

Handbuch Boden

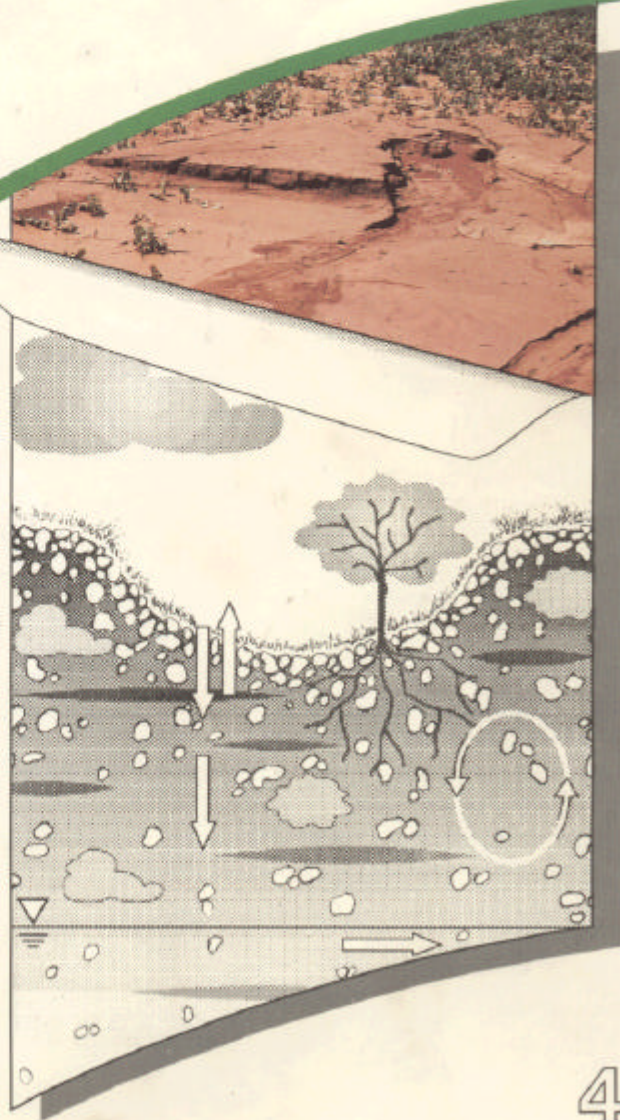
Prognose von Bodenerosion

Workshop



**BODEN
ABFALL
ALTLASTEN**

Materialien zum Bodenschutz



The logo for BofaWeb features the text "BofaWeb" in a bold, sans-serif font. The text is positioned on a yellow rectangular background. A red, curved shape, resembling a stylized wave or a ribbon, is located beneath the text, extending from the left side towards the right.

Bodenschutzfachinformation im WWW

IMPRESSUM

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe

Bearbeitung: Abteilung 5 Boden, Abfall, Altlasten
Referat 51 Bodenschutz

Redaktion: Dipl.-Geogr. Annette Kadereit

Karlsruhe, Juli 1995

**Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage.
Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt.
Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind - auch auszugsweise- nur für
eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

Prognose von Bodenerosion

Workshop

Herausgeber:

*Landesanstalt für Umweltschutz
Griesbachstraße 1
76 185 Karlsruhe*

Bearbeitung:

*Abteilung 5 Boden, Abfall, Altlasten
Referat 51 Bodenschutz*

Redaktion:

Annette Kadereit

Karlsruhe, Juli 1995

Vorwort

Auf vielen landwirtschaftlich genutzten Flächen Baden-Württembergs ist Bodendegradation durch Erosionsprozesse als Folge von Formen der Bewirtschaftung, die Erosion durch Wasser begünstigen, zu beobachten. Dort greifen Erosionsschutzmaßnahmen durch entsprechende Landbewirtschaftung unmittelbar. Nach §11 des Bodenschutzgesetzes von Baden-Württemberg ist die Landbewirtschaftung so zu gestalten, daß die Bodenfruchtbarkeit und die Leistungsfähigkeit des Bodens als natürliche Ressource durch standortgerechte Bewirtschaftungsmaßnahmen nachhaltig gesichert werden kann.

Für einen effektiven Erosionsschutz benötigt die Bodenschutzverwaltung Informationen, um Gefahren für den Boden und die Wirkung von Handlungsalternativen abschätzen zu können. Sie bilden die Grundlage, um Maßnahmen zur Erosionsminderung durchsetzen zu können.

Das Land Baden-Württemberg hat in den letzten Jahren vielfältige Maßnahmen zum Erosionsschutz erstellt, die landwirtschaftliche Beratung zum Erosionsschutz erweitert und Forschungsmittel bereitgestellt.

Die LfU hat im Dezember 1991 einen Workshop "Prognose von Bodenerosionen" veranstaltet und hierzu Fachleute aus Wissenschaft und Verwaltung aus dem gesamten Bundesgebiet eingeladen.

Aufgrund der vielen Nachfragen zu diesem Thema hat sich die LfU entschlossen, die Beiträge in der Reihe "Materialien zum Bodenschutz" aufzunehmen und damit einem größeren Fachpublikum zugänglich zu machen.

Sämtliche Beiträge wurden 1994 von den Autoren nochmals überarbeitet und auf einen aktuellen Stand gebracht.

Inhalt

VORWORT	1
EINFÜHRUNG WORKSHOP BODENEROSION DIETER WOLF, KARLSRUHE.....	5
LANDSCHAFTEN UND BÖDEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG FRIEDRICH WELLER, NÜRTINGEN	7
LITERATUR.....	23
TOLERIERBARE BODENEROSION - GRENZWERTE FÜR DEN BODENSCHUTZ WILHELM VOGL, RAVENSBURG.....	24
1 BODENEROSION ALS BODENBELASTUNG.....	24
1.1 <i>Lebensraum für Bodenorganismen</i>	24
1.2 <i>Standort für natürliche Vegetation</i>	25
1.3 <i>Standort für Kulturpflanzen</i>	25
1.4 <i>Ausgleichskörper und Filter und Puffer im Wasserkreislauf</i>	25
1.5 <i>Landschaftsgeschichtliche Urkunde</i>	25
2 BODEN IM SINNE DES BODENSCHUTZGESETZES	26
3 TOLERIERBARER BODENABTRAG.....	26
4 MÖGLICHKEITEN ZUR DURCHSETZUNG DES BODSCHG.....	28
5 IST DAS ZIEL 1 TONNE PRO HEKTAR UND JAHR ERREICHBAR?	29
6 ZUSAMMENFASSUNG.....	32
ERSTELLUNG VON EROSIONSPROGNOSEKARTEN MIT DEM MODELL DABAG JOSEF KAGERER, MÜNCHEN.....	33
1 EINGANGSDATEN	34
2 AUSGABEDATEN	35
LITERATUR.....	37
FAKTOREN DER ABAG UND DABAG - BESTIMMUNG UND GENAUIGKEIT - JOSEF HAIDER, MÜNCHEN - WEIHENSTEPHAN	38
1 EINFÜHRUNG	38
2 REGEN - UND OBERFLÄCHENABFLUßFAKTOR R	39
3 BODENERODIERBARKEITSAKTOR K.....	40
4 HANGLÄNGENFAKTOR L.....	43
5 HANGNEIGUNGSFAKTOR S.....	43
6 BEDECKUNGS - UND BEARBEITUNGSFAKTOR C.....	44
7 EROSIONSSCHUTZFAKTOR P	45
8 SENSITIVITÄTSANALYSE FÜR DIE EINZELNEN FAKTOREN	48
9 DABAG.....	49
10 GENAUIGKEIT DER ABTRAGSSCHÄTZUNG	51
DANKSAGUNG.....	54
LITERATUR.....	55

ERMITTLUNG VON K-FAKTOREN - REICHSBODENSCHÄTZUNG UND BODENBESTANDSAUFNAHME - WOLFGANG FLECK, FREIBURG IM BREISGAU.....	56
1 EINFÜHRUNG.....	56
2 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET.....	56
2.1 <i>Geologisch - morphologischer Überblick</i>	57
2.2 <i>Böden</i>	57
2.3 <i>Verbreitung der Böden im Untersuchungsgebiet</i>	58
3 ABLEITUNG DER EROSIONSGEFÄHRDUNG AUS DER BODENKARTE.....	60
3.1 <i>Legende der Bodenkarten 1:25.000 und Tabellarische Erläuterung</i>	60
3.2 <i>K-Faktoren der Lößböden im Untersuchungsgebiet</i>	62
4 VERGLEICH DER BODENKARTE MIT ERGEBNISSEN DER BODENSCHÄTZUNG.....	63
5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	64
6 SCHLUßFOLGERUNG.....	65
LITERATUR.....	65
EROSIONSGEFÄHRDUNGSKARTEN IN DER FLURNEUORDNUNG - HERSTELLUNG, ANWENDUNG UND ERFAHRUNGEN - LOTHAR KIEFER, KORNWESTHEIM	66
1 EROSIONSSCHUTZ IN DER FLURNEUORDNUNG.....	66
2 DAS DIGITALE GELÄNDEMOMENT IN DER FLURNEUORDNUNG.....	66
3 PRAKTISCHE HERSTELLUNG VON EROSIONSGEFÄHRDUNGSKARTEN	67
4 ANWENDUNG DER EROSIONSGEFÄHRDUNGSKARTEN.....	68
5 ERFAHRUNGEN.....	70
6 KÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN.....	71
LITERATUR.....	72
EROSIONSGEFÄHRDUNGSKARTEN DES DGM-SYSTEMS SCOP MANFRED SIGLE, STUTTGART	73
1 EINFÜHRUNG.....	73
2 DAS PROGRAMM-SYSTEM SCOP.....	73
3 EINGABEDATEN FÜR SCOP.....	74
4 ERZEUGUNG DIGITALER HÖHENMODELLE MIT SCOP.....	75
5 DIE PROGRAMMMODULE SLOPE UND INTERSECT	76
6 BODENEROSIONSBERECHNUNGEN MIT SCOP.INTERSECT	76
7 ARBEITSABLAUF ZUR ERSTELLUNG EINER EROSIONSGEFÄHRDUNGSKARTE.....	79
8 ARBEITS - UND RECHENAUFWAND FÜR DAS FLURBEREINIGUNGSGEBIET SULZFELD.....	79
9 GRAPHISCHE AUSGABE DER EROSIONSGEFÄHRDUNGSBERECHNUNGEN MIT SCOP	80
10 ABSCHÄTZUNGEN ZUR GENAUIGKEIT DER ERGEBNISSE	80
11 AUSBLICK	81
LITERATUR.....	82
ANWENDUNG DES MODELLS EROSION-2D IM RAHMEN BODENSCHUTZORIENTIERTER PLANUNGSVORHABEN JÜRGEN SCHMIDT, FREIBERG.....	83
1 EINFÜHRUNG.....	83
2 EIN - /AUSGABEGRÖßEN DES EROSION - 2D MODELLS.....	84
3 UNTERSUCHUNGSGEBIET	85
4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION DER MODELLRECHNUNGEN.....	87
4.1 <i>Abschätzung der Erosion für ein extremes Einzelereignis</i>	87
5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUßFOLGERUNGEN	99
LITERATUR.....	101

ERSTE FASSUNG BODENEROSIONSATLAS BADEN-WÜRTTEMBERG -	
AUSSAGEMÖGLICHKEITEN KLEINMABSTÄBIGER BETRACHTUNGEN - STEFAN JÄGER,	
HEIDELBERG.....102	
1	EINFÜHRUNG.....102
2	DAS MODELL102
3	METHODE103
3.1	<i>Regen - und Oberflächenabflußfaktor R</i> 103
3.2	<i>Bodenerodierbarkeitsfaktor K</i> 105
3.3	<i>Relieffaktoren L und S</i> 107
3.4	<i>Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor C</i> 109
4	MODELL ZUR ABSCHÄTZUNG DER BODENEROSIONSGEFÄHRDUNG.....111
5	ERGEBNISSE112
6	AUSBLICK116
	LITERATUR.....116
ABSCHÄTZUNG DER BODENEROSION DURCH FELDVERSUCHE UND	
MODELLANALYTISCHE ANSÄTZE BERND MURSCHEL & GERD CLEMENS, HOHENHEIM ...117	
1	EINFÜHRUNG.....117
2	METHODEN117
2.1	<i>Einsatz von Feldmethoden zur Quantifizierung der Bodenerosion</i> 117
2.2	<i>Einsatz von Modellen zur Schätzung der Bodenerosion</i> 121
3	SCHLUSFOLGERUNGEN130
3.1	<i>Zeitliche und räumliche Einsatzmöglichkeiten von Modellen und Feldmethoden</i> 131
3.2	<i>Anwendungsbezogene Einsatzmöglichkeiten von Modellen und Feldversuchen</i> 132
	LITERATUR.....134
ANHANG KARTEN:.....135	
ABBILDUNGSVERZEICHNIS138	
TABELLENVERZEICHNIS141	

Einführung *Workshop Bodenerosion*

Dieter Wolf, Karlsruhe

Ein wesentliches Merkmal der Bodenerosion ist die Irreversibilität des Vorgangs. Die Boden Neubildung - soweit sie überhaupt durch die gegebenen Bewirtschaftungs- und Klimaverhältnisse stattfindet - ist ein vergleichsweise langsamer, nicht meßbarer Prozeß. Demgegenüber wurden mittels Schadenskartierungen beispielsweise im Kraichgau Bodenverluste von 50 bis 300 t/pro ha und Jahr in Mais- und Zuckerrübenkulturen ermittelt.

Für den Bodenschutz ergibt sich Handlungsbedarf, wenn die häufig geforderten tolerierbaren Grenzwerte von jährlich 1 t/ha bzw. 10 t/ha zugrunde gelegt werden.

Aus ökologischer Sicht sind folgende Aspekte bei der Bodenerosion zu berücksichtigen:

- Veränderung der Böden

Im Bereich der Kuppen und Oberhänge erfolgt durch Bodenabtrag eine Ton- und Humusverarmung, eine Verminderung der Sorptionskapazität für Wasser und Nährstoffe, Verschlammungsneigung sowie Verminderung der Durchlüftung. Teilweise erfolgt Bodenabtrag bis zum anstehenden Gestein.

In den Senken entstehen durch Materialeinschwemmung mächtige Kolluvien mit hohem Tonanteil und schichtartiger Aggregatausprägung. Häufige Folge ist Wasserstau, schlechte Durchlüftung, überhöhte Nährstoff- und Pflanzenschutzmittelgehalte in den Böden.

- Belastung von Vorflutern

Ablagerung von Sedimenten in Seen, Regenrückhaltebecken und fließenden Gewässern.

Stofftransport verstärkt die Belastung durch Pestizide. Er fördert durch Eintrag von Düngemitteln die Eutrophierung der Gewässer.

Der Workshop setzt sich zum Ziel, Methoden vorzustellen und zu diskutieren, mit denen verlässliche Informationen zur Bodenerosion sowohl für die politische Ebene als auch für gezielte Maßnahmen auf Flurstücksebene gewonnen werden können. Hierzu sind Abschätzungen des aktuellen Bodenabtrages als auch die Prognose der Erosion unter geänderten Kulturmaßnahmen notwendig.

Im Rahmen des Workshops soll das gesamte Spektrum der Modelle zur Simulation der Bodenerosion von einer kleinmaßstäbigen, landesweiten Ebene, insbesondere für politische Entscheidungsträger bis hin zur großmaßstäbigen Simulation von Bewirtschaftungsalternativen und ihrer Auswirkung auf die Bodenerosion einzelner Ackerschläge betrachtet werden.

In den letzten 20 Jahren sind durch die Leistungsfähigkeit der elektronischen Datenverarbeitung die Möglichkeiten zum Einsatz rechenintensiver und komplexer Modelle zur Simulation der Bodenerosion gestiegen. Dieser Workshop soll dazu beitragen, die Entscheidungssicherheit für den Einsatz dieser Modelle zu erhöhen. Dabei sind folgende Kernfragen zu diskutieren:

- Modellauswahl

Hier ist zu prüfen, welche Modelle zur Prognose der Bodenerosion für überregionale, gebietsspezifische oder schlagbezogene Simulationen zur Verfügung stehen.

- Aussagesicherheit

Als zweites gilt es zu betrachten, daß Modelle nur Ausschnitte der Wirklichkeit wiedergeben und somit nicht das komplexe Gesamtsystem widerspiegeln. Es stellt sich also die Frage nach der Qualität, d.h. der Sicherheit des Modells. Darüberhinaus treten zwangsläufig Unschärfen im Bereich der Datenerhebung und der Parameterschätzung auf. Es ist zu diskutieren, wie sensibel die Modelle auf solche Unsicherheiten reagieren.

- Datenerhebung

Ein dritter wichtiger Bereich umfaßt das Problem der Datenerhebung für die Modelle. Insbesondere bei zunehmender Komplexität verlangen diese Modelle einen u.U. erheblichen, z.T. in der Praxis nicht zu realisierenden Aufwand bei der Bereitstellung und Erhebung der Eingangsdaten.

- Adaption

Der vierte Aspekt betrifft die regionalen Gegebenheiten. Dabei ist zu klären, welche Anpassungen notwendig sind und mit welchem Aufwand eine Adaption der Modelle, der Parameter und Eingangsgrößen an die regionalen Gegebenheiten verbunden ist.

Der Workshop ist in zwei Teile gegliedert. Während in dem ersten Teil des Workshops allgemeine und theoretische Grundlagen zum Thema Bodenerosion erörtert werden sollen, bilden im zweiten Teil Anwendungs- und Planungsverfahren den Schwerpunkt. Der Workshop soll auch die Gelegenheit bieten, Erfahrungen und Beiträge von seiten der Planungspraxis einzubringen.

Bevor wir uns aber den verschiedenen deterministischen Modellen, empirischen Modellen, Parametern und Fragen der Datengewinnung widmen, wird in dem anschließenden Vortrag Herr Prof. Dr. Weller sozusagen als Kontrapunkt einer numerischen Betrachtung eine ganz andere Sicht von Landschaft, Vegetation, Boden und Klimaverhältnissen in Baden-Württemberg geben.

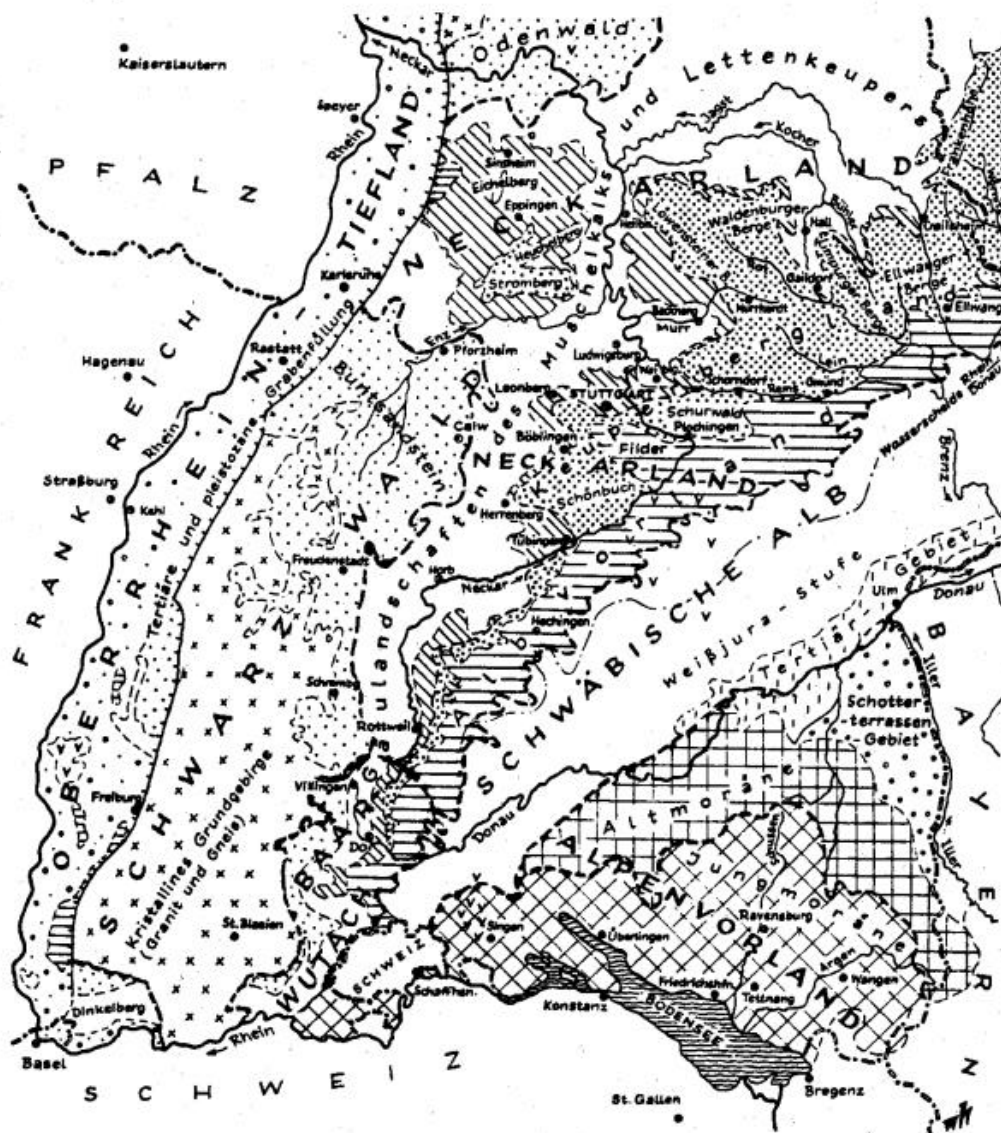
Landschaften und Böden in Baden-Württemberg

Friedrich Weller, Nürtingen

Die Einladung, im Rahmen des von der Landesanstalt für Umweltschutz ausgerichteten Workshops *Prognose von Bodenerosion* einen Vortrag zum Thema *Landschaften und Böden in Baden-Württemberg* zu halten, hat mich erstaunt, da ich der Meinung bin, dem geladenen Kreis von Fachleuten nichts Neues bieten zu können. Umso erfreulicher finde ich es zu erfahren, daß einige Teilnehmerinnen und Teilnehmer von außerhalb des Landes Baden-Württemberg kommen, sodaß der Vortrag wenigstens für diesen Personenkreis von Interesse sein kann. Angesichts der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit wird es sich allerdings nur um eine knappe Einführung handeln.

Die Landschaften Baden-Württembergs werden in erster Linie durch die großen geomorphographischen Einheiten geprägt. Folgende Großeinheiten können unterschieden werden (vgl. **Abb. 1**):

- der mit tertiären und quartären Sedimenten verfüllte *Ober rheingraben*,
- das aus kristallinen Gesteinen aufgebaute Mittelgebirgsland des *Schwarzwaldes* mit v.a. im Osten anliegendem Buntsandstein,
- der *Odenwald* mit einem dem Schwarzwald vergleichbaren geologischen Aufbau aus Grund- und Deckgebirge,
- das große Gebiet des *südwestdeutschen Schichtstufenlandes*, dessen mesozoische Gesteine vom Buntsandstein bis hinauf zum Weißen Jura reichen. Während erstere dem Schwarzwald bzw. Odenwald zugerechnet werden und letzterer die Schwäbische Alb aufbaut, bilden die dazwischen liegenden Schichten vom Muschelkalk bis zum Braunen Jura das *Neckar-* und *Mainland*. Darin werden unterschieden:
 - die *Gäulandschaften* im Bereich des teilweise lößbedeckten Muschelkalks und Lettenkeupers,
 - das *Keuperbergland* im Bereich des Mittleren Keupers,
 - das *Albvorland* im Bereich des Lias (Schwarzjura) und Dogger (Braunjura).
- Das Schichtstufenland wird bekrönt durch die *Schwäbische Alb*, die durch den Weißen Jura aufgebaut wird und eine eigene Großlandschaft bildet.
- Wo die mesozoischen Gesteine unter die tertiären und quartären Sedimente abtauchen, beginnt das *südwestdeutsche Alpenvorland*, dessen nördliche Grenze in etwa durch den Verlauf der Donau gekennzeichnet wird.



Nach der geologischen Schulkarte 1:1 Million von Baden-Württemberg bearbeitet von S. Müller 1965

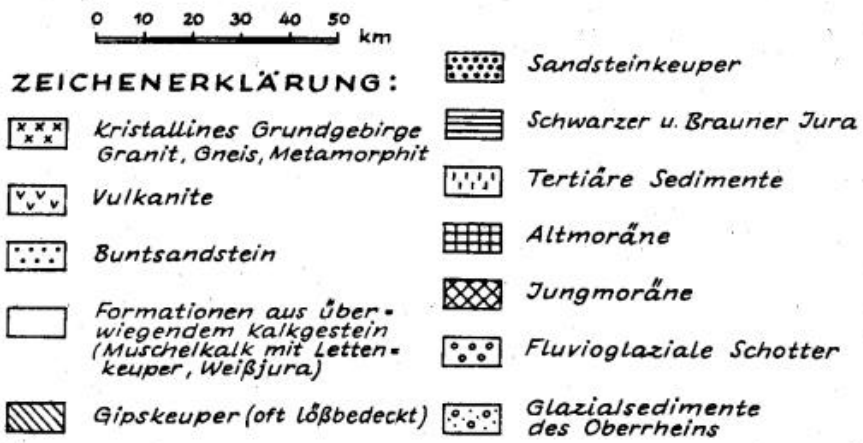


Abb. 1: Geologische Grobgliederung von Baden-Württemberg (aus: S. Müller et al., 1967)

Diese geomorphographisch-geologische Grobgliederung des Landes schlägt sich u.a. in einer entsprechenden Verteilung von Böden nieder. Im folgenden möchte ich lediglich den Aspekt der Erosionsneigung dieser Böden herausgreifen. In **Abb. 2** können Landschaften mit vergleichsweise hoher Bodenerodibilität von solchen mit relativ geringer Erosionsanfälligkeit unterschieden werden. Als niedrig wird die Erosionsneigung in den Berggebieten der Schwäbischen Alb und des Schwarzwaldes eingestuft, als hoch hingegen in den tieferen Lagen der Gäulandschaften - insbesondere im Kraichgau, im Neckarbecken und im Tauberbecken - und in den Tieflagen im Bereich der Donau und des Oberrheingrabens. Die Erodibilität der Böden ist allerdings nur eine Größe unter mehreren, die die Erosionsgefährdung von Böden bestimmt.

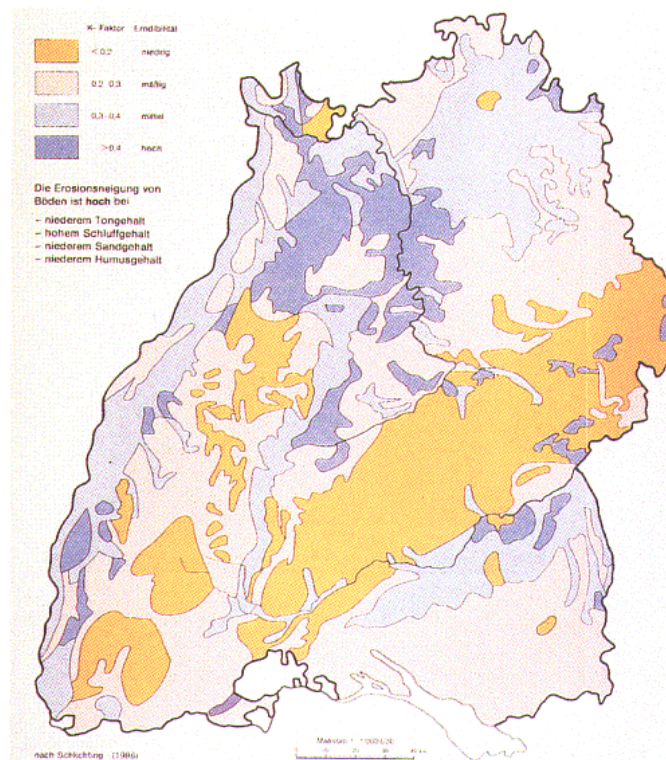


Abb. 2: Erosionsneigung (Erodibilität K) der Böden in Baden-Württemberg (aus: Bodenschutzprogramm '86 Baden-Württemberg)

Trotz hoher Erodibilität tritt in der Rheinebene infolge fehlenden Gefälles keine entsprechend hohe Bodenerosion auf (**Abb. 3**). Obwohl der Schwarzwald andererseits die Großlandschaft mit den größten Höhenunterschieden und den stärksten Hangneigungen ist, bleibt auch hier die Erosion meist gering. Dies liegt einmal an der geringen Erodibilität der Böden, die sowohl im kristallinen wie im Buntsandstein-Schwarzwald sandreich sind. Darüberhinaus werden auch heute noch weite Gebiete des Schwarzwaldes, insbesondere im Bereich des Buntsandsteines, durch eine geschlossene Waldbedeckung gekennzeichnet. Im Bereich des Kristallingesteins sind die Wälder stärker von landwirtschaftlich genutzten Flächen durchsetzt. Obwohl es sich vielfach um überaus steile Hanglagen handelt, die ackerbaulich nur mit dem Seilpflug bewirtschaftet werden können, wirkt die besonders

geringe Erodibilität der grobsandigen Kristallinverwitterungsböden einem stärkeren Bodenabtrag entgegen. Nachdem der Zwang zur Eigenversorgung mit Brotgetreide in den landwirtschaftlichen Betrieben heute nicht mehr besteht, wurden diese Hänge größtenteils in Grünland umgewandelt, sodaß die mäßigen Erosionsbeträge weiter reduziert wurden (**Abb. 4**).

Wenngleich der Schwarzwald trotz hoher Reliefenergie unter traditionellen Nutzungsformen nicht zu den Gebieten starker Bodenerosion in Baden-Württemberg zählt, so kann sich bei nicht angepaßter Nutzung doch auch hier eine entsprechend hohe Bodenerosion einstellen. Im Gebiet des Feldberges beispielsweise wurde die Vegetationsdecke als Folge touristischer Übernutzung teilweise so stark zerstört, daß der Boden offen liegt und sich auf den Wanderwegen tiefe Erosionsrinnen gebildet haben.

In den Hochlagen des Schwarzwaldes treten die höchsten Niederschlagssummen des Landes Baden-Württemberg auf (vgl. **Abb. 5**). Als erosionsfördernder Faktor sind aber nicht allein die Jahressumme sondern vielmehr die Verteilung der Niederschläge im Jahresverlauf und das Auftreten von Starkniederschlägen zu erachten.

Abb. 6 vermittelt einen Eindruck von der jahreszeitlichen Niederschlagsverteilung innerhalb Baden-Württembergs. Während der Schwarzwald durch eine mehr oder weniger gleichmäßige Niederschlagsverteilung über das Jahr mit einem nur wenig ausgeprägten Maximum während der Wintermonate Dezember und Januar gekennzeichnet wird, ist für die übrigen Gebiete Baden-Württembergs ein Sommermaximum der Niederschlagsverteilung charakteristisch, das vor allem im Alpenvorland und am Nordrand der Alpen deutlich hervortritt. Diese Verteilung von ozeanisch bzw. kontinental getöntem Klima wird auch durch vegetationskundliche Aufnahmen bestätigt (vgl. **Abb. 7**). Während für den Schwarzwald und den Odenwald Pflanzenarten mit ozeanischer Verbreitungstendenz kennzeichnend sind, werden die übrigen Landschaften Baden-Württembergs ganz oder zum überwiegenden Teil von Wildpflanzen mit kontinentaler Verbreitungstendenz besiedelt. Im Gegensatz zu ozeanisch beeinflussten Bereichen sind für Gebiete mit kontinentaler Klimatönung extremere Ausprägungen der Klimaelemente typisch; dies gilt für den Temperaturgang ebenso wie für die erosionsrelevante Niederschlagsverteilung.



Abb. 3: Überschwemmte Rheinaue bei Au am Rhein

Trotz überwiegend mittlerer Erosionsneigung der Böden ist die Erosionsgefahr in der Rheinebene wegen des geringen Gefälles meist nur gering. Dies gilt jedoch nicht für die Überflutungsgebiete der Auen, die deshalb ständig von Vegetation bedeckt sein müssen wie hier im Auwald.



Abb. 4: Steil geneigte Bewirtschaftungsflächen in einem typischen Schwarzwaldtal

Dank geringer Erosionsneigung der Böden konnten im Schwarzwald selbst steilere Hanglagen ackerbaulich genutzt werden. Wegen der schwierigen Bewirtschaftung sind sie heute meist in Grünland umgewandelt, was die Erosion zusammen mit dem hohen Waldanteil zusätzlich verringert.

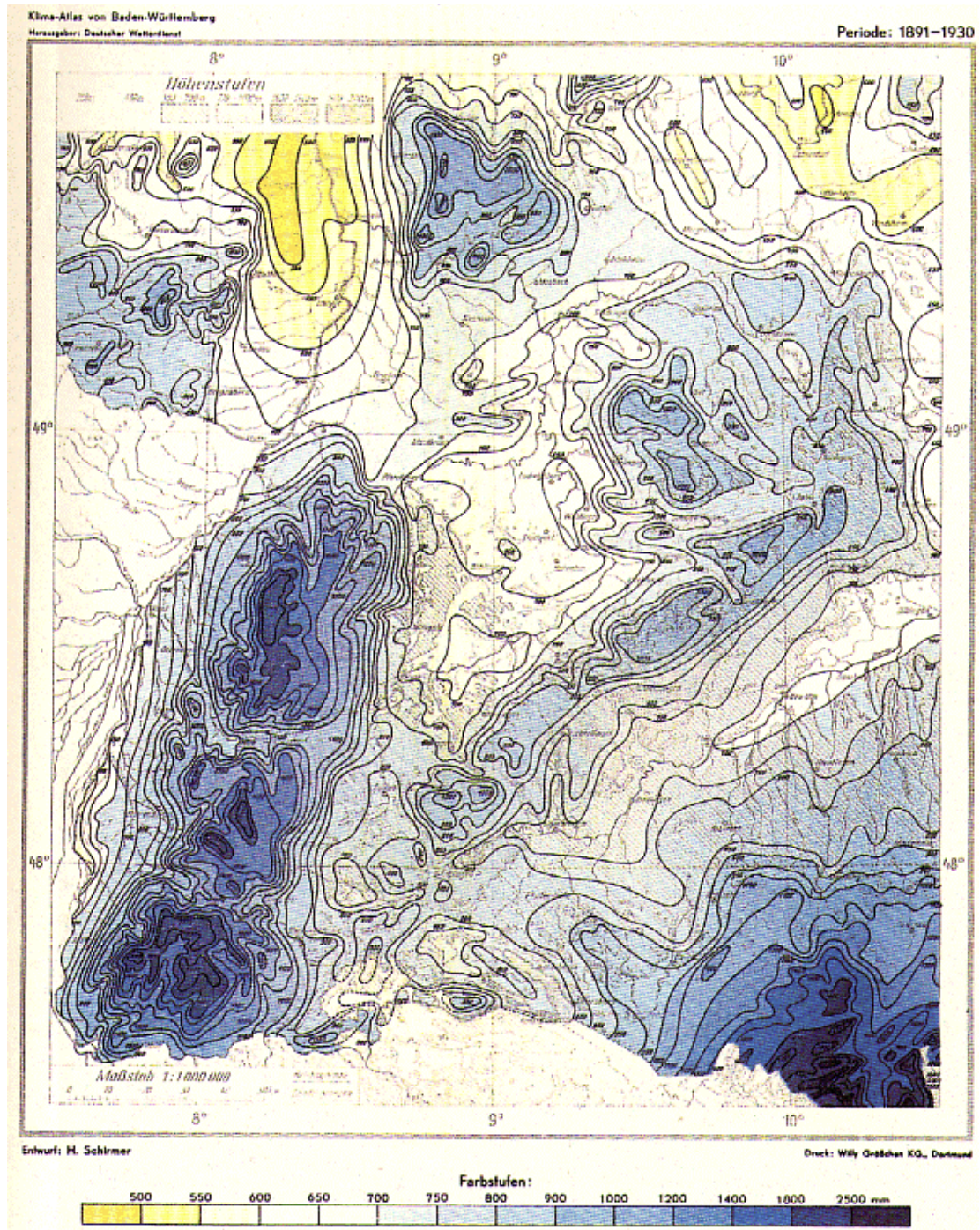
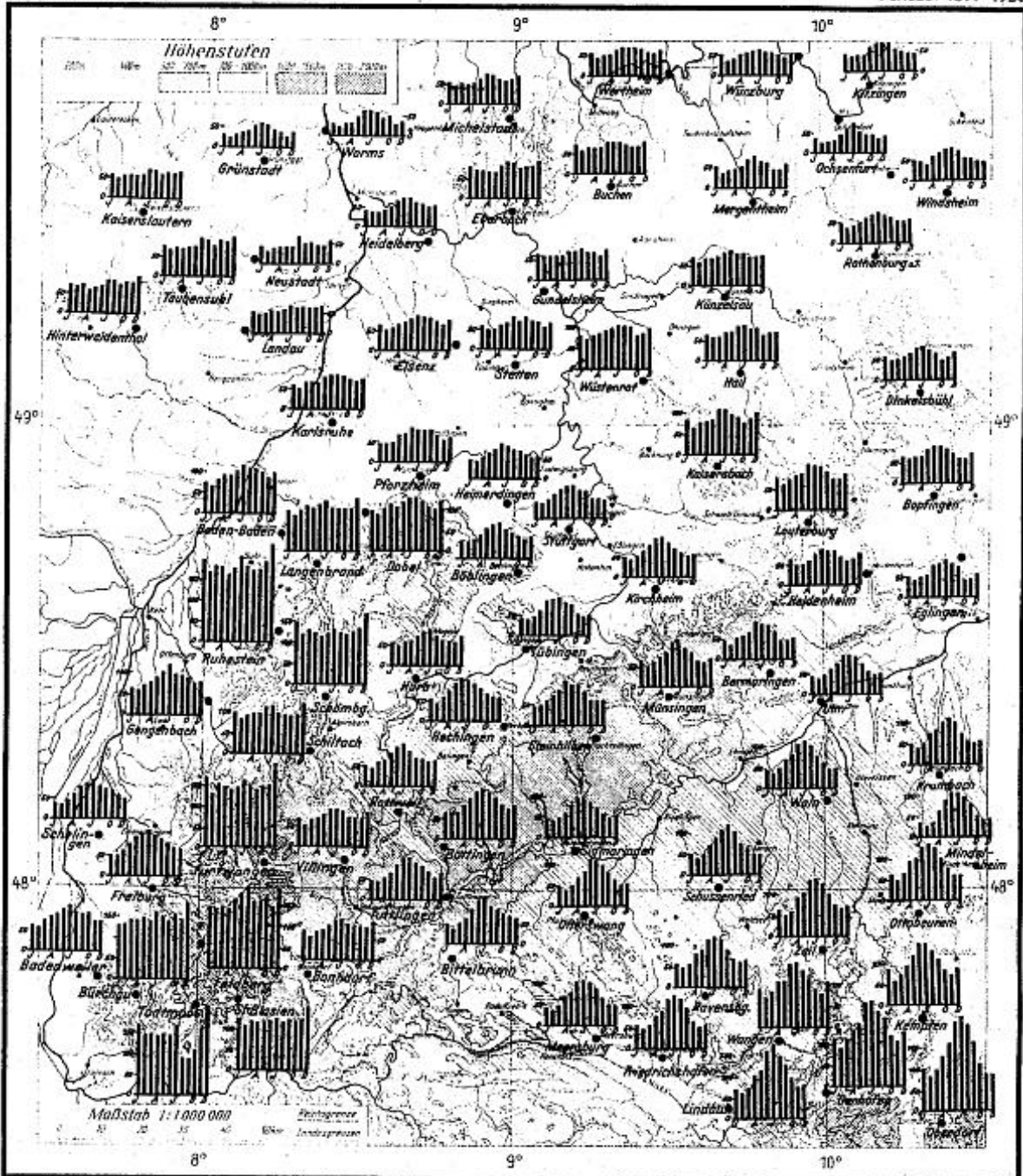


Abb. 5: Mittlere Niederschlagssummen (mm) pro Jahr (aus: Klima-Atlas von Baden-Württemberg, 1956)

Klima-Atlas von Baden-Württemberg
 Herausgeber: Deutscher Wetterdienst

Periode: 1891-1930



Entwurf: H. Schlimmer

Druck: Wity Gräßler KG, Dornum

Abb. 6: Mittlerer jährlicher Gang des Niederschlags nach Monatssummen (mm) (aus: Klima-Atlas von Baden-Württemberg, 1956)

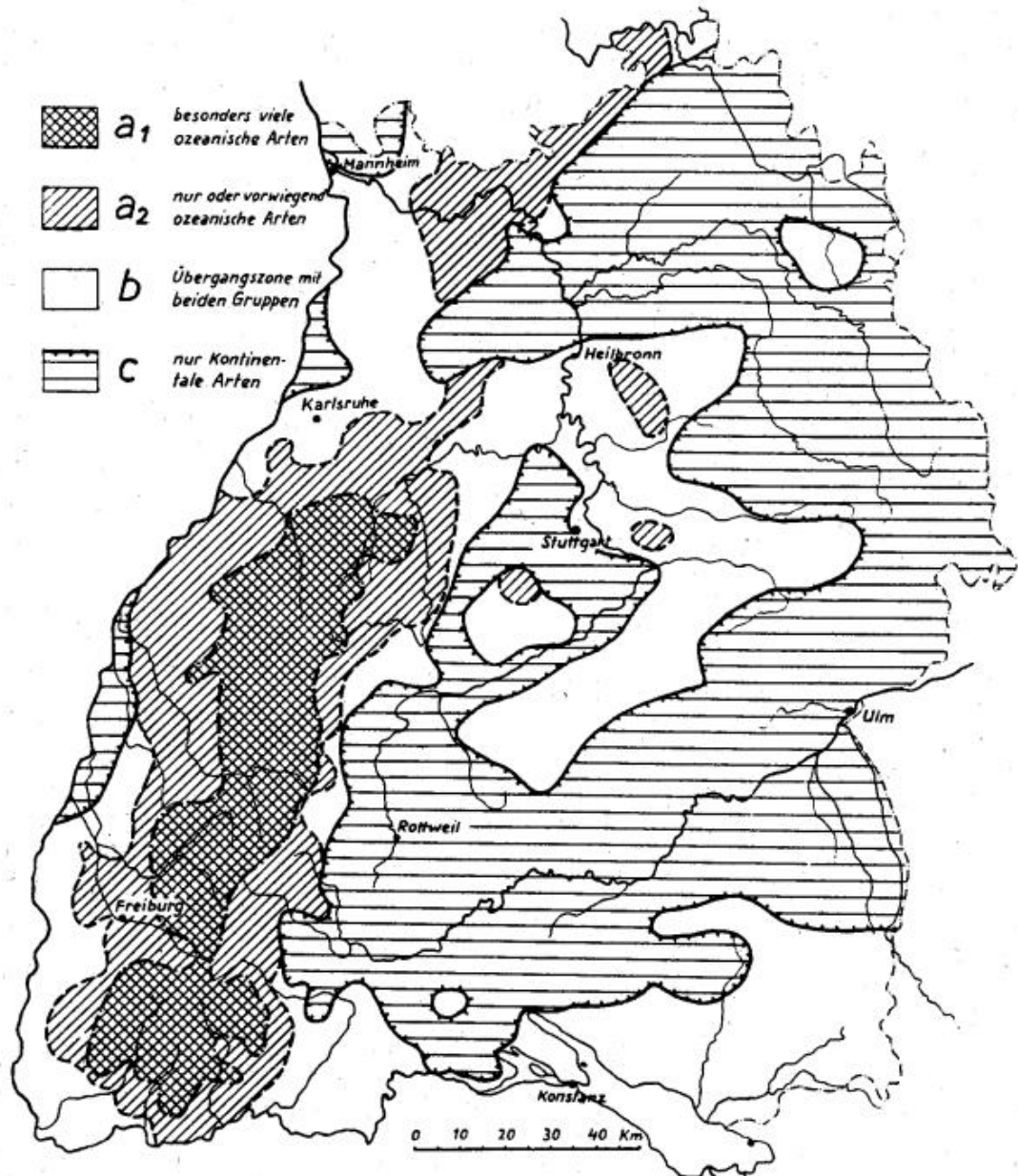


Abb. 7: Relative Abstufung der Kontinentalität in Südwest-Deutschland auf Grund der Verbreitung ozeanischer und kontinentaler Florenelemente (aus: ELLENBERG 1954)

Wie zuvor schon erwähnt, finden sich die Böden mit der höchsten Erosionsneigung - die Lößböden - in den tiefer gelegenen Beckenlandschaften, die gleichzeitig die höchsten Durchschnittstemperaturen und Temperatursummen aufweisen. Wenngleich während der Eiszeiten geringere Durchschnittstemperaturen geherrscht haben, so bestanden auch zu damaliger Zeit schon vergleichbare Relationen mit höheren Temperaturen in den tieferen Lagen, sodaß dort zumindest eine lückige Vegetation vorhanden war, durch die der angewehte Lößstaub ausgekämmt wurde und zur Ablagerung kam. Daher finden wir in den tieferen, wärmeren Lagen die mächtigsten Lößauflagen. Als weitere erosionsfördernde

Komponente gesellt sich hinzu, daß sich schon die ersten Ackerbauer - die Bandkeramiker im Neolithikum - gezielt in diesen lößreichen, warmen, ackerbaulich bestgeeigneten Gebieten angesiedelt haben, sodaß diese seither großflächig entwaldet sind. In Baden-Württemberg sind dies vor allem folgende Gebiete:

- die Vorhügelzone entlang des Rheingrabens,
- die wärmeren Gäulandschaften (insbesondere Kraichgau, Neckarbecken, Randgebiete zu Mainfranken),
- die Filder u.ä. lößreiche Landschaftsteile.

Bis heute treffen in diesen genannten warmen Landschaften die drei erosionsfördernden Faktoren der hohen Erodibilität der Lößböden, der großflächigen Entwaldung und des Auftretens fröhsommerlicher Starkniederschläge zusammen (**Abb. 8**).



Abb. 8: Hohe Erodibilität der Lößböden

Hohe Erosionsneigung der schluffreichen, überwiegend ackerbaulich genutzten Böden in Verbindung mit ausreichendem Gefälle führen insbesondere in den lößreichen Gäu- und Vorhügellandschaften zu starken Bodenverlagerungen.

In **Abb. 9** (siehe Anhang) ist die Verteilung von Waldflächen in Baden-Württemberg wiedergegeben. Darin ist der Schwarzwald als ein ganz überwiegend bewaldetes Gebiet zu erkennen. Im Gegensatz hierzu zeigt sich das warme Oberrheintal - abgesehen von den Flächen, auf denen magere Sandböden oder oberflächennahes Grundwasser die landwirtschaftliche Nutzung beeinträchtigen - ebenso wie die lößreichen Gäulandschaften als

überwiegend waldfrei. Waldreich sind dagegen das Keuperbergland und Teile der Schwäbischen Alb. Das südwestdeutsche Alpenvorland ist durch einen bunten Wechsel bewaldeter und waldfreier Bereiche gekennzeichnet. Wie ein Vergleich von **Abb. 9** mit **Abb. 10** (siehe Anhang) zeigt, spiegelt sich in dieser Verteilung von bewaldeten und waldfreien Flächen die unterschiedlich starke Eignung dieser Landschaften für den Ackerbau wider. Die Klassifikation der Eignung für Ackerbau, Grünland, Obst- und Weinbau basiert auf der agrar-ökologischen Gliederung des Landes. Danach konzentrieren sich die ackerbaulich günstigsten und die für klimatisch anspruchsvolle Sonderkulturen geeigneten Gebiete auf die tieferen Lagen, wo sich deshalb nach wie vor die intensivsten Nutzungen finden.

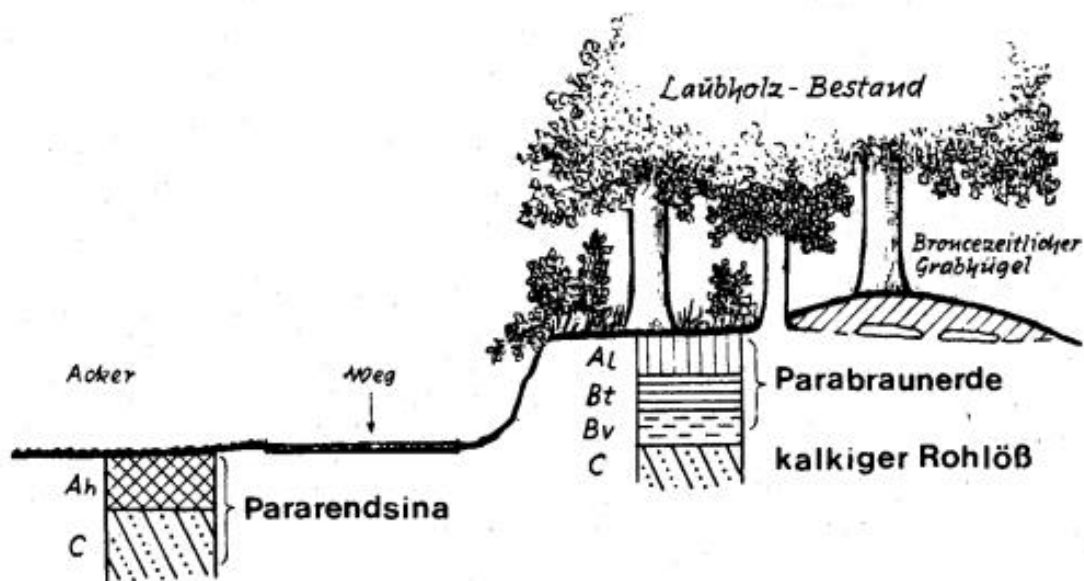


Abb. 11: Unterschiedlich starke Erosion unter Wald und Acker auf Löss im Kraichgau (aus: S. Müller, 1976)

Die intensive ackerbauliche Nutzung hat zu den bekannten, in **Abb. 11** für ein Beispiel aus dem Kraichgau skizzierten Konsequenzen geführt: Während wir unter dauerhaft bewaldeten Flächen auch heute noch das komplette Profil der Parabraunerde antreffen, wurden die Bodenprofile auf benachbarten Ackerflächen durch die fortwährende Erosion z.T. so stark geköpft, daß die entkalkten Horizonte gänzlich abgetragen wurden, so daß heute der Rohlöss des C-Horizontes an der Oberfläche ansteht, auf dem sich infolge der Bewirtschaftung eine Pararendzina mit einem wenig mächtigen Ah-Horizont ausgebildet hat. Solche Situationen lassen sich in den lößreichen Gäulandschaften vor allem im Vorfrühling, wenn der Boden

abtrocknet, die Saat aber noch nicht deckt, besonders gut beobachten: Gegenüber der ursprünglichen braunen Farbe der Parabraunerde heben sich die stärker erodierten Bereiche, die nunmehr von einer Pararendzina oder gar einem Lössrohboden bedeckt werden, durch ihre helle Farbe augenfällig ab. In den Mulden wiederum fallen die Kolluvien durch ihre dunkle Farbe ins Auge (**Abb. 12**). Der Profilaufbau dieser drei für den Kraichgau und die anderen lößreichen Gäulandschaften charakteristischen Bodentypen ist in **Abb. 13** dargestellt:

- Die Parabraunerde tritt zumeist oben auf den Hochflächen auf. Ihre komplette Horizontabfolge ist Ap-Al-Bt-C; häufig ist der durch die Erosion verkürzte Al-Horizont jedoch bereits in den Ap-Horizont einbezogen.
- Bei der aus der erodierten Parabraunerde durch weitere Erosion sekundär entstandenen Pararendzina liegt der Pflughorizont Ap unmittelbar auf dem CCa-Horizont, der durch Kalkkonkretionen und Lößkindel gekennzeichnet ist. Auch der A-Horizont ist bis zur Bodenoberfläche kalkhaltig.
- Die Kolluvien in den Muldenlagen besitzen einen Ap-Horizont über bis zu vielen Metern mächtigem, am Hangfuß wieder akkumuliertem Bodenerosionsmaterial (M-Horizont).



Abb. 12: Lößhügellandschaft im Kraichgau mit Parabraunerden (dunkel) auf der Hochfläche, Pararendzina (hell) am Hang und Kolluvium (dunkel) in der Mulde

Selbstverständlich beschränkt sich die Bodenerosion nicht nur auf die lößreichen Landschaften. Sie tritt vielmehr überall verstärkt auf, wo Böden in hängiger Lage umgebrochen wurden. Dies war in früheren Jahrhunderten, als jeder Betrieb sein Brotgetreide selbst erzeugen mußte, noch viel weiter verbreitet als heute. In vielen Mittelgebirgslandschaften, wie beispielsweise am Albtrauf, legen die alten Ackerterrassen noch davon Zeugnis ab. Erst als mit dem Ausbau des Verkehrswesens und der Konservierungsmöglichkeiten der Zwang zur Selbstversorgung wegfiel und zudem leicht verderbliche milchwirtschaftliche Produkte über große Strecken zu den Orten des Verbrauches transportiert werden konnten, war eine Umstellung auf Dauergrünland möglich. Das größte Ausmaß erreichte diese Umstellung von Ackerbau auf Grünland im äußersten Südosten von Baden-Württemberg wie im benachbarten Bayern im Allgäu. Durch solche Umstellungen ist gerade in den Mittelgebirgslandschaften die Gefahr der Bodenerosion in den letzten hundert Jahren zweifellos erheblich zurückgegangen (**Abb. 14**).

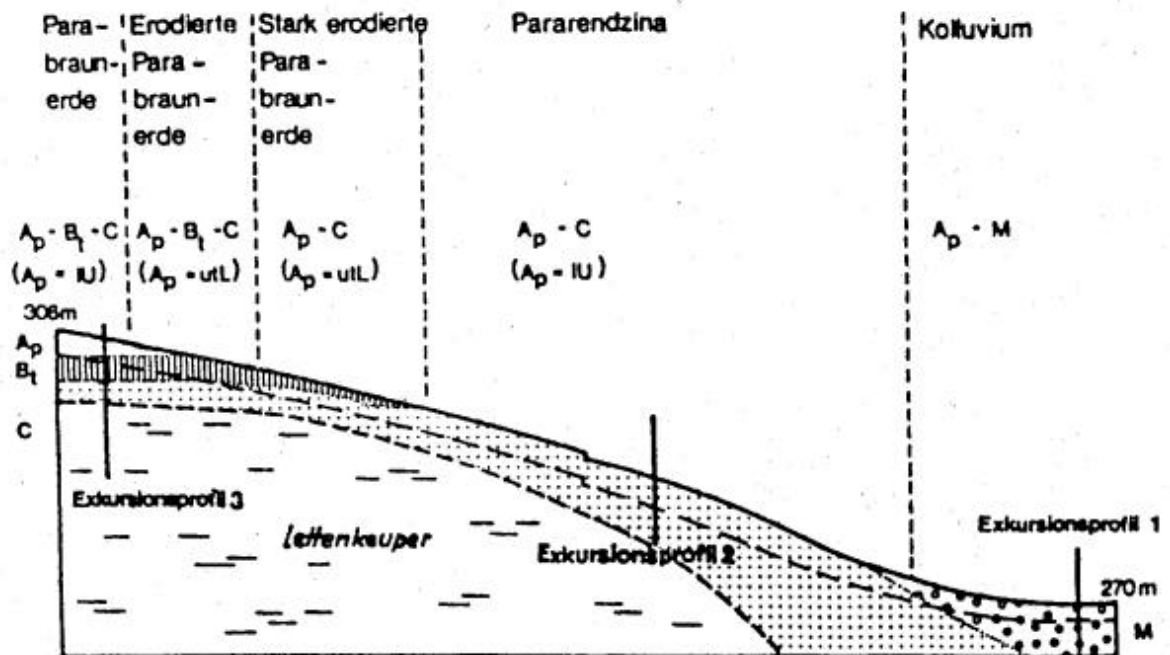


Abb. 13: Profilschnitt durch einen ackerbaulich genutzten Hang in einer lößreichen Gäulandschaft (aus: Exkursionsführer DBG-Tagung Würzburg 1980)



Abb. 14: Erosion in einem Maisfeld auf einem Drumlin bei Salem

Trotz verbreitet nur mäßiger Erosionsneigung der Böden kann es auch im Moränenhügel-land des Alpenvorlandes zu starken Verlagerungen kommen, wenn der Boden ackerbaulich genutzt und in Falllinie des Hanges bewirtschaftet wird.

In unseren Tagen allerdings ist infolge der veränderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ein entgegengesetzter Trend zu beobachten: Vielerorten wurde Grünland zu Ackerland umgebrochen, wobei oft ökologische Grenzen - Standortsgrenzen, Bodengrenzen, Bodenschutzgrenzen - nicht berücksichtigt wurden. Oftmals standen den Landwirten fortschrittliche Agrarökonomien beratend zur Seite, die mit neuesten Erkenntnissen und Formeln berechneten, daß auch hängige Lagen unter ökonomischen Gesichtspunkten am besten ackerbaulich mit Schwerpunkt Maisanbau bewirtschaftet werden. Was allerdings in diesen Formeln nicht berücksichtigt wurde, ist die Tatsache, daß auf solcherart bewirtschafteten Hanglagen bei einem für kontinentale Gebiete typischen kräftigen sommerlichen Gewitterguß fruchtbares Feinmaterial abgeschwemmt wird, daß erodiertes Material am Hangfuß abgelagert wird und dort die Saat überdeckt und erstickt, daß es Gräben verfüllt und Straßen zusegmentiert. All diese Folgekosten aber waren nicht Bestandteil der agrarökonomischen Formel. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie wichtig es ist, bei der Verwendung von Formeln auch immer kritisch deren Gültigkeitsbereich zu hinterfragen und zu prüfen, ob auch alle relevanten Faktoren berücksichtigt wurden. Auch natürliche Extremereignisse, wie Starkniederschläge oder Hochwässer mit Wiederkehrintervallen von mehreren Jahren oder Jahrzehnten, zählen hierzu. Bei über die Ufer tretendem Hochwasserabfluß kann es im Bereich der Flutrinnen und Flutmulden der Aue zu nicht unerheblichem Bodenabtrag kommen, wenn die Flächen nicht - wie traditionell üblich - als Grünland genutzt sondern zu Ackerland umgebrochen wurden und daher gegenüber der Scherwirkung des dahinströmenden Hochwassers keine schützende Vegetationsdecke besitzen (**Abb. 15**).



Abb. 15: Bodenerosion durch Hochwasser

Flutwellen bei Unwetter können auch scheinbar nicht erosionsgefährdete ebene Tallagen stark beeinträchtigen. Eine geschlossene Grasnarbe hielt in diesem Fall den Auelehm fest (rechts), während er unter Ackernutzung bis auf den darunterlagernden Schotter abgetragen wurde (links).

Schon die Altvorderen, die mit den heutzutage in der Erosionsforschung verwendeten Formeln nicht umzugehen wußten, besaßen ein empirisches Wissen über die ökologischen Zusammenhänge der Landschaft, das sie in langjährigen, oft recht schmerzlichen Erfahrungen angesammelt hatten und das bei der Bewirtschaftung der Landschaften umgesetzt wurde. So ist es zu erklären, daß der Kraichgau - speziell der westliche Kraichgau, wo der Löß weniger verlehmt ist und wo stärkere Reliefunterschiede ausgebildet sind - vor dem Einleiten der Flurbereinigungsverfahren noch weit mehr als heute durch zahlreiche Ackerterrassen charakterisiert war.

Auch in den lößärmeren Gebieten der Gäulandschaften tritt natürlich Bodenerosion auf. Selbst auf überaus flachgründig verwitterten, skelettreichen Böden, bei denen die zahlreich auftretenden Steine die Bodenbearbeitung erschweren und daher immer wieder ausgelesen und entlang der Bewirtschaftungsgrenzen zu Steinriegeln zusammengetragen wurden, auf denen sich im Laufe der Zeit Hecken entwickelten, findet Bodenabtrag statt. Selbst dort, wo unter einer dünnen Bodenauflage verkarstetes, kluffreiches Kalkgestein ansteht, muß davon ausgegangen werden, daß bei gelegentlichen Starkregen oder vor allem auch während der Schneeschmelze, wenn der Untergrund noch gefroren und die Karstdrainage vorübergehend blockiert ist, Erosion eintritt (**Abb. 16**).



Abb. 16: Bodenerosion bei blockierter Karstdrainage

Trotz geringer Erosionsneigung der flachgründigen, verkarsteten Böden kann es auch auf der Schwäbischen Alb zu erheblichem Bodenabtrag kommen, wenn beispielsweise bei Schneeschmelze die Karstdrainage noch durch Eis plombiert ist und das abfließende Schmelzwasser eine Leitbahn findet.

Daher müssen wir auch die Steinriegel und Hecken im "Heckengäu" mit in unsere Überlegungen hinsichtlich der Vermeidung oder Verminderung von Bodenerosion einbeziehen, da diese heckenbestandenen Steinriegel wirksame Erosionsbremsen darstellen. Denn selbst auf der Schwäbischen Alb mit ihrer vergleichsweise geringen Erosionsneigung der Böden findet man die Bremswirkung solcher Steinriegel dadurch bestätigt, daß das Hangprofil oberhalb der Riegel durch das hier akkumulierte Feinmaterial verflacht ist und erst unterhalb der Riegel jeweils mit steilerem Gefälle zum nächst tiefer gelegenen Schlag abfällt.

Selbstverständlich sind meine Skepsis gegenüber der Anwendung einfacher Formeln auf komplexe landschaftsökologische Zusammenhänge und meine Ausführungen über das einst vorhandene Wissen unserer Vorfahren über dieses Landschaftsgeschehen nicht dahingehend zu interpretieren, daß wir in allem das Alte übernehmen und nichts Neues in unseren Landschaften schaffen sollen. Wir wissen, daß neue Produktionsmethoden mitunter auch entsprechend neue Verfahrensweisen und Wege erfordern. Am deutlichsten mag dies in den vergangenen Jahren in den Rebflurbereinigungsgebieten sichtbar geworden sein. In den Lößgebieten wurden die vielen Kleinterrassen zu Großterrassen vereinigt. Da dies in den Keupergebieten nicht zu bewerkstelligen war, wurden dort die Terrassen ganz beseitigt und große, gleichmäßig geneigte Hänge geschaffen. Auf diese Weise allerdings hat man der Erosion zunächst enorm Vorschub geleistet. Wenngleich die Keupermergel sehr viel Ton und nur wenig Schluff enthalten und daher nicht zu den Böden mit besonders hoher Erodibilität gehören, ist die Erosionsgefährdung infolge des geschaffenen Gefälles und der Hanglänge doch sehr groß, insbesondere solange diese neuen Böden noch wenig Humus enthalten. Liegen solche Hänge während sommerlicher Gewitterniederschläge bloß, können ganz erhebliche Erosionsrinnen entstehen. Andererseits haben entsprechende Versuche bewiesen, daß durch eine ausreichende Mulchauflage oder eine geschlossene Grasnarbe der Bodenabtrag wirksam gemindert oder gar verhindert werden kann, so daß Erosion in Weinbergen selbst in rebflurbereinigten Gebieten kein gravierendes Problem mehr darstellen muß (**Abb. 17 u. 18**). Mit diesem eindrücklichen Beispiel möchte ich veranschaulichen, daß wir bei entsprechender Berücksichtigung der landschaftsökologischen Zusammenhänge durchaus auch tiefgreifende Veränderungen der Bewirtschaftung vornehmen können. Hätten wir in den Weinlagen die alten, schmalen Terrassen erhalten, die der Bodenerosion entgegenwirken, aber auch aus landeskultureller und biologisch-ökologischer Sicht bedeutsam sind, hätte dies unter den veränderten ökonomischen Voraussetzungen zur Folge gehabt, daß der Weinbau in zahlreichen Lagen aufgegeben worden wäre. Heute handelt es sich um ertragreiche Weinberge, in denen gleichzeitig die Erosion durch geeignete Maßnahmen auf ein tolerierbares Minimum reduziert werden konnte.

Es ist Ziel und Aufgabe dieses Workshop dazu beizutragen, daß Mittel und Wege gefunden werden, die in den neu gestalteten Agrarlandschaften verstärkt auftretende Bodenerosion wieder zu reduzieren, im Idealfall sogar die frühere zu unterschreiten. Dazu werden verschiedene Möglichkeiten diskutiert werden, die Bodenerosion zu berechnen. Es ist mir ein Anliegen, zu betonen, daß diese Berechnungen nicht Selbstzweck, sondern Mittel zum Zweck sind, der nur erfüllt wird, wenn die Erkenntnisse in praktische Maßnahmen umgesetzt werden und sich dann auch bewähren. Dazu bedarf es nach wie vor der praktischen

Erprobung und Überprüfung im Gelände. In diesem Zusammenhang mag am Schluß meiner Ausführungen ein Zitat von Pfarrer Johann Friedrich Mayer, dem berühmten "Gipsapostel" aus dem Hohenlohischen, stehen. Er gab bereits in seinem 1773 erschienenen Buch genaue Anweisungen zur Minderung des Bodenabtrags aus den Äckern und schrieb abschließend: "Alles dies aber ist dem fleisigen Landmann noch nicht genug: ... Wie er denn deßwegen, um zu sehen, wo es etwa mögte fehlen, bey jedem Regenguß seine Haue ergreift und seinen Ackern zulauft, um Entdeckungen, wo das Wasser etwa mögte stehen bleiben, zu machen und Hülfe zu geben."



Abb. 17: Erosionsschutz im Weinberg durch Rindenmulch

Verminderung der Erosion durch eine Bedeckung mit Rindenschrot (links) gegenüber unbedecktem Boden (rechts) in einem Weinberg am Keuperhang (Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg).

Ohne solche "Entdeckungen", die sich nur bei genauen Beobachtungen im Gelände selbst machen lassen, werden auch die modernsten Formeln und Berechnungen wenig hilfreich bleiben!



Abb. 18: Erosionsschutz in neu angelegtem Weinberg durch Strohbedeckung

Großflächige Strohbedeckung zur Erosionsminderung in einem flurbereinigten Weinberg am Keuperhang.

Literatur

- /1/ DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (1953): *Klima-Atlas von Baden-Württemberg*.- Bad Kissingen.
- /2/ ELLENBERG, H. (1954): *Naturgemäße Anbauplanung, Melioration und Landespflege*.- Landwirtschaftliche Pflanzensoziologie, Bd. III, Stuttgart: 109 S.; unveränderter Nachdruck 1983 unter dem Titel: *Ökologische Beiträge zur Umweltgestaltung*.
- /3/ MAYER, J.F. (1773): *Lehrbuch für die Land- und Hauswirth in der pragmatischen Geschichte der gesamten and- und Haußwirthschaft des Hohenlohe Schillingsfürstischen Amtes Kupferzell*.- Nürnberg: 280 S; Faksimiledruck Schwäbisch Hall 1980.
- /4/ MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND FORSTEN BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1986): *Bodenschutzprogramm '86 Baden-Württemberg*.- Stuttgart: 52 S. und Anlagen, (EM-60-86).
- /5/ MÜLLER, S. (1976): *Zur Quantifizierung der Erosions-Schutzwirkung des Waldes*.- Allgem. Forst-Zeitschrift **31**: S. 317-318.
- /6/ MÜLLER, S., unter Mitarbeit von G. SCHLENKER & J. WERNER nach Aufnahmen von K. GLATZEL, R. JAHN u.a. (1967): *Südwestdeutsche Waldböden im Farbbild*.- Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg **23**, Stuttgart: 311 S.
- /7/ WELLER, F. (1990): *Erläuterungen zur Ökologischen Standorteignungskarte für den Landbau in Baden-Württemberg 1:250.000*.- Herausgeber: Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg, Stuttgart: 32 S., 2 Karten und Tabellen.
- /8/ WELLER, F. & R. SILBEREISEN unter Mitwirkung von K.-F. SCHREIBER & F. WINTER (1978): *Erläuterungen zur Ökologischen Standorteignungskarte für den Erwerbsobstbau in Baden-Württemberg 1:250.000*.- Herausgeber: Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg, Stuttgart: 34 S., 2 Karten und Tabellen.

Tolerierbare Bodenerosion - Grenzwerte für den Bodenschutz

Wilhelm Vogl, Ravensburg

1 Bodenerosion als Bodenbelastung

Eine Regelung des Bodenschutzgesetzes betrifft die *Bodenbelastung*. Es stellt sich die Frage, ob Bodenerosion eine Bodenbelastung darstellt.

Bodenbelastung wird in den §§ 1 und 2 des Bodenschutzgesetzes definiert. Sinngemäß wird formuliert: Eine Bodenbelastung ist dann gegeben, wenn eine Veränderung der Bodenbeschaffenheiten - chemischer, physikalischer und/oder biologischer Art - eintritt, die Anlaß zur Besorgnis gibt, daß Bodenfunktionen nachhaltig oder erheblich beeinträchtigt werden.

Für den Bodenkundler bedeutet dies, daß durch das Gesetz nicht der Boden als stoffliche Komponente sondern der Boden in seinen Funktionen geschützt ist. Es gilt daher zu klären, wie diese Funktionen des Bodens bestimmt sind und wie sich Bodenerosion auf diese Funktionen auswirkt. In § 1 BodSchG werden sechs Funktionen des Bodens genannt:

- Lebensraum für Bodenorganismen,
- Standort für die natürliche Vegetation,
- Standort für Kulturpflanzen,
- Ausgleichskörper im Wasserkreislauf,
- Filter und Puffer für Schadstoffe,
- landschaftsgeschichtliche Urkunde.

1.1 Lebensraum für Bodenorganismen

Greift man vor diesem Hintergrund die Frage auf, ob Bodenerosion in den *Lebensraum der Bodenorganismen* nachhaltig und erheblich eingreift, so lautet die Antwort, daß die Eingriffe mit Sicherheit als erheblich und mit hoher Wahrscheinlichkeit als nachhaltig einzustufen sind. Allerdings üben auch natürliche Faktoren auf das Bodenleben derart große Einflüsse aus, daß im Falle mäßiger Bodenerosionsvorgänge in der Regel nur schwer nachzuweisen sein wird, daß den Bodenorganismen in ihrem Lebensraum ein Schaden zugefügt wurde, der über die Auswirkungen anderer Einflußfaktoren hinausgeht.

1.2 Standort für natürliche Vegetation

Auch für die weitere Funktion *Standort der natürlichen Vegetation* kann eine entsprechende Abschätzung über mögliche Störungen dieser Funktion durch Bodenerosion nur ähnlich vage formuliert werden. Der Gesetzgeber trifft keinerlei Aussage darüber, welche Vegetation er schützen will. So kennen wir beispielsweise Vegetationstypen auf sehr mageren Standorten, die aus Sicht des Naturschutzes als besonders wertvoll anzusehen sind. Allerdings stellen diese mageren Standorte oftmals das Ergebnis historischer Erosionsvorgänge dar. Damit aber verkehrt sich der Argumentationsgang, wenn durch Bodenerosion erst wertvolle Standorte entstehen, man aber andererseits das Bodenschutzgesetz als rechtliches Instrumentarium zur Vermeidung von Bodenerosion anwenden möchte, damit der Boden als Standort der natürlichen Vegetation erhalten bleibt. Hinsichtlich des schädigenden Einflusses von Bodenerosion auf die Funktion des Bodens als Standort für die natürliche Vegetation läßt sich keine eindeutige Aussage formulieren.

1.3 Standort für Kulturpflanzen

Die wohl sicherste Aussage über negative Auswirkungen erosiver Prozesse läßt sich in Hinblick auf die Funktion des Bodens als *Standort für Kulturpflanzen* treffen. Wir können mit relativ großer Sicherheit feststellen, daß durch Erosion die Bodenfruchtbarkeit erheblich und nachhaltig gemindert wird.

1.4 Ausgleichskörper und Filter und Puffer im Wasserkreislauf

Für die weiteren Funktionen *Ausgleichskörper im Wasserkreislauf* sowie *Filter und Puffer für Schadstoffe* läßt sich dies mindestens mit gleich großer oder noch höherer Sicherheit behaupten. Wenn die Mächtigkeit des Lockersubstrates abnimmt, vermindert sich die Fähigkeit des Bodens, Wasser aufzunehmen. In der Folge findet erhöhte oder raschere Grundwasserneubildung statt und Schadstoffe werden in geringerem Maße im Boden gebunden. Dieser Zusammenhang zwischen einer reduzierten Bodenmächtigkeit infolge Bodenerosion und einer schnelleren Kontamination des Grundwassers verdeutlicht besonders anschaulich, daß das Bodenschutzgesetz nicht den Boden selbst sondern die Funktionen des Bodens schützt.

1.5 Landschaftsgeschichtliche Urkunde

Auch über die Eigenschaft oder Funktion des Bodens als *landschaftsgeschichtliche Urkunde* läßt sich mit Bestimmtheit aussagen, daß diese Funktion durch Erosionsprozesse gestört oder zerstört wird. Wenn ein Boden als historisch gewachsenes Produkt eines diversifizierten geologischen, geomorphologischen, klimatischen und biologischen Wirkungsgefüges in seinem jetzigen Dasein eine *landschaftsgeschichtliche Urkunde* darstellt und dieser Boden erodiert wird, so hat dies die Störung oder Zerstörung dieser landschaftsgeschichtlichen Urkunde zur Folge.

2 Boden im Sinne des Bodenschutzgesetzes

Boden im Sinne des Bodenschutzgesetzes ist nicht identisch mit dem Boden im Sinne des Bodenkundlers. Er versteht darunter die oberste, durch Einflüsse der Atmosphäre und Vegetationsdecke verwitternde, belebte Grenzschicht der Erdkruste, die nach unten durch Fest- oder Lockergestein begrenzt wird. Die Definition des Bodenschutzgesetzes greift viel tiefer, wenn es in § 2, Absatz 1 heißt, daß Boden die Schicht der festen Erdkruste sei, die *durch menschliche Aktivitäten beeinflusst werden kann*. Streng genommen wäre damit auch die gesamte kontinentale Erdkruste betroffen, die derzeit im Bayerischen Wald durchbohrt wird. Im Sinne des Bodenschutzgesetzes ist die gesamte durchteufte Mächtigkeit als Boden aufzufassen. Eine solch strenge Auslegung des Begriffes *Boden* aber hat erhebliche Auswirkungen auf die Festsetzung der durch Bodenerosion tolerierbaren Abtragswerte, wenn diese sich an der Rate der Bodenneubildung orientieren. Wird Boden nämlich in diesem *tiefgreifenden* Sinne verstanden, so gibt es keine Bodenneubildung. Wenngleich im obersten Bereich der Erdkruste Ausgangsgestein verwittert und im klassischen Verständnis der Bodenkunde zu Boden umgebildet wird, so findet doch innerhalb des durch menschliche Tätigkeit beeinflussbaren Gesamtprofils nur eine stoffliche Umwandlung, hingegen keine Vermehrung von Boden statt. Bei einer Bodenneubildungsrate von Null aber wäre auch der tolerierbare Abtrag auf Null festzusetzen.

Allgemein ist festzustellen, daß Bodenerosion - also Auftrag und Abtrag von Bodenmaterial - fast alle Bodenfunktionen mehr oder weniger nachhaltig und mehr oder weniger erheblich stört. Hieraus ist zu schließen, daß Bodenerosion eine Form der Bodenbelastung darstellt.

3 Tolerierbarer Bodenabtrag

Von Bodenbelastung kann in der Regel nur gesprochen werden, wenn Störungen der Bodenfunktionen auch über einen gewissen Zeitraum anhalten. Von Bodenbelastungen im Sinne des BodSchG gehen Gefahren für Individuen und das Gemeinwohl aus und sie bedeuten eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung. Dieser Zusammenhang zwischen Bodenerosion und einer das Gemeinwohl gefährdenden Bodenbelastung wird vom Gesetzgeber in dem der Landwirtschaft gewidmeten § 11 BodSchG genauer erfaßt. Darin heißt es, daß *bei der Landbewirtschaftung (...) die Bodenfruchtbarkeit und die Leistungsfähigkeit des Bodens (...) nachhaltig zu sichern* seien. Eine *nachhaltige* Sicherung bedeutet einen Bodenerhalt *auf ewige Zeiten*, sprich *auf Dauer*. Weiterhin fordert der Gesetzgeber, daß *die Anbaumaßnahmen, wie Bodenbearbeitung und Fruchtfolgegestaltung, entsprechend den natürlichen Standortbedingungen so zu gestalten (sind), daß Bodenerosion und Bodenverdichtung soweit wie möglich vermieden werden*. Gemeinsam mit der in § 4, Absatz 1 enthaltenen Verpflichtung, daß ein jeder sich so zu verhalten habe, *daß Bodenbelastung auf das nach den Umständen unvermeidbare Maß beschränkt werde*, beinhaltet das Bodenschutzgesetz die als kritisch zu bewertende Aufforderung, Bodenabtrag generell zu vermindern - sofern Bodenerosion eine Bodenbelastung im Sinne des Bodenschutzgesetzes, §§ 1 und 2 darstellt. In § 11 wird die allgemeine Forderung nach Minimie-

rungen von Bodenbelastungen in Bezug auf die Bodenerosion weitergehend konkretisiert. In Absatz 1 heißt es, daß für die geforderte Reduzierung von Bodenabträgen bei der Bodenbewirtschaftung die Möglichkeiten von Anbaumaßnahmen auszuschöpfen sind - so zumindest kann der Wortlaut *soweit wie möglich* interpretiert werden. Dieses Minimierungsgebot aber hat zur Konsequenz, daß für das Bodenschutzgesetz keine Grenzwerte für einen maximal tolerierbaren Bodenabtrag existieren. Bodenerosion ist in jedem Fall zu vermindern, egal ob hohe oder geringe Erosionsraten vorliegen. Eine solche generelle Forderung ist für die Bodenschutzverwaltung nicht handhabbar. Damit die Verwaltungspraxis in Hinblick auf eine Anwendung des Bodenschutzgesetzes bei übermäßiger Bodenerosion aktiv werden kann, werden ersatzweise Hinweiswerte bzw. Richtwerte definiert. Ein solcher Richtwert dient dazu anzuzeigen, wann ein Landwirt die entsprechenden Maßnahmen zur Erosionsvermeidung nicht ausreichend durchgeführt hat. Der Richtwert fungiert als eine Art Negativwert: Werden Bodenabtragswerte erreicht, die den Hinweiswert übersteigen, so steht fest, daß die Möglichkeiten zur Reduzierung des Bodenabtrags nicht ausgeschöpft wurden.

So ist prinzipiell auch der Toleranzwert der *Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung* (ABAG) zu verstehen. Auch wenn der maximal tolerierbare Bodenabtrag (T) gerne so interpretiert wird, als handele es sich um einen Wert, der ohne negative Folgen ausgeschöpft werden könne, so ist er im ursprünglichen Sinne der Autoren als ein Indikator zu verstehen, der die Notwendigkeit des Handelns anzeigt. Die Einführung von Richtwerten im Zusammenhang mit dem Bodenschutzgesetz soll der Setzung von Prioritäten dienen. Bei Überschreiten des Richtwertes ist Handeln erforderlich und die Bodenschutzverwaltung muß aktiv werden. Die Richtwerte sind keinesfalls als ausschöpfbare Grenzwerte zu interpretieren.

Um Richtwerte aufzustellen, die im Einklang mit dem gesetzlichen Regelwerk zum Schutz des Bodens stehen, ist zunächst die Aussage des Bodenschutzgesetzes von Bedeutung, daß der Boden in seinen Funktionen vornehmlich *an Ort und Stelle* zu schützen ist. Schäden, die im Zusammenhang mit dem Eintrag andernorts erodierten Bodenmaterials und eventuell daran gebundener Schadstoffe stehen, sind nur dann Gegenstand des Bodenschutzgesetzes, wenn die öffentliche Ordnung und Sicherheit gefährdet ist. Hier greift aber auch das allgemeine Polizeirecht.

Das Bodenschutzgesetz verpflichtet die Landwirtschaft dazu, die Leistungsfähigkeit des Bodens nachhaltig zu sichern. Es ist davon auszugehen, daß die Leistungsfähigkeit eines Standortes langfristig abnimmt, wenn der Bodenabtrag die Bodenneubildung übersteigt. Soll die Leistungsfähigkeit aber erhalten werden, muß die Rate der Bodenerosion unter der Rate der Bodenneubildung liegen. In der Fachliteratur werden stark variierende Werte für die jährliche Bodenneubildung angegeben. Die Spannbreite zwischen den kleinsten und größten Werten beträgt das Vierzigfache. Die meisten Werte verdichten sich in einem Bereich zwischen 0,3 und 1,5 t/ha · a.

Es gibt aber auch ernstzunehmende Überlegungen, nach deren unter Ackernutzung überhaupt keine Bodenbildung stattfindet. Zu erklären ist dies damit, daß dem Boden unter ackerbaulicher Nutzung ständig Basen zugeführt werden, die eingetragene Säuren neutralisieren. Die Säuren aber sind im Prinzip der Antriebsmotor der Gesteinsverwitterung und Bodenbildung. Werden diese Säuren gepuffert, verhindert dies eine Bodenneubildung.

Eindeutige Aussagen hinsichtlich einer allgemein gültigen Bodenneubildungsrate können nicht getroffen werden. Mit großer Wahrscheinlichkeit aber sind die Werte gering anzusetzen und liegen im Bereich nahe Null.

Im Zusammenhang mit dem Gesetz zum Schutz des Bodens wird derzeit in Baden-Württemberg ein sogenannter "Tolerierbarer Bodenabtrag" diskutiert. In § 19 weist das Bodenschutzgesetz dem Umweltministerium und dem Ministerium Ländlicher Raum bzw. den höheren Behörden die Aufgabe zu, Verwaltungsvorschriften für die praktische Durchführung auszuarbeiten und Belastungswerte zu definieren. Angesichts der aus der Fachliteratur verfügbaren Richtwerte zur Bodenneubildung erscheint ein Wert um 1 angemessen. In Hinblick auf eine nachhaltige Vorsorge erschiene auch die Festlegung von 0 t/ha - a gerechtfertigt. In der Praxis allerdings wäre ein völliges Ausschalten von Bodenerosion unter landwirtschaftlicher, v.a. ackerbaulicher Nutzung, sicherlich nicht realisierbar.

4 Möglichkeiten zur Durchsetzung des BodSchG

Das Bodenschutzgesetz bietet verschiedene Möglichkeiten zur Durchsetzung eines maximal tolerierbaren Bodenabtrages:

- In § 19 wird der Minister für Ländlichen Raum beauftragt, Hinweise oder Vorschriften zu geben, die *nähere Anforderungen für die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung* in Baden-Württemberg beinhalten.
- Einzelanordnung § 19, Abs. 2 bzw. § 8 (2)
- § 9, der Maßnahmen zum Schutz und zur Sanierung des Bodens gewidmet ist, sieht im Falle vermuteter oder festgestellter Bodenbelastungen vor, *ihre Verminderung durch geeignete Maßnahmen (zu) verlangen oder auch bestimmte Arten der Bodennutzung (...) zu verbieten oder einzuschränken*.
- § 13 regelt die Festsetzung von Bodenbelastungsgebieten, die Einzelfälle ebenso wie großflächige Gebiete betreffen können. Gemäß Absatz 2, Satz 2 *kann vorgeschrieben werden, daß in diesen Gebieten nur bestimmte Nutzungen zugelassen sind*.
- Im Rahmen von Genehmigungsverfahren, die in § 6 BodSchG geregelt werden, ist die Bodenschutzbehörde angehalten, Stellungnahmen abzugeben und eventuell vorhandene Einwendungen vorzubringen. Ein solcher Einwand aus Sicht des Bodenschutzes kann z.B. dann gerechtfertigt sein, wenn ein Vorhaben zu absehbaren Bodenerosionsraten führt, die über der Bodenneubildungsrate liegen und damit die Leistungsfähigkeit des Bodens nachhaltig stören.
- Ordnungswidrigkeiten können entsprechend § 22 BodSchG mit bis zu 200.000 DM Bußgeld geahndet werden.

Das im Bodenschutzgesetz enthaltene Minimierungsgebot bezüglich der Bodenerosion verlangt von den Landwirten, daß sie ohne besondere Anordnung von behördlicher Seite

selber Erosionsschutzmaßnahmen bei der Bodenbewirtschaftung ergreifen. Legt man zur Beschreibung von Bodenerosion das Modell der *Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung* (ABAG) zugrunde, so kann der Landwirt vor allem durch entsprechende Beeinflussung des Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktors C und des Erosionsschutzfaktors P der Verpflichtung zur Erosionsminderung nachkommen. Möglichkeiten bestehen in der Bodenbearbeitung und der Fruchtfolgegestaltung und in besonders erosionsgefährdeten Lagen auch darin, daß Grünland zu belassen ist. Die in § 11 BodSchG enthaltene Formulierung "entsprechend den natürlichen Standortbedingungen" ist m.E. dahingehend zu verstehen, daß an Standorten mit erhöhter Erosionsgefährdung stärkere Erosionsschutzmaßnahmen notwendig sind.¹ In Hinblick auf die zu schützenden Funktionen des Bodens bedeutet es auch, daß an Standorten, an denen die Leistungsfähigkeit des Bodens durch Erosion besonders gefährdet ist, stärkere Erosionsschutzmaßnahmen zu treffen sind. Zur Konkretisierung von Bearbeitungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen sollte der maximal tolerierbare Bodenabtrag auf 1 t/ha · a festgelegt werden.

Von offizieller Seite eingeleitete Maßnahmen, die u.U. erheblich ins Eigentumsrecht eingreifen, sind möglich. Beispielsweise können auf Basis von § 8, Absatz 2 in Form von Einzelanordnungen Nutzungsänderungen angeordnet werden. In diesem Rahmen kann als Maßnahme gegen Bodenbelastungen durch Erosion die Umnutzung von Acker in Grünland vorgeschrieben werden; Auflagen zur Begrenzung der erosiven Hanglänge können ebenso angeordnet werden wie die Anlage von Terrassen. An dieser Stelle ist zu betonen, daß durch das Bodenschutzgesetz keinerlei Entschädigungsleistungen des Staates vorgesehen sind.

5 Ist das Ziel 1 Tonne pro Hektar und Jahr erreichbar?

Zum Abschluß soll noch der Frage nachgegangen werden, ob ein tolerierbarer mittlerer jährlicher Bodenabtrag von 1 t pro ha auf landwirtschaftlich genutzten Flächen möglich ist und welche Konsequenzen dies für die Bearbeitung und Fruchtfolgegestaltung bedeutet.

Den **Abb. 1** und **2** kann der tolerierbare C-Faktor auf einem Standardhang von 100 m Länge und einem Regen- und Oberflächenabfluß-Faktor (R) von 60 für verschiedene Bodenerodierbarkeitsfaktoren (K) und Hangneigungen zum einen bei Feldbearbeitung in Gefällsrichtung, zum anderen bei hangparalleler Bearbeitungsrichtung entnommen werden. Die gewählten Werte für die ABAG-Faktoren R und L sind typisch für den Kraichgau. Üblicherweise im Kraichgau anzutreffende K-Faktoren liegen bei 0,5 oder höher. Es ist davon auszugehen, daß sich in Zukunft die Feldbearbeitung in Contour durchsetzen wird, da hierbei deutlich höhere C-Faktoren zur Einhaltung des maximal tolerierbaren Bodenabtragswertes erlaubt sind als bei einer Nutzung in Richtung des Hanggefälles. Für die häufigsten im Kraichgau anzutreffenden Hangneigungen zwischen 6 und 9 % bedeutet eine hangparallele Bearbeitung einen erlaubten C-Faktor von 0,06 bis 0,03. Bei 3 % Hangneigung darf der C-Faktor einen Wert von 0,15 annehmen (vgl. **Abb. 2**). **Abb. 3** gibt einen

¹Eine genau gegenteilige Auslegung der Gesetzepassage ist theoretisch denkbar. Sie ist aber vom Gesetzgeber sicher nicht gedacht und würde der Schutzbedürftigkeit der verschiedenen Böden nicht gerecht.

Überblick über mögliche Fruchtfolgen und ihre spezifischen C-Faktoren. Daraus geht hervor, daß der bei 3 % Hangneigung noch tolerable C-Faktor von 0,15 noch eine Mais-Zuckerrüben-Getreide-Fruchtfolge mit 50 % Hackfruchtanteil erlaubt. Eine Mais-Kartoffel-Getreide-Fruchtfolge mit 50 % Hackfruchtanteil ist dann unproblematisch, wenn auf der Fläche mit Mulchsaat operiert wird. Mit konventioneller Bodenbestellung ist diese Fruchtfolge hingegen nicht mehr möglich.

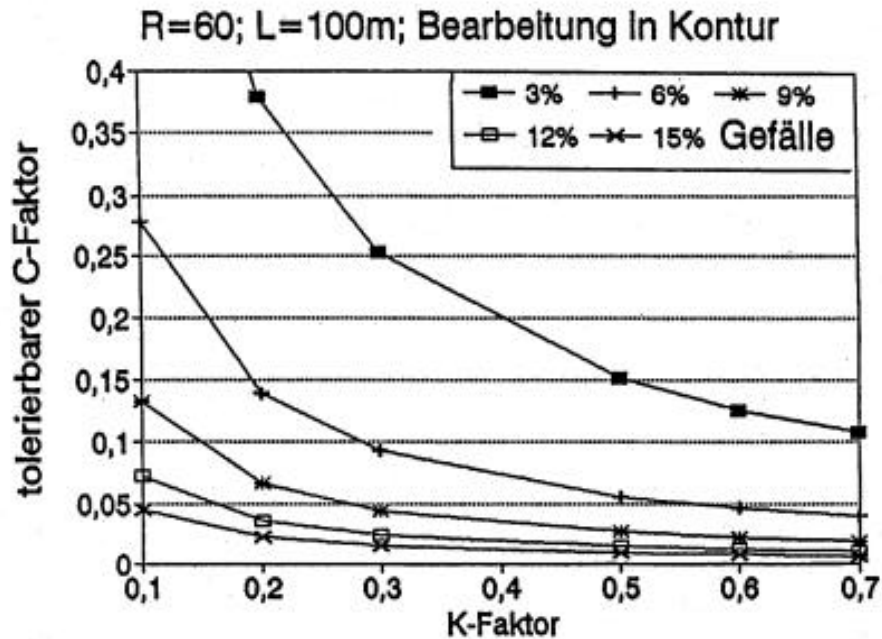


Abb. 1: Tolerierbare C-Faktoren bei Feldbearbeitung in Gefällsrichtung

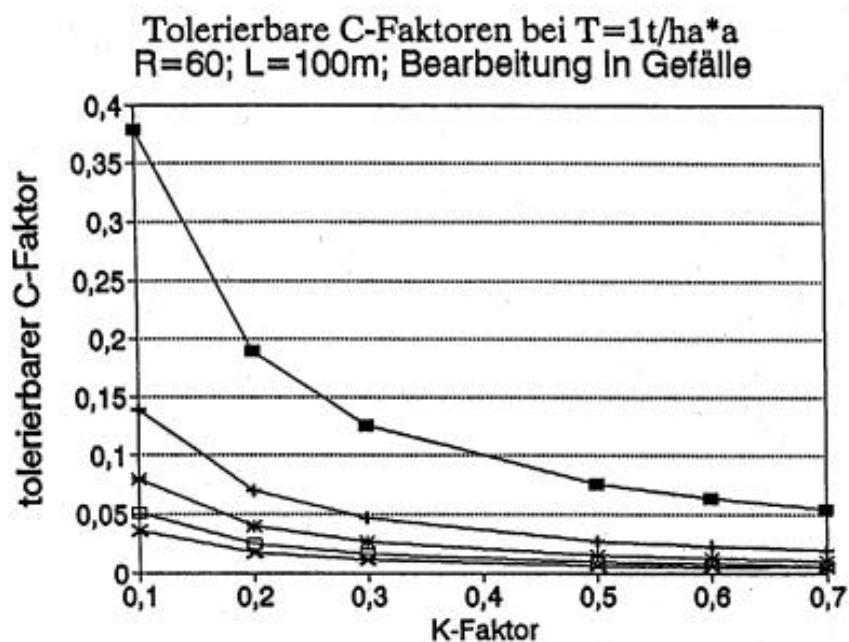


Abb. 2: Tolerierbare C-Faktoren bei hangparalleler Feldbearbeitung

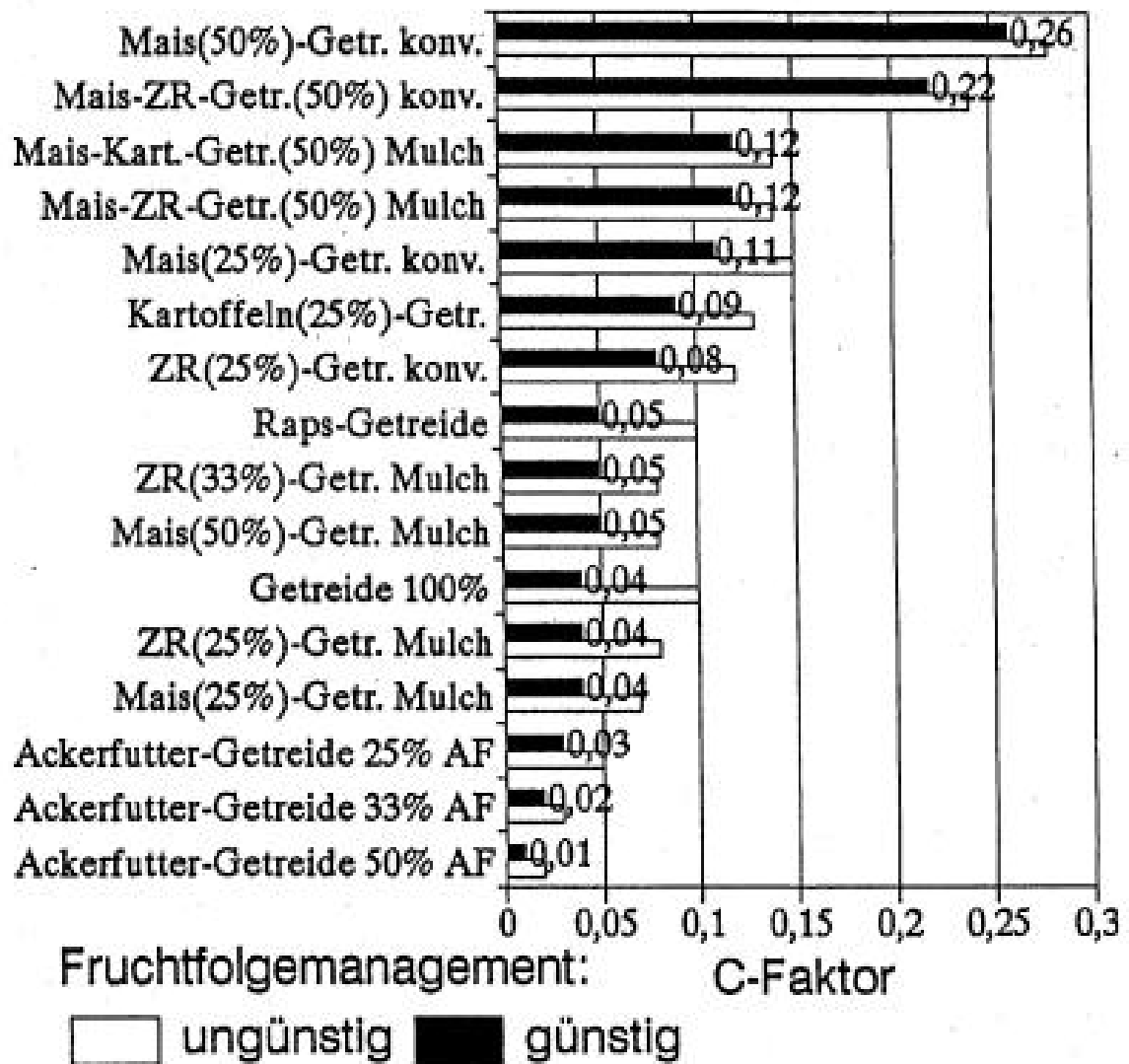


Abb. 3: C - Faktoren wichtiger Fruchtfolgen

Bei einer Hangneigung von 6 % sind die Fruchtfolgemöglichkeiten schon erheblich eingeschränkt. Hohe Hackfruchtanteile sind in der Regel nicht mehr möglich, außer bei extrem schonenden Fruchtfolgen, d.h. bei Anbau von Winterzwischenfrüchten und Mulchsaat im Frühjahr.

Bei 9 % wird es weitaus problematischer. Eigentlich kann der Landwirt nur noch eine Ackerfutter-Getreide-Fruchtfolge mit 25 % Ackerfutter anbauen, d.h. Klee gras und dreimal Getreide. Silomais als Ackerfutter ist mit dem Ziel von maximal einer Tonne Bodenabtrag pro Hektar und Jahr nicht mehr verträglich.

Bei der nächst höheren Neigungsstufe von 12 % ist als Fruchtfolge nurmehr Ackerfutter-Getreide mit 33 % Ackerfutteranteil erlaubt. Erosionsempfindlichere Fruchtfolgen können jedoch bei Reduzierung der erosiven Hanglänge angebaut werden.

In **Abb. 3** sind alle Fruchtfolgemöglichkeiten jeweils für konventionelle Anbaumethoden (helle Balken) und bodenschonende Anbauweisen (schwarze Balken) zusammengefaßt. Gestaltet ein Landwirt das Fruchtfolge-Management günstig, so daß Bodenerosion bei den eingesetzten Früchten vermindert wird, dann steigen die Fruchtfolgemöglichkeiten während sie im umgekehrten, hier als ungünstig bezeichneten Fall sinken.

Das Ziel von maximal einer Tonne Bodenabtrag pro Hektar und Jahr ist erreichbar. Zweifellos ist dies in einigen Gebieten Baden-Württembergs ziemlich schwierig. Die Ämter für Landwirtschaft, Landschafts- und Bodenkultur haben die schwierige Aufgabe, dieses Ziel durch Beratung anzustreben. Die Zuständigkeit der Ämter für Wasserwirtschaft und Bodenschutz erstreckt sich auf alle jene Fälle, in denen durch Bodenerosion Off-Site-Schäden an Oberflächengewässern auftreten. Wenn beispielsweise ein auf 10 Jahre ausgelegtes Sedimentationsbecken aufgrund extrem hoher Schwebstoffeinträge jährlich geräumt werden muß, so können und müssen die Ämter für Wasserwirtschaft und Bodenschutz entsprechend den im Bodenschutzgesetz festgeschriebenen Zuständigkeiten aktiv werden.

6 Zusammenfassung

Nach dem Bodenschutzgesetz ist die Bodenfruchtbarkeit auf Dauer zu erhalten. Dies ist nur möglich, wenn der Bodenverlust durch Erosion unter der Boden Neubildung liegt. Die Boden Neubildung ist nach bisherigen Erkenntnissen als sehr gering einzustufen, sie liegt nahe Null. Es erscheint gerechtfertigt, den maximal tolerierbaren Bodenabtrag auf 1 t Boden pro ha und Jahr festzulegen. Dieses Ziel ist erreichbar, jedoch nur unter Einschränkungen in der Fruchtfolge und der Bodenbearbeitungstechnik.

Erstellung von Erosionsprognosekarten mit dem Modell dABAG

Josef Kagerer, München

TIN-EROSION ist ein Softwarepaket für die Erstellung hochauflösender Karten des flächenhaften Bodenabtrags durch Regen. Mit ihm können das Ausmaß des Bodenverlustes abgeschätzt und geeignete erosionsmindernde Maßnahmen geplant werden. Das Verfahren beruht auf der *Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung* (ABAG) und einem Geländemodell in Form eines triangulierten, irregulären Netzwerkes. Es werden komplexe Hangformen hinsichtlich Neigung, Abflußrichtung, Konvergenz und Divergenz und die resultierende Transportkraft des Oberflächenabflusses automatisch berücksichtigt. Der Einfluß von Kleinstrukturen geht ebenfalls in die Berechnung des Bodenabtrags ein. Schließlich führen Boden-, Nutzungs- und Niederschlagsfaktoren zur Berechnung des langjährigen, mittleren Bodenabtrags. Das Verfahren wird daher auch *differenzierende allgemeine Bodenabtragungsgleichung* (dABAG) genannt. Das Software-Paket TIN-EROSION benutzt dazu Grundfunktionen des Geographischen Informationssystems ARC/INFO (Datenbank mit Overlay). Für die Berechnung des Netzes der Abflußwege wird die TIN-CASCADIERUNG verwendet.

Grundlagen: ALLGEMEINE BODENABTRAGSGLEICHUNG

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

- A** : langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag
- R** : Regen- und Oberflächenabflußfaktor
- K** : Bodenerodierbarkeitsfaktor
- L** : Hanglängenfaktor
- S** : Hangneigungsfaktor
- C** : Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
- P** : Erosionsschutzfaktor

1 Eingangsdaten

a) Erosionsdaten

Nicht vom Höhenmodell abhängig sind R-, K-, C-, P-Faktor und die Einteilung in Hangeinheiten (L-Faktor). Verschiedene Geometrien werden dazu zu einem sog. Erosionsdatencover verschnitten. Polygone, auf denen keine Erosion stattfindet (Wald, Gewässer, bebauete Flächen, Straßen) erhalten den P-Wert 0; Sliverpolygone (schmale Streifen nach Verschneidung) werden eliminiert.

b) digitales Höhenmodell

- Aus Höhenpunkten und/oder Kontourlinien wird eine vorläufige Dreiecksvermaschung aufgebaut.
- Um die Dreieckslinien möglichst genau an die Grenzen der realen Nutzungsgrenzen (Erosionsdatencover) anzupassen, werden beide miteinander verschnitten. Dabei werden mit Hilfe des vorläufigen TIN die Höhen entlang der Polygongrenzen des Erosionsdatencovers interpoliert.
- Dabei erfolgt eine erneute Triangulation; es entsteht ein flächenscharfes Höhenmodell.

Auf dieser Grundlage wird mit Hilfe des Programms TIN-CASCADING ein Abfluß- und Hangneigungsmodell berechnet. Dabei werden für jedes Dreieck die Richtung der Fallinie, die Hangneigung, die mittlere Hanglänge in Abflußrichtung sowie die Quellen und Zieldreiecke zugeordnet. Bei der Annahme, daß das Oberflächenwasser in Fallinie abfließt, sind die betroffenen Elemente (Dreiecke) bekannt. Der Abfluß endet in einer Rinne (wasserleitender Fluß, Straßengraben oder ableitende Geländestruktur).

Für jedes Dreieck kann somit der erosions- oder Sedimentationswert berechnet werden. Die Erosionsrate ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Eintrag aus den darüberliegenden Dreiecken und der Erosion des betrachteten Dreiecks. Eventuelle Sedimentationsgebiete sollten jedoch mit Vorsicht interpretiert werden.

2 Ausgabedaten

Von der Fragestellung ist abhängig, welche Ergebniskarten gewünscht werden und über einen Plotter als Karte ausgegeben werden.

Folgende Karten wurden gefertigt:

a) Karte des geländebedingten Erosionsrisikos

Eine erste schnelle Abschätzung des Erosionsrisikos ist möglich mit einer sog. Gefällstufenkarte. Der S-Faktor kann bei einem guten Höhenmodell relativ genau berechnet werden. Die Faktoren für K, R, C und P werden auf 1 gesetzt.

b) Karte der aktuellen Bodenerosion

Der C-Faktor wird einzelbetrieblich erhoben; der P-Faktor wird auf der Basis einer ermittelten Bearbeitungsrichtung spezifiziert; die Hänge werden durch erosionsbegrenzende Strukturen (Straßen, Böschungen, usw.) untergliedert und die Flächennutzung (Grünland, Acker) ist bekannt. Auf dieser Basis kann eine sehr genaue Erosionsprognosekarte erstellt werden.

c) Karte der Überschreitung des tolerierbaren Bodenabtrags

Der berechnete Bodenabtrag wird vom tolerierbaren Bodenabtrag ($-0,2 + 0,12 \cdot \text{Ackerzahl}$) abgezogen. Dadurch kann dargestellt werden, wie weit der tolerierbare Bodenabtrag überschritten wird.

d) Karte der zulässigen Hanglänge

Der Bodenabtrag wird durch den tolerierbaren Bodenabtrag ersetzt und die Formel nach der Hanglänge bzw. dem L-Faktor aufgelöst. Bei Flurneuordnungsverfahren bietet diese Karte eine wertvolle Planungshilfe.

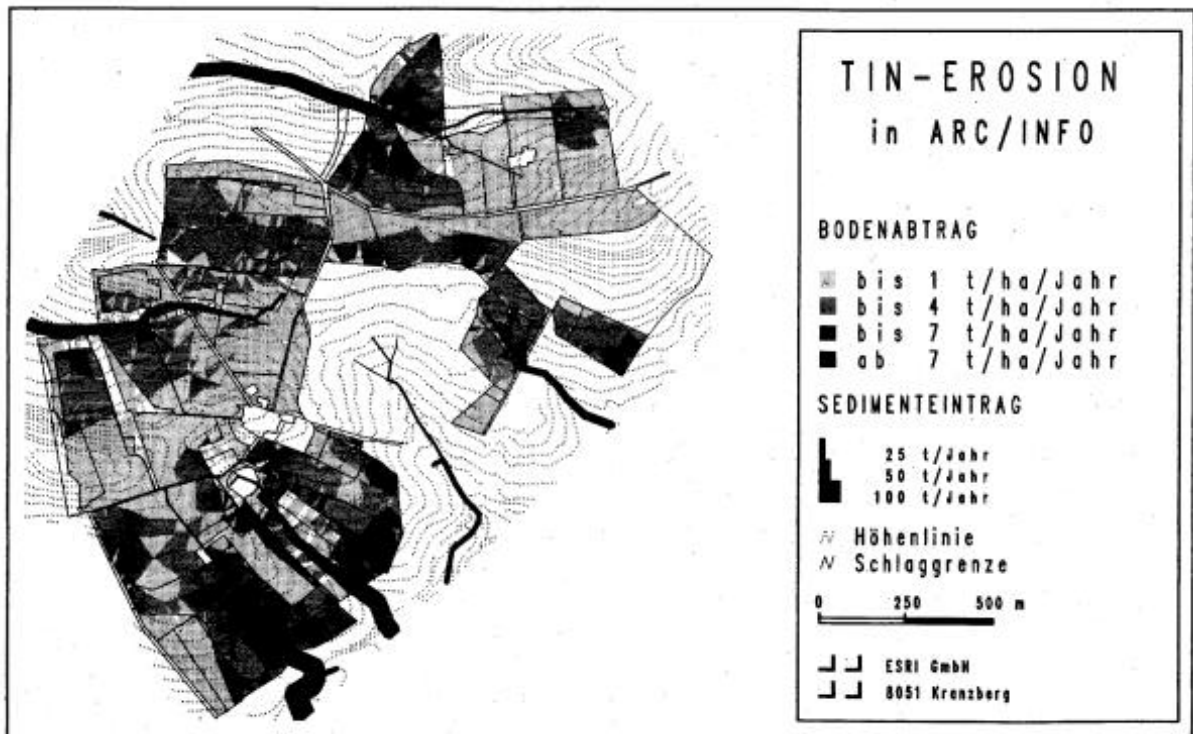


Abb. 1: Simulation des langjährigen mittleren Bodenabtrages von Ackerschlägen und des Sedimenteintrages in Tiefenlinien und Vorfluter

e) Darstellung von Rinnenerosion

Auf der Basis des Abflußmodells läßt sich die Gefahr von Rinnenerosion darstellen. Sowohl als Beratungsunterlage als auch bei der Flurneuordnung kann diese Karte hilfreich sein.

f) Karte des maximalen Bodennutzungsfaktors (C_{max} -Karte)

Bei einer vorgegebenen Flureinteilung kann der Bodenabtrag durch eine richtige Bodennutzung beeinflusst werden.

Wie bei der Karte für zulässige Hanglängen wird auch hier der Abtrag durch tolerierbaren Bodenabtrag ersetzt und die Formel nach C aufgelöst. Diese Karte kann eine wertvolle Beratungsgrundlage bei den Fragen der richtigen Bodennutzung und bei Fruchtfolgeplanungen sein, da hier eine schlagbezogene Darstellung gegeben ist.

Literatur

- /1/ SCHWERTMANN, U., W. VOGL & M. KAINZ (1987): Bodenerosion durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.- Stuttgart.
- /2/ AUERSWALD, K., W. FLACKE & L. NEUFANG (1988): Räumlich differenzierende Berechnung großmaßstäblicher Erosionsprognosekarten - Modellgrundlagen der dABAG.- Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **151**: S. 369-373.
- /3/ NEUFANG, L., K. AUERSWALD & W. FLACKE (1989): Automatisierte Erosionsprognose- und Gewässerverschmutzungskarten mithilfe der dABAG - ein Beitrag zur standortgerechten Bodennutzung.- Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch **7**: S. 771-789.
- /4/ FLACKE, W., K. AUERSWALD & L. NEUFANG (1990): Combining a modified universal soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash.- Catena, Vol. **17**, Cremlingen: S. 383-397.

Faktoren der ABAG und dABAG

- Bestimmung und Genauigkeit -

Josef Haider, München - Weihenstephan

1 Einführung

Da das komplexe Wirkungsgefüge der erosionsbestimmenden Faktoren bislang nur unzureichend physikalisch beschrieben werden kann, spielen empirische Modelle noch immer eine entscheidende Rolle bei der Vorhersage des Bodenabtrags. Vor allem die Universal Soil Loss Equation, USLE (WISCHMEIER & SMITH, 1978), bzw. deren an bayerische Verhältnisse angepasste Form, die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung, ABAG (SCHWERTMANN et al., 1987), fanden weite Verbreitung in der landwirtschaftlichen Beratungspraxis sowie für landesplanerische Zwecke, wie z. B. für die Flurbereinigung. Mit der ABAG kann der durchschnittliche jährliche Bodenabtrag für Einzelparzellen (Felder) berechnet werden.

Probleme bereitet vielfach die Ermittlung der Faktoren der ABAG, insbesondere in der Landesplanung, da hier Aussagen für große Flächen getroffen werden sollen, wobei die aufwendige und kostspielige Feldarbeit minimiert werden muß. Im folgenden sollen daher Möglichkeiten aufgezeigt werden, welche dieser Faktoren aus gemeinhin verfügbaren Daten ermittelt werden können, ohne daß dadurch große Einbußen bei der Schätzgenauigkeit zu erwarten sind. Darüberhinaus wird auf die Neuerungen eingegangen, die sich mit der Einführung der Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE (RENARD et al., 1991), sowie der differenzierenden Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung, dABAG (AUERSWALD et al., 1988), ergaben.

Faktoren der ABAG und deren Bestimmung

Die ABAG lautet:

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

mit A : langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag [t/ha] als zu errechnende Größe

R : Regen - und Oberflächenabflußfaktor [$\text{kJ/m}^2 \cdot \text{mm/h}$] bzw. [N/h]

K : Bodenerodierbarkeitsfaktor [$(\text{t/ha}) / (\text{kJ/m}^2 \cdot \text{mm/h})$] bzw. [$(\text{t/ha}) / (\text{N/h})$]

L : Hanglängenfaktor [-]

S : Hangneigungsfaktor [-]

C : Bedeckungs - und Bearbeitungsfaktor [-]

P : Erosionsschutzfaktor [-]

2 Regen - und Oberflächenabflußfaktor R

Der R-Faktor ist ein Maß für die gebietspezifische Erosionswirksamkeit der Niederschläge. Sein Zahlenwert entspricht der Summe des Produktes aus kinetischer Energie und maximaler 30-Minuten-Intensität (I_{30}) für alle erosionswirksamen Einzelregen (Ereignisse mit einer Gesamt-Niederschlagsmenge (N) von mindestens 10 mm, bzw., wenn $N < 10$ mm, mit einer $I_{30} > 10$ mm/h), die an einem Standort während des Jahres auftreten.

Im günstigsten Fall kann der R-Faktor aus einer Isoerodentkarte entnommen werden, wie sie z.B. für Bayern von ROGLER & SCHWERTMANN (1981) aufgrund der Auswertung von Regenschreiberdaten abgeleitet wurde. Die räumliche Diskretisierung dieser Isoerodentkarten ist in den meisten Fällen ausreichend für die Abschätzung des Bodenabtrages mit der ABAG. Für Gebiete, für die keine Isoerodentkarten vorliegen, bzw. für die aufgrund der starken kleinräumigen Variabilität der Niederschläge die räumliche Auflösung dieser Karten unzureichend sein könnte, kann der R-Faktor mit ausreichender Genauigkeit aus den mittleren Sommerniederschlägen (N_s , Niederschlag zwischen dem 1.5. und dem 31.10.) berechnet werden. Die für Bayern gefundene Beziehung (SCHWERTMANN et al., 1987) lautet:

$$R = -1,48 + 0,14 \cdot N_s \quad (n = 18; r^2 = 0,92)$$

Mit den Daten weiterer Wetterstationen aus verschiedenen Teilen Deutschlands, sowie der Schweiz und Österreichs wurde eine Regression zur Bestimmung des R-Faktors für die gesamte Bundesrepublik Deutschland (und möglicherweise darüber hinaus) abgeleitet (Abb. 1).

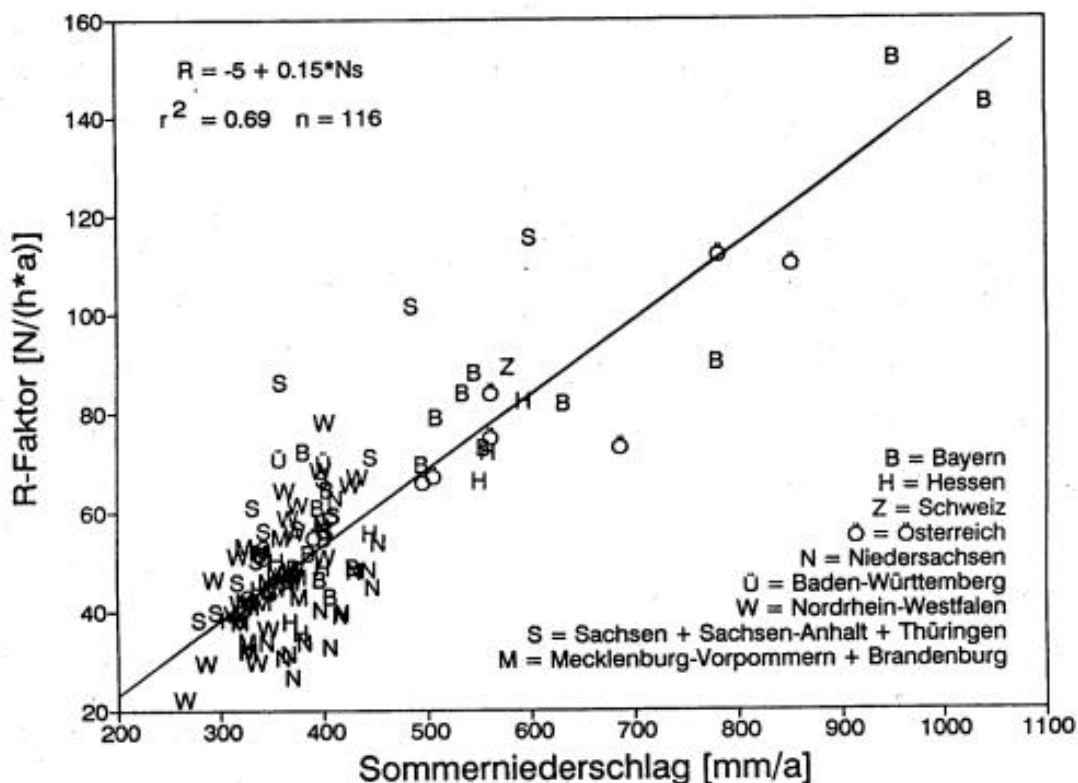


Abb. 1: Regressionsgleichung zur Berechnung des R-Faktors aus dem langjährigen, mittleren Sommerniederschlag (AUERSWALD, unveröffentlicht)

Der R-Faktor, der sich nach den angegebenen Regressionsgleichungen berechnet, schätzt den tatsächlichen R-Faktor ausreichend gut. Der damit verbundene Fehler bei der Abtragungsschätzung ist, verglichen mit anderen Fehlerquellen, gering.

3 Bodenerodierbarkeitsfaktor K

Der K-Faktor entspricht dem Bodenabtrag pro R-Faktor-Einheit für die von WISCHMEIER & SMITH (1978) definierte Standardparzelle (22,1 m lang, 9 % Gefälle, langjähriges Saatbett). Er ist ein Maß für die Erosionsanfälligkeit eines Bodens.

Zur Ermittlung des K-Faktors empfiehlt sich das bei SCHWERTMANN et al. (1987) angegebene Nomogramm. Hierfür sind 5 Bodenparameter zu bestimmen:

- Gehalt an der Korngröße 0,002 - 0,1 mm ("%Schluff+Feinstsand")
- Gehalt an der Korngröße 0,1 - 2,0 mm ("%Sand")
- Gehalt an organischer Substanz ("%Organische Substanz")
- Aggregatklasse
- Permeabilitätsklasse

Probleme bereitet häufig die Zuordnung einer Aggregatklasse zu einem Boden. Vor allem die Tatsache, daß der K-Faktor um so größer wird, je höher die Aggregatklasse ist (d. h. je gröber die Aggregate sind), stößt oft auf Unverständnis, da aus der Erfahrung, sowie aus Messungen bekannt ist, daß Ackerböden mit einer "guten Aggregierung" weniger erosionsanfällig sind als solche, die z. B. sehr feinbröckelig bearbeitet wurden. Die Einteilung der Aggregatklasse, wie sie im K-Faktor-Nomogramm verwendet wurde, bezieht sich aber nicht auf die Situation nach der Saatbettbereitung. WISCHMEIER & SMITH (1978), die diese Einteilung getroffen haben, bezogen sich dabei auf die Einteilung der Bodenstruktur nach der U.S. Soil Taxonomy. Diese bewertet die Aggregierung im "natürlichen", ungestörten Zustand, also nicht nach der Saatbettbereitung. Sie gingen davon aus, daß ein Boden, der im ungestörten Zustand kleine Aggregate ("Krümelgefüge") bildet, wesentlich weniger erosionsanfällig ist als ein Boden, der zur Ausbildung großer Brocken neigt. Die Einteilung in eine Aggregatklasse muß auf Ackerstandorten daher eher aus der Erfahrung heraus erfolgen, was nicht unproblematisch ist. Relativ gut läßt sich der Boden aufgrund seines Verhaltens beim Pflügen (feinkrümelig oder grobschollig) einstufen. Da die Aggregatklasse das Ergebnis der Abtragungsschätzung nicht sehr stark beeinflusst, ist der mit der Einstufung verbundene Fehler vergleichsweise gering.

Ein Faktor, der die Höhe des K-Faktors wesentlich beeinflusst, ist die Steinbedeckung eines Standortes (**Abb. 2**). Da diese bislang nicht aus Karten abgeleitet werden kann, muß sie im Gelände bestimmt werden. Sie sollte zukünftig ein fester Bestandteil bodenkundlicher Geländeaufnahmen werden.

Wo die Erhebung der für das K-Faktor-Nomogramm benötigten Eingabedaten (für die Erstellung großmaßstäblicher Erosionsgefährdungskarten) zu aufwendig ist, bietet sich die Ableitung des K-Faktors aus den Beschrieben der Reichsbodenschätzung an (**Tab. 1**). Diese sind für landwirtschaftliche Flächen nahezu flächendeckend und mit hoher räumlicher Auflösung verfügbar.

Die mit Hilfe der Beschriebe der Reichsbodenschätzung ermittelten K-Faktoren sind für Einzelflächen u.U. mit einem nicht unerheblichen Fehler (> 10 %) behaftet. Für die Bestimmung von K-Faktoren für größere Gebiete, wie dies z. B. für Flurbereinigungsverfahren erforderlich ist, gleichen sich diese Fehler allerdings weitgehend aus.

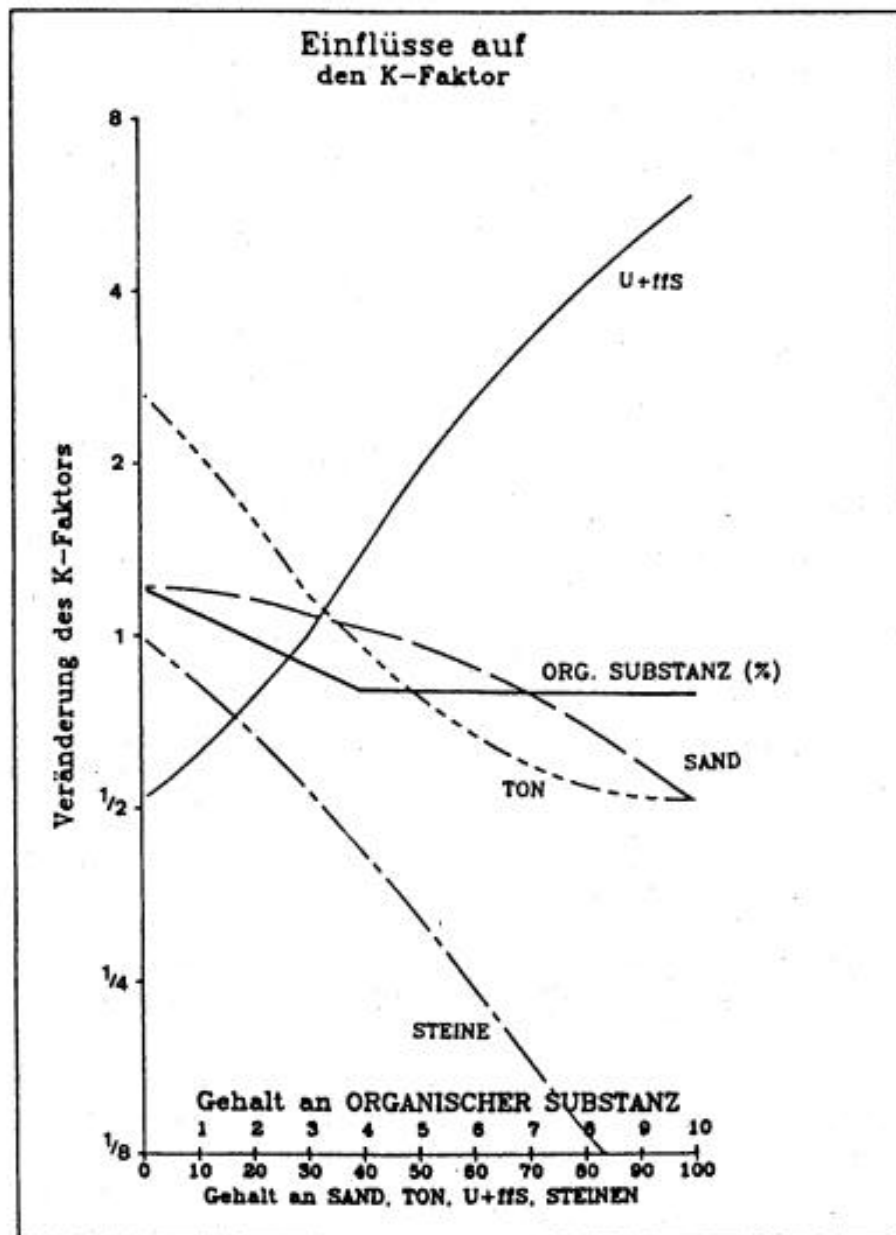


Abb. 2: Einflüsse des K - Faktors (AUERSWALD, 1987)

Die Grünlandbeschriebe sind für eine Ableitung des K-Faktors weniger geeignet. Hier sollte auf die Beschriebe von angrenzenden Ackerflächen zurückgegriffen werden. Zum Teil wird der K-Faktor auch in modernen Bodenkarten angegeben. Werden diese auch für Grünland und Wald ausgewiesenen K-Faktoren verwendet, ist zu berücksichtigen, daß sie nicht auf allen Karten in SEinheiten umgerechnet wurden.

Tab. 1: Zuordnung des K - Faktors zu den Beschrieben der Reichsbodenschätzung (SCHWERTMANN et al., 1987)

Bodenart	Entstehung	Zustands- stufe4	Zustands- stufe 5	Schilfs. Eisens. usw.	Grünland
S	D,AI,V	0,10	0,10	0,20	0,20
SI	D,AI,V	0,15	0,15	0,20	
IS	D,AI,V	0,20	0,20	0,25	0,30
	Lö	0,25	0,25		
	Vg	0,10	0,10		
SL	D,AI,V	0,30	0,25	0,35	
	Lö	0,35	0,35		
	Vg	0,15	0,15		
sL	D,AI	0,40	0,40	0,55	
	Lö	0,50	0,50		
	V	0,30	0,30		
	Vg	0,20	0,20		
L	D,AI	0,50	0,50	0,55	0,35
	Lö	0,55	0,55		
	V	0,40	0,35		
	Vg	0,25	0,20		
LT	D,AI	0,40	0,35		
	V	0,30	0,25		
	Vg	0,20	0,20		
T	D,AI	0,30	0,30		
	V	0,25	0,25		
	G	0,15	0,15		

4 Hanglängenfaktor L

Der L-Faktor errechnet sich aus der sog. erosiven Hanglänge. Dies ist die Hanglänge, ab der Oberflächenabfluß auftritt, bis zu jenem Punkt, an dem Sedimentation einsetzt oder der Abfluß kanalisiert wird (z. B. bei Rinnenerosion in einer Hangmulde). Da sich der Gültigkeitsbereich der ABAG (strenggenommen) auf diese erosive Hanglänge beschränkt, können mit der ABAG keine Aussagen für den Sedimentationsbereich gemacht werden.

Im günstigsten Fall wird die erosive Hanglänge während entsprechender Niederschlags-Abfluß-Ereignisse im Gelände erhoben. Den Untersuchungen von BORK (1988) zufolge setzt auf ackerbaulich genutzten Flächen der Oberflächenabfluß praktisch immer an der Wasserscheide ein.

Unter Wald ist dagegen kaum mit Oberflächenabfluß zu rechnen. Falls an einem Hang sowohl Grünland- als auch Ackernutzung vorliegt, muß der Abtrag räumlich differenziert berechnet werden (z. B. mit der dABAG).

5 Hangneigungsfaktor S

Die Abtragungsschätzung reagiert überaus sensibel auf die Hangneigung. Deshalb erweist sich die Verwendung von Hangneigungskarten für die Anwendung der ABAG vor allem dann als sehr problematisch, wenn die Hangneigungsklassen groß sind. Der S-Faktor wird aus folgender Formel ermittelt:

$$S = 65,41 \times \sin^2 Q + 4,56 \times \sin Q + 0,065$$

mit Θ : Hangneigung in Grad

Während sich die Verwendung klassifizierter Hangneigungswerte im Bereich großer Hangneigungen weniger gravierend auf die errechneten Abtragungsmengen auswirkt, ist die Verwendung von Hangneigungsklassen für die ABAG gerade bei flacheren Reliefpartien mit einem unakzeptabel hohen Schätzfehler verbunden. So umfaßt eine Hangneigungsklasse von z.B. 0 bis 7 % Hangneigung (**Tab. 2**), einen S-Faktor-Bereich, der über 2 Größenordnungen variiert.

Tab. 2: S - Faktor der ABAG für unterschiedliche Hangneigungen

Hangneigung [%]	S - Faktor
0,3	0,008
1,3	0,06
2,6	0,2
4,4	0,3
7,0	0,7
9,6	1,1
11,0	1,4
13,0	1,8
16,0	2,3
19,0	3,1
23,0	4,1

Dies zeigt, daß eine Verbesserung der Abtragsschätzung mit der ABAG vor allem durch eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung des S-Faktors zu erreichen ist. Durch den Einsatz digitaler Geländemodelle mit hoher räumlicher Auflösung ist dies am besten zu bewerkstelligen.

6 Bedeckungs - und Bearbeitungsfaktor C

Der Berechnung des C - Faktors liegt folgende Formel zugrunde:

$$C = \sum_{i=1}^{n \cdot 6} (RBA_i \cdot RRA_i) / n$$

- mit RBA_i: relativer Bodenabtrag für die Kulturperiode i [-]
 RRA_i: Relativer Anteil der Periode i am Jahres – R - Faktor [-]
 n: Zahl der Jahre, die eine Rotation umfaßt

Zur Ermittlung des C - Faktors bedarf es zunächst der Relativen Bodenabträge für sämtliche Fruchtfolgeglieder. Für jedes Fruchtfolgeglied erfolgt dabei eine Unterteilung in sechs Kulturperioden mit unterschiedlicher Erosionsdisposition. Die relativen Bodenabträge für

gängige landwirtschaftliche Kulturen können der Tabelle bei SCHWERTMANN et al. (1987) entnommen werden.

Schwieriger fällt hingegen die Einschätzung des Anteils am Jahres-R-Faktor, der auf eine Kulturperiode entfällt. Für den Süddeutschen Raum können die bei SCHWERTMANN et al. (1987) für Bayern ermittelten Werte übernommen werden. Auch die südlicheren Bereiche des Gebietes der neuen Bundesländer haben einen ähnlichen R-Faktor-Jahresgang wie Bayern. Für die durch ein eher atlantisches Klima geprägten Gebiete Norddeutschlands ist der Jahresgang der Regenerosivität bisher nicht bekannt. Deshalb sollte für diese Gebiete gesondert eine R-Faktor-Bestimmung aus Regenschreiber-Aufzeichnungen erfolgen. Die Methodik dafür ist bekannt (ROGLER & SCHWERTMANN, 1981).

7 Erosionsschutzfaktor P

Für die Bestimmung des P-Faktors, der in erster Linie zur Quantifizierung der Schutzwirkungen von Kontur- und Streifennutzung dient, benötigt man die Bearbeitungsrichtung der Ackerschläge, die entweder aus Luftbildern bezogen werden kann oder im Gelände erhoben werden muß. Im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren ist es möglich, durch die Ausrichtung der Parzellen die künftige Richtung der Feldbearbeitung vorzugeben.

In der Bundesrepublik Deutschland ist die Konturnutzung als die wichtigste Bewirtschaftungsweise mit einer nennenswerten Auswirkung auf den P-Faktor anzusehen. Bisher wurde so verfahren, daß verschiedenen Hangneigungen unterschiedliche P-Faktoren zugeordnet wurden. Man ging davon aus, daß eine Nutzung quer zum Hang, d.h. eine konturlinienparallele Nutzung, im Bereich von 3 bis 8 % Hangneigung der Erosion am effektivsten entgegensteuert. In diesem Hangneigungsintervall wurde der P-Faktor mit 0,5 angesetzt, was bedeutet, daß der Bodenabtrag im Vergleich zu einer hangauf-hangabwärtigen Bearbeitung um die Hälfte reduziert ist. Mit zunehmender Hangneigung stieg der P-Faktor trotz isohypsenparalleler Feldbearbeitung gegen 1 an. Dieser Wertezuweisung lag die Annahme zugrunde, daß bei sehr steilen Hängen eine Konturnutzung alleine als Erosionsschutz nicht ausreicht, da die konturlinienparallelen Rauigkeitselemente überspült würden. Entsprechend dieser Überlegung wurde eine maximale Hanglänge für wirksame Konturnutzung angenommen. Je steiler das Gelände desto kürzer sollte der Hang sein, da bei zunehmender Hangneigung die Wahrscheinlichkeit steigt, daß es zu einem Durchbrechen vorhandener isohypsenparalleler Konturen kommt. Die aufgrund dieser Überlegungen abgeleiteten Werte für den P - Faktor, wie sie z. B. bei SCHWERTMANN et al. (1987) tabelliert sind, basieren nur auf einer vergleichsweise geringen Anzahl von Versuchen, und stellen somit eine deutliche Fehlerquelle bei der Abtragungsschätzung dar.

Wesentliche Fortschritte hinsichtlich der P – Faktor - Bestimmung wurden in jüngster Zeit durch die Entwicklung der Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE (RENARD et al., 1991), erzielt. Der P - Faktor der RUSLE basiert auf einer größeren Anzahl von Versuchen, sodaß die früher im Rahmen der USLE/ABAG nur geschätzten Werte nun ein experimentell nachvollziehbares Fundament besitzen. **Abb. 3** erlaubt einen Vergleich des alten

P - Faktors der ABAG (getreppte Linie) mit dem neuen P - Faktor der RUSLE (stetiger Kurvenverlauf).

Der alte P-Faktor wurde lediglich in Abhängigkeit von der Hangneigung geschätzt. Er weist ein Spektrum diskreter Werte zwischen 0,5 und 1 auf. Bei der Ermittlung des neuen P - Faktors wurde eine weitere Einflußgröße, die sog. Rauhtiefe, ein Maß für die Rauigkeit der Bodenoberfläche, in drei Klassen berücksichtigt. Bei geringer Rauigkeit der Bodenoberfläche zeigt sich zwischen dem neuen P - Faktor der RUSLE und dem alten P - Faktor der USLE/ABAG eine gute Übereinstimmung, obwohl es sich bei letzterem nur um eine grobe Abschätzung handelte. Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit nimmt der P - Faktor dagegen ab, und der mit der RUSLE prognostizierte Bodenabtrag verringert sich entsprechend.

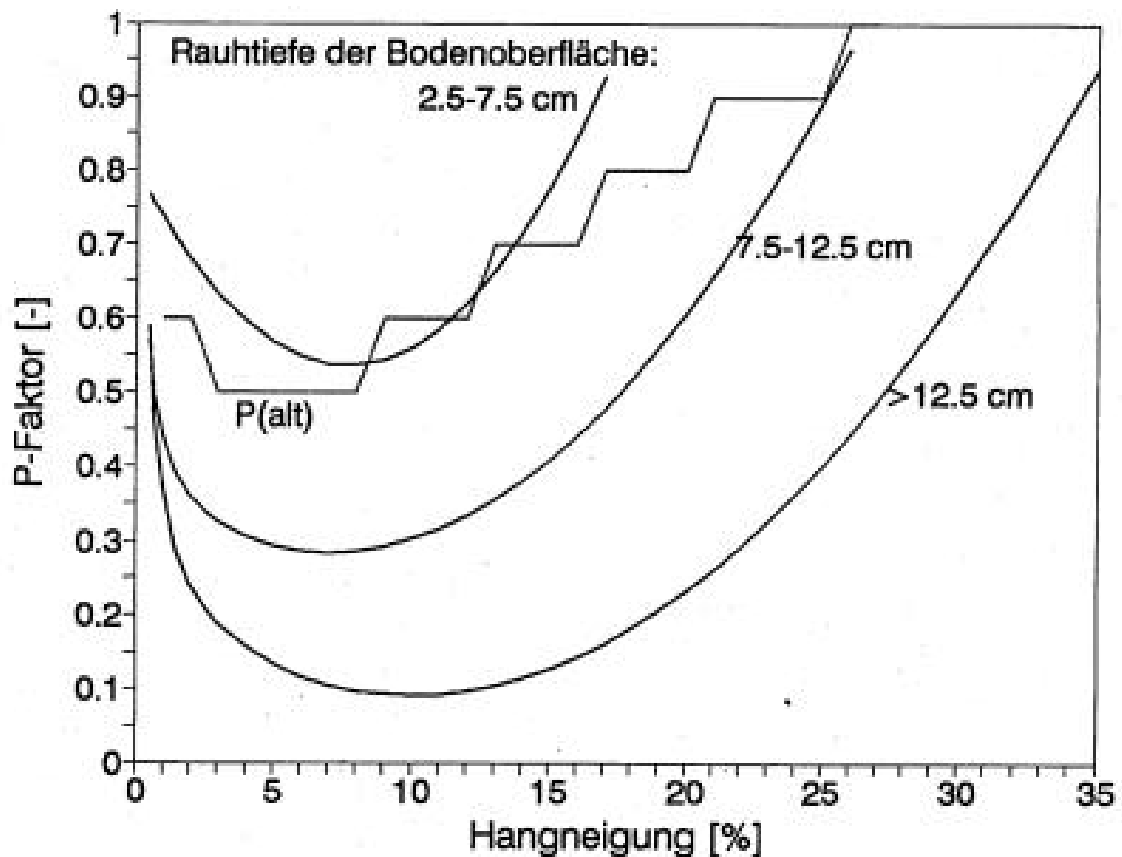


Abb. 3: P - Faktor bei konturparalleler Bearbeitung: Vergleich zwischen dem bisher verwendeten ("alt") und dem neuen, nach der Oberflächenrauigkeit differenzierten P - Faktor (nach AUERSWALD, 1992a)

Eine weitere wesentliche Neuerung der RUSLE besteht darin, daß man nicht, wie bei der USLE/ABAG von einer genau konturlinienparallelen Feldbearbeitung ausgehen muß, die in der Realität nur selten praktiziert wird. Im Zuge der Entwicklung der RUSLE wurde eine weitere empirische Gleichung abgeleitet, mit der man abschätzen kann, wie sich eine Abweichung von der konturlinienparallelen Feldbestellung auf den zu erwartenden Boden-

abtrag auswirkt. Es wurde ein sog. P-Effektivitätsfaktor (**Abb. 4**) bestimmt, der sich aus dem Winkel zwischen der Hauptgefällerrichtung und der Richtung der Feldbearbeitung ableitet.

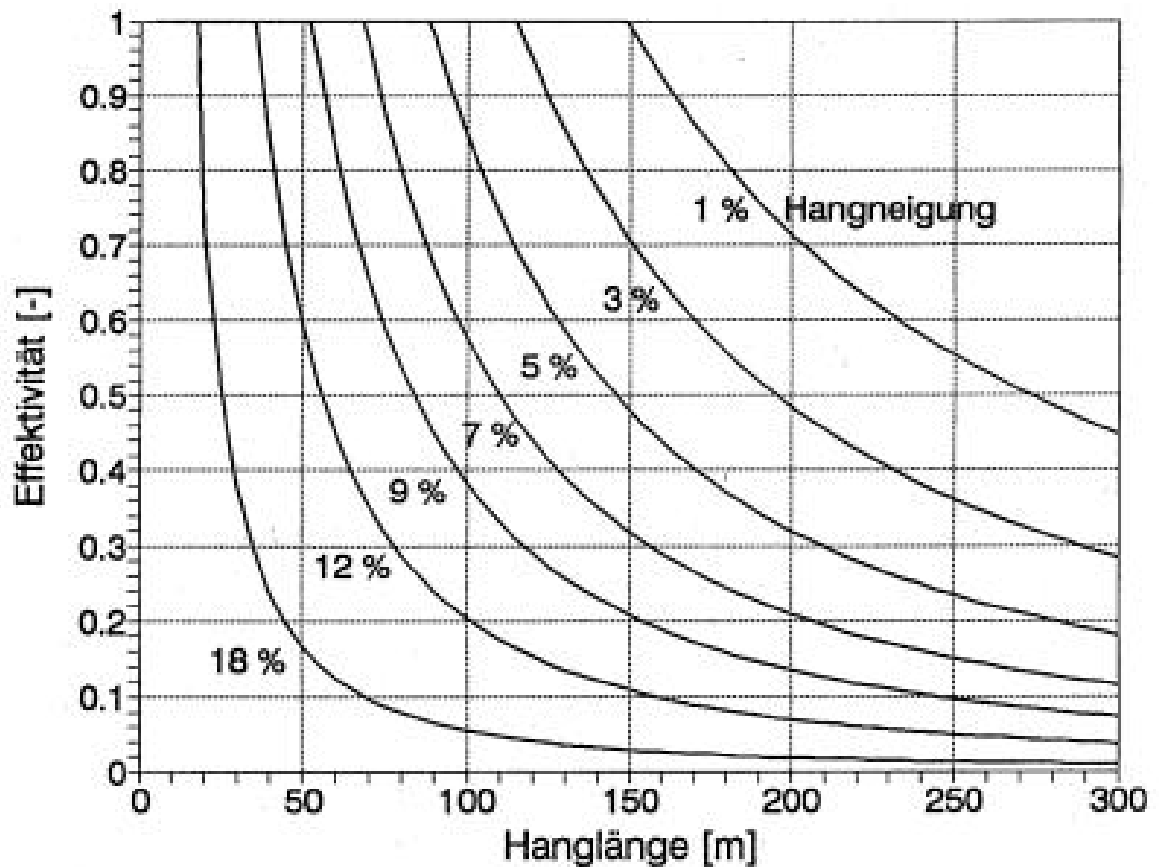


Abb. 4: Effektivität der Querbearbeitung in Abhängigkeit von der erosiven Hanglänge bei unterschiedlicher Hangneigung (nach AUERSWALD, 1992a)

Einer Bearbeitung in Gefällerrichtung entspricht eine P - Effektivität von 0, d. h. der P - Faktor nimmt den Wert 1 an, und einer konturlinienparallelen Bearbeitung entspricht eine P - Effektivität von 1. Generell berechnet sich der effektiv wirksame P - Faktor bei Querbearbeitung (P_q) nach folgender Formel (AUERSWALD, 1992a):

$$P_q = 1 + P_{=} \cdot \text{Eff} - \text{Eff}$$

- mit P_q effektiv wirksamer P - Faktor bei Querbearbeitung
 $P_{=}$ voll wirksamer P - Faktor bei konturlinienparalleler Bearbeitung
 Eff Effektivität der Quernutzung

Die Möglichkeit der rechnerischen Einbindung der Bearbeitungsrichtung in den P – Faktor bedeutet in jedem Fall eine Verbesserung der Abtragungsschätzung mit der ABAG.

8 Sensitivitätsanalyse für die einzelnen Faktoren

Wie genau die einzelnen Faktoren der ABAG bestimmt werden sollten, hängt unter anderem davon ab, wie sensitiv die Abtragsschätzung auf den jeweiligen Faktor reagiert.

Wie **Abb. 5** verdeutlicht, hat die Regenerosivität für die Verhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland den geringsten Einfluß auf die Variation des berechneten Abtrages. Dessen Bestimmung aus Isoerodentkarten bzw. mit Hilfe der vorgestellten Regressionsgleichung ist sicherlich ausreichend.

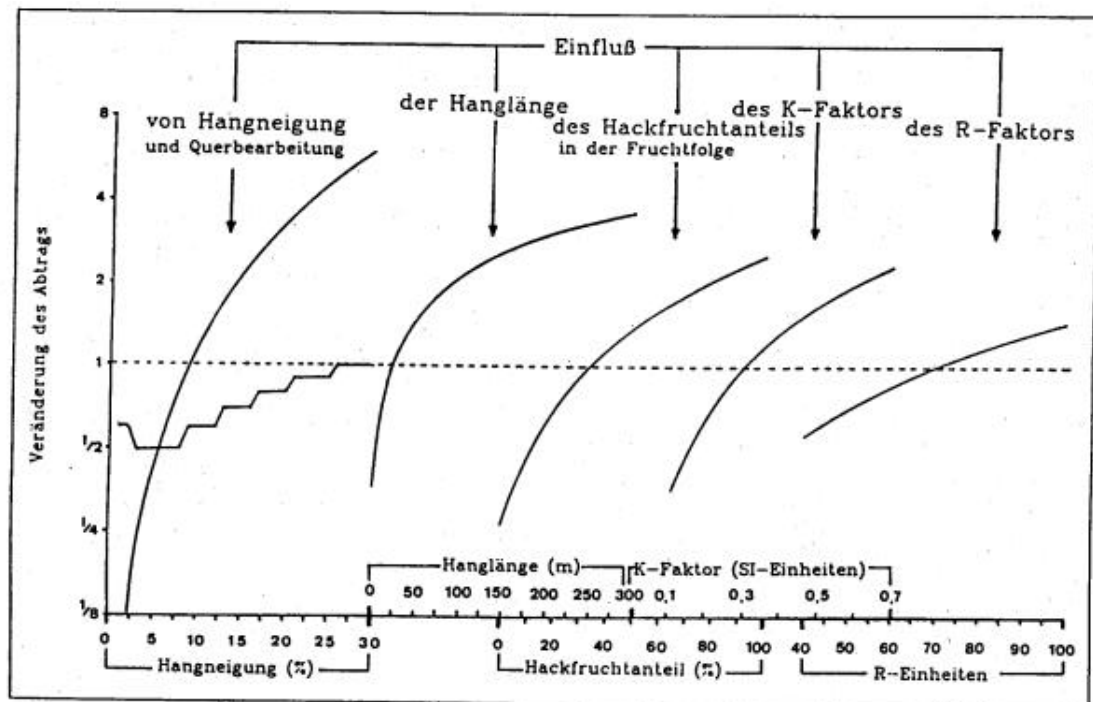


Abb. 5: Veränderung des Bodenabtrags bei Veränderung der Einflußfaktoren (nach AUERSWALD, 1987)

Während der K- und C-Faktor jeweils mit mittlerer Sensitivität die Abtragsschätzung beeinflusst, reagiert die Abtragsschätzung stark auf Unterschiede beim L- bzw. S-Faktor. Die Hanglänge wirkt besonders sensitiv im Bereich zwischen 0 und 80 m. Für Hanglängen über etwa 80 bis 100 m bewirkt eine Zunahme der Hanglänge nur mehr einen geringen Anstieg beim Bodenabtrag. Die Notwendigkeit einer möglichst genauen Bestimmung der Hangneigung wurde bereits angesprochen.

9 dABAG

Bei der dABAG handelt es sich um eine EDV - gestützte Variante des Vorhersagemodells, bei dem die ABAG mit dem Geographischen Informationssystem ARC/INFO verknüpft wurde. Aus den Reliefdaten wird ein Digitales Höhenmodell erstellt, bei dem die Höhenpunkte - anders als bei einem rasterbasierten Höhenmodell - als sog. trianguliertes, irreguläres Netzwerk (TIN) vorliegen. Durch die Dreiecksvermaschung wird eine bessere Anpassung an die Geländeverhältnisse erzielt als durch ein Rasternetz, und die Dichte der Punkte kann entsprechend der Reliefierung der Geländeoberfläche ausgedünnt oder verdichtet werden, sodaß in ebenen Gebieten durch Vermeidung redundanter Informationen Speicherplatz und Rechenzeit eingespart werden können. Benötigte Höhendaten werden durch Auswertung von Orthophotos oder durch Digitalisierung von Höhenlinien topographischer Karten gewonnen. Aus einem solchen Höhenmodell wird computergestützt ein Digitales Abflußmodell erstellt, bei dem die Abflußrichtung durch die Gefällrichtung der einzelnen Dreiecksmaschen vorgezeichnet wird (**Abb. 6**). Darüberhinaus werden in digitaler Form eine Bodenkarte bzw. eine - z.B. aus der Reichsbodenschätzung abgeleitete - K - Faktorkarte, sowie eine Nutzungskarte für den C - Faktor eingegeben. Auch diese Informationsschichten werden als TINs abgelegt, sodaß für jedes Dreieck die Hangneigung, der K - und C - Faktor bekannt sind. Man verfügt über ein detailliertes Digitales Standortmodell.

Eine wesentliche Neuerung der dABAG besteht darin, daß diese Dreiecke miteinander vernetzt werden, und der Abfluß entsprechend deren Hauptneigungsrichtung vom Punkt des Entstehens bis zum Vorfluter verfolgt werden kann. Im Sinne der ABAG ist jedes Dreieck als hinsichtlich seiner Einzelfaktoren homogenes Hangsegment aufzufassen, dessen Bedeutung für den Gesamtabtrag eines Hanges entsprechend seiner Lage innerhalb eines Hangprofiles mit Hilfe der bei WISCHMEIER & SMITH (1978) angegebenen Wichtungformel gewichtet werden kann. Es wird eine hohe räumliche Auflösung erreicht, die es z.B. ermöglicht, die sukzessive Zunahme des Bodenaustrages vom Oberhang zum Unterhang zu verfolgen, wenn sich mit hangabwärts ansteigender Abflußmenge auch die auf die Bodenpartikel einwirkenden Scherkräfte und die Sedimenttransportkapazität des Abflußwassers erhöhen.

Die Hanglänge entspricht der vom Abfluß beschriebenen Weglänge vom höchsten Dreieck an der Wasserscheide hinab zum Vorfluter in der Tiefenlinie oder einer Geländemulde. Auf diese Weise wird die gesamte erosive Hanglänge durch die Modellierung berücksichtigt.

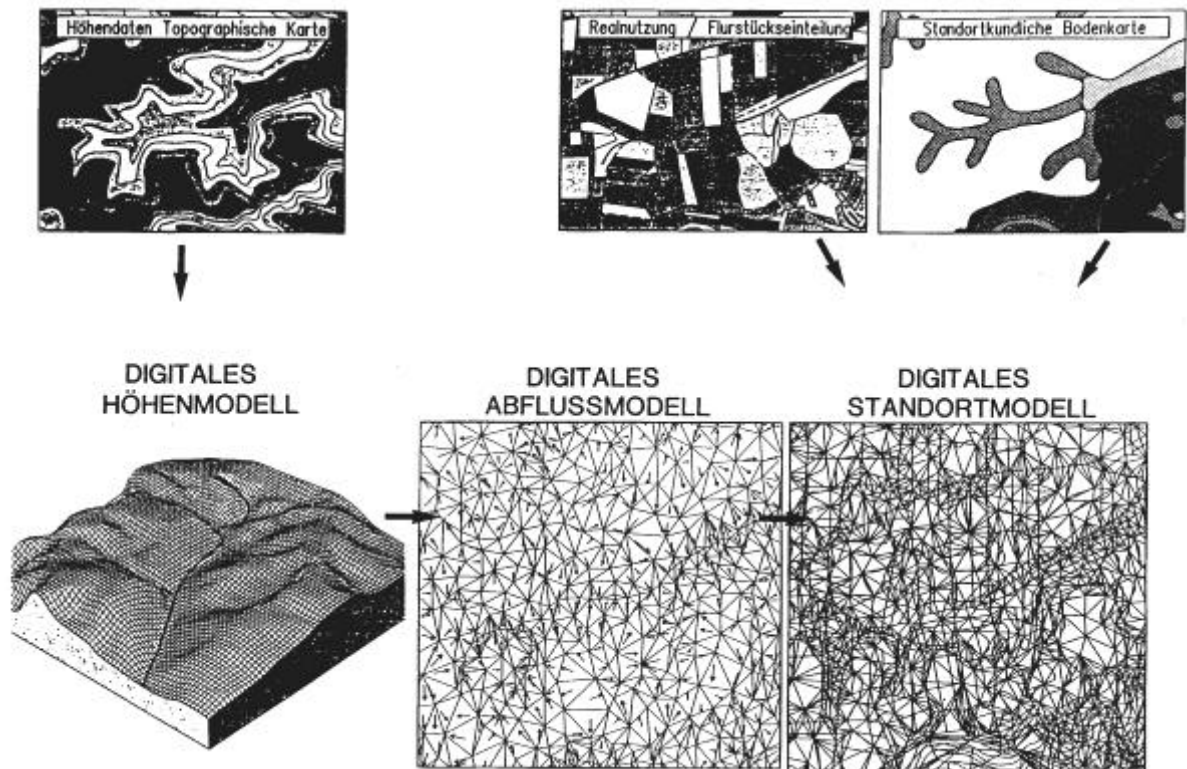


Abb. 6: Schema der computergestützten Vernetzung der Daten bei der dABAG zu einem Digitalen Höhen-, Abfluß- bzw. Standortmodell

Ist die Lage eventuell vorhandener erosionshemmender Strukturen wie Straßen, Gräben, Hecken, usw. im Gelände bekannt, so können diese digitalisiert und in das Modell aufgenommen werden. Bei der dABAG endet die erosive Hanglänge jeweils auf Höhe solcher Strukturen, und eine neue erosive Hanglänge setzt auf der hangabwärtigen Seite der Struktur wieder ein.

Während auf Kammlinien, Hangschultern, Kuppen und anderen horizontal konvex geformten Geländeauschnitten der Oberflächenabfluß divergierend auf die hangabwärts gelegenen Flächen verteilt wird, sodaß die Scherkräfte und die Transportkapazität dort relativ gering ausfallen, konvergiert der Abfluß in Hohlhängen und anderen horizontal konkav geformten Reliefpartien. Dies führt zu einer vergleichsweise hohen Erosionswirksamkeit des Abflusses. Um die Verhältnisse bei divergierendem bzw. konvergierendem Abflußgeschehen für die Abtragsberechnungen zu berücksichtigen, wurde von MOORE & BURCH (1986) mit dem sogenannten catchment shape parameter ein weiterer empirischer Ansatz in die USLE/ABAG integriert, der auch in die dABAG aufgenommen wurde. Der Formparameter des oberflächlichen Wassereinzugsgebietes wird ausgedrückt als Quotient aus der Fläche des Wassereinzugsgebietes und dem Produkt aus seiner Breite und Länge:

$$a = A / b \cdot l$$

mit a: catchment shape parameter, Formparameter

A, b, l: Fläche, Breite und Länge des Wassereinzugsgebietes

Im Falle einer Hangmulde beispielsweise nimmt der Formparameter einen Wert größer 1 an. In der Wirkung kommt dies einer entsprechend größeren Hanglänge gleich. Dieser Formparameter wird daher mit dem L-Faktor multipliziert. Wenngleich der L-Faktor damit nur mittels einer empirischen Anpassung verändert wird, bedeutet dies eine größere Annäherung an die wirklichen Reliefverhältnisse von Wassereinzugsgebieten, als wenn bei der Modellierung - wie bisher - die in der Realität kaum anzutreffenden, vereinfachten Bedingungen horizontal gestreckter Hänge angenommen werden.

Durch die beschriebene Vernetzung des Wasserflusses vom Ort der Entstehung des Oberflächenabflusses bis zum Vorfluter besteht auch die Möglichkeit, den Sedimenteintrag ins Gewässer abzuschätzen und die Phosphatfracht oder die Mengen anderer partikelgebundener Stoffe zu modellieren (NEUFANG et al., 1989).

10 Genauigkeit der Abtragschätzung

Wohl am geeignetsten für eine realistische Fehlerabschätzung ist der Vergleich von gemessenen und mit der ABAG vorausgesagten Bodenabträgen. Über die für diese Zwecke sicherlich größte Datenbasis verfügen WISCHMEIER & SMITH (1978), die Abtragsdaten von 189 Parzellen mit 2.300 Parzellenjahren haben (SCHWERTMANN et al., 1987). Bei ihren Parzellen ergab sich ein durchschnittlicher gemessener Bodenabtrag von 25,3 t/(ha · a). Die mit der USLE vorausgesagten Abträge wichen um durchschnittlich 12 % von den gemessenen Werten ab. Da die Datenbasis für die ABAG weniger umfangreich ist, als dies bei der USLE der Fall ist, dürfte die Vorhersagegenauigkeit bei der ABAG etwas geringer sein.

Bei Vergleichen von publizierten Meßwerten für Bodenabträge mit den mit der ABAG vorausgesagten Werten wird häufig nicht berücksichtigt, daß man mit der ABAG nur den langjährigen Mittelwert für den Bodenabtrag voraussagen kann. Für Einzelereignisse ist die Voraussagegenauigkeit vergleichsweise gering, da die spezifische Erosionsdisposition einer Fläche, wie z.B. der Bodenwassergehalt vor dem Regenereignis oder die Oberflächenrauigkeit, nur unzureichend in der ABAG berücksichtigt werden. Messungen des Abtrages über lange Zeiträume hinweg sind eher selten.

Abb. 7 zeigt ein Beispiel für eine Messung des langjährigen (13 bis 46 Jahre) mittleren Bodenabtrages. Es handelt sich dabei um Abtragsmessungen, die auf Hopfenflächen in der Hallertau durchgeführt wurden (SCHMIDT, 1979). Die gemessenen Abträge stimmen gut mit den vorausgesagten überein.

Daß die ABAG auch für Einzelereignisse anwendbar ist, zeigen z.B. die Ergebnisse der Abtragsmessungen, die im Rahmen eines Vergleichs verschiedener Regensimulatoren (AUERSWALD et al., 1992) auf Parzellen von 0,75 bis 10,6 m Länge durchgeführt wurden (**Abb. 8**). Da der LS-Faktor der ABAG nur für Hanglängen ab etwa 4 bis 5 m anwendbar ist, wurde für die Abtragsvoraussage bei den Parzellen mit einer Hanglänge <4 m der LS-Faktor der RUSLE verwendet (McCOOL et al., 1989). Zwar ist mit der ABAG auch eine Abtragsvoraussage für Einzelereignisse möglich, doch erfordert die Bestimmung der Fak-

toren der ABAG für solche Bedingungen viel Erfahrung und ist somit für viele potentielle Anwender nicht geeignet.

Die ABAG wurde zur Voraussage des Abtrags von Einzelparzellen entwickelt. Jedoch sind mit ihr auch Aussagen über die zu erwartenden Austräge aus Wassereinzugsgebieten möglich. Dazu ist die Summe der berechneten Abträge im Wassereinzugsgebiet mit einem sog. sediment delivery ratio (SDR) zu multiplizieren. Das SDR gibt an, wie groß der Anteil des abgetragenen Bodens ist, der letztendlich mit dem Vorfluter ausgetragen wird. Es ist um so kleiner, je größer das Wassereinzugsgebiet ist. Das SDR wird einzugsgebietspezifisch berechnet. **Abb. 9** zeigt die von AUERSWALD (1992b) an verschiedenen bayerischen Flüssen gemessenen Sedimentfrachten im Vergleich mit Sedimentfrachten, die mit der ABAG - unter Einbeziehung eines SDR - berechnet wurden. Auch hierfür zeigte sich ein überraschend hohes Maß an Übereinstimmung.

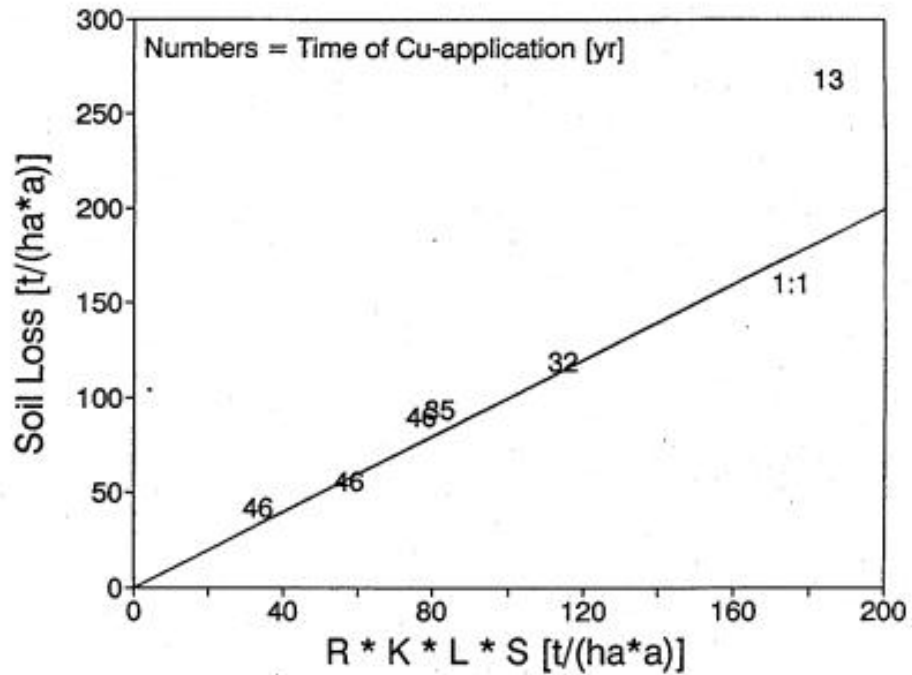


Abb. 7: Vergleich der gemessenen langjährigen mittleren Bodenabträge mit den mit der ABAG vorausgesagten Werten (nach SCHMIDT, 1979):

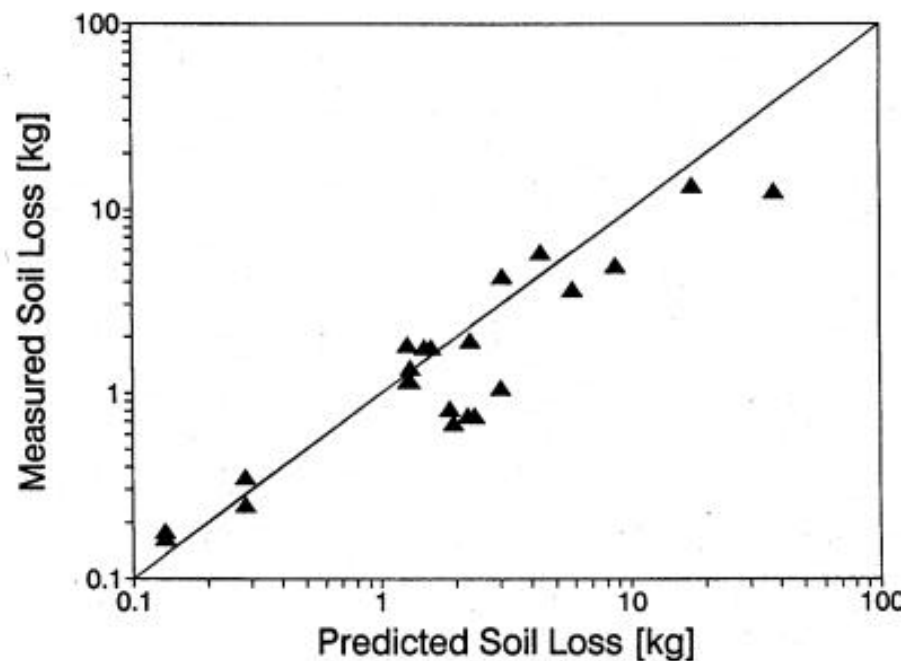


Abb. 8: Mit Hilfe der ABAG vorausgesagte und gemessene Bodenabträge für 22 Regensimulationen (nach AUERSWALD et al., 1992)

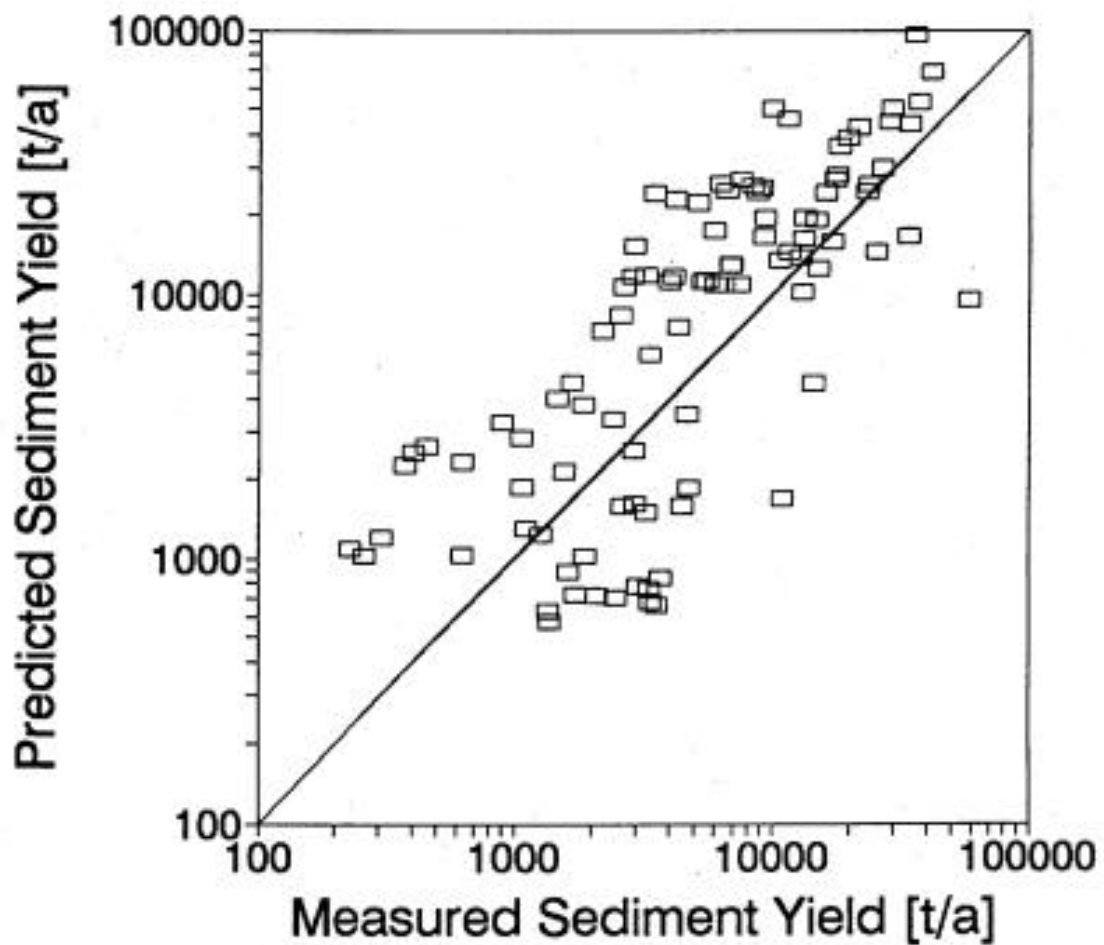


Abb. 9: Vergleich gemessener und mit der ABAG vorausgesagter jährlicher Sedimentfrachten für 22 Wassereinzugsgebiete Bayerns (nach AUERSWALD, 1992b):

Danksagung

Herrn Dr. habil. Karl Auerswald wird für die Überlassung von Datenmaterial sowie für die zahlreichen Anregungen für diesen Beitrag gedankt.

Literatur

- /1/ AUERSWALD, K. (1986): Einstufung der Bodenerodibilität (K-Faktor) nach dem Klassenbeschrieb der Reichsbodenschätzung für Südbayern.- Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 27: S. 344-351.
- /2/ AUERSWALD, K. (1987): Sensitivität erosionsbestimmender Faktoren.- Wasser + Boden 39: S. 34-38.
- /3/ AUERSWALD, K. (1992a): Verfeinerte Bewertung von Erosionsschutzmaßnahmen unter deutschen Anbaubedingungen mit dem P-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG).- Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 33: S. 137-144.
- /4/ AUERSWALD, K. (1992b): Predicted and Measured Sediment Loads of Large Watersheds in Bavaria.- Proc. 5th Int. Symp. River Sedimentation, Karlsruhe: S. 1031-1036.
- /5/ AUERSWALD, K., W. FLACKE & L. NEUFANG (1988): Räumlich differenzierende Berechnung großmaßstäblicher Erosionsprognosekarten - Modellgrundlagen der dABAG.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 151: S. 369-373.
- /6/ AUERSWALD, K., M. KAINZ, H.-J. WOLFGARTEN & J. BOTSCHKE, J. (1992): Comparison of German and Swiss Rainfall Simulators - Influence of Plot Dimensions.- Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 155: S. 493-497.
- /7/ BORK, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt - Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion. Bodenerosionsprozesse. Modelle und Simulationen.- Landschaftsgenese und Landschaftsökologie 13: 249 S.
- /8/ MCCOOL, D.K., G.R. FOSTER, C.K. MUTCHLER & L.D. MEYER (1989): Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation.- Transactions of the ASAE 32: S. 1571-1576.
- /9/ MOORE, I.D. & G.J. BURCH (1986): Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation.- Soil Sci. Soc. Am. J. 50: S. 1294-1298.
- /10/ NEUFANG, L., K. AUERSWALD & W. FLACKE (1989): Automatisierte Erosionsprognose- und Gewässerverschmutzungskarten mit Hilfe der dABAG - ein Beitrag zur standortgerechten Bodennutzung.- Bayer. Landwirtschaftl. Jahrbuch 66: S. 771-789.
- /11/ RENARD, K.G., G.R. FOSTER, G.A. WEESIES & J.P. PORTER (1991): RUSLE - Revised universal soil loss equation.- J. Soil Water Conserv. 46: S. 30-33.
- /12/ ROGLER, H. & U. SCHWERTMANN (1981): Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte Bayerns.- Z. Kulturtechn. Flurber. 22: S. 99-112.
- /13/ SCHMIDT, F. (1979): Die Abschätzung des Bodenabtrages in Hopfengärten mit Hilfe der Kupferbilanz.- Diss. TU München-Weihenstephan: 147 S.
- /14/ SCHWERTMANN, U., W. Vogl & M. Kainz (1987): Bodenerosion durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.- Ulmer, Stuttgart: 64 S.
- /15/ WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (1978): Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning.- USDA, Agric. Handbook No. 537: 58 S.

Ermittlung von K-Faktoren - Reichsbodenschätzung und Bodenbestandsauf- nahme - Wolfgang Fleck, Freiburg im Breisgau

1 Einführung

Ein von AUERSWALD (1986) für Südbayern entwickelter Umsetzungsschlüssel zur Ableitung von K-Faktoren der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) aus dem verkürzten Klassenbescrieb von Ackerflächen der Reichsbodenschätzung wurde vom Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung zur Erstellung einer Erosionsgefährdungskarte für das Flurbereinigungsgebiet Eppingen herangezogen. Zur Prüfung der Ergebnisse führte das Geologische Landesamt Baden-Württemberg eine Bodenkartierung im Flurbereinigungsgebiet durch, die im Rahmen der landesweiten Bodenbestandsaufnahme im Maßstab 1:25.000 erfolgte. Die K-Faktoren der auskartierten Böden wurden dabei aus Bodeneigenschaften nach SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) berechnet. Ein Vergleich der Ergebnisse sollte zeigen, ob sich der für Südbayern entwickelte Umsetzungsschlüssel auch in Baden-Württemberg anwenden läßt.

2 Das Untersuchungsgebiet

Das ca. 1.650 ha große Flurbereinigungsgebiet umgibt die Ortslage von Eppingen im Norden, Westen und Süden (vgl. **Abb. 1**). Das im Süden des Einzugsbereichs der Elsenz gelegene Gebiet befindet sich etwa 10 km südlich von Sinsheim und 20 km westlich von Heilbronn und liegt im Grenzbereich der Naturräume Kraichgau im Norden sowie Strom- und Heuchelberg im Süden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf einen 450 ha großen Ausschnitt im Süden des Flurbereinigungsgebiets (Untersuchungsgebiet), der in **Abb. 1** durch eine Schraffur gekennzeichnet ist und dessen Boden-, Relief- und Nutzungsverhältnisse für das gesamte Flurbereinigungsgebiet als repräsentativ angesehen werden können.



Abb. 1: Flurbereinigungs - und Untersuchungsgebiet Eppingen

2.1 Geologisch - morphologischer Überblick

Die südliche Begrenzung des Untersuchungsgebiets bilden Strom- und Heuchelberg mit steilen, überwiegend lößfreien Gipskeuperhängen und einer darüberliegenden, nahezu ebenen Schilfsandstein-Plateaufläche. Lediglich ostexponierte Hänge besitzen Decken aus Löß oder lößreichen Fließerden. Das sich nördlich anschließende Untersuchungsgebiet liegt bereits vollständig im Kraichgau, einem Hügelland mit großflächig verbreiteten, mächtigen Lößdecken. Auf den nach Südwesten und Westen exponierten Hängen dünnen die Lößdecken aus und Tonsteine des Letten- und Gipskeupers bilden dort das Ausgangsmaterial der Böden.

2.2 Böden

Hinsichtlich der Bodenverhältnisse ist zwischen landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzten Flächen zu unterscheiden. Unter den wenigen Waldflächen im Kraichgau treten, sofern diese in der Vergangenheit nie länger landwirtschaftlich genutzt wurden, auf würmzeitlichem Löß Parabraunerden mit Horizontabfolge Ah-Al-Bt-C auf. In den Senken finden sich häufig deutliche Merkmale von Staunässe, selten von Grundwassereinfluß. Die zugehörigen Bodentypen sind pseudovergleyte Parabraunerde, Pseudogley-Parabraunerde bzw. Gley-Parabraunerde (vgl. **Abb. 2**, unten).

Bei gleichen Reliefverhältnissen zeigen ackerbaulich genutzte Lößflächen stark veränderte Bodenverhältnisse (vgl. **Abb. 2**, oben). Auf Scheitelbereichen der Kuppen und Rücken wurde die Parabraunerde im Laufe jahrhundertelanger ackerbaulicher Nutzung vollständig erodiert. Als Bodentyp findet sich die Pararendzina mit Horizontabfolge Ap-C. Unter der Ackerkrume (Ap-Horizont) folgt direkt der unverwitterte Löß (C-Horizont), der häufig noch Relikte der Parabraunerdebildung in Form von fein verteilten oder konkretionären Carbonatanreicherungen erkennen lässt. Auf gestreckten Hängen sind trotz deutlicher Neigung der Geländeoberfläche unter dem Ap-Horizont noch Reste der Parabraunerde, in Form des 4-5 dm mächtigen Bt-Horizonts vorhanden. Der Horizontabfolge Ap-Bt-C entsprechend, ist der Bodentyp eine erodierte Parabraunerde. In den Senken sammelt sich das von höhergelegenen Reliefbereichen abgeschwemmte Oberbodenmaterial, als Bodentyp entwickelt sich ein Kolluvium über Parabraunerde.

2.3 Verbreitung der Böden im Untersuchungsgebiet

Abb. 3 gibt die flächenhafte Verteilung der Bodenverhältnisse im Untersuchungsgebiet wieder. Keuperverwitterungsböden (Kartiereinheiten 6 und 8) nehmen nur geringe Flächenanteile ein und treten vorherrschend in steileren Hanglagen auf. Da sie zumeist als Grünland und Streuobstwiesen genutzt werden, ist ihre Gefährdung durch Bodenabtrag nur gering. Viel problematischer sind in dieser Hinsicht die weniger geneigten, ackerbaulich genutzten Lößflächen. Die Bodenkarte (**Abb. 3**) zeigt die in **Abb. 2** zum Ausdruck kommende, bezüglich des Reliefs gesetzmäßige Verbreitung der Bodeneinheiten. Ebene bis schwach geneigte, konvexe Scheitelbereiche sind durch das Vorherrschen stark erodierter Böden (Kartiereinheit 1: Pararendzina aus Löß) gekennzeichnet. Auf gestreckten Hängen überwiegt die erodierte Parabraunerde aus Löß (Kartiereinheit 2) und in den Senkenbereichen der Muldentäler Kolluvium über Parabraunerde (Kartiereinheit 3). In breiteren Tälern haben sich in schmalen Talsohlen Auenböden (Kartiereinheiten 4 und 5) aus jungen Hochwassersedimenten entwickelt.

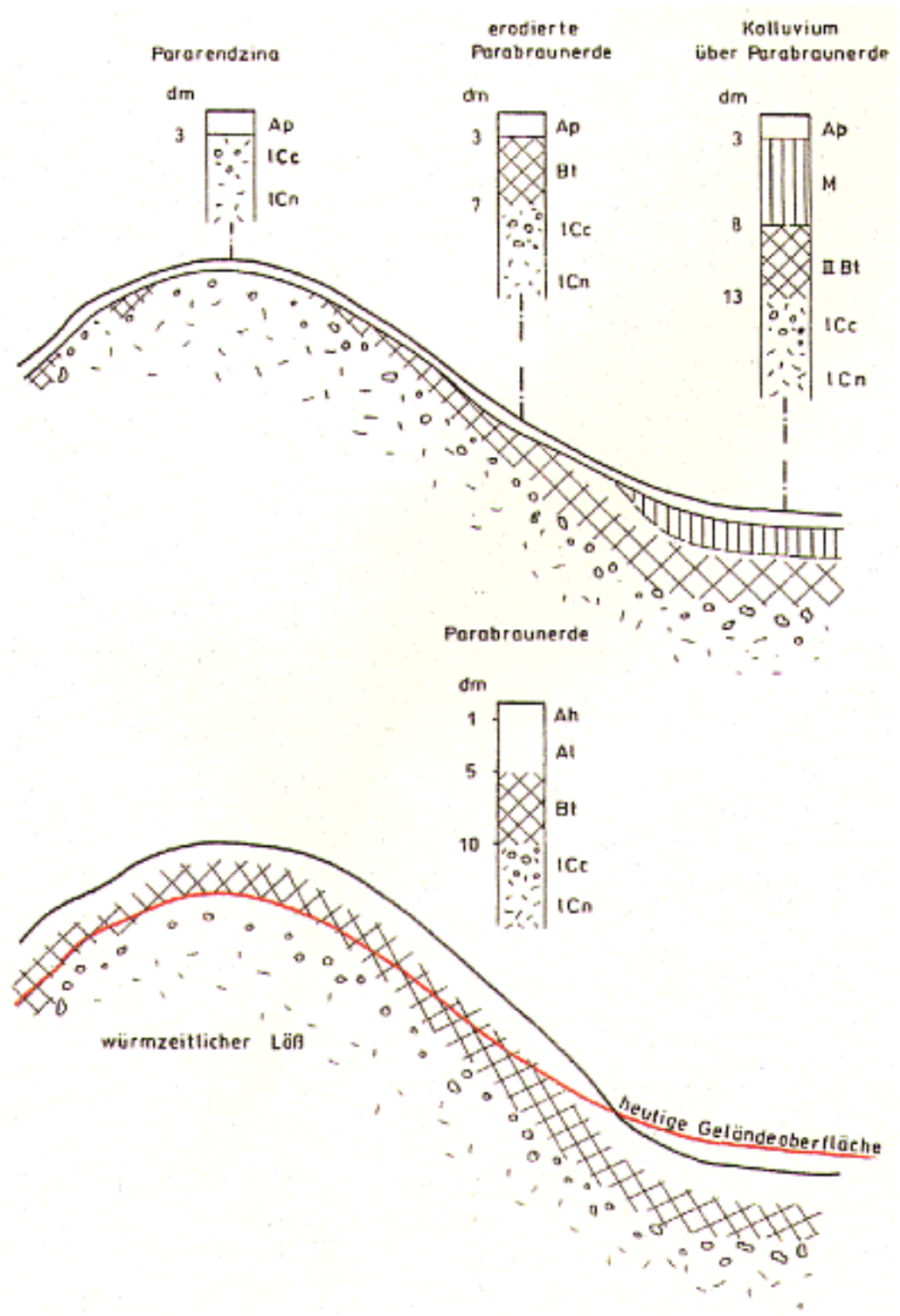


Abb. 2: Bodenverhältnisse unter Acker und unter Wald

3 Ableitung der Erosionsgefährdung aus der Bodenkarte

3.1 Legende der Bodenkarten 1:25.000 und Tabellarische Erläuterung

Abb. 4 zeigt die Beschreibung der Lößböden des Untersuchungsgebietes (Kartiereinheiten 1-3) als Beispiel für den Legendenaufbau der Bodenkarte 1:25.000 des Geologischen Landesamtes. Im Unterschied zu früheren, zumeist monotypisch ausgerichteten Legendenschreibungen, deren Angaben sich nur auf einen oder wenige Leitböden beschränkten, werden hier auch Begleitböden mit untergeordneten Flächenanteilen aufgeführt.

Für jede Kartiereinheit sind zunächst die auftretenden Bodentypen mit zugehöriger Bodenart genannt. Weiterhin werden Angaben zur Waldhumusform, zum geologischen Ausgangssubstrat der Bodenbildung, zum Georelief und zu den Wasserständen bei grundwasserbeeinflussten Böden gemacht. Der Abschnitt "Art und Flächenanteil der bestimmenden Bodenformengruppen" verbindet die Kartenlegende mit der Tabellarischen Erläuterung zur Bodenkarte, in letzterer sind sämtliche, den Kartiereinheiten zugrunde liegende Bodenformen aufgelistet. Aufgeführt werden darin im Gelände ermittelte Bodeneigenschaften (Bodentyp, Substrat, geologischer Profiltyp, Gründigkeit, Waldhumusform, Humus- und Carbonatgehalt, pH-Wert) sowie Bodenkennwerte, die aus Gelände- und Laboraten sowie Kennwerttabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE DER GEOLOGISCHEN LANDESÄMTER, 1982) ermittelt wurden. Neben potentieller Kationenaustausch-, Luft-, Feld- und nutzbarer Feldkapazität, Wasserdurchlässigkeit und Verschlammungsneigung der Böden wird in der Tabelle der K-Faktor der ABAG in Stufen von 1-6 angegeben.

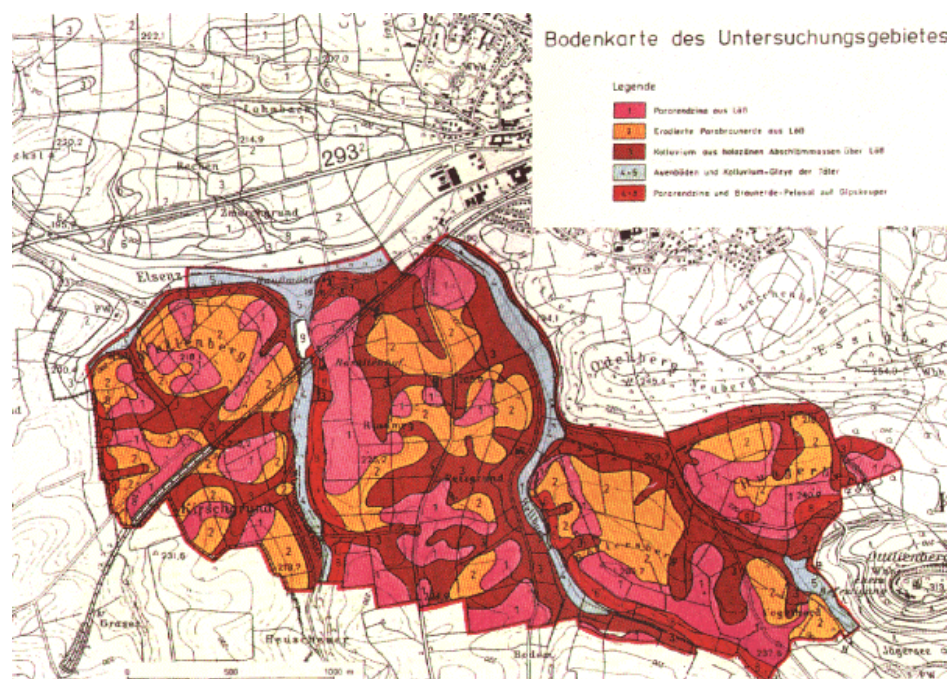


Abb. 3: Bodenkarte des Untersuchungsgebietes

Bodengesellschaften

1. Böden des Lößhügellandes

1. Tiefe Pararendzina aus 2-3 dm lehmigem Schluff, z.T. schluffigem Lehm, über schwach lehmigem Schluff; kalkreich bis zur Geländeoberfläche; vereinzelt mäßig tiefe, erodierte Parabraunerde aus 2-3 dm lehmigem Schluff, z.T. schluffigem Lehm über schluffig-tonigem Lehm; ab 6-9 dm unter Flur von kalkreichem schwach lehmigem Schluff unterlagert; stellenweise tiefe Parabraunerde-Pararendzina und mittlere, erodierte Parabraunerde
 Würmzeitlicher Löß
 Gerundete Scheitelbereiche und konvexe bis gestreckte Flachhänge von Hügelrücken und -kuppen
 Art und Häufigkeit der flächenbestimmenden Bodenformengruppen:
 Z1:4, Z2:1, L1:1, L3:1
2. Mäßig tiefe z.T. tiefe, erodierte Parabraunerde aus schluffig-tonigem Lehm, meist von 2-3 dm lehmigem Schluff bis schluffigem Lehm überlagert; kalkreicher Schluff ab 6-10 dm unter Geländeoberfläche; vereinzelt tiefe Pararendzina aus lehmigem Schluff, z.T. schluffigem Lehm, über Schluff; in Randlagen mittlere erodierte Parabraunerde
 Würmzeitlicher Löß
 Breite, schwach gewölbte Scheitelbereiche, Sattelbereiche und gestreckte Flachhänge von Hügelrücken und -kuppen
 Art und Häufigkeit der flächenbestimmenden Bodenformengruppen:
 L1:3, L2:2, Z1:1, L3:1
3. Tiefes Kolluvium, stellenweise kalkhaltig, aus schwach lehmigem Schluff bis schluffigem Lehm; im Zentrum der Muldentäler häufig pseudovergleyt; in Sattellagen häufig mittleres bis tiefes Kolluvium über Parabraunerde aus 4-8 dm schwach lehmigem Schluff bis schluffigem Lehm über schluffig-tonigem Lehm; in flachen Übergängen zu Talauen häufig Gley-Kolluvium; Humusgehalte gering bis mittel
 Holozäne Abschwemmassen aus Lößbodenmaterial
 Tiefenbereiche der Muldentäler, sowie dazwischen liegende Sattelbereiche
 Art und Häufigkeit der flächenbestimmenden Bodenformengruppen:
 K1:3, K2:3, K3:2, K4:1, K5:1
4. Mittlerer bis tiefer kalkhaltiger Auengley aus lehmigem Schluff bis schluffig-tonigem Lehm; Tongehalte i.d.R. von oben nach unten zunehmend; stellenweise kalkfrei; in Randlagen häufig Brauner-Auenboden-Auengley und Auengley-Brauner Auenboden; meist kalkhaltig; vereinzelt Bodenverbesserung durch künstlichen Auftrag
 Mittlerer Grundwasserstand (Auengley): 4-8 dm u.Fl.
 Holozäner Auenlehm
 Talauen der Elsenz und ihrer Zuflüsse
 Art und Häufigkeit der flächenbestimmenden Bodenformengruppen:
 AG1:3, AG2:2, AG3:2, AG4:2, A1:2

Abb. 4: Aufbau der Legende zur Bodenkarte 1:25.000

3.2 K-Faktoren der Lößböden im Untersuchungsgebiet

Nach SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) berechnet sich der K-Faktor der ABAG, als Maß für die Erosionsgefährdung eines Bodens, aus den 5 Bodeneigenschaften Humusgehalt, Gehalt an Schluff plus Feinstsand, Sandgehalt abzüglich Feinstsand, Aggregatgröße sowie der Wasserdurchlässigkeit des Gesamtbodens. Dabei steigt die Erosionsgefährdung vor allem mit zunehmendem Schluff- plus Feinstsandgehalt und abnehmendem Humusgehalt. Im Untersuchungsgebiet sind deshalb die überwiegend ackerbaulich genutzten Lößböden mit sehr schluffreichem, humusarmem Oberboden besonders erosionsgefährdet. Die weiteren Betrachtungen sollen deshalb ausschließlich den Lößbodentypen Pararendzina und erodierte Parabraunerde gelten. Terrassierte, häufig mit Streuobst und Grünland bestandene Hänge im Gipskeuper mit Pararendzina und Braunerde-Pelosol als Bodentypen sowie Kolluvien und Auenböden der Senken und Täler mit Akkumulation von abgeschwemmtem Oberbodenmaterial werden im folgenden ausgeklammert.

Die o.g. Bodeneigenschaften wurden zunächst bei der Kartierung im Gelände geschätzt oder nach Verfahren, die in der Bodenkundlichen Kartieranleitung angegeben sind, bestimmt (Wasserdurchlässigkeit). An 20 ausgewählten Aufnahmepunkten wurden zusätzlich die Oberböden beprobt und deren Kornfraktionen sowie ihre Humusgehalte im Labor bestimmt.

Tab. 1: K-Faktoren im Untersuchungsgebiet Eppingen - Vergleich der Werteausprägungen bei zwei unterschiedlichen Ermittlungsverfahren

Ermittlung der K-Faktoren aus Bodenschätzungskarten nach SCHWERTMANN et al. (1990, Tab. 4)		Berechnung der K-Faktoren nach Kartierergebnissen des GLA	
verkürzter Klassenbescrieb der Bodenschätzung	K-Faktor	Bodenform	K-Faktor
sL-Lö	0,50	Pararendzina aus LÖB	0,66
L-Lö	0,55	erodierte Parabraunerde aus LÖB	0,54

Für Pararendzina und erodierte Parabraunerde ergaben sich mittlere Humusgehalte von 1,8 % ($\pm 0,5$ %). Die Schluff- plus Feinstsandgehalte der Pararendzina bewegten sich mit 67 bis 82 % um einen Mittelwert von 75 % und lagen damit um 5 % höher als bei der Parabraunerde (64-79 %, Mittelwert 70 %). Die Sandgehalte, abzüglich des Feinstsandes, lagen bei beiden Bodenformen nur bei 1-3 %.

Aus diesen Mittelwerten ergeben sich K-Faktoren von 0,54 für die Parabraunerde bzw. 0,66 für die Pararendzina (vgl. **Tab. 1**). Da die Gleichung zur Berechnung des K-Faktors nach SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) nur für Böden mit 0-70 % Schluff plus Feinstsand gilt, wurde bei der Pararendzina mit Schluff- plus Feinstsandgehalten von durchschnittlich 75 % auf eine Schätztabelle von VOGL (mündl.) zurückgegriffen. Bei Gehalten von 75 % wird der K-Faktor im Vergleich zum berechneten Wert von 0,62 auf Grund der schlechten Aggregation und Durchlässigkeit geringfügig auf 0,66 erhöht.

4 Vergleich der Bodenkarte mit Ergebnissen der Bodenschätzung

Bei der bodenkundlichen Kartierung des Untersuchungsgebietes wurden die Ergebnisse der Bodenschätzung zunächst nicht berücksichtigt. Beim Vergleich von Bodenkarte und Bodenschätzungskarte (**Abb. 3** und **Abb. 5**) lassen sich deutliche Parallelen erkennen. Die Kartiereinheiten der Bodenkarte decken sich in der Regel mit bestimmten Klassenzeichen der Bodenschätzung. Sandiger Lehm aus Löß der Zustandsstufen 3 und 4 deckt sich fast immer mit der Kartiereinheit Pararendzina der Bodenkarte.

Hinter Lehm aus Löß verbergen sich zumeist erodierte Parabraunerde und Kolluvium, wobei die Parabraunerde den Zustandsstufen 4 und 5, das Kolluvium den Zustandsstufen 2 und 3 entspricht. Mit Hilfe der Bodenkarte ist es damit möglich, vom Klassenbescrieb der Bodenschätzung direkt auf den zugehörigen K-Faktor zu schließen.

Beim Vergleich mit den Lößböden Südbayerns ergibt sich bei den Lehmen (Klassenzeichen L-Lö) mit zugehörigem K-Faktor von 0,55 gegenüber 0,54 im Untersuchungsgebiet sehr gute Übereinstimmung. Dagegen steht dem K-Faktor von 0,50 der sandigen Lehme Bayerns ein Wert von 0,66 im Untersuchungsgebiet gegenüber.



Abb. 5: Bodenschätzungskarte des Untersuchungsgebietes

5 Diskussion der Ergebnisse

Der höhere K-Faktor der Lößpararendzinen des Untersuchungsgebietes beruht vor allem auf den gegenüber der Parabraunerde um durchschnittlich 5 % höheren Schluff- plus Feinstsandgehalten. Dieser geringe Unterschied in der Bodenart des Oberbodens war zunächst überraschend, sind doch die Unterschiede der Schluff- plus Feinstsandgehalte in den Unterböden (Parabraunerde mit schluffig-tonigem Lehm gegenüber schwach lehmigem Schluff der Pararendzina) mit 25-30 % um ein Vielfaches höher. Folgende Gründe lassen sich hierfür anführen:

Der im Vergleich zum Unterboden geringere Schluff- plus Feinstsandgehalt im Oberboden der Pararendzina läßt sich wahrscheinlich dadurch erklären, daß hier noch Reste des tonreicheren Unterbodens der Parabraunerde vorhanden sind. In den Oberböden der überwiegend an den Hängen vorkommenden Parabraunerde ist dagegen einerseits noch Material des ursprünglich vorhandenen, tonverarmten A1-Horizonts enthalten, andererseits wird im Zuge der Bodenerosion zusätzlich schluffreiches Material von höhergelegenen Pararendzinaflächen eingetragen, sofern dies nicht durch Wege, Ackerraine, Grünstreifen oder sonstige Erosionsschutzmaßnahmen unterbunden wird. In den Hängen findet "Durchtransport" von erodiertem Oberbodenmaterial statt. Von der Gesamtbilanz gesehen, ist der Materialverlust im Vergleich zu den flacheren Scheitellagen ohne Stoffeintrag somit gering.

Die in Bayern aus Ackerbeschrieben der Bodenschätzung abgeleiteten K-Faktoren sind zwar insgesamt ähnlich, doch zeigt schon der dort ermittelte niedrigere K-Faktor des sandigen Lehms (0,50) im Vergleich zum Lehm (0,55), daß hinter diesem Klassenzeichen in Bayern andere Böden bzw. Substrate stehen. So geben SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) für Parabraunerden aus Löß (Weißlehm) gemessene K-Faktoren von 0,65-0,98 an, für Pararendzina aus Löß dagegen nur einen K-Faktor von 0,45. Der Grund für den niedrigeren Wert der Pararendzina liegt vermutlich in den angegebenen deutlich höheren Sandgehalten und geringeren Schluff- plus Feinstsandgehalten. Der für Bayern erstellte Umsetzungstabelle liegen also, zumeist was die Lößböden betrifft, Böden mit anderen Substraten als im Untersuchungsgebiet zu Grunde.

6 Schlußfolgerung

Eine Anwendung der Umsetzungstabelle in Bodenlandschaften außerhalb Bayerns, ohne Kenntnis der maßgebenden Bodeneigenschaften, kann zu Fehlern bei der Einschätzung der Erosionsgefährdung führen. K-Faktoren sollten deshalb möglichst direkt aus bodenkundlichen Spezialkarten, z.B. der Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:25.000, entnommen oder abgeleitet werden. Zusätzlich lassen sich aus diesen Karten Bereiche mit vorherrschender Bodenerosion gegenüber Akkumulationsbereichen entnehmen.

Da die im Rahmen der Bodenbestandsaufnahme erstellten Bodenkarten bisher nur einen kleinen Teil Baden-Württembergs abdecken, sollte man für Fragen der Erosionsanfälligkeit der Böden auf die Bodenübersichtskarte 1:200.000 zurückgreifen. Momentan liegt eines von landesweit 6 Kartenblättern vor, die weiteren werden voraussichtlich im Laufe der nächsten 2 Jahre folgen. Die Auflösung der Bodenübersichtskarte ist zwar für eine direkte Ableitung der Erosionsgefährdung für großmaßstäbige Karten zu gering, doch kann mit ihrer Hilfe für einzelne Bodenlandschaften mit charakteristischen Böden und Substraten eine hinreichend genaue Interpretation der Kurzbeschriebe der Bodenschätzung, ähnlich der Vorgehensweise in Bayern, vorgenommen werden. Oben dargestellte Fehlinterpretationen könnten so weitgehend vermieden werden.

Literatur

- /1/ Arbeitsgruppe Bodenkunde der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland (1982): *Bodenkundliche Kartieranleitung*.- 3. Aufl., Hannover (BGR): 331 S.
- /2/ Auerswald, K. (1986): *Einstufung der Bodenerodibilität (K-Faktor) nach dem Klassenbeschrieb der Reichsbodenschätzung für Südbayern*.- Z. Kulturtechnik u. Flurbereinigung **27**: S. 344-351.
- /3/ Schwertmann, U., W. Vogl & M. Kainz (1990): *Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*.- 2. Aufl., Stuttgart: 64 S.

Erosionsgefährdungskarten in der Flurneuordnung - Herstellung, Anwendung und Erfahrungen - Lothar Kiefer, Kornwestheim

1 Erosionsschutz in der Flurneuordnung

Durch den Ausbau eines neuen Wege- und Gewässernetzes und die Neugestaltung der Flurstücksstruktur hat die Flurneuordnung einen starken Einfluß auf die Erosionsgefährdung innerhalb eines Flurneuordnungsgebietes. Es ist deshalb selbstverständlich, daß die Flurneuordnungsverwaltung bei der Neugestaltung eines Flurneuordnungsgebietes schon immer die Belange des Erosionsschutzes berücksichtigte und versuchte, das neue Wege- und Gewässernetz und die neuen Bewirtschaftungsrichtungen so zu planen, daß Erosionsschäden möglichst vermieden werden.

Bei der Abschätzung der Erosionsgefahr war man trotz aller Informationen, die die Gefällstufenkarten, denen die Hangneigung entnommen werden kann, und die Unterlagen der Reichsbodenschätzung enthalten, weitgehend auf den subjektiven Eindruck angewiesen, den das Gelände macht. Eine objektive Grundlage zur Beurteilung der Erosionsgefährdung ist deshalb in Flurneuordnungsverfahren, in denen Erosionsschäden zu befürchten sind, wünschenswert.

2 Das Digitale Geländemodell in der Flurneuordnung

Für zweckmäßige und umweltschonende Planungen im Flurneuordnungsgebiet werden geeignete Planungsunterlagen benötigt. In der Flurneuordnungsverwaltung Baden-Württemberg werden deshalb für praktisch alle Flurneuordnungsverfahren Orthophotos, also Luftbilder, die so entzerrt sind, daß sie mit anderen Kartenunterlagen kombiniert werden können, und Gefällstufenkarten, die Linien oder Flächen gleicher Geländeneigung enthalten, bereitgestellt.

Zur Herstellung dieser Produkte werden zunächst *Digitale Geländemodelle* benötigt, aus welchen für jeden Punkt des Geländes die Geländehöhe bestimmt werden kann. Die Daten für die Digitalen Geländemodelle werden aus Luftbildern im Maßstab 1 : 7.500 mit Hilfe der Luftbildmessung, der Photogrammetrie, mit einer Genauigkeit von etwa ± 20 cm erfaßt.

Bei der Datenerfassung wird ein regelmäßiges Raster über die Landschaft gelegt; die Rasterweite hängt hierbei von der Welligkeit des Geländes ab. In den Rasterpunkten wird jeweils photogrammetrisch die Geländehöhe gemessen. Zusätzlich werden Höhen von Geländebruchkanten gemessen, wo sich die Geländeneigung sprunghaft ändert, außerdem die Höhen entlang von Muldenlinien, Rückenlinien, in Hoch- und Tiefpunkten, sodaß das Gelände durch die Messungen gut repräsentiert wird. Aus diesen Messungen wird mit

Hilfe des Programmsystems SCOP ein Digitales Geländemodell berechnet, aus welchem sich - wie bereits erwähnt - die Geländehöhe jedes beliebigen Punktes bestimmen läßt.

Aus diesem Digitalen Geländemodell können nun die unterschiedlichsten Folgeprodukte abgeleitet werden: Höhenlinienkarten, Geländeprofile, perspektivische Schrägdarstellungen, Volumenberechnungen (z.B. Berechnung des Fassungsvermögens eines Wasserrückhaltebeckens), Steuerdaten zur Entzerrung von Luftbildern zu Orthophotos und - für unser Thema besonders wichtig - ein Digitales Neigungsmodell, aus welchem Gefällstufenkarten abgeleitet werden können, die die Geländeneigung graphisch darstellen.

3 Praktische Herstellung von Erosionsgefährdungskarten

Die Geländeneigung ist einer der wichtigsten Faktoren der Erosionsgefährdung. Da dieser Faktor bereits in digitaler Form - in Gestalt eines Digitalen Neigungsmodells, abgeleitet aus dem Digitalen Geländemodell - vorliegt, lag es nahe, diese Information zur Herstellung einer Erosionsgefährdungskarte zu nutzen. Der Gedankengang ging dahin, mit Hilfe der bekannten *Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung* (Wischmeier-Formel) und des vorhandenen Programm-Systems SCOP, das schon bisher für Digitale Geländemodelle verwendet worden war, Karten zu erstellen, die die Erosionsgefährdung in Flurneuordnungsgebieten aufzeigen.

Mit Hilfe der Wischmeier-Formel läßt sich die durchschnittliche jährliche Erosion in Tonnen pro Hektar berechnen, wenn Geländeneigung, ein Bodenerodierbarkeitsfaktor, die erosionswirksame Hanglänge und einige andere Faktoren bekannt sind. Wird ein bestimmter tolerierbarer Bodenabtrag festgelegt, der durchaus örtlich variabel sein kann, so kann nach einer kleinen Umformung der Wischmeier-Formel hieraus und mit Hilfe der übrigen Parameter die maximal zulässige erosionswirksame Hanglänge berechnet werden. Diese maximal zulässige erosionswirksame Hanglänge ist in Flurneuordnungsverfahren bis zu einem gewissen Grade beeinflussbar, z.B. durch Wege- und Grabenbau, Grünlandstreifen, sonstige Pflanzmaßnahmen oder durch die Größe der neuen Grundstücke.

Zur Herstellung der Erosionsgefährdungskarte sind also folgende Schritte nötig:

- Erstellung eines Digitalen Geländemodells; hieraus Ableitung des Digitalen Neigungsmodells (**Abb. 1**: Gefällstufen).
- Ableitung des tolerierbaren Abtrags aus Acker- oder Grünlandzahl der Reichsbodenschätzung (SCHWERTMANN et al. 1990); Digitalisierung der Karte des tolerierbaren Abtrags (**Abb. 2**: T-Werte).
- Ableitung der Erodierbarkeitsfaktoren aus den Bodenarten der Bodenschätzung (AUERSWALD & SCHMIDT 1986); Digitalisierung der Karte der Erodierbarkeitsfaktoren (**Abb. 3**: K-Faktoren).
- Festlegung der übrigen Faktoren der Wischmeier-Formel, die für das gesamte Flurneuordnungsgebiet als konstant angenommen werden.

- Hieraus Berechnung der maximal zulässigen erosionswirksamen Hanglängen mit Hilfe der Erweiterung des Programm-Moduls SCOP-INTERSECT (INPHO GmbH 1991).
- Graphische Darstellung der zulässigen Hanglänge mit dem Rasterplotter (**Abb. 4:** Tolerierbare Hanglängen).

4 Anwendung der Erosionsgefährdungskarten

Die Erosionsgefährdungskarte dient dem Flurneuordnungsingenieur als Unterlage insbesondere zur Planung des neuen Wege- und Gewässernetzes und der neuen Zuteilungs- und damit Bewirtschaftungsrichtungen. Da das neue Wege- und Gewässernetz in der Regel auf Karten im Maßstab 1:5.000 geplant wird, haben auch die Erosionsgefährdungskarten in der Regel diesen Maßstab.

Die Erosionsgefährdungskarte hilft dem Flurneuordnungsingenieur dabei, die neuen Wege und Gewässer so zu planen, daß möglichst keine unverträglichen Erosionsrisiken auftreten. Durch die Darstellung der besonders gefährdeten und der weniger gefährdeten Gebiete lenkt die Erosionsgefährdungskarte die Aufmerksamkeit des planenden Ingenieurs auf die kritischen Stellen des Flurneuordnungsgebiets, in denen eine eventuelle Erosionsgefährdung besonders sorgfältig beachtet werden muß.

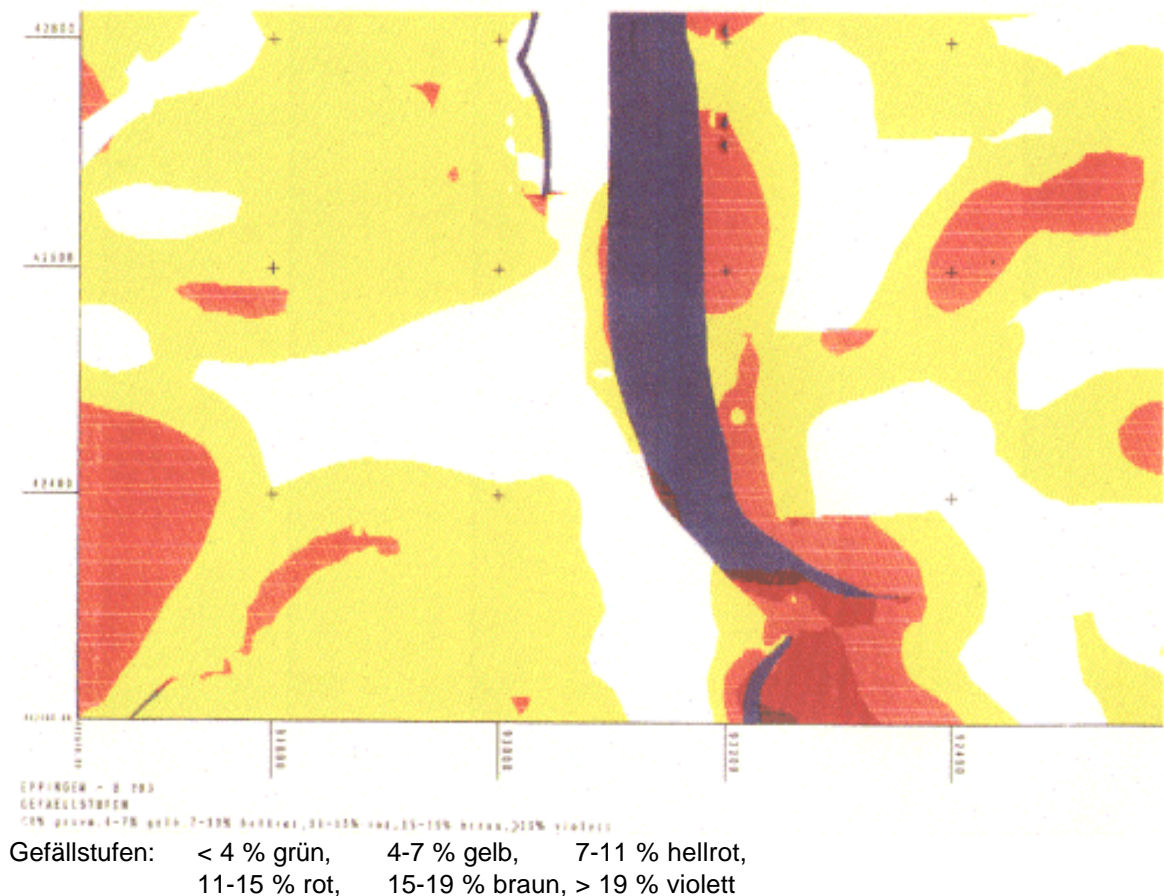
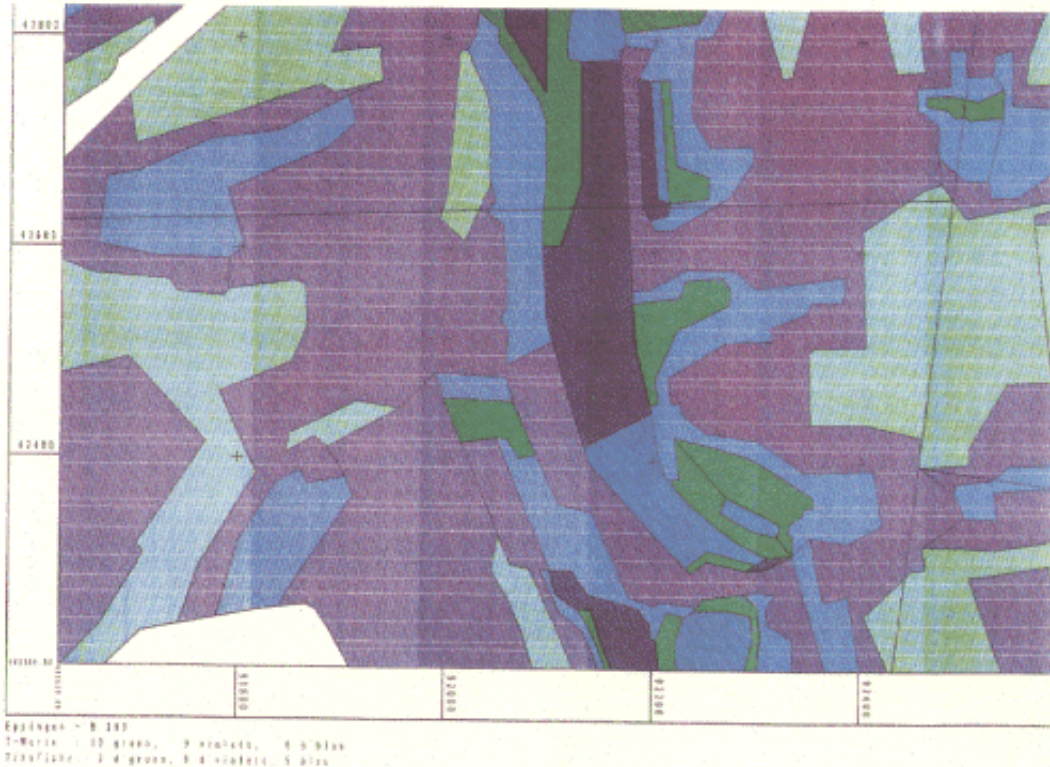
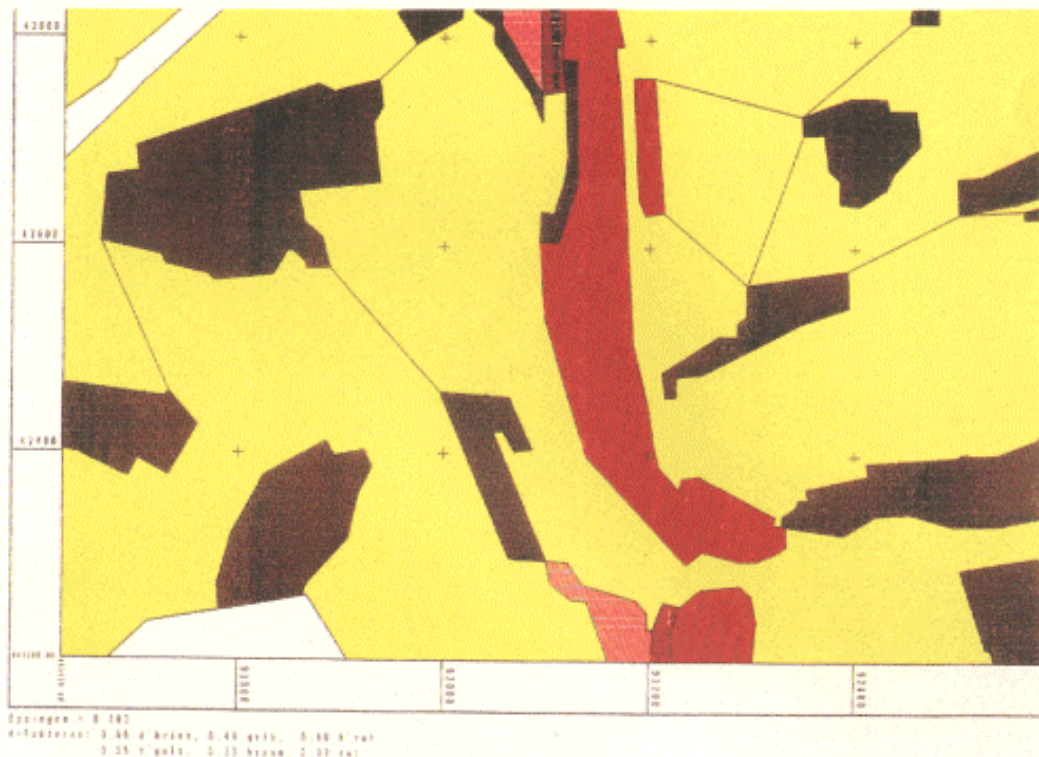


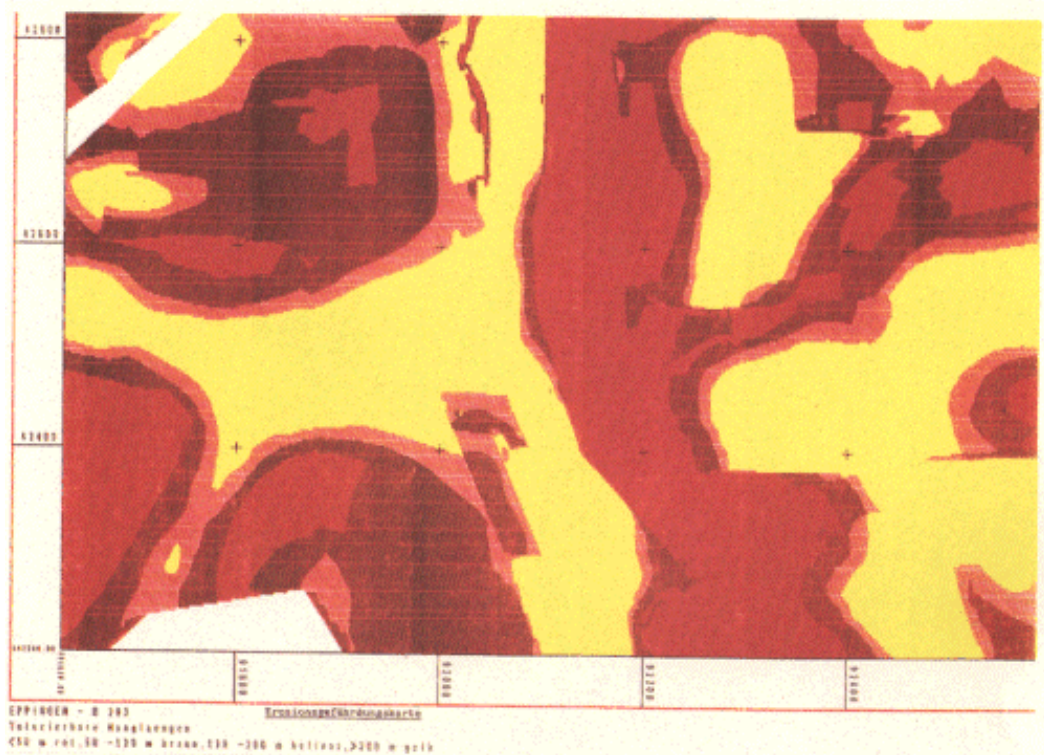
Abb. 1: Gefällsstufen



T-Werte: 10 grün 9 violett 8 h'blau
 T/ha/Jahr: 7 d'grün 6 d'violett 5 blau
Abb. 2: T – Werte



K-Faktoren: 0,66 d'braun, 0,49 gelb, 0,40 h'rot
 0,35 h'gelb, 0,33 braun, 0,32 rot
Abb. 3: K – Faktoren



< 50 m rot, 50-120 m braun, 120-200 m hellrot, > 200 m gelb

Abb. 4: Tolerierbare Hanglängen

Konsequenzen der Angaben der Erosionsgefährdungskarten sind die besonders sorgfältige Planung der neuen Wege und Wassergräben in den am meisten gefährdeten Bereichen, die Planung geeigneter Bepflanzungen, die Ausweisung von Grünlandstreifen oder ähnliche Maßnahmen. Die Erosionsgefährdungskarte sagt jedoch nichts darüber aus, welche Maßnahmen im Einzelfall am geeignetsten sind. Diese Entscheidung muß der planende Ingenieur nach seinem Sachverstand treffen.

5 Erfahrungen

Der Aufwand zur Herstellung der Erosionsgefährdungskarten ist überschaubar: Die Informationen über Hangneigungen lagen bei der Flurneuordnungsverwaltung Baden-Württemberg bisher schon in digitaler Form vor. Die Karten der tolerierbaren Erosion und der Erodierbarkeitsfaktoren müssen abgeleitet und digitalisiert werden. Die Digitalisierung erfolgt mit dem interaktiv-graphischen SICAD-System des Landesamtes. Die Programme zur Berechnung der zulässigen erosionswirksamen Hanglängen sind vorhanden, und die Ausgabe erfolgt mit dem Rasterplotter des Landesamtes.

Die technische Herstellung der Erosionsgefährdungskarten wirft also keine gravierenden Probleme auf. Hieraus darf jedoch nicht geschlossen werden, daß auch bei der Anwendung keine Probleme auftreten. Da die Erosionsgefährdungskarten auf der Wischmeier-Formel beruhen, haben sie dieselben Vor- und Nachteile wie diese. Das heißt beispielsweise:

- Die Form des Hanges (konkav oder konvex) wird nicht berücksichtigt; die Gefahr des Auftretens von reißender Erosion wird nicht beachtet.
- Die Frage, wo im Einzelfall der erosionswirksame Teil eines Hanges beginnt und wo er aufhört, wird nicht beantwortet. Die Lösung dieses Problems bleibt dem Sachverständigen des Ingenieurs überlassen.
- Die Erodierbarkeitsfaktoren der verschiedenen Bodenarten können aus den Ergebnissen der Bodenschätzung und weiterführenden Gutachten des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg (1991) festgelegt werden.
- Für viele notwendige Parameter, vor allem für die Frage, welche Erosion denn noch tolerierbar ist, gibt es keine allgemein anerkannten Werte. Diese Parameter werden zwar nach bestem Wissen, aber bis zu einem gewissen Grade willkürlich festgelegt. Entsprechend unsicher sind auch Ergebnisse der Berechnungen.

Trotzdem ist die Erosionsgefährdungskarte ein wertvolles Hilfsmittel bei den Planungen in Flurneuordnungsgebieten. Der Aufgabe, auf Bereiche besonders großer und weniger großer Erosionsgefährdung hinzuweisen, wird sie gerecht.

6 Künftige Entwicklungen

Die Erosionsgefährdungskarten der Flurneuordnungsverwaltung Baden-Württemberg sind in der Praxis anwendbar. Trotzdem können sie in vielen Bereichen noch verbessert werden.

- Zur optimalen Festlegung aller Parameter der Wischmeier-Formel ist noch Forschungs-aufwand nötig. Der Aufwand kann nicht von der Flurneuordnungsverwaltung getrieben werden, hier sind Spezialisten anderer Fachgebiete aufgerufen.
- Die Nachteile der Wischmeier-Formel sind bekannt. Eine verbesserte Formel sollte jedoch ähnlich leicht handhabbar sein wie die Wischmeier-Formel. Auch hier ist die Wissenschaft aufgerufen.
- Die Erfolge erosionsvermindernder Maßnahmen im Rahmen der Flurneuordnung sind flächenhaft nicht genau quantifizierbar. Die Entwicklung objektiver Verfahren zur Quantifizierung der Wirkungen von Erosionsschutzmaßnahmen ist wünschenswert.

Ziel der künftigen Entwicklungen ist es, mit Hilfe der Erosionsgefährdungskarten noch mehr als bisher umweltfreundliche und landschaftsschonende Planungen zu ermöglichen.

Literatur

- /1/ AUERSWALD, K. & F. SCHMIDT (1986): Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen.- GLA-Fachberichte 1, München.
- /2/ GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1991): Untersuchungen und Verbesserungsvorschläge zur Ermittlung der K-Faktoren von Böden am Beispiel des Flurbereinigungsverfahrens Eppingen (B 293).- Freiburg.
- /3/ INPHO GmbH (1991): Gutachten zur Erstellung von Erosionsgefährdungskarten.- Erstellt im Auftrag des Landes Baden-Württemberg vertreten durch das Landesamt für Flurbereinigung Kornwestheim, unveröffentlicht.
- /4/ SCHWERTMANN, U., W. Vogl & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.- Stuttgart.

Erosionsgefährdungskarten des DGM-Systems SCOP

Manfred Sigle, Stuttgart

1 Einführung

SCOP ist ein modulares Programmsystem zur Erstellung und Anwendung digitaler Geländemodelle. Das Programm-System, das die INPHO-GmbH/Stuttgart und das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien seit Beginn der 70er Jahre gemeinsam entwickeln, wird seit ca. 10 Jahren bei der Flurbereinigungsverwaltung in Baden-Württemberg für verschiedene DGM-Anwendungen eingesetzt. Aufbauend auf den Untersuchungen von EHGARTNER et al. (1988) erweiterte die INPHO-GmbH im Auftrag des Landesamtes für Flurbereinigung/Baden-Württemberg das Programm-System SCOP derart, daß auf Basis eines Digitalen Geländemodelles und unter Verwendung der *Allgemeinen Bodenabtragsgleichung* (ABAG) automatisch Karten der Bodenerosionsgefährdung abgeleitet werden können, die der Flurbereinigung als Planungsgrundlage dienen. Das Verfahren zur Verknüpfung der Einflußfaktoren der Bodenerosion, das einen vollständigen Datenfluß garantiert, wurde am Beispiel des Flurbereinigungsverfahrens Sulzfeld/Kraichgau entwickelt.

2 Das Programm-System SCOP

Das modulare Programm-System SCOP erzeugt aus dreidimensionalen Geländedaten beliebiger Herkunft durch Interpolation (lineare Prädiktion) ein Digitales Geländemodell und speichert dieses effizient mit schnellen Zugriffsmöglichkeiten. Das DGM stellt den zentralen Datenbestand zur Ableitung zahlreicher Folgeprodukte dar. **Abb. 1** gibt einen schematischen Überblick über die Generierung Digitaler Geländemodelle mit SCOP, die Programmodule zur Anwendung digitaler Modelle und die Möglichkeiten der Datenausgabe. Das Programmmodul ISOLINES dient dazu, Höhenlinienkarten automatisch aus einem Geländemodell abzuleiten. PROFILE generiert Längs- und Querprofile, wie sie z.B. im Straßenbau benötigt werden. Digitale Neigungsmodelle, die auch für Bodenerosionsberechnungen benötigt werden, können mit SLOPE aus einem Geländemodell abgeleitet werden. Mit PERSPECT werden 3-D-Ansichten eines Geländemodells erzeugt. Mit INTERSECT, das Gegenstand der Weiterentwicklung im Rahmen des hier vorgestellten Gutachtens ist, werden Geländemodelle verschnitten und miteinander verknüpft. Rastergraphische Visualisierungen eines Geländemodells können über das Programm PIXEL erstellt werden. Ebenso ist die Ausgabe numerischer Ergebnisse, die sich aus Verschneidungsberechnungen ergeben, möglich. SCOP verfügt über Schnittstellen zu verschiedenen Plottern, Bildschirmen und Geo - Informationssystemen.

SCOP digitale Geländemodelle

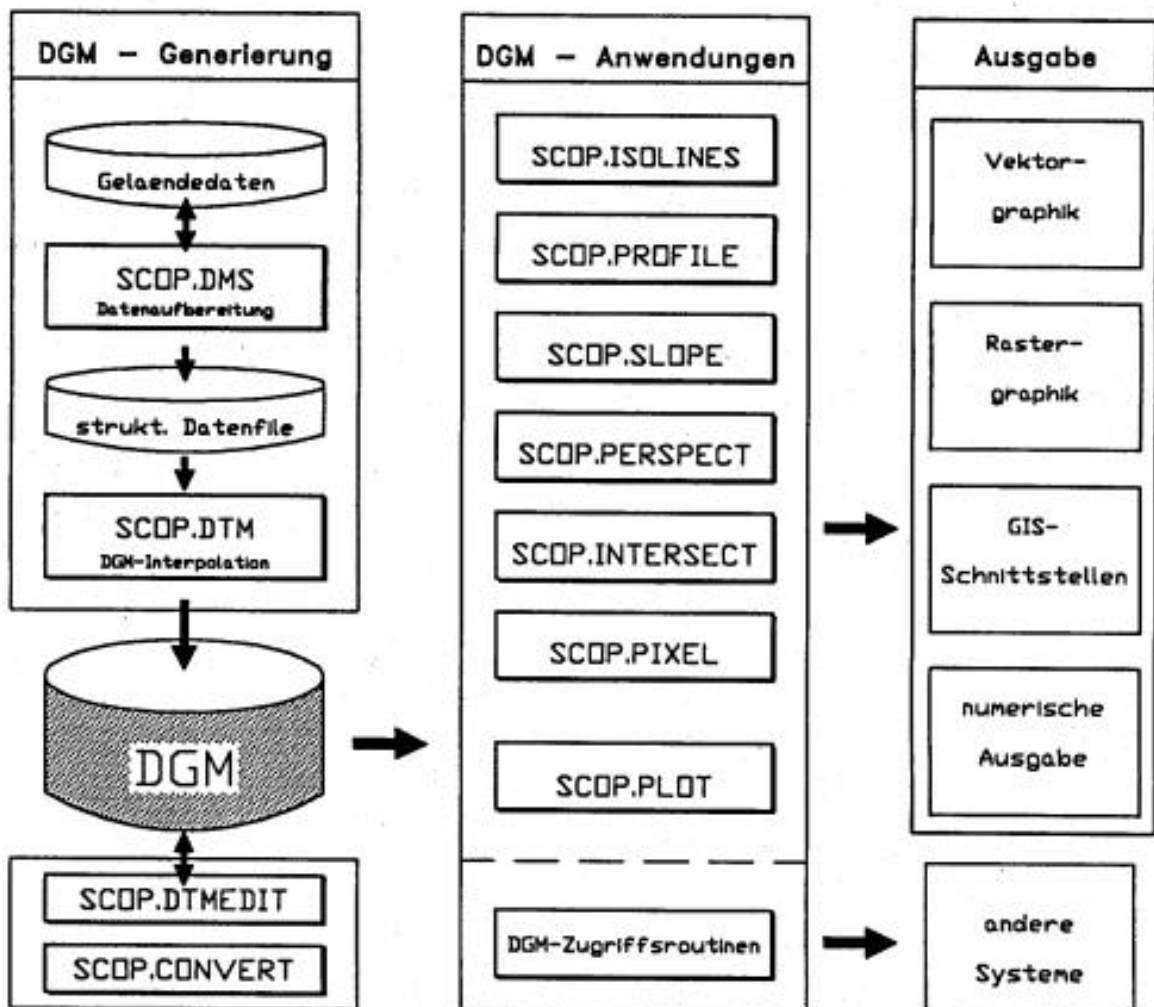


Abb. 1: Struktur des DGM-Systems

3 Eingabedaten für SCOP

SCOP verarbeitet Eingangsdaten beliebiger Herkunft. In der Praxis können die Möglichkeiten zur Gewinnung von Ausgangsdaten für die Erstellung Digitaler Geländemodelle oder anderer digitaler SCOP-Modelle prinzipiell drei verschiedenen Quellen zugeordnet werden, wobei jeder Methode ein spezifischer personeller und technischer Aufwand beizumessen ist und die verschiedenen Methoden zu unterschiedlicher Güte der Eingangsdaten führen können.

- (1) Bei stereo-photogrammetrischen Geländeerfassungen, wie beispielsweise im Landesamt für Flurbereinigung Kornwestheim, werden regelmäßige Gitter von Massenpunkten erzeugt. Bei der automatischen Luftbildauswertung werden häufig auch Linien, v.a. im Zusammenhang mit großmaßstäbigen Anwendungen, berücksichtigt. Hierbei handelt es sich z.B. um Geländekanten, Gerippelinien oder Randlinien zur Definition von Aussparungsflächen.
- (2) Im Fall terrestrischer Vermessungen liegen im allgemeinen unregelmäßig verteilte Punkte vor. Aber auch hierbei werden zumeist Linien, wie z.B. Böschungskanten erfaßt.
- (3) Eine dritte Möglichkeit der Datenerfassung besteht in der Digitalisierung von analog vorliegenden Daten, so z.B. der Digitalisierung von Höhenlinienkarten. In diesem Fall liegen entlang der Höhenlinien dichte Punktfolgen vor, dazwischen aber bestehen größere Informationslücken. Die amtlichen Höhenlinienkarten weisen in der Regel nur eine Genauigkeit im Meterbereich auf. Mit photogrammetrischen Messungen werden hingegen Höhengenaugkeiten im Dezimeterbereich erzielt. Daher bedeutet diese dritte Variante der Datengewinnung zumeist einen Qualitätsverlust der Ausgangsdaten für die Erzeugung der digitalen Höhenmodelle.

4 Erzeugung Digitaler Höhenmodelle mit SCOP

SCOP interpoliert aus den beliebig verteilten Punkten und Linien ein stark verdichtetes Höhengitter, dessen Maschenweite frei wählbar ist. Für jeden dieser Gitterpunkte wird eine Höhe im Geländemodell, ein z-Wert, gespeichert. Neben diesem Höhengitter werden aber auch alle gemessenen Linien, also Geländekanten, Gerippelinien oder Linien zur Begrenzung von Aussparungsflächen, streng in dieses Geländemodell integriert und damit in ihren Höhen abgespeichert (vgl. **Abb. 2**). Auf diese Weise können Böschungen und andere markante Geländeformen für spätere Auswertungen des Geländemodells berücksichtigt werden. Dies ist z.B. bei großmaßstäbigen Neigungs- und Bodenerosionsberechnungen von Bedeutung.

Die von SCOP berechneten Höhenmodelle können in Form von Höhenlinienkarten (vgl. **Abb. 2 b**), 3-D-Darstellungen oder geschummerten Rastergraphiken visualisiert werden. Ebenso ist die Extraktion und Darstellung von Geländeprofilen möglich.

5 Die Programmmodule SLOPE und INTERSECT

Im folgenden sollen zwei SCOP-Programmmodule vorgestellt werden, die für die Erosionsberechnungen von Bedeutung sind.

SLOPE dient zur Ableitung digitaler Neigungsmodelle aus den DGMs und der Darstellung der Ergebnisse in Gefällsstufenkarten. Für jeden einzelnen Gitter- und Linienpunkt des Höhenmodells wird der Betrag der Neigung in Prozent berechnet. Unstetigkeiten der Neigung an Geländekanten werden dabei berücksichtigt. Die Ergebnisse werden in einem digitalen Neigungsmodell gespeichert, das die gleiche Datenstruktur hat wie das Geländemodell. Daher können die Neigungsmodelle wie die Geländemodelle ausgewertet werden. Vergleichbar den Höhenlinien, die aus Geländemodellen gewonnen werden, können Neigungsklassen, also Gefällstufen aus einem Neigungsmodell abgeleitet werden (vgl. **Abb. 2c**). Das Neigungsmodell ist für den Hangneigungsfaktor (S-Faktor) bei der Abschätzung langjähriger mittlerer Bodenerosionsraten mithilfe der ABAG von Bedeutung.

Das zweite für die Erstellung von Bodenerosionskarten bedeutsame Programmmodul ist INTERSECT. Dieses dient der Verknüpfung digitaler Modelle, die in der SCOP-Datenstruktur vorliegen, mittels mathematischer Funktionen. In seiner ursprünglichen Version wurde das Modul dazu verwendet, durch Differenzbildung zwischen zwei Geländemodellen ein Höhendifferenzenmodell abzuleiten. Dabei berücksichtigt INTERSECT alle im Geländemodell abgespeicherten Geländekanten oder andere Linie. Die Verknüpfungsroutine verarbeitet auch zwei Modelle, die unterschiedliche Rasterweiten aufweisen. Die jüngsten Software-Entwicklungen erlauben heute quasi beliebige Durchführungen von Verknüpfungsfunktionen zwischen den Datensätzen digitaler SCOP-Modelle. Verknüpfungen der z-Werte über die Grundrechenarten sind ebenso möglich wie Verknüpfungen über beliebige diskretisierte Funktionen der z-Werte.

6 Bodenerosionsberechnungen mit SCOP.INTERSECT

Als eine solche mit SCOP frei wählbare Verknüpfungsfunktion kann die von WISCHMEIER et al. (1978) entwickelte *Allgemeine Bodenabtragsgleichung* (ABAG) verwendet werden. Die ABAG berechnet den langjährigen mittleren Bodenabtrag A in t/ha · a:

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

Es bedeuten:

- R: Regen - und Oberflächenabflußfaktor
- K: Bodenerodierbarkeitsfaktor
- L: Hanglängenfaktor
- S: Hangneigungsfaktor
- C: Bewirtschaftungsfaktor
- P: Erosionsschutzfaktor

Berechnungen zur Erosionsgefährdung werden von INTERSECT auf vergleichbare Weise wie die oben erwähnten Berechnungen der Höhendifferenzen vorgenommen. Als erstes Modell geht in die Verknüpfung ein digitales Neigungsmodell ein, aus dem rechnerisch für jeden vorliegenden Punkt der S-Faktor bestimmt wird. Als zweites Modell wird beispielsweise ein digitales Modell der K-Faktoren verwendet. Beide Modelle, das Neigungsmodell und das K-Faktorenmodell werden mithilfe der ABAG zu einem Erosionsgefährdungsmodell verknüpft, wobei auch die anderen Subfaktoren der ABAG Berücksichtigung finden.

Die Flurbereinigung ist daran interessiert zu erfahren, wie ein Gelände hinsichtlich der Flurstückbemessung und Wegeführung geplant werden kann, ohne daß bei gegebenen Bewirtschaftungsverhältnissen und natürlichen Voraussetzungen eine bestimmte, maximal tolerierbare Erosionsmenge (T) überschritten wird. Aus diesem Grund wurde für unsere Untersuchungen die Bodenabtragsgleichung nach dem Hanglängenfaktor aufgelöst:

$$L = T / R \times K \times S \times C \times P$$

Wegen der geringen flächenmäßigen Ausdehnung des ca. 5 km · 5 km großen Flurbereinigungsgebietes Sulzfeld/Kraichgau wurden die Faktoren T (=10), R (=60), C (=0,3) und P (=1) als konstant angenommen. Prinzipiell kann mit INTERSECT jedoch eine beliebige Anzahl von Variablen verwendet werden, wenn diese in digitaler Form in der SCOP-Datenstruktur vorliegen.

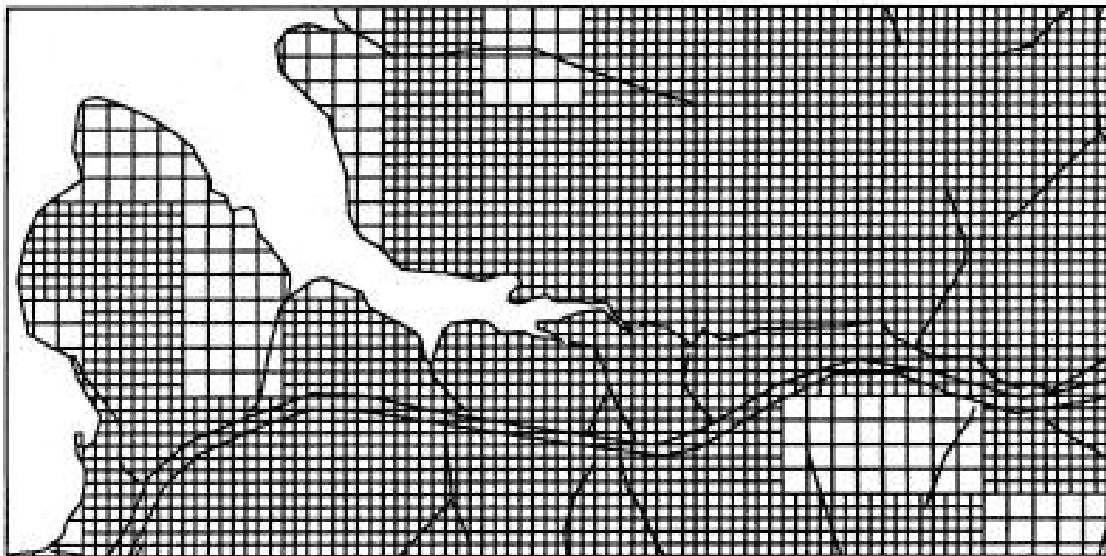


Abb. 2 a: DGM-Datenstruktur

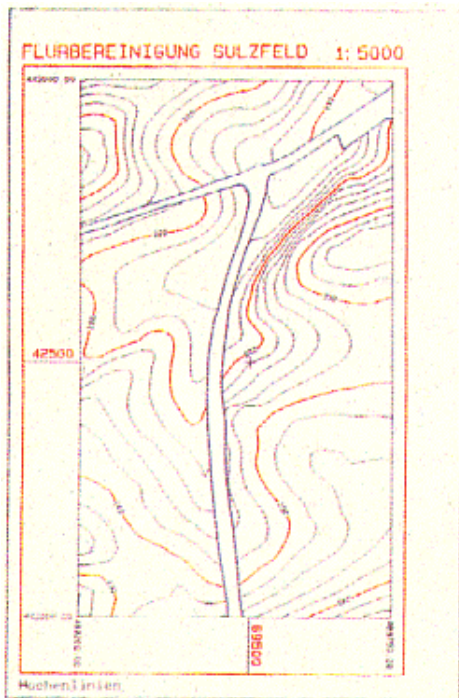


Abb. 2 b: Höhenlinien

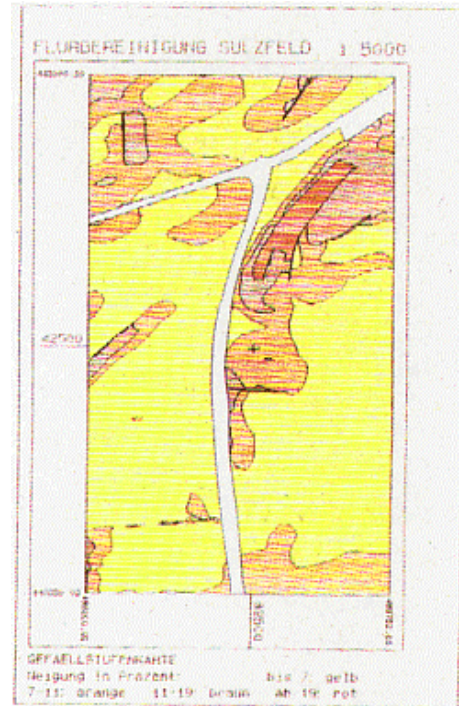


Abb. 2 c: Gefällstufenkarte

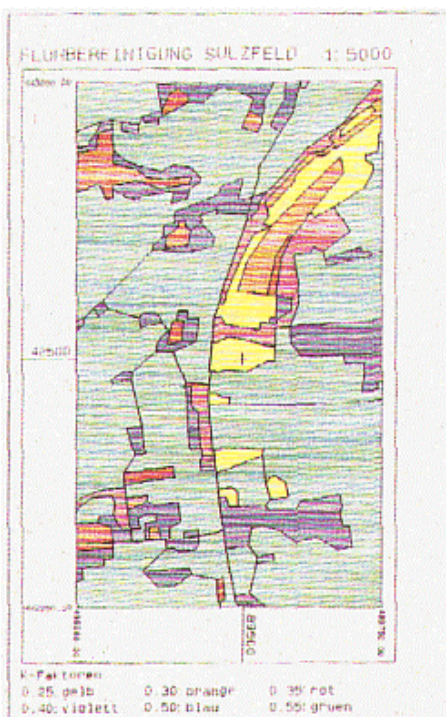


Abb. 2 d: K-Faktoren

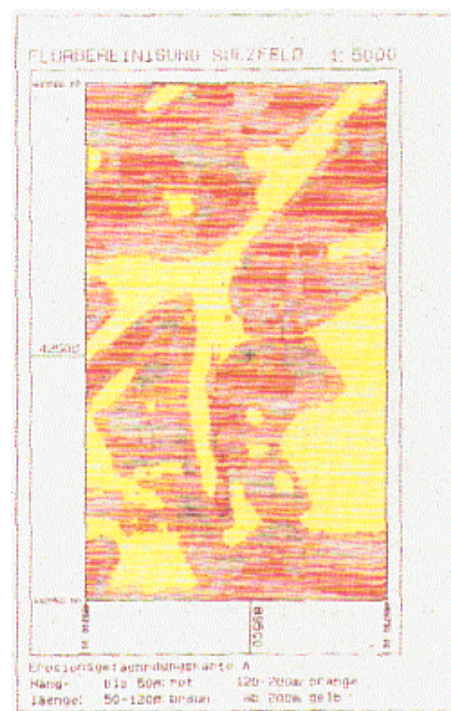


Abb. 2 e: Erosionsgefährdungskarte

Abb. 2 b bis e: Graphische Ergebnisse der Erosionsgefährdungsberechnung für einen Ausschnitt des Flurbereinigungsgebietes Sulzfeld

7 Arbeitsablauf zur Erstellung einer Erosionsgefährdungskarte

Der Arbeitsablauf von der Datenerfassung bis zur Ausgabe der Erosionsgefährdungskarte gliedert sich in drei Einheiten.

(1) In einem ersten Arbeitsschritt müssen die Geländedaten erfaßt werden. Bei einer großmaßstäbigen Bearbeitung 1 : 5.000, wie im Fall Sulzfeld, wird ein Geländemodell benötigt, das eine Höhengenaugigkeit im Dezimeterbereich aufweist. Nur so können genaue Modelle über die Geländeneigung und die Bodenerosion abgeleitet werden. Dies bedeutet, daß von einer sehr genauen Datenerfassung ausgegangen werden muß. Aus den gemessenen Gitter- und Linienpunkten wird mit SCOP das Geländemodell interpoliert. Anschließend wird aus dem Geländemodell ein Digitales Neigungsmodell rechnerisch abgeleitet, das in der derselben Datenstruktur wie das SCOP-Geländemodell abgelegt wird.

(2) Der zweite Schritt der Vorbereitung besteht in der Kartierung der K-Faktoren-Flächen. In dem vorliegenden Fall wurde aus der Reichsbodenschätzung von Seiten der Flurbereinigungsverwaltung zunächst eine Karte der K-Faktoren nach den Vorgaben von Auerswald & Schmidt (1986) erstellt. Die Flächen einheitlicher K-Faktoren wurden ebenfalls durch die Flurbereinigungsverwaltung digitalisiert. Die abgelegten Polygonflächen werden von SCOP in ein Gittermodell, d.h. ein SCOP-Modell der K-Faktoren überführt. Dies geschieht dadurch, daß die Polygonflächen mit regelmäßigen Gitterlinien überlagert werden, wobei jedem Gitterpunkt der z-Wert der jeweiligen Polygonfläche zugeordnet wird (vgl. Abb. 2 d). Sollen neben dem S- und K-Faktor auch andere Faktoren, wie z.B. C oder P, als Variable in das Modell zur Erosionsberechnung übernommen werden, so müßten auch diese, vergleichbar dem K-Faktor, digital erfaßt werden. Die erhaltenen Polygonflächen müßten ebenfalls mit SCOP in ein entsprechendes digitales Modell in der Datenstruktur des Digitalen Geländemodells überführt werden.

(3) In einer dritten Arbeitsstufe wird eine beliebige Verknüpfungsfunktion festgelegt. In unserem Fall handelt es sich um die Einflußfaktoren auf die Bodenerosion, die durch die ABAG ausgedrückt werden. Durch die Anwendung dieser Verknüpfung entsteht ein digitales Modell der maximal zulässigen Hanglängen, für die der maximal zulässige Bodenabtrag nicht überschritten wird. Dieses Hanglängenmodell wird in Form von Erosionsgefährdungskarten dargestellt, die Hanglängenklassen beinhalten (vgl. Abb. 2 e).

8 Arbeits - und Rechenaufwand für das Flurbereinigungsgebiet Sulzfeld

Für das gesamte Untersuchungsgebiet Sulzfeld mit einer Ausdehnung von 5 km · 5 km wurden insgesamt 25.717 Massenpunkte und 18.461 Linienpunkte photogrammetrisch erfaßt. Der zeitliche Arbeitsaufwand der Flurbereinigungsverwaltung zur Auswertung der Luftbilder betrug für eine Person 5-6 Wochen. Die Datenmengen für die Geländeerfassung umfassen ca. 2,9 Mega-Byte. Für die K-Faktoren wurden insgesamt 869 Flächen mit 16.485 Polygonpunkten digitalisiert. Dies entspricht ca. 2,3 Mega-Byte. Der Aufwand für die K-Faktoren-Kartierung und für die Digitalisierung betrug zusammen ca. 2 Wochen. Der Aufwand zur Erhebung solch genauer Daten, die sich für eine Weiterverarbeitung im Maßstab 1 : 5.000 eignen, ist damit als ganz erheblich einzustufen.

Die Datenmengen, die während der Modellierung verarbeitet wurden, haben für heutige Rechner einen relativ kleinen Umfang. Jedes der einzelnen Modelle benötigt wenige Mega-Byte. Für ein ganzes Projekt vom Umfang Sulzfeld werden einschließlich der Erosionsgefährdungskarten nicht mehr als 40 Mega-Byte benötigt, die heute auf jedem PC verfügbar sind. Die Berechnungen für das Projekt Sulzfeld wurden auf einem MS-DOS-PC 386 mit 33 MHz Taktfrequenz durchgeführt. Folgende Rechenzeiten wurden für das Projekt benötigt:

- Die Interpolation des Geländemodells aus etwas mehr als 40.000 Punkten dauerte 64 min.
- Für die Ableitung des Neigungsmodells wurden 18 min benötigt.
- Das K-Faktoren-Modell wurde in 9 min aus den digitalisierten K-Faktoren-Flächen berechnet.
- 58 min hat es gedauert, bis das Hanglängenmodell aus der Verknüpfung des Neigungsmodells und des K-Faktoren-Modells gewonnen war.
- Die Berechnung einer Erosionsgefährdungskarte benötigt 3 min.

9 Graphische Ausgabe der Erosionsgefährdungsrechnungen mit SCOP

In **Abb. 2** sind die graphischen Ergebnisse der Erosionsgefährdungsberechnung für einen Ausschnitt des Flurbereinigungsgebietes zusammengestellt.

Die große Ähnlichkeit der Ergebniskarte mit der Gefällstufenkarte, die sich in der Übereinstimmung hoher Neigungen mit geringen, tolerierbaren Hanglängen äußert, verdeutlicht den auch von AUERSWALD (1987) herausgestellten Sachverhalt, daß der Hangneigungsfaktor den stärksten Einfluß auf das Erosionsgeschehen ausübt.

10 Abschätzungen zur Genauigkeit der Ergebnisse

Nach den Erfahrungswerten aus der Flurbereinigung können die Hangneigungen der auf die oben beschriebene Weise photogrammetisch gewonnenen, qualitativ guten Geländemodelle auf 1 - 1,5 % genau bestimmt werden. Legt man für die Genauigkeit der K-Faktoren einen Wert von 0,05 zugrunde, berechnen sich die Fehler der zulässigen Hanglänge wie in **Tab. 1** dargestellt. Daraus erkennt man, daß eine hohe Qualität der Ausgangsdaten unbedingte Voraussetzung für eine befriedigende Qualität der modellierten Ergebnisse ist. Gerade auf Änderungen der Hangneigungen reagiert die aus der ABAG abgeleitete Verknüpfungsroutine überaus sensibel.

In diesem Zusammenhang ist auch auf die Problematik der hier vorgestellten Verknüpfungsroutine durch SCOP zur Bodenerosionsberechnung hinzuweisen. Das von Wi-

SCHMEIER et al. (1978) entwickelte Verfahren beruht auf der Multiplikation von Subfaktoren, deren Werteausprägungen sich auf ganze Hangbereiche beziehen, die als Einzugsgebiet von Wasser und abgetragenem Bodenmaterial für einen zu betrachtenden Punkt fungieren.

Tab. 1: Fehlerabschätzung zur Berechnung der maximal tolerierbaren Hanglänge mit dem Programm-System SCOP

geschätzte Genauigkeit der Ausgangsdaten	Hanglängenfehler für Hanglänge		
	50 m	120 m	200 m
Neigungsgenauigkeit 1 %	15 m	23 m	32 m
K-Faktoren-Genauigkeit 0,05	11 m	16 m	22 m

Die Werteausprägungen der einzelnen Subfaktoren an einem bestimmten Punkt im Gelände sind damit nicht nur eine Funktion der an einem Punkt selbst vorliegenden Werte sondern auch aller bis zur Wasserscheide hangauf gelegenen Punkte bzw. homogenen Teilflächen. Für Hänge die hinsichtlich ihrer Neigung und anderer für die Ermittlung der Subfaktoren wichtiger Eingangsparameter inhomogen sind, haben WISCHMEIER et al. (1978) eine entsprechende Wichtungsroutine zur Ermittlung der Bodenabtragsraten mittels der ABAG erarbeitet. Entsprechende Rechenroutinen zur Einbeziehung dieser räumlichen Bezüge können von SCOP bisher nicht berücksichtigt werden. Die Werte der Ergebniskarte über maximal zulässige Hanglängen (**Abb. 2e**) dürfen von dem planenden Flurbereinigungsingenieur nur dann als Planungsgrundlage übernommen werden, wenn alle Subfaktoren, insbesondere der S-Faktor, oberhalb eines zu betrachtenden Rasters dieselben Werte haben wie das Raster selbst und damit quasi als Konstante in das Erosionsmodell eingehen. Diese Voraussetzung wird jedoch in Flurbereinigungsverfahren meist erfüllt, da die Flurstücksblöcke so angelegt werden, daß innerhalb der einzelnen erosionswirksamen Hanglängen homogene Geländebeziehungen auftreten.

11 Ausblick

Die wichtigsten Ergebnisse der Projektbearbeitung Sulzfeld lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der eigentliche Arbeitsaufwand besteht bei der Erhebung genauer, qualitativ hochwertiger Eingangsdaten für die Modellierung.

Es hat sich gezeigt, daß mit SCOP ein lückenloser Datenfluß gewährleistet werden kann. Wenn die Ausgangsdaten der Modellierung erfaßt sind, kann eine kontinuierliche Berechnung bis zur Ausgabe der Erosionsgefährdungskarte erfolgen.

Obwohl der Verknüpfung der digitalen Modelle recht strenge Rechenverfahren zugrunde liegen und bei den Geländemodellen nicht nur reine Raster-Modelle verarbeitet werden sondern auch alle erfaßten Linien - wie Geländekanten und die Grenzen der K-Faktoren-Flächen - gespeichert und berücksichtigt werden, bewegen sich die Rechenzeiten und Datenmengen in vertretbarem Rahmen. Die Berechnungen können auf MS-DOS-PCs durchgeführt werden.

Seit dem Abschluß des Pilotprojektes Sulzfeld werden vom Landesamt für Flurbereinigung mit dem Programm-System SCOP routinemäßig Erosionsgefährdungskarten im Zuge von Flurbereinigungsverfahren durchgeführt. Zusätzlich zu der hier vorgestellten Verfahrensweise wird auch der zulässige jährliche Bodenabtrag T als variabel angesetzt und vergleichbar dem K-Faktor in Form von Polygonflächen digitalisiert.

Für eine auch bei inhomogenen Geländebeziehungen dem Verfahren von WISCHMEIER et al. (1978) entsprechende Berechnung von langjährigen mittleren Bodenabtragsraten mittels der ABAG müßte das Programm-System insofern weiterentwickelt werden, als daß die von der ABAG geforderten räumlichen Bezüge des Bodenabtragsgeschehens berücksichtigt und rechnerisch ausgeführt werden können.

Literatur

- /1/ ACKERMANN, F. (1991): *High-Quality Digital Terrain Models - The SCOP Programm and Derived Products.*- Proceedings of the Workshop on Relationship of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Hannover, 16.-18. September 1991.
- /2/ AUERSWALD, K. (1987): *Sensitivität erosionsbestimmender Faktoren.*-Wasser und Boden 1: S. 34-38.
- /3/ EHGARTNER, M., R. KALLIANY & A. STECHAUNER (1988): *Bodenerosionsgefährdungskarten als Planungsgrundlage in der Flurbereinigung.*- Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 1: S. 3-7.
- /4/ KÖSTLI, A. & M. SIGLE (1986): *Die SCOP-Datenstruktur zur Verschneidung und Korrektur von Geländemodellen.*- Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3.
- /5/ KRAUS, K., E. ABMUS, A. KÖSTLI, L. MOLNAR & E. WILD (1982): *Anforderungen an das digitale Höhenmodell aus der Sicht des Anwenders.*- AVN 89.
- /6/ NEUFANG, K., K. AUERSWALD & W. FLACKE (1989): *Räumlich differenzierende Berechnung großmaßstäblicher Erosionsprognosekarten - Anwendung der dABAG in der Flurbereinigung und Landwirtschaftsberatung.*- Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung: S. 233-241.
- /7/ WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (1978): *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planing.*- USDA Agric. Handbook No. 37.

Anwendung des Modells EROSION-2D im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben

Jürgen Schmidt, Freiberg

1 Einführung

Der Bodenabtrag durch Erosion wird im Bereich der Planungspraxis häufig nach der von WISCHMEIER & SMITH (1978) in den USA entwickelten Universal Soil Loss Equation (USLE) rechnerisch ermittelt. Es handelt sich hierbei um eine rein empirische Gleichung, die über korrelativ ermittelte Faktoren den mittleren jährlichen Bodenabtrag in Abhängigkeit von verschiedenen bodenkundlich-topographischen Gegebenheiten, Klimabedingungen und menschlichen Eingriffen beschreibt. Wenngleich die USLE ihrer relativ einfachen Handhabung wegen nahezu weltweit zur Anwendung kommt, so ist das Verfahren doch mit gravierenden Nachteilen und Einschränkungen verbunden. Als wesentliche Kritikpunkte sind hervorzuheben:

- Als rein empirisches Modell ist die USLE nur eingeschränkt übertragbar. In jedem Fall müssen die in die Gleichung eingehenden Faktoren zunächst an die regionalen Klima- und Bodenbedingungen angepaßt werden (vgl. Schwertmann et al., 1990).
- Die USLE liefert eine Vorhersage über den Bodenabtrag bezogen auf die sog. erosive Hanglänge, d.h. den Ausschnitt eines Hanges, ab dem der Abfluß beginnt bis zu jenem Punkt, an dem Sedimentation einsetzt. Die Deposition des abgetragenen Bodenmaterials beschreibt die Gleichung jedoch nicht. Zur Beurteilung von Off-Site-Schäden (z.B. der Eintrag partikelgebundener Agrochemikalien in das Gewässernetz) ist daher die USLE kaum geeignet.
- Die USLE eignet sich nicht zur Abschätzung des Abtrages individueller Erosionsereignisse. Für die Abschätzung von Risiken und für die Bemessung von Schutzmaßnahmen sind jedoch vor allem die Extremsituationen von Interesse. Die mittleren Verhältnisse, wie sie durch die USLE beschrieben werden, sind für Fragen und Entscheidungen der Planungspraxis im allgemeinen weniger relevant.

Um diese Beschränkungen des empirischen Modells zu überwinden, wurde mit finanzieller Förderung des Bundesministers für Forschung und Technologie das Simulationsmodell EROSION-2D entwickelt. Das Modell basiert auf einer physikalisch begründeten Beschreibung der für die Erosion maßgeblichen Ablösungs- und Transportprozesse und erlaubt bezogen auf Einzelereignisse sowohl die Berechnung des Bodenabtrages wie auch der Deposition einschließlich des Eintrages in Oberflächengewässer. Eine ausführliche Darstellung des Modellansatzes gibt SCHMIDT (1991b u. 1992b).

Ziel dieses Beitrages ist es, exemplarisch einige Anwendungsmöglichkeiten des EROSION-2D Modells im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben (z.B. in Zusammenhang mit der Flurbereinigung) darzustellen. Die hierfür herangezogenen Modellrech-

nungen basieren im wesentlichen auf Daten, die mit Unterstützung des Landesamtes für Flurbereinigung, Baden-Württemberg, im Rahmen einer Diplomarbeit (v. WERNER, 1991) für verschiedene Beispielflächen des Flurbereinigungsgebietes Zaisenhausen/Kraichgau erhoben wurden.

2 Ein - /Ausgabegrößen des EROSION - 2D Modells

Die in EROSION-2D verwendeten Eingabegrößen lassen sich in 3 größere Gruppen einteilen: Reliefparameter, Bodenparameter und Niederschlagsparameter. Diese Gruppen umfassen folgende, in **Tab. 1** zusammengestellte Einzelgrößen:

Tab. 1: Eingabegrößen

Reliefparameter	Bodenparameter	Niederschlagsparameter
Hanglänge Hanggeometrie (x - ,y – Koordinaten)	Körnung Infiltrationsrate Erosionswiderstand Rauigkeitsbeiwert Bedeckungsgrad	Niederschlagsdauer Niederschlagsintensität

Darüberhinaus berücksichtigt das Programm eine Anzahl weiterer Parameter, die jedoch als feste Größen nicht durch den Anwender beeinflusst werden können. Hierzu zählen u.a. die Flüssigkeits- und Partikeldichte, die Viskosität sowie die Erdbeschleunigung. Festgelegt sind ferner die Länge und Breite (Δx und Δy) der programmintern zugrundegelegten Hangsegmente und die Dauer (T) der für die Berechnung herangezogenen Niederschlagsintervalle.

Hierfür gelten:

$$\mathbf{Dx = 1m, Dy = 1m, T = 10min.}$$

Eine Übersicht über die durch das Programm gelieferten Ausgabegrößen gibt **Tab. 2**:

Tab. 2: Ausgabegrößen

flächenbezogene Größen	punktbezogene Größen
Feststoffaustrag Feststoffeintrag	Abfluß Sedimentmenge Sedimentkonzentration Anteil Ton Anteil Schluff

Die flächenbezogenen Ausgabegrößen beziehen sich jeweils auf die intern festgelegten Hangsegmente ($\Delta x = 1\text{ m}$, $\Delta y = 1\text{ m}$) bzw. auf Vielfache davon ($\Delta x = 1, 2, 3, \dots\text{ m}$, $\Delta y = 1\text{ m}$). Die punktbezogenen Größen beziehen sich dagegen auf eine bestimmte, durch den Anwender frei wählbare Hangposition (z.B. die Sedimentkonzentration an der Stelle $x = 156\text{ m}$).

Die zeitliche Bezugsbasis aller Ausgabegrößen bildet das intern festgelegte Zeitintervall ($T = 10\text{ min}$) oder entsprechende Vielfache davon ($T = 20, 30, 40, \dots\text{ min}$).

3 Untersuchungsgebiet

Als Testgebiet für die Anwendung des EROSION-2D Modells wurde ein Teilbereich des Flurbereinigungsgebietes Zaisenhausen gewählt. Zaisenhausen liegt im Zentrum des Kraichgaus (**Abb. 1**) - einer überwiegend mit Löß bedeckten Hügellandschaft, die vorwiegend landwirtschaftlich (Getreide und Hackfrüchte) genutzt wird. Zeugnisse einer intensiven Erosion der Böden sind bedingt durch die über Jahrhunderte währende ackerbauliche Nutzung und die besonders erosionsanfälligen Lößböden allenthalben sichtbar (Hangstufen, Hohlwege etc.).



Abb. 1: Lage des Testgebietes

Der größte Teil des Testgebietes weist Hangneigungen von 3 - 8° und Hanglängen bis etwa 300m auf. Kleinräumig treten auch größere Neigungen (>22°) auf, z.B. am Südhang des Hedrichsberges (**Abb. 2**).

Kennzeichnend für die Böden des Testgebietes ist der hohe Schluff-Anteil (85-90%). Die Böden werden überwiegend (mit Ausnahme der Wirtschaftswege) ackerbaulich genutzt (Getreide und Hackfrüchte). Die Bearbeitung folgt in der Regel dem Gefälle. Besondere Maßnahmen, die dem Erosionsschutz dienen, existieren bisher nicht.

Die für Erosion relevanten Starkregenereignisse häufen sich in den Sommermonaten (Hitzegewitter). Nach Angaben von QUIST (1986) beträgt der Anteil der Starkregen an der Niederschlagsmenge in den Monaten Mai und Juni zwischen 60 und 80%. Diese Angaben beziehen sich auf den Kraichgau insgesamt - für das Testgebiet selbst stehen Klimadaten nicht zur Verfügung! Die dem Gebiet räumlich am nächsten gelegene Klimastation ist Bretten - Entfernung ca. 10km.

Die Basisdaten für die Anwendung des Modells wurden repräsentativ an 6 über das Testgebiet verteilten Meßstellen erhoben (s. **Abb. 2**). Einen Überblick über die an den Meßstellen experimentell bestimmten Größen liefert **Tab. 3**. Die bei der Bestimmung der Modellparameter herangezogenen Methoden hat SCHMIDT (1992) ausführlich dargestellt. Auf eine Erläuterung dieser Methoden wird daher hier verzichtet.

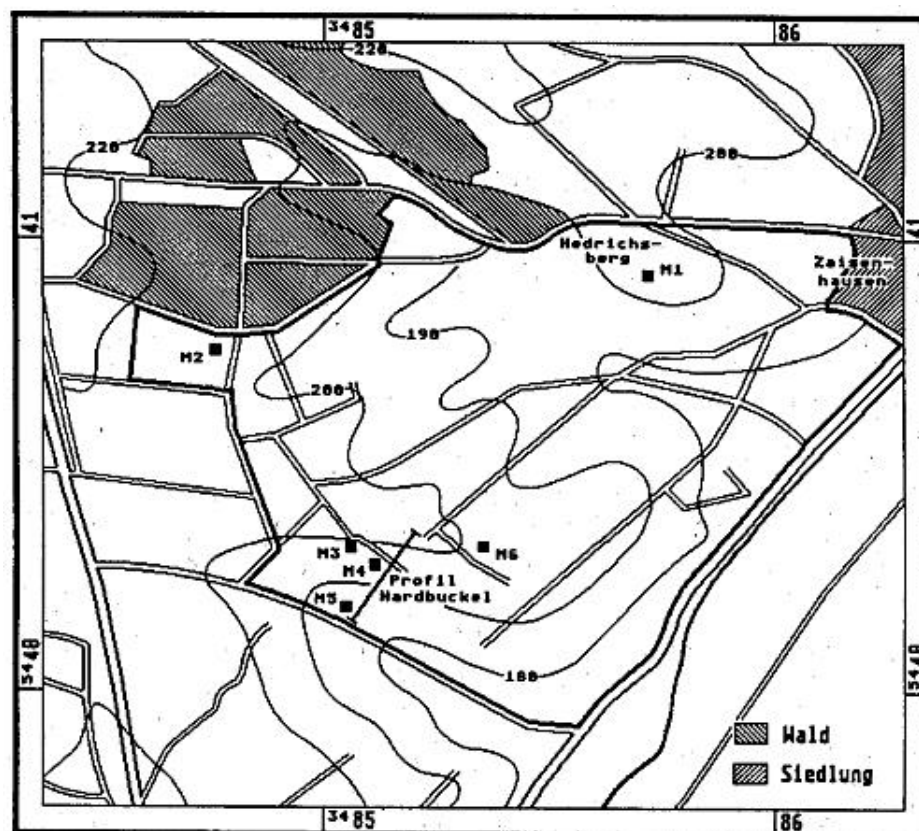


Abb. 2: Untersuchungsgebiet Zaisenhausen, Lage der Meßstellen (Kartengrundlage Topographische Karte 1:25.000 Blatt 6818 Odenheim und Blatt 6918 Bretten)

Tab. 3: Parameterbestimmung Testgebiet Zaisenhausen

vorhandene Daten	experimentell bestimmte Größen	abgeleitete Größen
Niederschlagsdauer u. – intensität (Dtsch. Wetterdienst)	Körnung	
	Aggregatgrößenverteilung	Rauhigkeit (<i>Garbrecht</i>)
	Wassergehalt	Infiltrationsrate
	Wasserspannung	
	Infiltrationsrate/hydr. Leitfähigkeit	
	Scherwiderstand	Erosionswiderstand
	Nutzung/ Bedeckungsgrad	Rauhigkeit (<i>Bork/Raspini</i>)

4 Ergebnisse und Interpretation der Modellrechnungen

4.1 Abschätzung der Erosion für ein extremes Einzelereignis

Für eine differenzierte Bewertung des Erosionsrisikos reichen Prognosen über den mittleren jährlichen Abtrag (WISCHMEIER-Gleichung) selten aus. Vor allem bei der Planung und Bemessung von Schutzmaßnahmen sind Abschätzungen bezogen auf kurzzeitige Extremsituationen unerlässlich.

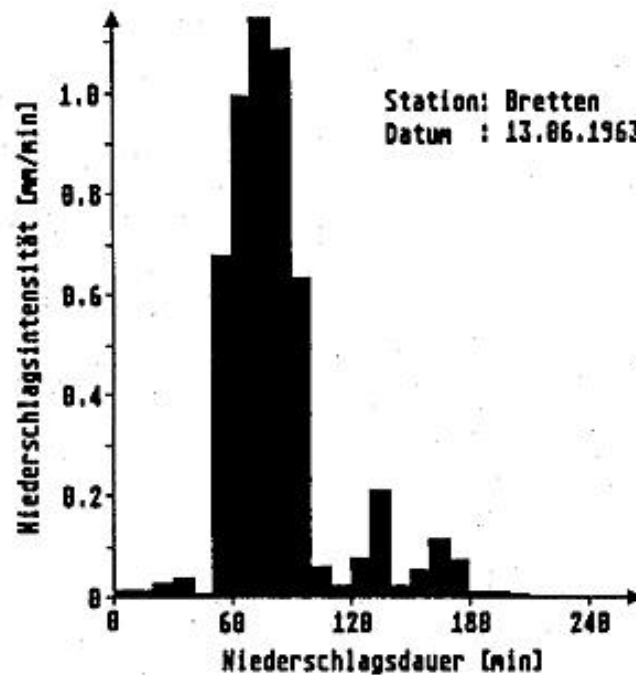


Abb. 3: Extremereignis Bretten 13.06.1963 (Niederschlagsintensität bezogen auf Intervalle von 10min)

Im folgenden soll zunächst eine solche Extremsituation am Beispiel des Profils Hardbuckel betrachtet werden. Als Grundlage dient hierbei das Starkregenereignis Bretten/13.06.1963 (s. **Abb. 3**). Auf dieser Basis werden in den Modellrechnungen folgende Varianten der Hanggliederung, der Nutzung und des aktuellen Feuchtezustandes gegenübergestellt:

Varianten der Hanggliederung:

- A:** ungegliedert
- B:** gegliedert durch hangparallelen Grasweg
- C:** gegliedert durch hangparallelen Wirtschaftsweg mit Grünstreifen oberhalb und Graben unterhalb des Weges
- D:** gegliedert durch hangparallele Terrassen

Varianten der Nutzung:

- BRA:** Brache/Saatbeet
- RUB:** Rüben im Reifezustand
- WW:** Winterweizen (abgeerntet)

Varianten der aktuellen Bodenfeuchte:

- I:** feucht
- II:** trocken

Variante A: Hang ungegliedert

Die Simulation der Variante A (Nutzung: Rüben; Boden: feucht) ergab das in **Abb. 4** dargestellte Ergebnis. Der obere Teil der Abbildung zeigt das Geländeprofil, der untere den Feststoffaustrag in kg/m² bzw. die Deposition.

Das Profil Hardbuckel ist 275m lang - im oberen Bereich konvex und im unteren Bereich konkav gewölbt. Die maximale Hangneigung beträgt 11% bzw 6.3 °.

Der Austrag (je Flächeneinheit) nimmt zunächst mit der Hanglänge (und -neigung) zu. Das Maximum des Austrages wird bei etwa 100m erreicht. Ab etwa 170m nimmt der Austrag dann wieder ab.

Kleinere, das generelle Hangprofil überlagernde Wölbungen bilden sich deutlich im Verlauf der Austragskurve ab. Besonders gut sichtbar ist dies im unteren Hangbereich - etwa bei 200m Hanglänge. Der Austrag zeigt an dieser Stelle ein deutliches Minimum.

Am Hangfuß wird ein - allerdings sehr geringer - Teil des erodierten Bodens wieder abgelagert.

Variante B: Hang gegliedert durch hangparallelen Grasweg

Der in **Abb. 4** dargestellte Fall des ungegliederten, d.h. vollständig als Acker genutzten Hanges entspricht nicht der aktuellen, heute vorhandenen Situation. Gegenwärtig teilt ein Grasweg den Hang in einen oberen, flacheren Hangabschnitt und in einen unteren, steileren Abschnitt. Die damit verbundenen Effekte zeigt **Abb. 5**.

Der Weg verzögert aufgrund der geschlossenen Grasbedeckung den oberflächlichen Abfluß. Aus diesem Grunde wird in diesem Bereich nicht erodiert sondern - wenn auch in sehr geringem Maße - akkumuliert.

Unterhalb des Weges setzt allerdings die Erosion mit umso größerer Intensität wieder ein. Dies hängt vor allem mit der geringeren Sedimentbelastung des Abflusses zusammen, die sich als Folge der Sedimentation im Bereich des Weges einstellt. Darüberhinaus ist die Oberfläche des Weges infolge des Befahrens stark verdichtet, sodaß dort nur wenig Wasser infiltriert. Dadurch nimmt der Abfluß in diesem Bereich stark zu und der Sedimentstrom wird weiter verdünnt. Unterhalb des Weges kann daher zunächst sehr viel Sediment aufgenommen werden, bis sich erneut ein "Quasi-Gleichgewicht" einstellt. Es wird dann in jedem Hangsegment nur noch soviel Sediment erodiert und zusätzlich aufgenommen, wie unter Aufrechterhaltung des Gleichgewichts (Transportkapazität) zum Ausgleich der niederschlagsbedingten Verdünnung notwendig ist.

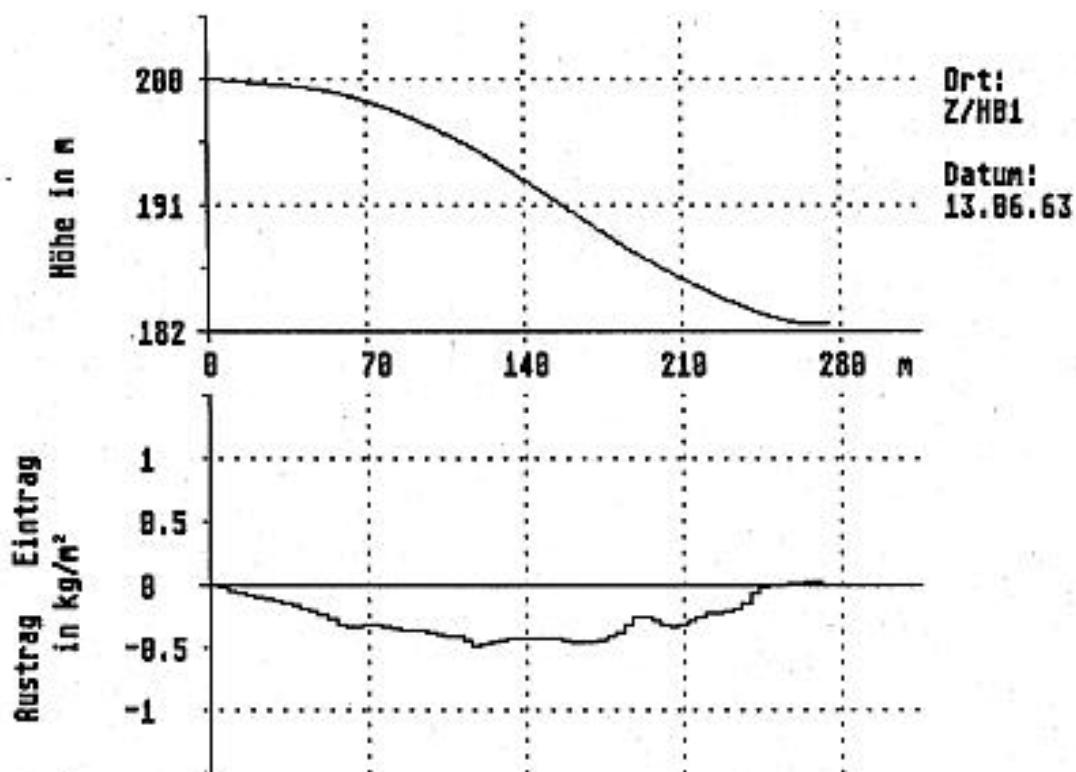


Abb. 4: Simulation der Variante A: Hang: ungegliedert, Nutzung: Rüben, Boden: feucht

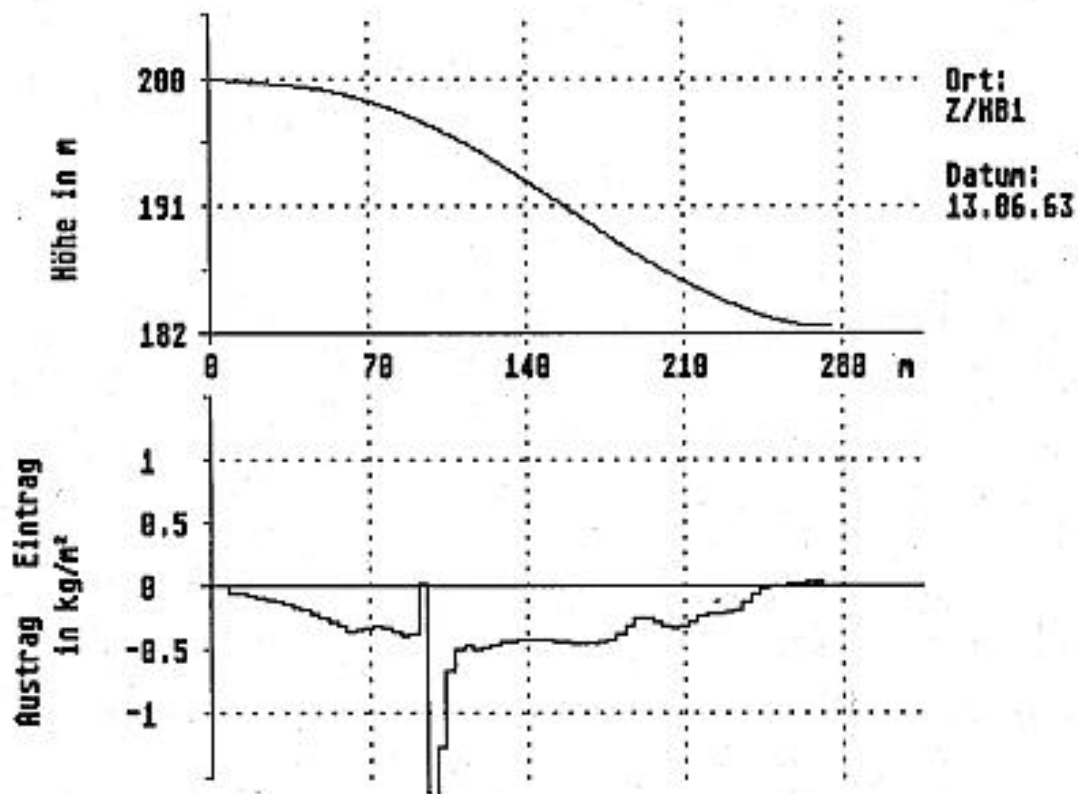


Abb. 5: Simulation für Rüben/feucht mit Grasweg bei 92 - 96m

Variante C: Hang gegliedert durch hangparallelen Wirtschaftsweg mit Grünstreifen oberhalb und Graben unterhalb des Weges

Die Untergliederung des Hanges entsprechend der in **Abb. 5** dargestellten Variante ist unter dem Gesichtspunkt des Erosionsschutzes wenig sinnvoll, da die verstärkte Erosion unterhalb des Weges den positiven Sedimentationseffekt des Weges weit übersteigt.

Abb. 6 zeigt die Variante eines Wirtschaftsweges, bei der die zuvor beschriebenen nachteiligen Wirkungen vermieden werden können. Oberhalb des Weges befindet sich ein Grünstreifen, unterhalb ein Graben, um den Abfluß aus dem darüber gelegenen Hangabschnitt abzuführen.

Ersetzt man den Grasweg aus **Abb. 5** durch die in **Abb. 6** dargestellte Variante, so ergibt sich die in **Abb. 7** dargestellte Verteilung des Austrages am Hang.

Deutlich zu erkennen ist zunächst die Wirkung des Grünstreifens (oberhalb des Weges). In diesem Bereich geht die Erosion bis gegen Null zurück. Allerdings reicht der Grünstreifen - zumindest unter den hier gegebenen extremen Niederschlags- und Abflußverhältnissen - nicht aus, um einen wesentlichen Teil des weiter oberhalb erodierten Materials zur Ablagerung zu bringen. Dazu müßte der Grünstreifen erheblich breiter sein.

Der Weg selbst wird nicht erodiert, da eine befestigte Oberfläche (Asphalt oder Beton) unterstellt wurde. Der Graben unterhalb des Weges leitet den oberflächlichen Abfluß par-

allel zum Hang ab, dadurch werden auf der hangabwärts folgenden Ackerfläche extreme Schäden vermieden.

Ein Vergleich mit **Abb. 4** zeigt, daß mit einem gemäß **Abb. 6** gestalteten hangparallelen Wirtschaftsweg die Erosion wesentlich reduziert werden kann. Da mit der Flurbereinigung in der Regel auch die Anlage eines neuen Wegenetzes verbunden ist, kann über eine entsprechend ausgerichtete Planung ein - wenn auch begrenzter - Beitrag zum Erosionsschutz geleistet werden. Hierbei ist neben der Ausgestaltung der Wege auch deren Lage am Hang von Bedeutung. Um diesen Einfluß genauer zu untersuchen, wurden anhand der in **Abb. 6** dargestellten Kombination aus Grünstreifen, Weg und Graben die in **Tab. 4** zusammengestellten Lage-Varianten untersucht.

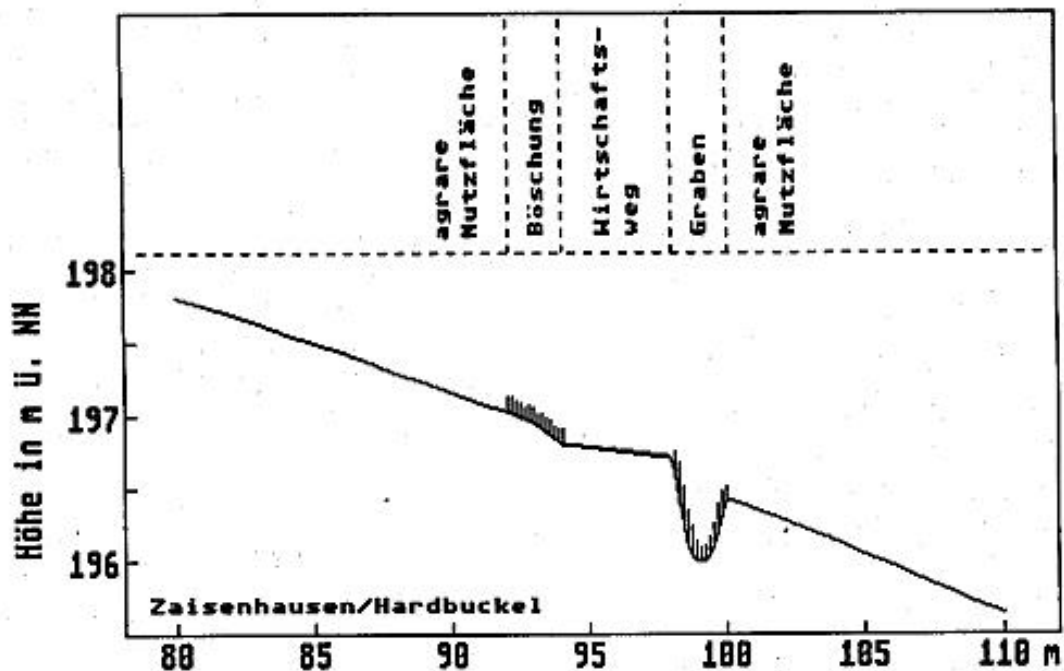


Abb. 6: Ausschnitt aus Profil Hardbuckel mit Kombination Grünstreifen, Weg, Graben (alternativ zu vorhandenem Grasweg)

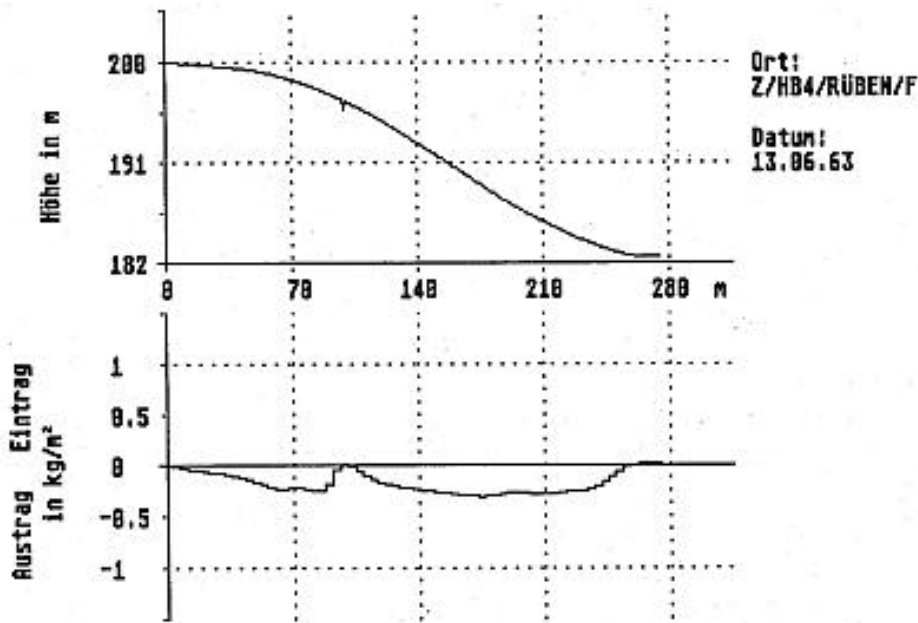


Abb. 7: Simulation für Rüben/feucht mit Kombination Grasstreifen, Weg, Graben bei 92 - 100m

Tab. 4: Abstand des Grabens von der Hangoberkante

Variante	Abstand von der Hangoberkante in m
I	0
II	50
III	100
IV	150
V	200

Für jede dieser Varianten wurde der Austrag, bezogen auf den Gesamthang, berechnet und mit dem Austrag des ungegliederten Hanges (Variante I) in Beziehung gesetzt. Die auf diese Weise ermittelten relativen Austräge sind in **Abb. 8** in Abhängigkeit von der Hanglänge aufgetragen. Anhand des durch die berechneten Punkte hindurchgelegten Kurvenzuges ist folgendes zu erkennen:

- Der relative Austrag beträgt 100%, wenn sich der Weg unmittelbar an der Ober- bzw. Unterkante des Hanges befindet. Jede andere Position des Weges zwischen Hangober- und Hangunterkante führt zu einer Minderung des Austrages.
- Der Verlauf der Kurve ist asymmetrisch. Die größte Minderung des Austrages wird erreicht, wenn sich der Weg in der oberen Hälfte des Hanges befindet. Der optimale Abstand des Weges von der Hangoberkante liegt im Falle des hier untersuchten Profils bei ca. 80m. Der Austrag vermindert sich dann auf ca. 78% (bezogen auf den Austrag des ungegliederten Hanges).

Diese Ergebnisse zeigen, daß über die Optimierung des Wegenetzes die Erosion bis zu einem gewissen Grad vermindert werden kann. Deutlich wird aber auch, daß es allein mit den Mitteln der Flurbereinigung kaum gelingen wird, Erosionsprobleme in befriedigender Weise zu lösen. Der wichtigste Grund hierfür ist, daß die wesentlichsten Steuergrößen der Erosion - insbesondere die Bewirtschaftung - durch die Flurbereinigung nicht beeinflußt werden können.

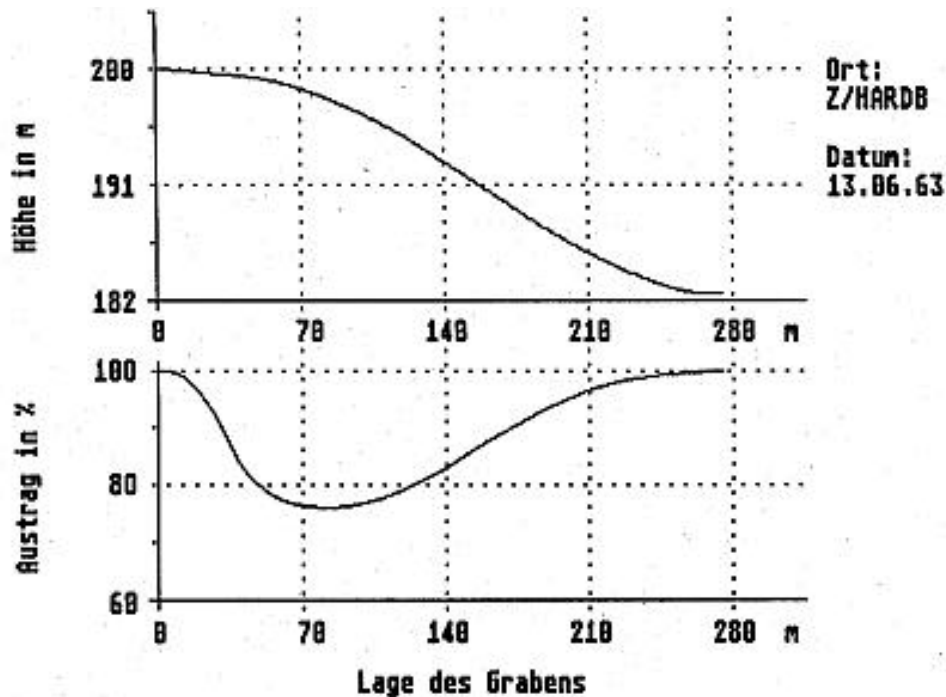


Abb. 8: Minderung des Austrages in Abhängigkeit von der Lage eines hangparallelen Grabens

Variante D: Hang gegliedert durch hangparallele Terrassen

In einem weiteren Beispiel wird im folgenden die Wirkung von Terrassen simuliert. Die Terrassierung von Hängen ist außerordentlich aufwendig und außerdem mit dem Nachteil behaftet, daß der autochthone Boden durch die baulich bedingten Bodenbewegungen in jedem Falle stark gestört wird. Trotzdem werden Terrassen vielfach als Mittel zur Boden-erhaltung eingesetzt - u.a. in steilen Weinberglagen. Obgleich im Testgebiet Zaisenhausen die Anlage von Terrassen vermutlich nicht zur Diskussion steht, sollen hier dennoch einige Effekte der Terrassierung anhand des folgenden Beispiels diskutiert werden.

Die Aufteilung des Testhanges (Profil Hardbuckel) in Terrassen unterschiedlicher Breite zeigt **Abb. 9**. Die Höhendifferenz zwischen benachbarten Terrassen beträgt einheitlich etwa 2,5m. Die Neigung der Terrassenflächen liegt im Mittel bei 2,5%.

Wie die Simulation zeigt, nimmt die Erosion durch die Anlage der Terrassen zwar stark ab, kann aber dennoch nicht völlig unterbunden werden. Die Verminderung des Austrages

gegenüber dem unveränderten Hang beträgt unter den hier zugrundegelegten Bedingungen aber immerhin 69%.

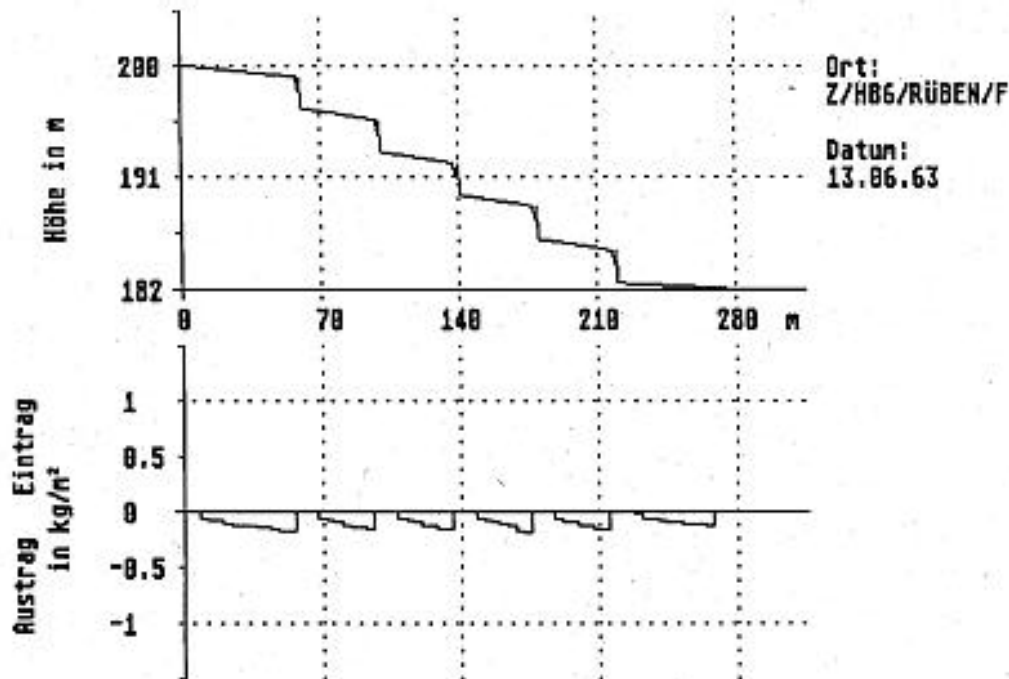


Abb. 9: Simulation für Rüben/feucht bei terrassiertem Hang

Zusammenstellung und Vergleich der unterschiedlichen Varianten

In **Abb. 10** sind die in den vorangegangenen Kapiteln angesprochenen Varianten der Hanggliederung in ihrer Wirkung auf den Austrag nochmals gegenübergestellt. Darüberhinaus ist der jeweilige Einfluß der Anfangsbodenfeuchte dargestellt.

Man erkennt zunächst, daß - wie zu erwarten war - der Austrag bei vorbefeuchtetem Boden deutlich größer ist als ohne Vorbefeuchtung. Es ist bekannt, daß mit zunehmendem Anfangswassergehalt die Infiltrationskapazität des Bodens abnimmt - insbesondere zu Beginn des Ereignisses. Ein entsprechend größerer Teil des Niederschlagswassers fließt oberflächlich ab. Dies führt zwangsläufig zu einer Zunahme des Austrages, sofern - wie in diesem Beispiel - alle übrigen Einflußgrößen der Erosion als konstant angenommen werden.

Ein Vergleich der simulierten Varianten der Hanguntergliederung zeigt, daß Variante B (Hang gegliedert durch Grasweg ohne Graben) den größten Austrag liefert. Der Austrag ist bei dieser Variante sogar größer als im Falle des ungegliederten Hanges. Die Varianten C und D führen demgegenüber zu einer Minderung des Austrages.

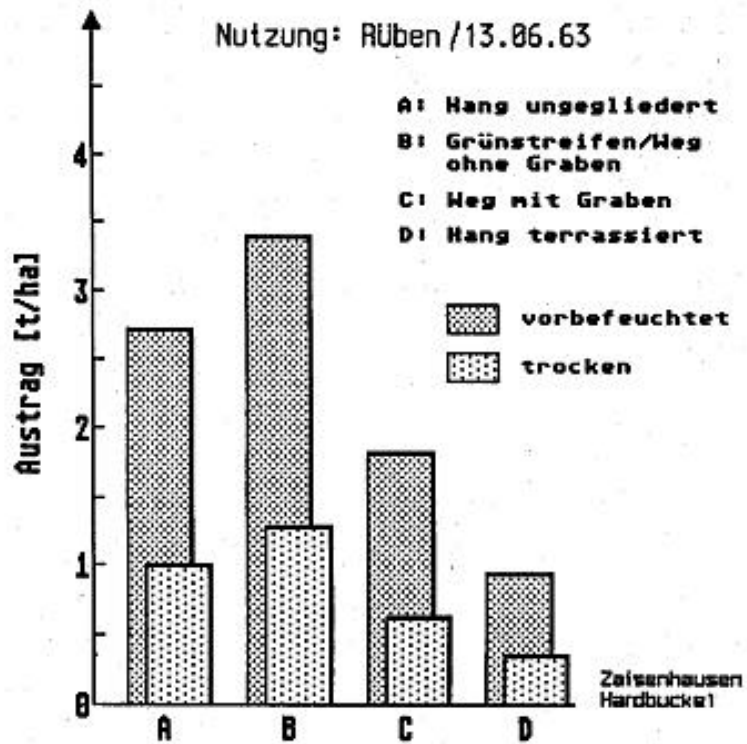


Abb. 10: Abhängigkeit des Austrages von der Gliederung des Hanges und von der Bodenfeuchte

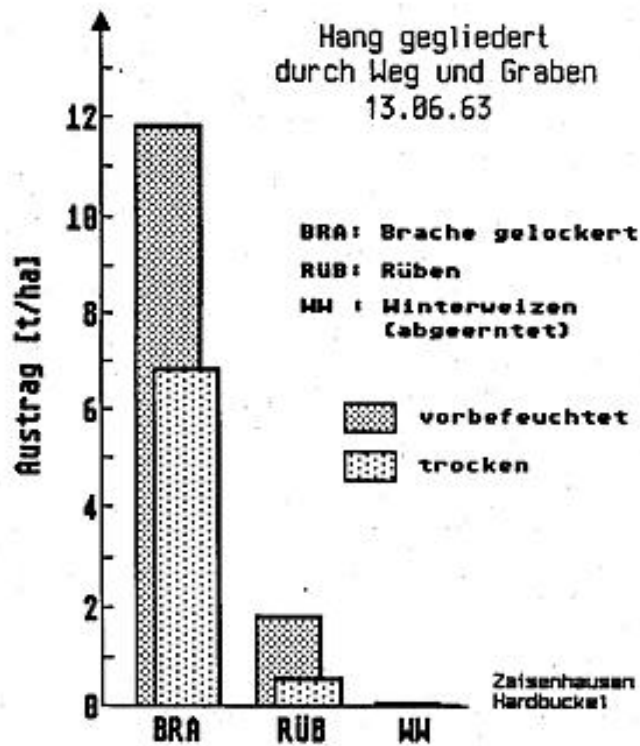


Abb. 11: Abhängigkeit des Austrages von der Nutzung und der Bodenfeuchte

Abb. 11 veranschaulicht den Einfluß der Nutzung bzw. des Nutzungszustandes auf den Austrag (am Beispiel der Variante C). Zusätzlich ist auch hier wieder der Einfluß der Anfangsfeuchte angegeben. Die dargestellten Ergebnisse belegen, daß die Nutzung einen sehr viel größeren Einfluß auf den Austrag hat als etwa die Gliederung des Hanges durch Gräben oder Terrassen. Im Zustand der Brache (Saatbeet) werden nach Vorbefeuchtung knapp 12t/ha, ohne Vorbefeuchtung knapp 7t/ha Boden ausgetragen. Im Falle des Weizenfeldes tritt dagegen praktisch keine Erosion auf. Unter Rüben bleibt der Austrag unter 2t/ha.

Abschätzung des mittleren jährlichen Austrages (auf der Basis eines statistisch bestimmten Referenzjahres)

Neben der Simulation einzelner Erosionsereignisse gestattet das EROSION-2D Modell auch die Berechnung sog. Ereignissequenzen. Unter Zugrundelegung eines Referenzjahres kann so u.a. der mittlere jährliche Austrag ermittelt werden. Dieser Wert ist vor allem für die Beurteilung der durchschnittlichen langfristigen Erosionsgefährdung von Interesse.

In **Tab. 5** sind die für das Profil Hardbuckel/Variante A berechneten jährlichen Netto-Austräge zusammengestellt (bezogen auf das Referenzjahr 1955 und die Nutzungen Brache (gelockert), Rüben und Winterweizen). Der Wert für Brache (gelockert) repräsentiert hierbei den denkbar ungünstigsten Fall. Dieser Wert ist vor allem als Bezugsgröße von Interesse.

Tab. 5: Jährliche Netto - Austräge (Profil Hardbuckel/Variante A), bezogen auf das Referenzjahr 1955 in Abhängigkeit von der Kulturart

Nutzung	Netto – Austrag in t/ ha a
Brache (gelockert)	13,4
Rüben	6,2
Winterweizen	0,1

Unter Rüben reduziert sich der mittlere jährliche Austrag um etwa 50%, bezogen auf den Wert bei Brache. Winterweizen erniedrigt den Austrag praktisch auf Null. Es sei hierbei aber nochmals darauf hingewiesen, daß als Grundlage der Berechnungen nur die Niederschlagsdaten des Sommerhalbjahres zur Verfügung standen!

Zum Vergleich sind in **Tab. 6** einige Angaben über jährliche Bodenverluste zusammengestellt, die im Kraichgau von verschiedenen Autoren mit unterschiedlichen Methoden gemessen wurden. Es fällt auf, daß die Angaben sehr stark schwanken. Insgesamt liegen die Werte jedoch deutlich höher als die berechneten Werte. Lediglich die Messungen von SCHRAMM (1992, S. 245) ergaben einen geringeren Austrag als berechnet.

Tab. 6: Jährliche Bodenverluste im Kraichgau, nach Angaben verschiedener Autoren

Autoren	Netto – Austrag in t/ ha a	Nutzung
QUIST (1984)	24 – 115	Rüben
BOLL & BECKERT (1985)	40 – 45	Mais
	30 – 35	Rüben
DIKAU (1986)	max. 36	Mais
	max. 277	Rüben
BÖHRER & LEICHT (1988)	44	Mais
	40	Rüben
SCHRAMM (1992)	max. 2	Mais

Die Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Werten können im wesentlichen auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- Die gemessenen Werte beruhen auf nicht repräsentativen kurzzeitigen Untersuchungen. Einzelne Extremereignisse liefern - wie die vorangegangenen Berechnungen gezeigt haben - u.U. erheblich größere Austräge als unter Normalbedingungen im jährlichen Mittel.
- Die Übertragung der Ergebnisse von Testflächenmessungen auf ganze Hänge führt tendenziell zu einer Überschätzung der Austräge. Die Übertragbarkeit ist umso weniger gegeben, je kleiner die Testflächen sind (s. Schmidt, 1991a, S. 16). Die "Nagelmethode" (Quist, 1984) als Alternative zu den Testflächenmessungen liefert ebenfalls zu große Austragswerte, da sich die erosionsbedingten Niveauveränderungen der Bodenoberfläche von den mit der Bodenbearbeitung verbundenen Sackungserscheinungen nicht trennen lassen (s. Schmidt, 1988, S. 52).
- Für die Berechnung der Austräge mit Hilfe des Modells standen nur die Niederschlagsdaten aus den Sommerhalbjahren zur Verfügung. Die Simulationsrechnungen liefern daher, bezogen auf das Jahr insgesamt, zu geringe Austräge.
- Neigung, Bearbeitung etc. der Meßflächen stimmen nicht überein. Dies schränkt die Vergleichbarkeit der Daten zusätzlich ein.

Abschätzung der langfristigen erosiven Änderungen des Geländeprofils

Die Erosion ist in aller Regel ein schleichender Prozess. Die mit der Erosion einhergehenden morphologischen Veränderungen der Landschaft entziehen sich daher weitgehend der unmittelbaren Beobachtung, und bleiben infolgedessen bei Planungsvorhaben häufig völlig außer Betracht.

Die bisher dargestellten Modellrechnungen richteten sich einerseits auf die Abschätzung der Erosion, unter den Bedingungen eines extremen Einzelereignisses, und andererseits auf die Abschätzung der Erosion im jährlichen Mittel (Referenzjahr).

In einem weiteren Schritt soll nun versucht werden, auch die langfristigen Effekte der Erosion modellmäßig abzubilden.

Bei der Simulation über lange Zeiträume (100 und mehr Jahre) ergeben sich typische, vor allem von der Nutzung abhängige Veränderungen der Geländegeometrie (s. SCHMIDT, 1991c). Ein solches Beispiel zeigt **Abb. 12**.

Die in diesem Beispiel dargestellte Simulation basiert auf der Iteration des bereits erwähnten Referenzjahres. Als Beispiel für die Berechnung dient wiederum das Profil Hardbukkel/Variante B. **Abb. 12** zeigt das Ausgangsprofil des Hanges und den berechneten Verlauf des Geländeprofiles nach 250 Iterationen - also etwa nach 250 Jahren.

Deutlich sichtbar werden vor allem die Effekte des Grasweges. Das Zusammenwirken von Ablagerung im Bereich des Weges und verstärkter Erosion im unmittelbaren Anschluß an den Weg führt - wie das untere Profil zeigt - zur Herausbildung einer kleinen Geländestufe. Entsprechende erosionsbedingte Formen sind im Kraichgau - soweit noch nicht durch die Flurbereinigung beseitigt - heute weit verbreitet.

Das Beispiel zeigt, daß die morphologische Entwicklung einer Landschaft - zumindest ausschnittsweise - rechnerisch nachvollzogen und dabei der anthropogene Einfluß genauer spezifiziert werden kann. Mit Hilfe des Modells können somit die voraussichtlichen langfristigen Folgen von geplanten Veränderungen/Eingriffen abgeschätzt und die damit verbundenen Risiken bewertet werden. Hierin vor allem liegen die Anwendungsmöglichkeiten für planerische Zwecke.

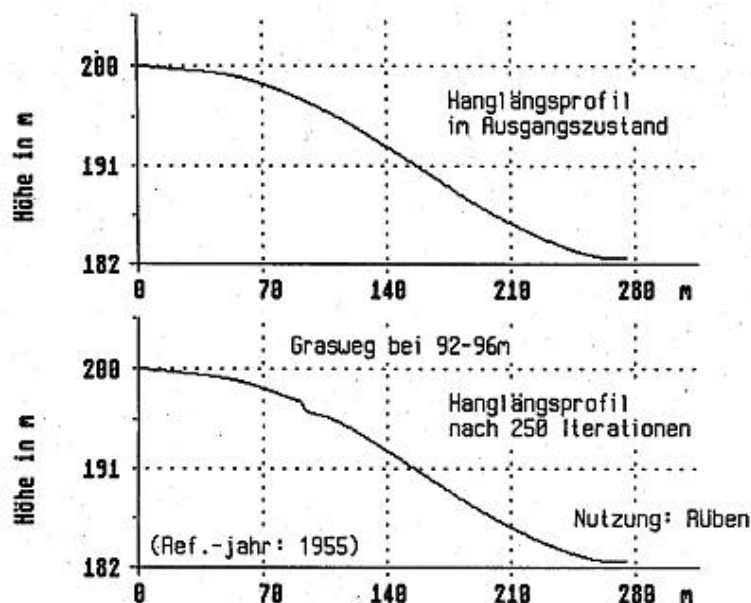


Abb. 12: Einfluß eines hangparallelen Grasweges auf die langfristige Entwicklung des Hangprofils:

5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

EROSION-2D ist ein physikalisch begründetes, computergestütztes Simulationsmodell zur quantitativen Erfassung der Bodenerosion und -deposition auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Als Eingabegrößen gehen die Höhenkoordinaten des Ausgangsprofils, die Oberflächen- und Bodeneigenschaften sowie die Vegetationsbedeckung in das Modell ein. Die kennzeichnenden Zustandsgrößen können sowohl örtlich (über das Hanglängsprofil) wie auch zeitlich (z.B. im Jahresverlauf) variieren.

Zur Anwendung des EROSION-2D Modells im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben wurden in der Gemarkung Zaisenhausen die für die Modellierung erforderlichen Eingangsgrößen erfaßt und am Beispiel des Testhanges "Hardbuckel" ausgewertet.

Die Modellrechnungen beziehen sich auf die Simulation

- des Austrages, für den Fall eines extremen Einzelereignisses
- des mittleren jährlichen Austrages
- der langfristigen erosions - bzw. depositionsbedingten Veränderungen der Geländegeometrie.

Hierbei wurden zugrundegelegt:

- der ungegliederte Hang
- die derzeitige Aufteilung des Hanges in zwei durch einen Grasweg getrennte Teilstücke
- die Aufteilung des Hanges durch einen ausgebauten Wirtschaftsweg mit Graben
- die Gliederung des Hanges durch Terrassen
- verschiedene Nutzungs- und Feuchtezustände (Brache/Saatbeet, Rüben, Winterweizen)

Die Gliederung des Hanges durch einen Grasweg (derzeitiger Zustand) führt insgesamt zu einer Zunahme des Austrages (gegenüber dem ungegliederten Hang), weil aufgrund des Sedimentdefizites (bezogen auf die Transportkapazität) unterhalb des Weges die Erosion sprunghaft zunimmt. Hangparallele Gürtelwege sind daher unter dem Gesichtspunkt des Erosionsschutzes nur sinnvoll, wenn sie mit einem Graben zur Ableitung des Oberflächenwassers kombiniert werden. In diesem Falle hängt die Verminderung der Erosion wesentlich von der Lage des Weges/Grabens am Hang ab. Eine Beispielrechnung für das Profil Hardbuckel ergab, daß in diesem Fall die größte Minderung der Erosion erreicht wird,

wenn sich die Kombination Weg/Graben ca. 80m von der Hangoberkante entfernt befindet, bei 275m Gesamtlänge des Hanges. Der Austrag vermindert sich dann auf 78%, bezogen auf den ungliederten Hang.

Eine drastische Reduzierung der Erosion ist durch die Anlage von Terrassen zu erreichen. Allerdings ist damit ein außerordentlich großer Aufwand verbunden. Zudem wird der autochthone Boden durch die baulich bedingten Bodenbewegungen stark gestört. Terrassen sind daher nur unter extremen Bedingungen - z.B. in steilen Weinberglagen - vertretbar.

Der auf der Basis eines statistisch ermittelten Referenzjahres berechnete mittlere jährliche Austrag entspricht in der Größenordnung etwa dem Austrag eines extremen Einzelereignisses. Dies zeigt, daß Schäden durch Erosion häufig das Ergebnis nur weniger heftiger Starkregen sind. Der berechnete Austrag kann daher auch nur sehr schwer mit gemessenen Werten verglichen werden. Langfristige Messungen, die als Vergleich zu dem berechneten Jahresmittelwert herangezogen werden könnten, existieren für das Untersuchungsgebiet nicht.

Bei der Simulation über mehrere hundert Jahre ergeben sich spezifische Veränderungen der Geländegeometrie. Im Falle des Testhanges zeigt sich z.B., daß im Bereich des Weges eine hangparallele Stufe entsteht. Derartige Geländestufen sind im Kraichgau heute weit verbreitet und offensichtlich das Ergebnis der jahrhundertelangen Erosion.

Die verschiedenen, in diesem Bericht zusammengestellten Beispielrechnungen geben einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten des EROSION-2D Modells im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben. Die wichtigsten Anwendungsbereiche sind:

- die Bereitstellung objektiver Grundlagendaten zur Bewertung des kurz - und langfristig zu erwartenden Bodenaustrages
- der unmittelbare Vergleich und die Optimierung verschiedener Planungsvarianten, z.B. des Wegenetzes
- die Visualisierung der kurz - und langfristigen Auswirkungen von geplanten Maßnahmen.

Bisher stellt der mit der Erfassung der Eingabegrößen verbundene Aufwand noch ein gewisses Problem für die routinemäßige Anwendung des Modells dar. Durch die Entwicklung von Nomogrammen und speziellen Prozeduren soll dieser Aufwand jedoch soweit reduziert werden, daß vorhandene bodenkundliche und topographische Informationen ausreichen, um das Modell in der Praxis anzuwenden.

Literatur

- /1/ BÖHRER, R. & K. LEICHT (1988): Entwicklung eines Bewertungssystems zur Beurteilung der Erosionsgefährdung im Flurbereinigungsverfahren Zaisenhausen, Landkreis Karlsruhe.- Unveröff. Diplomarbeit FH Karlsruhe.
- /2/ BOLL, H. & T. BECKERT (1985): Vorkehrungen und Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenerosionen im Flurbereinigungsverfahren Zaisenhausen, Landkreis Karlsruhe.-Unveröff. Diplomarbeit FH Karlsruhe.
- /3/ DIKAU, R. (1986): Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen.- Heidelberger Geographische Arbeiten 81, Heidelberg.
- /4/ QUIST, D. (1984): Zur Erosion im Zuckerrübenanbau des Kraichgaus.- Diss. Universität Heidelberg.
- /5/ SCHMIDT, J. (1988): Wasserhaushalt und Feststofftransport an geneigten, landwirtschaftlich bearbeiteten Nutzflächen.- Diss. FU Berlin.
- /6/ SCHMIDT, J. (1991a): The Impact of Rainfall on Sediment Transport by Sheetflow.- In: Bork, H.-R., J. De Ploey & A.P. Schick (Hrsg.): Erosion, transport and deposition processes - theorie and models. Catena Supplement 19: S. 9-17.
- /7/ SCHMIDT, J. (1991b): A Mathematical Model to Simulate Rainfall Erosion.- In: Bork, H.-R., De Ploey, J. & A.P. Schick (Hrsg.): Erosion, transport and deposition processes - theorie and models.- Catena Supplement 19: S. 101-109.
- /8/ SCHMIDT, J. (1991c): Anwendung eines theoretischen Modells zur Langfristsimulation von Erosions- und Akkumulationsprozessen an Hängen.- In: Mäckel u. Röhrig: Forschungen zur Fluß- und Hangdynamik. Freiburger Geographische Hefte 33: S. 145-165.
- /9/ SCHMIDT, J. (1992a): Anwendung des EROSION-2D Modells zur Untersuchung des Einflusses von Flurbereinigungsmaßnahmen auf den Bodenabtrag am Beispiel des Flurbereinigungsgebietes Zaisenhausen.- Gutachten für das Landesamt für Flurbereinigung Baden-Württemberg.
- /10/ SCHMIDT, J. (1992b): Modeling long-term soil loss and landform change.- In: Abrahams, A.J. & A.D. Parsons: Overland Flow - Hydraulics and Erosion Mechanics. University College London Press, London.
- /11/ SCHRAMM, M. (1992): Bestimmung des Bodenabtrags und des Stoffaustrags im Vorfluter eines kleinen ländlichen Einzugsgebietes.- In: Plate, E.J.: Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet. Schlußbericht BMFT-Verbundprojekt: S. 229-256.
- /12/ SCHWERTMANN, U., W. VOGL & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.- 2. Aufl., Stuttgart.
- /13/ WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (1965): Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains.- Agr. Handbook 282 (USDA), Washington D.C.
- /14/ V. WERNER, M. (1991): Anwendung des Bodenerosionsmodells EROSION-2D in der agraren Nutzungsplanung.- FU Berlin, FB Geowissenschaften.

Erste Fassung Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg

- Aussagemöglichkeiten kleinmaßstäbiger Betrachtungen - Stefan Jäger, Heidelberg

1 Einführung

Der *Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg*, der zur Zeit in einer ersten, unveröffentlichten Fassung vorliegt, entstand im Rahmen einer Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Heidelberg im Auftrag des Ministeriums Ländlicher Raum des Landes Baden-Württemberg. Als methodisches Vorbild der kleinmaßstäbigen Bodenerosionsmodellierung diente der von AUERSWALD & SCHMIDT (1986) für das benachbarte Bundesland erstellte *Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern*. Erste Bemühungen zur Anfertigung eines vergleichbaren Kartenwerkes für das Land Baden-Württemberg wurden seit Erscheinen des bayerischen Atlases an der Landesanstalt für Pflanzenbau (LAP) in Forchheim unter der Federführung von Dr. D. Quist ergriffen. Auf diese Vorarbeiten, die in die Modellierungsarbeiten Eingang fanden, wird jeweils an entsprechender Stelle eingegangen.

Aufgabe und Ziel der Arbeit war die quantitative Abschätzung der Erosionsgefährdung auf Ackerflächen in Baden-Württemberg mittels eines geeigneten Modells und mit Basisdaten, die in den Verwaltungsbehörden bereits flächendeckend vorliegen.

Der Atlas stellt damit eine regionale Untersuchung zur Erosionsgefährdung dar. Er enthält Übersichtskarten, die Aussagen für 22 km große Raster mit jeweils in sich homogenen Parameterausprägungen enthalten. Aus den Karten dürfen keine Aussagen für Landschaftsausschnitte abgeleitet werden, die die vorgegebene Rasterweite unterschreiten.

2 Das Modell

Die Arbeit basiert auf der von WISCHMEIER & SMITH (1978) entwickelten Universal Soil Loss Equation (USLE)/Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG), einem empirischen Modell zur Abschätzung des mittleren, langjährigen Bodenabtrags durch Wasser:

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

wobei:

- A: langjähriger, mittlerer Bodenabtrag
- R: Regen- und Oberflächenabflußfaktor
- K: Bodenerodierbarkeitsfaktor
- S: Hangneigungsfaktor
- L: Hanglängenfaktor
- C: Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
- P: Erosionsschutzfaktor

Die bekannten Einschränkungen, die es bei der Anwendung dieses Modelles zu berücksichtigen gilt, sind in anderen Beiträgen des Workshops erläutert. Im Zusammenhang mit dem *Erosionsatlas* bleibt zu erwähnen, daß der Arbeit die folgenden zwei Hypothesen zugrunde liegen:

- Die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung, die als empirisches Modell zur Vorhersage von Bodenerosion für großmaßstäbige Anwendungen auf dem Ackerschlag von WISCHMEIER & SMITH (1978) entwickelt wurde, eignet sich auch für kleinmaßstäbige Anwendungen und regionale Aussagen.
- Die von SCHWERTMANN et al. (1987) für bayerische Verhältnisse erarbeiteten Adaptierungen der ABAG gelten auch für das Nachbarland Baden-Württemberg. Daher können die Faktoren R, K, S, L und C mit den gleichen Methoden berechnet werden.

3 Methode

Methodisch stellt die Arbeit in wesentlichen Teilen eine Anwendung des von AUERSWALD & SCHMIDT (1986) entwickelten und für Bayern erprobten Verfahrens zur Erstellung eines entsprechenden Atlas dar. Für jeden Faktor wurden die jeweils für ein 2-2 km-Raster typischen Werteausprägungen für K, L usw. erfaßt und mittels eines Geographischen Informationssystems verknüpft.

An die Eingangsdaten wurden 4 Bedingungen gestellt. Sie sollten möglichst

- flächendeckend vorliegen,
- methodisch einheitlich erhoben worden sein,
- digital vorliegen oder
- ohne größeren Aufwand digitalisiert werden können.

Die Rasterweite von 2 km wurde durch den Hangneigungsfaktor S vorgegeben, der in keiner höheren Auflösung zur Verfügung stand. Eine geringere Rastergröße der Ergebnis-karten würde daher räumliche Präzisierungen der Informationsgehalte vortäuschen. Der Erosionsschutzfaktor P mußte in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt bleiben, da hierzu keine flächendeckende Information vorliegt.

3.1 Regen - und Oberflächenabflußfaktor R

Mithilfe des R-Faktors soll im empirischen Modell der USLE der Einfluß des Niederschlags auf den Bodenerosionsprozeß erfaßt werden. Als Datengrundlage des R-Faktors wurde die 1985 an der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU)/Baden-Württemberg von SCHWEIKLE et al. erstellte Arbeit zur "Erosivität der Niederschläge Baden-Württembergs"

verwendet. Diese Erosivitätskarten basieren auf einem von ROGLER & SCHWERTMANN (1981) für regionale Anwendungen in Bayern entwickelten, vereinfachten Verfahren zur Ableitung von R-Faktoren aus einem Niederschlagsindex, das von SCHWEIKLE et al. (1985) auf Niederschlagsdaten des Klima-Atlas von Baden-Württemberg (DEUTSCHER WETTERDIENST, 1953) angewendet wurde. Nach ROGLER & SCHWERTMANN (1981) besteht zwischen dem nach WISCHMEIER & SMITH (1978) berechneten Jahres-R-Faktor und der mittleren Niederschlagssumme des Sommerhalbjahres (Mai bis Oktober) folgender Korrelationszusammenhang:

$$R = 1,48 + 0,141 \times N_s$$

wobei

R: mittlere jährliche Erosivität in $[\text{kJ}/\text{m}^2] \cdot [\text{mm}/\text{h}]$

N_s : mittlerer Sommerniederschlag in mm (1. Mai - 31. Oktober).

Die Anwendung des für Bayern gültigen R-Faktor-Modells auf Baden-Württemberg erscheint wegen der vergleichbaren Niederschlagsverhältnisse in beiden Bundesländern möglich.

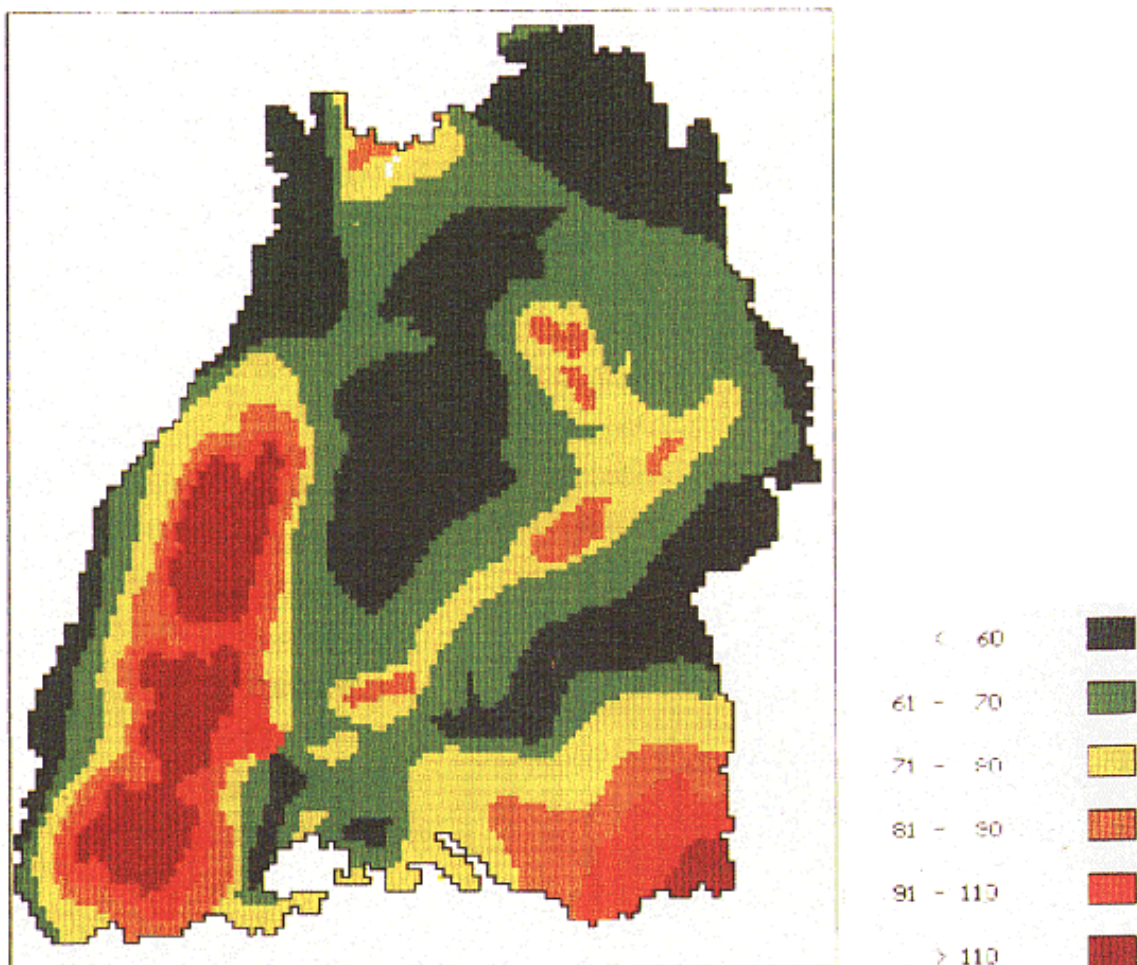


Abb. 1: R - Faktor-Verteilung Baden-Württembergs im 2 x 2 km-Raster (Quelle: Karte der Sommererosivität Baden-Württembergs, SCHWEIKLE et al., 1985)

Darüberhinaus ist die ABAG hinsichtlich des R-Faktors viel weniger sensibel als gegenüber den Relieffaktoren S und L und dem C-Faktor.

Addiert man, um den Jahres-R-Faktor zu erhalten, entsprechend der Anleitung von SCHWEIKLE et al. (1985), die Werte beider Karten, so entstehen an der Landesgrenze zu Bayern, für das eine Karte der Jahres-R-Faktoren existiert (ROGLER & SCHWERTMANN 1981), starke "Blattrandverwerfungen" mit etwa doppelt so hohen Werten in Baden-Württemberg. Bei der Empfehlung zur Addition der Sommer- und Winter-R-Faktoren handelt es sich offensichtlich um eine Fehlinterpretation des Verfahrens von ROGLER & SCHWERTMANN (1981) durch SCHWEIKLE et al. (1985). Der Jahres-R-Faktor wird vielmehr durch die von SCHWEIKLE et al. (1985) als "Sommererosivität" bezeichnete Karte repräsentiert. Diese wurde in der vorliegenden Arbeit demzufolge als Datengrundlage des R-Faktors verwendet. Die Isoerodentkarte liegt in der Landschaftsdatenbank (LDB) der LfU digital als Flächen gleicher R-Faktor-Klassen vor. Mittels eines Programmmoduls der LDB zur Vektor-Raster-Konvertierung wurden die Vektordaten für die Bodenerosionsmodellierung in das geforderte 2-2 km-Raster (s.o.) überführt und klassifiziert (vgl. **Abb. 1**).

Die höchsten R-Faktoren von > 200 treten im Schwarzwald und am Alpenrand auf. Auch der Westrand der Alb sowie Teile der Hohenloher Ebene weisen hohe Werte von 151 - 200 auf, während die Regenschattengebiete wie z.B. Bauland, Tauberland, Neckarbecken und das Donauebiet nur R-Faktoren bis etwa 70 besitzen.

3.2 Bodenerodierbarkeitsfaktor K

Der K-Faktor spiegelt den Einfluß der Bodeneigenschaften auf den Bodenerosionsprozeß wider. Für großmaßstäbige Bodenerosionsabschätzungen mit der USLE wird der K-Faktor normalerweise durch bodenphysikalische und bodenchemische Labormethoden bestimmt (WISCHMEIER & SMITH 1978). Nach SCHWERTMANN et al. (1987) kann der K-Faktor in Mitteleuropa aus den erhobenen Labordaten wie folgt berechnet werden:

$$K = 2,77 \cdot 10^{-6} \cdot M^{1,4} \cdot (12 - OS) + 0,043 \cdot (A - 2) + 0,033 \cdot (4 - D)$$

wobei:

- M: Schluff – und Feinsandgehalt in %
- OS: organische Substanz in % für OS > 4 gilt OS = 4
- A: Aggregatklasse
- D: Durchlässigkeitsklasse

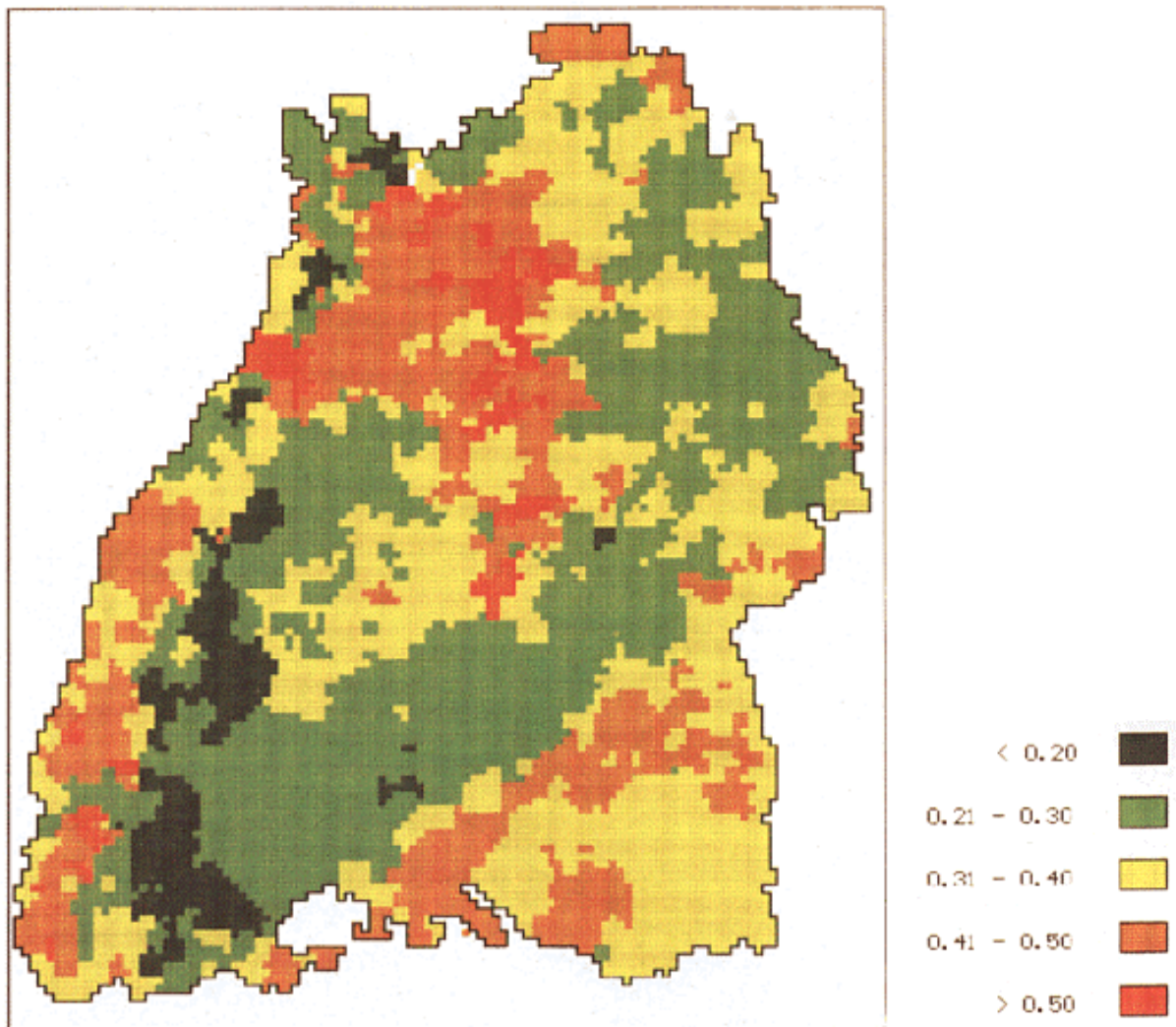


Abb. 2: K – Faktor - Verteilung Baden - Württembergs im 2x2 km-Raster (Quelle: eigene Bearbeitung nach Daten aus dem ALB)

Für die landesweite Modellierung wurde auf ein vereinfachtes Verfahren zur Ableitung von K-Faktoren aus Basisdaten der flächenhaft verfügbaren Reichsbodenschätzung zurückgegriffen, das von AUERSWALD (1986) für bayerische Verhältnisse entwickelt wurde. Vergleichbar dem R-Faktor wird auch hierbei auf ein Korrelationsmodell zur Bestimmung des K-Faktors zurückgegriffen, in das die in der Reichsbodenschätzung festgehaltene Bodenart, Genese und Zustandsstufe eingehen. Die Zuordnungen von K-Faktoren zu den genannten Kennwerten der Reichsbodenschätzung sind in AUERSWALD (1986) sowie AUERSWALD & SCHMIDT (1986) in tabellarischer Form zusammengestellt.

Die Daten der Reichsbodenschätzung wurden vom Landesvermessungsamt (LVA) in digitaler Form in das sog. Automatisierte Liegenschaftsbuch (ALB) überführt. Die auf Schlagenebene vorliegenden Werte wurden im Auftrag der LAP vom LVA nach dem beschriebenen Schema von AUERSWALD (1986) auf Gemarkungsebene aggregiert, wobei allerdings nur Ackerbeschreibungen verwendet wurden. Grünlandbeschreibungen bleiben im Rahmen der vorgenommenen Erosionsmodellierung damit ebenso unberücksichtigt wie Böden unter Wald. Um das benötigte 2x2 km-Raster herzustellen, mußten die auf Gemarkungsebene

vorliegenden K-Faktoren zunächst auf Gemeindeebene aggregiert werden, da die für den Vektor-Raster-Prozeß erforderliche Vektor-Geometrie in der LDB nur für die Gemeinden vorliegt. Das Ergebnis der beschriebenen Vorgehensweise ist in **Abb. 2** wiedergegeben.

Wie zu erwarten, finden sich die Böden mit den höchsten K-Faktoren auf den Lößsubstraten des Kraichgaus und in den Vorbergzonen von Odenwald und Schwarzwald. Aber auch im Alpenvorland, wo quartäre Lockersubstrate aus Grund- und Endmoränenmaterial typisch sind, treten hohe K-Faktoren auf. Dies erklärt sich daraus, daß in der Karte nur Ackerland berücksichtigt wird. Im Allgäu aber werden die wenigen lößüberdeckten und gleichzeitig stark erosionsanfälligen Gebiete ackerbaulich genutzt, während die übrigen Flächen der Moränenlandschaft als Wiesen und Weiden der Milchwirtschaft dienen.

3.3 Relieffaktoren L und S

Im LS-Faktor soll der Einfluß des Reliefs auf den Prozeß der Bodenerosion zum Ausdruck kommen. Im Vergleich mit den anderen vier in der USLE enthaltenen Faktoren, reagieren die Ergebnisse der Bodenabtragsschätzungen auf den LS-Faktor am sensibelsten (AUERSWALD, 1987). Daher ist eine hohe Güte der Eingangsdaten zur Berechnung des LS-Faktors Voraussetzung der Bodenerosionsmodellierung. Der Relieffaktor ist dimensionslos und gibt das Verhältnis der Bodenabtragungsmengen im Vergleich zur Standardparzelle von 22 m Länge und 5 ° Neigung an. Die Gleichungen zur Berechnung von L und S wurden wie die anderen Faktoren der USLE empirisch durch eine Vielzahl von Messungen und die Erarbeitung entsprechender Korrelationsmodelle erhoben (WISCHMEIER & SMITH, 1978; SCHWERTMANN et al., 1987). Die empirisch gefundenen Ergebnisse konnten jedoch durch deterministische Verfahren von MOORE & BURCH (1986) bestätigt werden.

Als Datenquelle für die Berechnung der LS-Faktoren dienten an der LAP aus den Blättern der Topographischen Karte 1:25.000 (TK 25) manuell aufgenommene Hangneigungen und Hanglängen. Die Aufnahme erfolgte innerhalb des vorgegebenen, am Gauß-Krüger-Netz orientierten 2-km-Gitters, indem innerhalb eines jeden Rasters für die darin enthaltenen Landwirtschaftsflächen mithilfe des Neigungs- und Längenmaßstabes jeweils eine typische Neigung und Hanglänge erhoben wurde. Da die Daten somit schon in Rasterform vorlagen, mußten für die EDV-gestützte Modellierung lediglich der L- und S-Faktor jeder Rasterfläche mittels der bei WISCHMEIER & SMITH (1978) bzw. SCHWERTMANN et al. (1987) angegebenen Formeln errechnet werden.

Eine kritische Analyse der Daten deutet allerdings darauf hin, daß die manuell erhobenen Werte typischer Neigungen und Hanglängen stark fehlerbehaftet sind. Vor allem Hanglängenwerte von 600 m oder mehr erscheinen unwahrscheinlich. Anhand von 3 Kartenblättern erfolgte eine Überprüfung der manuell erhobenen LS-Faktoren durch solche die computergestützt aus dem Digitalen Höhenmodell (DHM) des Landes Baden-Württemberg abgeleitet wurden. Zur Unterscheidung von Ackerland und anderweitig genutzten Flächen wurde das 50-m-Höhengitter des DHM mit einer Landsat TM Szene überlagert. Anschließend wurde das Gitter auf 2,2 km Rasterweite ausgedünnt und innerhalb eines jeden Rasters der Modal- und Mittelwert der Hanglänge und -neigung berechnet. Ein Vergleich der manuell und digital abgeleiteten Werte erbrachte nur geringe Korrelationskoeffizienten.

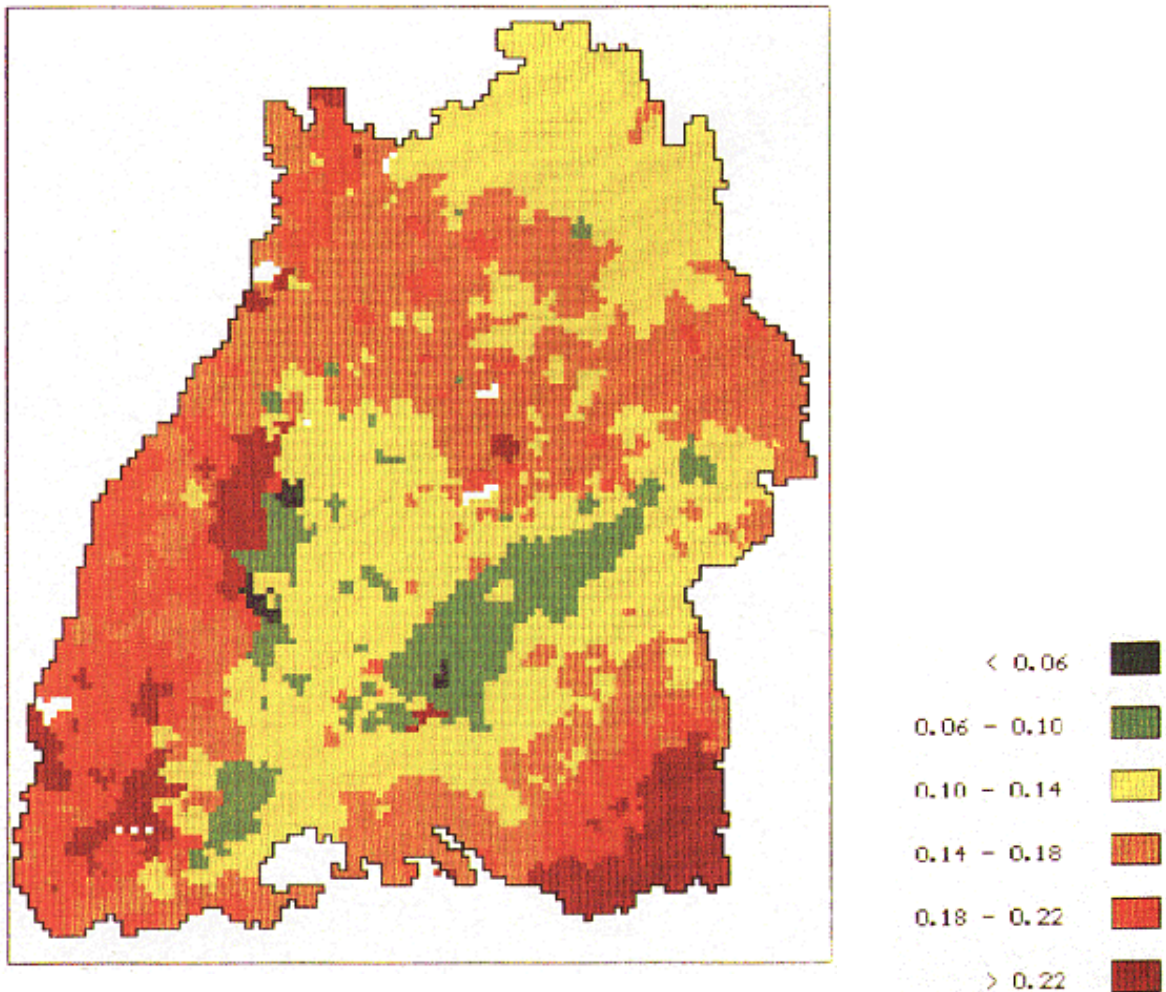


Abb. 3: L-Faktor-Verteilung Baden-Württembergs im 2x2 km-Raster (Quelle: eigene Bearbeitung nach Daten der LAP)

Um eine Verbesserung der Datengüte des LS-Faktors zu erreichen, wurden bei den Hanglängen statistische Korrekturen vorgenommen. Hierfür wurde innerhalb einer jeden Hangneigungsklasse von 1° Spannbreite die häufigste Hanglänge (Modalwert) ermittelt. Die erhaltenen Modalwerte wurden als die jeweils typischen einer jeden Neigungsklasse erachtet und daher für die Bodenerosionsmodellierung verwendet. Auf diese Weise werden offensichtliche Ausreißer eliminiert, gleichzeitig aber auch die Verwendung einer für das ganze Land gültigen mittleren Hanglänge vermieden. Die gewählte Vorgehensweise entspricht tendenziell den in der Agrarlandschaft zu beobachtenden Verhältnissen. So konnten AUERSWALD & SCHMIDT (1986) für Bayern nachweisen, daß die Hanglängen zum einen historisch begründet sind und zum anderen mit zunehmender Hangneigung kürzer werden. Ein entsprechender Zusammenhang konnte auch für Baden-Württemberg nachgewiesen werden (**Tab. 1**). Wenngleich die Hanglänge mit steigenden Hangwinkeln abnimmt, so wächst dennoch der LS-Faktor mit zunehmender Hanglänge. Für den Bodenabtragsprozeß bedeutet dies, daß die Schlaglängen nicht in ausreichendem Maße verkürzt werden und das Ausmaß der Bodenerosion mit größer werdender Hangneigung zunimmt.

Abb. 3 enthält die Ergebnisse für die Verteilung des L-Faktors in Baden-Württemberg.

Tab. 1: Zusammenhänge zwischen Hangneigung und Hanglänge, L - Faktor sowie LS – Faktor

Neigung [in°]	n	Modalwert [in m]	Mittelwert [in m]	L-Faktor	LS-Faktor
1	183	240	231	2,05	0,34
2	411	240	240	2,05	0,62
3	382	180	239	2,85	1,38
4	445	240	223	3,30	2,31
5	356	180	231	2,85	2,74
6	454	180	215	2,85	3,59
7	116	130	190	2,42	3,86
8	187	180	224	2,85	5,61
9	40	100	198	2,13	5,06
10	12	110	161	2,23	6,31
11	64	65	182	1,79	5,69
> 12	28	38	147	1,31	5,04

3.4 Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor C

Der C-Faktor spiegelt den Einfluß der Pflanzenbedeckung und der Bewirtschaftung wider. Aufgrund der großen Vielfalt von Fruchtfolgemoöglichkeiten und Bodenbearbeitungsmaßnahmen ist er der komplexeste Faktor im Modell der USLE. Darüberhinaus muß ein zeitlicher Abgleich zwischen den Entwicklungsstadien der Pflanzen und den Zeitpunkten der Bodenbearbeitung auf der einen Seite sowie dem Jahresgang des R-Faktors erarbeitet werden. Treten Starkregenfälle z.B. zur Saatbettsituation auf, so bewirken sie in der Regel katastrophal hohe Bodenabträge, während sie im Falle hoher Deckungsgrade der Feldfrüchte zu deutlich geringeren Abträgen führen. Da für das Land Baden-Württemberg noch keine systematischen Untersuchungen als Grundlage für die Ableitung eines landesweiten C-Faktors existieren, wurde auf die im Nachbarbundesland Bayern von AUERSWALD et al. (1986) ermittelten C-Faktoren zurückgegriffen (vgl. **Tab. 2**). Da die Vorbergzonen des Odenwaldes und Schwarzwaldes von Weinbau dominiert werden und hier hohe Raten der Bodenerosion auftreten, wurde Weinbau in die Modellierung einbezogen, obwohl Weinstöcke nicht Bestandteil der von AUERSWALD et al. (1986) berücksichtigten Fruchtfolgen sind. Da hinsichtlich des C-Faktors auf keine Meßergebnisse zurückgegriffen werden kann, wurde der Wert von 0,1 willkürlich geschätzt. Der C-Faktor wurde entsprechend niedrig angesetzt, da zahlreiche Winzer aus Gründen des Erosionsschutzes Weinbergsbegrünung vornehmen.

Tab. 2: C - Faktoren der Einzelfrüchte (nach Auerswald & Schmidt, 1986; pers. mündl. Mitt. K. Auerswald, 1990)

Anbaufrucht	C - Faktor
Mais	0,400
Kartoffeln	0,300
Zuckerrüben	0,300
Raps	0,100
Wintergerste	0,100
Feldfutter	0,004
Wein	0,100
gemüse	0,400
Hülsenfrüchte	0,400
Sonstige	0,060

Das bayerische Verfahren basiert auf folgenden 2 Annahmen:

- Die zeitliche Abfolge von Fruchtfolgen an einer bestimmten Lokalität entspricht der räumlichen Verteilung der Anbaufrüchte an diesem Ort zu einem beliebigen Zeitpunkt. Der Fruchtfolgewechsel kann daher als identisch mit der räumlichen Verteilung des betrachteten Momentes erachtet werden.
- Es besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem prozentualen Anteil einer Feldfrucht innerhalb einer Fruchtfolge und dem Anteil mit dem die Fruchtart zu einem mittleren C-Faktor der Bezugsfläche beiträgt.

Insofern können mittlere C-Faktoren aus Daten über die räumliche Verteilung von Anbaufrüchten abgeleitet werden. Eine entsprechende landesweite Agrarstatistik auf Gemeindeebene mit Stand 1987 wurde über das Statistische Landesamt (StLaA) Baden-Württemberg bezogen. Zur Erzeugung des erforderlichen 2·2 km-Rasters wurde die gleiche Vektor-Raster-Konvertierung wie im Falle der K-Faktoren angewendet. **Abb. 4** zeigt die Ergebnisse der gewichteten C-Faktoren für Gemeinden mit mehr als 10 % ackerbaulich genutzter Fläche.

Das Wertespektrum des C-Faktors reicht von 0,04 bis 0,32 und zeigt damit unter allen Faktoren der USLE die geringste Differenzierung. Das Fruchtartenspektrum einer Gemeinde wird sowohl von natürlichen Bedingungen wie dem Klima und der Bodenbeschaffenheit als auch von historisch gewachsenen Wirtschafts- und Sozialstrukturen geprägt. Die niedrigsten C-Faktoren werden auf der Schwäbischen Alb, der Baar und in Teilen der oberen Gäue angetroffen. Hohe Werte treten vor allem in der Oberrheinebene auf, wo aber infolge der günstigen topographischen Verhältnisse dennoch keine oder kaum Bodenerosion durch Wasser auftritt. Aber auch der Kraichgau, das Markgräfler Land und Teile des Alpenvorlandes weisen relativ hohe Werte auf. Der dominierende Einfluß von Mais und Hackfrüchten wird in der Karte deutlich.

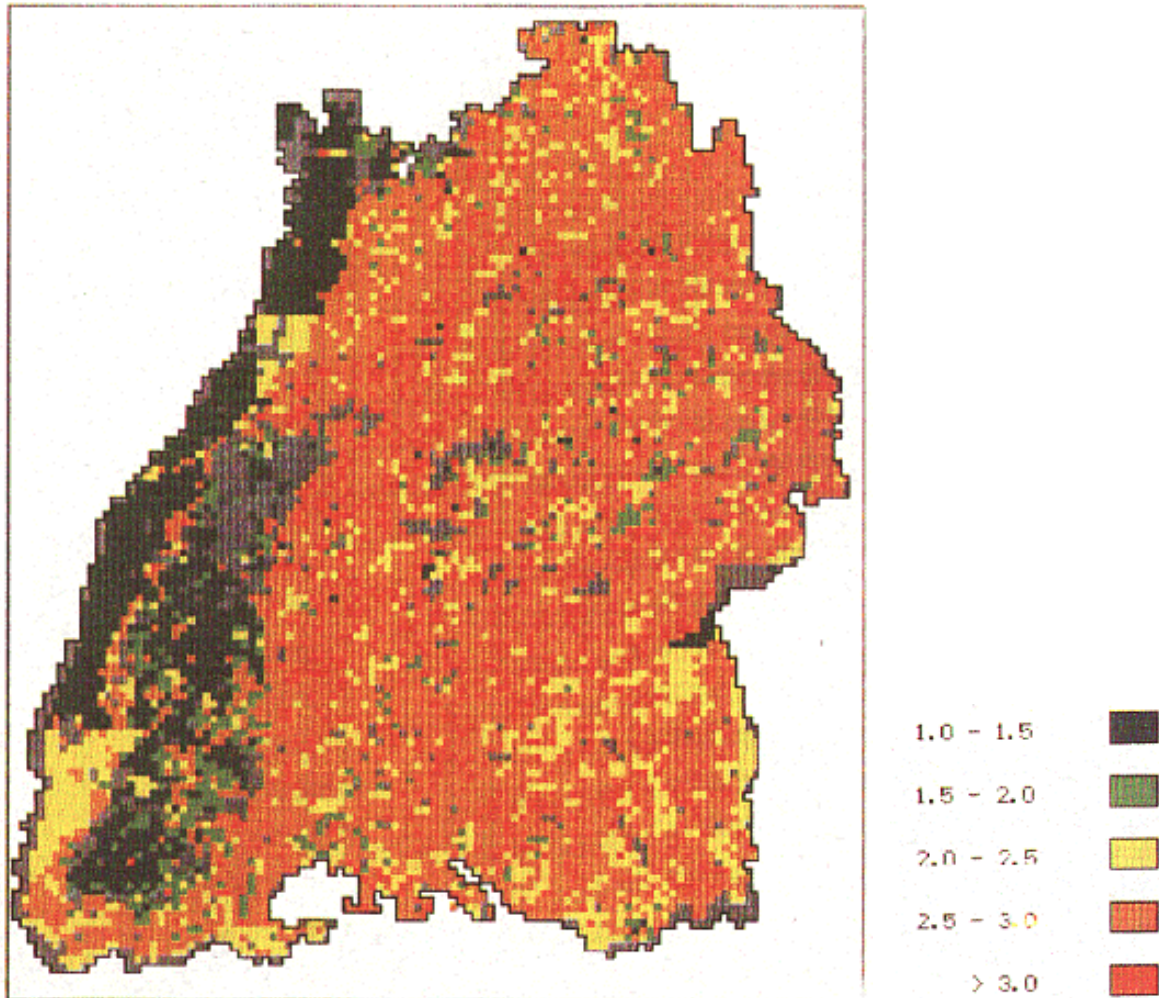


Abb. 4: C – Faktor - Verteilung Baden - Württembergs im 2 x 2 km-Raster (Quelle: eigene Bearbeitung nach Daten des StaLaA)

4 Modell zur Abschätzung der Bodenerosionsgefährdung

In der Literatur existieren verschiedene Verfahren zur Abschätzung von Erosionsrisiken. Oftmals werden erhaltene Abtragswerte willkürlich Klassen zugeordnet und das Erosionsrisiko als gering, mäßig oder hoch eingestuft. Im folgenden soll ein Verfahren zur Risikoabschätzung vorgestellt werden, das sich als besonders geeignet für Planungszwecke im regionalen Maßstab erweist. Der Grundgedanke des hier vorgestellten und von HEIMLICH & BILLS (1984) entwickelten Bewertungsschemas basiert auf der Unterteilung der USLE in ihre natürlichen (R, K, S) und anthropogenen Faktoren (C, P, L). Auf diese Weise kann der Frage nachgegangen werden, ob der Bodenabtrag durch angepaßte Bearbeitungsmethoden unter den tolerierbaren Bodenabtrag (T) gesenkt werden kann bzw. ob auch bei hohen CLP-Wertausprägungen keine problematischen Abträge erreicht werden.

Die Diskussion über das überaus problematische Thema, welche Erosionsraten überhaupt als tolerierbar erachtet werden können, soll an dieser Stelle nicht aufgegriffen werden. Im

Gegensatz zu HEIMLICH & BILLS (1984) wird hier der L-Faktor zu den anthropogenen Faktoren gezählt, was jedoch am Prinzip der Bewertung nichts ändert. Bei der Festlegung der T-Faktoren wurde auf das in Bayern von AUERSWALD & SCHMIDT (1986) verwendete Modell zurückgegriffen, wonach die zulässigen Abtragsmengen an die Gründigkeit der Böden gekoppelt sind und mit dieser steigen oder fallen. Die Werte können vergleichbar den K-Faktoren aus den flächendeckend verfügbaren Aufnahmen der Reichsbodenschätzung abgeleitet werden (vgl. 3.2). Wie die K- und C-Faktoren wurden die Flächendaten der T-Faktoren aufgerastert.

Für die Abschätzung der Erosionsgefährdung müssen zunächst der niedrigst- und höchstmögliche CLP-Wert bestimmt werden, die im Fall der vorliegenden Modellierung ganz Baden-Württembergs 0,04 und 0,91 betragen. In einem weiteren Arbeitsschritt muß für jedes 2,2 km-Raster das Verhältnis $T/0,91 (R \cdot K \cdot S_{\max})$ und $T/0,04 (R \cdot K \cdot S_{\min})$ berechnet werden. Alle Raster, für die gilt $R \cdot K \cdot S < R \cdot K \cdot S_{\max}$, können auch bei ungünstiger Bewirtschaftungsweise keine über das tolerierbare Maß gehenden Bodenabtragswerte aufweisen. Das Erosionsrisiko wird daher als *gering* eingestuft. Bei allen Rastern mit $R \cdot K \cdot S > R \cdot K \cdot S_{\min}$ kann der Bodenabtrag aufgrund der ungünstigen natürlichen Voraussetzungen auch dann nicht auf das tolerierbare Maß beschränkt werden, wenn sie auf besonders bodenschonende Weise bewirtschaftet werden und die im Land Baden-Württemberg günstigste mögliche CLP-Kombination aufweisen würden. Das Erosionsrisiko ist daher als *sehr hoch* einzustufen. Auf den verbleibenden Flächen wird das Erosionsrisiko zwei weiteren Klassen zugeordnet. Ist die mithilfe der USLE modellierte momentane Abtragsrate $A > T$, so ist das Risiko als *hoch* zu bewerten. Für die Planungspraxis bedeutet dies, daß bei Anwendung günstigerer Bewirtschaftungsmethoden eine Reduktion des Bodenabtrags auf das tolerierbare Maß möglich ist. Auf den verbleibenden Rasterflächen mit $A < T$ besteht die Gefahr, daß der Bodenabtrag über den als tolerierbar erachteten Wert steigt, wenn ungünstigere Fruchtfolgen oder Bearbeitungstechniken zum Einsatz kommen. Das Erosionsrisiko wird in diesem Fall als *mäßig* eingestuft. Da jede der vier Risikostufen unmittelbar mit einem möglichen Handlungsbedarf verknüpft ist, kommt dem beschriebenen Bewertungsverfahren hohe Bedeutung in der Planungspraxis zu.

5 Ergebnisse

Im folgenden sollen zwei von mehreren im Rahmen der landesweiten Bodenerosionsmodellierung entstandenen Ergebniskarten vorgestellt werden. **Abb. 5** zeigt die nach dem oben beschriebenen Verfahren mithilfe der USLE modellierte mittlere jährliche Abtragsraten pro Hektar. In der Karte werden nur solche Rasterelemente berücksichtigt, die einen Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche von mindestens 10 % aufweisen. Die berechneten Abtragswerte liegen zwischen 0 und 117 t/ha · a. Die geringsten Werte treten wie erwartet im Oberrheingraben und anderen wenig reliefierten Gebieten auf. Durch die Modellierung werden auch die bekannten problematischen Gebiete in den Lößlandschaften wie beispielsweise dem Kraichgau gut nachgezeichnet. Hohe Abtragswerte finden sich auch im Alpenvorland. Diese sind das Ergebnis sowohl hoher R- als auch C-Faktoren. Zu bedenken ist allerdings, daß der Anteil des ackerbaulich genutzten Landes zumeist nur 10

bis 20 % beträgt. Für Baden-Württemberg kann der von AUERSWALD & SCHMIDT (1986) für den bayerischen Teil des Alpenvorlandes gefundene Zusammenhang von hohen Erosionsraten in Gebieten mit viel Milchwirtschaft tendenziell bestätigt werden. Da in den Gebieten mit hohem Viehbesatz Silomais die Hauptfeldfrucht auf den verbleibenden Ackerflächen darstellt, sind hier hohe C-Faktoren mit entsprechend hohen Abtragsraten typisch.

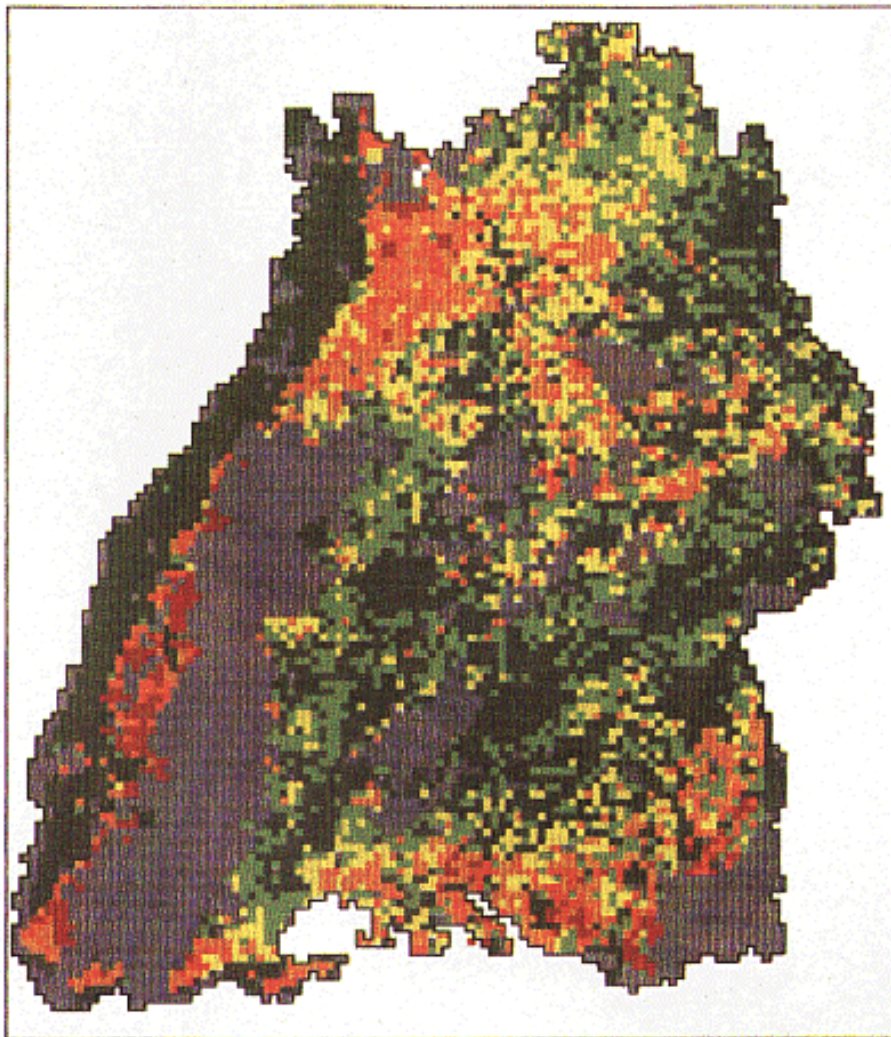


Abb. 5: Karte der mittleren jährlichen Bodenabträge in t/ha (Quelle: eigene Bearbeitung nach Daten von Schweikle et al., 1985, ALB, LAP und StaLaA)

Eine Validierung der modellierten Abtragsraten durch Meßergebnisse gestaltet sich schwierig, da für Baden-Württemberg nur wenig Datenmaterial vorliegt (vgl. **Tab. 3**). Wenngleich Ähnlichkeiten feststellbar sind, so genügen diese dennoch nicht als Beweis für die Richtigkeit der vorliegenden Modellierung, zumal sich die Messungen auf Wischmeier-Parzellen jeweils nur auf wenige Jahre erstrecken und die Ergebnisse somit nicht mit den modellierten langfristigen, mittleren Bodenabtragsraten verglichen werden können.

Tab. 3: Gemessene Bodenabtragswerte in Baden-Württemberg

Autor	Landschaft	Betrachtungszeitraum	mittlerer jährlicher Bodenabtrag in [t/ha × a]
BLEICH (1978)	Kraichgau	1974 - 1976	12
DIKAU (1986)	Kraichgau		25 - 165
EICHLER (1974)	Kraichgau	Einzelereignis 1974	
OSTENDORFF & ZÜRL (1964)		Jahrhunderte - Jahrtausende	
QUIST (1984, 1987)	Kraichgau		25 > 400

Als für die Planungspraxis wichtigere Karte wird **Abb. 6** erachtet, die die Ergebnisse der nach der Methode von HEIMLICH & BILLS (1984) erstellten Risikobewertung enthält. Der weitaus größte Teil des Landes (63 %) weist nach dieser Bewertung ein *hohes* Bodenerosionsrisiko auf. Diese Kategorie impliziert jedoch auch, daß durch geeignete Maßnahmen wie z.B. Schlaglängenverkürzung, bodenschonende Bewirtschaftungsmethoden oder günstigere Fruchtfolgen der tatsächliche Bodenabtrag auf oder unter das tolerierbare Maß gesenkt werden kann.

Nur sehr wenige Radsterelemente (ca. 3 %) fallen in die Klasse *sehr hoher* Gefährdung, die besagt, daß mit den in Baden-Württemberg vorkommenden CLP-Kombinationen eine Verringerung des Abtrages unter T nicht möglich ist. Es sind dies vor allem die Weinbaugebiete der Vorbergzone am Übergang vom Schwarzwald zum Oberrheingraben. Wegen der sehr schlechten Datenqualität des LS-Faktors und der groben Schätzung des C-Faktors für Weinbaukulturen handelt es sich um Gebiete mit der höchsten Fehlerrate in der Bodenerosionsmodellierung.

Natürlich zählt der gesamte flache Oberrheingraben zur Kategorie *geringer* Gefährdung. Auch große Teile der oberen Gäue sowie die Donauniederung sind gering gefährdet. Insgesamt entfallen 21 % der Landesfläche auf diese hinsichtlich der Bodenerosionsgefährdung völlig unproblematische Klasse, bei der auch höhere C-Faktoren nicht zum Überschreiten des maximal tolerierbaren Bodenabtrags führen.

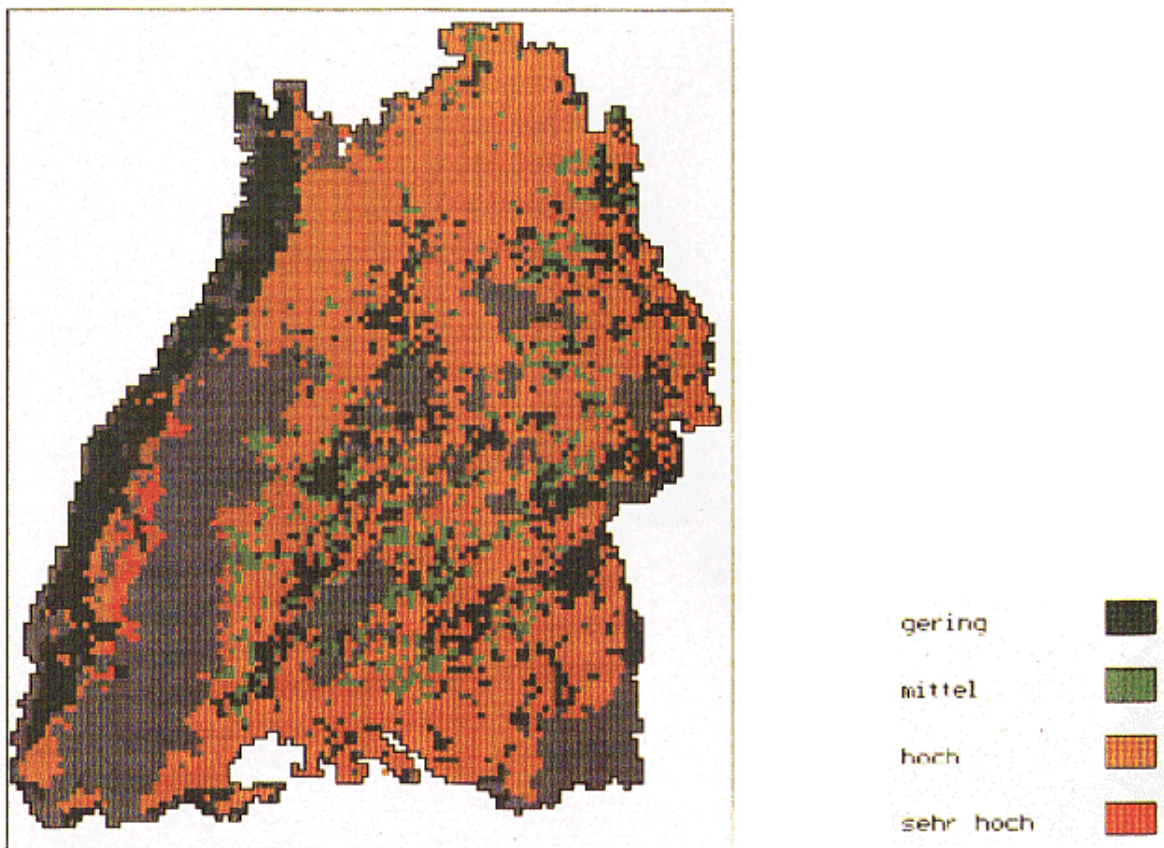


Abb. 6: Abschätzung des Erosionsrisikos nach HEIMLICH & BILLS (1984) (Quelle: eigene Bearbeitung nach Daten von Schweikle et al., 1985, ALB, LAP und StaLaA)

Zwölf Prozent der Raster weisen ein *mittleres* Erosionsrisiko auf, deren tatsächliche Erosionsrate unter den gegebenen Bewirtschaftungsbedingungen unterhalb der tolerierbaren liegt, die aber bei ungünstigeren Voraussetzungen einen Abtrag aufweisen können, der T übersteigt.

Durch Hinzuziehen einer Karte, die Auskunft über das Verhältnis von A zu T gibt (hier nicht abgebildet), kann innerhalb der Klasse *hoher* Gefährdung eine Abschätzung darüber erfolgen, in welchen Gebieten ein hoher Aufwand zur Risikominimierung betrieben werden muß bzw. wo mit einfacheren Maßnahmen Erfolge erzielt werden können. Als Gebiete mit vordringlichem Handlungsbedarf kristallisieren sich der Kraichgau, die Vorbergzonen von Odenwald und Schwarzwald sowie Teile Oberschwabens und des Albvorlandes heraus. Bei den genannten Gebieten handelt es sich um sehr unterschiedlich strukturierte Agrarregionen, für die individuell Maßnahmen ergriffen werden müssen.

6 Ausblick

Die Studie zeigt, daß mit der USLE, die im Rahmen großmaßstäbiger Erosionsmodellierungen heutzutage zunehmend durch physikalisch begründete Modelle ersetzt wird, für Abschätzungen der Bodenerosion im regionalen Maßstab auch in Zukunft gute und für die Landesplanung aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können. Die Vorhaltung der Daten in einem Geographischen Informationssystem erweist sich als sinnvoll, da entsprechend den sich wandelnden Zielvorgaben z.B. hinsichtlich der als tolerierbar einzustufenden maximalen Bodenabträge in relativ kurzer Zeit und mit geringem Arbeitsaufwand neue Szenarien erstellt und graphisch aufbereitet werden können. Die gewonnenen Ergebnisse einer Modellierung aber hängen in hohem Maße von der Qualität der Eingangsdaten ab. Die bisher zur Verfügung stehenden Flächendaten der manuell erhobenen Topographiefaktoren L und S, auf die die USLE mit hoher Sensibilität reagiert, entsprechen nicht der gewünschten Güte. In einem weiterführenden Projekt, das wiederum vom Ministerium Ländlicher Raum finanziert wird, sollen diese Relieffaktoren daher landesweit computergestützt automatisch aus dem Digitalen Höhenmodell des Landes Baden-Württemberg abgeleitet werden. Gleichzeitig wird eine genauere räumliche Abgrenzung von C-Faktoren durch Einsatz von Satellitenbildern angestrebt.

Literatur

- /1/ AUERSWALD, K. (1986): Einstufung der Bodenerodibilität (K-Faktor) nach dem Klassenbeschrieb der Reichsbodenschätzung für Südbayern.- Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 27: S. 344-351.
- /2/ AUERSWALD, K. (1987): Sensitivität erosionsbestimmender Faktoren.- Wasser & Boden 1987/1: S. 34-38.
- /3/ AUERSWALD, K. M. KAINZ & W. VOGL (1986): Vergleich der Erosionsgefährdung durch Maisfruchtfolgen (C-Faktor).- Bay. Landw. Jahrb. 63/1: S. 3-8.
- /4/ AUERSWALD, K. & F. SCHMIDT (1986): Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen.- GLA-Fachberichte 1, München.
- /5/ DEUTSCHER WETTERDIENST (1953): Klima-Atlas von Baden-Württemberg.- Bad Kissingen.
- /6/ HEIMLICH, R.E. & N.L. BILLS (1984): An improved soil erosion classification for conservation policy.- Journal of Soil and Water Conservation 39: S. 261-266.
- /7/ MOORE, I.D. & J. BURCH (1987): Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation.- Soil Science Society of America Journal 50: S. 1294-1298.
- /8/ ROGLER, H. & U. SCHWERTMANN (1981): Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte Bayerns.- Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 22: S. 99-112.
- /9/ SCHWEIKLE, V., M. MÜLLER, B. ZUCK, R. PITSCH, D. DÖRR, K. TIMMERBERG & Y. BUCHLEITNER (1985): Regen- und Oberflächenabflußfaktoren (R) sowie Bodenerodierbarkeitsfaktoren (K) zur quantitativen Abschätzung des Bodenabtrags durch Wasser in Baden-Württemberg nach dem Verfahren von Wischmeier und Smith.- Anlage zum Bericht der LfU vom 11.11.85.
- /10/ SCHWERTMANN, U., W. VOGL & M. KAINZ (1987): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.- Stuttgart.
- /11/ WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (1978): Predicting rainfall erosion losses. A Guide to conservation planning.- USDA Agr. Handbook 537, Washington.

Abschätzung der Bodenerosion durch Feldversuche und modellanalytische Ansätze

Bernd Murschel & Gerd Clemens, Hohenheim

1 Einführung

Verschiedene gesellschaftliche Gruppen stellen an Böden und Landschaften unterschiedliche Ansprüche. Durch das Bodenschutzgesetz jüngst auch rechtlich verankert, werden Böden nicht mehr allein als Standort für Nutzpflanzen angesehen, sondern es werden ihnen eine Reihe weiterer Funktionen (Standort für Wildpflanzen und Bodenorganismen, Puffer usw.) zugewiesen. Folglich werden im Bezug auf Erosion nicht allein "off-site"-Schäden als für die Allgemeinheit relevant betrachtet, sondern auch "on-site"-Schäden. Grundsätzlich sind mit dem Ziel, Agrarlandschaften umweltgerecht zu nutzen, verschiedene Personengruppen gefordert: Die, die diese Landschaften nutzen und die, die sie planen. Sie sind angehalten, Produktionsverfahren bzw. Agrarlandschaften so zu gestalten, daß Erosion verhindert wird. Dazu sind unterschiedliche Konzepte und Modelle erforderlich, die zu bewerten und auszuwählen sind.

Für die verschiedenen Betrachtungsebenen - landwirtschaftliche Nutzfläche einerseits, ganze Landschaft und Regionen andererseits - sind Risikofaktoren und Effekte von Maßnahmen richtig zu beurteilen. Überprüft man daraufhin das zur Verfügung stehende Instrumentarium an Feldmethoden oder Modellen, wird klar, daß die mit diesen gewonnenen Aussagen eine unterschiedliche Güte in Bezug auf Raum und Zeit haben. Das soll z.T. an eigenen Untersuchungsergebnissen aus dem Kraichgau gezeigt werden.

2 Methoden

2.1 Einsatz von Feldmethoden zur Quantifizierung der Bodenerosion

Zu unterscheiden sind die **indirekte Methode (a)**, mit der die Erodibilität von Böden charakterisiert wird und **Umsatz- (b)** und **Bilanzmessungen (c)**, mit denen der Bodenabtrag direkt gemessen wird.

Bei der **indirekten Methode (a)** werden solche Merkmale von Böden ermittelt, die für den Bodenabtrag von Bedeutung sind (Infiltrationsfähigkeit, Aggregatstabilität, Körnung etc.). Die Methoden, die dabei zum Einsatz kommen, sind in der Regel relativ einfach und mit vertretbarem Aufwand durchzuführen. Aus **Abb. 1** ist ersichtlich, daß solche Methoden (hier Aggregatstabilität nach BECHER & KAINZ, 1983) fein genug sind, Einflüsse unterschiedlicher Bewirtschaftungsweisen nachzuweisen. Probleme treten dadurch auf, daß die gemessenen Merkmale zeitlich und räumlich stark variieren können. So stieg beispiels-

weise, wie in **Abb. 2** ersichtlich, die Aggregatstabilität von Mai bis Juli insbesondere bei den Pararendzinen an, während sie bei den Parabraunerden abnahm.

Will man mit indirekten Meßgrößen arbeiten, sei es zum Vergleich von Bewirtschaftungsweisen oder als Eingabeparameter in Modelle, so ist es erforderlich deren Variabilität zu erkennen und durch die Art und den Umfang der Beprobung sowie bei der Art der Auswertung zu berücksichtigen. Wir haben Untersuchungen zur räumlichen Variabilität durchgeführt und mit geostatistischen Verfahren ausgewertet. Die **Abb. 3** zeigt, daß die Aggregatstabilität räumlich stark variiert. Die Auswertungen ergeben eine räumliche Abhängigkeit der Aggregatstabilität mit maximaler Driftausprägung in Richtung der Hangneigung.

Bei **Umsatzmessungen (b)** werden Abflüsse und Abträge bei natürlichen oder simulierten Niederschlägen von exakt definierten Flächen gemessen. Sie liefern für exakt definierte Rahmenbedingungen genaue Ergebnisse. Die Messungen sind allerdings sehr aufwendig und wegen der kleinen Referenzfläche ist eine Übertragbarkeit auf größere Flächen nicht möglich.

Bei **Bilanzuntersuchungen (c)** werden ein früher vorhandener Zustand (z.B. Oberfläche) mit einem späteren verglichen, wobei Bodenab- und/oder -aufträge gemessen werden können. Dazu gehören die meisten der beschriebenen Feldmethoden.

Zu Nagelpegel und Sedimentfangkästen ist zu sagen, daß sie bei geringem Aufwand sehr wohl dazu geeignet sind Prozesse zu verdeutlichen. Es ist aber problematisch, quantitative Aussagen für größere Flächen zu machen, da die Referenzflächen klein sind oder das Einzugsgebiet (bei Sedimentfangkästen) schwer zu definieren ist. Bei dem Einsatz von Nagelpegel im Liefergebiet besteht ferner die Gefahr, daß die Strömungsverhältnisse und damit der Abtrag verändert wird. Eine Ergänzung der Untersuchungen z.B. durch Schadenskartierungen ist daher erforderlich.

Durch Schadenskartierungen können die Abträge auf größeren Flächen und während längeren Zeiten (Einzelereignisse bis Vegetationsperiode) ermittelt werden. Wesentliche Nachteile sind der hohe Aufwand und die Unterschätzung der Flächenspülung.

Die Bedeutung der Faktoren Zeit und Bezugsfläche wird deutlich bei der Gegenüberstellung von Schadenskartierungsergebnissen aus dem Kraichgau. EICHLER (1974/75) ermittelte bei einem Einzelereignis unter Mais $154-174 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, DIKAU (1986) unter Hackfrüchten auf verschiedenen Schlägen und über die ganze Vegetationsperiode $12-248 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ und QUIST (1984) als 3-jähriges Mittel einer Zuckerrüben-Getreide Fruchtfolge $16-77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. QUIST hebt die Bedeutung des Faktors Zeit hervor durch seine Beobachtung, daß bei durchschnittlichen Ereignissen Bodenmaterial in Tiefenlinien am Hang sedimentiert (Stichwort *Wellbrett-relief*) und daß diese Tiefenlinien bei sehr starken Ereignissen verstärkt ausgeräumt werden.

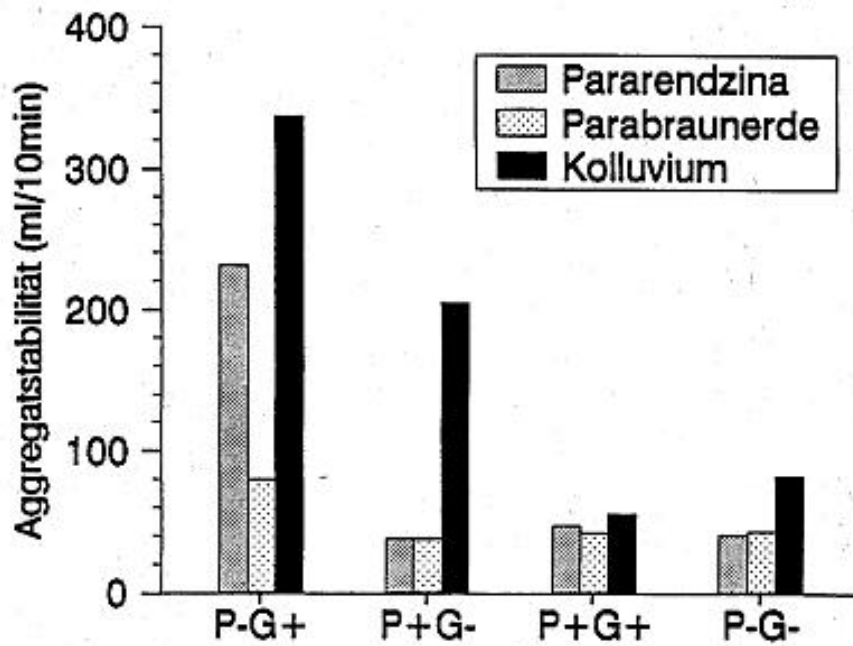


Abb. 1: Aggregatstabilität (als perkolierte Wassermenge in 10 Min.) von drei Bodentypen unter Zuckerrüben auf vier Betrieben im Kraichgau mit wendender/nichtwendender Bodenbearbeitung (P+/P-) und mit/ohne Gülle (G+/G-)

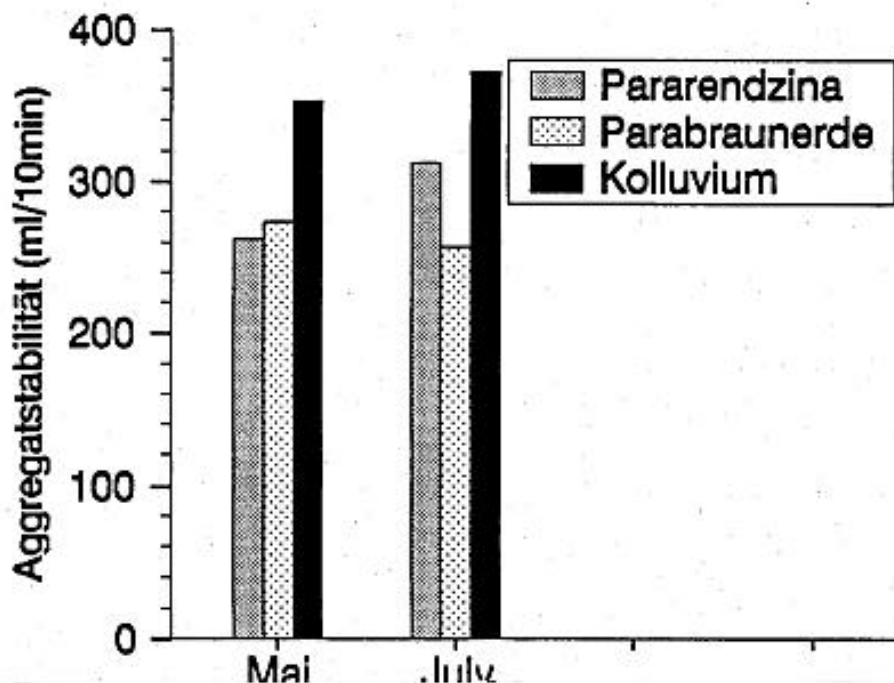


Abb. 2: Aggregatstabilität (als perkolierte Wassermenge in 10 Min.) von drei Bodentypen eines Zuckerrübenschlages im Mai und Juli als Mittelwert von 52 Meßwerten auf einer 90×100m großen Meßparzelle (aus KERNER, 1991, unveröffentlicht)

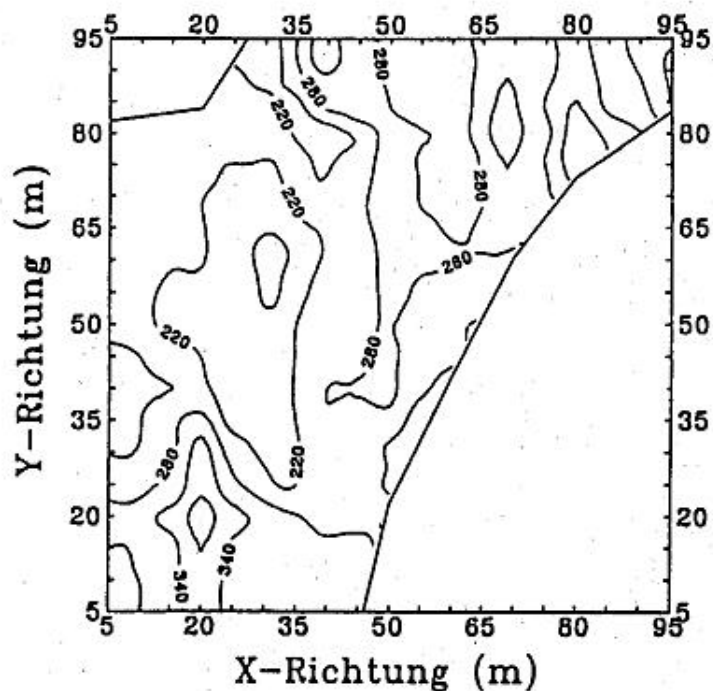


Abb. 3: Isolinien­darstellung (Linienabstand 60 ml) der Aggregatstabilität (in ml perkolierter Wassermenge), gemessen im Mai auf Pararendzina unter Zuckerrüben, aus 52 gemessenen und 693 gekrigten Werten (aus KERNER & MURSHEL, 1991)

Für Umsatz, Nagelpegel, Sedimentfangkästen und Schadenskartierungen auf kleiner Fläche gilt gleichermaßen, daß bei der kleinen Referenzfläche eine Übertragung auf größere Flächen problematisch ist.

Werden die bisher genannten Methoden zur Beurteilung des Erosionsgeschehens in Einzugsgebieten oder Landschaften eingesetzt, sind Messungen in einer größeren, dem Standortmuster (Resultierende aus Topographie, Boden- und Nutzungsmuster) entsprechenden Zahl zu fordern.

Bei **Landschaftsbilanzen** werden Erosionsvorgänge über eine längere Zeit und größere Flächen integriert, wobei grundsätzlich sowohl Verluste von den Hängen als auch Gewinne in den Senken berechnet werden können.

Wir haben solche Landschaftsbilanzen von 4 unterschiedlich ausgestatteten und genutzten Einzugsgebieten im Kraichgau gemacht (CLEMENS, 1991). Es wurde dabei der Gesamtabtrag (seit der Entwaldung) ermittelt durch Vergleich der Horizontmächtigkeiten nicht erodierter Böden unter Wald mit der von kartierten Böden unter Acker. Ferner wurde der rezente Abtrag berechnet durch Datierung der Kolluvien unter Verwendung von Cadmium und Blei als Tracer. Dies war möglich, da beide Schwermetalle verstärkt seit ca. 40 Jahren in Böden eingetragen werden und dort wenig mobil sind.

Die wichtigsten Ergebnisse sind in **Tab. 1** zusammengestellt. Sie zeigen, daß die beiden Landschaften bei Münzesheim deutlich stärker erodiert sind als die bei Gondelsheim. Dies wird auf unterschiedlich lange Nutzung (frühe Entwaldung in Münzesheim) zurückgeführt. Die höchsten rezenten Abträge wurden in den Landschaften Münzesheim B und Gondels-

heim B ermittelt, Landschaften, die sich auszeichnen durch hohen Hackfruchtanteil (33 bzw. 50 %) und relativ große, überwiegend hangabwärts bearbeitete Schläge. In der ebenfalls intensiv genutzten Landschaft Gondelsheim C wird die geringere rezente Erosion auf die Querbearbeitung der langgestreckten Parzelle zurückgeführt. In der terrassierten, wenig intensiv genutzten Landschaft Münzesheim A ist die früher starke Erosion durch die Terrassen deutlich reduziert.

Tab. 1: Abtrag von Bodenmaterial aus dem Hügelbereich und rezente Akkumulation in den Senken von 4 unterschiedlich genutzten und ausgestatteten Einzugsgebieten im Kraichgau

Landschaft	Gesamtverluste 1000 t ha ⁻¹	Gesamtgewinne 1000 t	rezenter Abtrag) ¹	rezenter Abtrag) ¹	Anteil rezent/ gesamt %
Münzesheim A	12,9	8,3) ³	0,6) ³	14) ³	4) ³
Münzesheim B	12,6	49,4	3,4	84	27
Gondelsheim B	7,6	67,0	2,7	67	35
Gondelsheim C	8,4	52,0	1,5	39	18

)¹ rezenter Abtrag = Gesamtgewinne/Fläche des Liefergebietes

)² zugrunde gelegt werden 40 a

)³ angenommen wird ein Auftrag von 1 dm

Auch diese Methoden bergen einige Probleme. So wird der Abtrag von unverwittertem Löß bei den Gesamtverlusten nicht berücksichtigt und lediglich ein Totalverlust der Parabraunerde in die Rechnung eingesetzt (Unterschätzung des Abtrags). Bei Traceruntersuchungen bleibt der Anteil von Material unberücksichtigt, der das Einzugsgebiet verlassen hat (Unterschätzung).

2.2 Einsatz von Modellen zur Schätzung der Bodenerosion

2.2.1 Grundsätzliches

Modelle beschreiben ein komplexes System durch vereinfachende analoge, physikalische oder mathematische Darstellungen. Häufig wird bei mathematischen Modellen nur ein Teilkomplex, wie der Wasser- und Stofftransport bzw. chemische oder biologische Prozesse in einem (Agrar-)Ökosystem dargestellt. Unter der Voraussetzung, daß diese Prozesse hinreichend exakt mathematisch-physikalisch formuliert werden können, läßt sich unter bekannten Randbedingungen eine rechnergestützte Simulation des Systems vornehmen.

Ein wesentlicher Vorzug bei der Verwendung von Modellen liegt in der flexiblen, schnellen und kostengünstigen Handhabung. Herkömmliche experimentelle Methoden sind dagegen in der Regel zeitaufwendiger, teuer und in der Fragestellung unflexibler. Verschiedene Szenarien der Landnutzung, der Produktionsweise oder Produktionsintensität lassen sich ohne Eingriffe in die Landschaft auf ihre Umweltwirkung abschätzen. Dies ist insbesondere im Bereich von Umwelt- und Naturschutzfragen interessant. Darüberhinaus kann das Ar-

beiten mit Modellen das Verständnis über das Systemverhalten verbessern. Das oft komplexe und nicht überschaubare Wirkungsgefüge kann dadurch transparenter werden.

Diesen Vorteilen der Verwendung von mathematischen Modellen stehen in der Praxis häufig eine Reihe von Nachteilen gegenüber. Ein bedeutender begrenzender Faktor stellt der Mangel an adäquaten Daten dar. Die Datenbereitstellung wird dann häufig zu einer zeit- und kostenintensiven Maßnahme, die die Vorteile der Modellanwendung zunichte machen kann. Dies kann vor allem bei Kurzzeitsimulationen zu Fehlern führen. Wichtig ist daher eine intensive Zusammenarbeit der klassischen Forschung und der Systemmodellierer.

Die Abgrenzung gegen das Systemumfeld durch Randbedingungen geschieht häufig über die Annahme konstanter Energie- oder Stoffflüsse oder konstanter Potentialdifferenzen. Diese Annahme wird selten aktuelle Feldbedingungen widerspiegeln. Die Genauigkeit der Modellergebnisse hängt wesentlich von der Güte der Eingabedaten ab. So muß die zeitliche Aggregation auf die Parameter abgestimmt werden. Bei höherer zeitlicher Diskretisierung sind die Systemzustände und Randbedingungen für die gleichen Zeitabschnitte zu definieren. Die räumliche Aggregation ist vor allem bei Gebiets- und Einzugsmodellern notwendig. Die Parameterbestimmung für flächenhafte Beziehungen kann über stochastische und geo-statistische Methoden erfolgen.

2.2.2 Modellarten

Agrarökosysteme sind dynamische Systeme. Sie zeichnen sich damit durch folgende Eigenschaften aus:

- a) die Zustandsgrößen des Systems (z.B. Bodenwasserhaushalt) ändern sich stetig
- b) das zeitliche Verhalten des Systems ist determiniert. Durch Anfangs- und Randbedingungen ist der weitere Ablauf für alle Zeiten festgelegt
- c) dynamische Systeme lassen sich durch Differentialgleichungen beschreiben

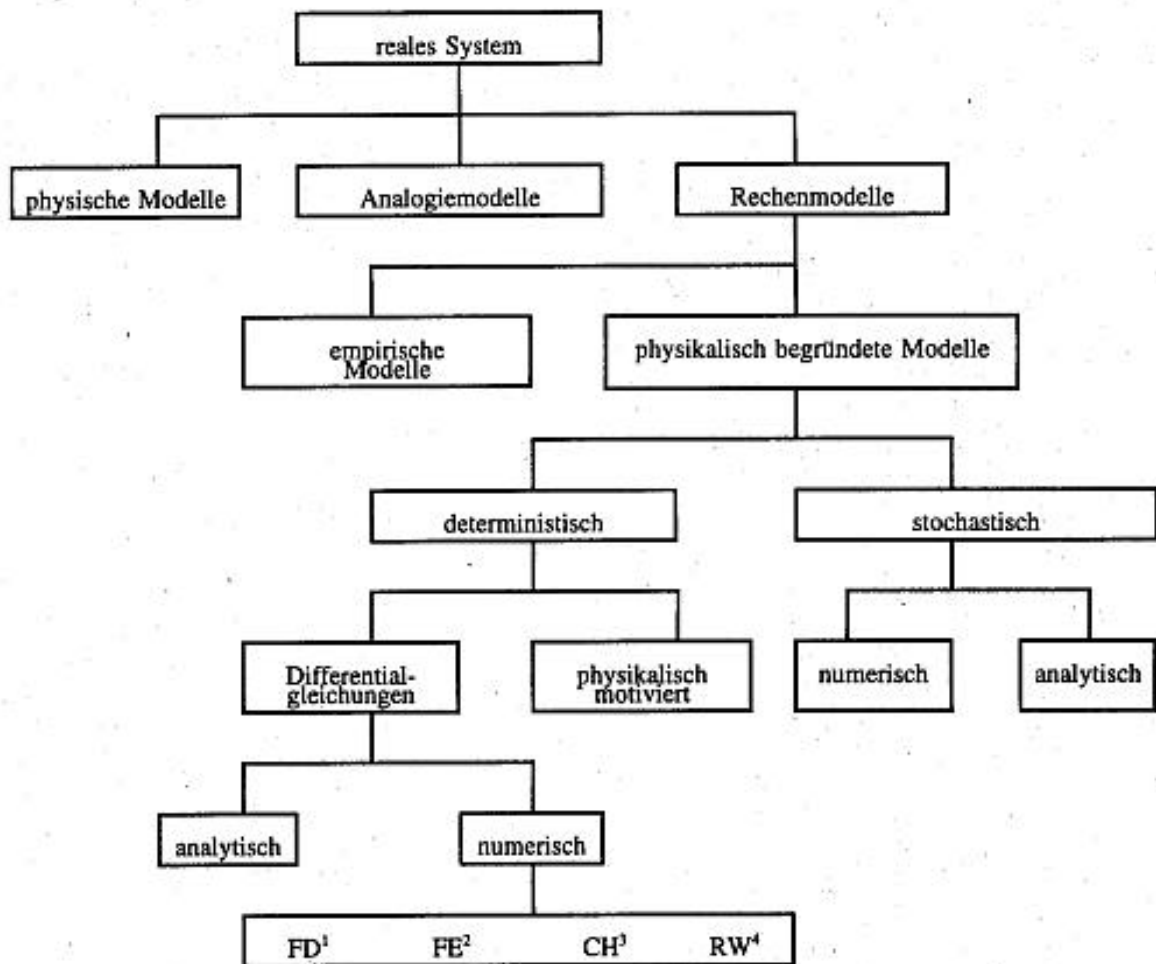
Eine Einteilung von Modellen kann in unterschiedlicher Weise erfolgen. Nach der Form der Prozeßbeschreibung erfolgt eine Unterscheidung in empirisch-mathematische (a), physikalisch-deterministische (b) und stochastische Modelle (c) (**Abb. 4**).

a) Empirische Modelle

sind Ursache-Wirkungsmodelle, in denen eine mathematische Übertragungsfunktion Eingabedaten und Antwort verbindet. Eine physikalische Beschreibung der Prozesse findet nicht statt. Erkenntnisse über das Systemverhalten sind damit nicht erreichbar. Entsprechend ist keine unmittelbare Übertragbarkeit auf andere Standorte und Bedingungen möglich. Der Rechenzeitbedarf und die Anforderung an Rechnerkapazitäten sind allgemein gering. Für Prognosezwecke sind diese Modelle nicht geeignet. Beispiele für empirische Modelle sind Regressions- und Korrelationsmodelle. Ihren Einsatz haben diese Modelle in den Bereichen, wo eine exakte physikalische, chemische oder biologische Beschreibung der Prozesse nicht bekannt ist und kostengünstige und schnelle Lösungen gesucht werden.

b) Deterministische Modelle

beschreiben die Änderung der Zustandsgrößen eindeutig aus dem jeweiligen Systemzustand und den Umwelteinwirkungen (BOSSEL, 1987). Tritt zu einem zeitabhängigen System eine ortsabhängige Komponente, ist also eine räumliche und zugleich zeitliche Abhängigkeit vorhanden, so treten partielle Differentiale nach der Zeit und dem Ort auf. Dieses ist bei komplexen Ökosystemen häufig. Zur annähernd exakten Lösung werden physikalisch-deterministische Modelle eingesetzt. Eine optimale Lösung, bei der alle Prozesse und alle Randbedingungen des Systems korrekt wiedergegeben werden, existiert in der Ökosystemanalyse nur in Ausnahmefällen. Daher ist man auf eine Vereinfachung der mathematischen Beschreibung der Prozesse angewiesen. Um eine Näherungslösung zu erreichen, werden analytische oder numerische Lösungsverfahren eingesetzt.



- 1 Finite Differenzen-Verfahren
- 2 Finite Elemente-Verfahren
- 3 Charakteristik-Verfahren
- 4 Random-Walk-Verfahren

Abb. 4: Einteilung von Modellen in der Bodenkunde

Dies führt zu **deterministisch-analytischen Modellen**, welche die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse stark vereinfachen, so daß sich unter bekannten Randbedingungen exakte Lösungen ableiten lassen. Der Vorteil der exakten Lösung ist allerdings mit einer Reihe von Nachteilen verknüpft. Durch die Vereinfachung wird das System fehlerhaft beschrieben. Die Modellparameter zur Beschreibung der Prozesse besitzen keine strenge physikalische oder chemische Bedeutung und sind deshalb auch nur begrenzt übertragbar. Exakte Lösungen existieren oft nicht bei allen Randbedingungen und nur bei homogenen Systembereichen (ROHDENBURG, 1989). Dadurch wird die Einsatzmöglichkeit des Modells begrenzt.

Um die Mängel der deterministisch-analytischen Modelle, vor allem die Schwierigkeit der Übertragbarkeit der Modellparameter zu umgehen, werden in **deterministisch-numerischen Modellen** Lösungsstrategien der numerischen Mathematik eingesetzt. Bei diesen Modellen geht man von einer exakten Beschreibung der Prozesse aus und löst die Transportgleichungen durch numerische Verfahren. Numerische Modelle besitzen den Vorzug, daß die Modellparameter eine physikalische oder chemische Bedeutung haben. Die Modelle sind also uneingeschränkt übertragbar. Der Einsatz für Prognosezwecke ist möglich und das Modell erlaubt eine Interpretation des Systems. Nachteilig wirkt sich bei diesen Modellen der hohe Rechenaufwand aus. Auch der Aufwand für die Parameterbestimmung und Kalibrierung ist allgemein höher. Ungenaue Lösungen können sich durch die zeitliche und räumliche Diskretisierung und durch numerische Fehler ergeben.

c) Stochastische Modelle

nehmen eine Sonderstellung ein. Diese enthalten eine Komponente, die die räumliche Varianz von Parametern beschreibt (RICHTER, 1987). Damit kann die Heterogenität eines Gebiets erfaßt werden. In Bezug auf das Lösungsverfahren sind sowohl analytisch-deterministisch-stochastische als auch numerisch-deterministisch-stochastische Modelle möglich. In der stochastischen Hydrologie werden die hydrologischen Meßwerte als Zufallserscheinungen gedeutet. Dabei werden unterschiedliche Verteilungsfunktionen verwendet.

Aus der Abhandlung über Modellarten kann entnommen werden, daß deterministisch-numerische Modelle sich am besten zur Beschreibung der Dynamik in einem Agrarökosystem eignen. Es ist allerdings im Bereich der Bodenerosion bis heute kein Modell vorhanden, welches alle Bodenabtragsprozesse physikalisch exakt beschreibt.

2.2.3 Vergleich der Modelle USLE, dABAG und CREAMS

Alle in der Literatur dargestellten Modelle enthalten mehr oder weniger empirische Komponenten. Es werden im folgenden zwei empirische (USLE und dABAG) und das physikalisch-empirische Modell CREAMS miteinander verglichen. Bei der Anwendung sind für diese Modelle jeweils deren Homogenitätskriterien und deren Vor- und Nachteile zu berücksichtigen.

Die drei Modelle erlauben eine unterschiedlich starke Differenzierung der Geländemorphologie, des Bodens, der Vegetation und der Bodenbearbeitung (**Tab. 2**). Alle Modelle haben gemeinsam, daß die Bodeneigenschaften vertikal und horizontal homogen sind. Im

Gegensatz zur USLE sind dABAG und CREAMS geeignet, eine räumliche Differenzierung der Vegetation und Bodenbearbeitung vorzunehmen. Mit der dABAG kann die Fläche als gegliedertes Einzugsgebiet dargestellt werden. Mit CREAMS kann ein differenzierter Hang beschrieben werden. Die USLE setzt einen homogenen Hang voraus.

Homogenitätskriterien der Bodenerosionsmodelle USLE, dABAG, CREAMS (nach BORK 1987, verändert)			
Modellsystem zur Schätzung der Bodenerosion	Eigenschaften, deren Homogenität das jeweilige Modell voraussetzt		
	Gelände- oberfläche	Boden	Vegetation und Bodenbearbeitung
USLE	ungegliederter Hang	vertikal und horizontal homogen	räumlich nicht differenzierbar
dABAG	gegliedertes Einzugsgebiet	vertikal und horizontal homogen	räumlich (eingeschränkt) differenzierbar (Polygone)
CREAMS	gegliederter Hang	vertikal und horizontal eingeschränkt differenzierbar	räumlich eingeschränkt differenzierbar

Tab. 2: Homogenitätskriterien der Modelle USLE, dABAG und CREAMS

Der wesentliche Vorzug des empirischen USLE-Modells liegt in der einfachen Handhabbarkeit und der Möglichkeit, mit geringem Aufwand schnell Ergebnisse zu erhalten (Tab. 3). Dem gegenüber stehen die Nachteile der bisher fehlenden Überprüfung aller Faktoren der USLE. Aus Vergleichen von Erosionsmessungen und Schätzungen mit der USLE zeigt sich eine deutliche Überbewertung der Bodenerosion mit der USLE.

Die dABAG basiert auf den Grundlagen der USLE. Eine flächenhafte Aussage wird mit der dABAG durch die räumliche Diskretisierung (in Verbindung mit Geographischen Informationssystemen) erhalten. Die angesprochenen Nachteile der USLE gelten auch für die dABAG.

Das CREAMS-Modell besitzt den Vorzug einer stärkeren physikalischen Ausrichtung der Beschreibung der Prozesse. Es kann für Einzelereignisse wie auch für langfristige Aussagen verwendet werden. Der Nachteil des Modells liegt insbesondere in der aufwendigen Datenbestimmung.

Modellergebnisse von USLE, dABAG und CREAMS

Für ein eingrenzbare Teileinzugsgebiet (s. Tab. 1, Gondelsheim C) wurden die Modelle angewendet und die Rechenergebnisse der Bodenerosion miteinander verglichen. Mit der USLE und dABAG wurde der langfristige mittlere jährliche Bodenabtrag für eine Zuckerrüben-Körnermais-Getreide-Fruchtfolge berechnet. Die Simulation mit CREAMS verwendete Tageswerte für Temperatur und Niederschlag für eine Zuckerrüben-Winterweizen-Körnermais-Winterweizen-Fruchtfolge.

Tab. 3: Vor- und Nachteile der Modelle USLE, dABAG und CREAMS

Vergleich der Modelle USLE, dABAG, CREAMS und der Feldmethoden hinsichtlich ihrer Vorteile und Nachteile

Modell oder Feldmethoden	Vorzüge	Nachteile
USLE	<ul style="list-style-type: none"> > einfach > liefert schnell Ergebnisse 	<ul style="list-style-type: none"> > Gültigkeit der Faktoren in Europa? > für schluffreiche Böden K-Faktor nicht definiert > fördert nicht das Prozeßverständnis > nur eingeschränkt für Beratung / Planung verwendbar > nur langfristiger mittlerer Abtrag
dABAG	<ul style="list-style-type: none"> > räumlich besser differenzierbar > erlaubt flächenhafte Darstellung von Belastungsgebieten 	<ul style="list-style-type: none"> > die Nachteile der USLE gelten auch hier > Notwendigkeit eines Rechners > keine Dynamik
CREAMS	<ul style="list-style-type: none"> > für Einzelereignisse und langfristige Prognose verwendbar > für Beratung / Planung verwendbar > stärker physikalisch begründet > dynamisch 	<ul style="list-style-type: none"> > Parameterbestimmung aufwendig > komplizierter > Notwendigkeit eines Rechners
FELDMETHODEN		
- INDIREKTE METHODE	<ul style="list-style-type: none"> > relativ geringer Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> > Übertragbarkeit auf Erosion > zeitliche und räumliche Variabilität
- DIREKTE METHODE (Schadenskartierung)	<ul style="list-style-type: none"> > fördert das Prozeßverständnis > kleine Referenzflächen 	<ul style="list-style-type: none"> > Unterschätzen der Flächenerosion > keine Einsatzmöglichkeit für Beratung / Planung
- LANDSCHAFTSBILANZ mit Tracer	<ul style="list-style-type: none"> > integriert über Zeit und Raum 	<ul style="list-style-type: none"> > hoher Aufwand > Fehlerquellen > kein Rückschluß auf Prozesse und Einzelereignisse

a) USLE

Die reinen Lieferflächen wurden gegenüber den Anlieferungsflächen, dem Kolluvium, abgetrennt. Da sowohl mit dem Modell USLE als auch mit dem CREAMS-Modell kein komplexes Einzugsgebiet in einem Durchgang berechnet werden kann, wurde das Untersuchungsgebiet in 5 Teilbereiche mit weitgehend homogenen Eigenschaften unterteilt. In **Abb. 5** ist das Teileinzugsgebiet dargestellt. Das Kolluvium ist weiß eingezeichnet. Die Schätzung mit der USLE ergab einen mittleren jährlichen Abtrag von 54,7 t/ha bezogen auf das Liefergebiet.

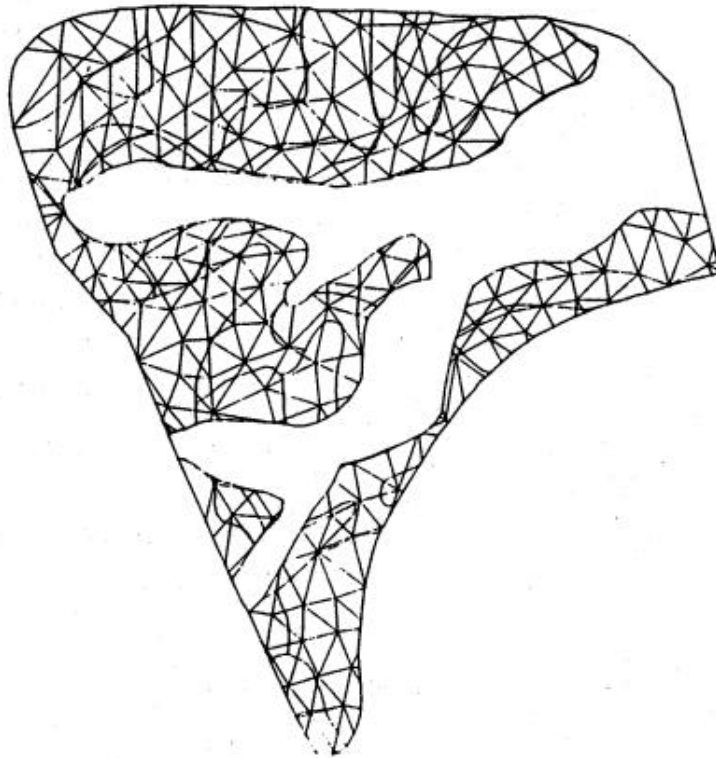


Abb. 5: Teileinzugsgebiet für die Berechnungen nach der USLE. Anlieferungsgebiete (Kolluvium) sind weiß eingezeichnet

b) CREAMS

Analog zu den Berechnungen mit dem USLE-Modell wurde das CREAMS-Modell angewandt. Die Simulation verwendete Wetterdaten der Jahre 1978 bis 1988 aus den umliegenden Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Beispielhaft wurden bodenerhaltende Maßnahmen in das Modell integriert. Diese Maßnahmen sind in **Abb. 6** dargestellt. Sie zeigen, daß insbesondere Mulchsaatverfahren mit Zwischenfrüchten eine sehr deutliche Reduzierung der Bodenabträge bewirken. Maßnahmen wie Grasstreifen in Hangmitte oder ein Ableitungskanal für Oberflächenwasser zeigen dagegen nur eine geringe Wirkung. Die Schätzung der Bodenabträge ergibt unter diesen Annahmen deutlich geringere Werte als mit den anderen Modellen. Als Flächenerosion wurde 9,2 t/ha und Jahr berechnet. Die zusätzliche Berücksichtigung von Rinnenerosion führt zu Abträgen in der Größenordnung von 14 t/ha und Jahr.

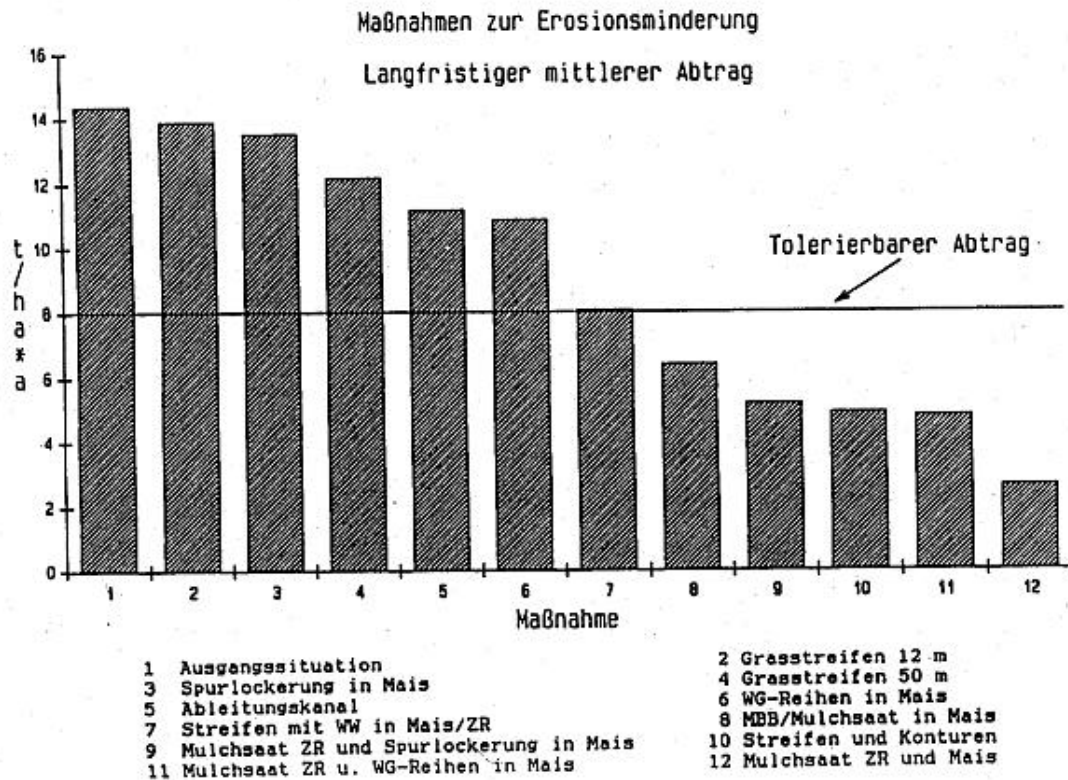


Abb. 6: Bodenabtragsschätzungen für verschiedene bodenerhaltende Maßnahmen mit dem CREAMS-Modell

c) dABAG

Das Modell dABAG erlaubt die flächenhafte Darstellung der Bodenabtragungsmengen. In **Abb. 7** ist dies dargestellt. Als Problem erweist sich bei der dABAG die Abgrenzung von reinen Liefergebieten von Bodenmaterial und den reinen Sedimentationsgebieten. Mit der USLE und dem CREAMS-Modell wurde das Kolluvium als Sedimentationsgebiet betrachtet. Die Schätzungen mit der USLE ergeben für die Bereiche ohne Kolluvien einen mittleren jährlichen Bodenabtrag von 57,1 t/ha. Das Modell berechnet darüberhinaus aber auch im Kolluvium Flächen mit Bodenabträgen. Werden alle Flächen, für die gilt Abtrag > Sedimentation zusammengefaßt, ergibt sich ein mittlerer jährlicher Austrag von 74,1 t/ha.

Bewertung der Modellergebnisse und der Kartierung

Die Ergebnisse der Modellrechnungen im Vergleich zu den durch Datierung geschätzten Abtragungsmessungen sind in **Tab. 4** dargestellt.

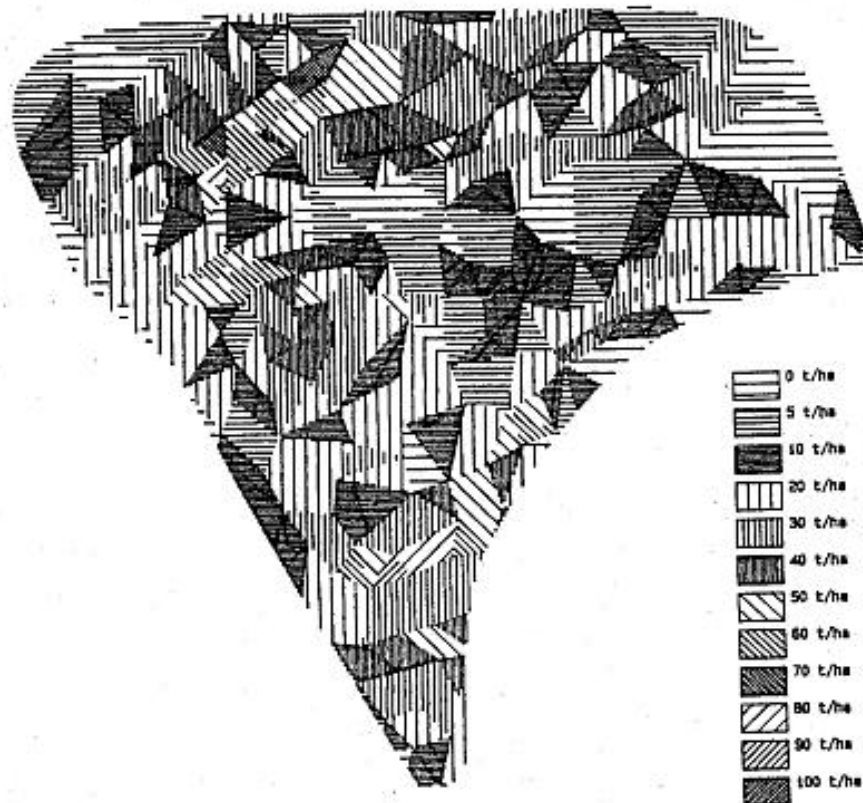


Abb. 7: Bodenabtragsschätzung mit der dABAG

Tab. 4: Ergebnisse von Modellrechnungen und Kartierung

Ergebnisse von Modellrechnungen und Kartierung (Landschaftsbilanz)		
Modell	Abschätzung der Bodenerosion nach	
	Austrag aus Liefergebiet in t/ha - Jahr	Abtrag + Sedimentation im Liefergebiet in t/ha - Jahr
USLE ¹⁾	54,7	
dABAG ¹⁾		57,1
ohne Kolluvium-Bilanz alle Flächen: Abtrag > Sedimentation		74,1
CREAMS ²⁾		
Flächenerosion	9,2	
Flächen- + Rinnenerosion	13,8	
Kartierung - Landschaftsbilanz ¹⁾	67,0	

1) langfristiger (<20 Jahre) mittlerer jährlicher Bodenabtrag

2) jährlicher Bodenabtrag der Fruchtfolge Zr-Ww-Km-Ww (Mittelwert aus 11 Jahren)

Der Vergleich zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Schätzungen der USLE mit der dABAG und der Kartierung. Die Schätzungen mit dem Modell CREAMS liegen deutlich niedriger. Der Vergleich wird aber dadurch erschwert, daß unterschiedliche Betrachtungsräume und Zeiten vorhanden sind. So werden mit dem Modell dABAG nicht die gleichen Flächen (Kolluvien) als Eintragsflächen angenommen wie mit den anderen Modellen und der Landschaftskartierung. Diese "Bilanz-Betrachtung" der dABAG liefert daher auch höhere Abtragungswerte, insbesondere gegenüber dem CREAMS-Modell. Die geringen Abtragungsschätzungen mit dem CREAMS-Modell können u.U. durch die relativ geringe Simulationsdauer von 11 Jahren erklärt werden. Es ist bekannt, daß Bodenabträge besonders durch katastrophale Ereignisse geprägt werden. In den Jahren 1978 bis 1988 fanden aber zu wenig erosive Einzelereignisse statt.

Das Modell USLE zeigt eine gute Übereinstimmung der Abtragungsschätzungen mit der Berechnung durch eine Landschaftsbilanz und den Schätzungen der dABAG ohne Berücksichtigung der Kolluvien. Verschiedene Felduntersuchungen zeigten allerdings, daß mit dem USLE-Modell eine deutliche Überschätzung der Abtragungswerte stattfindet. Aus den Untersuchungen von DIKAU (1986), JENNE und STAUSS (1988) und GEROLD (1990) geht eine 2- bis 16-fache Überbewertung der Bodenabträge mit dem USLE-Modell hervor (Tab. 5).

Tab. 5: Literaturvergleiche für Bodenerosionsschätzungen mit der USLE

AUTOR		Faktor USLE / Messung
DIKAU 1986 ¹⁾	Kraichgau	2-13fach
JENNE und STAUSS 1988 ²⁾	Schweizer Tafeljura 8 Jahre	2-16fach
GEROLD 1990 ³⁾	Kraichgau (Weiherbachprojekt)	Deutlich höher

1) Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen. Heidelberger Geographische Arbeiten, 81.

2) 8 Jahre Bodenerosionsforschung in einem Kleinzugsgebiet des Basler Tafeljuras. Regio Basiliensis, XXIX. Jahrgang 1 und 2.

3) Erfassung erosionswirksamer Faktoren zur Abschätzung der Flächenerosion auf Ackerflächen (Bodenerodierbarkeit). Zwischenpräsentation Weiherbachprojekt am 15.-16.11.1990 in Karlsruhe.

3 Schlußfolgerungen

Für den Einsatz von Modellen bzw. Feldmethoden bei der Abschätzung der Bodenerosion sind die räumliche und zeitliche Auflösung und somit der Anwendungszweck von Bedeutung.

3.1 Zeitliche und räumliche Einsatzmöglichkeiten von Modellen und Feldmethoden

In **Abb. 8** ist dargestellt, daß sich die USLE und die dABAG zur Schätzung der langfristigen mittleren Bodenabträge (Jahrzehnte) eignen. Auf Einzelereignisse oder Jahre kann nicht geschlossen werden. Bei der räumlichen Betrachtung kann das Modell dABAG von Parzellen bis auf größere Einzugsgebiete und Regionen angewendet werden. Einen großen zeitlichen und räumlichen Bereich decken die Modelle CREAMS und OPUS ab. Mit diesen Modellen ist es möglich, von Einzelereignissen bis über Jahrhunderte und von Punkt Betrachtungen bis bis zu Einzugsgebieten die Bodenerosion abzuschätzen. Den gleichen zeitlichen Rahmen deckt das Modell SWAM ab. Es ist aber gleichzeitig explizit auf Einzugsgebiete und Regionen beschränkt. Das Modell 2D-Erosion findet für Einzelereignisse und für Parzellen seine Anwendung. Für den Themenkomplex *Feldmethoden* kann ein ähnliches Schema aufgestellt werden. Der Gültigkeitsbereich in Bezug auf Fläche und Zeit ist in **Abb. 9** zusammengestellt. Die Einordnung der indirekten Methode ist schwierig, da die bestimmten Einzelmerkmale getrennt zu bewerten sind. Aus den Abbildungen wird deutlich, daß die verschiedenen Methoden und Modelle unterschiedlich gut geeignet sind je nach dem Ziel der zu gewinnenden Aussagen.

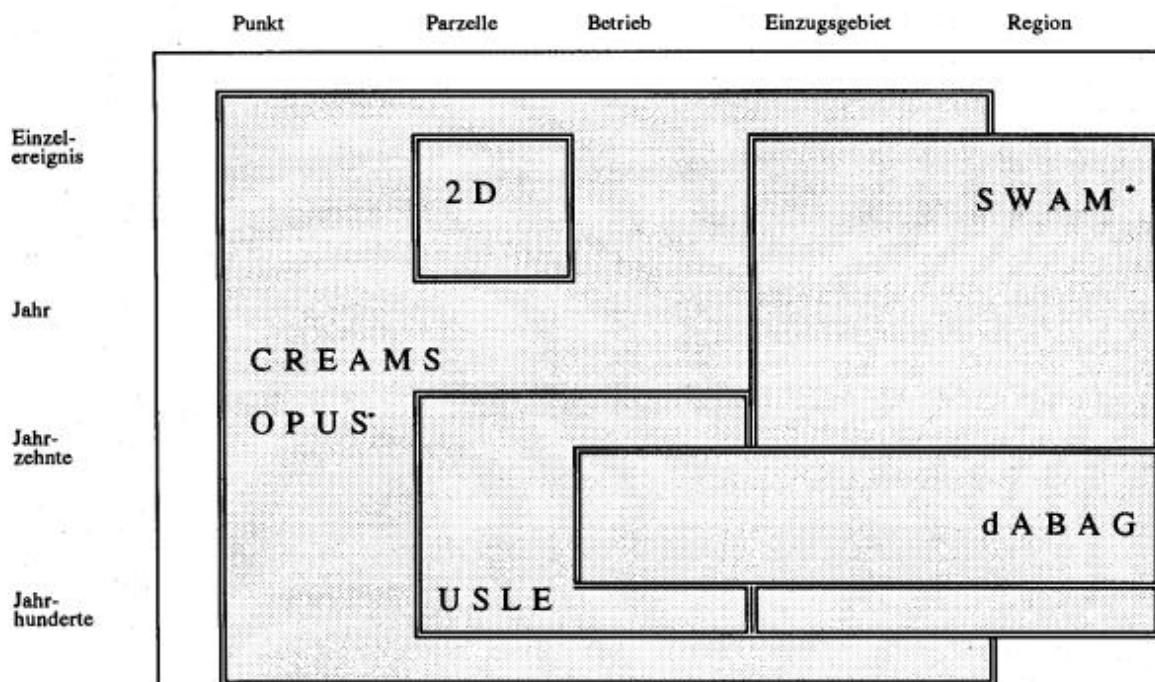


Abb. 8: Räumliche und zeitliche Anwendungsmöglichkeiten von Modellen

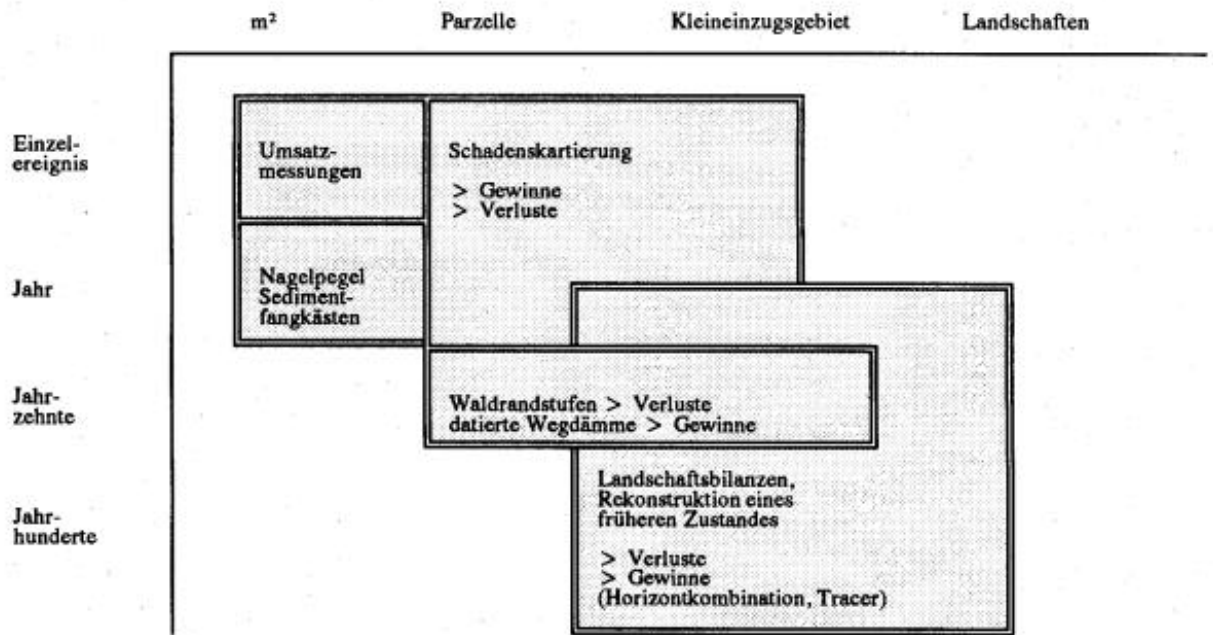


Abb. 9: Räumliche und zeitliche Anwendungsmöglichkeiten von Feldmethoden

3.2 Anwendungsbezogene Einsatzmöglichkeiten von Modellen und Feldversuchen

Bei den Einsatzmöglichkeiten von Modellen und Feldmethoden bei der Abschätzung der Bodenerosion ist zu unterscheiden zwischen der Anwendung in der Beratung und Planung im Landwirtschaftsbereich, in der Landschaftsplanung und in der Prozeßforschung.

Im Hinblick auf diese Gliederung zeigen die Methoden und Modelle eine unterschiedliche Eignung (**Tab. 6**). Bei den Feldmethoden eignen sich Umsatzmessungen und Schadenskartierungen für die Prozeßforschung. Für die Landschaftsplanung ist die Verwendung von Tracermethoden möglich. In der landwirtschaftlichen Beratung ist lediglich die Schadenskartierung bedingt geeignet.

Tab. 6: Einsatzmöglichkeiten von Feldmethoden und Modellen zur Abschätzung der Bodenerosion für die Beratung, die Landschaftsplanung und die Prozeßforschung

Methode / Modell	Beratung/ Planung in der Landwirtschaft	Landschafts- planung	Prozeß- forschung
Umsatzmessungen	-	-	x
Tracer	-	x	-
Schadenskartierung	(x)	(x)	x
USLE	(x)	(x)	-
dABAG	(x)	x	-
CREAMS	x	(x)	x
EROSION – 2D	(x)	(x)	(x)
OPUS ¹⁾	-	-	x
SWAM ¹⁾	-	x	x
WEPP ¹⁾	x	(x)	-

¹⁾ nicht verfügbar
x geeignet
(x) bedingt geeignet
- nicht geeignet

Bei den Modellen zeigt sich, daß die komplexeren und neuen Modelle OPUS und SWAM überwiegend im Bereich der Prozeßforschung Anwendung finden werden. Der Aufwand insbesondere für die Datenbeschaffung wird der Möglichkeit für einen breiten Einsatz in der landwirtschaftlichen Beratung gegenüberstehen. Im Gegensatz zu den stärker physikalisch orientierten Modellen eignen sich die USLE und die dABAG nicht für die Prozeßforschung. Die empirischen Grundlagen dieser Modelle erlauben keine Rückschlüsse auf die Systemzusammenhänge. Bis zur Entwicklung relativ einfacher aber auch stärker physikalisch ausgeprägter Modelle werden die USLE und die dABAG ihre Anwendung in der Beratung und Landschaftsplanung haben. Die Modelle 2-D-Erosion und CREAMS stellen einen Übergang zwischen den empirischen Modellen und den stärker physikalisch geprägten Modellen dar. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind weniger begrenzt und sie orientieren sich vor allem an den Möglichkeiten und Intentionen der Benutzer. Die Entwicklung des Modells WEPP wird ein insbesondere für die Beratung in der Landwirtschaft neues Modell ergeben. Wie bei OPUS und SWAM ist allerdings dieses Modell nicht verfügbar.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Abschätzung der Bodenerosion sowohl mit Feldmethoden wie auch mit Modellen nach wie vor problematisch ist. So ist bei empirischen Modellen deren Gültigkeitsbereich häufig nicht bekannt und damit eine Übertragbarkeit nicht gegeben. Eine Bewertung von Modellen hinsichtlich der Güte der Aussage ist nur bedingt möglich, da adäquate Vergleichsmessungen oft nicht zur Verfügung stehen. Ein Ziel muß daher die Entwicklung physikalischer Modelle sein. Mit Hilfe derartiger Modelle lassen sich standortspezifische Regressionsmodelle ableiten, welche einem größeren Anwenderkreis zur Verfügung stehen können. Den Nachteilen der Feldmethoden ist

durch die integrierte Anwendung verschiedener Methoden zu begegnen. Für den momentanen Zeitpunkt empfiehlt sich bei der Schätzung der Bodenerosion und der Auswahl von Methoden bzw. Modellen, sich deren Vor- und Nachteile bewußt zu sein und die Auswahl am Anwendungszweck sowie der zeitlichen und räumlichen Gültigkeit der Modelle/Methoden zu orientieren.

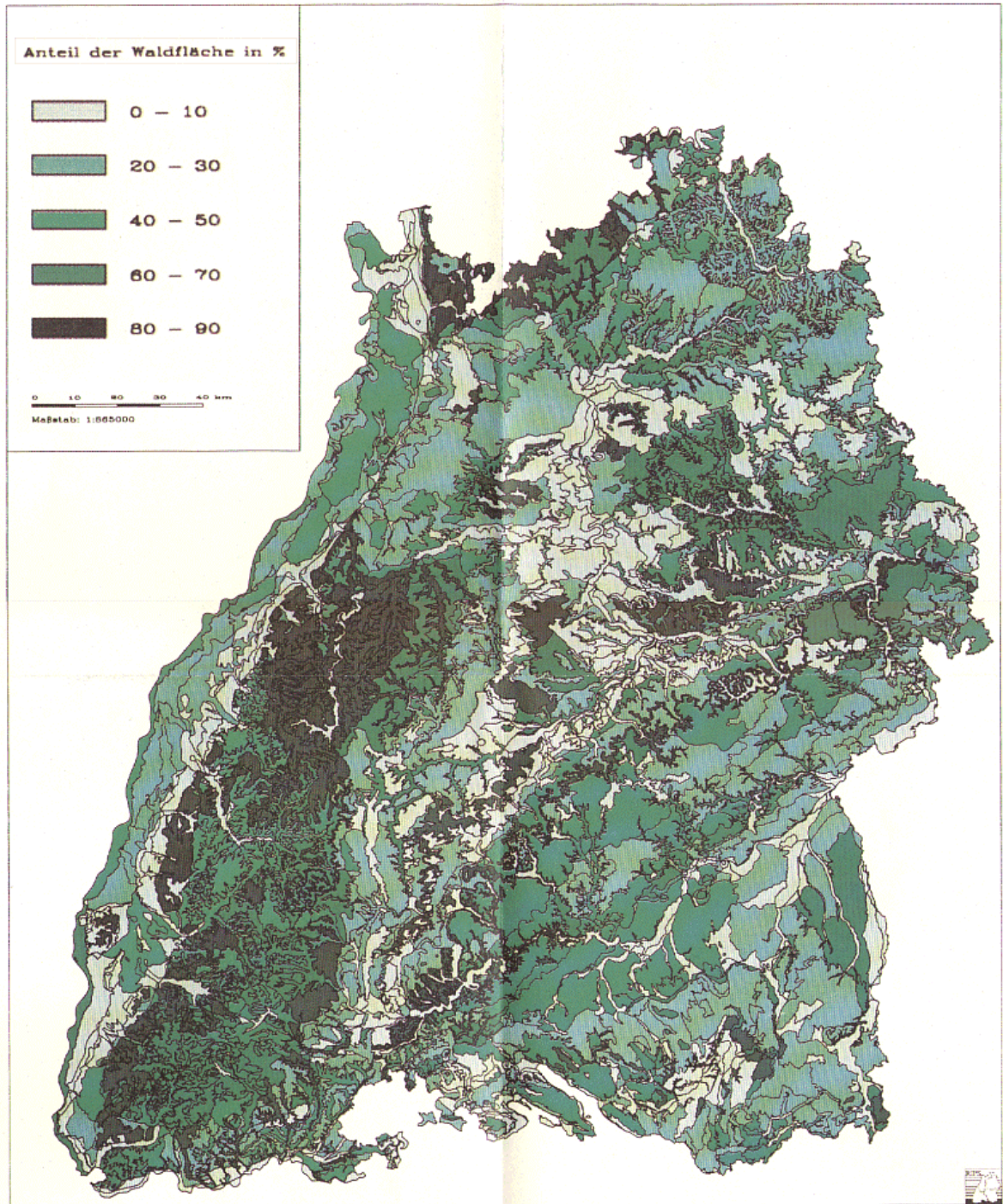
Literatur

- /1/ BECHER & KAINZ (1983): Auswirkungen einer langjährigen Stallmistdüngung auf das Bodengefüge im Lößgebiet bei Straubing.- Z. Acker- und Pflanzenbau 152: S. 152-158.
- /2/ BOSSEL, H. (1987): Systemdynamik.- Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- /3/ CLEMENS, G. (1991): Bodenabtrag in unterschiedlich genutzten und ausgestatteten Kleinlandschaften des Kraichgaus.- Mitteilgn. Dtsch. Bodenk. Gesellsch. 66: S. 923-926.
- /4/ DIKAU, R. (1986): Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen.- Heidelberger Geographische Arbeiten 81: 195 S.
- /5/ EICHLER, H. (1974/75): Bodenerosion in Mais- und Rübenkulturen.- Kraichgau 4: S. 174-189.
- /6/ KERNER, F. (1991): Die räumliche Variabilität von bodenphysikalischen Erosionsparametern einer Löß-Pararendzina im Naturraum Kraichgau.- Diplomarbeit Universität Hohenheim, unveröffentlicht.
- /7/ KERNER, F. & B. MURSCHEL (1991) Die räumliche und zeitliche Variabilität von bodenphysikalischen Erosionsparametern.- Mitteilgn. Dtsch. Bodenk. Gesellsch. 66: S. 959-962.
- /8/ QUIST, D. (1984): Zur Bodenerosion im Zuckerrübenanbau des Kraichgaus.- Dissertation Universität Heidelberg: 226 S.
- /9/ RICHTER, J. (1987): Der Boden als Reaktor. Modelle für Prozesse im Boden.- Enke Verlag, Stuttgart.
- /10/ ROHDENBURG, H. (1989): Methoden zur Analyse von Agrar-Ökosystemen in Mitteleuropa unter Betonung geoökologischer Aspekte.- Catena 16, 1: S. 1-57.

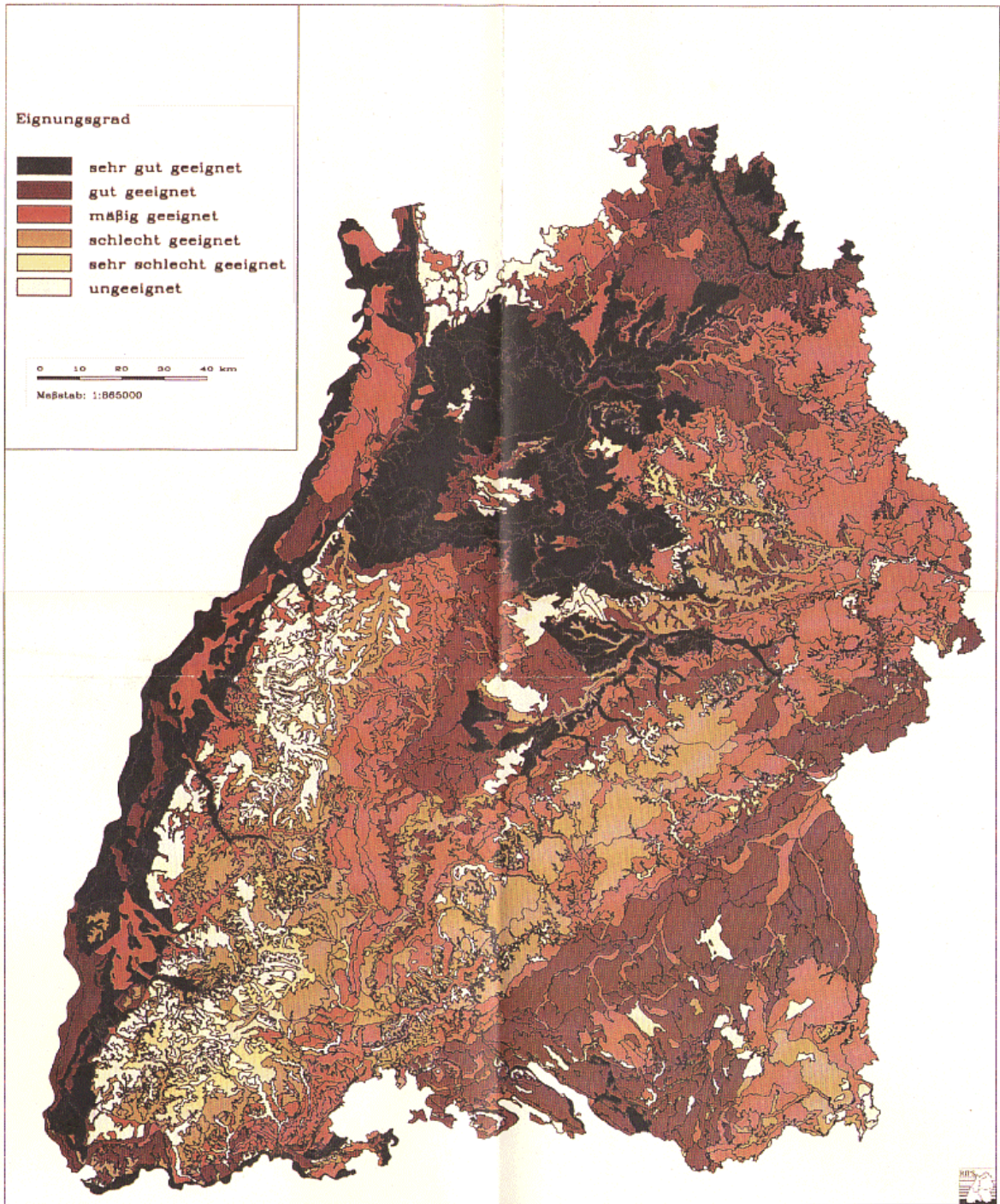
Anhang Karten:

- Quellen:** ökologische Standorteignungskarten nach Weller 1990
- Digitale Bearbeitung:** Institut für Angewandte Forschung, Landschaftsentwicklung und Landschaftsinformatik der FH Nürtingen
Weller F. und Durwen, K.-J. (1994)
- Herausgeber:** Räumliches Informations- und Planungssystem (RIPS) im UIS Baden-Württemberg (1995)

Prozentualer Anteil der Waldfläche :



Eignung für den Ackerbau (beste verbreitete):



Abbildungsverzeichnis

Friedrich Weller: Landschaften und Böden in Baden-Württemberg

ABB. 1:	GEOLOGISCHE GROBGLIEDERUNG VON BADEN-WÜRTTEMBERG (AUS: S. MÜLLER ET AL., 1967).....	8
ABB. 2:	EROSIONSNEIGUNG (ERODIBILITÄT K) DER BÖDEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG (AUS: BODENSCHUTZPROGRAMM '86 BADEN-WÜRTTEMBERG).....	9
ABB. 3:	ÜBERSCHWEMMTE RHEINAUE BEI AU AM RHEIN	11
ABB. 4:	STEIL GENEIGTE BEWIRTSCHAFTUNGSFLÄCHEN IN EINEM TYPISCHEN SCHWARZWALDTAL	11
ABB. 5:	MITTLERE NIEDERSCHLAGSSUMMEN (MM) PRO JAHR (AUS: KLIMA-ATLAS VON BADEN-WÜRTTEMBERG, 1956).....	12
ABB. 6:	MITTLERER JÄHRLICHER GANG DES NIEDERSCHLAGS NACH MONATSSUMMEN (MM) (AUS: KLIMA-ATLAS VON BADEN-WÜRTTEMBERG, 1956)	13
ABB. 7:	RELATIVE ABSTUFUNG DER KONTINENTALITÄT IN SÜDWEST-DEUTSCHLAND AUF GRUND DER VERBREITUNG OZEANISCHER UND KONTINENTALER FLORENELEMENTE (AUS: ELLENBERG 1954)....	14
ABB. 8:	HOHE ERODIBILITÄT DER LÖBBÖDEN	15
ABB. 11:	UNTERSCHIEDLICH STARKE EROSION UNTER WALD UND ACKER AUF LÖB IM KRAICHGAU (AUS: S. MÜLLER, 1976).....	16
ABB. 12:	LÖBHÜGELLANDSCHAFT IM KRAICHGAU MIT PARABRAUNERDEN (DUNKEL) AUF DER HOCHFLÄCHE, PARARENDZINA (HELL) AM HANG UND KOLLUVIUM (DUNKEL) IN DER MULDE	17
ABB. 13:	PROFILSCHNITT DURCH EINEN ACKERBAULICH GENUTZTEN HANG IN EINER LÖBREICHEN GÄULANDSCHAFT (AUS: EXKURSIONSFÜHRER DBG-TAGUNG WÜRZBURG 1980).....	18
ABB. 14:	EROSION IN EINEM MAISFELD AUF EINEM DRUMLIN BEI SALEM.....	18
ABB. 15:	BODENEROSION DURCH HOCHWASSER.....	19
ABB. 16:	BODENEROSION BEI BLOCKIERTER KARSTDRAINAGE	20
ABB. 17:	EROSIONSSCHUTZ IM WEINBERG DURCH RINDENMULCH.....	22
ABB. 18:	EROSIONSSCHUTZ IN NEU ANGELEGTEM WEINBERG DURCH STROHBEBECKUNG.....	23

Wilhelm Vogl: Tolerierbare Bodenerosion - Grenzwerte für den Bodenschutz

ABB. 1:	TOLERIERBARE C-FAKTOREN BEI FELDBEARBEITUNG IN GEFÄLLSRICHTUNG.....	30
ABB. 2:	TOLERIERBARE C-FAKTOREN BEI HANGPARALLELER FELDBEARBEITUNG.....	30
ABB. 3:	C - FAKTOREN WICHTIGER FRUCHTFOLGEN	31

Josef Kagerer: Erstellung von Erosionsprognosekarten mit dem Modell dABAG

ABB. 1:	SIMULATION DES LANGJÄHRIGEN MITTLEREN BODENABTRAGES VON ACKERSCHLÄGEN UND DES SEDIMENTEINTRAGES IN TIEFENLINIEN UND VORFLUTER.....	36
---------	--	----

Josef Haider: Faktoren der ABAG und dABAG - Bestimmung und Genauigkeit

ABB. 1:	REGRESSIONSGLEICHUNG ZUR BERECHNUNG DES R-FAKTORS AUS DEM LANGJÄHRIGEN, MITTLEREN SOMMERNIEDERSCHLAG (AUERSWALD, UNVERÖFFENTLICHT).....	39
ABB. 2:	EINFLÜSSE DES K - FAKTORS (AUERSWALD, 1987).....	41
ABB. 3:	P - FAKTOR BEI KONTURPARALLELER BEARBEITUNG: VERGLEICH ZWISCHEN DEM BISHER VERWENDETEN ("ALT") UND DEM NEUEN, NACH DER OBERFLÄCHENRAUHIGKEIT DIFFERENZIIERTEN P - FAKTOR (NACH AUERSWALD, 1992A)	46
ABB. 4:	EFFEKTIVITÄT DER QUERBEARBEITUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER EROSIVEN HANGLÄNGE BEI UNTERSCHIEDLICHER HANGNEIGUNG (NACH AUERSWALD, 1992A).....	47
ABB. 5:	VERÄNDERUNG DES BODENABTRAGS BEI VERÄNDERUNG DER EINFLUßFAKTOREN (NACH AUERSWALD, 1987).....	48
ABB. 6:	SCHEMA DER COMPUTERGESTÜTZTEN VERNETZUNG DER DATEN BEI DER DABAG ZU EINEM DIGITALEN HÖHEN - ,ABFLUß – BZW. STANDORTMODELL	50

ABB. 7:	VERGLEICH DER GEMESSENEN LANGJÄHRIGEN MITTLEREN BODENABTRÄGE MIT DEN MIT DER ABAG VORAUSGESAGTEN WERTEN (NACH SCHMIDT, 1979):.....	53
ABB. 8:	MIT HILFE DER ABAG VORAUSGESAGTE UND GEMESSENE BODENABTRÄGE FÜR 22 REGENSIMULATIONEN (NACH AUERSWALD ET AL., 1992).....	53
ABB. 9:	VERGLEICH GEMESSENER UND MIT DER ABAG VORAUSGESAGTER JÄHRLICHER SEDIMENTFRACHTEN FÜR 22 WASSEREINZUGSGEBIETE BAYERNS (NACH AUERSWALD, 1992B):.....	54

Wolfgang Fleck: Ermittlung von K-Faktoren - Reichsbodenschätzung und Bodenbestandsaufnahme

ABB. 1:	FLURBEREINIGUNGS - UND UNTERSUCHUNGSGEBIET EPPINGEN	57
ABB. 2:	BODENVERHÄLTNISS UNTER ACKER UND UNTER WALD	59
ABB. 3:	BODENKARTE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES.....	60
ABB. 4:	AUFBAU DER LEGENDE ZUR BODENKARTE 1:25.000.....	61
ABB. 5:	BODENSCHÄTZUNGSKARTE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES	63

Lothar Kiefer: Erosionsgefährdungskarten in der Flurneuordnung - Herstellung, Anwendung und Erfahrungen

ABB. 1:	GEFÄLLSTUFEN.....	68
ABB. 2:	T - WERTE.....	69
ABB. 3:	K - FAKTOREN	69
ABB. 4:	TOLERIERBARE HANGLÄNGEN.....	70

Manfred Sigle: Erosionsgefährdungskarten des DGM-Systems SCOP

ABB. 1:	STRUKTUR DES DGM-SYSTEMS.....	74
ABB. 2 A:	DGM-DATENSTRUKTUR.....	77
ABB. 2 B:	HÖHENLINIEN	78
ABB. 2 D:	K-FAKTOREN	78
ABB. 2 C:	GEFÄLLSTUFENKARTE.....	78
ABB. 2 E:	EROSIONSGEFÄHRDUNGSKARTE.....	78

Jürgen Schmidt: Anwendung des Modells EROSION-2D im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben

ABB. 1:	LAGE DES TESTGEBIETES	85
ABB. 2:	UNTERSUCHUNGSGEBIET ZAISENHAUSEN, LAGE DER MEßSTELLEN (KARTENGRUNDLAGE TOPOGRAPHISCHE KARTE 1:25.000 BLATT 6818 ODENHEIM UND BLATT 6918 BRETTE).....	86
ABB. 3:	EXTREMEREIGNIS BRETTE 13.06.1963 (NIEDERSCHLAGSINTENSITÄT BEZOGEN AUF INTERVALLE VON 10MIN).....	87
ABB. 4:	SIMULATION DER VARIANTE A: HANG: UNGEGLIEDERT, NUTZUNG: RÜBEN, BODEN: FEUCHT	89
ABB. 5:	SIMULATION FÜR RÜBEN/FEUCHT MIT GRASWEG BEI 92 - 96M.....	90
ABB. 6:	AUSSCHNITT AUS PROFIL HARDBUCKEL MIT KOMBINATION GRÜNSTREIFEN, WEG, GRABEN (ALTERNATIV ZU VORHANDENEM GRASWEG).....	91
ABB. 7:	SIMULATION FÜR RÜBEN/FEUCHT MIT KOMBINATION GRASSTREIFEN, WEG, GRABEN BEI 92 - 100M	92
ABB. 8:	MINDERUNG DES AUSTRAGES IN ABHÄNGIGKEIT VON DER LAGE EINES HANGPARALLELEN GRABENS	93
ABB. 9:	SIMULATION FÜR RÜBEN/FEUCHT BEI TERRASSIERTEM HANG.....	94
ABB. 10:	ABHÄNGIGKEIT DES AUSTRAGES VON DER GLIEDERUNG DES HANGES UND VON DER BODENFEUCHTE	95
ABB. 11:	ABHÄNGIGKEIT DES AUSTRAGES VON DER NUTZUNG UND DER BODENFEUCHTE.....	95
ABB. 12:	EINFLUß EINES HANGPARALLELEN GRASWEGES AUF DIE LANGFRISTIGE ENTWICKLUNG DES HANGPROFILS:	98

Stefan Jäger: Erste Fassung Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg - Aussagemöglichkeiten kleinmaßstäbiger Betrachtungen

ABB. 1:	R - FAKTOR-VERTEILUNG BADEN-WÜRTTEMBERGS IM 2 X 2 KM-RASTER (QUELLE: KARTE DER SOMMEREROSIVITÄT BADEN-WÜRTTEMBERGS, SCHWEIKLE ET AL., 1985).....	104
ABB. 2:	K – FAKTOR - VERTEILUNG BADEN - WÜRTTEMBERGS IM 2·2 KM-RASTER (QUELLE: EIGENE BEARBEITUNG NACH DATEN AUS DEM ALB).....	106
ABB. 3:	L-FAKTOR-VERTEILUNG BADEN-WÜRTTEMBERGS IM 2·2 KM-RASTER (QUELLE: EIGENE BEARBEITUNG NACH DATEN DER LAP).....	108
ABB. 4:	C – FAKTOR - VERTEILUNG BADEN - WÜRTTEMBERGS IM 2 X 2 KM-RASTER (QUELLE: EIGENE BEARBEITUNG NACH DATEN DES STALAA).....	111
ABB. 5:	KARTE DER MITTLEREN JÄHRLICHEN BODENABTRÄGE IN T/HA·A (QUELLE: EIGENE BEARBEITUNG NACH DATEN VON SCHWEIKLE ET AL., 1985, ALB, LAP UND STALAA).....	113
ABB. 6:	ABSCHÄTZUNG DES EROSIONSRISIKOS NACH HEIMLICH & BILLS (1984) (QUELLE: EIGENE BEARBEITUNG NACH DATEN VON SCHWEIKLE ET AL., 1985, ALB, LAP UND STALAA).....	115

Bernd Murschel & Gerd Clemens: Abschätzung der Bodenerosion durch Feldversuche und modellanalytische Ansätze

ABB. 1:	AGGREGATSTABILITÄT (ALS PERKOLIERTE WASSERMENGE IN 10 MIN.) VON DREI BODENTYPEN UNTER ZUCKERRÜBEN AUF VIER BETRIEBEN IM KRAICHGAU MIT WENDENDER/NICHTWENDENDER BODENBEARBEITUNG (P+/P-) UND MIT/OHNE GÜLLE (G+/G-).....	119
ABB. 2:	AGGREGATSTABILITÄT (ALS PERKOLIERTE WASSERMENGE IN 10 MIN.) VON DREI BODENTYPEN EINES ZUCKERRÜBENSCHLAGES IM MAI UND JULI ALS MITTELWERT VON 52 MESSWERTEN AUF EINER 90·100M GROßEN MESSPARZELLE (AUS KERNER, 1991, UNVERÖFFENTLICHT).....	119
ABB. 3:	ISOLINIENDARSTELLUNG (LINIENABSTAND 60 ML) DER AGGREGATSTABILITÄT (IN ML PERKOLIERTER WASSERMENGE), GEMESSEN IM MAI AUF PARARENDZINA UNTER ZUCKERRÜBEN, AUS 52 GEMESSENEN UND 693 GEKRIGTEN WERTEN (AUS KERNER & MURSCHER, 1991).....	120
ABB. 4:	EINTEILUNG VON MODELLEN IN DER BODENKUNDE.....	123
ABB. 5:	TEILEINZUGSGEBIET FÜR DIE BERECHNUNGEN NACH DER USLE. ANLIEFERUNGSGEBIETE (KOLLUVIUM) SIND WEIß EINGEZEICHNET	127
ABB. 6:	BODENABTRAGSSCHÄTZUNGEN FÜR VERSCHIEDENE BODENERHALTENDE MAßNAHMEN MIT DEM CREAMS-MODELL	128
ABB. 7:	BODENABTRAGSSCHÄTZUNG MIT DER DABAG.....	129
ABB. 8:	RÄUMLICHE UND ZEITLICHE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN VON MODELLEN.....	131
ABB. 9:	RÄUMLICHE UND ZEITLICHE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN VON FELDMETHODEN.....	132

Tabellenverzeichnis

Haider, J.: Faktoren der ABAG und dABAG

TAB. 1:	ZUORDNUNG DES K - FAKTORS ZU DEN BESCHRIEBEN DER REICHSBODENSCHÄTZUNG.....	42
TAB. 2:	S - FAKTOR DER ABAG FÜR UNTERSCHIEDLICHE HANGNEIGUNGEN.....	44

FLECK, W.: Ermittlung von K-Faktoren

TAB. 1:	K-FAKTOREN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET EPPINGEN - VERGLEICH DER WERTEAUSPRÄGUNGEN BEI ZWEI UNTERSCHIEDLICHEN ERMITTLUNGSVERFAHREN.....	62
---------	---	----

SIGLE, M.: Erosionsgefährdungskarten des DGM-Systems SCOP

TAB. 1:	FEHLERABSCHÄTZUNG ZUR BERECHNUNG DER MAXIMAL TOLERIERBAREN HANGLÄNGE MIT DEM PROGRAMM-SYSTEM SCOP.....	81
---------	--	----

SCHMIDT, J.: Anwendung des Modells Erosion-2D im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben

TAB. 1:	EINGABEGRÖßEN	84
TAB. 2:	AUSGABEGRÖßEN	85
TAB. 3:	PARAMETERBESTIMMUNG TESTGEBIET ZAISENHAUSEN	87
TAB. 4:	ABSTAND DES GRABENS VON DER HANGOBERKANTE	92
TAB. 5:	JÄHRLICHE NETTO - AUSTRÄGE (PROFIL HARDBUCKEL/VARIANTE A), BEZOGEN AUF DAS REFERENZJAHR 1955 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KULTURART	96
TAB. 6:	JÄHRLICHE BODENVERLUSTE IM KRAICHGAU, NACH ANGABEN VERSCHIEDENER AUTOREN.....	97

JÄGER, S.: 1. Fassung Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg

TAB. 1:	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN HANGNEIGUNG UND HANGLÄNGE, L - FAKTOR SOWIE LS – FAKTOR	109
TAB. 2:	C - FAKTOREN DER EINZELFRÜCHTE.....	110
TAB. 3:	GEMESSENE BODENABTRAGSWERTE IN BADEN-WÜRTTEMBERG.....	114

MURSCHEL, B. & G. CLEMENS: Abschätzung der Bodenerosion durch Feldversuche und modellanalytische Ansätze

TAB. 1:	ABTRAG VON BODENMATERIAL AUS DEM HÜGELBEREICH UND REZENTE AKKUMULATION IN DEN SENKEN VON 4 UNTERSCHIEDLICH GENUTZTEN UND AUSGESTATTETEN EINZUGSGEBIETEN IM KRAICHGAU.....	121
TAB. 2:	HOMOGENITÄTSKRITERIEN DER MODELLE USLE, DABAG UND CREAMS	125
TAB. 3:	VOR- UND NACHTEILE DER MODELLE USLE, DABAG UND CREAMS VERGLEICH DER MODELLE USLE, DABAG, CREAMS UND DER FELDMETHODEN HINSICHTLICH IHRER VORTEILE UND NACHTEILE.....	126
TAB. 4:	ERGEBNISSE VON MODELLRECHNUNGEN UND KARTIERUNG.....	129
TAB. 5:	LITERATURVERGLEICHE FÜR BODENEROSIONSSCHÄTZUNGEN MIT DER USLE.....	130
TAB. 6:	EINSATZMÖGLICHKEITEN VON FELDMETHODEN UND MODELLEN ZUR ABSCHÄTZUNG DER BODENEROSION FÜR DIE BERATUNG, DIE LANDSCHAFTSPLANUNG UND DIE PROZEFORSCHUNG...	133