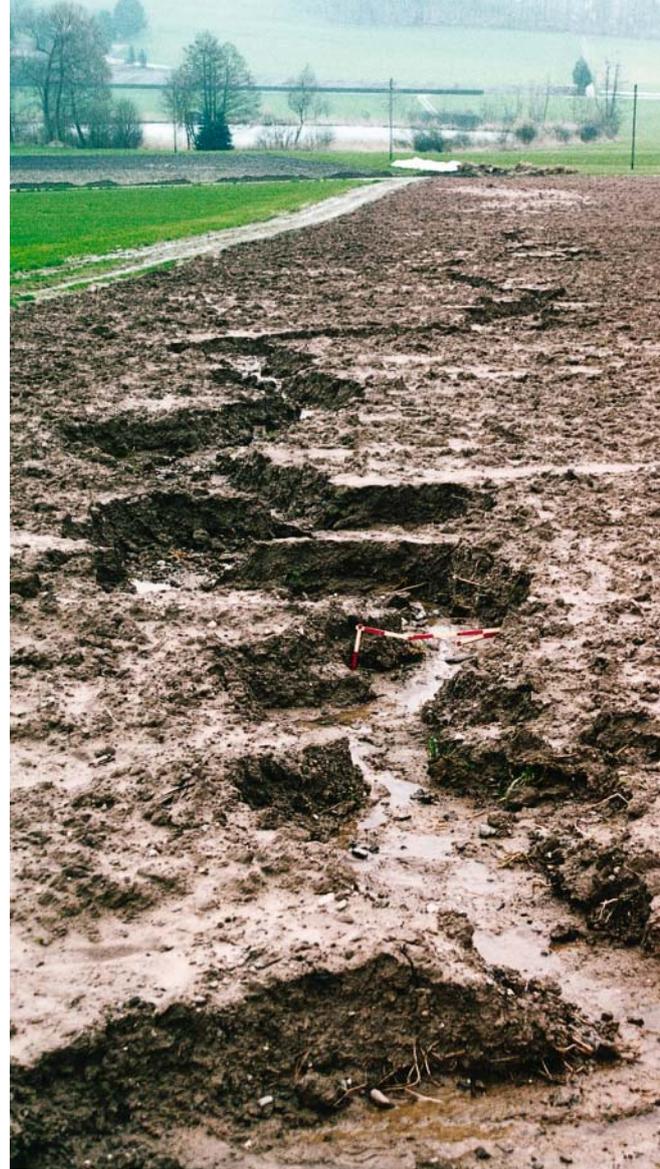


14 Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Erosion

Volker Prasuhn

Bodenerosion ist in intensiv genutzten Ackerbauregionen einer der bedeutendsten Phosphor-Eintragspfade in die Gewässer. In einem Testgebiet im Kanton Bern (Region Frienisberg) wurde versucht, die Wirkung der Ökomassnahmen durch ein Monitoring von Erosionsschäden, Landnutzung und Bodenbearbeitung sowie durch Modellrechnungen über verschiedene Zeiträume aufzuzeigen. Vor allem durch die Zunahme konservierender Bodenbearbeitungsverfahren und den vermehrten Anbau von Zwischenkulturen haben die Bodenabträge seit der Einführung der Ökomassnahmen um 15 bis maximal 25 % abgenommen. Das Ziel einer Reduktion der Phosphorausträge aus der Landwirtschaft um 50 % konnte dadurch aber nicht erreicht werden.

Abbildung 1:
Erosionsrinne in einem frisch bearbeiteten Feld. Ein Teil des Erosionsmaterials gelangte in den Lobsigensee (Foto: V. Prasuhn).



Unter Bodenerosion wird die Ablösung, der Transport und die Ablagerung von Bodenpartikeln verstanden. Sie wird durch Eingriffe des Menschen ermöglicht und durch Wasser (oder Wind) ausgelöst. Diese Bodenpartikel enthalten Phosphor (P) und können in die Gewässer gelangen (Abb. 1). P-Einträge durch Bodenerosion werden als eine der wichtigsten diffusen Eintragsquellen von Phosphor in die Oberflächengewässer angesehen (Behrendt *et al.* 1999). Vor allem auf Acker- und Rebflächen kann es zu anthropogen bedingter Bodenerosion kommen. Unter Grasland, Wald und unproduktiven Flächen ist dagegen eine Trennung zwischen anthropogenen und natürlichen Erosionsprozessen schwierig.

Mit dem ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) und den damit verbundenen Auflagen zum geeigneten Bodenschutz und zur geregelten Fruchtfolge sollten die P-Verluste durch Bodenerosion von Ackerflächen reduziert werden können. Auch die Anlage von ökologischen Ausgleichsflächen und ausgeglichene Phosphorbilanzen könnten einen positiven Effekt haben. Prasuhn *et al.* (1997) prognostizierten für das Berner Mittelland eine Reduktion der P-Belastung durch Bodenerosion von 35 % für das Jahr 2000 gegenüber Anfang der 1990er Jahre. Braun *et al.* (1997) schätzten den Reduktionswert für das Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der grossen Seen auf 37 % gegenüber Mitte der 1980er Jahre, falls verschiedene Massnahmen, die den Anforderungen des ÖLN nahe kommen, realisiert würden.

Als Testgebiet zur Überprüfung der Wirkung des ÖLN auf das Ausmass der P-Belastung der Gewässer durch Erosion wurde die Region Frienisberg (Kt. Bern) gewählt, wo die Untersuchungen für das «Nationale Forschungsprogramm Boden» (NFP 22) stattgefunden haben. Hier liegen Ergebnisse von Erosionsmessungen, Erosionsschadenskartierungen, Landnutzungskartierungen und Betriebsbefragungen aus der Periode 1987–89 vor (Mosi-*mann et al.* 1990, 1991). Alle dargestellten Resultate beziehen sich auf dieses Testgebiet.

Volker Prasuhn,
Agroscope
FAL Reckenholz,
Reckenholzstr. 191,
CH-8046 Zürich

Methodik

Das methodische Konzept wurde ausführlich von Prasuhn und Grünig (2001) beschrieben. Da die Messung des partikulären Phosphors, der aus der Erosion von Ackerflächen stammt, im Gewässer problematisch ist, wird das Ausmass des Bodenabtrages bzw. die Erosionsgefährdung von Ackerflächen im Folgenden als Indikator für die potenzielle Gewässerbelastung mit Phosphor verwendet.

Von 1998 bis 2004 wurden ereignisbezogene, flächendeckende Erosionsschadenskartierungen durchgeführt und mit den Resultaten der nach dem gleichen Verfahren erfolgten Kartierungen der Periode 1987–89 verglichen. Zusätzlich erfolgten Modellberechnungen zur Erosionsgefährdung für dieselben Perioden, um Veränderungen aufzuzeigen. Ausserdem wurden die Ergebnisse der Kartierungen und Modellberechnungen verglichen.

Das Untersuchungsgebiet liegt im zentralen Berner Mittelland zwischen Aarberg und Lyss. Es umfasst fünf Teilgebiete (Frienisberg, Seedorf, Lobsigen, Suberg, Schwanden). Eine Zusammenstellung der wichtigsten Angaben zur Charakterisierung des Gebietes findet sich in Tabelle 1. Die Anzahl Ackerparzellen ging um rund 20 % zurück. Dadurch stieg die durchschnittliche Parzellengrösse zwischen 1987 und 2004 von rund 1 ha auf knapp 1,3 ha. Die Beteiligung der Betriebe am ÖLN liegt seit 1998 bei 90 % aller Betriebe (77 % der Ackerfläche). Zwei Betriebe bewirtschaften ihre Fläche biologisch (3,5 % der Ackerfläche) und fünf konventionell (23,5 % der Ackerfläche). Alle fünf konventionellen Betriebe sind nicht beitragsberechtigt.

Die Böden sind als mässig erosionsanfällig einzustufen. Die Hangneigungen der Ackerparzellen sind relativ hoch, die Hanglängen aufgrund der kleinen Parzellen eher gering. Das Gebiet ist kleinräumig stark reliefiert, so dass Geländemulden auch auf Ackerflächen häufig auftreten.

Tabelle 1. Gebietscharakterisierung des Testgebiets Frienisberg

Gebietshöhe	475–720 m.ü.M.
Gebietsgrösse	360 ha
Anz. Betriebe mit Parzellen im Gebiet	52
Mittlere Betriebsgrösse (2003)	16,7 ha
Mittlerer Jahresniederschlag	1035–1150 mm
Erosivität (R-Faktor)	80–90 Newton/h
Böden (Ackerland)	Braunerden, Parabraunerden
Textur	sandige Lehme
Mittlere Erodibilität (K-Faktoren)	0,033 kg h/Newton m ²
Spannweite Erodibilität	0,017–0,042
Neigung Ackerparzellen	
Mittelwert	6,5 %
Spannweite	1–25 %
Hanglänge Ackerparzellen	
Mittelwert	68 m
Spannweite	5–210 m

Veränderung der Landnutzung und Bewirtschaftung

Im Jahr 2004 wurden knapp 5 % (13 ha) der Ackerfläche von 1987–89 nicht mehr ackerbaulich genutzt. Davon wurden zwei Drittel in Naturwiesen, der Rest in ökologische Ausgleichsflächen oder Garten- und Obstanlagen umgewandelt. Ein kleiner Teil wurde überbaut. Im gleichen Zeitraum wurden aber auch 3 ha Naturwiese umgebrochen. Im Vergleich zur Periode 1987–89 ging der Anbau von Kartoffeln zurück, was auf den gestiegenen Preis- und Kostendruck zurückzuführen ist (Tab. 2). Die Fläche der Zuckerrüben hat zugenommen, und beim Getreide wurde anstelle von Winterweizen und Wintergerste häufiger Triticale, Dinkel und Sommergetreide angebaut. Der Anteil an Hackfrüchten (gemessen an der Ackerfläche 1987–1989) hat insgesamt von 39 % auf 36 % abgenommen.

Die Winterbedeckung hat deutlich zugenommen (Tab. 2). Der Anteil an Schwarzbrache hat sich zwischen 1987–89 und 1998–2004 markant verringert. Die Fläche an Zwischenkulturen hat sich bis 2004 verdreifacht.

Konservierende Bodenbearbeitungsverfahren haben seit 1987–89, als rund 95 % aller Flächen konventionell mit dem Pflug bearbeitet wurden, deutlich zugenommen (Tab. 2). Pfluglose Anbauverfahren wurden in der Periode 1998–2004 auf rund 40 % der Ackerfläche eingesetzt. Vor allem in den letzten Jahren hat es eine starke Zunahme konservierender Bodenbearbeitungsverfahren gegeben, wie die Entwicklung bei Mais und Zuckerrüben zeigt (Abb. 2). Dieser Flächenanteil ist bezogen auf die gesamte Schweiz überproportional hoch, da konservierende Bodenbearbeitungsverfahren im Kanton Bern speziell propagiert und finanziell gefördert werden. Die vertraglich finanziell unterstützte Fläche im Untersuchungsgebiet betrug 2004 38 ha (14 % der gesamten Ackerfläche).

Tabelle 2. Vergleich der Landnutzung und Bewirtschaftung in den Perioden 1987–89 und 1998–2004 im Testgebiet Frienisberg

	1987–1989	1998–2004
Parzellen Ackerland (Anzahl)	259	211
Ackerland inklusive Kunstwiese (ha)	276	267
Mittlere Flächengrösse Anbauparzellen (ha)	1,06	1,27
Sommerkulturen (%)		
Weizen	25	22
Gerste	9	9
Mais	17	16
Zuckerrüben	12	14
Kartoffeln	10	7
Kunstwiese	20	21
Übriges	7	11
Winternutzung (%)		
Wintergetreide	34	38
Kunstwiesen (inkl. 1-jährige)	34	38
Zwischenkulturen	5	15
Stoppelbrache	5	5
Schwarzbrache	22	4
Bodenbearbeitung (%) (Hauptkulturen ohne Kunstwiese)		
Pflug	95 ¹⁾	61
Pfluglos ohne ausreichende Mulchbedeckung	5 ¹⁾	23
Mulchsaat	0	5
Streifenfrässaat	0	4
Direktsaat	0	7

¹⁾ Schätzwerte

Ergebnisse der Erosionsschadenskartierungen

Die Kartierung aller sichtbaren Erosionsformen erfolgte in Anlehnung an bestehende Kartieranleitungen (Prasuhn und Grünig 2001, Prasuhn 2004). In den sieben Jahren zwischen 1998 und 2004 wurden über 1'100 Erosionssysteme (Einzelformen und/oder komplexe Gebilde) kartiert und analysiert, über die rund 1'160 m³ Boden erodiert wurde. Bezogen auf die gesamte Ackerfläche von 267 ha ergibt dies rein rechnerisch einen mittleren Abtrag von 0,62 t/ha und Jahr. Im Mittel über die sieben Jahre waren 15 % der Acker-

flächen von Bodenerosion betroffen. 83 % der Ackerparzellen wurden in den sieben Jahren mindestens einmal von Erosion betroffen, auf 17 % gab es bisher noch keine Erosion. Meist wurden nur geringe Bodenabträge von weniger als 1 t/ha und Jahr verzeichnet. Auf einzelnen Parzellen traten in manchen Jahren aber auch Abträge von bis zu 55 t/ha und Jahr auf. Drei Parzellen überschritten im Mittel aller Kartierungsjahre einen Abtrag von 4 t/ha und Jahr und lagen damit über dem Richtwert von 2 bzw. 4 t/ha und Jahr (je nach Gründigkeit) gemäss Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBö) (Bundesrat 1998), auf weiteren 9 Parzellen wurden im Mittel mehr als 2 t/ha und Jahr gemessen; hier kann je nach Gründigkeit eine Überschreitung des Richtwertes vorliegen.

Die jährliche Variabilität der Bodenabträge ist gross. Knapp 300 m³ Abtrag im Winterhalbjahr 1998–99 machen 26 % der gesamten Abtragsmenge von 1998–2004 aus; 15 m³ Abtrag im Sommerhalbjahr 2001 machen dagegen nur 1 % aus (Abb. 3). Die Höhe des Abtrags pro Halbjahr hängt dabei nicht allein von der Niederschlagsmenge oder -intensität ab, sondern auch vom zeitlichen Zusammenspiel von Niederschlag und Bodenbearbeitung bzw. Bodenbedeckung auf Parzellen, die aufgrund der Standortfaktoren potenziell gefährdet sind.

Die Erosionsschäden durch lineare Erosion waren mit 70 % deutlich grösser als die durch flächenhafte Erosion (30 %). Ursache für die hohe lineare Erosion ist die starke Reliefierung des Gebietes mit vielen kleinen Mulden sowie die zahlreichen Erosionsrillen entlang von Acker- und Anhaupfurchen, durch Fahrspuren und Fremdwasserzuflüssen von Wegen. Dass weniger flächenhafte Erosion auftritt, dürfte damit zusammenhängen, dass die Böden vergleichsweise wenig Schluff und Feinsand enthalten, über eine relativ gute Gefügestruktur aufgrund des hohen Anteils an Kunstwiese in der Fruchtfolge verfügen und damit nicht besonders erosionsanfällig sind. Zudem sind viele Parzellen durch konservierende Bodenbearbeitungsverfahren relativ gut gegen flächenhafte Erosion geschützt.

54 % aller Erosionsschäden traten bisher im Winterhalbjahr auf; im Sommerhalbjahr waren es 46 %. 38 % aller Bodenabträge traten bei Winterweizen auf. Zwar hatte Winterweizen

Abbildung 2:

Entwicklung der Bodenbearbeitungsverfahren bei a) Mais und b) Zuckerrüben im Testgebiet Frienisberg (DS = Direktsaat; SFS = Streifenfrässaat; MS = Mulchsaat; PFL = pfluglos ohne ausreichende Mulchbedeckung; PF = Pflug; Werte für 1988–89 Schätzwerte, 1998–99 und 2003–04 Mittelwerte Feldkartierungen).

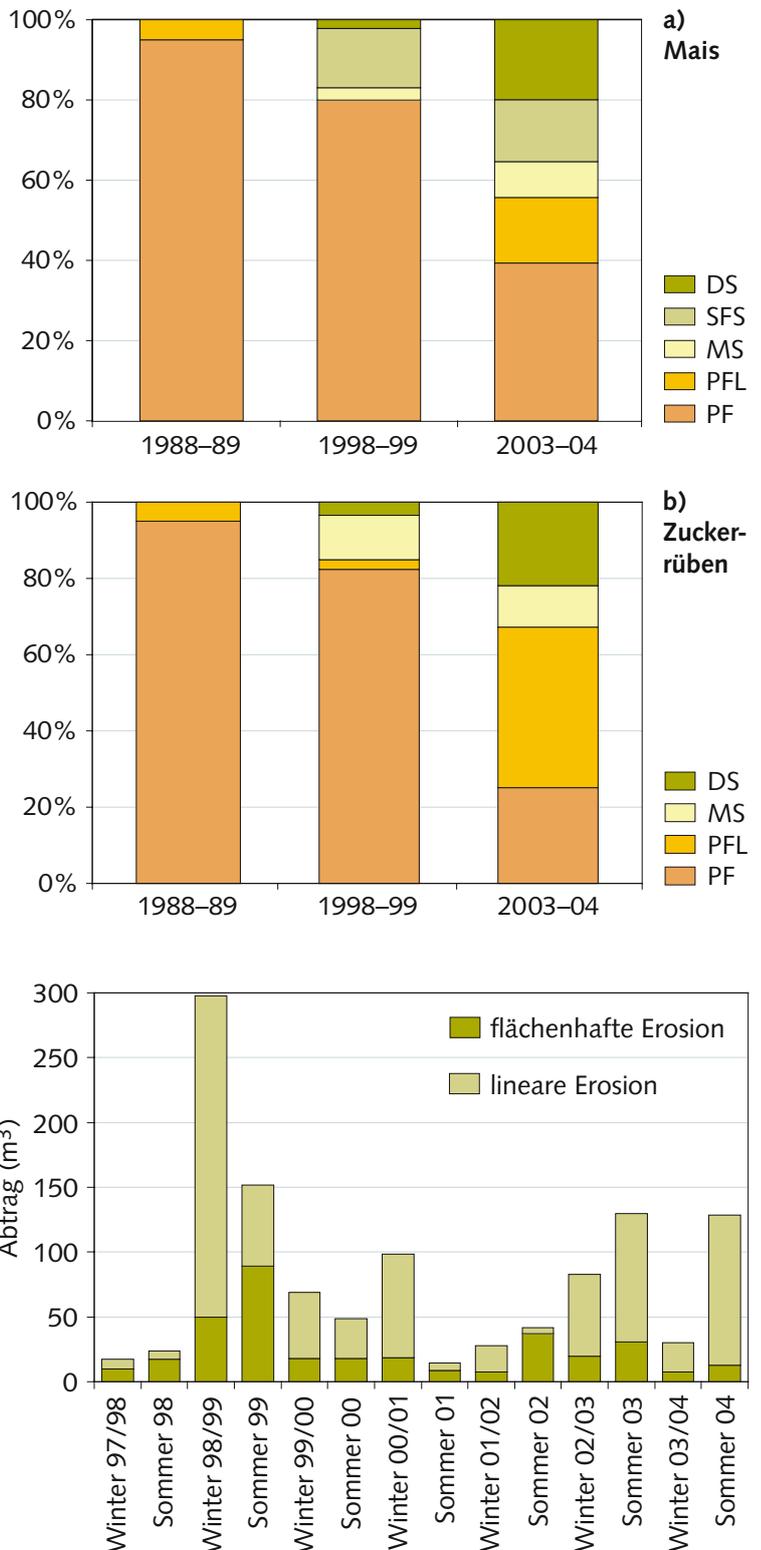


Abbildung 3:

Entwicklung der kartierten Bodenabträge pro Halbjahr im Testgebiet Frienisberg zwischen 1998 und 2004.

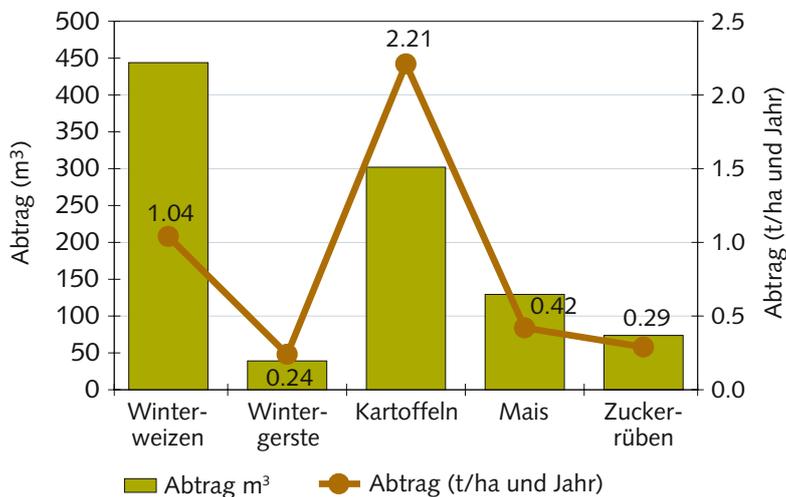


Abbildung 4: Bodenabtrag der wichtigsten Kulturen im Testgebiet Frienisberg, dargestellt als absolute Werte (aufsummiert über 7 Jahre) und als mittlerer flächenspezifischer Abtrag.

Anbau von Winterweizen sind wirksame konservierende Bodenbearbeitungsverfahren kaum möglich. Selbst wenn Winterweizen pfluglos angebaut wird, wird eine wirksame Mulchschicht von mehr als 30 % Bodenbedeckung selten erreicht, weil die meisten Vorkulturen (z.B. Kartoffeln, Zuckerrüben) nicht genügend Ernterückstände hinterlassen. Eine Aufteilung nach Bodenbearbeitungsverfahren zeigt deutlich geringere Bodenabträge bei Mulch-, Streifenfräs- und Direktsaaten (Abb. 5).

Bei StreifenfräsSaat trat bisher nie Erosion auf. Bei Direktsaat betrug der mittlere Abtrag 4 % des Abtrages vom Pflugverfahren, bei Mulchsaat waren es 10 % und bei pfluglosem Anbau ohne ausreichende Bodenbedeckung 31 %. Damit bestätigen die Ergebnisse der langjährigen Erosionsschadenskartierungen, dass konservierende Bodenbearbeitung die Bodenerosion massiv reduziert (Abb. 6).

Vergleich der Erosionsschadenskartierungen von 1998–2004 und 1987–1989

Die beiden untersuchten Perioden sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da die Zeiträume zu kurz sind und durch Einzelereignisse oder Zufälligkeiten im Witterungsverlauf geprägt sein können. Trotzdem sollen einige interessante Parallelen und einige deutliche Gegensätze aufgezeigt und diskutiert werden. Tendenziell wurden 1998–2004 mehr Erosionsschäden als 1987–89 pro Jahr kartiert (Tab. 3). Die Anzahl von Erosion betroffener Parzellen lag aber 1998–2004 mit 70 Parzellen pro Jahr (= 26 % aller Parzellen) niedriger als 1987–89 mit 85 Parzellen (33 %). Die durch Erosion direkt geschädigte Fläche betrug 1998–2004 im Mittel 39 ha (15 % der gesamten Ackerfläche), 1987–89 43 ha bzw. 16 %. Mosimann *et al.* (1991) nennen für das zentrale Mittelland einen Anteil von 20 % für durch Erosion betroffene Ackerflächen (bei einer Schwankungsbreite von 10 bis 40 % je nach Gebiet).

Der mittlere Bodenabtrag war von 1998 bis 2004 um 15 % niedriger als 1987 bis 1989. In beiden Beobachtungsperioden waren rund zwei Drittel des erodierten Abtragsvolumens auf lineare Erosion zurückzuführen, rund ein Drittel auf flächenhafte Erosion. Während 1987 bis 1989 der grössere Teil des Abtragsvolumens im Sommerhalbjahr erodiert wurde, war der Abtrag in der Periode 1998 bis 2004 im Winterhalbjahr deutlich grösser (Tab. 3). Dies ist zum grössten Teil auf die sehr unterschiedlichen Niederschlagsbedingungen der beiden Vergleichsperioden zurückzuführen. Es sprechen jedoch auch einige Gründe dafür, dass ein gewisser Wandel in der ackerbaulichen Bewirtschaftungspraxis erfolgt ist, der eine Zunahme der Wintererosion und eine Abnahme der Sommererosion begünstigt. Einerseits haben konservierende Bodenbearbeitungsverfahren bei den Sommerkulturen im Testgebiet deutlich zugenommen, andererseits besteht ein allgemeiner Trend in Richtung Zunahme der Winterniederschläge (Prasuhn 2003). Schwerere Erntemaschinen (z.B. Zuckerrübenvollernter) führen zudem zunehmend zu Bodenverdichtungen und -strukturschäden im Herbst.

mit 22 % auch einen hohen Flächenanteil, doch die mittleren Abträge waren mit 1,04 t/ha und Jahr vergleichsweise hoch. Sie wurden nur durch die mittleren Abträge von 2,21 t/ha und Jahr bei Kartoffeln übertroffen (Abb. 4). Die üblicherweise als besonders erosionsanfällig bezeichneten Kulturen Mais und Zuckerrüben erreichten mit 0,42 bzw. 0,29 t/ha und Jahr erstaunlich niedrige mittlere Abträge. Die Ursache hierfür liegt in den zunehmenden Flächen von Mais und Zuckerrüben, die mit konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren angebaut werden (Direktsaat, StreifenfräsSaat, Mulchsaat mit ausreichender Mulchbedeckung). Beim

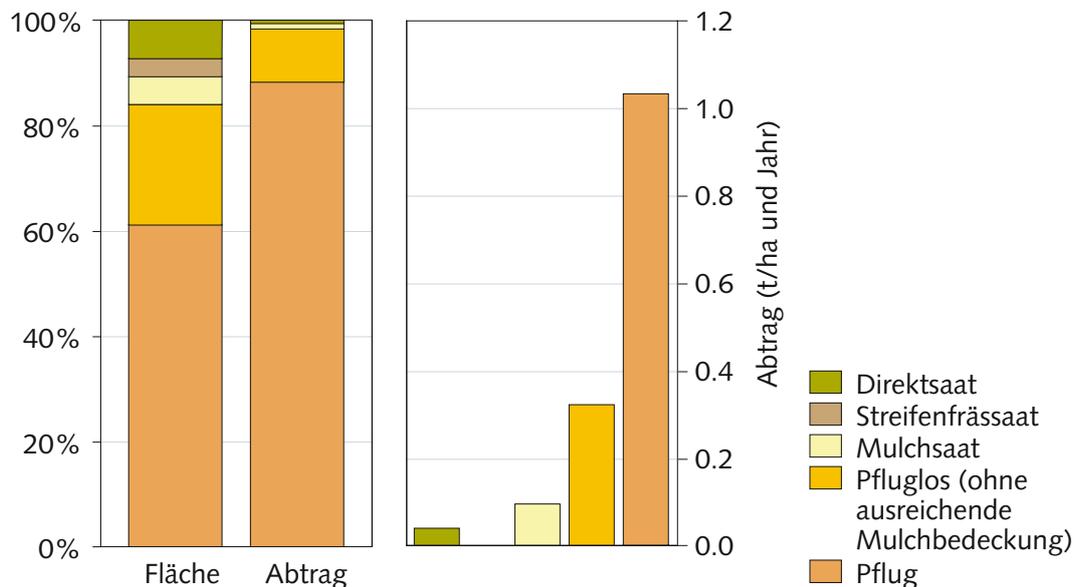


Abbildung 5: Prozentualer Anteil der Bodenbearbeitungsverfahren der Hauptkulturen (ohne Kunstwiese) an der Flächennutzung und dem Bodenabtrag sowie mittlerer Bodenabtrag 1998–2004 nach Bodenbearbeitungsverfahren im Testgebiet Frienisberg.



Abbildung 6: Direktsaat von Zuckerrüben in abgestorbene Zwischenkultur (Gelbsenf). Die Mulchschicht stellt einen wirksamen Erosionsschutz dar. (Foto: V. Prasuhn)

Tabelle 3. Vergleich einiger Ergebnisse der Erosionsschadenskartierungen 1987–1989 und 1998–2004 im Testgebiet Frienisberg

	1987–1989 Mittelwerte über 3 Jahre	1998–2004 Mittelwerte über 7 Jahre
Anzahl kartierter Erosionsformen	108	154
Von Erosion betroffene Anbauparzellen (Anzahl)	85	70
Von Erosion betroffene Anbauparzellen (%)	33	26
Durch Erosion geschädigte Fläche (ha)	43	39
Durch Erosion geschädigte Fläche (% von Ackerfläche)	16	15
Abtragsvolumen (m ³)	196	166
Abtragsvolumen (t/ha gesamtes Ackerland)	0,71	0,62
Anteil lineare Erosion (%)	67	70
Anteil flächenhafte Erosion (%)	33	30
Anteil Sommerhalbjahr/Sommerkulturen (%)	65	46
Anteil Winterhalbjahr/Winterkulturen (%)	35	54
Erosionsmaterialeintrag in die Gewässer (%)	10–20	21

Im Mittel der sieben Untersuchungsjahre von 1998 bis 2004 wurden 21 % (35 m³ pro Jahr) des gesamten Erosionsmaterials über die Ackerschläge hinaus bis in ein Gewässer transportiert. Mosimann *et al.* (1990) schätzten den Anteil des erodierten Bodenmaterials, der in der Periode 1987–89 in ein Gewässer eingetragen wurde, auf 10 bis 20 %.

Ergebnisse der Modellberechnungen

Bodenerosion kann von Jahr zu Jahr stark variieren. Dementsprechend ist auch die vorliegende Beobachtungsperiode zu kurz, um über Erosionsschadenskartierungen allein eine Erfolgskontrolle der Ökomassnahmen durchzuführen. Aus diesem Grund wurde die Bodenerosion im Untersuchungsgebiet modellhaft mit der «Allgemeinen Bodenabtragsgleichung» (ABAG) berechnet (Schwertmann *et al.* 1990). Die verwendeten Modellgrundlagen sind in Prasuhn und Grünig (2001) ausführlich beschrieben. Die ABAG beschreibt den langjährigen, mittleren jährlichen Bodenabtrag als Produkt der folgenden erosionsbedingenden Faktoren: Erosivität der Niederschläge (R-Faktor), Erodibilität des Bodens (K-Faktor), Topografie (LS-Faktor), Bewirtschaftung (C-Faktor) und Erosionsschutzmassnahmen (P-Faktor). Für beide Zeitperioden wurden überwiegend die gleichen R-, K-, LS- und P-Faktoren verwendet, weil erstens diese Faktoren relativ konstant sind und zweitens kaum Unterlagen für allfällige Änderungen existieren. Für die Berechnung von regionsspezifischen und parzellscharfen C-Faktoren wurden folgende Grundlagen verwendet: Fruchtfolgen, Bodenbearbeitungsverfahren, die regionstypischen Entwicklungsphasen der Kulturen, die regionspezifische jährliche Verteilung der erosionswirksamen Niederschläge und die relativen Bodenabtragswerte der einzelnen Kulturen.

Der mittlere, flächengewichtete C-Faktor lag für die Periode 1998 bis 2004 mit 0,100 26 % unter dem Wert von 1987 (0,136). Die Reduktion der aktuellen C-Faktoren gegenüber 1987 ist zu einem grossen Teil auf die veränderte Bodenbearbeitung zurückzuführen. Der pfluglose Anbau hatte eine Reduktion um etwa 60 % zur Folge. Der Einfluss der Fruchtfolgen (Reduktion um 27 %) beruht vor allem auf der kleiner gewordenen Anbaufläche der Hackfrüchte und dem grösseren Anteil an Kunstwiesen. Der Anbau von Zwischenkulturen bewirkte eine Reduktion um 13 %. Damit brachten Zwischenkulturen eine geringere Reduktion als der pfluglose Anbau. Der Einfluss der Zwischenkulturen wird bei der Modellberechnung deshalb so gering eingeschätzt, weil eine im Herbst gepflügte Parzelle eine nur geringfügig höhere Wintererosion zur Folge hat als eine mit einer Zwischenkultur bewachsene Parzelle. Zudem wurde der Einfluss der Bodenbedeckung durch Zwischenkulturen bei konservierender Bodenbearbeitung vollumfänglich dem pfluglosen Anbau zugerechnet. Somit dürfte der Nutzen der Zwischenkulturen auf die Erosion grösser sein als berechnet.

Die aktuelle Erosionsgefährdung berechnet sich aus der Multiplikation aller Faktoren ($R \times K \times LS \times C \times P$) für jede Parzelle. Die flächengewichtete, mittlere aktuelle Erosionsgefährdung lag im Jahr 1987 bei 5,9 t/ha und Jahr und in der Periode 1998 bis 2004 bei 4,6 t/ha und Jahr. Der Rückgang um rund 23 % ist grösstenteils auf die beschriebenen Veränderungen des C-Faktors zurückzuführen.

Vergleich Modellrechnung – Erosionsschadenskartierung

Ein Vergleich der Ergebnisse der Modellberechnung und der Erosionsschadenskartierung gestaltet sich schwierig, weil den beiden Ansätzen unterschiedliche Zeitskalen zugrunde liegen. Ausserdem ist der jeweilige Geltungsbereich und Genauigkeitsgrad zu berücksichtigen. Die Modellrechnung prognostiziert einen langjährigen, mittleren Bodenabtrag und lässt sich nicht auf Einzelereignisse anwenden. Die Zeitskala beträgt rund 20 Jahre. Sie erfasst vor allem die flächenhafte Erosion.

Die Erosionsschadenskartierungen umfassen bisher sieben ausgewertete Jahre und sind somit stark von Einzelereignissen geprägt. Es wird vor allem die lineare Erosion erfasst. Die

ABAG überschätzt die Bodenabträge deutlich (Prasuhn und Grünig 2001). Auch in der vorliegenden Untersuchung liegen die über die Modellberechnung ermittelten Bodenabträge mit über 4 t/ha und Jahr im Mittel massiv über denen der Kartierungen mit 0,6 t/ha und Jahr. Tendenziell zeigt sich jedoch beim Vergleich der real aufgetretenen Erosionsschäden mit der auf der Grundlage der ABAG ermittelten Erosionsgefährdung, dass Parzellen mit hohen kartierten Bodenabträgen auch eine hohe Erosionsgefährdung gemäss Modell aufweisen. Somit ergibt sich bei den Abtragsbeträgen ein relativ guter räumlicher Zusammenhang zwischen kartierten und prognostizierten Bodenabträgen. Die Auswertungen der Erosionsschadenskartierungen in Zusammenhang mit den Bodenbearbeitungsverfahren zeigen, dass Parzellen mit konventioneller, intensiver Bodenbearbeitung zu grösseren Erosionsschäden neigen als solche, die konservierend bearbeitet wurden. Dies steht in Einklang mit den entsprechenden berechneten C-Faktoren und den daraus resultierenden Bodenabträgen der Modellberechnung.

Gemäss Erosionsschadenskartierung hat sich der mittlere Bodenabtrag im Testgebiet zwischen 1987–89 und 1998–2004 um rund 15 % verringert, gemäss Modellberechnungen sind es 23 %. Beide Ansätze zeigen also eine Reduktion des Bodenabtrags durch Erosion, wobei das Ausmass unterschiedlich ausfällt. Ursachen dafür sind in den sehr unterschiedlichen Ansätzen und Genauigkeiten beider Berechnungsweisen zu suchen (siehe Prasuhn und Grünig 2001).

P-Eintrag in die Gewässer

Da die ABAG aus Abtragsdaten von Testparzellen hergeleitet wurde, ist grundsätzlich nur eine Prognose des Bodenabtrages (Mobilisierung und Umlagerung von Bodenpartikeln auf Hangparzellen) möglich, nicht jedoch eine Vorhersage der Off-site-Schäden. Eine Verknüpfung mit dem Eintrag von Erosionsmaterial in die Gewässer und damit zur P-Belastung der Gewässer durch Bodenerosion ist nicht gegeben. Über die Erosionsschadenskartierung konnte dagegen der Materialeintrag in die Gewässer geschätzt werden.

Die P-Belastung der Gewässer durch Bodenerosion hängt einerseits von der Menge des in ein Gewässer transportierten Bodenmaterials ab, andererseits vom P-Gehalt des Erosionsmaterials. Gemäss den bei den Erosionsschadenskartierungen geschätzten Anteilen an Bodenmaterial, welche direkt oder indirekt über Einlaufschächte in die Gewässer gelangt sind, wurden in den hier betrachteten sieben Jahren 247 m³ Bodenmaterial in die Gewässer transportiert. Dies entspricht etwa 21 % der insgesamt erodierten Bodenmenge. Der Vergleich mit den Abschätzungen von Mosimann *et al.* (1991) lässt vermuten, dass der prozentuale Anteil an Erosionsmaterial, der in ein Gewässer gelangt, in etwa gleich gross geblieben ist (Tab. 3).

Der mittlere P_{total}-Gehalt des Oberbodens ausgewählter Ackerparzellen des Testgebietes liegt mit 740 mg/kg (n = 104, s = 143, min = 529, max = 1'210) deutlich niedriger als im Einzugsgebiet Lippenrütibach (Mittelwert = 1'186 mg/kg, siehe Kapitel 13). Angaben über die zeitliche Entwicklung der P_{total}-Gehalte im Boden lagen nicht vor. Aufgrund der nationalen P-Bilanzüberschüsse (siehe Kapitel 11) und der zulässigen Toleranzen bei den betrieblichen Nährstoffbilanzen (Suisse-Bilanz) ist aber anzunehmen, dass die P_{total}-Gehalte nicht abgenommen haben. Die pflanzenverfügbaren P-Gehalte (P-Test nach CO₂-Methode) waren ausgesprochen hoch. 85 % der Proben des Jahres 2004 (n = 104) lagen in den P-Versorgungsklasse D oder E (Vorrat oder Anreicherung). Der hohe Anteil an Böden mit erhöhten pflanzenverfügbaren P-Gehalten dürfte darauf zurückzuführen sein, dass Zuckerrübenkalk, der durch die pH-Erhöhung die P-Verfügbarkeit erhöht, in grösseren Mengen aus der nahe gelegenen Zuckerrübenfabrik Aarberg ausgebracht wird, dass einige Schweinemastbetriebe mit hohem P-Hofdüngeranfall im Gebiet liegen und dass in früheren Jahren Klärschlamm im Gebiet ausgebracht wurde.

Multipliziert man den in das Gewässer eingetragenen Bodenabtrag pro Parzelle mit dem jeweiligen P_{total} -Gehalt des Bodens und einem mittleren Anreicherungsfaktor von 1,86 im Erosionsmaterial (siehe Prasuhn und Grünig 2001), ergibt sich für das Untersuchungsgebiet ein mittlerer P-Eintrag in die Gewässer von 52 kg/Jahr. Bezogen auf die gesamte Ackerfläche von 267 ha entspricht dies einem mittleren Eintrag von rund 0,2 kg P/ha und Jahr.

Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die im Testgebiet Frienisberg gewonnenen Erkenntnisse sind in das Modell MODIFFUS zur Ermittlung der P-Einträge in die Gewässer über Bodenerosion im gesamten Kanton Bern eingeflossen (Prasuhn und Mohni 2003). Dort wurde mit flächendeckend vorhandenen, wesentlich unpräziseren Daten auf Hektare-Rasterbasis gerechnet. Der Vergleich von langjährig kartierten Bodenabträgen, parzellenscharf berechneten Bodenabträgen und mit MODIFFUS berechneten, rasterbasierten Bodenabträgen zeigt für die Region Frienisberg weitgehend eine zufrieden stellende räumliche Übereinstimmung. Der mit MODIFFUS berechnete mittlere Bodenabtrag liegt für die Testregion bei rund 0,79 t/ha und Jahr und damit um rund 25 % über den durchschnittlichen, aus Kartierungen ermittelten Werten. Für den gesamten Kanton Bern wurde mit MODIFFUS ein mittlerer Bodenabtrag von 0,47 t/ha und Jahr berechnet. Da vergleichsweise wenige Parzellen in ebener Lage liegen, zeichnet sich das Testgebiet Frienisberg durch eine überproportional hohe Erosionsgefährdung aus.

Der Anteil pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren im Testgebiet (2004: 55 % der Fläche der Hauptkulturen) ist sehr hoch und für die Schweiz nicht repräsentativ. Die Ursachen dafür sind das kantonale Direktsaatprogramm, eine intensive und gute Beratung durch das Amt für Landwirtschaft und Natur Bern, engagierte und kreative Lohnunternehmer im Testgebiet, die die entsprechenden Techniken anbieten und die langjährigen Erosionsschadenskartierungen im Testgebiet, die die Landwirte für die Erosionsproblematik sensibilisiert haben. Dies zeigt, dass ein solch hoher Anteil pflugloser Bodenbearbeitungsverfahren in der Praxis zu realisieren ist – vorausgesetzt die Rahmenbedingungen stimmen.

Im Kanton Basel-Landschaft wird ein Monitoringprogramm betrieben, in dem alle 10 Jahre für rund 70 ausgewählte Betriebe auf der Grundlage von Befragungen und Felderhebungen die Erosionsgefährdung mit einem ähnlichen Modellansatz wie im Testgebiet Frienisberg berechnet wird (Mosimann 2003). Der Vergleich der berechneten C-Faktoren zwischen 1992 und 2002 zeigt, dass im weniger intensiv genutzten Jura der mittlere C-Faktor von 0,11 um rund 25 % auf 0,07 zurückgegangen ist. Im intensiver genutzten Lösshügelland blieb der mittlere C-Faktor dagegen unverändert bei 0,14. Auf den meisten Betrieben wurden in Bezug auf den Erosionsschutz Verbesserungen vorgenommen. Insgesamt gab es eine Zunahme von extensiveren Bodenbearbeitungsverfahren, von Winterbegrünungen und von Ernterückständen auf den Parzellen. Auf einzelnen Betrieben kam es aber auch zu erheblichen Verschlechterungen, vor allem auf Betrieben, die vom Mischbetrieb zum Ackerbaubetrieb umstellen und wo der Hackfrucht- und Wintergetreideanbau zunimmt. Manchmal heben sich positive und negative Veränderungen gegenseitig auf. Insgesamt sehen Mosimann *et al.* (2003) die Ursachen für den Rückgang der Erosionsgefährdung um etwa 12 % zwischen 1992 und 2002 für den Kanton Basel-Landschaft weniger in der bodenschonenderen Bewirtschaftung als in strukturellen Veränderungen (Extensivierung mit Zunahme von Kunstwiesen und Buntbrachen an Stelle von Mais und Wintergetreide).

Die Auswertungen langjähriger Erosionsschadenskartierungen (1987–1999) in zwei Testgebieten im Schweizer Tafeljura von Ogermann *et al.* (2003) ergaben zum Teil ähnliche Resultate wie im Testgebiet Frienisberg. Die hohe zeitliche Variabilität der Bodenabträge macht aber eine eindeutige Trenderaussage unmöglich. So nahm die Anzahl kartierter Erosionsformen seit 1987 deutlich ab; bei den Abtragsmengen war dagegen kein Trend fest-

stellbar. Die Abtragsmengen überwogen im Winterhalbjahr, wobei die lineare Erosion gegenüber flächenhafter Erosion dominierte. Hohe Abtragsmengen fanden vor allem bei Schwarzbrache, Mais und Winterweizen statt. Die offene Ackerfläche ist allerdings seit 1987 zurückgegangen, der Anbau von Mais hat abgenommen. Dagegen wurden immer häufiger Kunstwiesen angelegt, so dass Schwarzbrachen abnahmen.

Langjährige Feldbeobachtungen von Gratier (2004) im Kanton Waadt bestätigen ebenfalls die im Kanton Bern beobachteten Entwicklungen. So konnten eine tendenzielle Abnahme der Erosionsschäden in den vergangenen 20 Jahren, eine Verlagerung der Erosionsproblematik vom Sommer- ins Winterhalbjahr, eine Abnahme der Erosionsschäden bei Mais und Zuckerrüben und grosse Erosionsschäden beim Anbau von Winterweizen beobachtet werden.

Einfluss der Ökomassnahmen

Die wichtigste Massnahme zur Verminderung der P-Verluste durch Bodenerosion ist der geeignete Bodenschutz. Mit dem Bodenschutzindex wurde ein System geschaffen, welches eine hohe Bodenbedeckung über den Winter fordert. Der Bodenschutzindex aller Parzellen im Testgebiet hat zwischen 1987–90 und 1995–2000 um 33 % zugenommen (Prasuhn und Grünig 2002). Diese Veränderung liegt damit in der gleichen Grössenordnung wie die Reduktion des C-Faktors in der Modellberechnung. Die Veränderung des C-Faktors wird zu 60 % auf die Zunahme konservierender Bodenbearbeitungsverfahren und zu 13 % auf den vermehrten Anbau von Zwischenkulturen zurückgeführt (Prasuhn und Grünig 2001). Der Anbau von Zwischenfrüchten ist aber oft die Grundlage für konservierende Bodenbearbeitung.

Anlässlich der letzten Revision der Direktzahlungsverordnung wurde der Bodenschutzindex allerdings durch eine für die Erfassung einfachere Methode mit geringeren Anforderungen an die Bodenbedeckung ersetzt. Falls dies wieder zu vermehrten Schwarzbrachen sowie weniger Zwischenkulturen und Kunstwiesen im Winter führt und dadurch zu weniger Mulch- und Direktsaaten, so wird auch die Bodenerosion wieder zunehmen.

Der Einfluss der geregelten Fruchtfolge (27 % Anteil an der Reduktion des C-Faktors) beruht vor allem auf der kleiner gewordenen Anbaufläche der Hackfrüchte und dem grösseren Anteil der Kunstwiesen. Der Einfluss einer ausgeglichenen P-Bilanz wurde nicht untersucht. Ökologische Ausgleichsflächen wurden nicht speziell für den Boden- und Gewässerschutz angelegt, sondern für die Biodiversität. Ihr Nutzen ist daher für die P-Verminderung vergleichsweise gering. Im Testgebiet wurde beispielsweise eine Hecke neu angelegt – allerdings nicht hangparallel sondern in Gefällrichtung. Bunt- und Rotationsbrachen wurden nur einige wenige und an vergleichsweise wenig erosionsgefährdeten Standorten neu angelegt. Die Tierhaltungsprogramme RAUS und BTS haben keinen Einfluss auf die Höhe der P-Verluste durch Bodenerosion von Ackerflächen.

Neben den Ökomassnahmen dürfte ein kantonales Projekt, welches seit 1996 konservierende Bodenbearbeitung finanziell fördert, massgeblich zur Abnahme der Bodenerosion beigetragen haben (<http://www.no-till.ch>). Weitere Einflussfaktoren wie technischer Fortschritt und Beratung sind in Kapitel 15 aufgeführt.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit den Untersuchungen zur Bodenerosion im Testgebiet Frienisberg konnten folgende Entwicklungen aufgezeigt werden:

- Bodenerosion ist kein flächendeckendes Phänomen, sondern schädigt pro Jahr durchschnittlich weniger als 20 % der Ackerfläche.
- Es treten überwiegend geringe Bodenabträge auf (<1 t/ha und Jahr). Auf einzelnen Parzellen können aber Werte bis zu 55 t/ha in einem Jahr erreicht werden.

- Auf etwa 5 % der Ackerparzellen werden die tolerierbaren Bodenabträge nach VBBo im langjährigen Mittel überschritten.
- Rund 20 % des erodierten Materials wird in die Gewässer transportiert. Dadurch gelangen rund 0,2 kg P/ha und Jahr in die Gewässer.
- Bodenschonende Anbauverfahren wirken sich nachweislich positiv auf den Erosionsschutz aus und haben zu einer Verminderung der Bodenabträge geführt. Erosionsschadenskartierung und Modellberechnung zeigen mit einer Reduktion der mittleren Bodenabträge von 15 % bzw. 23 % eine klare Tendenz zur Verbesserung der heutigen Erosionsdisposition gegenüber 1987–89. Dies beruht vor allem auf der Veränderung der Anbauverfahren und ist nur zum Teil auf die Ökomassnahmen zurückzuführen – zum einen weil konservierende Bodenbearbeitung nicht explizit zu den Ökomassnahmen zählt, sondern nur indirekt über den geeigneten Bodenschutz integriert ist, zum anderen weil konservierende Bodenbearbeitung speziell durch ein kantonales Programm gefördert wird.
- In der Modellberechnung wird die Abnahme der Erosion wahrscheinlich überschätzt. Eine Zunahme der Bodenbelastungen durch immer schwerere Maschinen und durch Bodenbearbeitungen bei ungünstigen Bodenverhältnissen aufgrund eines hohen Zeitdrucks haben zu einer Verschlechterung der Strukturstabilität der Böden geführt. Dies wird im Modell zu wenig berücksichtigt. Weiterhin werden spezielle lineare Erosionsformen (Talwege, Erosion in Fahrspuren und Bearbeitungsfurchen) mit dem Modell nur unzureichend erfasst. Ob diese zu- oder abgenommen haben, kann im Modell nicht beurteilt werden.
- Es ist mit regional unterschiedlichen Entwicklungen zu rechnen. So muss in bestimmten Regionen infolge einer Intensivierung des Ackerbaus, die durch den Strukturwandel bedingt ist, auch mit einer Erhöhung der durch Bodenerosion bedingten P-Einträge in die Gewässer gerechnet werden (Mosimann *et al.* 2003).

Die bisherigen Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass das gesteckte sektorale Ziel der Ökomassnahmen – Reduzierung der P-Belastung der Gewässer um mindestens 50 % bis zum Jahr 2005 – im Testgebiet und auch in anderen Regionen der Schweiz nicht erreicht wird. Dazu wären weitergehende Massnahmen erforderlich, die beispielsweise über Artikel 62a Gewässerschutzgesetz oder den Vollzug der VBBo realisiert werden könnten.

Aufgrund des grossen Einflusses der Witterung bleiben aber trotzdem Unsicherheiten bei der Interpretation der Daten bestehen. Ein langfristiges Monitoring ist daher zwingend notwendig. Weiterer Forschungsbedarf besteht vor allem bei der Übertragbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf andere Regionen. Ausserdem muss die Entwicklung der P-Düngung und der P-Gehalte der Böden und deren Auswirkung auf die Gewässerbelastung mit Phosphor langfristig verfolgt werden.

Literatur

- Behrendt H., Huber P., Kornmilch M., Opitz D., Schmoll O., Scholz G. und Uebe R., 1999. Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben Wasser, Forschungsbericht 296 25 515, UBA-Texte 75/99, Berlin. 288 S.
- Braun M., Kopse Rolli D. und Prasuhn V., 1997. Abschätzung der Verminderung der Nährstoffverluste in die Gewässer durch Massnahmen in der Landwirtschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 293, Gewässerschutz, BUWAL. 100 S.
- Bundesrat, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens. Bern, SR 814.12.
- Gratier M., 2004. Persönliche Mitteilung. Service des Eaux, Sols et Assainissement (SESA), Lausanne.
- Mosimann T., 2003. Erosionsgefährdung und Schutz der Böden durch die Bewirtschaftung im Kanton Basel-Landschaft. Monitoring 1982–2002. Amt für Umweltschutz und Energie (AUE), Liestal. 32 S.
- Mosimann T., Bono R. und Simon P., 2003. Besserer Erosionsschutz durch ökologischen Leistungsnachweis? Agrarforschung 11(11–12), 428–433.
- Mosimann T., Crole-Rees A., Maillard A., Neyroud J.-A., Thöni M., Musy A. und Rohr W., 1990. Bodenerosion im Schweizerischen Mittelland. Ausmass und Gegenmassnahmen. Bericht 51 des Nationalen Forschungsprogrammes «Nutzung des Bodens in der Schweiz», Liebefeld-Bern. 262 S.

- Mosimann T., Maillard A., Musy A., Neyroud J., Rüttimann M. und Weisskopf P., 1991. Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung. Themenbericht des Nationalen Forschungsprogrammes «Nutzung des Bodens in der Schweiz», Liebefeld Bern. 186 S.
- Ogermann P., Meier S. und Leser H., 2003. Ergebnisse langjähriger Bodenerosionskartierungen im Schweizer Tafeljura. *Landnutzung und Landentwicklung* 44, 151–160.
- Prasuhn V., 2003. Zunahme der Bodenerosion von Ackerflächen im Winterhalbjahr? *Mitt. DBG* 102, 789–790.
- Prasuhn V., 2004. Kartierung aktueller Erosionsschäden im Berner Mittelland. *Bulletin BGS* 27, 79–84.
- Prasuhn V. und Mohni R., 2003. GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Interner Bericht FAL z.H. GSA Bern. 223 S. <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/umwelt/wasser/wasser.html#bern>
- Prasuhn V. und Grünig K., 2001. Evaluation der Ökomassnahmen. Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. *Schriftenreihe der FAL* 37, Zürich-Reckenholz. 151 S.
- Prasuhn V. und Grünig K., 2002. Evaluation der Ökomassnahmen. Phosphor. Wirkungsanalyse. Teilprojekt 4: Erosion (Frienisberg). In: BLW (Hrsg.). *Evaluation der Ökomassnahmen und Tierhaltungsprogramme. Bereich Stickstoff und Phosphor*, 5. Zwischenbericht, 33–39. <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/umwelt/wasser/wasser.html#evalu>
- Prasuhn V., Braun M. und Kopse Rolli D., 1997. Massnahmen zur Verminderung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft in die Gewässer. Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern. 216 S.
- Schwertmann U., Vogl W. und Kainz M., 1990. Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen. Stuttgart. 64 S.