

Erfassung von Bodenerosion in der Schweiz

Vergleichende Anwendung verschiedener Methoden und Beurteilung ihrer Eignung für den Vollzug der Bodenschutzgesetzgebung

Petra Ogermann, Basel, Bernd Hebel, Frauenfeld, Volker Prasuhn, Zürich-Reckenholz, Rainer Weissshaidinger, Basel

1 Einleitung

Trotz einer Vielzahl an vorhandenen und lang getesteten Methoden ist die realitätsnahe Erfassung der Bodenerosion auf Ackerflächen bisher nur für Teilausschnitte (zeitlich, räumlich, für bestimmte Erosionstypen) gelöst (LESER et al. 2002). Die Auswahl der Methoden für die Bodenerosionserfassung in einem Gebiet hängt zum einen von der Art und dem Ausmass der Erosionsschäden ab, welche durch die naturräumlichen und landwirtschaftlichen Gegebenheiten mitbestimmt werden. Zum anderen wirken politische und gesetzliche Rahmenbedingungen mit, welche zu einer bestimmten wissenschaftlichen Schwerpunktsetzung führen. Die gesetzlichen Grundlagen zur Verminderung von Bodenerosion sind in der Schweiz national und umfassender als in allen anderen europäischen Ländern geregelt (VANDEKERCKHOVE et al. 2004). Der Vollzug obliegt aber den Kantonen, wofür diese praxistaugliche Instrumente benötigen. Da es keine einheitlichen, verbindlichen Vorgaben und auch kein für die ganze Schweiz validiertes Verfahren gibt, existieren verschiedene kantonale Ansätze. Das Ausmass der vermuteten Erosionsschäden, Kosten, Zeitaufwand und Datenverfügbarkeit (z.B. Bodenkarten) entscheiden über den gewählten Ansatz.

Auf Forschungsseite wird die Bodenerosion seit den 1975er Jahren von der Basler Bodenerosionsforschungsgruppe als landschaftsökologischer, raumbezogener Prozess untersucht (OGERMANN et al. 2003; LESER et al. 2002). Dafür wurde ein räumlich und zeitlich mehrstufiges Erfassungssystem aus mehreren Methoden entwickelt (z.B. PRASUHN 1991), um der sehr kleinräumig differenzierten Naturraumausstattung und Landnutzung und den daraus resultierenden sehr vielfältigen Erosionserscheinungen gerecht werden zu können. Auch im Rahmen der gegenwärtig ausgearbeiteten EU-Bodenrahmenrichtlinie wird ein indikatorbasiertes Vorgehen empfohlen, das aus einer Kombination von Risikoabschätzung auf nationaler Ebene mittels Modellen und von gemessenen aktuellen Erosionsraten auf einer begrenzten Anzahl repräsentativer Flächen besteht (VANDEKERCKHOVE et al. 2004). In der Schweiz wurde für die geplante Einführung eines

Agrarumweltindikators «Erosionsrisiko» ein ähnliches Vorgehen vorgeschlagen (GAILLARD 2003).

Im Folgenden soll die Erfassung der Bodenerosion durch Wasser auf Ackerflächen in der Schweiz mittels unterschiedlicher Methoden vergleichend dargestellt werden. Der Artikel soll auch eine Einschätzung über Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Methoden für den Vollzug der Schweizerischen Bodenschutzgesetzgebung liefern.

2 Bodenschutzbestimmungen in der Schweiz

Bodenerosion und Bodenschutz werden in verschiedenen gesetzlichen Regelungen der Schweiz berücksichtigt:

- Umweltschutzgesetz (Art. 33); Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBO; Art. 6 und Anhang 3) (SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT 1998a)
- Landwirtschaftsgesetz (Art. 70, 76); Direktzahlungsverordnung (DZV; Art. 8, 9) (SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT 1998b)
- Gewässerschutzgesetz (Art. 62a); Gewässerschutzverordnung (GSchV, Anhang 1, 2) (SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT 1998c).

Ziel aller dieser gesetzlichen Bestimmungen ist es, die Bodenerosion derart einzuschränken, dass die Bodenfruchtbarkeit langfristig erhalten bleibt und *off-site*-Schäden nachhaltig minimiert werden. Doch welche Methoden können angewandt werden, um das Ausmass der Bodenerosion räumlich und zeitlich richtig einzuschätzen?

3 Methodenübersicht zur Bestimmung von Bodenerosion durch Wasser

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in der Schweiz bisher häufig eingesetzten Methoden zur Messung oder Abschätzung von Bodenerosion durch Wasser auf Ackerflächen. Die hier angeführten Methoden werden in diesem Beitrag nicht näher vorgestellt. Weiterführende Informationen dazu finden sich in der Grundlagenliteratur, z.B. LAL 1994; MORGAN 2005; RICHTER 1998; SCHMIDT 2000.

Es stellt sich die Frage, welche Methoden davon unter den Schweizer Rahmenbedingungen für die Praxis,

Räumliche Skala	Methode	Einsatzzweck/ Anwendungsgebiete*					
		1	2	3	4	5	6
Standort 1-100 m ²	Testparzelle im Feld oder Labor; z.B. für Regensimulation, <i>splash</i> -Erosionsmessungen	x	x	(x)		(x)	
Einzelhang/ Ackerschlag 0.01-10 ha	Feldmessstation Abfluss- und Abtragsmessungen; Gerlach-Tröge	x	x	(x)		x	
	Tracereinsatz im Feld (z.B. Caesium 137 o.a. Radionuklide)	x	x	(x)		(x)	
	Empirische Modelle: z.B. USLE, RUSLE, ABAG, EPIC, Erosionsschlüssel			x	x		x
	Prozessorientierte Modelle: z.B. EROSION 2D, WEPP			(x)	x		x
Einzugsgebiet 0.01-10 km ²	Erosionsschadenskartierung im Feld	(x)	x	x		x	x
	Messung des Sedimentaustrags	x	x	x		(x)	(x)
	Tracereinsatz im Feld (z.B. Isotope, Fingerprint)	x	x	x		x	(x)
	Empirische Modelle: z.B. USLE-Derivate			x	x		x
	Prozessorientierte Modelle: z.B. EROSION 3D, WEPP			(x)	x		x

*1 = Grundlagenforschung, 2 = Validierung bestehender Modelle, 3 = Monitoring, 4 = Szenarien rechnen, 5 = Erarbeitung von Vollzugshilfen, 6 = Vollzugshilfe; x = Hauptanwendungsgebiet, (x) = eingeschränkte Anwendungsmöglichkeit

(ABAG: Allgemeine Bodenabtragungsgleichung; WEPP: Water erosion prediction project; USLE: Universal soil loss equation; RUSLE: Revised universal soil loss equation; EPIC: Erosion productivity impact calculator)

Tab. 1: Anwendungsgebiete für Methoden zur Messung oder Abschätzung von Bodenerosion durch Wasser auf Ackerflächen in der Schweiz

Areas of application of methods for measuring or assessing water erosion on arable areas in Switzerland

Domaines d'application des méthodes de mesure ou d'estimation de l'érosion du sol par l'eau des terres arables en Suisse

insbesondere für den Gesetzesvollzug, am zweckmäßigsten sind. Messungen sind zeit- und kostenintensiv und für den Vollzug nicht geeignet. Sie dienen aber der Erarbeitung von Vollzugshilfen, bei welchen es sich überwiegend um Modelle handelt (siehe Tab. 1). Wie realitätsnah können mit den verwendeten Modellen die räumlich und zeitlich äußerst variablen Bodenerosionserscheinungen in der Schweiz nachgewiesen werden?

4 Vergleichende Anwendung verschiedener Methoden zur Erfassung der Bodenerosion

Für die vergleichende Anwendung von Bodenerosionsmethoden wurden zwei Testgebiete gewählt, die schon Teil einer langfristigen Bodenerosionsaufnahme sind: zum einen das Untersuchungsgebiet Frienisberg im Schweizer Mittelland (Kanton Bern; PRASUHN & GRÜNIG 2001) und zum anderen das Länenbachtal im Tafeljura (Kanton Basel-Landschaft; OGERMANN et al. 2003). Diese – von Seiten der Naturraumausstattung – sehr unterschiedlichen Testgebiete decken einen wesentlichen Teil der ackerbaulich genutzten Regionen der Schweiz ab.

4.1 Methodenvergleich zwischen Erosionsschadenskartierung, Modellrechnung mit ABAG und Erosionsschlüssel

Der Methodenvergleich zwischen Erosionsschadenskartierung und den Modellberechnungen erfolgte im Testgebiet Frienisberg im Berner Mittelland (PRASUHN & GRÜNIG 2001). Das Gebiet ist ackerbaulich genutzt und umfasst auf 58 Hektaren 39 Ackerparzellen.

Die Erosionsschadenskartierung wurde in Anlehnung an die Kartieranleitung von ROHR et al. (1990) von 1997 bis 2004 ereignisbezogen und parzellenscharf durchgeführt. Dabei wurden nach jedem erosiven Niederschlagsereignis lineare Erosionsformen vermessen, um das Ausräumvolumen zu quantifizieren. Flächenhafte Erosion wurde zusätzlich visuell beurteilt und über Erfahrungswerte quantifiziert (PRASUHN 2004, 2005).

Die Modellberechnung über die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) erfolgte in Anlehnung an SCHWERTMANN et al. (1990) mit einer an die Verhältnisse im Berner Mittelland adaptierten Version (PRASUHN & GRÜNIG 2001; PRASUHN & WEISSKOPF 2004).

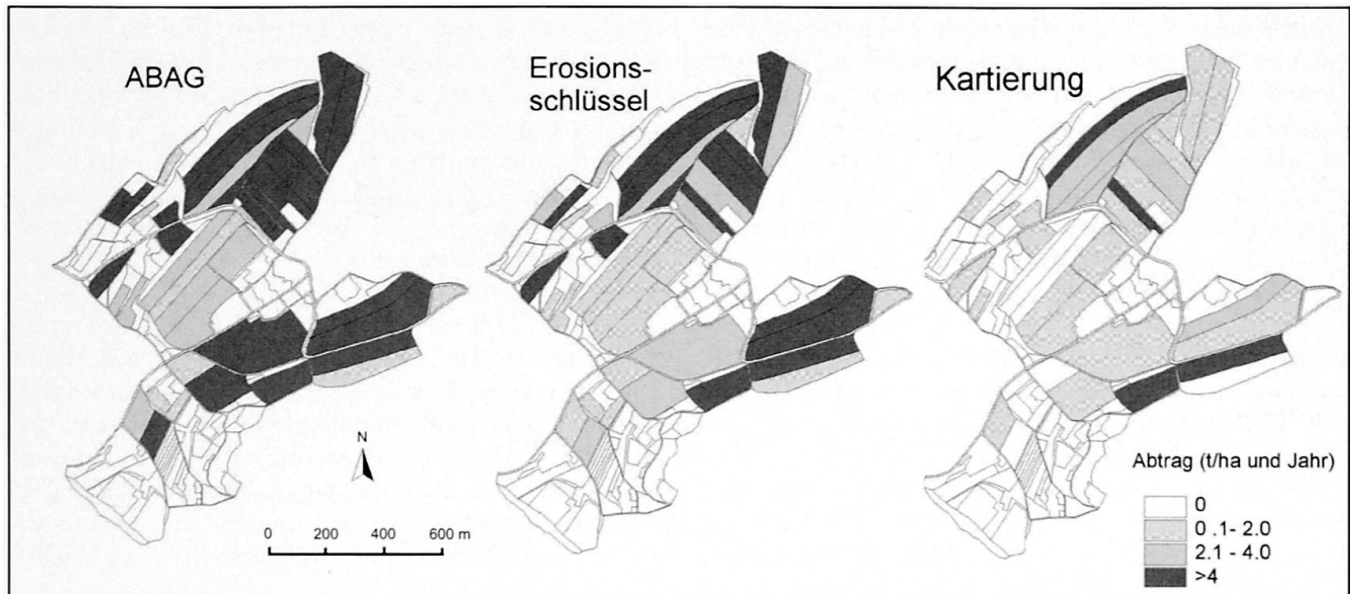


Abb. 1: Vergleich der ermittelten Bodenabträge auf Ackerflächen über Erosionsschadenskartierung sowie über Modellberechnung mit Allgemeiner Bodenabtragsgleichung (ABAG) bzw. Erosionsschlüssel für das Testgebiet Frienisberg (Kanton Bern, Schweiz; jeweils Mittelwerte der Periode 1997-2004 in t/ha und Jahr)

Comparison of soil loss on arable land within the Frienisberg study area (canton of Berne, Switzerland). Results determined by erosion mapping, as well as by use of the universal soil loss equation adapted for Switzerland and the Swiss soil erosion assessment tool (average values over the period 1997-2004 in t/ha and year)

Erosion des terres arables de la zone d'étude de Frienisberg (Canton de Berne, Suisse) par relevé cartographique, par le modèle de l'équation universelle des pertes de sol adopté pour la Suisse et par la clef d'estimation suisse (valeurs moyennes pour la période 1997-2004 en t/ha et année)

Entwurf und Kartographie: V. PRASUHN

Neben den Standortfaktoren (Niederschlag, Boden, Relief bzw. R-, K- und LS-Faktor) wurden die Fruchtfolge inklusive Zwischenfruchtanbau und Bodenbearbeitungsverfahren und die Bearbeitungsrichtung über acht Jahre (1997-2004) für jede Parzelle im Feld erhoben und ein entsprechender Bewirtschaftungs- und Erosionsschutzfaktor (C- bzw. P-Faktor) berechnet.

Der Erosionsschlüssel (MOSIMANN & RÜTTIMANN 1999) ist ein für Betriebsleiter und Berater entwickeltes Schätzverfahren zur Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit, welches auf den Grundlagen der ABAG basiert. Für jede Parzelle wurden die Standortseinflüsse eingestuft, ein Fruchtfolgefaktor für die Periode 1997-2004 bestimmt und die Gefährdung für flächenhafte Erosion berechnet. Für lineare Erosion wurde auf der Grundlage der Erosionsschadenskartierungen gemäss Erosionsschlüssel ein Zuschlag bestimmt.

Der Vergleich der drei verschiedenen Ansätze im selben Gebiet über den gleichen Zeitraum zeigt ein heterogenes räumliches Muster (Abb. 1). Auf allen Parzellen liegen die berechneten Bodenabträge über den kartierten. Die flächengewichteten Abträge liegen im Mittel

der 38 Parzellen beim Erosionsschlüssel um Faktor 3 und bei der ABAG-Berechnung um Faktor 5 über den kartierten Bodenabträgen. Einerseits ist bekannt, dass die ABAG-basierten Modellrechnungen die Bodenabträge besonders bei geringem Abtrag von <10 t/ha und Jahr überschätzen (PRASUHN & GRÜNING 2001), andererseits bestehen Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Erosionsschäden über die Kartierung, vor allem bei flächenhafter Erosion. Weiterhin ist die ABAG-Berechnung als 20-jähriger Mittelwert zu verstehen, die Erosionsschadenskartierung hat aber bisher nur über sieben Jahre gedauert. So gab es elf Parzellen, auf denen bisher nie Erosion kartiert wurde und weitere zehn Parzellen mit minimalen Abträgen. Vor allem bei diesen Parzellen sind die Differenzen zwischen kartierten und berechneten Abträgen besonders gross. Die neun Parzellen, auf denen bezüglich der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit bzw. Einhaltung der VBBo-Richtwerte kritische Abtragswerte von >2 t/ha und Jahr über sieben Jahre kartiert wurden, werden von den beiden Modellberechnungen auch entsprechend als gefährdet klassiert.

Zwischenfazit: Der Vergleich von Erosionsschadenskartierung und Modellberechnung mit ABAG und mit

Erosionsschlüssel zeigt, dass beide Modellansätze für fast alle Parzellen höhere Abtragswerte als die Kartierung berechnen und dadurch deutlich mehr für die Bodenfruchtbarkeit kritische Parzellen ausweisen. Alle Parzellen, auf denen bisher hohe Bodenabträge kartiert wurden, werden aber von beiden Modellansätzen zuverlässig als Parzellen mit hoher Gefährdung identifiziert. Die Modelle zeigen, wo das grösste Risikopotenzial für Bodenerosion auf Ackerschlägen vorhanden ist.

4.2 Methodenvergleich zwischen Erosionsschadenskartierung und Modellrechnung mit EROSION 3D

Der Methodenvergleich zwischen Erosionsschadenskartierung und einer Berechnung von Bodenabträgen mit Hilfe des Computermodells EROSION 3D (E 3D) erfolgte für das Länenbachtal, einem 2.6 km² grossen, land- und forstwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet im Nordwestschweizer Tafeljura (HEBEL 2003).

E 3D ist ein computergestütztes Simulationsmodell, welches die physikalischen Prozesse von oberflächlichem Niederschlagsabfluss sowie die dadurch hervorgerufene Bodenerosion (Summen aus linearen und flächenhaften Erosions- sowie Akkumulationsformen) in Kleineinzugsgebieten für einzelne Starkniederschlagsereignisse quantifiziert (SCHMIDT et al. 1996). Das Modell berechnet dabei prozessorientiert und zeitlich aufgelöst (z.B. 10 Minuten-Intervalle) die Infiltrationsrate, den resultierenden Oberflächenabfluss, die Loslösung von Bodenpartikeln durch Tropfenaufrall und Abflussimpuls sowie deren Transport und Deposition. Modellparametrisierung und Ergebnisausgabe erfolgen in räumlich kontinuierlicher Form als Rasterdaten mit wählbarer Zellauflösung. Im Vergleich zu anderen verfügbaren physikalischen Erosionsmodellen ist die Inputerstellung für E 3D mit geringerem zeitlichen und messtechnischen Aufwand verbunden und wird durch einen umfangreichen Referenz-Parameterkatalog zusätzlich unterstützt.

Als Modellinput wurden Parameter zu Niederschlag (Messdaten in 10 Minuten-Auflösung), Bodeneigenschaften (Laboranalysen zu Textur und organische Substanz für vorherrschende Bodenformen, Erosionswiderstand anhand Parameterkatalog), Bodenzustand (gemessene Anfangsfeuchte, Oberflächenrauigkeit anhand Parameterkatalog) und Bewirtschaftung (Pflanzenbedeckung anhand Parameterkatalog) sowie Morphologie (digitales Höhenmodell) für Einzugsgebiet und vorflutendes Gerinne (Länenbach) berücksichtigt.

Die Erfassung von linearen Erosionsschäden für den Zeitraum Februar 1997 bis Februar 1999 im Feld erfolgte ereignisbezogen und entsprechend der Methodik von ROHR et al. (1990), flächenhafte Abträge durch Zwischenrillenerosion blieben dabei unberücksichtigt.

Abbildung 2 zeigt für sämtliche erosive Niederschlagsereignisse zwischen Februar 1997 und Februar 1999 einen visuellen Vergleich zwischen den im Feld diskret erhobenen Erosionsschäden und räumlich kontinuierlichen Bodenabträgen, welche mit E 3D für dieselben Ereignisse kumulativ berechnet wurden (exemplarisch wird ein Teilausschnitt des Untersuchungsgebiets dargestellt).

Die mit E 3D berechneten Bodenabträge sind deutlich höher als die über die Schadenskartierung erhobenen. Die Abweichung kann einerseits dadurch erklärt werden, dass über Schadenskartierung nur lineare, nicht aber flächenhafte Bodenerosion quantifiziert wird. Andererseits ist aus früheren Untersuchungen bekannt, dass E 3D dazu tendiert, Bodenabträge deutlich zu überschätzen (HEBEL 2003; JETTEN et al. 1999; SCHMIDT et al. 1999).

Der Vergleich zeigt teilweise gute räumliche Analogien zwischen den ereignisbezogen, räumlich diskret kartierten Schäden und den ebenfalls ereignisbezogen berechneten, räumlich kontinuierlichen Abtragsraten. Abweichungen sind dadurch begründbar, dass der Einfluss lokaler geomorphologischer Kleinstrukturen (z.B. Ackerrandfurchen, Eintiefung von Wegen) vom Modell aufgrund der limitierten Rasterauflösung (prozessierte Zellengrösse 6.25 m) nicht hinreichend genau wiedergegeben wird. Oberflächenabfluss wird zudem im nordwestlichen Teil des Kartenausschnittes durch ein Rohrdrainage-System reduziert, was vom Modell nicht berücksichtigt werden kann.

Zwischenfazit: Der Vergleich zwischen Schadenskartierung und Simulationsergebnissen zeigt, dass das prozessorientierte Erosions-Simulationsmodell E 3D eingesetzt werden kann, um durch eine Analyse räumlich kontinuierlich berechneter Erosionsraten eine Ausscheidung jener Standorte in einem Untersuchungsgebiet durchzuführen, an denen während erosiver Starkregenereignisse kritische Abtragsraten auftreten können.

Allerdings bleibt die Applikation prozessorientierter Modelle auf Einzugsgebiets-Dimension beschränkt; integrierte regionale oder landesweite Berechnungen sind nicht möglich. Zudem ist eine flächendeckend vereinheitlichte Parametrisierung solcher Modelle für die Schweiz gegenwärtig nicht gewährleistet. Dies bedarf Vorarbeiten zur Standardisierung und homogenisierten Datenbeschaffung (z.B. Adaptierung von Transferfunktionen und Parameterkatalogen zur Modellinput-Erstellung für regionale Verhältnisse, Korrektur für Drainagen).

4.3 Einzugsgebietsmessungen

Im Einzugsgebiet (EZG) Länenbachtal (siehe Kap. 4.2) wurden im Zeitraum vom 1. März 2002 bis zum 30. Juni 2004 Erosionsschadenskartierungen und Hochwasserbeprobungen in der Klein- und Kleinstein-

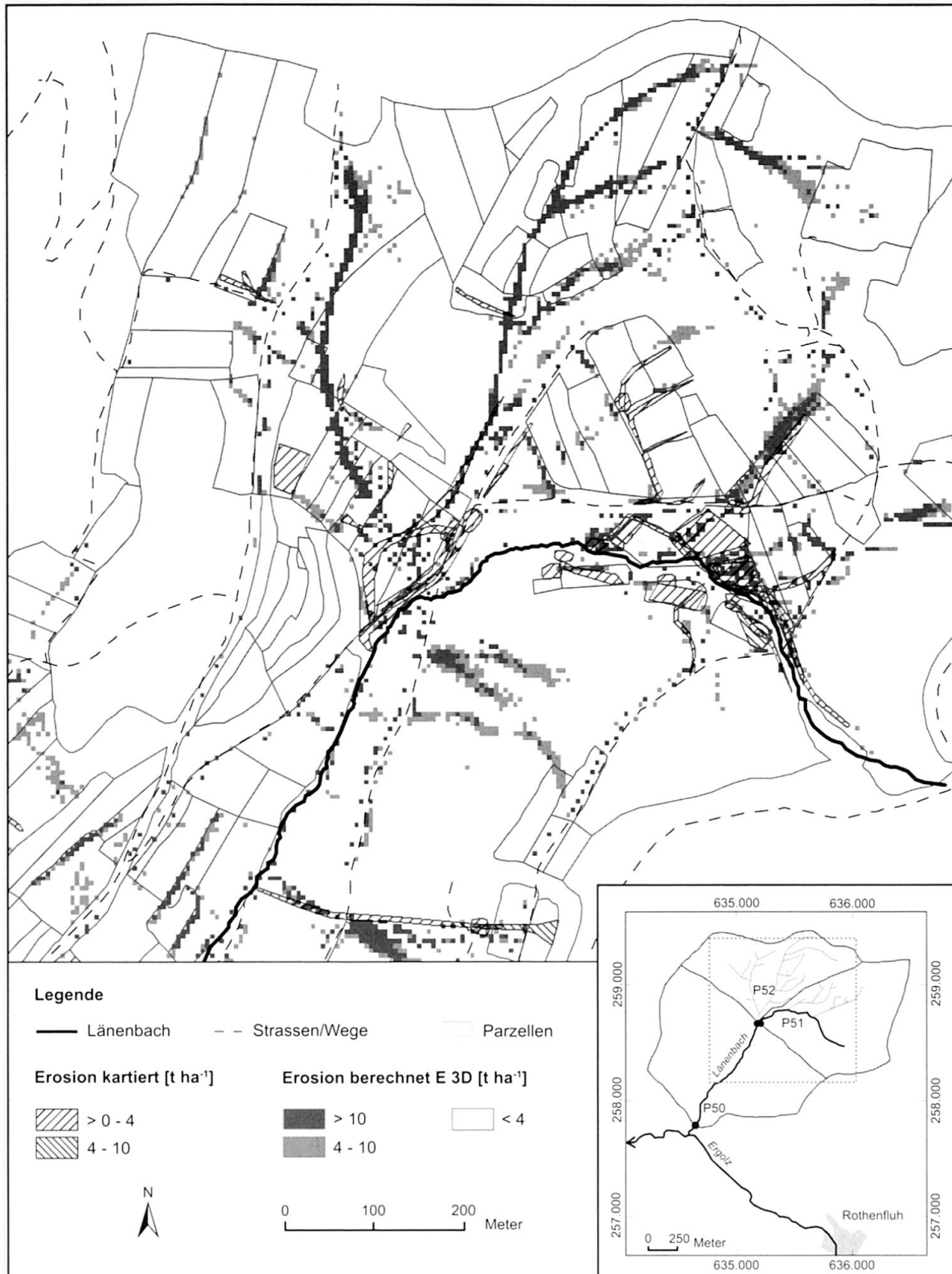


Abb. 2: Im Feld kartierte Erosionsschäden und mit E 3D berechnete Bodenabträge für sämtliche erosive Niederschlagsereignisse im Zeitraum Februar 1997 bis Februar 1999 im Länenbachtal (Basel-Landschaft, Schweiz)
Field-mapped erosion damage and E 3D-calculated soil loss for all erosive precipitation events between February 1997 and February 1999 in the Länenbach valley study area (Basel-Landschaft, Switzerland)

Dégâts dus à l'érosion relevés dans le terrain et érosion du sol calculée par E 3D pour l'ensemble des précipitations entre février 1997 et février 1999 dans la zone d'étude de la Vallée de Länenbach (Bâle-Campagne, Suisse)

Entwurf: B. HEBEL; Kartographie: R. WEISSHAIDINGER

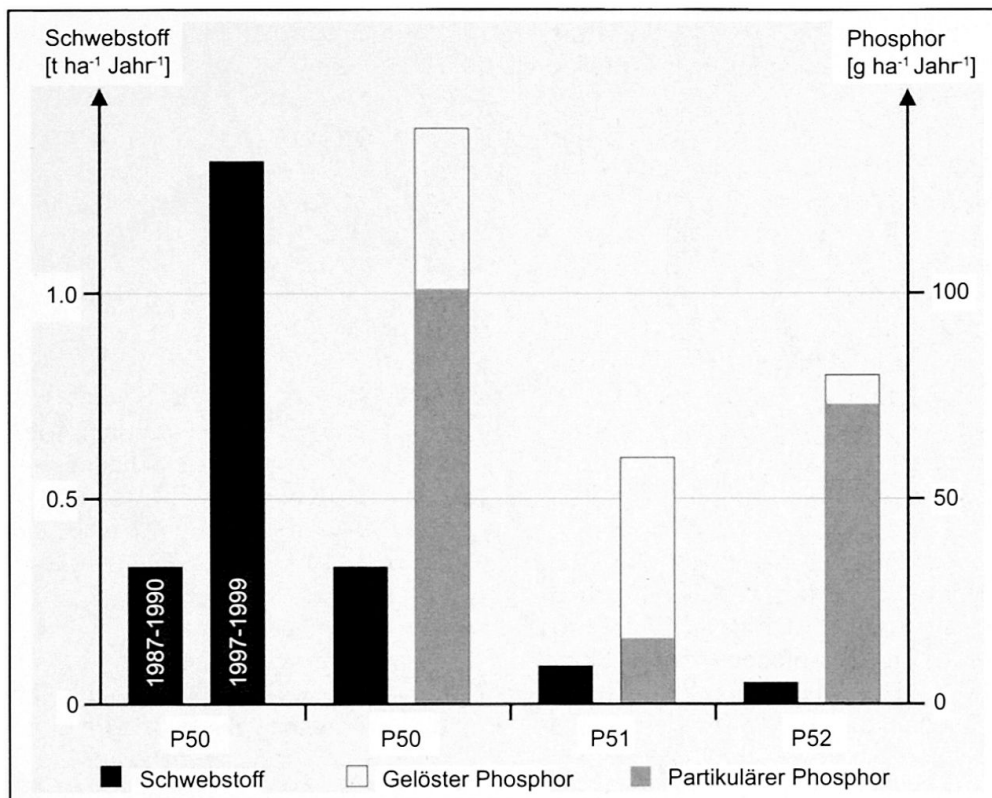


Abb. 3: Durchschnittliche jährliche Stofffrachten im Einzugsgebiet P50 und in den Teileinzugsgebieten P51 und P52 im Zeitraum vom 1. März 2002 bis zum 30. Juni 2004

Average annual sediment yield from the catchment area P50, and the subcatchment areas P51 and P52 between 1 March 2002 and 30 June 2004

Transport moyen annuel de matériaux issus du bassin versant P50 et des sous-bassins versants P51 et P52 entre le 1 mars 2002 et le 30 juin 2004

Datengrundlage: 1987-1990 und 1997-1999 aus PRASUHN 1991 bzw. HEBEL 2003

zugsgebietsskala durchgeführt. Ziel war, die Untersuchung von Oberflächenprozessen auf Ackerflächen und deren Konnektivität an Oberflächengewässer zu untersuchen. Erosionsschäden wurden mittels der Methode nach ROHR et al. (1990) aufgenommen, Gerinneerosion wurde qualitativ bewertet. An drei hydrologischen Stationen (P50, P51, P52; Lage siehe Abb. 2) mit integrierten automatischen Wasserprobennehmern wurde der Durchfluss kontinuierlich und der Gehalt an Schwebstoff, gelöstem und partikulärem Phosphor während Hochwasserwellen ermittelt (vgl. WEISSHAIDINGER et al. 2005). Durch die in Beziehung zu Durchflussgrößen gesetzten Stofffrachten konnte eine Abschätzung der nicht beprobten Hochwasserereignisse (Winterereignisse, kleine Ereignisse) mittels einer Regressionsgleichung erfolgen.

In Abbildung 3 ist die durchschnittliche Schwebstofffracht für das Gesamteinzugsgebiet P50 und die Teileinzugsgebiete P51 und P52 sowie ein langfristiger Vergleich für P50 dargestellt; Phosphor wird als zusätzlicher

Erosionsindikator herangezogen. Der langfristige Vergleich der Schwebstoffausträge am Pegel P50 zeigt eine beträchtliche Variabilität zwischen den Untersuchungsperioden. Die durchschnittliche Schwebstofffracht von 2002 bis 2004 ist – verglichen mit jener von 1997 bis 1999 – aufgrund der geringen Niederschläge relativ niedrig.

Neben der zeitlichen Variabilität wird eine beträchtliche räumliche Heterogenität im einzugsgebietsinternen Vergleich mit den Pegeln P51 und P52 deutlich. Wie die ereignisbezogenen Kartierungen und Stoffbilanzen zeigen, steigt die Schwebstofffracht auf Grund von Gerinneerosionsprozessen – besonders der Seitenerosion – zum Gebietsauslass P50 stark an. Das verlagerte Ufermaterial führt zu der für das Gebiet hohen partikulären Phosphorfracht.

Die Schwebstoffquellen für das nordöstliche Teileinzugsgebiet P51 sind hauptsächlich Erosion von Mergelwegen im oberen und Tiefenerosion des Vorfluters im mittleren und unteren Gewässerabschnitt. Ins-

besondere die Tiefenerosion liefert phosphorarmes Sediment und führt zu einem eher geringen Anteil an partikulärem Phosphor.

Die Schwebstofffracht des drainierten Teileinzugsgebiets P52 ist, verglichen mit den anderen Einzugsgebieten, geringer, da Tiefen- und Seitenerosion hier ausgeschlossen werden können (Drainagerohre). Wie die Erosionsschadenskartierungen aber zeigen, wird Sediment aus Erosion von Mergelwegen und seltener aus Talwegerosion über Einlaufschächte in die Drainagesammelleiter transportiert. Der sehr hohe Anteil an partikulärem Phosphor bestätigt zudem die Annahme, dass Oberbodenmaterial über Makroporen (v.a. Trockenrisse) über die Drainagerohre transportiert wird.

Zwischenfazit: Während Niederschlagsereignissen erfolgt der schnelle Wassertransport und damit verbunden die Mobilisierung von gelösten und partikulären Stoffen in präferentiellen Fließpfaden – z.B. Gerinne, Tallinien, Mergelwege, Fahrspuren, Trockenrisse und Drainagen. Die Quellen des Erosionsmaterials sind neben Ackerschlägen überwiegend die angesprochenen Fließpfade selbst. Die geringen Erosionsschäden auf Ackerflächen hatten hauptsächlich eine lokale Umlagerung von Boden zur Folge; direkte Übertritte in den Bach konnten lediglich an Mergelwegen festgestellt werden. Die Beobachtungen, dass im Landschaftstyp des Tafeljuras nur ein kleiner Teil des erodierten Materials direkt in die Vorfluter eingetragen wird, bestätigen Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen (z.B. PRASUHN 1991; OGERMANN et al. 2003). Die Kombination aus Kartierungen und Einzugsgebietsmessungen ermöglicht die Aufnahme und Bewertung sowohl der realen *on-site*-Schäden auf den Ackerflächen als auch der im Oberflächengewässer transportierten Stoffe. Obwohl Kartierung und Einzugsgebietsmessung nicht grundsätzlich vergleichbar sind, kann durch den Einsatz beider Methoden die Anbindung zwischen Erosionsquellflächen und *off-site*-Ökosystemen ereignisbezogen und langfristig ermittelt werden.

5 Schlussfolgerungen

Alle drei getesteten Modellansätze (ABAG, Erosionsschlüssel, E 3D) weisen höhere Abtragsraten auf als die über Kartierungen ermittelten. Ursache dafür ist einerseits die schon von verschiedenen Autoren beschriebene Überschätzung durch die Modelle, andererseits aber auch eine mögliche Unterschätzung durch die Kartierung. Für den Vollzug der gesetzlichen Vorgaben stellen die Modelle dennoch ein geeignetes Hilfsmittel dar, da alle gemäss Kartierung als kritisch eingestuften Flächen als solche ausgewiesen werden. Die Modelle scheiden jedoch mehr kritische Flächen aus (potenzielle Erosionsgefährdung). Diese müssen

daher gezielt im Feld einer Prüfung im Hinblick auf die Ergreifung von Schutzmassnahmen unterzogen werden. Schadenskartierungen müssen dabei aufgrund der Witterungsvariabilität über mehrere Jahre laufen, um repräsentative Aussagen zu ermöglichen.

Einerseits liegt der Unterschied zwischen den Modellrechnungen mit ABAG bzw. Erosionsschlüssel und jenen mit E 3D in der zeitlichen und räumlichen Auflösung. Während ABAG und Erosionsschlüssel parzellenbezogene Angaben liefern, ermöglicht E 3D innerhalb der Parzelle zu differenzieren und kann so mögliche lineare Erosionsformen wie z.B. Talwege oder auch mögliche *off-site*-Schäden aufzeigen. Andererseits bestehen Unterschiede in der Komplexität der Ansätze und damit der Anwenderfreundlichkeit. Der Erosionsschlüssel stellt dabei das einfachste und kostengünstigste Verfahren dar.

Für ein indikatorbasiertes Monitoring im Rahmen des Vollzugs der Bodenschutzgesetzgebung wird ein kombiniertes, stufenweises Vorgehen aus flächendeckender Modellierung und gezielter Erosionsschadenskartierung empfohlen:

- Ansprache von Ackerbaugebieten mit Hilfe einer grossräumigen, räumlich kontinuierlichen ABAG- bzw. Erosionsschlüssel-Analyse
- Gezielte, räumlich differenzierte Ausscheidung von kritischen Flächen innerhalb dieser Gebiete mit Hilfe von prozessorientierten, räumlich kontinuierlichen Erosionsmodellen
- Mehrjährige Kartierung der ausgeschiedenen Flächen zur Entscheidungsfindung bezüglich Art und Ausmass zu treffender Bodenschutzmassnahmen.

Die Einzugsgebietsmessungen zeigen, dass der durchschnittliche, auf die Ackerflächen des Gebietes umgelegte Schwebstoffaustrag bei den hier untersuchten Einzugsgebieten unter dem von der VBBo geforderten Richtwert für zulässigen Bodenabtrag von Ackerschlägen liegt. Jedoch lassen sich solche Erosionsraten höchstens in ackerbaudominierten Einzugsgebieten direkt aus den Austragsmessungen am Pegel ableiten, in anderen Einzugsgebieten dominieren Stoffausträge aus anderen Eintragspfaden. Trotzdem stellt die gewählte Methodenkombination aus Einzugsgebietsabfluss- und Stoffmessungen ein geeignetes Instrument zur integralen Aufnahme von Boden- und Gewässerschutzaspekten dar – wie es auf europäischer Ebene etwa mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie aktuell gefordert wird (vgl. FEGER 2004).

In Kombination mit einer Kartierung können auch Herkunftsorte von Stoffen in Gewässern erkannt, Reduktionspotenziale (z.B. Pufferstreifen entlang von Wegen, besonders um Einlaufschächte) räumlich ausgewiesen und gezielte Massnahmen zur Verminderung bzw. Vermeidung von Bodenerosion eingeleitet werden.

Literatur

- FEGER, K.-H. (2004): Pedologische und geomorphologische Bedingungen und Prozessdynamik in Wassereinzugsgebieten: Bedeutung für den Gewässerschutz im Lichte der EU-Wasserrahmenrichtlinie. – In: LORZ, C. & D. HAASE (Hrsg.): Stoff- und Wasserhaushalt in Einzugsgebieten – Beiträge zur EU-Wasserrahmenrichtlinie und Fallbeispiele. – Berlin, Heidelberg: Springer: 3-6.
- GAILLARD, G. (Hrsg.) (2003): Agrarumweltindikatoren – Machbarkeitsstudie für die Umsetzung in der Schweiz. – = Schriftenreihe der FAL 47, Zürich-Reckenholz: 1-68.
- HEBEL, B. (2003): Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiet-Dimension. – = Physiographica 32, Basel: 1-181.
- JETTEN, V., DE ROO, A. & D. FAVIS-MORTLOCK (1999): Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. – In: Catena 37: 521-541.
- LAL, R. (Hrsg.) (1994): Soil erosion research methods. – Ankeny (Iowa): Soil and Water Conservation Society.
- LESER, H., MEIER-ZIELINSKI, S., PRASUHN, V. & C. SEIBERTH (2002): Soil erosion in catchment areas of Northwest-Switzerland. Methodological conclusions from a 25-year research program. – In: Zeitschrift für Geomorphologie NF 46: 35-60.
- MORGAN, R.P.C. (2005): Soil erosion and conservation. – 3. Auflage, Malden: Blackwell Publishing.
- MOSIMANN, T. & M. RÜTTIMANN (1999): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes. – Bern: Amt für Landwirtschaft des Kantons Bern; Aarau: Finanzdepartement Aargau, Abteilung Landwirtschaft; Solothurn: Kanton Solothurn, Amt für Umweltschutz.
- OGERMANN, P., MEIER, S. & H. LESER (2003): Ergebnisse langjähriger Bodenerosionskartierungen im Schweizer Tafeljura. – In: Landnutzung und Landentwicklung 44: 151-160.
- PRASUHN, V. & K. GRÜNIG (2001): Evaluation der Ökomassnahmen – Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. – = Schriftenreihe der FAL 37, Zürich-Reckenholz: 1-152.
- PRASUHN, V. & P. WEISSKOPF (2004): Current approaches and methods to measure, monitor and model agricultural soil erosion in Switzerland. – In: FRANCAVIGLIA (ed.): Agricultural impacts on soil erosion and soil biodiversity: developing indicators for policy analysis. Proceedings from an OECD Expert Meeting, March 2003. – Rome: 217-228 (www.oecd.org/agr/env/indicators/htm).
- PRASUHN, V. (1991): Bodenerosionsformen und -prozesse auf tonreichen Böden des Basler Tafeljura (Raum Anwil, BL) und ihre Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt. – = Physiographica 16, Basel: 1-372.
- PRASUHN, V. (2004): Kartierung aktueller Erosionsschäden im Berner Mittelland. – In: Bulletin der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) 27: 79-84.
- PRASUHN, V. (2005): Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Erosion. – = Schriftenreihe der FAL 57, Zürich-Reckenholz: 108-119.
- RICHTER, G. (Hrsg.) (1998): Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. – Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- ROHR, W., MOSIMANN, T., BONO, R., RÜTTIMANN, M. & V. PRASUHN (1990): Kartieranleitung zur Aufnahme von Bodenerosionsformen und -schäden auf Ackerflächen. – = Materialien zur Physiogeographie 14, Basel: 1-56.
- SCHMIDT, J. (ed.) (2000): Soil erosion: application of physically based models. – Berlin: Springer.
- SCHMIDT, J., VON WERNER, M. & A. MICHAEL (1996): Erosion 2D/3D: Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. – Dresden und Freiberg: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie: 1-150.
- SCHMIDT, J., VON WERNER, M. & A. MICHAEL (1999): Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. – In: Catena 37: 449-456.
- SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT (1998a): Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) vom 1. Juli 1998 (814.12), Bern.
- SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT (1998b): Verordnung über Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV) vom 7. Dezember 1998 (910.13), Bern.
- SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT (1998c): Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (814.201), Bern.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen. – Stuttgart: Eugen Ulmer.
- VANDEKERCKHOVE, L. et al. (2004): Monitoring soil erosion in Europe. – In: VAN-CAMP, L. et al. (eds): Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection. – EUR 21319 EN/2, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities: 297-309.
- WEISSHAIDINGER, R., HEBEL, B., OGERMANN, P., SCHNEIDER, P., KATTERFELD, C. & R. KOCH (2005): Phosphorus concentrations of brook runoff in a Swiss agricultural catchment: longitudinal variability and subsurface drainage impact. – = IAHS Publication (Red Books) 299, Wallingford: 81-88.

Zusammenfassung: Erfassung von Bodenerosion in der Schweiz. Vergleichende Anwendung verschiedener Methoden und Beurteilung ihrer Eignung für den Vollzug der Bodenschutzgesetzgebung

In der Schweiz existiert eine umfassende Gesetzgebung für den Schutz der Ackerflächen vor Bodenerosion durch Wasser. Es fehlen aber einheitliche, verbindliche Vorgaben sowie ein für die ganze Schweiz validiertes Verfahren für den Vollzug dieser gesetzlichen Regelungen durch die Kantone. Im Artikel werden unterschiedliche Methoden zur Erfassung der Bodenerosion in zwei Untersuchungsgebieten vergleichend angewendet. Drei angewendete Modellansätze (Allgemeine

Bodenabtragsgleichung (ABAG), Erosionsschlüssel, EROSION 3D) berechneten höhere Abtragsraten als über Kartierungen ermittelte. Für den Vollzug der gesetzlichen Vorgaben stellen die Modelle dennoch ein geeignetes Hilfsmittel dar, da alle gemäss Kartierung als kritisch eingestuften Flächen als solche ausgewiesen werden. Die Modelle bestimmen eine potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerflächen. Erst nach einer Prüfung durch mehrjährige Kartierung auf den als potenziell gefährdet ausgewiesenen Flächen lassen sich Entscheidungen über gezielte Bodenschutzmassnahmen treffen. Deshalb wird für ein indikatorbasiertes Monitoring im Rahmen des Vollzugs der Bodenschutzgesetzgebung ein kombiniertes, stufenweises Vorgehen aus flächendeckender Modellierung und gezielter Erosionsschadenskartierung empfohlen. Einzugsgebietsabfluss- und Stoffmessungen erweisen sich zusätzlich als geeignetes Instrument, um Boden- und Gewässerschutzaspekte integriert zu betrachten.

Summary: Soil erosion assessment in Switzerland. Comparative application of methods and rating of their benefits for soil protection legislation

Switzerland has established a comprehensive legislation to protect arable land from soil erosion by water. Still lacking are unified, and binding standards, as well as a nationwide validated procedure for the enforcement of these legal regulations by the Swiss cantons. This article presents a comparative study of different erosion assessment methods implemented in two test regions. It could be shown that the three models implemented (i.e. universal soil loss equation, Swiss soil erosion assessment tool, and EROSION 3D) calculated higher soil loss rates than actually estimated by the mapping of soil erosion. Despite this difference, the models are still considered suitable tools for legislation enforcement, as they correctly identified areas defined by observation as critical. All models assess a potential soil erosion hazard on arable areas. A decision regarding suitable conservation measures can only be made after several years of observation of erosion-risk areas. Thus, to support indicator-based monitoring of erosion risk areas within soil protection law enforcement, a two-staged procedure is recommended, consisting of nationwide modelling to be followed by specific mapping where erosion risk is identified as critical. Surface runoff and sediment yield measurements of catchments are also considered suitable monitoring instruments which allow an integration of soil and water protection aspects.

Résumé: Evaluation de l'érosion du sol en Suisse. Application comparative de différentes méthodes et appréciation de leur aptitude à servir la législation sur la protection du sol

La Suisse a une législation étendue relative à la protection des terres arables contre l'érosion causée par l'eau. Toutefois, il n'existe pas d'objectifs normalisés

et impératifs, ni de procédure d'exécution de cette réglementation valables pour tous les cantons. Dans cet article, différentes méthodes de quantification de l'érosion sont présentées d'une manière comparative dans deux régions de recherche. Les trois modèles testés (équation universelle des pertes de sol (USLE), clef d'estimation de l'érosion, EROSION 3D) ont donné des taux d'érosion supérieurs à ceux obtenus par le relevé cartographique. Les modèles utilisés présentent malgré tout une aide adéquate pour l'application de la législation, car toutes les surfaces qui ont été identifiées comme critiques à l'érosion par le relevé cartographique le sont également en utilisant les modèles. Ces derniers permettent ainsi de déterminer un risque potentiel d'érosion des terres arables. Des décisions relatives à des mesures ciblées de protection du sol ne peuvent être prises qu'après une vérification des surfaces classées comme potentiellement menacées, au moyen de relevés cartographiques sur plusieurs années. Pour cette raison, dans le cadre de l'application des lois de la protection du sol, nous recommandons une procédure combinée et graduelle comprenant la modélisation de toute la surface et le relevé cartographique ciblé des dégâts d'érosion. Des mesures d'écoulement des eaux de surface et du transport des sédiments sont des instruments supplémentaires appropriés pour analyser intégralement les aspects de protection du sol et des eaux.

Dr. **Petra Ogermann**, Dipl.-Geogr. **Rainer Weissheidinger**, Geographisches Institut der Universität Basel, Abteilung Physiogeographie und Landschaftsökologie, Klingelbergstrasse 27, CH-4056 Basel, Schweiz.

e-mail: petra.ogermann@unibas.ch

e-mail: rainer.weissheidinger@unibas.ch

Dr. **Bernd Hebel**, Kanton Thurgau, Amt für Geoinformation - ThurGIS-Zentrum, Schlossmühlestrasse 9, CH-8510 Frauenfeld, Schweiz.

e-mail: bernd.hebel@tg.ch

Dr. **Volker Prasuhn**, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Bereich Gewässerschutz, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich-Reckenholz, Schweiz.

e-mail: volker.prasuhn@fal.admin.ch

Manuskripteingang/received/manuscript entré le 20.12.2005

Annahme zum Druck/accepted for publication/accepté pour l'impression: 14.9.2006