (BREBUDA & RICHTER, 1998). Der Prozess führt durch den Abtrag von Feinerde, den damit verbundenen Nährstoffverlust und die Abnahme der Gründigkeit zu einer Verringerung der Bodenfruchtbarkeit. Durch den Eintrag mobilisierter Feinerde werden auch benachbarte Flächen geschädigt. Bodenerosion trägt zur Verschlechterung des chemischen Zustandes von Gewäs-

sern bei und muss deshalb auch zur Einhaltung der EU-Wasserrahmenrichtlinie vermindert werden.

Zur Untersuchung der Abtragsmengen, der räumlichen Verbreitung, der spezifischen Ursachen, Folgen und der Variabilität der Erosion unter realer Bewirtschaftung wird seit dem Jahr 2000 in Niedersachsen im Rahmen der Bodenbauerbeobachtung ein Erosionsmonitoring durchgeführt (MOSIMANN et al., 2009). Die Felddaufnahme basiert auf dem DVWK-Merkblatt 239 (1996). Die Vermessung der Tiefe, Breite und Länge von Rillen, Rinnen und Gräben ermöglicht die Bestimmung der Ausräumvolumina von li-

Summary

Since 2000, for more than 11 years, the project “Long-term monitoring of erosion in Lower Saxony” has measured linear erosion. The rate of soil erosion, spatial distribution and the specific factors of linear erosion were documented. Rill erosion shows high spatial and temporal variability. One of the most important causes for temporal variability is the interaction between crops, soil cover and precipitation. The rate of linear soil erosion is higher in winter than in summer. A locally differentiated analysis shows that spatial variability within plots is mostly due to slope form and steepness and direction of tillage. This article presents the results of the 11-year study in detail and describes the implications for modeling and practice.

Key words: Soil erosion, erosion damage mapping, long-term monitoring, rill erosion.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Erosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen ist seit dem Jahr 2000 eine elfjährige Messreihe zur linearen Erosion entstanden. Diese dokumentiert das Ausmaß der Bodenabträge, die räumliche Verbreitung und die spezifischen Faktoren der linearen Erosion. Rillenerosion variiert in Raum und Zeit stark. Die wichtigste Ursache für die zeitliche Variabilität ergibt sich in erster Linie aus dem Zusammenspiel von Anbaukultur, Bodenbedeckung und Niederschlag. Die linearen Bodenabträge sind im Winter höher als im Sommer. Eine kleinräumig-differenzierte Auswertung der linearen Erosion zeigt, dass die räumliche Variabilität innerhalb von Parzellen sich vor allem auf die Hangform, die Neigung und die Bearbeitungsrichtung zurückführen lässt. Dieser Artikel stellt die Ergebnisse der elfjährigen Messreihe detailliert dar und fasst die wichtigsten Folgerungen für die Modellierung und die Praxis zusammen.

Schlagworte: Bodenerosion, Erosionsschadenskartierung, Langzeit-Monitoring, Rillenerosion.

nearen Formen und damit der Abtragsmengen. Bei der Dauerbeobachtung in Niedersachsen handelt es sich um die zeitlich und räumlich umfangreichste Erosionsmessreihe dieser Art in Deutschland (AUERSWALD et al., 2009). Die beobachtete Ackerfläche umfasst rund 400 ha, verteilt auf die drei Regionen Leinebergland, Uelzener Sandlössgebiet und Osnabrücker Land.

Erosionsformen lassen sich abhängig von ihrem Auftretismuster in flächenhafte, lineare und flächenhaft-lineare Formen unterteilen (MOSIMANN et al., 1991; BERNSTORF et al., 1995). Flächenhafte Abtragsformen werden an Verschlämmung, Abspülungen und an freigespülten Wurzeln bzw. Saatgut sowie am Auftreten von Kleinstrillen (Tiefe < 2 cm) erkannt. In die Kategorie „Lineare Erosionsformen“ (rill erosion) fallen Einzelformen, die durch Lateral- und Tiefenerosion entstehen und eine Tiefe von mehr als 2 cm aufweisen. Flächenhaft-linienhafte Abtragsformen sind lineare Formen, die auf einer Fläche häufig und regelmäßig verteilt auf kleinem Raum vorkommen. Darunter fallen parallel verlaufende Rillensysteme und fächerartige Systeme. Die Betrachtungen in diesem Beitrag fassen unter linearer Erosion alle Formen der linearen und der flächenhaft-linienhaften Erosion zusammen.

Die Formen der linearen Erosion führen zu sehr unterschiedlich hohen Bodenverlusten. Der Abtrag findet durch den konzentrierten Abfluss statt. Es gilt die einfache Regel: Je mehr Wasser abfließt, desto höher ist auch der Bodenabtrag. Abträge von 87,6 t/ha in England (FULLEN & REED, 1987), 90 t/ha in der Schweiz (MOSIMANN et al., 1991) oder 50 t/ha in Thüringen (STRAUCH et al., 2000) sind für Ereignisse auf einzelnen Parzellen dokumentiert. Wie hoch der Anteil der linearen Erosion am Gesamtabtrag ist, wird in der Literatur kontrovers diskutiert. AUERSWALD & WIEGAND (2001) stellen fest, dass zwischen den linearen Erosionsformen immer noch die Flächenerosion auftritt und diese wesentlich zum Gesamtabtrag beiträgt. Nach AUERSWALD & WIEGAND (2001) wird das Ausmaß des Gesamtabtrages vor allem durch die flächenhafte Erosion bestimmt. Dagegen belegen GOVERS & POESEN (1988) mit einer Literaturzusammenstellung, dass der Anteil des linearen Abtrages am Gesamtabtrag stark variabel, aber keineswegs zu vernachlässigen ist. So variieren die Anteile der linearen Erosion am Gesamtabtrag von 14 %–99 %. POESEN et al. (2003) haben eine ähnliche Literaturzusammenstellung für den Bodenabtrag in Rinnen und Gräben (ephemeral gully erosion) erstellt. Auch hier reicht die Spannweite des Anteils des Abtrages durch Rinnen- und Grabenerosion am Gesamtabtrag von 10–94 %. Dabei be-

ziehen sich die hohen Werte (> 65 %) zumeist auf Untersuchungsgebiete in subtropisch-tropischen Klimazonen. Angaben für Deutschland schwanken zwischen 12–29 % (AUERSWALD & WIEGAND 2001) und 0–76 % (FELDWISCH 1995). Aus den Untersuchungen von FELDWISCH (1995) wird deutlich, dass der Anteil der Rillenerosion mit steigendem Gefälle zunimmt. MEYER & HARMON (1985) stellen fest, dass auch mit wachsender Hanglänge die Bedeutung der Rillenerosion zunimmt. Vor allem bei extremen Niederschlagsereignissen und der Schneeschmelzerosion dominiert die Rillenerosion gegenüber der Flächenspülung. Insgesamt lässt sich festhalten, dass lineare Erosion zum Teil einen hohen Anteil der Gesamterosion erbringt. In Niedersachsen sind drei Viertel der kartierten Erosionsysteme durch linearen Abtrag geprägt. Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse der Dauerbeobachtung zur bedeutsamen linearen Erosion zusammen, bilanziert die Abtragsmengen und untersucht das Auftretismuster der Erosion. Insbesondere wird die zeitliche und räumliche Variabilität analysiert, um Rückschlüsse zur Prävention von Schäden durch lineare Erosion zu ziehen.

2 Methodik

2.1 Untersuchungsgebiete

Ausmaß und Ursachen der Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Niedersachsen werden seit 2000 auf fünf zusammenhängenden Referenzflächen von jeweils 33 bis 106 ha Größe erfasst. Daneben erstreckt sich die Beobachtung im Rahmen der Erfolgskontrolle von Schutzmaßnahmen auf ausgewählte Betriebsflächen in zwei weiteren Gebieten. Insgesamt erfasst die Dauerbeobachtung so rund 400 ha Ackerfläche mit 85 Einzelparzellen. Die Flächen repräsentieren die verschiedenen erosionsgefährdeten Gebiete mit Löss- und Sandlössbedeckung in Niedersachsen (CAPELLE & LÜDERS, 1985; CAPELLE, 1990). Die Gebiete unterscheiden sich in der Art des Lössmaterials, in den Relief- und Standorteigenschaften, in der Betriebsgrößen- und Parzellenstruktur (Tabelle 1) und zum Teil auch im Anteil konventioneller und konservierender Bewirtschaftungstechniken. Das Gebiet Barum (Landkreis Uelzen) befindet sich im nordniedersächsischen Sandlössgebiet. Das westniedersächsische Gebiet Küingdorf liegt im Ravensberger Hügelland ca. 30 km südöstlich von Osnabrück. Die Gebiete Klein Ilde, Nette, Lamspringe, Adenstedt und Brüggem (alle Landkreis Hildesheim) repräsentie-

Tabelle 1: Dauerbeobachtungsgebiete der Bodenerosion in Niedersachsen
 Table 1: Soil erosion monitoring areas in Lower Saxony

Gebiet	Größe [ha]	Anzahl Parzellen	Durchschnittliche Größe [ha]	Anteil konservierender Bodenbearbeitung (%)
Barum	142,7	23	6,2	20,8
Küingdorf	28,2	10	2,8	35,3
Nette	42,3	10	4,2	43,1
Klein Ilde	33,1	11	3,0	26,7
Lamspringe	146,5	12	12,2	47,2
Adenstedt	33,5	8	4,2	79,3
Brüggen	43,3	11	3,9	53,6

ren das südniedersächsische Berg- und Hügelland, das von Lössböden und mittleren bis hohen Hangneigungen geprägt ist.

2.2 Methodik der Erosionsbeobachtung

Erosionskartierungen haben eine lange Tradition. Ansätze eines institutionalisierten Monitorings der Bodenerosion gibt es jedoch erst seit den 1990er-Jahren (LESER & PRASUHN, 1990; MOSIMANN, 1994, 1998, 2003; PAGENKOPF et al., 1997; FRIELINGHAUS [Hrsg.], 1997; PRASUHN, 2004). Langfristige Beobachtungsreihen existieren bisher nur für zwei Gebiete in der Schweiz (OGERMANN et al., 2003, 2006; PRASUHN, 2011) und in Niedersachsen (MO-

SIMANN et al., 2009). Die niedersächsische Messreihe umfasst zurzeit elf Jahre und wird für mindestens fünf Jahre weitergeführt.

Die Dauerbeobachtung kombiniert die Erosionskartierung und -vermessung mit einer Bewirtschaftungsbefragung. Ein solches Vorgehen

- kann im Vergleich zu Plots große Flächen untersuchen (bis zu mehreren hundert Hektar), erfasst die Bodenerosion unter realer Bewirtschaftung,
- kann die flächenhaft-lineare Erosion und lineare Erosion präzise quantifizieren,
- berücksichtigt alle Erosionsursachen,
- analysiert die Erosionsprozesse parzellenübergreifend und
- ist wegen des begrenzten Zeitaufwandes und der vertretbaren Kosten langfristig durchführbar.

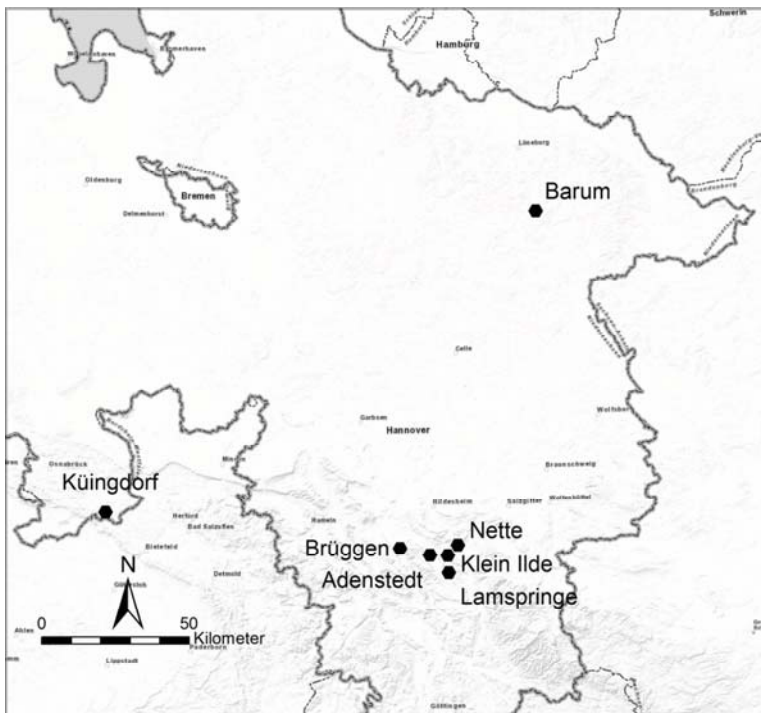


Abbildung 1: Lage der Untersuchungsgebiete in Niedersachsen (Kartengrundlage: USGS, ESRI, TANA, AND)

Figure 1: Location of the soil erosion monitoring areas

Erfassung der Wintererosion:

Das Erosionsgeschehen wird generell zum Ende der Frostperiode erfasst. Dabei werden die Bodenabträge durch Schneeschmelzerosion und Niederschläge in den Wintermonaten zusammengefasst.

Erfassung der Sommererosion:

Die Erosion in den Frühjahrs- und Sommermonaten wird direkt nach Niederschlagsereignissen mit einer Gesamtreghöhe von 30 mm und unabhängig von der Menge nach allen Regen, die deutliche Erosionsspuren verursachen, lagegenau auf den Parzellen kartiert. Meist finden zwei bis drei Kartierungen pro Jahr in den Monaten April bis Oktober statt.

Die Erfassung der linearen Erosion kann sowohl im Winter als auch im Sommer nahezu vollständig durchgeführt werden. Die Quantifizierung des Bodenabtrages erfolgt in Tonnen pro Hektar (t/ha) bzw. Tonnen pro Hektar und Jahr (t/ha*a).

Die parallel durchgeführte Bewirtschaftungsbefragung erfasst die agrartechnischen Randbedingungen auf den Referenzflächen sowie Daten zur Betriebsstruktur. Für die Bodenerosion wichtige Merkmale der Bewirtschaftung werden für die einzelnen Parzellenflächen von den Betriebsleitern erfragt. Neben den angebauten Kulturen steht die Erfassung der Bodenbearbeitungs- und Bestelltechniken (eingesetzte Maschinen und Verfahren) im Vordergrund. Alle Daten der Dauerbeobachtung fließen in die Datenbank NERODAT (Niedersächsische EROSIONS DATENbank) (MOSIMANN et al., 2009).

Die Dauerbeobachtung erfasst auch flächenhafte Erosionsformen in ihrer räumlichen Abgrenzung und differenziert drei spezifische Typen (Abspülung, Abspülung in Bearbeitungsspuren, Kleinstrillen). Darüber hinaus erfolgt die Bestimmung des Verschlammungsgrades der Flächen in Prozent. Eine Quantifizierung der Bodenabträge durch flächenhafte Erosionsformen ist mit der Methodik der Feldkartierung jedoch nicht möglich (AUERSWALD & WIEGAND, 2001), da die Mächtigkeit der abgetragenen Feinerdeschicht nicht bestimmt werden kann. Eine Bestimmung der flächenhaften Abträge erfolgt deshalb mit Hilfe von Modellierungen. Die ABAG (SCHWERTMANN et al., 1991) bietet sich dabei als Hilfsmittel an, da dieses Modell die flächenhaften Abträge bestimmt und die Modellergebnisse empirisch abgesichert sind. Obwohl es Zweifel an der Validität der Aussagen der ABAG in Europa gibt (JETTEN & FAVIS-MOTTLOCK, 2007), gilt das Modell aufgrund der umfangreichen Datenbasis gegenwärtig als das einzige Mo-

dell, mit dem der mittlere jährliche Bodenabtrag überregional vergleichbar geschätzt werden kann (BORK & SCHRÖDER, 1996).

2.3 Methodik der kleinräumig-differenzierten Auswertung der linearen Erosion

Zur räumlichen verbesserten Auswertung der linearen Erosion erfolgt die Analyse aller bislang kartierten Erosionsereignisse der Dauerbeobachtung mit GIS-Modulen, die

- die elfjährige Messreihe lagegetreu zusammenfassen,
- den Abtrag zusammenfassend berechnen,
- den Abtrag einzelner Formengruppen gesondert auswerten und
- die Häufigkeit des Auftretens aller Erosionsformen bestimmen.

Die größte Herausforderung bei der Analyse der linearen Formen und ihrer Abträge stellt der Flächenbezug dar. Bislang erfolgt die Auswertung der Bodenabträge durch lineare Formen immer auf Parzellenbasis. Für eine genauere Analyse der Ursachen und Folgen ist jedoch eine Untersuchung der durch Erosion direkt betroffenen Parzellenausschnitte vorteilhaft.

Kern der kleinräumig-differenzierten Analyse ist der Flächenbezug der linearen Bodenabträge. Der Bodenabtrag, der durch lineare Erosion entsteht, wird durch die jährliche Bodenbearbeitung, sei es mit oder ohne Pflug, beseitigt. Ansonsten würden sich die Spuren immer weiter vertiefen und über die Jahre die Bearbeitung stark einschränken. Bei Aussagen auf Parzellenbasis wird der Feinerdeverlust auf den Gesamtfläche bezogen. Diese bilanzierende Annahme entspricht nicht der Realität. Vielmehr kommt das Material zur Auffüllung der Formen zumeist aus der unmittelbaren Umgebung der Form. Lineare Erosionsformen führen also zu einer Verringerung der Mächtigkeit des Bodens in der unmittelbaren Umgebung der Form. Auf dieser Tatsache basiert die vorliegende Auswertung: Es wird angenommen, dass der Bodenverlust sich durch die Bodenbearbeitung auf die umliegenden 16 m der Form (jeweils 8 m links und rechts) gleichmäßig verteilt. Größere Rillen- und Rinnsysteme werden nach der Ernte durch den Einsatz des Grubbers (seltener durch den Pflug) beseitigt. Die Bezugsbreite von 16 m entspricht etwa 3 Bearbeitungsbreiten der in den Dauerbeobachtungsgebieten gängigen Grubber. Bei der Bearbeitung überlappen sich die Grubberspuren, sodass der Bodenverlust nicht nur dort auftritt, wo sich die Form

befindet, sondern auch in den beiden benachbarten Spuren. Die 16 m Breite der Bezugsfläche entspricht zudem der Ungenauigkeit bei der räumlichen Aufnahme mit GPS-Geräte. Da für die Aufnahmen der Formen keine DGPS-Geräte verwendet wurden, entspricht der mittlere Lagefehler aller Formen etwa 8 m.

3 Ergebnisse

Lineare Erosion unterliegt einer sehr großen zeitlichen und räumlichen Variabilität. Um diese Variabilität umfassend zu untersuchen, erfolgt die vorliegende Analyse deshalb auf verschiedenen Maßstabsebenen vom Gebiet bis zum Parzellenausschnitt. Die kleinräumig differenzierte Analyse der linearen Erosion weist auf lokale Schwerpunkte der linearen Erosionsaktivität hin und hilft damit die räumliche Variabilität des Prozesses genau zu erfassen. Grundlage ist ein Datenkollektiv von 85 Parzellen mit insgesamt 796 Parzellenmessjahren. Insgesamt wurden über 1200 einzelne Erosionssysteme auf Abtragungsmengen und die räumliche und zeitliche Verbreitung untersucht.

3.1 Mittelwerte, jährliche und jahreszeitliche Variabilität der linearen Erosion

Im Mittel beträgt der Bodenabtrag durch lineare Erosion auf allen Parzellen der Dauerbeobachtung 1,2 t/ha*a. Lineare Erosion tritt dabei im Schnitt fast jedes zweite Jahr auf (41 % der Messjahre). Der Bodenabtrag bezogen auf Jahre mit linearer Erosion liegt mit gut 2,9 t/ha*a dementsprechend deutlich höher. Die Bodenerosion unterliegt demnach einer großen zeitlichen Variabilität. Diese Variabilität resultiert aus der wechselnden Verteilung erosiver Niederschläge und der Fruchtfolge, was auch für andere Gebiete bestätigt wird (PRASUHN, 2011). Abbildung 3 illustriert diese Variabilität. Der obere Teil der Abbildung zeigt den mittleren jährlichen Abtrag von allen Abtragsbezugsparzellen der Erosionsdauerbeobachtung. Auf Jahre mit sehr hohen Abträgen, wie zum Beispiel 2000 oder 2007, folgen teils Jahre mit sehr geringen Abträgen. Als Hauptgrund für die Varianz zwischen den Jahren erweist sich die Verteilung der erosiven Niederschläge. Starkregen fallen in Jahren mit geringer Erosionsaktivität nur zu Zeitpunkten mit hoher Bodenbedeckung, wie in den Monaten Juli oder August. In einzelnen Jahren bleiben in Norddeutschland Starkregen



Abbildung 2: Typische Formen der linearen Erosion: Fahrgassenerosion (März 2007, Lamspringe) und Rinnenerosion in einer Tiefenlinie (März 2010, Barum)

Figure 2: Types of rill erosion: rill erosion in tractor tracks and thalweg erosion

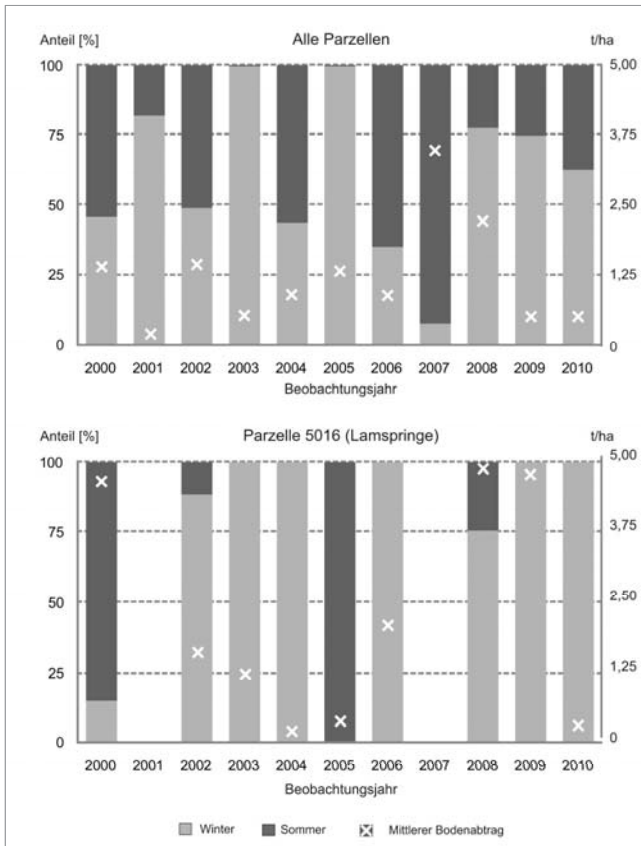


Abbildung 3: Durchschnittlicher Bodenabtrag und jahreszeitliche Verteilung der linearen Bodenabträge in Niedersachsen
 Figure 3: Soil erosion rates and seasonal variation of soil loss due to rill erosion in Lower Saxony

auch vollständig aus, der lineare Abtrag ist dann zu großen Teil auf die winterlichen Niederschläge bzw. die Schneeschmelze zurückzuführen (z. B. im Jahr 2003). Das Parzellenbeispiel im unteren Teil der Abbildung steht stellvertretend für Parzellen mit mittlerer Erosionsaktivität. Hier zeigt sich die zeitliche Variabilität der Gesamtabträge noch wesentlich deutlicher.

Jahreszeitlich variieren die linearen Bodenabträge stark. Im Mittel sind ca. 55 % der Bodenabträge auf Niederschläge im Winter bzw. auf die Schneeschmelze zurückzuführen. Dies widerspricht der gängigen Annahme, dass Bodenerosion vor allem im Frühjahr und Frühsommer auftritt (GOVERS, 1991).

Zwischen der absoluten Höhe der Abträge und der jahreszeitlichen Verteilung besteht nur ein Zusammenhang: In Jahren mit geringer Erosionsaktivität (2003, 2004, 2010) ist in der Regel der Anteil der Wintererosion hoch. Die um-

gekehrte Aussage ist jedoch nicht zulässig: Jahre mit einem hohem Anteil der Wintererosion am Gesamtabtrag weisen nicht generell geringe Erosionsaktivitäten auf (siehe z. B. das Jahr 2008). Lineare Erosion tritt im Winter regelmäßig, im Sommer jedoch eher unregelmäßig auf. Die Höhe der Abträge hängt nicht allein vom Zeitpunkt des Niederschlagsresultates ab, sondern wird von weiteren Faktoren, wie der Bodenfeuchte und der Bodenbedeckung, gesteuert.

Auf Einzelparzellenebene lassen sich ebenfalls keine allgemeinen Zusammenhänge zwischen dem Auftrittszeitpunkt und der Höhe der Bodenabträge feststellen. Allgemein gilt aber: Erosion tritt im Winter häufiger auf. Auf Parzelle 5016 fand in acht Jahren Abtrag im Winter, aber nur in vier Jahren Abtrag im Sommer statt. Lineare Erosionsformen entstehen also bevorzugt zum Zeitpunkt geringer Bodenbedeckung und weitgehend gesättigter Bodenwasserspeicher.

Ein Trend der Erosionsintensität lässt sich aus den Mittelwerten der Jahre 2000–2010 nicht ableiten. Die in Abbildung 4 dargestellten jahresaktuellen Mittelwerte zeigen ab dem Jahr 2003 einen annähernd konstanten mittleren jährlichen Bodenabtrag von 1,2 t/ha *a an. Einflüsse wie der zunehmende Anteil der konservierenden Bewirtschaftung spiegeln sich noch nicht in den Mittelwerten wider oder werden durch andere Effekte überprägt. Einen Einfluss des Klimawandels mit einer einhergehenden erhöhten Häufigkeit von Starkniederschlägen in Niedersachsen (ENGEL & MÜLLER, 2009) kann aufgrund des diskontinuierlichen Charakters der Bodenerosion nicht festgestellt werden. Weder die Häufigkeit von Starkregenereignissen noch die

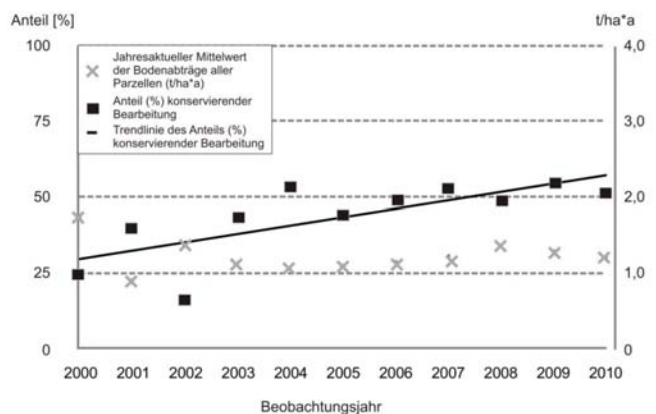


Abbildung 4: Bodenabträge und Entwicklung der konservierenden Bodenbearbeitung in Niedersachsen (2000–2010)
 Figure 4: Temporal variation of soil loss and the usage of conservation tillage systems in Lower Saxony (2000–2010)

Regenmengen sind in der letzten Dekade signifikant angestiegen.

Für die Bildung von validen Mittelwerten auf Parzellenbasis ist die elfjährige Messreihe wegen der starken jährlichen Schwankungen noch zu kurz (MOSIMANN et al., 2009). Die Mittelwerte hängen stark von Einzelereignissen mit hohen Abträgen oder auch von Phasen ohne Abtrag ab. Die bisherige Entwicklung der Standardabweichung lässt auf eine mindestens 15-jährige Dauer zur Bildung von validen Mittelwerten schließen.

3.2 Der Einfluss der Bewirtschaftung auf die lineare Erosion

Die Dauerbeobachtung zeigt immer wieder, dass Parzellen mit hohen Bodenabträgen in direkter Nachbarschaft von Parzellen ohne Erosionssysteme liegen. Die räumliche Variabilität der linearen Bodenabträge wird neben den Oberflächenformen vor allem von den Feldfrüchten und der Bodenbearbeitung bestimmt. Die beiden Einflussgrößen werden im Folgenden auf der Ebene der Parzellen betrachtet.

Tabelle 2 stellt die mittleren Bodenabträge für verschiedene Hauptkulturen und Bodenbearbeitungssysteme zusammen. Die höchsten mittleren Bodenabträge treten auf Parzellen mit Kartoffeln auf. Kartoffeln werden nur im nordniedersächsischen Gebiet Barum angebaut. Die Dammkultur begünstigt die Bildung von linearen Erosionsformen, da die meisten Schläge in Barum in Hangfallrichtung bewirtschaftet werden. Eine konservierende Bewirtschaftung funktioniert im Kartoffelanbau noch nicht richtig. Der Anbau erfolgt ausschließlich konventionell. Damit führt der Anbau von Kartoffeln im Norden Niedersachsens zu dreifach höheren Bodenabträgen als der Anbau von Ge-

treide (Mittelwert 1,5 t/ha*a im Gebiet Barum) oder der Zuckerrübe (Mittelwert 1,3 t/ha*a im Gebiet Barum).

Ähnliche mittlere Bodenabträge (0,9–1 t/ha*a) treten auf Parzellen mit Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste auf. Dieses Ergebnis überrascht hinsichtlich der Zuckerrübe. Sie gilt als besonders erosionsfördernde Anbaufrucht, da sie im beginnenden Zeitraum intensiver Starkregen den Boden wenig schützt. Wie bereits in Abschnitt 3.1 dargestellt, blieben Starkniederschläge im Frühjahr und Frühsommer in Niedersachsen in vielen Jahren aus. Die Abträge in den Wintermonaten und durch Schneeschmelze treten dadurch in der Datenreihe in den Vordergrund. Die Parzellen der Dauerbeobachtung mit der Hauptfrucht Zuckerrübe sind im Winter zu 85 % durch eine Zwischenfrucht, eine Stoppelbrache oder durch Mulch geschützt. Im Winter tritt auf diesen Parzellen daher nur sehr vereinzelt lineare Erosion auf. 83 % der auffallend geringen Bodenabträge bei der Zuckerrübe können auf Sommerniederschläge zurückgeführt werden. Neben den ausbleibenden Starkniederschlägen im Sommer ist der höhere Anteil konservierender Bearbeitungssysteme beim Anbau der Zuckerrübe im Vergleich zu anderen Feldfrüchten ein wichtiger Grund dafür. Gerade auf den besonders erosionsanfälligen Parzellen mit hohen Hangneigungen (> 5 %) und langen Fließstrecken (> 150 m) wird die Zuckerrübe zu über 90 % konservierend angebaut. Auf den weniger erosionsanfälligen Parzellen kommt der Pflug wesentlich häufiger zum Einsatz. Folgende Ergebnisse lassen sich für den linearen Bodenabtrag im Zuckerrübenanbau festhalten:

Der mittlere Bodenabtrag bei konservierender Bodenbearbeitung ist mit 1,1 t/ha*a doppelt so groß wie beim Winterweizen und 10-mal so groß wie bei der Wintergerste.

Die Abtragungswerte für Zuckerrübe beim Anbau mit Pflug basieren auf Parzellen mit geringer Erosionsgefährdung.

Tabelle 2: Mittlerer linearer Bodenabtrag in Abhängigkeit von Anbaukultur und Bodenbearbeitung (in kursiv sind die Hauptfrüchte dargestellt, die nur in einzelnen Gebieten angebaut werden)

Table 2: Soil loss due to rill erosion dependent on crop and tillage system

Hauptfrucht	Mittlerer Bodenabtrag [t/ha * a]	Parzellenmessjahre Pflug [a]	Anteil Pfluglose Bodenbearbeitung [%]	Mittlerer Bodenabtrag Pfluglos [t/ha * a]	Mittlerer Bodenabtrag Pflug [t/ha * a]
Winterweizen	0,9	385	39	0,6	1,2
Zuckerrübe	0,9	127	54	1,1	0,8
Wintergerste	1,0	116	6	0,1	1,1
Winterraps	0,5	73	26	0,3	0,5
<i>Kartoffel</i>	<i>4,2</i>	<i>33</i>	<i>0</i>	<i>k.A.</i>	<i>4,2</i>
<i>Futtermais (Silomais)</i>	<i>0,6</i>	<i>23</i>	<i>43</i>	<i>0,2</i>	<i>1,0</i>
Sonstiges	1,0	44	7	0	0,3

Die mittleren Bodenabträge beim Anbau der Zuckerrübe sind vergleichsweise gering, da auf den erosionsgefährdeten Flächen konservierende Anbausysteme dominieren.

Auf Parzellen mit Wintergetreide treten etwa zwei Drittel der Erosionsereignisse in den Wintermonaten auf. Diese führen zu 74 % der Bodenabträge auf Getreideparzellen. Für Nordwestdeutschland gilt also: Wintergetreide ist aufgrund der hohen Abträge in den Wintermonaten wesentlich erosionsfördernder als bislang angenommen. Gerste wird aufgrund von Fruchtfolgebedingten Einschränkungen fast ausschließlich konventionell angebaut. Dadurch fallen die mittleren Bodenabträge, trotz der besseren Bodenbedeckung durch den eher horstartigen Wuchs, ähnlich hoch wie beim Weizen aus. Durch einen vermehrten konservierenden Anbau von Gerste könnte der lineare Bodenabtrag vermutlich deutlich verringert werden. Nur durch den mit 39 % deutlich höheren Anteil an pflugloser Bearbeitung treten beim Weizen vergleichbare lineare Bodenabträge auf. Beim Anbau von Winterraps zeigen sich nur etwa halb so hohe Abtragsbeträge wie beim Wintergetreide. Raps schützt den Boden wesentlich besser vor linearer Erosion als Wintergetreide. Das liegt vor allem an dem bis zu 40 % höheren Bodenbedeckungsgrad dieser Frucht in den Wintermonaten.

Die Anbaufrucht Mais spielt in den Gebieten der Dauerbeobachtung bislang nur eine untergeordnete Rolle. In den ersten sechs Messjahren fand Maisanbau nur im westniedersächsischen Gebiet Küingdorf statt. Hier sind die Bodenabträge wegen der kleinparzellierten Struktur im Mittel geringer als in den anderen Gebieten (MOSIMANN et al., 2009). Erst in den letzten Jahren nimmt der Anbau auch in den anderen, klassischen Marktfruchtanbaugebieten zu. Der Hauptgrund für den Anstieg des Maisanbaus ist die Nutzung von Mais als Substrat für die Erzeugung von Energie aus Biogas. Diese Nutzung steht im Zusammenhang mit der Novellierung des EEG im Jahre 2004 (WEIDANZ & MOSIMANN, 2008) und führt zu teilweise erhöhten Bodenabträgen im südlichen, lössgeprägten niedersächsischen Berg- und Hügelland. Aussagen zur Höhe der Bodenabträge beim Maisanbau sind auf Grundlage der bisherigen Messreihe daher nicht zulässig.

Bei fast allen Feldfrüchten führt eine konservierende Bodenbearbeitung zu einer Verringerung des Bodenabtrags. Die um 10–30 % höhere Bodenbedeckung bei konservierender Bodenbearbeitung verringert also auch die lineare Erosion. Besonders effektiv zeigt sich diese Bearbeitungsvariante beim Anbau von Wintergerste und beim Winterweizen.

3.3 Abhängigkeit der linearen Erosion von Oberflächenformen und der durch Bewirtschaftung geschaffenen Oberflächenstrukturelemente

Die Faktoren Anbaufrucht und Bodenbearbeitung steuern die durchschnittlichen Gesamtabträge von Parzellen. Innerhalb der Parzellen zeigten sich aber auch große räumliche Unterschiede. Auf einzelnen Parzellen sind bestimmte Bereiche häufiger und stärker von linearem Abtrag betroffen als andere. Lineare Erosion findet in verschiedenen Formtypen statt. Erosion in Tiefenlinien, in Fahrspuren, in Vorgehenden und fächerartig sowie parallel verlaufende Erosionssysteme müssen differenziert werden. Der Formtyp gibt Hinweise auf die Entstehung der linearen Erosionsform. Aus diesem lassen sich auch Rückschlüsse zur Planung von Erosionsschutzmaßnahmen gewinnen.

Abbildung 5 illustriert die Bedeutung der verschiedenen Formtypen anhand ihrer Häufigkeit und ihrem Anteil am Gesamtbodenabtrag durch lineare Erosion.

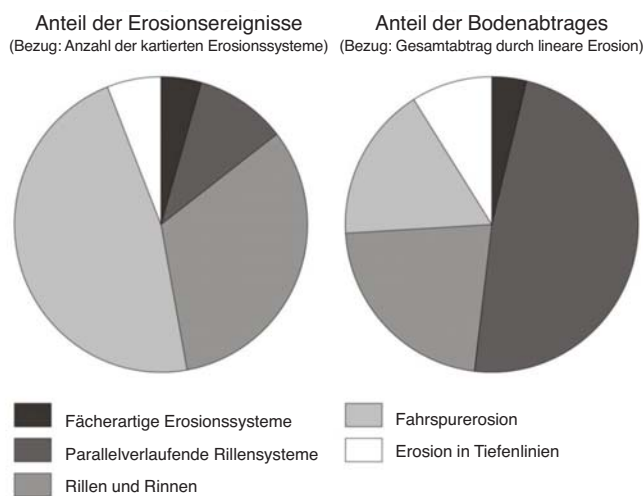


Abbildung 5: Bedeutung der linearen Formtypen und Anteile des Bodenabtrages in den verschiedenen linearen Erosionssystemen

Figure 5: Relevance of rill erosion types and their soil loss

Fahrspurenerosion

Am häufigsten tritt Rillenerosion in Fahrspuren auf. Alleine 286 der insgesamt 806 beobachteten Systeme gehören zu diesem Formtyp, bei einem Flächenanteil der Fahrspuren auf den Parzellen von nur 4 %. Abtrag in Fahrspuren tritt dementsprechend häufig auf. Die Abtragsbeträge sind aber

eher gering (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 4). Im Mittel führte ein Ereignis zu 0,3 t/ha Abtrag. Auch bei wenig intensiven Niederschlagsereignissen bündelt sich abfließendes Wasser in den Spuren, während auf der übrigen Fläche kein wirksamer Oberflächenabfluss stattfindet. Erosionsformen mit geringem Abfluss sind also bei diesem Formtyp überrepräsentiert, woraus sich die geringen mittleren Abträge erklären. In wenigen Fällen können die Bodenabträge durch Fahrspurerosion aber auch sehr hoch sein. Es wurden Maximalwerte von 4–12 t/ha gemessen. Trotz der meist geringen Einzelabträge ist Fahrspurerosion bedeutend. Auf einer Parzelle in Lamspringe wurden in 11 Jahren bislang 21 Ereignisse kartiert.

Rillenerosion tritt vor allem in Fahrspuren auf, die in Hangfallrichtung angelegt sind. Bei Bearbeitung in Hangfallrichtung dienen die Fahrspuren und Saatrillen als Leitbahnen für oberflächlich ablaufendes Wasser. Je höher die Hangneigung der Fahrspuren ist, desto regelmäßiger tritt in diesen auch Erosion auf und desto höher fallen die Bodenabträge aus. Die Bearbeitungsrichtung bestimmt also auch den Erosionsanteil durch Fahrspurerosion stark.

Erosion in parallelverlaufenden Bearbeitungsstrukturen

Sehr ähnliche Zusammenhänge präsentieren sich bei der Analyse der Formen mit parallelem Bodenabtrag in Rillen oder Rinnen. Darunter fällt der Abtrag in Saatrillen und in Dammkulturen. 83 % dieser Formen traten in Bereichen auf, die in Hangfallrichtung bewirtschaftet werden. Auch hier gilt die Regel: Je größer die Neigung, desto häufiger fand Abtrag statt. Im Unterschied zur Fahrspurerosion entstehen diese Formen zwar weniger regelmäßig, sie führen aber zu wesentlich höheren Abträgen. Die Rillen in Saatspuren oder zwischen Dämmen weisen im Mittel keine größere Tiefe oder Breite auf als Rillen in Fahrspuren. Der Grund für den höheren Abtrag ist die hohe räumliche Dichte der Formen. Auf der gleiche Fläche liegen etwa 10-mal mehr Kartoffeldämme bzw. bis 30-mal mehr Saatrillen als Fahrspuren.

Mit knapp 50 % am gesamten kartierten Abtrag ist dieser Formtyp für sehr hohe, räumlich aber begrenzte Abträge verantwortlich. Nur gezielte hangparallele Bewirtschaftung kann dieses verhindern.

Erosion im Vorgewende

Bei einer konsequenten Querbearbeitung der Parzellen haben jedoch die Vorgewende (Wendebereich bei der Bodenbearbeitung) eine Bearbeitungsrichtung in Falllinie.

Die Vorgewende in Hangfalllinie weisen meist eine hohe lineare Erosionsdisposition auf. Zusätzlich entsteht durch das häufige Wenden und Überfahren mit zum Teil schweren Maschinen mit der Zeit im Vorgewende eine Bodenschadverdichtung (VORDERBRÜGGE & BRUNOTTE, 2011). Einhergehend mit der Verdichtung sinkt die Infiltrationskapazität des Bodens in diesem Bereich der Parzelle. Dies löst verstärkte Erosion aus. Rund 28 % aller kartierten Ereignisse fanden ausschließlich im Vorgewende statt. Weitere 22 % traten sowohl im Vorgewende als auch im Hauptfeld auf. Die Vorgewende aller Parzellen nehmen dagegen lediglich 13 % der Gesamtfläche ein. 86 % der Abträge in Vorgewenden fanden dementsprechend auch in Vorgewenden statt, die in Hangfallrichtung bewirtschaftet werden.

Erosion in Tiefenlinien

Auf 16 der 85 Parzellen tritt Erosion in Tiefenlinien auf. In den elf Jahren der Erosionsdauerbeobachtung sind 82 Erosionssysteme in Tiefenlinien aufgenommen worden. Der Abtrag betrug im Durchschnitt 5,4 t pro System. Das sind 3,2 t mehr als der durchschnittliche Abtrag aller 806 bisher erfassten linearen Systeme. Der Abtrag durch Formen in Tiefenlinien ist also mehr als doppelt so groß wie der Abtrag aller linearen Formen. Der maximale Abtrag in einer einzelnen Form betrug 84 Tonnen. Von den zehn Formen mit den höchsten Abträgen befinden sich sechs in Tiefenlinien. Der Gesamtanteil der Formen in Tiefenlinien beträgt jedoch nur 13 %. Formen in Tiefenlinien führen also zu sehr hohen Abträgen, treten aber nur auf wenigen Parzellen auf. Dort haben sie aber eine große Bedeutung für die gesamte Erosionsdisposition

Die kleinräumig Differenzierung der linearen Erosion am Beispiel des Gebiets Barum

Die vorgestellten Erosionsformen treten in kleinräumlicher Differenzierung innerhalb der Parzellen und Hangeinzugsgebiete auf. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse einer kleinräumig-differenzierten Analyse für das Untersuchungsgebiet Barum. Etwa 40 % der Fläche, dieses relativ flachen mit Sandlöss bedeckten Gebietes, waren bislang von linearer Bodenerosion betroffen. Durch das regelmäßige Auftreten von flächenhaft-linienhaften Systemen ist aber auf einigen Parzellen eine beinahe flächendeckende Erosionsaktivität zu beobachten. Auf 6 der 22 Parzellen waren bislang mehr als 50 % der Flächen durch linearen Bodenabtrag betroffen.

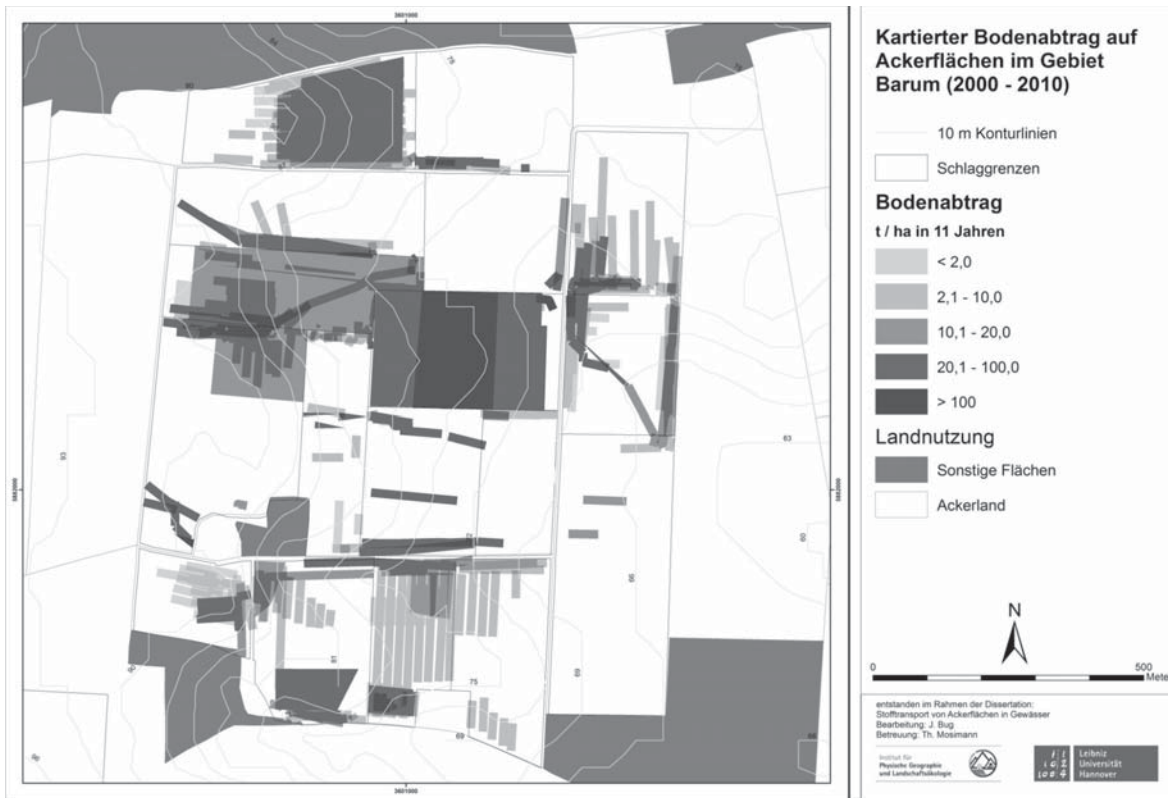


Abbildung 6: Kleinräumliche Differenzierung des Bodenabtrages im Gebiet Barum (2000–2010)
 Figure 6: Locally differentiated analysis of soil loss due to rill erosion in Barum (2000–2010)

Es zeigt sich also eine ausgeprägte räumliche Variabilität der linearen Erosion.

Das räumliche Muster der linearen Erosion zeigt die wichtigsten Ursachen für den Bodenabtrag: So ist die Parzelle im äußersten Nordosten des Gebietes sehr häufig von hohen Abträgen betroffen. Die Bearbeitungsrichtung verläuft in Hangfalllinie, sodass paralleler Bodenabtrag in Saatrillen und auch Fahrspurerosion immer wieder auftreten. Die beiden südlich angrenzenden Parzellen zeigen jeweils ein über die Parzelle schräg verlaufendes Erosionssystem. Hier tritt Bodenabtrag in Tiefenlinien auf. Ein Beispiel für erhöhte Abträge im Vorgewende liefern die drei südlichsten Parzellen. Das jeweils nördliche Vorgewende ist häufig von Bodenabtrag betroffen. Hier verläuft die Bearbeitung zwar schräg zur Falllinie, jedoch verläuft im Bereich der Vorgewende eine Tiefenlinie, die zu einer zusätzlichen Bündelung des oberflächlich abfließenden Wassers führt. Der Parzelle im Nordwesten des Gebietes ist kaum von Bodenabtrag betroffen. Lediglich am Südrand der Parzelle konnte lineare Erosion nachgewiesen werden. Die Formen entstanden auf

dem ansonsten sehr flachen Parzelle (mittlere Hangneigung 2 %) durch Zuschusswasser.

4 Diskussion

Die Analyse der Daten der Erosionsdauerbeobachtung zeigt, dass Bodenerosion auch in Niedersachsen zeitlich sehr variabel auftritt. Auf erosionsaktive Jahre folgen teilweise Jahre ohne Bodenabtrag. Dadurch ist eine langfristige Analyse des Prozesses wichtig, um ein realistisches Bild zur Höhe und räumlichen Auftretens der Bodenabträge zu gewinnen. Nur mit Langfristmessreihen lassen sich realistische Mittelwerte auf Schlagbasis bilden und Trends zum Erosionsgeschehen ableiten. Selbst elfjährige Messreihen werden noch stark von Einzelereignissen beeinflusst.

Ein wichtiges Ergebnis der zeitlichen Analyse der elfjährigen Messreihe in Niedersachsen ist der hohe Anteil des Bodenabtrages im Winter. Im Gegensatz zu gängigen Annahmen kann für Niedersachsen nachgewiesen werden,

dass über 55 % der Bodenabträge in den Monaten November bis März stattfinden. Parzellen mit Sommerfrüchten sind bislang also nicht erosionsaktiver als Parzellen mit Wintergetreide. Wenn die Sommerfrüchte konservierend, im Winterzustand mit Zwischenfrucht oder Mulch (> 30 % Bodenbedeckung) und entsprechend der guten fachlichen Praxis angebaut werden, bleiben die Bodenabträge mehrheitlich unter den Werten auf vergleichbaren Schlägen mit Wintergetreide.

Die Formtypanalyse zeigt, dass besonders hohe lineare Abträge durch Erosion in Tiefenlinien und durch Abtrag in hangabwärtsverlaufenden Saatrillen entstehen. Die räumliche Variabilität der linearen Erosion auf den Parzellen hängt stark vom Relief und der Bearbeitungsrichtung ab. Diese Erkenntnis gilt sowohl beim Vergleich der Parzellen untereinander als auch bei der Analyse innerhalb der Parzellen. In der Beratung muss dementsprechend der Landwirt mehr auf den Zusammenhang zwischen Hangformung und Bearbeitungsrichtung hingewiesen werden. Durch einfache Anpassungen der Bearbeitungsrichtung lassen sich hohe Bodenabträge gerade in Dammkulturen und in Tiefenlinien vermeiden. Für die Beratung müssen deshalb einfache Feldmethoden, z. B. in Form eines entscheidungsbasierten Schlüssels (MOSIMANN & SANDERS, 2004, MOSIMANN et al., 2007) zur Lokalisierung von Risikobereichen innerhalb von Ackerparzellen konzipiert werden, um lineare Erosion sinnvoll zu vermeiden.

Die lineare Erosion konzentriert sich auf etwa 25 % der beobachteten Fläche. Nur auf etwa 15 % der Parzellen der Dauerbeobachtung ist mehr als die Hälfte der Fläche von linearem Abtrag betroffen. Lineare Erosion tritt also räumlich konzentriert und immer wieder in den gleichen Bereichen auf. Die wichtigsten steuernden Faktoren sind die Hangneigung, die Hangform und die Bearbeitungsrichtung in Bezug auf die Hangfallrichtung.

5 Ausblick

Ein Monitoring liefert zunächst nur Erkenntnisse für die beobachtete Fläche und die Gegebenheiten auf dieser. Erst durch die Entwicklung und Anpassung von Modellen und die räumliche Übertragung kann das Potenzial einer Dauerbeobachtung genutzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erosionsmodelle stärker auf die Wintererosion ausgerichtet werden müssen. Gerade die ABAG zeigt die Tendenz zur Überschätzung der Sommererosion. Die Ergebnisse des Erosionsmonitoring können zudem in ein Modellbaustein

für die Schätzung der linearen Erosion in Tiefenlinien umgesetzt werden, der sich in die Erosionsabschätzung mit der ABAG einbetten lässt.

Die Erkenntnisse der kleinräumig-differenzierten Auswertung lassen künftig eine räumlich-hochauflösende Prognose der linearen Erosion zu. Durch die konkrete Prognose von Tiefenlinienerosion, Erosion in Fahrspuren, in Vorgewenden und Erosion durch Zuschusswasser dient dabei der Erstellung von Risikokarten. Damit wird innerhalb der Beratung eine gezielte und konzentrierte Planung von Erosionsschutzmaßnahmen möglich. Die beschränkten Mittel für den Bodenschutz sind effizienter und zielgerichteter einzusetzen.

In Anbetracht der prognostizierten höheren Winterniederschläge infolge des Klimawandels (ENGEL & MÜLLER, 2009) muss auch in der Beratung stärker auf die Eindämmung der Wintererosion hingewiesen werden. Zudem sollte die Erforschung von erosionsmindernden, z. B. konservierenden Bestellverfahren im Kartoffelanbau forciert werden. Auch die Erforschung der Wirkung von technischen Maßnahmen, wie der Anlage von Querrinnen und Einlaufschächten, auf die lineare Erosion ist ein weiteres Ziel.

Literatur

- AUERSWALD, K. & S. WIEGAND (2001): Ist die Erosionsschadenskartierung geeignet, um im Sinne der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung Erosionsflächen zu identifizieren und den Bodenabtrag festzustellen? *Bodenschutz*, H.4, 123–128.
- AUERSWALD, K., P. FIENER and R. DIKAU (2009): Rates of sheet and rill erosion in Germany – A meta-analysis. In: *Geomorphology* 111, 182–193.
- BERNSDORF, B., G. RICHTER and R.G. SCHMIDT (1995): Die Kartierung der Schneeschmelz-Erosion – Probleme und Möglichkeiten der Felderhebung. Forschungsstelle Bodenerosion. Universität Trier.
- BREBUDA & RICHTER (1998). Kurze Geschichte der Bodenerosion und ihrer Erforschung in Mitteleuropa. In: Richter, G. [Hrsg.]: *Bodenerosion. Analysen und Bilanz eines Umweltproblems*. Darmstadt, 21–30.
- BORK, H.-R. & A. SCHRÖDER (1996): Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. In: *Handbuch der Bodenkunde (Loseblatt-Ausgabe)*, Landsberg, Kap. 6.3.5.
- CAPELLE, A. (1990): Die erosionsgefährdete Landesfläche in Niedersachsen und Bremen. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 31, 11–17.

- CAPELLE, A. & R. LÜDERS (1985): Die potentielle Erosionsgefährdung der Böden in Niedersachsen. In: Göttinger Bodenkundliche Berichte, Bd. 83, 107–127.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSER- UND KULTURBAU E.V. (DVWK) (1998): Bodenerosion durch Wasser – Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen. DVWK-Merkblätter, 239, Bonn.
- ENGEL, N. & U. MÜLLER (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover.
- FELDWISCH, N. (1995): Hangneigung und Bodenerosion. Boden und Landschaft. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie, Bd. 3, Gießen.
- FRIELINGHAUS, M. [Hrsg.] (1997): Merkblätter zur Bodenerosion in Brandenburg. ZALF-Bericht Nr. 27, Münchenberg.
- FULLEN, M.A. & A.H. REED (1987): Rill erosion on arable loamy sands in the West Midlands of England. In: BRYAN, R.B. (ed.), Rill Erosion Processes and Significance. Catena Suppl., vol. 8, 85–96.
- GOVERS, G. (1991): Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. *Catena* 18, 133–155.
- GOVERS, G. & J. POESEN (1988): Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. In: *Geomorphology*, Bd. 1, 343–354.
- JETTEN, V. & D. FAVIS-MORTLOCK (2006) Modelling Soil Erosion in Europe. In: J. BOARDMAN & J. POESEN: Soil Erosion in Europe, 695–716.
- LANG, A. & H.R. BORK (2006): Past Soil Erosion in Europe. In: BOARDMAN, J. & J. POESEN: Soil erosion in Europe. Chichester, 465–478.
- LESER, H. & V. PRASUHN (1990): Möglichkeiten der Erosionsschadenskartierung im Felde und daraus entwickelte Schadens- und Gefährdungskarten. Überlegungen zu deren methodischen und arbeitstechnischen Prinzipien. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 61, 25–34.
- MEYER & HARMON (1985): Sediment losses from cropland furrows of different gradients. *Trans. ASAE*, 28: 448–453, 461.
- MOSIMANN, T. (1994): Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft. Aktueller Stand, Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, Thesen zur Erhaltung der Böden, Weiteres Vorgehen. Bau- und Umweltschutzdirektion des Kantons Basel-Landschaft [Hrsg.], Liestal.
- MOSIMANN, T. (1998): Bodenerosion im Bodenschutzvollzug. In: RICHTER, G. [Hrsg.]: Bodenerosion. Analysen und Bilanz eines Umweltproblems, Darmstadt, 171–184.
- MOSIMANN, T. (2003): Erosionsgefährdung und Schutz der Böden durch die Bewirtschaftung im Kanton Basel-Landschaft. Entwicklungstrends aus dem Monitoring 1982–2002 und Folgerungen für die Beratung. Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft [Hrsg.], Liestal.
- MOSIMANN, T. (2008): Wie gut wirken Erosionsschutzmaßnahmen, und was kann der Erosionsschutz noch erreichen? In FNL [Hrsg.] Heft 15/2008: Strategien zum Bodenschutz – Sachstand und Handlungsbedarf. Tagungsband zur Fachveranstaltung von ilu, GKB und KTBL am 5. und 6. Dezember 2007 in Bonn, 155–169.
- MOSIMANN, T., J. BUG, S. SANDERS und F. BEISIEGEL (2009): Bodenerosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen 2000–2008. *Geosynthesis* 14, Hannover.
- MOSIMANN & SANDERS (2004): Bodenerosion selber abschätzen – Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater, Ackerbaugebiete im südlichen Niedersachsen. Hannover.
- MOSIMANN, T. & H. WESTPHAL (2007): Einfluss von Klimaänderungen auf die Bodenerosion in Niedersachsen. Prognose der Bodenabträge 2000–2050 in den Modellgebieten Barum und Lamspringe. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.
- MOSIMANN, T., A. CROLE-REES, A. MAILLARD, J.A. NEYROUD, A. THÖNI und W. ROHR (1991): Bodenerosion im Schweizerischen Mittelland. Ausmaß und Gegenmaßnahmen. Nationales Forschungsprogramm „Nutzung des Bodens in der Schweiz“, Bd. 51, Liebefeld-Bern.
- PAGENKOPF, W., B. WINNIGE & M. FRIELINGHAUS (1997): Wassererosionspfade in der Landschaft. Aufnahme Informationsverarbeitung – Kartographie. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 83, 447–450.
- POESEN, J., J. NACHTERGAELE, G. VERSTRAETEN und C. VALENTIN (2003): Gully erosion and environmental change: importance and research needs. In: *Catena*, 50, 91–133.
- PRASUHN, V. (2004): Mapping of actual soil erosion in Switzerland. *Eurosoil* 2004, 4.–12.9.2004, Freiburg.
- PRASUHN, V. (2011): Soil erosion in the Swiss midlands: Results of a 10-year field survey. In: *Geomorphology* 126, 32–41.
- SCHWERTMANN, U., W. VOGL und M. KAINZ (1991): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl., Stuttgart.

- STRAUCH, D., J. BAADE & R. MÄUSBACHER (2000): Ausmaß und Ursachen der Tiefenlinienerosion im östlichen Thüringer Becken. In: BAADE et al. (Hrsg.): Neuere Beiträge zur geomorphologischen Prozessforschung. Jenaer Geographische Schriften 9: 81–94.
- WEIDANZ, J. & T. MOSIMANN (2008): Auswirkungen von Maisanbau zur Produktion von Biogas auf die Bodenerosion. In: Wasser und Abfall 7–8, 16–20.
- VORDERBRÜGGE, T. & J. BRUNOTTE (2011): Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) – Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur guten fachlichen Praxis. Landbauforschung vTI agriculture and forestry research, Band 61, Heft 1, Braunschweig.

Anschrift der Autoren

Dr. Jan Bug, Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 50, D-30167 Hannover
Tel.: +49 511.762-4490, Fax: +49 511.762-3984
bug@phygeo.uni-hannover.de

Prof. Dr. Thomas Mosimann, Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 50, D-30167 Hannover
Tel.: +49 511.762-4493, Fax: +49 511.762-3984
mosimann@phygeo.uni-hannover.de

Eingelangt am 13. Jänner 2012

Angenommen am 4. September 2012