

*Schwertmann  
Vogl·Kainz*

---

# Bodenerosion durch Wasser

---

*Vorber sage des Abtrags  
und Bewertung von  
Gegenmaßnahmen*

*Ulmer*

---

# Bodenerosion durch Wasser

---

Vorhersage des Abtrags und Bewertung  
von Gegenmaßnahmen

---

Von

U. Schwertmann, W. Vogl und M. Kainz

Unter Mitarbeit von  
K. Auerswald und W. Martin

8 Schwarzweißabbildungen



---

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Bodenerosion durch Wasser:** Vorhersage des Abtrags und  
Bewertung von Gegenmaßnahmen / von U. Schwertmann  
u. W. Vogl ... – Stuttgart : Ulmer 1987.  
ISBN 3-8001-3081-5

NE: Schwertman, U. [Mitverf.]

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung  
außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages  
unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen,  
Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 1987 Eugen Ulmer GmbH & Co.  
Wollgrasweg 41, 7000 Stuttgart 70 (Hohenheim)  
Printed in Germany  
Einbandgestaltung: Alfred Krugmann, Stuttgart  
Satz: Filmsatz Jovanović, Ruhstorf/Rott  
Druck und Bindung: Friedrich Pustet, Regensburg

---

# Vorwort

---

In einer Zeit, in der der Ertrag häufig nur kurz- bis mittelfristig optimiert wird, ist die Forderung, die Fruchtbarkeit unserer Böden langfristig zu erhalten und zu sichern, in hohem Maße gerechtfertigt. Der Verlust wertvollen Bodens durch die Bodenerosion ist eine derjenigen Erscheinungen, die unsere Böden gefährden. Langfristige Bewahrung der Bodenfruchtbarkeit heißt daher auch Schutz der Böden vor Erosion. Diese Forderung ist aus verschiedenen Gründen aktueller denn je zuvor.

Moderne Technologien in der Landbewirtschaftung haben zwar zu höheren und kurzfristig sichereren Erträgen geführt, sie haben in hängigen Gebieten aber auch die Erosion durch Wasser verstärkt. Felder wurden vergrößert, Hänge verlängert und Hangstufen beseitigt. Viele Hänge werden aus technischen Gründen senkrecht zum Hang genutzt. Das häufige Befahren mit schweren Maschinen schwächt das Gefüge der Böden und verdichtet sie. Der Anbau von Mais, einer Kulturpflanze, die den Boden ungenügend vor Erosion schützt, hat sehr stark zugenommen, der von schützenden Futterpflanzen hat dagegen abgenommen.

Die Ackerkrume ist durch regelmäßige Düngung über den Entzug nährstoffreich. Mit dem Bodenmaterial werden daher Nährstoffe zum Hangfuß, z. T. aber auch in die Gewässer transportiert, wenn diese nicht ausreichend gegen den erodierenden Acker geschützt sind.

Landwirtschaft und Wasserwirtschaft sind also gleichermaßen daran interessiert, den Bodenabtrag möglichst gering zu halten: die Landwirtschaft, um wertvollen, nährstoffreichen Oberboden nicht zu verlieren, die Wasserwirtschaft, um die Gewässer rein und funktionsfähig zu halten. Maßnahmen gegen die Erosion sind also erforderlich; sie stehen in großer Vielfalt zur Verfügung. Oft sind sie jedoch kostspielig und möglicherweise mit Ertragseinbußen verbunden; sie müssen daher überlegt angewandt werden. Die Basis jeder Maßnahme sollte aber eine **realistische, quantitative Abschätzung** der Erosionsgefahr sein.

Ein Verfahren hierzu ist in den USA von Wischmeier und Smith entwickelt worden und wird dort vom Soil Conservation Service seit mehr als 3 Jahrzehnten mit Erfolg angewendet. Es besteht darin, den langjährigen Bodenabtrag jedes einzelnen Feldstücks mithilfe der sog. Allgemeinen Bodenabtragsgleichung aus der Größe derjenigen Faktoren zu berechnen, die die Erosion verursachen. Das Ergebnis dieser Berechnung wird dann mit der für die jeweiligen Böden festgelegten Toleranzgrenze verglichen. Falls die Toleranzgrenze überschritten wird, werden Maßnahmen empfohlen, die die Erosion unter die Toleranzgrenze senken. Die Maßnahmen erstrecken sich u.a. auf Hangverkürzungen, erosionsmindernde Fruchtfolgen und Bearbeitungsweisen, Anlage von Terrassen.

Im Jahre 1981 wurden in einer 1. Version dieses Handbuchs, herausgegeben vom Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, diejenigen Informationen veröffentlicht, die nötig sind, um das oben beschriebene Verfahren der Erosionsvorausschätzung in Bayern anzuwenden. Dies war möglich, weil zu diesem Zeitpunkt genügend Daten vorlagen, mit denen das Verfahren an bayerische Verhältnisse angepaßt werden konnte. Es wurde aber gleichzeitig darauf verwiesen, daß weitere Forschungen notwendig sind, um diese Anpassung zu verbessern. Dies ist in den letzten Jahren geschehen. Die Messungen erfolgten zwar ausschließlich in Bayern; wir glauben jedoch, daß ihre Ergebnisse entweder direkt oder mithilfe angegebener Verfahren und ergänzender Werte auf große Bereiche Mitteleuropas übertragen werden können.

Die 1. Version des Handbuchs hat in den letzten Jahren bei aufgeschlossenen, um die Erhaltung unserer Böden bemühten Kollegen, insbesondere in der Offizialberatung, Interesse und Eingang gefunden. Um es in der revidierten Form allen interessierten Kreisen zugänglich zu machen, haben wir diesmal eine normale Buchform gewählt.

Die Messungen und Erhebungen, auf die sich ein Teil der Daten dieses Handbuchs stützt, sind in enger Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, der Bodenkundlichen Abteilung des Bayerischen Geologischen Landesamtes, den Wetterämtern und vielen Landwirten entstanden, denen allen wir herzlich danken. Das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten hat unsere Arbeiten durch Bereitstellung technischer Einrichtungen und Forschungsmittel gefördert. Das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen und die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützten unsere Arbeiten finanziell. Dem Verlag E. Ulmer gebührt unser Dank für die Herstellung des Buches. Wir hoffen, daß es dazu beiträgt, den Erosionsschutz zu intensivieren und dadurch unsere Böden funktionsfähig zu halten.

Weihenstephan, November 1987

U. Schwertmann, W. Vogl und M. Kainz

### **Danksagung**

Wir danken Herrn Dr. W.H. Wischmeier, Purdue University, Lafayette, Indiana, USA, sehr herzlich für seine zahlreichen Ratschläge bei der Anfertigung der 1. Version dieser Schrift. Gedankt sei allen denen, die Material zur Verfügung stellten, insbesondere den Herren S. Bader, Dr. H.-H. Becher, M. Huith, H. Rogler und R. Schäfer. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts danken wir Herrn Dr. Th. Diez, Frau E. Schmidlein und Herrn W. Kraier und für die sorgfältige Anfertigung des Manuskripts und der Zeichnungen Frl. R. Wiesheu und Frau E. Schuhbauer.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Das Verfahren</b> .....	9
Das Prinzip .....	9
Die Genauigkeit der Abtragsschätzung .....	11
Toleranzgrenzen .....	12
<b>Die einzelnen Faktoren</b> .....	14
Regen- und Oberflächenabflußfaktor R .....	14
Wesen und Berechnung des R-Faktors .....	14
R-Faktoren Bayerns .....	15
Einfluß der Schneeschmelze .....	15
Kommentar .....	18
Bodenerodierbarkeitsfaktor K .....	19
Wesen des K-Faktors .....	19
Ermittlung der 5 Bodeneigenschaften .....	19
Das K-Faktor-Nomogramm .....	22
K-Faktoren aus Bodenkarten .....	25
K-Faktor aus dem Beschrieb der Reichsbodenschätzung .....	25
K-Faktoren bayerischer Böden .....	25
Kommentar .....	28
Topographiefaktor LS .....	29
Wesen und Berechnung des LS-Faktors .....	29
Ablesevorschrift für die LS-Nomogramme .....	32
Ungleichmäßige Hänge .....	35
Ermittlung der tolerierbaren Hanglänge .....	36
Kommentar .....	37
Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor C .....	38
Wesen des C-Faktors .....	38
Einfluß der Vegetationsbedeckung und Bodenbearbeitung .....	39
Kulturperioden .....	41
Relative Bodenabträge .....	42
Kommentar .....	44
Berechnung der C-Faktoren .....	44
C-Faktoren von Fruchtsfolgen für Bayern .....	48
C-Faktoren von Hopfen für Bayern .....	50
Bewertung der Erosionsanfälligkeit unter einzelnen Früchten und bei verschiedenen Maßnahmen zwischen zwei aufeinander folgenden Früchten ..	51
Ermittlung maximal zulässiger C-Faktoren .....	52
Erosionsschutzfaktor P .....	53

<b>Die Durchführung der Schätzung .....</b>	<b>55</b>
Die Ermittlung der Faktorenwerte .....	55
Die Berechnung des Bodenabtrages .....	57
Berechnung der Wirkung von Maßnahmen zur Senkung des Bodenabtrages	60
<b>Literatur .....</b>	<b>61</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>63</b>

### Tabellen:

Nr.		
1	Toleranzgrenzen .....	13
2	R-Faktoren der bayerischen Landkreise .....	17
3a	Aggregatklassen .....	20
3b	Durchlässigkeitsklassen .....	20
4	Mittlere K-Faktoren der Ackerbeschriebe der Reichsbodenschätzung ..	24
5	Gemessene K-Faktoren bayerischer Böden .....	26
6	Wichtungsfaktoren für vier unregelmäßig geneigte Hänge, die aus 2, 3, 4 oder 5 gleichlangen Teilstücken bestehen .....	36
7	Einteilung der Kulturperioden .....	41
8	Relativer Bodenabtrag der einzelnen Perioden für die verschiedenen Kulturpflanzen .....	42
9	Summenprozente der R-Faktorenanteile im Mittel von 18 bayerischen Wetterstationen im langjährigen Durchschnitt .....	45
10	Mittlerer Beginn der Perioden zur Ermittlung des C-Faktors für bayerische Verhältnisse .....	46
11	Beispiel der Berechnung eines C-Faktors für eine Fruchtfolge Silomais/Winterweizen/Wintergerste .....	47
12	C-Faktoren von häufigen Fruchtfolgen in Bayern .....	48
13	C-Faktoren von Hopfen .....	50
14	Teil-C-Faktoren verschiedener Früchte für die Zeit von Saatbett bis Ernte und Gesamt-C-Faktoren in Bayern .....	52
15	P-Faktoren für Konturnutzung und maximale Hanglänge für die Wirksamkeit der Konturnutzung .....	54
16	P-Faktoren, maximale Streifenbreite und maximale Länge des Gesamthangs für Streifennutzung .....	54
17	Tabellen zur Schnellbestimmung des Bodenabtrags in Bayern (Verfahren B) .....	58
18	Beispiele für Maßnahmen zur Senkung des Bodenabtrags .....	60

### Abbildungen:

Nr.		
1	Isoerodentkarte von Bayern .....	16
2	Einteilung Bayerns in Großlandschaften .....	21
3	K-Faktor-Nomogramm .....	23
4	Bestimmung der effektiven Hanglänge .....	30
5a-d	LS-Nomogramme .....	31-34
6	Abhängigkeit des Relativen Bodenabtrags von der Bodenbedeckung durch Mulch .....	39

---

# Das Verfahren

---

## Das Prinzip

Wischmeier und Smith haben in den Jahren 1930 bis 1952 an zahlreichen Orten der USA auf standardisierten Parzellen (22 m lang, 9 % Gefälle) den langjährigen Bodenabtrag gemessen. Er war mit einer großen Zahl von Eigenschaften dieser Standorte korreliert, von denen 6 Parameter den gemessenen Abtrag hinreichend genau erklärten und daher zu einer Vorausschätzung verwendet werden konnten. Diese Eigenschaften waren also auf den untersuchten Standorten die wichtigsten erosionsbedingenden Faktoren.

Es sind dies:

- die Charakteristik des Regengeschehens
- die Eigenschaften des Bodens
- die Länge des Hanges
- die Neigung des Hanges
- die Bedeckung und Bearbeitung des Bodens und
- die Art der Erosionsschutzmaßnahmen

Die Beziehung des gemessenen Bodenabtrages zu diesen 6 Faktoren wurde quantifiziert und zu einer Abtragsgleichung zusammengefaßt, die in den USA UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (USLE) genannt wird. Sie soll hier ALLGEMEINE BODENABTRAGSGLEICHUNG (ABAG) genannt werden.

Die Allgemeine Bodenabtragsgleichung lautet:

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

Hierin bedeuten:

**A: Langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag** in t/ha · a als zu errechnende Größe.

**R: Regen- und Oberflächenabflußfaktor:** Er ist ein Maß für die gebietsspezifische Erosionskraft (Erosivität) der Niederschläge und wird aus der kinetischen Energie und der Niederschlagsintensität aller erosionswirksamen Einzelregen während des Jahres berechnet.

**K: Bodenerodierbarkeitsfaktor:** Er stellt den jährlichen Abtrag eines bestimmten Bodens pro R-Einheit auf dem Standardhang (22 m lang, 9 % Gefälle, dauernde Schwarzbrache) dar. Er ist ein Maß für die Erodibilität eines Bodens und wird von einer Reihe von Bodeneigenschaften bestimmt.

**L: Hanglängenfaktor:** Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges beliebiger Länge zu dem des Standardhanges (22 m Länge) unter sonst gleichen Bedingungen an.

**S: Hangneigungsfaktor:** Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges beliebiger Neigung zu dem des Standardhanges (9 % Gefälle) unter sonst gleichen Bedingungen an.

**C: Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor:** Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges mit beliebiger Bewirtschaftung (Kulturpflanze, Bedeckungsgrad, Bearbeitungsverfahren, etc.) zu dem unter Schwarzbrache an.

**P: Erosionsschutzfaktor:** Er gibt das Verhältnis des Bodenabtrages mit beliebigen Erosionsschutzmaßnahmen wie Konturnutzung, Streifennutzung, Terrassierung usw. zu dem bei Bearbeitung in Gefällerichtung und ohne Schutzmaßnahmen an.

Der Abtrag A auf einem bestimmten Schlag ergibt sich also aus dem Abtrag des Standardhanges unter den gebietsspezifischen Niederschlagsgegebenheiten, korrigiert durch Faktoren, die die speziellen Bedingungen des jeweiligen Standortes bezüglich Boden (K), Morphologie (L, S) und Nutzungsweise (C, P) berücksichtigen. Die Größe dieser (Korrektur-) Faktoren ist aus einer Vielzahl von Messungen in den USA ermittelt und für die USA im Agriculture Handbook No. 537: Predicting Rainfall Erosion Losses (Wischmeier and Smith, 1978) niedergelegt worden. Die für unseren Raum gültigen Werte sind z. T. dem genannten Handbuch entnommen worden, z. T. mußten sie jedoch eigens erarbeitet werden. Wir gingen dabei von der Voraussetzung aus, daß die ABAG im Prinzip auch in unserem Raum verwendbar ist. Ob diese erfüllt ist, kann streng genommen nur durch langjährige Abtragsmessungen in Dauerparzellen geprüft werden. Diese liegen jedoch so gut wie nicht vor. Es müssen daher andere Wege wie z. B. die Ermittlung der langjährigen Stoffbilanz an Hängen und die Verwendung künstlicher Niederschläge an deren Stelle treten. Ergebnisse aus solchen Untersuchungen stützen unsere Ansicht, daß die ABAG auch bei uns anwendbar ist. Die Hauptaufgabe bestand und besteht auch weiterhin also darin, die Zahlenwerte der Faktoren mit Hilfe der genannten Verfahren zu ermitteln und laufend zu verbessern.

Der große Vorteil der ABAG besteht in ihrer hohen Flexibilität. Sie erlaubt es nicht nur, für eine unendlich große Zahl von Bedingungskombinationen den mittleren langjährigen Abtrag zu berechnen, sondern auch die abtragsmindernde und abtragssteigernde Wirkung veränderter Bedingungen vorherzusagen. Dies ist dann von Belang, wenn ermittelt werden soll, ob der derzeitige Abtrag das tolerierbare Maß, die sog. Toleranzgrenze überschreitet und daher Maßnahmen zu ergreifen sind, die den Abtrag unter die Toleranzgrenze senken. Die ABAG erlaubt es, die Wirkung solcher Maßnahmen zu quantifizieren.

Für die eigentliche Bestimmung des Abtrags sind zwei Verfahren vorgesehen. Das erste (Verfahren A) ermittelt zunächst alle 6 Faktoren und verwendet dann die Abtragsgleichung, um aus diesen Faktoren den Abtrag zu errechnen. Das zweite (Verfahren B) geht wie das erste vor, bedient sich hierzu jedoch nur einer begrenzten Zahl von Faktorenwerten, die in Tabelle 17 zusammengestellt sind.

Bei der Anwendung der Abtragsgleichung sind zwei wichtige Einschränkungen zu beachten:

- 1) Die Gleichung wurde für die Abschätzung des Bodenabtrages von **Einzelschlägen** ausgearbeitet. Die Ausdehnung auf ganze Einzugsgebiete erfordert andere Gleichungen.
- 2) Die Gleichung errechnet den mittleren, **langjährigen** Abtrag. Die Abträge einzelner Jahre oder gar einzelner Regen können daher deutlich von den

geschätzten abweichen. Für solche Einzelabträge existieren daher andere Gleichungen. Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens sind von Wischmeier (1976) ausführlich dargestellt worden.

## Die Genauigkeit der Abtragsschätzung

Der ABAG liegen in den USA Abtragsmessungen von 10000 Parzellenjahren zugrunde. Da sich die Gleichung jedoch aus verschiedenen Teilfunktionen zusammensetzt, läßt sich eine generelle statistische Signifikanz nicht angeben. Eine Vorstellung für die Sicherheit der Abschätzung wurde in den USA jedoch aus einem Vergleich der Vorhersage aufgrund der ABAG mit den Abtragsmessungen auf 189 Parzellen mit 2300 Parzellenjahren gewonnen. Die Vorhersagewerte der ABAG wichen von den Meßwerten im Mittel um  $3,2 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$  ab, entsprechend 12 % des mittleren gemessenen Abtrags von  $25,3 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$ . 84 % der Abweichungen lagen innerhalb  $4,5 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$  und nur 5 % bei  $10,6 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$ . Im wesentlichen waren an solchen Abweichungen die Meßergebnisse über kürzere Zeiträume beteiligt, die naturgemäß vom langfristigen Abtragsgeschehen erheblich abweichen können. Die größte Schätzsicherheit hatten Hänge mit 5–12 % Neigung und bis zu 130 m Länge mit Böden aus Schluff, schluffigem Lehm oder Lehm und solchen Fruchtfolgen, deren relative Bodenabträge experimentell bestimmt worden waren. Außerhalb dieser Bedingungen nimmt die Schätzsicherheit ab, ist jedoch für eine langfristige Abschätzung immer noch vertretbar hoch. Die Sicherheit ist dabei nicht durch die ABAG selbst begrenzt, sondern durch die mangelnde Genauigkeit, mit der ihre Faktoren bekannt sind, so daß weitere Meßergebnisse die Schätzung in Zukunft genauer machen werden.

## Toleranzgrenzen

Die Toleranzgrenze  $T$  ( $t/\text{ha} \cdot \text{a}$ ) wurde vorläufig so festgesetzt, daß das natürliche Ertragspotential in einem Zeitraum von etwa 300–500 Jahren nicht entscheidend geschwächt wird. Naturgemäß hat diese Richtlinie eine gewisse Beliebigkeit, denn streng genommen dürfte nicht mehr Boden abgetragen werden als sich neu bildet. Die Rate der Neubildung ist jedoch so gering, daß dieses Prinzip die Toleranzgrenze fast auf 0 herabsetzen würde. Dies ist in der jetzigen Situation unrealistisch, obwohl als Fernziel, insbesondere im Hinblick auf die Gewässerqualität, durchaus anzustreben. Die Toleranzgrenze entscheidet darüber, ob und in welchem Ausmaß Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Die Toleranzgrenzen sind naturgemäß bodenspezifisch. Sie wurden vorläufig nach der Gründigkeit der jeweiligen Bodenform festgelegt. Die Gründigkeit und damit die Durchwurzelbarkeit wird nach unten begrenzt durch anstehendes Festgestein, sehr hohen Steingehalt, verfestigte, stark verdichtete oder Reduktionshorizonte oder durch wurzelhemmende Änderungen der chemischen Eigenschaften, wozu auch extreme Nährstoffarmut zählt.

Um die Toleranzgrenze leichter ermitteln zu können, ist sie in Tab. 1 außer mit der Gründigkeit mit der Zustandsstufe und den Bodenzahlen der Reichsbodenschätzung verknüpft worden. In der letzten Spalte sind häufig vorkommende Bodenformen angeführt. Die Überprüfung von 893 Profilbeschrieben in ganz Bayern ergab darüber hinaus, daß zwischen der Gründigkeit und der Ertragsmeßzahl (Acker- bzw. Grünlandzahl) eine gesicherte Beziehung besteht. Diese Beziehung kann – da Gründigkeit und Toleranzgrenzen linear miteinander korrelieren – in eine Beziehung zwischen Toleranzgrenze und Ertragsmeßzahl umgesetzt werden. Diese Beziehung lautet

$$\text{Toleranzgrenze } (\text{t}/\text{ha} \cdot \text{a}) = \frac{\text{Acker- oder Grünlandzahl}}{8}$$

Während die Toleranzgrenzen aus Tab. 1 nur stufenweise zu entnehmen sind, lassen sie sich mit dieser Gleichung stufenlos ermitteln.

Abschließend sei eindringlichst darauf hingewiesen, daß Toleranzgrenzen nur im Überschreitungsfalle praktische Bedeutung haben, da dann Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Wird sie dagegen unterschritten, so darf darin keinesfalls die Berechtigung gesehen werden, den Bodenabtrag bis zur Toleranzgrenze steigen zu lassen.

Tabelle 1: Toleranzgrenzen

Toleranzgrenze t/ha	Gründigkeit	Tiefe cm	Bodenschätz. Zust.	Bodenstufe	Häufige Bodenformen
			(Acker)	Bodenzahl	
<b>1</b>	flach	< 30	häufig 6–7 (V, Vg, D)	meist < 35	– Rendzinen, Pararendzinen, Ranker aus Festgestein und Ranker aus stark steinigem Lockergestein (Moränen, Schotter)
<b>3</b>	mittel	30–60	häufig 5–4 bei sL, L, LT bis 60 bei S, SL auch < 35	35–50	– tiefgründige Rendzinen, tief- gründige Pararendzinen, Ranker aus Festgesteinen; – Pararendzinen und Regosole aus feinkörnigem Lockergestein (Löß, Flugsand); – Braunerden aus mächtigeren Flugsanddecken; – Braunerden, Parabraunerden, Pelosol-Braunerden und Pelo- sole aus Deckschichten in Ober- bis Mittelhanglage
<b>7</b>	tiefe	60–100	4–2 bei SL, L, LT > 60 bei IS, SL > 50	bei SL, L, LT > 60 bei IS, SL > 50	– Braunerden, Parabraunerden, Regosol-Braunerden aus gering- mächtigen Deckschichten in Mittel- bis Unterhanglage; – Braunerden, Parabraunerden aus mächtigeren Deckschichten (Löß, Lößlehm, Fließerden)
<b>10</b>	sehr tiefe	> 100	3–1 (4)	bei sL, L, LT > 60 bei IS, SL > 50	– Braunerden, Parabraunerden aus mächtigeren Deckschichten (Löß, Lößlehm, Fließerden) in Unter- bis Mittelhanglage sowie auf weitflächigen, örtlich schwach geneigten Verebnungen

# Die einzelnen Faktoren

## Regen- und Oberflächenabflußfaktor R

### Wesen und Berechnung des R-Faktors

Der Auslöser für einen Bodenabtrag durch Wasser ist stets ein Regen. Er bewirkt einerseits, daß Aggregate zerschlagen und deren Bruchstücke sowie andere Bodenteilchen verspritzt werden (sog. Plansch). Andererseits entsteht oberflächlich abfließendes Wasser, durch das losgeschlagenes Bodenmaterial hangabwärts transportiert und weiteres Bodenmaterial abgesichert wird. Um einen Abtrag zu bewirken, muß ein Regen jedoch bestimmte Eigenschaften haben. Dabei sind nur diejenigen Eigenschaften für den R-Faktor verwendbar, die eine quantitative Beziehung zum Abtrag zeigen. Dies ist nach Wischmeier für eine Größe der Fall, in die sowohl die Regenenergie als auch die Niederschlagsmenge eingeht. Als solche fand Wischmeier das Produkt aus der aufsummierten Flächendichte der kinetischen Energie eines erosiven Niederschlags E und seiner maximalen 30-Minuten-Intensität  $I_{30}$ . Erosive Niederschläge sind solche, die mindestens 10 mm erbringen oder – falls weniger als 10 mm – eine  $I_{30}$ -Intensität von mehr als 10 mm/h aufweisen. Regen, die weniger als 6 h von einander entfernt sind, werden als ein Regen gezählt.

Die **aufsummierte kinetische Energiedichte E** ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ ) eines Regens wird für jeden erosiven Einzelregen aus Regenschreiberkurven ermittelt. Dazu wird die Regenschreiberkurve in beliebig viele (n) Teilabschnitte i mit annähernd konstanter Intensität  $I_i$  ( $\text{mm}/\text{h}$ ) zerlegt und die zu jedem Teilabschnitt gehörende Niederschlagsmenge  $N_i$  ermittelt.

$$E_i = (11,89 + 8,73 \log I_i) \cdot N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{für } 0,05 < I_i < 76,2$$

$$E_i = 0 \quad \text{für } I_i < 0,050$$

$$E_i = 28,33 \cdot N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{für } I_i > 76,2$$

Die Energiedichten  $E_i$  der Teilabschnitte werden dann zur Energiedichte E des gesamten Regens aufsummiert.

Die **maximale 30-Minuten-Intensität  $I_{30}$**  ( $\text{mm}/\text{h}$ ) erhält man wie folgt: Aus der Regenschreiberkurve eines erosiven Einzelregens wird die maximale Regenmenge abgelesen, die innerhalb von 30 Minuten fällt. Dieser Wert wird dann, um ihn auf eine Stunde zu beziehen, verdoppelt. Dauert ein erosiver Regen weniger als 30 Minuten, so ist  $I_{30}$  die gesamte Regenmenge, ebenfalls bezogen auf eine Stunde.

Um schließlich den **R-Faktor** pro Jahr für einen bestimmten Ort zu erhalten, werden die Produkte  $E \cdot I_{30}$  ( $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{mm}/\text{h}$  entspr.  $\text{N}/\text{h}$ ) für alle erosiven Regen eines Jahres aufsummiert.

Der R-Faktor variiert von Jahr zu Jahr sehr viel stärker als der Gesamtniederschlag. Einen gültigen Mittelwert erhält man daher erst bei Auswertung eines längeren Zeitraumes. Diese über einen längeren Zeitraum gemittelten R-Faktoren, werden für die ABAG verwendet.

### R-Faktoren Bayerns

Für Bayern wurde der R-Faktor von allen 18 Orten, die den Niederschlag ganzjährig registriert haben, für 1967–1976 berechnet. Dabei wurden diejenigen Starkregen ausgeschlossen, die mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit als einmal in 30 Jahren auftreten, um so zu wahrscheinlicheren R-Faktoren zu kommen.

Die so errechneten jährlichen R-Faktoren waren mit den mittleren Jahresniederschlägen N (mm/a) des gleichen Zeitraumes nach:

$$R = 0,083 \cdot N - 1,77 \quad (r = 0,942)$$

hochsignifikant korreliert. Noch etwas besser war die Beziehung von R (1967–1976) zu den mittleren Sommerniederschlägen vom 1. Mai–31. Oktober (1931–1960) (Ns):

$$R = 0,141 \cdot Ns - 1,48 \quad (r = 0,961)$$

Mit diesen Regressionsgleichungen kann für jeden beliebigen Ort in Bayern die Erosivität der Niederschläge geschätzt werden. Eine Übertragbarkeit dieser Formeln auf andere Gebiete mit ähnlichen Klimaten scheint möglich (Gabriels, 1986).

Die mittleren Sommerniederschlagshöhen wurden benutzt, um eine Isoerodentkarte (Abb. 1) von Bayern anzufertigen. In ihr ist der R-Faktor flächendeckend in den Klassen < 48; 48–55; 56–62; 63–69; 70–83; 84–97; 98–111 und > 111 kJ/m<sup>2</sup> · mm/h dargestellt. Aus dieser Karte können für jeden beliebigen Ort durch Interpolation die R-Faktoren abgeschätzt werden. Genauer kann der R-Faktor über die obigen Regressionsgleichungen bestimmt werden. Man benötigt hierzu die mittlere Jahresniederschlagssumme oder besser die Summe der Sommerniederschläge von Mai bis Oktober.

Um die R-Faktoren leichter zu finden, sind sie in Tab. 2 für die bayerischen Landkreise aufgeführt. Es sind dies gewogene Mittelwerte, ermittelt aus den mittleren Sommerniederschlägen innerhalb der Kreise. In Gebieten mit starker, engräumiger Variation des R-Faktors innerhalb eines Landkreises wie z. B. im Bayrischen Wald, kann der genaue R-Faktor eines Ortes auch aus den Gesamt- oder Sommerniederschlägen (s. oben) ermittelt werden, soweit diese bekannt sind. In den meisten Fällen dürfte aber der Mittelwert genau genug sein.

### Einfluß der Schneeschmelze

Im R-Faktor ist die Erosion durch Schmelzwasser nicht enthalten. Diese kann jedoch, wie Beobachtungen zeigen, unter bestimmten Bedingungen erheblich sein. Zum Zeitpunkt der Schneeschmelze kann der Boden meist nur wenig Wasser aufnehmen, und der oberste Boden ist durch den Frost in kleine, leicht transportierbare Aggregate zerteilt.

Quantitative Messungen über diesen Einfluß liegen noch nicht vor. Daher muß er einstweilen noch grob geschätzt werden. Es wird vorgeschlagen, zum R-Faktor 1/10 der Niederschläge zwischen 1. Dezember und 31. März als Zahlenwert hinzuzunehmen.

zuzählen. Dieser Zuschlag sollte in allen Gebieten gemacht werden, in denen regelmäßige Bodenabträge durch Schmelzwässer beobachtet werden.

Bei der Jahres-R-Verteilung, mit dessen Hilfe der C-Faktor berechnet wird, wurde der Bodenabtrag durch Schmelzwasser noch nicht berücksichtigt.

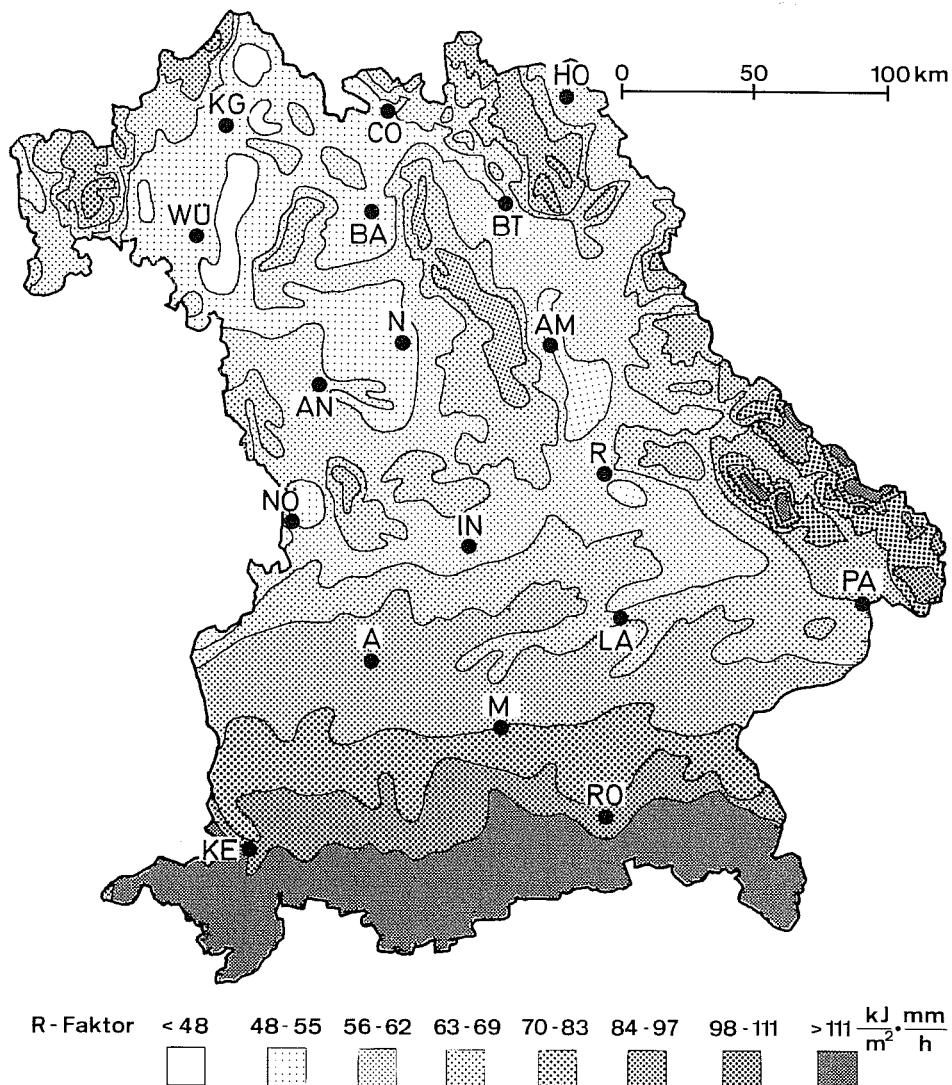


Abb. 1: Isoerodenkarte von Bayern

**Tabelle 2: R-Faktoren der bayerischen Landkreise**

Landkreis	R-Faktor	Landkreis	R-Faktor
Aichach-Friedberg	72	Landsberg/Lech	89
Altötting	79	Landshut	67
Amberg Stadt	55	Landshut Stadt	63
Amberg-Sulzbach	59	Lichtenfels	57
Ansbach	59	Lindau (Bodensee)	118
Ansbach Stadt	56	Mühldorf/Inn	78
Aschaffenburg	65	München	92
Aschaffenburg Stadt	55	München Stadt	83
Augsburg	76	Main-Spessart	58
Augsburg Stadt	73	Memmingen Stadt	88
Bad Kissingen	58	Miesbach	119
Bad Tölz-Wolfratshausen	116	Miltenberg	58
Bamberg	58	Nürnberg Land	65
Bamberg Stadt	55	Nürnberg Stadt	56
Bayreuth	64	Neu-Ulm	72
Bayreuth Stadt	55	Neuburg-Schrobenhausen	64
Berchtesgadener Land	116	Neumarkt/Opf.	64
Cham	75	Neustadt/Aisch	55
Coburg	57	Neustadt/Waldnaab	62
Coburg Stadt	55	Oberallgäu	119
Dachau	72	Ostallgäu	108
Deggendorf	74	Passau	76
Dillingen/Donau	64	Passau Stadt	71
Dingolfing-Landau	63	Pfaffenhofen/Ilm	68
Donau-Ries	60	Regen	91
Ebersberg	88	Regensburg	59
Eichstätt	62	Regensburg Stadt	56
Erding	75	Rhön-Grabfeld	56
Erlangen Stadt	55	Rosenheim	106
Erlangen-Höchstadt	55	Rosenheim Stadt	102
Fürstenfeldbruck	78	Roth	58
Fürth	55	Rottal-Inn	71
Fürth Stadt	55	Schwabach Stadt	55
Forchheim	63	Schwandorf	62
Freising	70	Schweinfurth	51
Freyung-Grafenau	91	Schweinfurth Stadt	48
Günzburg	73	Starnberg	95
Garmisch-Partenkirchen	119	Straubing Stadt	57
Haßberge	55	Straubing-Bogen	68
Hof	64	Tirschenreuth	65
Hof Stadt	62	Traunstein	107
Ingolstadt Stadt	62	Unterallgäu	88
Kaufbeuren Stadt	99	Würzburg	51
Kehlheim	64	Würzburg Stadt	48
Kempten Stadt	100	Weissenburg-Gunzenhausen	62
Kitzingen	52	Weiden/Opf. Stadt	62
Kronach	64	Weilheim-Schongau	106
Kulmbach	60	Wunsiedel	67

### Kommentar

Die R-Faktoren in Bayern liegen mit  $40\text{--}140 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{mm/h}$  deutlich niedriger als die in den USA östlich der Rocky Mountains ( $90\text{--}1000$ ). Dies liegt daran, daß bei uns bei gleichem Gesamtniederschlag sehr viel weniger Starkregen auftreten. Dementsprechend besteht auch ein sehr hoher Anteil der Jahres-R-Summe aus Regen mit geringeren R-Werten. Wischmeier weist jedoch darauf hin, daß ein bestimmter R-Faktor, der aus vielen einzelnen erosionsschwachen Regen zusammengesetzt ist, die gleiche Erosivität aufweist, wie ein gleicher, der aus wenigen, aber erosionsintensiveren Regen besteht. Im Prinzip müßte dies für unseren Raum erst noch nachgewiesen werden. Andererseits ist es aber möglich, daß auch schwächere Regen als 12,5 mm bei uns bereits einen Abtrag bewirken, weil die Böden im Mittel feuchter und nicht selten oberflächennah verdichtet sind, so daß weniger Niederschläge versickern. Aus diesem Grund werden auch alle Niederschläge  $> 10 \text{ mm}$  statt  $> 12,5 \text{ mm}$  wie bei Wischmeier in die Summation einbezogen. In Belgien werden sogar alle Niederschläge  $> 1,27 \text{ mm}$  in der R-Faktor-Berechnung berücksichtigt. Möglich erscheint weiterhin, daß die höhere Bodenfeuchte bei uns zu Algenwuchs und verstärkter mikrobieller Tätigkeit führen, die den Boden besser schützen und so den Abtrag verringern.

Wegen des hohen Beitrages seltener Starkregen auf den mittleren R-Faktor ist dessen Genauigkeit naturgemäß bei einem 10-jährigen Meßzeitraum nicht sehr hoch. In den USA wurde die Isoerodentkarte aus dem 22-jährigen Niederschlagsgeschehen von 181 Stationen östlich der Rocky Mountains erstellt. Dies entspricht einer Station pro  $26500 \text{ km}^2$ . Für weitere 1700 Stationen wurden die R-Werte aus den Beziehungen zwischen den gemessenen R-Werten und der Häufigkeit bestimmter Starkregen errechnet. Der bayerischen Karte liegen für die meisten der 18 Stationen mindestens 10-jährige Messungen bei 1 Station pro  $4000 \text{ km}^2$  zugrunde. Der Abstand zweier Isoerodentlinien liegt bei der USA-Karte mit 40 bis 160 R-Einheiten wesentlich über dem der Karte Bayerns. Eine Isoerodentkarte für weitere Gebiete Mitteleuropas ist z. Z. in Arbeit (Gabriels, 1986).

# Bodenerodierbarkeitsfaktor K

## Wesen des K-Faktors

Böden unterscheiden sich in ihrer Erosionsgefährdung. Diese hängt zwar von vielen Bodeneigenschaften ab, lässt sich aber nach Wischmeier und Smith doch mit folgenden 5 Eigenschaften ausreichend gut quantifizieren:

Gehalt (%) an der Korngröße 0,002–0,1 mm (Schluff + Feinstsand)

Gehalt (%) an der Korngröße 0,1 mm (Sand abzügl. Feinstsand)

Gehalt (%) an organischer Substanz

Aggregatklasse

Durchlässigkeitssklasse

Diese Bodeneigenschaften sind nur dann als charakteristisch für die Erodierbarkeit des Bodens anzusehen, wenn sie sich langfristig nur wenig ändern. Kurzfristig z. B. durch Bewirtschaftung sich verändernde Bodeneigenschaften werden dagegen im C-Faktor berücksichtigt. Eine Trennung von kurz- und langfristig sich ändernden Eigenschaften ist jedoch nicht immer leicht. Während sich die Korngrößen Zusammensetzung und der Gehalt an organischer Substanz nicht bzw. nicht kurzfristig ändern, gilt dies für die Aggregat- und Durchlässigkeitssklasse nicht so eindeutig, da beide z. B. durch die Bodenbearbeitung im Bearbeitungshorizont und unmittelbar darunter verändert werden.

Die quantitative Beziehung zwischen dem Bodenabtrag und den 5 Bodeneigenschaften wurde in den USA für Standardhänge (Einheitshänge) berechnet. Der Standardhang hat folgende Eigenschaften:

Eingegrenzte Hänge von 22,1 m Länge und 1,87 m Breite

Hangneigung 9 %

Bodenbearbeitung hangauf-hangab

Vegetationsfreiheit (einschl. Unkraut) mindestens 2 Jahre vor der Messung und während der gesamten Meßzeit (= Schwarzbrache)

Konventionelle Maissaatbettbereitung jedes Frühjahr, jedoch ohne Saat

Brechen der Oberflächenkrusten nach jedem Starkregen

Für diese Standardbedingungen sind die Faktoren L, S, C und P definitionsgemäß gleich 1. Der Abtrag des Standardhanges beträgt daher  $A = K \cdot R$ . Die Erodibilität des Bodens (K-Faktor) ist demnach  $K = A/R$ . K ist also der Abtrag pro R-Faktor-Einheit am Einheitshang und ist daher ein Maß für die Erosionsanfälligkeit (Erodibilität) des Bodens. Er hat die Dimension:

$$\frac{t}{ha} \left( \left( \frac{kJ}{m^2} \cdot \frac{mm}{h} \right) \left( = \frac{t \cdot h}{ha \cdot N} \right) \right)$$

## Ermittlung der 5 Bodeneigenschaften

**Kornfraktionen:** Die für das unten beschriebene Nomogramm benötigten Kornfraktionen Schluff + Feinstsand und Sand der Ackerkrume müssen im Labor bestimmt werden. Der Feinstsand wird bei den Routinekörnungsanalysen in der BRD allerdings meist nicht mitbestimmt. Er lässt sich jedoch dadurch grob berücksichtigen, daß der Schluff um ein Drittel des Feinsandes (0,06–0,2 mm)

erhöht wird. Genauer lässt sich der Feinstsand aus dem Fein- und Mittelsand mithilfe folgender empirischer Beziehung berechnen ( $r = 0,875$ ):

$$\text{Feinstsand} = 2,6 + 0,285 \cdot (\text{Feinsand}) - 0,138 \cdot (\text{Mittelsand}).$$

**Organische Substanz:** ist der mit 1,72 multiplizierte Gehalt an organischem Kohlenstoff (in %) der Ackerkrume, der ebenfalls im Labor bestimmt werden muß.

**Aggregatklaasse:** Hier werden die bei der Bodenkartierung (s. Kartieranleitung 1982) üblichen Größenklassen verwendet (Tab. 3a). Sie sind ebenfalls in der Ackerkrume zu ermitteln.

**Tabelle 3a: Aggregatklassen**

Aggregation in der Ackerkrume	Mittlere Aggregatgröße (mm)	Aggregatklaasse
sehr feinkrümelig	< 1	1
feinkrümelig	1– 2	2
mittel bis grobkrümelig	2–10	3
blockig, plattig oder fest	> 10	4

**Durchlässigkeitssklasse:** Auch hier wird die bei der Bodenkartierung übliche Einteilung verwendet (Tab. 3b):

**Tabelle 3b: Durchlässigkeitssklasse**

Bezeichnung nach Kartieranleitung	Wasserleitfähigkeit (cm/d)	Durchlässigkeitssklasse
sehr gering	< 1	1
gering	1– 10	2
mittel	10– 40	3
hoch	40–100	4
sehr hoch	100–300	5
extrem hoch	> 300	6

Während die bisherigen Eigenschaften in der Ackerkrume zu ermitteln sind, bezieht sich die Durchlässigkeit auf das ganze Profil. Die für die einzelnen Horizonte ermittelten oder geschätzten Werte sind von oben bis zum Horizont mit der geringsten Durchlässigkeitssklasse arithmetisch zu mitteln, falls dieser Horizont in 40–80 cm Tiefe liegt. Liegt er oberhalb von 40 cm, so wird er bei der Mittelung doppelt berücksichtigt, liegt er oberhalb 20 cm, so bestimmt er allein die Durchlässigkeitssklasse des gesamten Profils.

Die Durchlässigkeitssklasse kann auch im Feld mithilfe von Bodenart und Lagerungsdichte horizontweise bis 80 cm Tiefe geschätzt werden. Ein Verfahren hierzu enthält die Kartieranleitung (1982, S. 153).

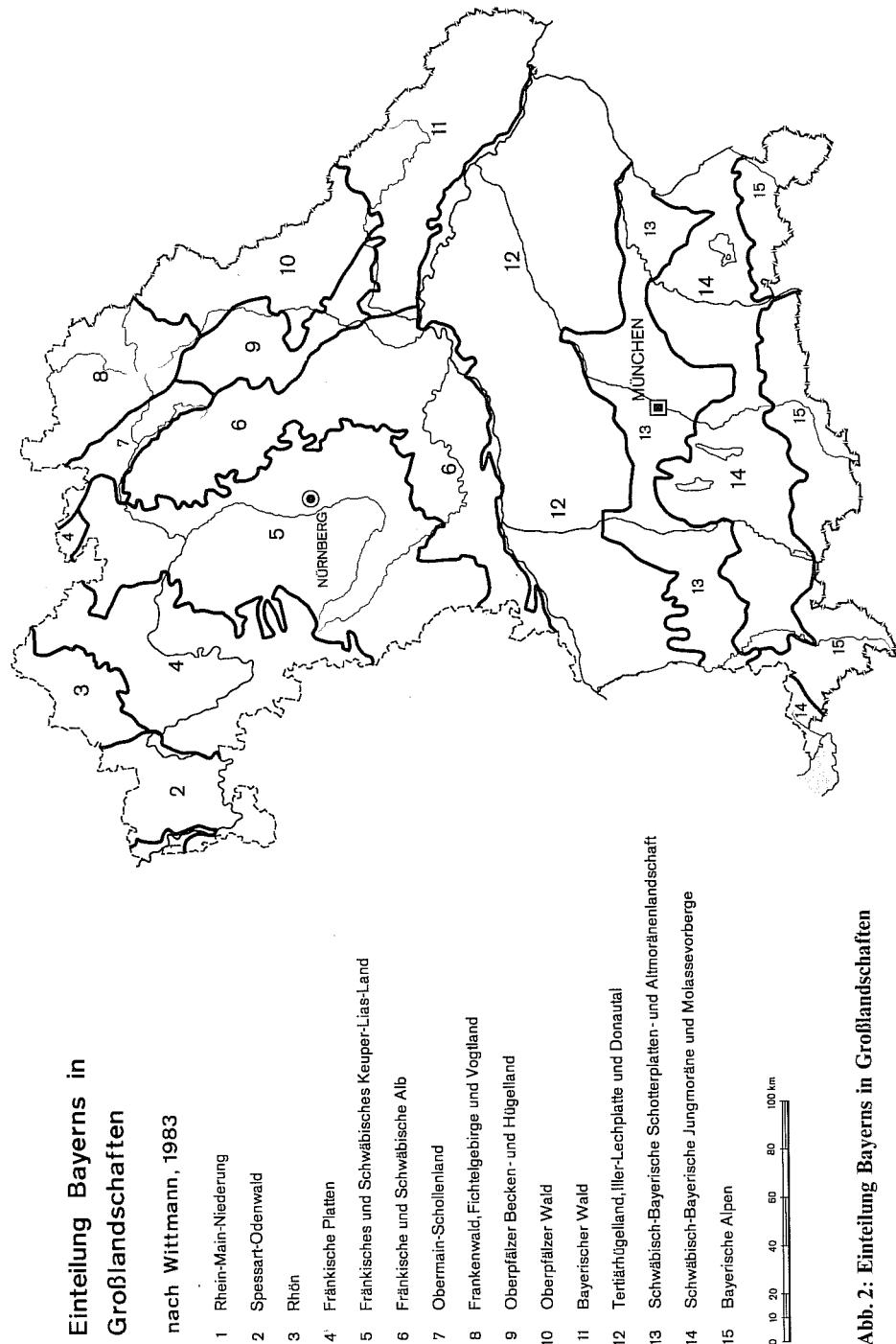


Abb. 2: Einteilung Bayerns in Großlandschaften

### Das K-Faktor-Nomogramm

Die 5 Bodeneigenschaften werden mithilfe der folgenden Gleichung zum K-Faktor verrechnet:

$$K = 2,77 \cdot 10^{-6} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OS) + 0,043 \cdot (A - 2) + 0,033 \cdot (4 - D)$$

$M = (\% \text{ Schluff} + \text{Feinstsand}) \cdot (\% \text{ Schluff} + \% \text{ Sand})$  (incl. Feinstsand)

$OS = \% \text{ organische Substanz}$ ; für  $OS > 4\%$  4 einsetzen

$A = \text{Aggregatklasse}$

$D = \text{Durchlässigkeitssklasse}$

Die obige Gleichung gilt nur für Böden mit 0–70% Schluff + Feinstsand und nicht für Böden mit K-Vorwerten von < 0,16–0,18 (vorw. Sande und Tone). Sie ist die Grundlage des K-Faktor-Nomogramms (Abb. 3), das jedoch über diese Restriktionen hinaus ausgeweitet wurde.

Aus der Gleichung geht hervor, daß ein Boden umso erosionsanfälliger ist,

- je höher der Schluff- plus Feinstsandgehalt
- je geringer der Tongehalt
- je geringer der Humusgehalt
- je größer die Aggregate und
- je geringer die Wasserdurchlässigkeit ist.

Der Gebrauch des K-Faktor-Nomogramms (Abb. 3) ist an einem Beispiel mithilfe der gestrichelten Linie demonstriert. Das Beispiel gilt für einen Boden mit 65% Schluff plus Feinstsand, 5% Sand (ohne Feinstsand), 3% organischer Substanz, Aggregatklasse 2 und Durchlässigkeitssklasse 3. Man tritt von links bei 65% Schluff + Feinstsand in das Nomogramm ein, fährt bis zur 5% Sand-Linie fort, von dort nach oben bis zur 3% org.-Substanz-Linie und von dort nach rechts. Man trifft dann auf die Achse des K-Vorwertes (0,37), der für die Aggregatklasse 2 und die Durchlässigkeitssklasse 4 gleich dem K-Faktor ist. Weichen Aggregat- und/oder Durchlässigkeitssklasse von 2 bzw. 4 ab, so schreitet man vom K-Vorwert zur zutreffenden Aggregatklassen-Linie (hier 2) und von dort nach unten zur Durchlässigkeitssklassen-Linie (hier 3) fort und findet schließlich, nach links fahrend, den K-Faktor (hier 0,40).

Liegen auf der Bodenoberfläche Steine, so verringern diese den K-Faktor, weil sie die kinetische Energie der Regentropfen weitgehend vernichten. Dieser Einfluß wurde analog dem Einfluß des Mulches auf den Relativen Bodenabtrag quantifiziert (s. Abb. 6). Um diese Verringerung des K-Faktors zu ermitteln, schätzt man zunächst den Bedeckungsgrad durch die Steine (hier 20%) und bildet dann im Nomogramm von der K-Faktorskala zur Steinbedeckungsskala (hier 20%) eine gerade Linie, die zur Skala des korrigierten «K-Faktors mit Steinen» verlängert wird (hier 0,26).

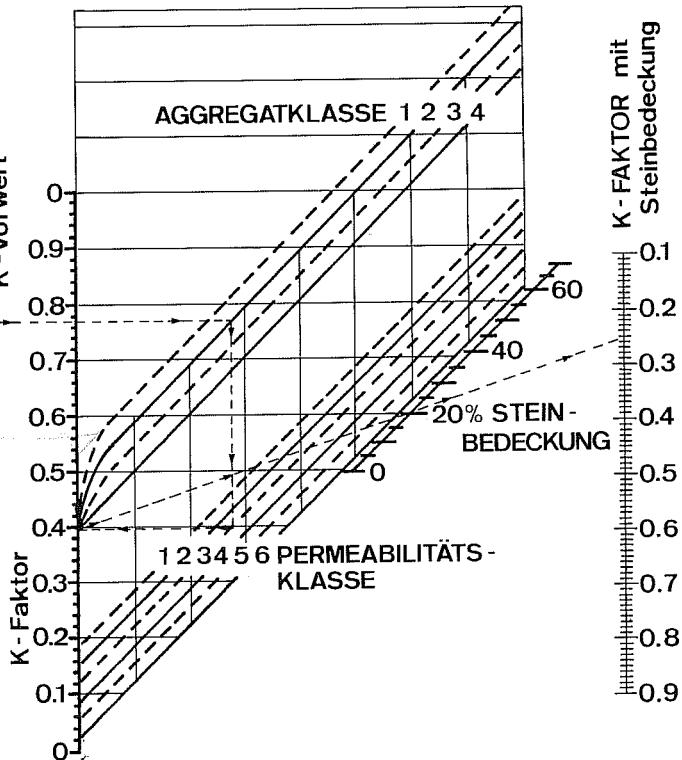
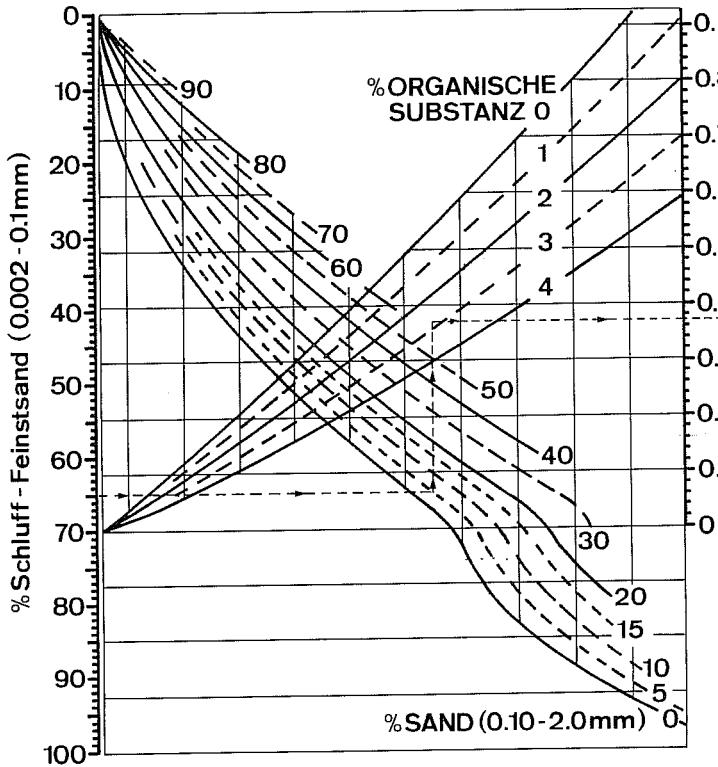


Abb. 3: K-Faktor-Nomogramm

**Tabelle 4: Mittlere K-Faktoren der Ackerbeschriebe der Reichsbodenschätzung**

Bodenart nach Reichsbodenschätzung	Entstehung*	K-Faktor Zustandstufe $\leq 4$ $\geq 5$	K-Faktor**
S	D, Al, V	0,10	0,20
Sl	D, Al, V	0,15	0,20
lS	D, Al, V Lö Vg	0,20 0,25 0,15	0,25
SL	D, Al, V Lö Vg	0,30 0,25 0,35 0,15	0,35
sL	D, Al Lö V Vg	0,40 0,50 0,30 0,20	0,55
L	D, Al Lö V Vg	0,50 0,55 0,40 0,35 0,25 0,20	0,55
LT	D, Al V Vg	0,40 0,35 0,30 0,25 0,20	
T	D, Al V Vg	0,30 0,25 0,15	

\* D: Diluvium; Al: Alluvium; V: Verwitterungsböden; Vg: Gesteinsböden; Lö: Löss

\*\* gilt nur für feinsandige Böden (Böden aus Schilf-, Eisen-, Knollensandstein, Miltenberger Sandstein, Rheinhauser Schichten, Mehl- und Schillsanden).

### **K-Faktoren aus Bodenkarten**

Die in Bayern vom Bayerischen Geologischen Landesamt in den letzten Jahren hergestellten standortkundlichen Bodenkarten 1:25 000 und 1:50 000 enthalten die K-Faktoren jeder kartierten Bodenform. Diese K-Faktoren sind Mittelwerte von Einzelprofilen, bestimmt mithilfe des Nomogramms. In Gebieten, für die solche Bodenkarten vorliegen (Auskunft bei den Geol. Landesämtern), kann ihnen der K-Faktor der jeweiligen Bodenform direkt entnommen werden. In den älteren Karten wird allerdings der K-Faktor noch in US-Einheiten geführt:

$$K_{SI} = K_{US} \cdot 1,32$$

### **K-Faktor aus dem Beschrieb der Reichsbodenschätzung**

Die Reichsbodenschätzung ist für fast alle Ackerstandorte verfügbar. Dem verkürzten Klassenbeschrieb (Bodenart\* und Entstehung) wurden mithilfe des Nomogramms berechnete K-Faktoren zugeordnet (Tab. 4). Diese Tabelle gilt für Ackerbeschriebe. Den Grünlandbeschrieben können wegen der zu großen Streuung innerhalb der Einheiten keine K-Faktoren zugeordnet werden. In vielen Fällen ist es jedoch möglich, die K-Faktoren benachbarter Ackerschläge zu verwenden, falls die Böden hinreichend ähnlich sind.

Werden die K-Faktoren anhand von Bodenkarten oder anhand der Reichsbodenschätzung bestimmt, so können am Einzelschlag erhebliche Fehler auftreten. Diese K-Faktorzuordnung ist daher nur für einen ersten Überblick oder für den Vergleich größerer Gebiete (Wassereinzugsgebiete, Landschaften) geeignet.

### **K-Faktoren bayerischer Böden**

Das im vorigen Kapitel zur Bestimmung der K-Faktoren vorgestellte Nomogramm beruht auf Messungen an Böden in den USA. Obwohl zu erwarten ist, daß das Nomogramm auch auf unsere Böden anwendbar ist, war es doch nötig, dieses durch Messungen zu überprüfen. Dies gilt besonders für sehr sandige und sehr tonige Böden, die im Nomogramm nicht ausreichend berücksichtigt sind.

Daher wurden die K-Faktoren an 32 bayerischen Böden\*\*, die das Spektrum der Bodenarten ackerbaulich genutzter Böden in erosionsgefährdeten Lagen gut abdecken, experimentell ermittelt. Diese K-Faktoren wurden auf 8 m langen, 1 m breiten und 9 % geneigten Parzellen mit simulierten Starkregen bei unterschiedlichen Feuchtebedingungen (Trocken-, Feucht- und Naßlauf) gemessen. Die Böden wurden unkrautfrei gehalten, die Oberflächenkrusten wurden gebrochen und ein Saatbett wie zur Rübensaat hergestellt.

\* Die Bodenarten der Reichsbodenschätzung, die aus den Bodenarten des Gesamtprofils gebildet wurden («Gesamtgepräge»).

\*\* Die Auswahl der Böden traf das Bayerische Geologische Landesamt.

Die K-Faktoren dieser Böden sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Der K-Faktor eines Bodens lässt sich dann aus dieser Tabelle ablesen, wenn seine Eigenschaften nicht wesentlich von den Eigenschaften der untersuchten Böden abweichen. Als Abweichung sind nicht mehr als 5 % bei Sand oder Schluff, oder 1 % bei den einwertigen Kationen am Austauscher oder 2 % bei der Steinbedeckung von einem der tabellierten Böden tolerierbar. Weichen gleichzeitig mehrere Eigenschaften ab, so sind die Grenzen um den Faktor 1/n enger zu setzen, wobei n die Anzahl der abweichenden Eigenschaften ist.

**Tabelle 5:**  
**Gemessene K-Faktoren bayerischer Böden.**

Die Böden sind nach Bodenart und Bodenform gegliedert. Außerdem sind die erosionsrelevanten Bodeneigenschaften der Böden angegeben.

Boden- art	Bodenform	Körnung			Anteil an der Basen- sättigung			Steinbedeckung %	K-Faktor
		Nummer d. Großland- schaft (s. Abb. 2)	Korngr. 0,002–0,63 mm	Korngr. 0,63–2 mm	Org. Substanz	K	Na		
		%	%	%	%	%	%	%	

## 1. Ackerböden

### 1.1. Böden aus Löß und Lößlehm in Bayern

IU	Parabraunerde aus Löß (Weißlehm)	4	79	4	1,8	17,5	1,9	0	<b>0,78</b>
IU	Parabraunerde aus Löß (Weißlehm)	12	78	2	1,3	3,9	0,9	0	<b>0,49</b>
uL	Parabraunerde aus Lößlehm der lehmigen Albüberdeckung	6	64	14	2,2	7,7	0,0	1	<b>0,44</b>
uL	Pararendzina aus Sandlöß	12	67	9	1,8	1,4	0,6	2	<b>0,42</b>
uL	Pararendzina aus Löß	12	63	13	1,6	2,0	0,0	3	<b>0,37</b>
uL	Pseudogley-Braunerde aus Löß (schwarzerdeartig)	13	58	22	2,3	5,5	0,0	2	<b>0,30</b>
utL	Parabraunerde aus Löß (Rotlehm)	12	65	2	1,4	2,9	0,5	1	<b>0,29</b>
utL	Kolluvium aus Lößlehm	12	52	12	3,3	3,4	0,5	0	<b>0,29</b>

**Tabelle 5:** Fortsetzung

Boden- art	Bodenform	Nummer d. Großland- schaft (s. Abb. 2)	Körnung			Anteil an der Basen- sättigung			Steinbedeckung	K-Faktor
			0,002–0,63 mm	0,63–2 mm	Org. Substanz	K	Na			
		%	%	%	%	%	%	%	%	%

**1.2. Böden aus Sanden und Mergeln des Schichtstufenlandes**

S	Braunerde aus Doggersandstein	5	8	86	1,0	8,4	0,0	9	<b>0,05</b>
I'S	Gley-Podsol aus Flugsand	6	9	86	2,9	3,1	0,0	1	<b>0,04</b>
I'S	Braunerde aus Burgsandstein	5	10	82	2,8	7,0	0,0	4	<b>0,10</b>
IS	(Para)-Braunerde aus Lößlehm und Coburgersandstein	5	31	58	1,4	11,5	0,0	1	<b>0,65</b>
IS	Braunerde aus Schilfsandstein	5	37	48	1,9	12,3	0,0	7	<b>0,40</b>
SL	Braunerde aus Doggersandstein mit Lößlehm	5	16	63	3,4	5,8	0,0	7	<b>0,18</b>
s'uL	Braunerde-Pseudogley aus schuffreicher Decke mit Amaltheenton	5	50	25	2,4	8,9	0,5	5	<b>0,30</b>
tL	Pelosol aus Opalinuston	5	38	17	3,2	8,0	0,4	6	<b>0,24</b>
sT	Braunerde-Pelosol aus Feuerletten	5	20	45	3,0	8,3	0,3	1	<b>0,22</b>
IT	Pelosol aus Gipskeuper	4	33	4	2,4	6,0	0,0	2	<b>0,30</b>

**1.3. Böden aus Molasse des Tertiären Hügellandes**

kil'S	Braunerde aus fs-ms Molasse	12	12	81	1,3	20,0	0,0	13	<b>0,19</b>
lS	Braunerde aus l', fs-ms Terassensand	12	21	69	1,6	15,3	0,0	3	<b>0,25</b>
lS	Braunerde aus l, fs-ms kiesiger Molasse	12	27	61	1,6	5,1	0,0	6	<b>0,25</b>
xSL	Braunerde aus sandig, kiesiger Molasse mit Lößlehm	12	36	43	1,7	4,1	0,0	8	<b>0,28</b>
sL	Pseudogley-Braunerde aus Tonmergel und Glimmerschluff	12	33	43	2,2	5,2	0,0	3	<b>0,29</b>

**Tabelle 5:** Fortsetzung

Boden- art	Bodenform		Körnung		Anteil an der Basen- sättigung				
			Nummer d. Großland- schaft (s. Abb.2)						
			0,002–0,63 mm	0,63–2 mm	Org. Substanz	K	Na		Steinbedeckung
			%	%	%	%	%		%

**1.4. Böden aus Geschiebe der Jungmoränenlandschaft**

kit'L	Braunerde-Rendzina aus sandig-kiesiger Jungmoräne	14	39	30	6,3	0,4	6	9	<b>0,16</b>
kit'L	Braunerde-Rendzina aus schluffig-kiesiger Jungmoräne	14	43	21	3,9	0,3	6	6	<b>0,18</b>

**1.5. Böden aus Kristallinverwitterung der ostbayerischen Mittelgebirge**

xlS	Braunerde, stark grusig,	10	30	55	3,1	4,1	0,0	23	<b>0,06</b>
xlS	Braunerde, grusig,	10	33	51	3,0	12,2	0,0	10	<b>0,31</b>
sL	Braunerde, glimmerreich, aus Fließerde	10	40	38	2,1	1,9	0,0	6	<b>0,45</b>
s'L	(Para)-Braunerde aus schluff- reicher Deckschicht	11	50	25	2,9	5,9	0,0	4	<b>0,35</b>

**2. Weinbergsböden**

t'L	Regosol aus grusigem Gipskeuper	4	45	24	0,9	5,9	0,0	7	<b>0,27</b>
xtL	Regosol aus oberem Muschelkalk	4	50	12	1,3	3,9	0,5	13	<b>0,16</b>

Die verwendeten Abkürzungen für die Bodenart entsprechen der Bodenkundlichen Kartieranleitung von 1982.

**Kommentar**

Die aus dem Nomogramm entnommenen K-Faktoren können als hinreichend zuverlässig gelten, denn in den USA war zwischen den so ermittelten und den tatsächlich gemessenen K-Faktoren für den K-Bereich von 0,05–0,86 die Differenz in 65 % der Fälle nur < 0,026K und in 95 % der Fälle nur 0,05K. In Bayern können für Böden, die denen in der Tabelle 5 hinreichend ähnlich sind, die K-Faktoren aus der Tabelle 5 entnommen werden.

K-Faktoren aus Bodenkarten oder aus der Reichsbodenschätzung können nicht auf Einzelschläge sondern nur auf größere Flächeneinheiten angewendet werden.

# Topographiefaktor LS

## Wesen und Berechnung des LS-Faktors

Der Bodenabtrag einer geneigten Fläche nimmt mit zunehmender Neigung und mit zunehmender Hanglänge zu. Je steiler ein Hang ist, umso früher kommt es bei erosiven Niederschlägen zu oberflächlichem Abfluß und umso schneller fließt das Wasser hangabwärts. Mit zunehmender Hanglänge sammelt sich hangabwärts immer mehr Oberflächenwasser und dieses fließt immer schneller ab.

Menge und Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses bestimmen seine Abscher- und Transportkapazität. Dieser Zusammenhang wird durch den LS-Faktor quantitativ beschrieben. Er gibt das Verhältnis des Abtrages eines Hanges beliebiger Neigung und beliebiger Länge zu dem des Standardhanges mit 22 m Länge und 9% Gefälle unter sonst gleichen Bedingungen an. Der LS-Faktor ist also eine Verhältniszahl.

Der LS-Faktor wird Nomogrammen entnommen (Abb. 5a–d). Den Nomogrammen liegt folgende empirische Beziehung zwischen LS einerseits und der erosiven Hanglänge  $l$  (in m), der Hangneigung  $\theta$  (in Grad) und dem Hanglängenexponenten  $m$  andererseits zugrunde:

$$LS = (l/22)^m \cdot (65,41 \cdot \sin^2 \theta + 4,56 \cdot \sin \theta + 0,065).$$

Der Hanglängenexponent  $m$  variiert mit der Hangneigung wie folgt:

Hangneigung (%)	$m$
0,5 u. kleiner	0,15
0,6–1,0	0,2
1,1–3,4	0,3
3,5–4,9	0,4
5,0 u. größer	0,5

Nahezu gleiche Werte für den LS-Faktor erbringt die folgende Gleichung, in der die Hangneigung ( $s$ ) in % ausgedrückt wird:

$$\text{LS-Faktor} = (l/22)^m \cdot s/9 \cdot \sqrt{(s/9)}$$

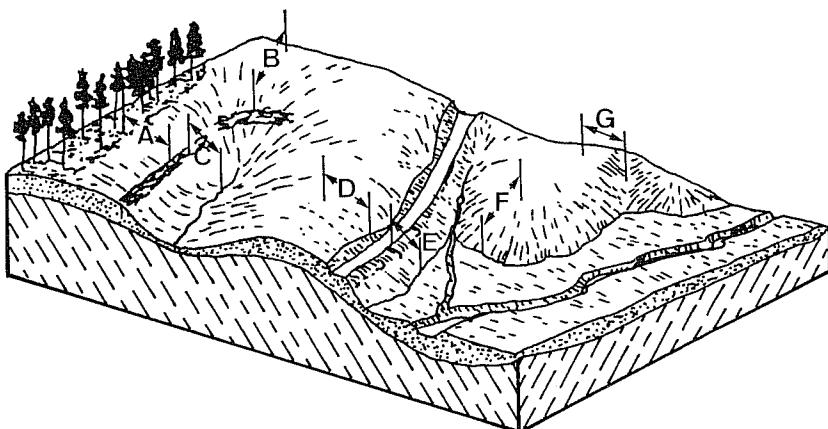
Diese Gleichung zeigt, daß die Hanglänge unterproportional – der Exponent  $m$  ist kleiner als 1 – die Hangneigung dagegen leicht überproportional in den LS-Faktor eingehen.

Die **Hanglänge** ist stets in Gefällerichtung zu messen. Sie ist die Länge zwischen der Stelle am Hang, wo im Mittel der Ereignisse der Oberflächenabfluß einsetzt und der Stelle, wo am Unterhang die Ablagerung von Bodenmaterial (Sedimentation) beginnt oder wo das Wasser in einen Vorfluter eintritt. Diese sog. **erosive Hanglänge** ist also häufig kürzer als die Gesamtlänge des Hanges und kann daher meist auch nicht topographischen Karten entnommen werden. Die Stelle, wo die Sedimentation beginnt, ist häufig an einer deutlichen Hangverflachung erkennbar, genauer jedoch daran, daß die durch Humus dunkler gefärbte Krume dicker ist als die Pflugschicht. Schlaggrenzen begrenzen die Hanglänge nur, wenn sie Sedimentation bewirken und kein Wasser auf den darunterliegenden Schlag überlaufen kann, sondern quer zum Hang langsam abgeleitet wird. Dies ist meist der Fall, wenn das Feldstück von seinem höher gelegenen Nachbar durch einen Feldrain oder

Gürtelweg getrennt ist. Die beiden Feldstücke sind dann getrennt zu berechnen.

Zur Erläuterung des hier Gesagten dient Abb. 4, in der verschiedene erosive Hanglängen in eine komplexe Landschaft eingezeichnet wurden.

Die **Hangneigung** ist mit einem Hangneigungsmesser zu bestimmen. Diese Messung sollte so genau wie möglich erfolgen, da der daraus abgeleitete S-Faktor den Abtrag von Schlägen in vielen Fällen stärker beeinflusst als jeder andere Faktor.



**Abb. 4:** Bestimmung der erosiven Hanglänge (nach Dissmeyer & Foster, 1980; verändert)

#### Hanglänge:

- A: Sofern im Wald kein Oberflächenabfluß auftritt, beginnt die wirksame Hanglänge am Waldrand. Sie endet am Feldrain, wenn dieser das Wasser sammelt und ableitet.
- B: Von Punkt, an dem der erste Oberflächenabfluß auftritt, bis zum Rain, sofern dieser das Wasser sammelt.
- C: Vom Feldrain bis zum Punkt, an dem der Abfluß zusammengeführt wird.
- D: Vom Punkt, an dem Oberflächenabfluß auftritt, bis zur Straße, die den Abfluß sammelt.
- E: Von der Straße bis zu dem Punkt der Talsohle, an dem die Ablagerung beginnt.
- F: Von dem Punkt der Hangschulter, an dem der Abfluß beginnt, bis zu der Stelle der Talsohle, an der die Ablagerung beginnt.
- G: Vom Beginn des Oberflächenabflusses bis zur Einkerbung, in der sich der Abfluß sammelt.

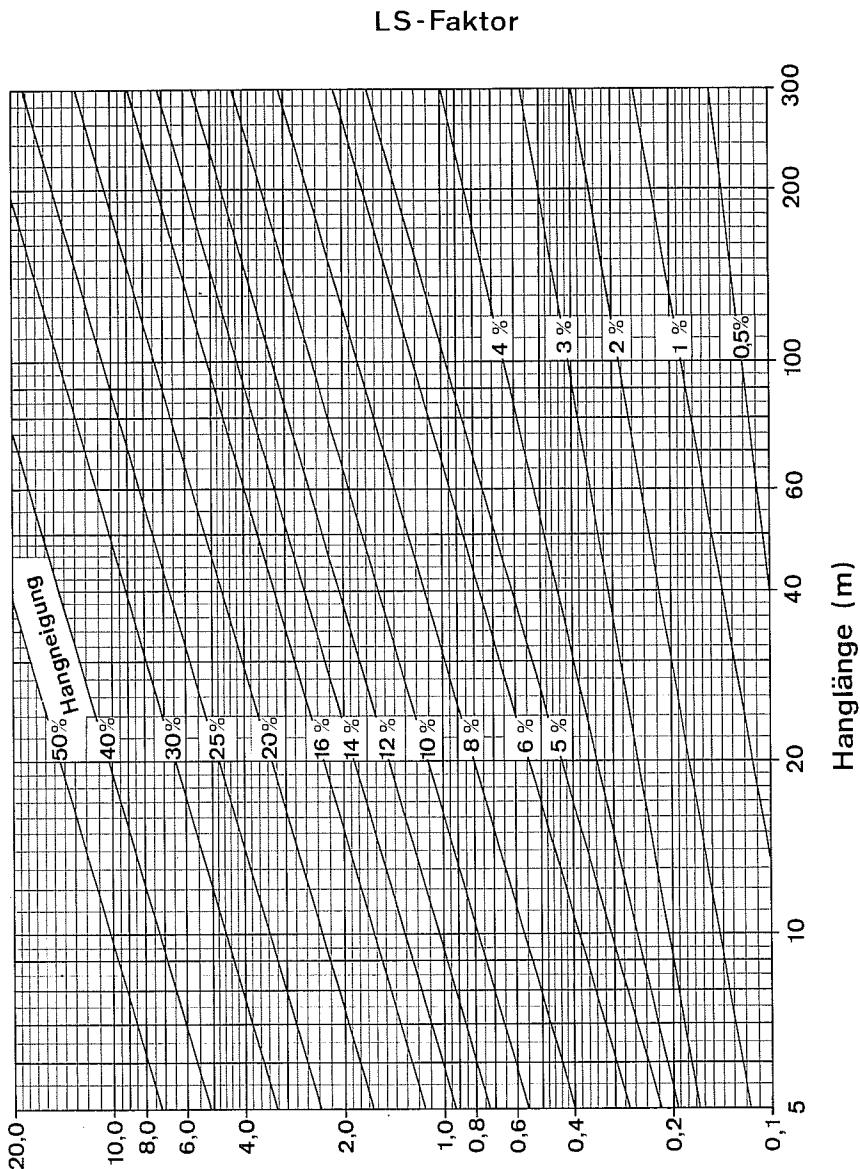


Abb. 5a: LS-Nomogramm (weitere LS-Nomogramme siehe auch Abb. 5b, c, d)

### Ablesevorschrift für die LS-Nomogramme

**1. LS-Nomogramm in Abb. 5a**

Bitte beachten: Die Skalen des Nomogramms sind nicht linear sondern logarithmisch geteilt. Dies bedeutet, daß die Abstände nach rechts und nach oben immer enger werden. Zwischenwerte müssen interpoliert werden.

a. Ablesen des LS-Faktors

- Auf der Hanglängenachse die im Feld ermittelte erosive Hanglänge aufsuchen.
- Von hieraus senkrecht nach oben bis zu derjenigen schräg nach rechts oben verlaufenden Linie gehen, auf der die Neigung des betreffenden Hanges verzeichnet ist.
- Vom Kreuzungspunkt waagerecht nach links gehen und auf der LS-Faktor-Skala den LS-Faktor ablesen.

b. Ablesen der tolerierbaren Hanglänge

- Nach Vorschrift von S. 36 den tolerierbaren LS-Faktor  $L_{max}S$  ermitteln.
- Auf der LS-Faktor-Skala des LS-Nomogramms den tolerierbaren  $L_{max}S$ -Faktor aufsuchen.
- Auf der LS-Faktor-Linie waagerecht nach rechts bis zur zutreffenden HangneigungsLinie gehen.
- Vom Kreuzungspunkt senkrecht nach unten gehen und auf der Hanglängenskala die tolerierbare Hanglänge ablesen.

**2. Ein einfacheres Ablesen ist mit Hilfe der LS-Nomogramme in Abb. 5b, 5c oder 5d (Leiternomogramme) möglich. Allerdings benötigt man hierfür je nach Gefälle 3 verschiedene LS-Nomogramme. Abb. 5b gilt für Hänge von 5–25 %, Abb. 5c für Hänge von 3,5–4,9 % und Abb. 5d für Hänge von 1,1–3,4 % Gefälle.**

a. Ablesen des LS-Faktors

- Auf der links liegenden Hanglängen-Leiter die gemessene Hanglänge aufsuchen.
- Auf der rechts liegenden Hangneigungs-Leiter die gemessene Hangneigung aufsuchen.
- Die beiden Punkte mit einem Lineal verbinden.
- Der Kreuzungspunkt des Lineals mit der in der Mitte liegenden LS-Leiter gibt den LS-Faktor an.

b. Ablesen der tolerierbaren Hanglänge

- Auf der LS-Faktor-Leiter den errechneten  $L_{max}S$ -Faktor (s. S. 36) aufsuchen.
- Auf der Hangneigungs-Leiter die im Feld ermittelte Hangneigung aufsuchen.
- Die beiden Punkte mit einem Lineal verbinden und auf der Hanglängen-Leiter die tolerierbare Hanglänge ablesen.

Liegt die im Feld ermittelte erosive Hanglänge außerhalb des Bereichs der Nomogramme 5a–5d, so ist der LS-Faktor mit einer der Formeln auf S. 29 zu errechnen.

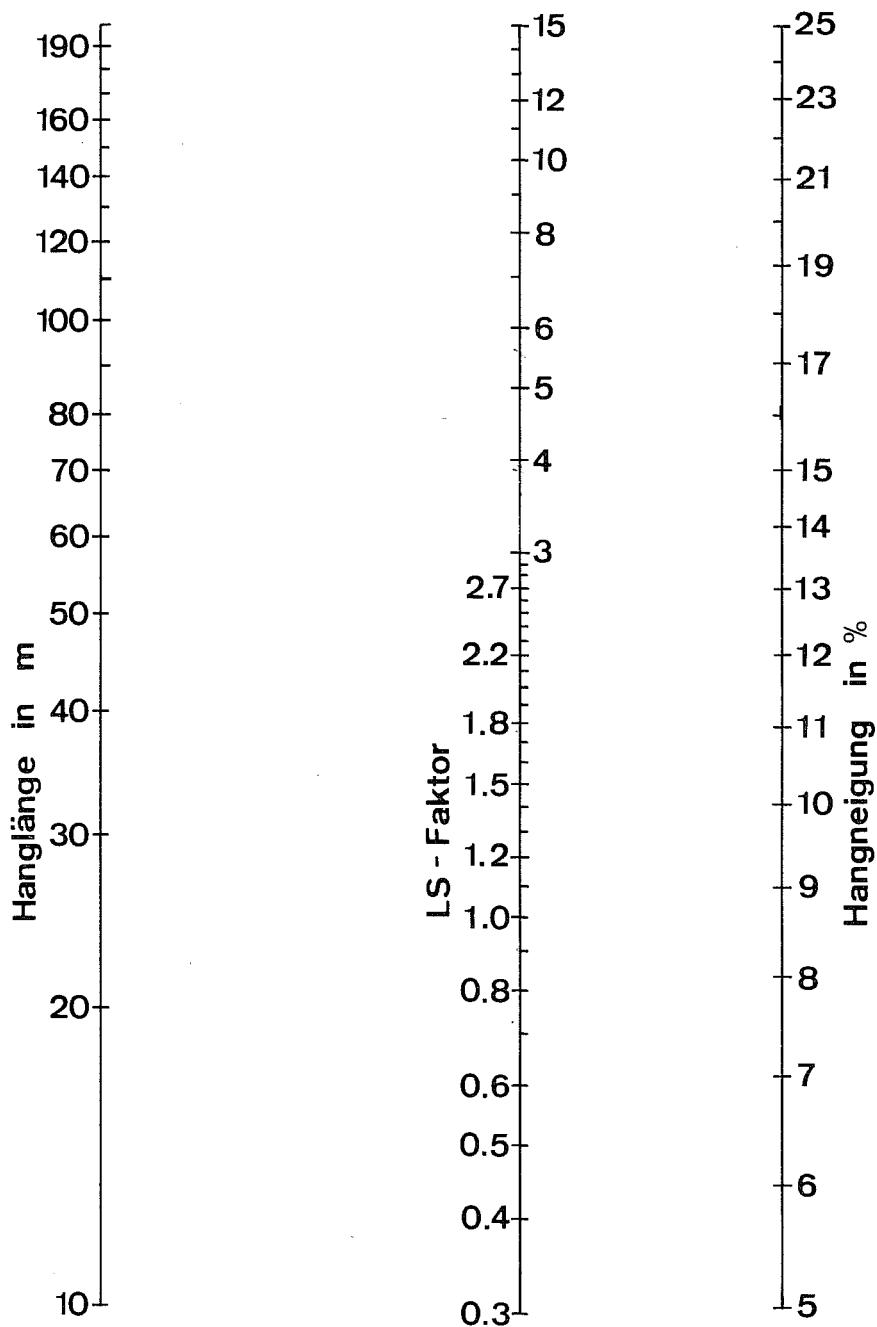


Abb. 5b: LS-Nomogramm für Hänge ab 5% Neigung

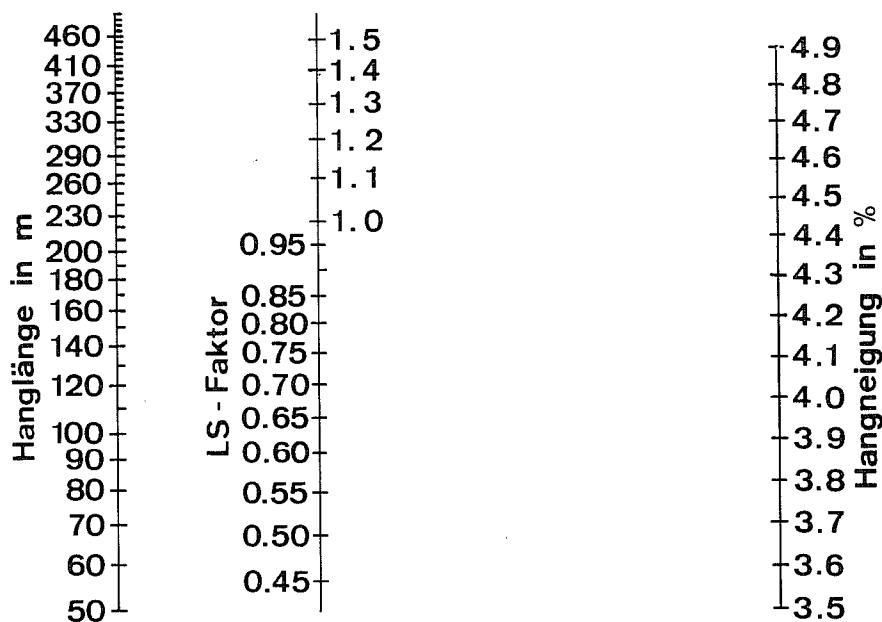


Abb. 5c: LS-Nomogramm für Hänge mit 3,5–4,9 % Neigung

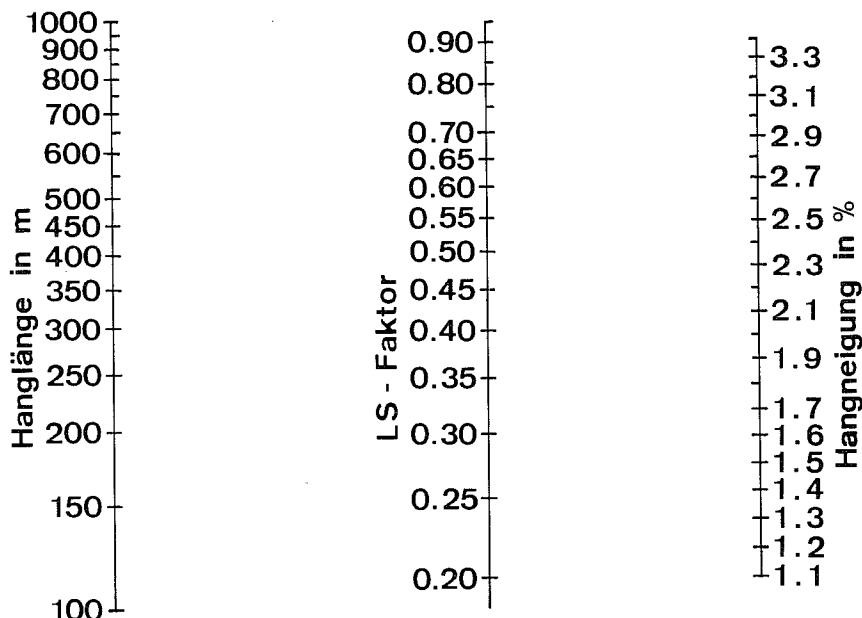


Abb. 5d: LS-Nomogramm für Hänge mit 1,1–3,4 % Neigung

### Ungleichmäßige Hänge

Hänge sind häufig nicht gleichmäßig geneigt. Ihre Neigung kann von oben nach unten zunehmen (konvex) oder abnehmen (konkav). Durch eine mittlere Hangneigung werden solche Hänge nur unzureichend gekennzeichnet. Für sie läßt sich ein geeigneter LS-Faktor ermitteln, wenn der Hang in gleich lange Teilstücke annähernd gleicher Neigung unterteilt wird.

Der LS-Faktor solcher Hänge wird wie folgt ermittelt:

- Den Hang in X gleichlange Teilstücke mit annähernd gleicher Hangneigung innerhalb des Teilstücks unterteilen.
- Von jedem Teilstück die Hangneigung ermitteln.
- Für jedes Teilstück den LS-Faktor aus Abb. 5 a, b, c oder d ablesen unter Verwendung der Neigung des jeweiligen Teilstückes und der **Gesamtlänge** des Hanges.
- Die Einzel-LS-Faktoren mit dem zugehörigen Wichtungsfaktor der Tabelle 6 multiplizieren.
- Die gewichteten Einzel-LS-Faktoren zum LS-Faktor des Gesamthanges addieren.

Die Wichtungsfaktoren W werden nach folgender Formel berechnet:

$$W_i = \frac{i^{(m+1)} - (i-1)^{m+1}}{X^{(m+1)}}$$

i = Nr. des Teilstücks von oben

m = Hanglängenexponent des Gesamthanges

X = Anzahl der Teilstücke

Die Wichtungsfaktoren der Tab. 6 machen deutlich, daß die am Unterhang liegenden Teilstücke den LS-Faktor des Gesamthanges weit stärker beeinflussen als die am Oberhang liegenden Teilstücke. Das bedeutet, daß an einem Hang die Erosion umso größer ist, je steiler der Unterhang ist.

In analoger Weise lassen sich auch Hänge mit Böden verschiedener K-Faktoren oder mit Fruchtsfolgen verschiedener C-Faktoren wichten.

**Beispiel:** Ein konvexer Hang ist 100 m lang und läßt sich in 3 Teilstücke zu je 33 m unterteilen. Die Hangneigung des obersten Teilstücks ist 5%, des mittleren 10% und des unteren 15%. Der LS-Faktor dieses Hanges ergibt sich wie folgt:

Teilstück Nr. von oben nach unten	Neigung %	LS-Faktor für Neigung des Teilstücks und 100 m Länge	Wichtungs- faktor aus Tab. 6	LS-Faktor mal Wichtungs- faktor
1	5	0,97	0,19	0,2
2	10	2,5	0,35	0,9
3	15	4,6	0,46	2,1
Summe = LS-Faktor = 3,2				

Würde der LS-Faktor dieses 100 m langen Hanges für eine mittlere Neigung von 10% ermittelt, so ergäbe dies einen LS-Faktor von nur 2,5. Die Erosionsgefährdung des Hanges würde also um 24% unterschätzt.

Tabelle 6:

**Wichtigungsfaktoren für vier unregelmäßig geneigte Hänge, die aus 2, 3, 4 oder 5 gleichlangen Teilstücken bestehen.**

Die Werte geben den Anteil des Bodenabtrages von Teilstücken bei verschiedenen Hanglängenexponenten m des Gesamthanges an.

Anzahl der Teilstücke	Teilstück Nr. von oben nach unten	Neigung m =	Wichtigungsfaktor für:		
			> 5 % 0,5	4,9–3,5 % 0,4	1,1–3,4 % 0,3
2	1		0,35	0,38	0,41
	2		0,65	0,62	0,59
3	1		0,19	0,22	0,24
	2		0,35	0,35	0,35
	3		0,46	0,43	0,41
4	1		0,12	0,14	0,17
	2		0,23	0,24	0,24
	3		0,30	0,29	0,28
	4		0,35	0,33	0,31
5	1		0,09	0,11	0,12
	2		0,16	0,17	0,18
	3		0,21	0,21	0,21
	4		0,25	0,24	0,23
	5		0,29	0,27	0,26

### Ermittlung der tolerierbaren Hanglänge

Das LS-Nomogramm lässt sich auch zur Ermittlung der tolerierbaren Hanglänge eines Feldstückes mithilfe des tolerierbaren L-Faktors ( $L_{\max}$ ) verwenden. Die tolerierbare Hanglänge ist diejenige Länge, bei der der Bodenabtrag gleich der Toleranzgrenze T ist. Sie zu kennen ist besonders wichtig bei allen Planungsmaßnahmen in einer Feldflur, weil sich damit die beste Lage von quer zum Hang verlaufenden Wegen (Gürtelwege), Terrassen oder neu anzulegenden Ranken (terrassenartiger Felddrain) und Feldgrenzen ermitteln lässt. Auch lässt sich bestimmen, ob ein in der Flur liegender Ranken entfernt werden kann oder nicht.

Zur Berechnung von  $L_{\max}$  werden in der Abtragsgleichung zunächst der Abtrag A durch T und L durch  $L_{\max}$  ersetzt ( $T = R \cdot K \cdot L_{\max} \cdot C \cdot P$ ) und die Gleichung nach  $L_{\max}S$  aufgelöst:

$$L_{\max}S = \frac{T}{R \cdot K \cdot C \cdot P}$$

Dann werden die Faktoren R, K, C und P und die Toleranzgrenze T des betreffenden Feldstücks in die Gleichung eingesetzt und  $L_{\max}S$  errechnet. Aus  $L_{\max}S$  kann dann die tolerierbare Hanglänge mit Hilfe des LS-Nomogramms abgelesen werden.

### Kommentar

Die Gleichung, die dem LS-Nomogramm zugrunde liegt und die unverändert dem US-Handbuch entnommen wurde, basiert auf Messungen für einen Bereich von Hangneigungen zwischen 3 und 18 % und für Hanglängen zwischen 10 und 100 m; sie ist jedoch auch für höhere Werte anwendbar. Höhere Hanglängenexponenten ( $m$ ) könnten besonders dort auftreten, wo es durch starke Bodenverdichtungen oder Dammkultur zu erhöhtem Oberflächenabfluß kommt. Im Hopfen wurden z. B. Werte bis 1 wahrscheinlich gemacht. Bewirtschaftungsmaßnahmen können also den Hanglängenexponenten beeinflussen.

Während die Hangneigung nur in geringem Umfang verändert werden kann, lässt sich die Hanglänge auf ein maximal zulässiges Maß vermindern. Dabei sollte versucht werden, die Bearbeitungslänge, die hierdurch verloren geht, dadurch wieder zu gewinnen, daß die Feldstücke mit ihrer Längsausdehnung quer zum Hang gelegt und dann auch quer zum Hang bearbeitet werden. Durch diese Konturnutzung wird der Abtrag gesenkt. Auf Einhaltung der tolerierbaren Hanglänge sollte besonders bei der Neuordnung der Flur (Flurbereinigung) geachtet werden. Dabei kann mit Hilfe des LS-Nomogramms leicht ermittelt werden, wie stark eine bestimmte Hangverlängerung durch Beseitigen von Hangstufen (Rain und Ranken) den LS-Faktor und damit den Bodenabtrag erhöht. So wird z. B. auf einem 200 m langem Hang mit 10 % Gefälle der LS-Faktor von 2,5 auf 3,5 erhöht, wenn man einen 1 m hohen Ranken beseitigt, der den Hang in zwei gleichlange Felder von 100 m teilt und das Oberflächenwasser vollständig abführt. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, daß bei der Planierung des Rankens auch die Hangneigung leicht erhöht wird.

## Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor C

### Wesen des C-Faktors

Der Anbau von Kulturpflanzen beeinflußt den Bodenabtrag in zweierlei Weise: Die Bodenoberfläche wird gegen die aufprallenden Regentropfen geschützt, und der Boden, insbesondere die Ackerkrume, wird durch die Bewirtschaftung (Bodenbearbeitung, Befahrung etc.) verändert. Je nach Art, Intensität und Zeitpunkt des Anbaus ist dieser Effekt sehr variabel. Er wird im C-Faktor quantifiziert. Der C-Faktor ist wegen der großen Variabilität der Kulturmaßnahmen sicherlich der komplexeste der Faktoren.

Die Vegetationsbedeckung vermindert den Bodenabtrag vor allem dadurch, daß sie die sog. Planschwirkung der Regentropfen wesentlich mildert. Diese Schutzwirkung ist von der Art der Kulturpflanze(n) und ihrem Entwicklungsstand abhängig. Die Pflanzen wirken jedoch über ihre Vegetationszeit hinaus, weil auch die Art, Menge und Behandlung der Ernterückstände den Bodenabtrag beeinflussen. Die Bodenbearbeitung verändert die Erodierbarkeit des Bodens, indem sie unterschiedlich stabile und große Bodenaggregate schafft, die von den Regentropfen verschiedenen leicht zerschlagen werden können und indem sie die Rauigkeit des Bodens und damit die Menge und Geschwindigkeit des oberflächlich abfließenden Wassers verändert.

Vegetationsbedeckung und Oberbodenzustand bestimmen die Erosionsanfälligkeit zu jedem Zeitpunkt der Kultur. Diese Anfälligkeit wird im **Relativen Bodenabtrag** (RBA) quantifiziert. Er gibt das Verhältnis (in %) des Bodenabtrages einer Fläche unter einer bestimmten Kultur bei einem bestimmten Entwicklungszustand zu dem einer gleichen Fläche unter Schwarzbrache (= 100%) an (siehe Bedingungen für Messung des K-Faktors S. 19).

Wie hoch der tatsächliche Abtrag in einer bestimmten Zeit ist, hängt aber nicht nur vom RBA, sondern auch von der gebietsspezifischen Erosivität der Niederschläge in dieser Zeit ab. Daher muß die Erosivität in den C-Faktor einbezogen werden, denn es ist leicht einzusehen, daß ein unbedeckter Boden (hoher RBA) kaum erosionsgefährdet ist, wenn zu dieser Zeit nur wenig erosive Niederschläge fallen, oder, umgekehrt, der Boden in einer sehr erosiven Niederschlagsphase gut bedeckt ist (kleiner RBA). Der RBA-Wert einer bestimmten Periode wird daher mit dem Anteil dieser Periode am Jahres-R-Wert zum C-Faktor verknüpft.

Aus dem Vorigen ergibt sich, daß die Erosivität der Niederschläge zweimal in die ABAG eingeht: Einmal in ihrer absoluten Höhe als Jahres-R-Faktor und zum anderen in ihrer relativen Verteilung über das Jahr in den C-Faktor.

### Kulturperioden

Bedeckungs- und Bearbeitungszustand sind zeitabhängige Größen: Die Bedeckung durch die lebende Pflanze wächst kontinuierlich im Laufe der Vegetationsperiode, der Zustand der Bodenoberfläche variiert mit der Art und dem Zeitpunkt der Bodenbearbeitung und mit der daran anschließenden Bodensetzung. Dies muß sich in den RBA-Werten niederschlagen. Aus praktischen Gründen wird für die Berechnung des C-Faktors statt einer allmählichen Veränderung des RBA eine Aufteilung in Perioden vorgenommen, für die gemittelte RBA-Werte angesetzt werden. Die Perioden sind in Tab. 7 näher erläutert.

**Tabelle 7: Einteilung der Kulturperioden**

Periode	Nr. in Tab. 8	Erläuterungen
Bodenbearbeitung (BB) bis Saatbett (SB) Wendend	1 a	Zeit zwischen wendender Bodenbearbeitung (Wendepflug, Schälpflug o.ä.) und Aussaat der folgenden Frucht
BB bis Saatbett Nicht-wendend	1 b	Tritt an die Stelle von Per. 1 a, wenn statt wendender Bodenbearbeitung flaches Ein- mischen der Ernterückstände mit Grubber oder Fräse tritt. Mindestbodenbedeckung nach Einmischen 50 %. Bei Direktsaat entfällt Periode 1 vollständig.
Saatbett bis 10 % Bodenbedeckung	2	Zeit von der Saatbettbereitung bis zu einer Bodenbedeckung von 10 % durch die Kultur- pflanze.
10 % bis 50 %	3	Zeit von 10 bis 50 % Bodenbedeckung
50 % bis 75 %	4	Zeit von 50 bis 75 % Bodenbedeckung
75 % bis Ernte (E)	5	Zeit von 75 % Bodenbedeckung bis zur Ernte
Ernte bis Boden- bearbeitung	6	Für diese Periode gibt es folgende Möglich- keiten: a) Liegenlassen v. Stoppeln u. Stroh bis BB b) flaches Einarbeiten v. Stoppeln u. Stroh bis BB c) Einarbeiten v. Stoppel u. Stroh mit Grub- ber und anschl. Gründüngung (ohne feines Saatbett für die Gründüngung)

### Relative Bodenabträge

In Tab. 8 sind die Relativen Bodenabträge (RBA) für die häufigsten Fruchtarten und bei unterschiedlichen Erosionsschutzmaßnahmen zusammengestellt.

**Tabelle 8:**

**Relativer Bodenabtrag der einzelnen Perioden für die verschiedenen Kulturpflanzen**

Zeile Frucht und Bestelltechnik	Periode						
	1 a wen- dend	1 b nicht- wendend	2 wen- dend	Saat- bett bis	Bodenbedeckung 10 % bis	4 50 % bis	5 75 % bis
	BB	BB	10 %	50 %	75 %	Ernte	6 bis BB
1 Getreide konvent.	32	—	46	38	3	1	2
2 dto Minimal-BB	—	8	8	6	1	1	2
3 Raps	32	—	46	38	3	1	2
* 4 Kartoffeln	32	—	80	40	5	7,5	44
* 5 Zuckerrüben	32	—	85	45	5	3	44
* 6 dto Mulchsaat	20	8	9	6	3	3	15
* 7 Mais konventionell	32	—	94	45	12	8,5	44
* 8 dto Spurlockerung	32	—	54	45	12	8,5	44
* 9 dto WG Reihen	32	—	36	21	12	8,5	44
*10 dto Mulchsaat	20	8	11	7	2	1	10
*11 dto Minimal-BB	—	8	8	6	2	1	10

\* Bei Blattfruchtanteilen in der Fruchtfolge von 50% und mehr sind die RBA-Werte der Blattfrüchte in den Perioden 2–6 mit 1,5 zu multiplizieren, um den stärkeren Gefügebela-stungen der Böden Rechnung zu tragen.

### Erläuterungen zu Tabelle 8

**Zeile 1 Getreide konventionell:** Tiefe Pflugfurche vor der Getreidesaat. Saatbettbereitung mit Saatbettkombination, Kreiselegge o.ä. Nach der Ernte folgt entweder

Periode 6: Stroh und Stoppeln bleiben liegen oder Stoppeln werden flach eingearbeitet oder Stoppeln werden etwas tiefer bearbeitet und Zwischenfrucht angesät oder

Periode 1a der nächsten Frucht: Stroh und Stoppeln werden sofort untergepflügt (Schälfurche oder tiefe Herbst- oder Sommerfurche) oder

Periode 1b der nächsten Frucht: Nach Getreideernte sofort nicht-wendende Bodenbearbei-tung mit anschließender Saatbettbereitung für Winterzwischenfrucht; im Frühjahr Saat von Zuckerrüben oder Mais in Mulchdecke.

**Zeile 2 Getreide Minimalbodenbearbeitung:** Keine tiefe, wendende Bodenbearbeitung im gesamten Anbausystem sondern stets nur flaches Einmischen der Ernterückstände: Saat mit Fräse-Sämaschine-Kombination oder Direktsaat, mindestens 40% Mulchbedeckung unmit-

telbar nach der Saat. Nach der Ernte folgt entweder  
 Periode 6 wie unter Zeile 1 oder  
 Periode 1 b der nächsten Frucht.

**Zeile 3 Raps:** Körnerraps nach tiefer Pflugfurche und anschließender Saatbettbereitung. Nach der Ernte folgt entweder  
 Periode 6: flaches Einarbeiten des Rapsstrohs und Gründüngung bis zur Bodenbearbeitung oder  
 Periode 1a der nächsten Frucht bei sofortiger tiefer Pflugfurche.

**Zeile 4 Kartoffeln:** Kartoffeln nach tiefer Pflugfurche. Wird nach Frühkartoffeln eine Zwischenfrucht angebaut, so kann für die Periode 6 ein RBA-Wert von 20 angesetzt werden.

**Zeile 5 Zuckerrüben:** Zuckerrüben nach tiefer Pflugfurche. Nach der Ernte folgt entweder  
 Periode 6: Acker bleibt liegen (ohne Blattbergung) bis zur Bodenbearbeitung für die Folgefrucht oder  
 Periode 1 der nächsten Frucht, wenn sofort bearbeitet wird.

**Zeile 6 Zuckerrüben Mulchsaat:** Zuckerrüben in Winterzwischenfrucht: Nach Vorfrucht Bodenbearbeitung mit anschließender Saatbettbereitung für Winterzwischenfrucht; im Frühjahr keine oder nur ganz flache Bodenbearbeitung mit Kreiselegge o.ä. Bodenbedeckung mit Rückständen unmittelbar nach der Rübensaat mindestens 30 %. Periode 1a gilt für die Zeit von Aussaat der Winterzwischenfrucht bis zur Rübensaat, wenn nach der Vorfrucht gepflügt wird. Periode 1b gilt, wenn vor der Zwischenfruchtsaat nur gelockert wird (Grubber o.ä.) (Bodenbedeckung mind. 50 %).

**Zeile 7 Mais konventionell:** Tiefe Pflugfurche; rauhe Pflugfurche bis zur Saatbettbereitung im Frühjahr; Saatbettbereitung mit Saatbettkombination, Kreiselegge o.ä.

**Zeile 8 Mais Spurlockerung:** Wie konventionell jedoch zusätzlich bei der Maissaat Spurlockerung mit einem Spurlockerer bis 25 cm Tiefe oder Aussaat mit Gerätelkombination Kreiselegge und Sämaschine. Diese Maßnahme soll Oberflächenwasser, das sich in den Spuren sammelt, zum Versickern bringen bzw. das Sammeln verhindern.

**Zeile 9 Mais WG Reihen:** Wintergersteneinsaat in die Fahrspuren bei der Maissaat. Verfahren wie Spurlockerung, jedoch werden zusätzlich in die gelockerte Fahrspur jeweils 2 Reihen Wintergerste eingesät (50 Körner je lfd. m).

**Zeile 10 Mais Mulchsaat:** Maiseinsaat in eine abgefrorene Winterzwischenfrucht. Nach Vorfrucht Bodenbearbeitung mit anschließender Saatbettbereitung für die Winterzwischenfrucht. Im Frühjahr keine oder streifenweise oder ganzflächige, flache Bodenbearbeitung (z.B. Streifenfräse, Kreiselegge). Bodenbedeckung mit Rückständen unmittelbar nach der Maissaat mind. 30 %. Periode 1a gilt für die Zeit von Aussaat der Winterzwischenfrucht bis zur Maissaat, wenn nach der Vorfrucht gepflügt wird. Periode 1b gilt, wenn vor der Zwischenfruchtsaat nur gelockert wird (Grubber o.ä.) (Bodenbedeckung mind. 50 %).

**Zeile 11 Mais Minimalbodenbearbeitung:** Keine tiefe, wendende Bodenbearbeitung im ganzen Anbausystem sondern stets nur flaches Einmischen der Ernterückstände. Nach Körnermais oder Getreide bleiben Stroh und Stopfeln auf der Oberfläche bis zur Maissaat liegen. Saat mit Fräse-Sämaschine-Kombination oder Direktsaat. Bodenbedeckung unmittelbar nach der Maissaat mindestens 40 %.

### Kommentar

Für Getreide, Mais und Zuckerrüben wurden eigene, mit einem Regensimulator gemessene RBA-Werte erarbeitet. Um fehlende Meßwerte zu ergänzen (bei Zuckerrüben, Kartoffeln und Raps), wurden die Relationen der bei uns gemessenen RBA-Werte zu denen bei Wischmeier gebildet und mit diesen Relationen die fehlenden Werte berechnet. Die neuen RBA-Werte und C-Faktoren müssen jedoch durch weitere Untersuchungen noch besser abgesichert werden.

Während im US-Handbuch alle RBA-Werte für «ohne und mit Stroh belassen» angegeben werden, gelten die hier angegebenen RBA-Werte nur für «Stroh belassen». Das Stroh verbleibt nämlich meist auf dem Felde oder abgefahrenes Stroh kommt als Stallmist wieder auf das Feld zurück. Sollte in einem Betrieb jedoch das Stroh regelmäßig verkauft oder verbrannt werden, so sind die C-Faktoren um 20 % zu erhöhen. Für die Periode BB–SB (1a) wurde für alle Früchte ein RBA von 32 angesetzt, da der Oberflächenzustand nach einer Pflugfurche fast unabhängig von der Vorfrucht ist.

Während unsere RBA-Werte der Periode SB bis 10 % denen des US-Handbuchs sehr ähnlich sind, liegen sie in den nachfolgenden 4 Perioden beträchtlich unter denen des US-Handbuchs. Offenbar stabilisiert sich der Boden nach der Saatbettbereitung bei uns früher. Einige RBA-Werte von Mais und Zuckerrüben sprechen dafür, die Periode SB bis 10 % in Zukunft stärker zu unterteilen, denn in dieser Periode nimmt der RBA unmittelbar nach der Saatbettbereitung zunächst stark zu, erreicht 3 bis 4 Wochen danach ein Maximum, das größer als 100 sein kann, und sinkt gegen Ende wieder ab.

Es ist anzunehmen, daß die in Bayern ermittelten RBA-Werte über Bayern hinaus Gültigkeit besitzen. Die RBA-Werte für Raps und Kartoffeln basieren nur auf wenigen Versuchen und müßten daher für Gebiete, in denen diese Früchte großflächig auf erosiven Lagen angebaut werden, genauer bestimmt werden.

### Berechnung der C-Faktoren

Zur Berechnung der C-Faktoren benötigt man die RBA-Werte, die Jahres-R-Verteilung (Tab. 9) und die Kalenderdaten der einzelnen Kulturperioden (Tab. 10). Für die C-Faktoren dieses Buches wurden ausschließlich Daten Bayerns herangezogen.

Die mittlere Jahres-R-Verteilung (Summenprozente) ist in Tab. 9 für jeden Tag angegeben, und zwar aufsummiert zu 100 %. Diese Jahres-R-Verteilung ist das langjährige Mittel aus 18 bayerischen Wetterstationen. Trotz gewisser regionaler Unterschiede genügt es, in Bayern mit diesen Mittelwerten zu arbeiten, da sich die Jahres-R-Verteilungen der 18 Stationen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Während also die **absolute** Höhe des R-Faktors regional sehr stark variiert (s. Abb. 1), ist seine relative Verteilung ziemlich homogen. In anderen Gebieten Europas sind die Jahres-R-Verteilungen z.T. deutlich anders. Für solche Gebiete müssen daher die C-Faktoren der Tab. 12–14 mit den dort herrschenden Jahres-R-Verteilungen berechnet werden.

### Einfluß von Vegetationsbedeckung und Bodenbearbeitung

Die Wirkung der **Vegetationsbedeckung** läßt sich durch den Bedeckungsgrad ausdrücken. Er stellt den prozentualen Anteil der Bodenoberfläche dar, den die Pflanzen bedecken und damit vor dem direkten Aufprall der Regentropfen schützen. Der Schutz der Oberfläche nimmt mit steigendem Bedeckungsgrad zu, der RBA entsprechend ab (s. Abb. 6). Gleichzeitig trägt auch das sich ausdehnende Wurzelwachstum zur Stabilisierung und Durchlässigkeit des Oberbodens bei. Bei gleichem Bedeckungsgrad ist der Schutz um so stärker, je näher das Blattdach an der Bodenoberfläche ist, weil die Fallgeschwindigkeit der Tropfen von der Fallhöhe abhängt. Aus diesem Grund ist der Schutz bei gleichem Bedeckungsgrad kulturspezifisch (Getreide > Mais > Hopfen).

Ein Mulch, d. h. die direkte Bedeckung an der Bodenoberfläche mit pflanzlichem (z. B. Ernterückstände) oder anderem Material, ist besonders wirksam.

Abb. 6 zeigt, wie der RBA mit steigendem Bedeckungsgrad durch Mulch abnimmt. Ernterückstände haben ihre größte Wirkung auf den RBA unmittelbar nach der Ernte, da dann der Bedeckungsgrad am höchsten ist. Mit der Zeit nimmt der Bedeckungsgrad wegen der Zersetzung der Ernterückstände ab. Bei Verfahren mit reduzierter Bodenbearbeitung (pfluglos) kann sich aber die Bedeckung durch Mulch noch bis weit in die Wachstumszeit der nächsten Frucht mindernd auf den RBA auswirken (siehe Tab. 8, S. 42).

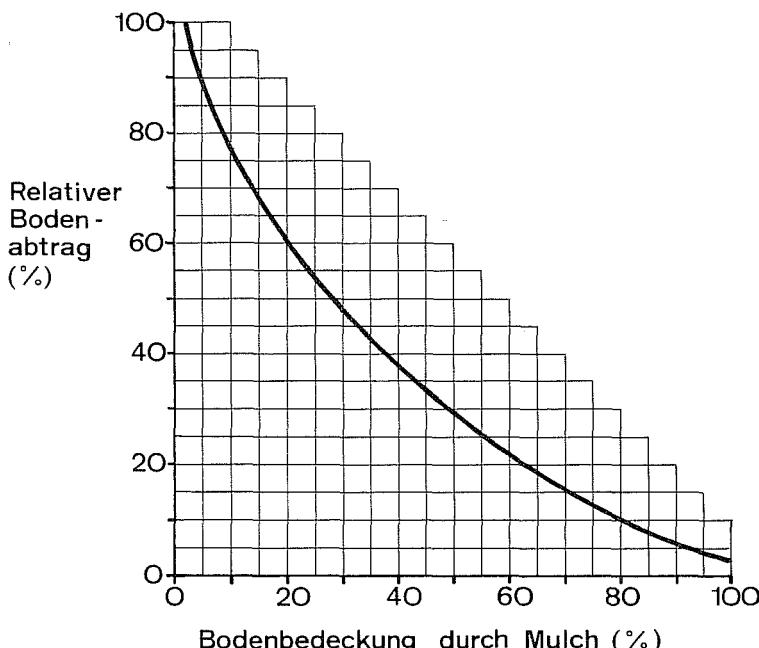


Abb. 6: Abhängigkeit des Relativen Bodenabtrags von der Bodenbedeckung durch Mulch

Der RBA ist geringfügig höher, wenn die Ernterückstände nach der Ernte nicht an der Oberfläche verbleiben, sondern flach eingearbeitet werden. Ähnliches gilt, wenn man sie etwas tiefer in den Boden einmischt und danach eine Gründüngung bei grobem Saatbett folgt. Dies wurde jedoch in Tab. 8 nicht gesondert ausgewiesen, da die Unterschiede nur sehr klein sind. Werden Stroh und Stoppeln dagegen tief eingepflügt, so ist der RBA deutlich höher. Es ist daher anzuraten, die Ernterückstände möglichst lange an der Bodenoberfläche zu belassen und die wendende Bodenbearbeitung möglichst weit hinauszuschieben oder ganz auf sie zu verzichten.

Der Bedeckungsgrad kann bei einiger Übung visuell hinreichend genau abgeschätzt werden, wie es bisher in den USA geschah. Genauer sind photographisch ermittelte Werte, die auch den RBA-Werten der Tab. 8 zugrunde liegen.

Die **Bodenbearbeitung** erzeugt Aggregate unterschiedlicher Größe und Stabilität und damit Lockermaterial, das durch Oberflächenwasser transportiert werden kann. Sie verändert die Rauhigkeit der Oberfläche und das Wasseraufnahmevermögen des Bodens. Während die grobe Scholle nicht so anfällig ist, erzeugt die starke Zerteilung bei der Saatbettbereitung besonders hohe (die höchsten) RBA-Werte. Das Saatbett ist daher besonders erosionsgefährdet, vor allem dann, wenn diese Periode in eine Zeit mit hoher Erosivität der Niederschläge fällt wie z. B. bei Mais, Rüben, Kartoffeln, Raps oder Wintergerste. Diese Gefahr wird bei Verfahren mit reduzierter Bodenbearbeitung (pfluglos) oder bei Mulchsaat und Streifensaat abgemildert.

Zum Schluß werden die Werte der Spalte 8 aufsummiert und durch die Dauer der Fruchtfolge in Jahren (hier 3 Jahre) geteilt. Das Ergebnis ist der gesuchte C-Faktor obiger Fruchtfolge.

Ergebnis: C-Faktor der Fruchtfolge =  $\frac{0,408}{3} = 0,136 \approx 0,14$

**Tabelle 11:**  
**Beispiel der Berechnung eines C-Faktors für eine Fruchtfolge**  
**Silomais/Winterweizen/Wintergerste**

### C-Faktoren von Fruchfolgen für Bayern

Bei den im folgenden aufgeführten C-Faktoren<sup>1</sup> wird bei allen Fruchfolgen zwischen einem »Günstigsten Fall« und einem »Ungünstigsten Fall« unterschieden:

**Günstigster Fall:** Nach der Ernte verbleiben die Ernterückstände auf der Bodenoberfläche oder werden nur oberflächlich flach eingearbeitet. Eine evtl. Zwischenfrucht wird in ein rauhes, mit Rückständen bedecktes Saatbett gesät. Der Zeitraum von wendender Bodenbearbeitung bis Aussaat der Folgefrucht ist kurz.

**Ungünstigster Fall:** Nach der Ernte verbleiben keine oder sehr wenig Ernterückstände auf der Bodenoberfläche, und die Zeit zwischen wendender Bodenbearbeitung und Aussaat der Folgefrucht ist lang (z. B. frühe Sommerfurche oder Schälen ohne Zwischenfruchtanbau).

In beiden Fällen sind die C-Faktoren um 20 % zu erhöhen, falls das Stroh regelmäßig verkauft oder verbrannt wird.

**Tabelle 12:  
C-Faktoren (mit 100 multipliziert) von häufigen Fruchfolgen für Bayern<sup>1</sup>**

<b>1. Fruchfolgen mit 100 % Getreide</b>		
	günstigster Fall 4	ungünstigster Fall 10
<b>2. Raps-Getreidefruchfolgen: Rapsanteil 25 bis 33 %</b>		
Wintergerste (Anteil)	günstigster Fall	ungünstigster Fall
< 30 %	5	10
> 30 %	6	10
<b>3. Kartoffel-Getreidefruchfolgen</b>		
Kartoffel (Anteil)	günstigster Fall	ungünstigster Fall
25 %	9	13
33 %	10	14

<sup>1</sup> Die C-Faktoren wurden mit 100 multipliziert, um Irrtümer mit Dezimalstellen zu vermeiden. Zum Gebrauch in der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung müssen die Werte dieser Tabellen daher durch 100 geteilt werden.

Zur Beschreibung der Anbauverfahren s. Erläuterungen zu Tab. 8, S. 42f.

**Tabelle 9:**  
**Summenprozente der R-Faktorenanteile im Mittel von 18 bayerischen Wetterstationen im langjährigen Durchschnitt**

Tag	Monat											
	Jan 1	Feb 2	Mrz 3	Apr 4	Mai 5	Juni 6	Juli 7	Aug 8	Sept 9	Okt 10	Nov 11	Dez 12
1	0,01	0,12	0,73	1,5	4,6	15,0	43,7	63,8	84,6	94,2	97,4	98,9
2	0,01	0,12	0,74	1,5	4,8	15,9	44,2	64,3	85,0	94,2	97,4	98,9
3	0,01	0,13	0,74	1,5	4,9	16,2	45,0	65,4	85,4	94,5	97,5	98,9
4	0,02	0,13	0,74	1,5	5,3	17,9	45,6	66,9	85,5	94,6	97,5	98,9
5	0,03	0,15	0,74	1,5	5,7	18,1	46,2	67,7	85,7	94,7	97,5	98,9
6	0,03	0,16	0,74	1,6	6,0	18,6	46,9	68,4	86,0	94,7	97,6	98,9
7	0,03	0,16	0,77	1,7	6,2	19,7	47,9	68,7	86,5	94,7	97,6	98,9
8	0,03	0,17	0,77	1,7	6,3	21,0	48,3	69,2	87,1	94,7	97,6	99,0
9	0,05	0,37	0,77	1,8	7,1	22,7	48,7	70,2	87,1	94,8	97,7	99,1
10	0,05	0,42	0,77	1,9	7,2	24,1	49,0	71,0	88,0	95,3	97,7	99,2
11	0,05	0,45	0,79	2,0	7,3	24,8	49,4	71,4	88,6	95,5	97,7	99,2
12	0,07	0,49	0,85	2,1	7,4	25,0	50,2	72,7	89,0	95,5	97,7	99,2
13	0,07	0,49	0,85	2,1	7,8	25,3	50,3	73,9	89,5	95,6	97,8	99,2
14	0,07	0,49	0,86	2,1	8,3	26,1	50,9	75,2	89,9	95,6	97,8	99,3
15	0,07	0,49	0,86	2,1	8,9	26,7	51,5	75,3	90,2	96,0	97,9	99,4
16	0,07	0,49	0,87	2,2	9,1	27,6	53,0	75,8	90,4	96,1	97,9	99,5
17	0,07	0,49	0,89	2,2	9,5	28,0	54,2	77,6	91,1	96,1	97,9	99,6
18	0,08	0,49	0,92	2,7	10,2	28,3	54,8	78,1	91,1	96,4	97,9	99,6
19	0,08	0,49	0,93	2,7	10,7	31,0	55,5	78,7	91,7	96,4	98,0	99,6
20	0,08	0,53	1,03	2,8	10,9	32,0	55,8	79,5	91,8	96,7	98,4	99,6
21	0,08	0,55	1,09	2,9	11,2	33,5	56,9	80,4	91,9	96,7	98,7	99,6
22	0,08	0,57	1,10	3,0	11,8	34,5	57,3	81,1	92,2	96,7	98,7	99,6
23	0,08	0,58	1,11	3,2	11,9	36,5	58,7	81,7	92,3	96,8	98,8	99,6
24	0,08	0,58	1,12	3,5	12,2	37,3	60,1	82,3	93,2	96,8	98,9	99,6
25	0,09	0,58	1,26	3,6	12,5	38,3	60,3	82,7	93,4	96,9	98,9	99,6
26	0,10	0,61	1,27	3,8	13,0	38,5	61,0	83,0	93,4	96,9	98,9	99,7
27	0,10	0,70	1,27	3,9	13,3	40,5	61,6	83,2	93,7	97,0	98,9	99,8
28	0,10	0,72	1,38	4,3	14,0	41,8	62,0	83,7	93,8	97,1	98,9	99,9
29	0,11		1,47	4,4	14,3	42,1	62,7	84,1	94,0	97,3	98,9	99,9
30	0,12		1,48	4,5	14,6	42,8	63,7	84,1	94,1	97,3	98,9	100
31	0,12		1,49		14,8		63,7	84,3		97,3		100

Die Werte der Tab. 9 zeigen, daß die Hauptmenge der erosiven Niederschläge (ca. 90 %) von Mai bis September fallen. Hiervon sind insbesondere die Mai- und Juni-Niederschläge für die Hackfrüchte gefährlich, weil diese den Boden zu dieser Zeit nur unzureichend bedecken. Ähnliches gilt für die Niederschläge im September, wenn sie auf das Saatbett (hoher RBA) von Wintergerste und Raps fallen.

Die Kalenderdaten der Kulturperioden sind aus Tab. 10 zu entnehmen, in der die Daten des Beginns der jeweiligen Periode für die einzelnen Früchte angegeben sind. Diese Werte sind repräsentative Mittelwerte für Bayern und wurden den C-Faktoren (Tab. 12) zugrunde gelegt. Selbstverständlich können auch gebietsspezifische Daten bei der Berechnung der C-Faktoren verwendet werden, wenn diese von denen der Tab. 10 deutlich abweichen.

**Tabelle 10:**  
**Mittlerer Beginn der Perioden zur Ermittlung des C-Faktors**  
**für bayerische Verhältnisse**

Frucht	Periode					
	1*	2	3	4	5	6
	BB-Saatbett	Saatbett bis 10 %	10 % bis 50 %	50 % bis 75 %	75 % bis Ernte	Ernte bis BB
W. Weizen		20. 10.	10. 3.	15. 4.	24. 4.	15. 8.
S. Weizen		15. 3.	15. 4.	25. 4.	1. 5.	20. 8.
W. Gerste	20.	9.	10. 10.	10. 11.	10. 3.	20. 7.
S. Gerste	20.	3.	15. 4.	25. 4.	1. 5.	5. 8.
Hafer	20.	3.	15. 4.	25. 4.	1. 5.	15. 8.
W. Roggen		1. 10.	20. 10.	25. 11.	25. 3.	10. 8.
Körneraps	20.	8.	5. 9.	10. 10.	15. 11.	20. 7.
Kartoffeln		10. 4.	30. 5.	15. 6.	22. 6.	20. 9.
Zuckerrüben		1. 4.	2. 6.	15. 6.	26. 6.	20. 10.
Mais	20.	4.	6. 6.	30. 6.	15. 7.	5. 10.

\* Der Beginn der Periode 1 hängt vom Zeitpunkt der Bodenbearbeitung nach der Vorfrucht ab und kann daher nicht generell angegeben werden.

Wie die RBA-Werte, die R-Faktor-Anteile und die Daten der Kulturperioden zum C-Faktor einer Fruchfolge verknüpft werden, wird im folgenden für eine Silomais-Winterweizen-Wintergerste-Fruchfolge in konventioneller Bestelltechnik gezeigt. Nach Wintergerste folgt Tiefgrubber und Raps als Zwischenfrucht in die rauhe Grubberscholle.

Rechenschritte:

- In eine Arbeitstabelle nach dem Muster von Tabelle 11 werden eingetragen:
- In Spalte 1 die jeweilige Frucht
- In Spalte 2 die Perioden 1–6
- In Spalte 3 das Datum von Beginn und Ende der jeweiligen Periode aus Tabelle 10
- In Spalte 4 der R-Faktor-Anteil zu Beginn der Periode aus Tabelle 9
- In Spalte 5 der R-Faktor-Anteil zu Ende der Periode aus Tabelle 9
- In Spalte 6 die Differenz Spalte 5 minus Spalte 4 geteilt durch 100, d.h. der Anteil der jeweiligen Periode. (Falls Spalte 5 kleiner ist als Spalte 4, so ist die Differenz aus Spalte 5 + 100 minus Spalte 4 zu bilden.)
- In Spalte 7 der RBA der jeweiligen Periode aus Tabelle 8, geteilt durch 100
- In Spalte 8 das Produkt Spalte 6 mal Spalte 7

## 4. Zuckerrüben-Getreidefruchtfolgen

Zuckerrüben	konventionelle Rüben-Bestelltechnik		Mulchsaat		
	günstigster Anteil	Fall	ungünstiger Fall	günstigster Fall	ungünstiger Fall
25 %		8	12	4	8
33 %		10	14	5	8

## 5. Mais-Getreidefruchtfolgen

Mais	Mais		Mais		Mais	
	konventionell	Spurlockerung	WG-Einsaat	Mulchsaat	günst.	un-
Mais	günst.	un-	günst.	un-	günst.	un-
Anteil	günst.	un-	günst.	un-	günst.	un-
25 %	11	15	10	14	8	12
33 %	14	18	12	16	9	13
50 %	26	28	21	24	15	17
66 %	38	40	30	32	21	25

## 6. Fruchtfolgen mit 50 % Hackfrüchten

a: Fruchtfolgen mit Zuckerrüben und Kartoffeln und 50 % Getreide

günstigster Fall	ungünstigster Fall
18	20

b: Fruchtfolgen mit Mais (25–40 % Mais) und Zuckerrüben oder Kartoffeln und 50 % Getreide

zweite Hackfrucht	Mais		Mais		Mais	
	konvent.	Spurlockerung	WG-Einsaat	Mulchsaat	günst.	un-
Kartoffeln	günst.	un-	günst.	un-	günst.	un-
Zuckerrüben	21	23	20	22	16	19
Zuckerrüben	22	24	20	22	17	19

## 7. Ackerfutter-Getreidefruchtfolgen mit mehrjährigen Futterpflanzen (25–50 % Klee, Kleegras, Luzerne)

Futterpflanzen (Anteil)	günstigster Fall	ungünstigster Fall
25 %	3	5
33 %	2	3
50 %	1	2

### C-Faktoren von Hopfen

Besondere Verhältnisse liegen bei langjährigen Dauerkulturen wie Hopfen, Spargel oder Früchten mit ähnlichem Anbausystem vor. Der Bodenabtrag unter Hopfen ist dann beträchtlich, wenn:

- die Dämme im Gefälle verlaufen (viel Oberflächenwasser)
- die Fahrgassen häufig befahren werden (oberflächennahe Verdichtung)
- häufig gegrubbert wird (viel erodierbares Bodenmaterial)

Die in Tab. 13 angegebenen C-Faktoren für Hopfen sind bei herkömmlicher Bewirtschaftungsweise höher als bei allen anderen Kulturen. Tab. 13 zeigt außerdem, daß der C-Faktor erheblich abnimmt, wenn der Boden weniger bearbeitet wird, weil eine schützende Unkrautschicht entsteht und weniger erodierbares Bodenmaterial zur Verfügung steht. Gleiches gilt auch für Untersaaten im Hopfen. Verminderte Bodenbearbeitung, Stehenlassen von Unkraut und Untersaaten werden in einem Merkblatt der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau vom April 1978 als wirksame Erosionsschutzmaßnahmen in Hopfenanlagen empfohlen (Einzelheiten siehe dort).

Die Erosion im Hopfen kann erheblich verminderd werden, wenn bei einer Neuanlage die Dämme und Fahrgassen quer zum Hang angelegt werden. Dabei sollten die Dämme eine Querneigung von ca. 2% aufweisen, damit das Wasser seitlich abfließen kann und nicht die Dämme durchbricht. Die Dämme sollten in einer flachen, begrasten Mulde, die als Vorgewände dienen kann, auslaufen, damit es außerhalb des Hopfengartens nicht zur Grabenerosion kommt.

**Tabelle 13:  
C-Faktoren (multipliziert mit 100) von Hopfen**

Art der Grund- bearbeitung	Anzahl Anhäufeln	Anzahl Grubbern nach Anhäufeln	C-Faktor
Normal <sup>1</sup>	2	4	97
dito	2	3	88
dito	2	2	78
dito	2	1	69
dito	2	0	61
Minimal <sup>2</sup>	1	0	38
Minimal mit Untersaat <sup>3</sup>	1	0	20
Minimal mit Strohmulch <sup>3</sup>	1	0	13

<sup>1</sup> Die Normalbodenbearbeitung schließt Abhäufeln sowie Grubbern, Fräsen oder Pflügen nach der Ernte ein, so daß die Oberfläche über Winter weitgehend unkrautfrei ist. Wird im Frühjahr abgehäufelt, so ist der jeweilige C-Faktor um 11 zu vermindern.

<sup>2</sup> Bei der Minimalbodenbearbeitung unterbleibt nach dem Anhäufeln jegliche Bodenbearbeitung. Das Abhäufeln erfolgt im Frühjahr. Übermäßigter Unkrautwuchs wird chemisch beseitigt.

<sup>3</sup> Sofort nach 1. Anhäufeln.

### Bewertung der Erosionsanfälligkeit unter einzelnen Früchten und bei verschiedenen Maßnahmen zwischen zwei aufeinander folgenden Früchten

Es wird häufig mit gewissem Recht von der Erosionsanfälligkeit einzelner Früchte gesprochen. Dies ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da die Früchte unterschiedlich lange auf dem Feld stehen und ihnen somit unterschiedlich große Anteile der Jahreserosivität zuzuordnen sind. Dies ist auch der Grund dafür, daß C-Faktoren nur für ganze Fruchtfolgen erreichbar sind. Da jedoch bei ganzen Fruchtfolgen die Wirkung der Einzelfrucht auf die Erosionsgefährdung nicht deutlich zum Ausdruck kommt, wurde die Tab. 14 zusammengestellt. In dieser Tabelle sind für den Zeitraum von Saatbett bis Ernte der Anteil der Jahreserosivität (R-Faktoranteil; Spalte 2) und der Teil-C-Faktor einer Frucht (Spalte 3) aufgeführt. Aus Spalte 2 dieser Tabelle ergibt sich, daß auf die Zeit zwischen Saat und Ernte für die verschiedenen Früchte zwischen 64 und 95 % der Jahreserosivität fallen. Spalte 3 zeigt, daß die Böden unter Getreide sehr viel weniger erosionsgefährdet sind als unter Hackfrüchten und daß die Erosionsanfälligkeit unter Mais durch eine Reihe von Maßnahmen stark gesenkt werden kann. Die Wintergetreidearten haben jeweils höhere Teil-C-Faktoren als die Sommergetreidearten. Dies liegt daran, daß beim Wintergetreide die Periode Saatbett bis 10 % Bodenbedeckung in eine Zeit fällt, in der noch erhebliche R-Anteile liegen.

Die 4. und 5. Spalte enthalten die C-Faktoren für die Gesamtzeit zwischen der Saat einer Frucht und der erneuten Aussaat der gleichen Frucht. Diese C-Faktoren sind also für eine fiktive Monokultur der betreffenden Frucht berechnet. Dabei bleibt jedoch die erosionsfördernde Gefügeverschlechterung hoher Hackfruchtkomplexe, die bei der Berechnung der C-Faktoren für Fruchtfolgen eingerechnet wurde, unberücksichtigt.

Für die Zeit zwischen Ernte und Wiederaussaat wurden dabei zwei verschiedene Bodenzustände angenommen:

»Offener Boden«: Nach der Ernte wird entweder sofort gepflügt oder zunächst geschält und später gepflügt.

»Bedeckter Boden«: Bei Getreide bleiben Stroh und Stoppeln entweder unbearbeitet liegen oder sie werden sehr flach eingearbeitet (Bodenbedeckung > 30 %), oder es wird nach flachem Einarbeiten eine Zwischenfrucht in ein rauhes Saatbett gesät. Bei Zuckerrüben und Mais bleibt der Boden nach der Ernte unbearbeitet.

Die Unterschiede in den C-Faktoren zwischen »Offener Boden« und »Bedeckter Boden« sind bei Getreide deutlich größer als bei Hackfrüchten (ausgenommen Raps). Dies liegt daran, daß die Zwischenperioden bei Getreide länger sind als bei Hackfrüchten und daher noch erhebliche R-Anteile auf sie entfallen, nämlich 12–36 % bei Getreide gegenüber 5–10 % bei Hackfrüchten. Erosionsschutzmaßnahmen in den Zwischenperioden (niedrige RBA-Werte) sind daher bei Getreide und Raps sehr wirksam. Dies gilt besonders nach Früchten, die das Feld früh räumen, wie Wintergerste oder Raps. So nimmt der C-Faktor bei Wintergerste von 3,9 für »Bedeckten Boden« auf 14,7 für »Offenen Boden« zu: der Bodenabtrag steigt also bei sonst gleichen Bedingungen auf das 4-fache an.

Für den geringen Unterschied im C-Faktor zwischen »Bedeckter Boden« und »Offener Boden« bei den Hackfrüchten ist außer dem geringen R-Faktoranteil der Zwischenperiode auch die Tatsache verantwortlich, daß der RBA des bearbeiteten

Bodens nach der Ernte (»Offener Boden«) geringer ist als der des unbearbeiteten Bodens (»Bedeckter Boden«). Dies liegt vor allem daran, daß der Oberboden nach der Hackfrüchternte durch viele Fahrspuren verdichtet und der Bedeckungsgrad gering ist und daher der RBA durch eine Bodenbearbeitung (»Offener Boden«) gesenkt wird.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die Werte in Tab. 14 nur zum Vergleich von Einzelfrüchten dienen und nicht zu C-Faktoren von Fruchtfolgen aufaddiert werden dürfen.

**Tabelle 14:**  
**Teil-C-Faktoren verschiedener Früchte für die Zeit von Saatbett bis Ernte**  
**und Gesamt-C-Faktoren in Bayern** (Erklärung s. Text)

Frucht	R-Faktor-Anteil (SB-E)	Teil-C-Faktor (SB-E)	Gesamt-C-Faktor Offener Boden	Gesamt-C-Faktor Bedeckter Boden
W. Weizen	78,6	3,2	10,0	3,6
S. Weizen	78,7	1,9	8,8	2,4
W. Gerste	64,0	3,2	14,7	3,9
S. Gerste	66,7	1,7	12,4	2,4
W. Roggen	88,5	2,9	6,6	3,1
Hafer	74,3	1,8	10,4	2,3
Raps	76,3	7,2	14,7	7,6
Kartoffeln	89,9	19,7	22,9	24,1
Zuckerrüben	95,2	19,4	21,0	21,5
Z. R. Mulchsaat	95,2	4,1	5,0	4,8
Mais Standard	91,8	24,1	26,7	27,7
M. Spurlockerung	91,8	15,5	18,1	19,6
M. Mulchsaat	91,9	4,0	5,7	4,8

### Ermittlung maximal zulässiger C-Faktoren

Die allgemeine Bodenabtragsgleichung kann außer zur Ermittlung der maximal zulässigen Hanglänge auch zur Ermittlung des maximal zulässigen C-Faktors jedes einzelnen Schlages benutzt werden. Das ist derjenige C-Faktor, bei dem der Abtrag gleich der Toleranzgrenze T ist. Dieser tolerierbare C-Faktor ist wichtig für einzelbetriebliche Beratungen zur Erosionsverminderung. Mit seiner Hilfe und der Tabelle 12 läßt sich unter den gegebenen betriebswirtschaftlichen Bedingungen eines Betriebes eine Fruchtfolge finden, die die Toleranzgrenze langjährig nicht überschreitet.

Der **tolerierbare C-Faktor** ( $C_{\max}$ ) wird analog dem tolerierbaren LS-Faktor berechnet. Dazu werden in der Abtragsgleichung der Abtrag A durch T (Toleranzgrenze, s. Tab. 1) und C durch  $C_{\max}$  ersetzt ( $T = R \cdot K \cdot LS \cdot C_{\max} \cdot P$ ) und die Gleichung nach  $C_{\max}$  aufgelöst

$$C_{\max} = \frac{T}{R \cdot K \cdot LS \cdot P}$$

## Erosionsschutzfaktor P

Im Erosionsschutzfaktor P werden die Schutzwirkungen von Kontur- und Streifenutzung quantifiziert. Terrassierungsmaßnahmen beeinflussen sowohl den LS- als auch den P-Faktor, da die erosive Hanglänge verkürzt wird (L-Faktor) und innerhalb der Terrassen quer bewirtschaftet wird (P-Faktor). Der P-Faktor gibt das Verhältnis des Bodenabtrages bei Anwendung von Schutzmaßnahmen zu dem ohne diese Maßnahmen an.

Ein Erosionsschutz durch Konturnutzung ist dann gegeben, wenn die Bodenbearbeitung und die Saatreihen quer zum Hang, genauer parallel zu den Höhenlinien verlaufen. Dabei muß darauf geachtet werden, daß alle Maßnahmen (auch Düngung und Pflanzenschutz) quer zum Hang erfolgen. Es dürfen keine Fahrspuren hangauf-hangab entstehen.

Die Konturnutzung ist nur bei schwach erosiven Niederschlägen wirksam. Bei starken Regenfällen wird sie wirkungslos, da sich das Wasser in den quer zum Hang laufenden Furchen und Fahrspuren ansammelt, diese schließlich durchbrechen, und es dann zu Rillen- und Grabenerosion kommt. Auf Böden, die stärker zu Rillen- und Grabenerosion neigen, dürfte Quernutzung weniger wirksam sein als bei Böden, die hauptsächlich flächig erodieren. Bei Bifangkulturen ist Quernutzung wirksamer als bei Früchten mit ebenem Saatbett.

Die erosionsmindernde Wirkung der Konturnutzung hängt auch von der Hangneigung ab: Bei Hangneigungen von 3–8 % ist sie am größten. Mit zunehmender Hangneigung nimmt sie ab, weil sich mit steigender Hangneigung zunehmend mehr Wasser in den Furchen sammelt. Dadurch nimmt die Gefahr zu, daß sie durchbrechen. Aus dem gleichen Grund wird die erosionsmindernde Wirkung der Querbewirtschaftung durch die Hanglänge begrenzt (s. Tab. 15). Die Erfahrung scheint jedoch zu lehren, daß im Gegensatz zu den USA auch auf längeren Hängen noch ein gewisser Schutz vorhanden ist, weil bei uns die R-Faktoren kleiner sind. Zukünftige Messungen müssen dies noch klären.

Eine weitere Schutzmöglichkeit besteht darin, 1–2 m breite Querstreifen einer sehr dichten Kultur (z. B. Wintergerste) im Abstand von 20–40 m möglichst höhenlinienparallel in eine Reihenkultur einzusäen (s. Diez, 1985). Dadurch ist auf Hängen mittlerer Neigung (3–9 %) bei Regenereignissen, die wenig Oberflächenabfluß bringen, ein guter Erosionsschutz zu erreichen. Bei sehr erosiven Niederschlägen oder steileren Hängen können die Schutzstreifen überspült werden, und die Schutzwirkung ist dann sehr gering. Die Gefahr des Überspülens verstärkt sich, wenn aufgrund langer Hänge höhere Abflümmengen auftreten (vgl. Tab. 15).

In anderen Ländern werden z. T. Hänge in gleich breite, höhenlinienparallele Streifen unterteilt. Benachbarte Streifen tragen abwechselnd erosionsfördernde und erosionsmindernde Früchte (z. B. Mais und Gras). Auf den Streifen wechseln die Früchte in den Jahren entsprechend der Fruchtfolge, z. B. bedingt eine Mais-Mais–Gras–Gras–Fruchtfolge, daß jeder Streifen 2 Jahre hintereinander mit Mais und Gras bestanden ist. Die Streifen mit der erosionsfördernden Kultur dürfen jeweils nur so breit sein, daß die kritische Hanglänge für Rillenbildung nicht

**Tabelle 15:**  
**P-Faktoren für Konturnutzung und maximale Hanglänge für die Wirksamkeit der Konturnutzung**

Hangneigung in %	Maximale Hanglänge für wirksame Konturnutzung	P-Faktor für Konturnutzung
1– 2	130	0,6
3– 5	100	0,5
6– 8	70	0,5
9–12	40	0,6
13–16	30	0,7
17–20	20	0,8
21–25	17	0,9

erreicht wird, während die Streifenbreite mit der erosionsmindernden dazu ausreichen muß, den Oberflächenabfluß vollständig zum Versickern zu bringen.

Häufig sind Hänge in mehrere Schläge mit verschiedenen Besitzern unterteilt. Wenn die Schlaggrenzen  $\pm$  Höhenlinienparallel verlaufen und die Felddraine (= Besitzergrenze) kein Hindernis für den Oberflächenabfluß darstellen, so ergibt sich eine Situation, die ähnlich wie die Streifennutzung gehandhabt werden muß. Dabei ist der Schutz durch Streifenanbau dann am besten, wenn

- der Gesamthang kurz ist
- eine Hangneigung von 3–8 % hat
- die Streifen (bzw. Schläge) relativ schmal sind (je nach Hangneigung bis zu 40 m) und
- jeder zweite Streifen eine erosionsmindernde Frucht trägt (z. B. Gras, Getreide).

Haben alle Schläge des Hanges alternierende Fruchtfolgen mit demselben C-Faktor, so ist der P-Faktor aus Tab. 16 zu verwenden.

Werden die Schläge, die eine gemeinsame erosive Hanglänge bilden, durch Fruchtfolgen genutzt, die unterschiedliche C-Faktoren besitzen, so sind diese zusätzlich nach den Verfahren auf S. 35 zu wichten.

**Tabelle 16:**  
**P-Faktoren, maximale Streifenbreite und maximale Länge des Gesamthangs für Streifennutzung**

Hangneigung %	max. Länge des Gesamthanges (m)	Streifenbreite	P-Faktoren
1– 2	250	40	0,45
3– 5	200	30	0,38
6– 8	150	30	0,38
9–12	80	25	0,45
13–16	50	25	0,52
17–20	40	20	0,60

# Die Durchführung der Schätzung

Die Schätzung erfolgt in 3 Schritten:

Die Ermittlung der Faktorenwerte.

Die Berechnung des Bodenabtrags.

Die Berechnung der Wirkung von Maßnahmen zur Senkung des Bodenabtrags.

Die Berechnung des Abtrags aus den ermittelten 6 Faktorenwerten ist in diesem Handbuch nach zwei Verfahren möglich.

Für das **Verfahren B**, das ein Schnellverfahren ist, wird die Tabelle 17 verwendet. In ihr sind in kurzen Teiltabellen die vereinfacht abgeleiteten Faktorenwerte aufgelistet, die im freien Raum darunter zum Abtrag aufmultipliziert werden.

Es sei hier jedoch betont, daß auch bei der Verwendung des vereinfachten Verfahrens das Verständnis der Verfahrensprinzipien vorausgesetzt wird und daher die Kenntnis des Handbuchs notwendig ist.

## Die Ermittlung der Faktorenwerte

### R-Faktor

#### Verfahren A:

- a) Erfragen des langjährigen, mittleren Jahresniederschlags N oder des Sommer-  
niederschlags  $N_s$  (1. 5.-31. 10.) und Berechnen des R-Faktors nach:

$$R = 0,083 \cdot N - 1,77 \quad \text{bzw.} \quad R = 0,14 \cdot N_s - 1,48 \quad \text{oder}$$

nur für Bayern:

- b) Aus R-Faktorkarte (Abb. 1) oder  
c) Aus Landkreistabelle (Tab. 2)

#### Verfahren B:

Aus mittlerem Jahresniederschlag (mm/a)

### K-Faktor

#### Verfahren A:

- a) Aus Nomogramm (Abb. 3), falls Bodeneigenschaften bekannt oder  
b) Aus Tabelle 4, falls die Bodenart nach der Reichsbodenschätzung (Gesamtge-  
präge) bekannt oder  
c) Aus Tabelle 5, falls Bodenart, Bodenform, Kationenbelegung und Steinbedek-  
kung bekannt sind.

**Verfahren B:**

Aus Bodenart mit Zu- und Abschlägen für Humusgehalt, Aggregation und Durchlässigkeit. Für die Steinbedeckung ist in der letzten Spalte ein Korrekturfaktor einzutragen.

**LS-Faktor****Verfahren A:**

Mit gemessener Hangneigung s (in %) und erosiver Hanglänge l (in Metern) LS-Faktor ermitteln

- Aus Nomogramm (Abb. 5a–5d) S. 31 ff. oder
- Aus der Gleichung  $LS = (1/22)^m \cdot (s/9) \cdot \sqrt{(s/9)}$

Die Werte für m sind auf S. 29 aufgeführt.

Für  $m = 0,5 (> 5\% \text{ Gefälle})$  vereinfacht sich obige Gleichung zu:

$$LS = (s/9) \sqrt{(1/22) \cdot (s/9)}$$

Bei ungleichmäßig geneigten Hängen ist das Wichtungsverfahren für ungleichmäßige Hänge (s. S. 35) anzuwenden.

**Verfahren B:**

Aus L- u. S-Faktor-Spalte

**C-Faktor****Verfahren A:**

- Für Bayern: Werte aus Tabelle 12, S. 48
- Falls nicht in Tabelle 12 enthalten oder bei abweichender R-Verteilung: Berechnung nach Verfahren auf S. 44ff.

**Verfahren B:**

Aus C-Faktor-Spalte (nur für Bayern)

**P-Faktor****Verfahren A:**

Aus Angaben im Kap. P-Faktor S. 53f.

**Verfahren B:**

Aus P-Faktor-Spalte

**Wichtiger Hinweis:**

Der Berater wird in der Regel Abschätzungen nur in einem engeren Gebiet durchzuführen haben. Für dieses ist die Zahl der in Frage kommenden Faktorenwerte von R, K, C und P meist begrenzt, während der LS-Faktor von Hang zu Hang sehr stark variiert. Es wird daher empfohlen, sich die Faktorenwerte von R, K, C und P für das betreffende Gebiet aus dem Handbuch herauszuschreiben und diesen ein LS-Diagramm (Abb. 5a oder 5b–d) hinzuzufügen. Mit dem LS-Diagramm wird dann für den betreffenden Schlag aus dessen Hangneigung und -länge der LS-Faktor ermittelt und mit den anderen Faktorenwerten dieses Schlages zum Abtrag aufmultipliziert.

## Die Berechnung des Bodenabtrages

### **Verfahren A:**

Aus den Zahlenwerten der 6 Faktoren wird mit der ABAG der mittlere jährliche Bodenabtrag in t/ha errechnet.

#### **Beispiel:**

Region:	Tertiärhügelland, Landkreis Freising mittlerer Jahresniederschlag: 800 mm mittlerer Sommerniederschlag: 508 mm Abb. 1 oder Tab. 2: $\Rightarrow R\text{-Faktor} = 70$
Boden:	Parabraunerde aus Lößlehm, 17% T, 79% U + ffS (70% U + 9% ffS), 2% org. Substanz, Aggregatklasse 3, Durchlässigkeitsklasse 4; Abb. 3 $\Rightarrow K\text{-Faktor} = 0,59$ Boden-Gründigkeit: 80 cm tief Toleranzgrenze Tab. 1: $\Rightarrow T\text{-Wert} = 7$
Hanglänge:	120 m
Hangneigung:	8%
Fruchtfolge:	Nomogramm Abb. 5 $\Rightarrow LS\text{-Faktor} = 1,95$ 1/2 Mais, 1/2 Getreide Tab. 12: Mittel aus günstigstem und ungünstigstem Fall $\Rightarrow C\text{-Faktor} = 0,27$
Erosionsschutz:	keiner $\Rightarrow P\text{-Faktor} = 1$
$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$	
$A = 70 \cdot 0,59 \cdot 1,95 \cdot 0,27 \cdot 1$	
$A = 21,7 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$	

### **Verfahren B:**

Aus den Angaben der Tabelle 17 ergeben sich die folgenden Faktoren: R: 65; K: 0,53; L: 2,3; S: 0,8; C: 0,27; P: 1,0 und für die Steinbedeckung (= 0%) 1,0. Diese Werte sind im unteren Teil der Tabelle eingetragen und zum Abtrag aufmultipliziert. Sie ergeben einen Abtrag von 17,1 t/ha · a, der deutlich unter dem der genaueren Schätzung nach Verfahren A liegt. Dies liegt daran, daß die Tabelle 17 nicht alle Faktorenmöglichkeiten enthält, die das Handbuch bietet, z.B. beim K-Faktor für die große Vielfalt der Böden, beim LS-Faktor für komplexe Hänge und beim C-Faktor für andere Fruchtfolgen.

Das **Ergebnis** der Schätzung nach den 2 Verfahren zeigt, daß der derzeitige Bodenabtrag des gewählten Schlages weit über der Toleranzgrenze T von 7 t/ha · a liegt. Es sollten daher Maßnahmen zu seiner Senkung ergriffen werden. Im Folgenden wird die Wirkung einiger solcher Maßnahmen, wiederum mit Hilfe der Abtragsgleichung, ermittelt.

Tabelle 17:

R (mm/a)	K Bodenart	L 1 (m) ≥ 5 %	S Neigung < 5 %	S Neigung (%)	C un- gün- stig	P =	Abtrag (t/ha · a)
550: 44	T 0,09	5: 0,5	0,6	3: 0,2	Getreide:		Bearbeitung:
600: 48	sT 0,10	10: 0,7	0,7	4: 0,3	100 %	0,10	hangauf-ab 1,0
650: 52	S 0,10	20: 1,0	1,0	5: 0,5			
700: 56	tS 0,11	30: 1,1	1,1	6: 0,6	Raps		in Kontur bei
750: 60	IT 0,13	40: 1,3	1,3	7: 0,7	33 %	0,10	Hangneigung in
800: 65	uT 0,18	50: 1,5	1,4	8: 0,8	Zuckerrüben/Kartoffeln:		% .
850: 69	sL 0,23	60: 1,7	1,5	9: 1,0	25 %	0,13	3- 8: 0,5
900: 73	IS 0,26	70: 1,8	1,6	10: 1,2	33 %	0,14	8-12: 0,6
950: 77	stL 0,28	80: 1,9	1,7	11: 1,3	50 %	0,10	12-16: 0,7
1000: 81	suL 0,35	90: 2,0	1,8	12: 1,5			16-20: 0,8
1050: 85	utL 0,37	100: 2,1	1,8	13: 1,7			20-25: 0,9
1100: 90	ulS 0,39	120: 2,3	2,0	14: 2,0	Mais, konvent.:		
1150: 94	uS 0,43	140: 2,5	2,1	15: 2,2	25 %	0,15	
1200: 98	uL 0,49	160: 2,7	2,2	16: 2,4	33 %	0,18	Steinbedeckung
1250: 102	tU 0,62	180: 2,9	2,3	17: 2,6	50 %	0,14	%
1300: 106	sU 0,65	200: 3,0	2,4	18: 2,9			0: 1,00
1350: 110	U 0,72	240: 3,3	2,6	19: 3,2	Mais, 33 %:		10: 0,85
1400: 114		270: 3,5	2,7	20: 3,5	Mulch	0,08	20: 0,65
1450: 119	1 % OS · 1,1	300: 3,7	2,8	21: 3,8	WG-Eins	0,05	30: 0,50
	2 % OS · 1,0	350: 4,0	3,0	22: 4,1			40: 0,40
	3 % OS · 0,9	400: 4,3	3,2	23: 4,4	Futterbau:		50: 0,30
	4 % OS · 0,8			24: 4,7	25 %	0,09	60: 0,20

		Hangform:	26: 5,4	33 %	0,03	0,02	70:	0,15
Aggr. ± 0,04		konkav	• 0,9	28: 6,1	50 %	0,02	0,01	80: 0,10
		konvex	• 1,2	30: 6,8				
Durchl. ± 0,05				Hopfen:				
				normal	0,97	0,61		
				minimal	0,38	0,13		
				Strohverkauf	• 1,2			
<b>Beispiel:</b>								
Jahresniederschlag 800 mm/a	Parabraunerde aus Löß (uL, 2 % OS, ungünstige Aggr.)	Hanglänge 120 m	Hangneigung 8 %	50 % Silomais, kein Strohverkauf	Bearbeitung hangauf-ab keine Steine	mittlerer Bodenabtrag		
65	• (0,49 · 1 + 0,04)	· 2,3	· 0,8	· 0,27	· (1 · 1)	=	17 t/ha · a	
R:	Regenerosivität (N/h)			ungünstig:	lange Zeitspannen mit unbedecktem Boden;			
(mm/a):	Jahresniederschlag				viel Wintergerste, keine Gründüngung			
K:	Bodenerodierbarkeit (K = Bodenart · OS ± Aggr. ± Durchl.)		P:	Schutzfaktor				
L:	Hanglängenfaktor		OS:	organische Substanz				
I:	Hanglänge in m		Aggr. -:	günstige Aggregation				
≥ 5 %:	Hanglängenfaktor bei Neigung über 5 %		Aggr. +:	ungünstige Aggregation				
< 5 %:	Hanglängenfaktor bei Neigung von 3,5–4,9 %		Durchl. -:	hohe Durchlässigkeit				
S:	Hangneigungsfaktor bei Neigung in %		Durchl. +:	niedrige Durchlässigkeit				
C:	Bewirtschaftungsfaktor bei Fruchtanteilen < 100 % ist der Rest Getreide		Futterbau:	Klee, Gras, Luzerne				
			Mulch:	Mulchsaat				
			WG-Eins:	Wintergersteneinsaat in jede Fahrspur				

## Berechnung der Wirkung von Maßnahmen zur Senkung des Bodenabtrages

Die folgenden Vorschläge von Maßnahmen zur Senkung des Bodenabtrages gehen davon aus, daß die Betriebsstruktur (z. B. Tierhaltung) nicht grundlegend geändert wird. In Tabelle 18 sind die Maßnahmen, ihre Faktorenwerte und die sich daraus ergebenden Abträge angeführt. Die Faktorenwerte, die sich aufgrund der Maßnahmen ändern, sind jeweils fett gedruckt. Der Toleranzwert für diesen Standort beträgt 7 t/ha · a.

Wie der Tabelle 18 zu entnehmen ist, stehen eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung, mit denen sich der jährliche Bodenabtrag bis unter die Toleranzgrenze senken läßt.

Die Maßnahmen, die eine Verringerung des C-Faktors bedingen, kann der Landwirt selbst ergreifen. Oft ist auch Konturnutzung ohne größere Schwierigkeiten möglich. Maßnahmen, die auf eine Verkürzung der Hanglänge hinzielen, können meistens nur im Rahmen der Flurbereinigung durchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß die Möglichkeit der Konturnutzung erhalten bleibt oder neu geschaffen werden muß. Mit der Streifennutzung ist in Tab. 18 eine Maßnahme angeführt, die bei uns kaum genutzt wird. Bei geschickter Wahl der Streifenbreite (= Vielfaches der Gerätebreite) kann sie aber eine billige, einfach durchzuführende Möglichkeit sein.

**Tabelle 18:**  
**Beispiele für Maßnahmen zur Senkung des Bodenabtrags**

Faktor	R	K	LS	C	P	Abtrag (t/ha · a)
Ausgangssituation (Bsp. S.57)	70	0,59	1,95	0,27	1	21,7
50 % Mais in Mulchsaat	70	0,59	1,95	<b>0,07</b>	1	5,7
33 % Mais + 20 % Getreide als Ganzpflanzsilage	70	0,59	1,95	<b>0,16</b>	1	13,0
50 % Mais mit WG-Einsaat, Konturnutzung	70	0,59	1,95	<b>0,16</b>	<b>0,5</b>	6,4
25 % Mais-Mulchsaat, 25 % Weidelgras, Konturnutzung	70	0,59	1,95	<b>0,03 **</b>	<b>0,5</b>	1,2
Zweiteilen des Hanges, Konturnutzung	70	0,59	<b>1,4</b>	0,27	<b>0,5</b>	7,8
4 Streifen à 30 m Breite*	70	0,59	1,95	0,27	<b>0,38</b>	8,3

\* Streifen abwechselnd mit Getreide und Mais bestellt.

\*\* Wert ist nicht in Tab. 12.

### Allgemeine Literatur

- Anonym (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. 3. Aufl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Diez, Th. (1985): Vermeiden von Erosionsschäden. AID, **108**.
- Dissmeyer, G. und Foster, G. (1984): A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land. USDA-Forest Service, Techn. Publ. R8-TP6, 40 S.
- Gabriels, D. (1986): Provisional rain erosivity map of EEC countries. Workshop on erosion assessment for the EEC: Methods and models, 2–3 December 1986, Brussels.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P. (1982): Lehrbuch der Bodenkunde. Verlag F. Enke, Stuttgart.
- Wischmeier, W. H. (1976): Use and misuse of the USLE. J. of Soil and Water Cons. **31**, 5–9.

### Literatur, aus der die im Handbuch verwendeten Daten stammen

- Auerswald, K. (1985): Beurteilung der Erosionsanfälligkeit von Mais bei unterschiedlichen Anbauverfahren. Z. Acker- u. Pfl.-bau **154**, 45–55.
- Auerswald, K. (1985): Erosionsgefährdung unter Zuckerrüben und Sommergerste. Z. Acker- u. Pfl.-bau **155**, 34–42.
- Auerswald, K.; Kainz, M. und Vogl, W. (1986): Vergleich der Erosionsgefährdung durch Maisfruchtfolgen (C-Faktor). Bayer. Landw. Jahrb. **63**, 3–8.
- Auerswald, K. und Schmidt, F. (1986): Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. GLA Fachberichte H. 1, Bayer. Geol. Landesamt.
- Auerswald, K. (1987): Bestimmung der Bodengründigkeit aus dem Klassenbeschrieb der Reichsbodenschätzung zum Festlegen von tolerierbaren Bodenabträgen (T-Wert). Z. Acker- u. Pfl.-bau, **158**, 132–139.
- Becher, H. H.; Schäfer, R.; Schwertmann, U.; Wittmann, O. und Schmidt, F. (1977): Bestimmung der Erosionsanfälligkeit nach Wischmeier an hopfengenutzten Böden der Hallertau. Z. f. Kulturtechn. u. Flurber. **18**, 339–349.
- Becher, H. H. und Schwertmann, U. (1981): Korrelative Ermittlung der Feinstsandfraktion zur Bestimmung des K-Faktors der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung nach Wischmeier. Z. f. Kulturtechn. u. Flurber. **22**, 97–98.
- Diez, Th. und Kainz, M. (1986): Erosion control under corn. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. **49**, 226–230.
- Kainz, M. (1985): Verlauf des relativen Bodenabtrags unter Mais. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. **43**, 865–866.
- Mutchler, C. und Greer, J. (1980): Effect of slope length on erosion from slopes. Trans. ASAE **23**: 866–876.
- Rogler, H. und Schwertmann, U. (1981): Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte von Bayern. Z. f. Kulturtechn. u. Flurber. **22**, 99–112.
- Wischmeier, W. H. und Smith, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. USDA, Agric. Handbook No. 537 (dort weitere Literatur).

- Wittmann, O. (1983): Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern, Übersichtskarte 1:1000000 mit Erläuterungen. Materialien 21, München (Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen).
- Zingg, A. (1940): Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff. Agr. Eng. **21**, 59–64.

---

# Stichwortverzeichnis

---

- A, siehe Abtrag bzw. Aggregatkasse  
ABAG 9  
Abfluß, siehe Regen- und Oberflächenabflußfaktor  
Ablagerung 29  
Abtragsberechnung 9  
Abtragsberechnung, Restriktionen 10f.  
Ackerbeschrieb 12, 24ff.  
Ackerfutterbau 49  
Aggregatkasse 19ff.  
Allgemeine Bodenabtragsgleichung 9  
Basensättigung 26  
Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor C 10, **38ff.**  
Bedeckung 39ff.  
Bestelltechnik **42ff.**, 49  
Bewirtschaftung 38  
Bifangkulturen 53  
Bodenabtrag, langjähriges Mittel 9  
Bodenbearbeitung 38ff.  
Bodeneigenschaften 19ff.  
Bodenerodierbarkeitsfaktor K 9, **19ff.**, 35  
Bodenkarten 25  
Bodenschätzung, siehe Reichsboden-schätzung  
C-Faktor 10, 35  
D, siehe Durchlässigkeitsklasse  
Direktsaat 42ff.  
Durchlässigkeitsklasse 19ff.  
E ·  $I_{30}$  14  
Einzelregen 10, 14  
Einzugsgebiete 10  
Energiedichte 14  
Ernterückstände 38ff.  
Erodibilität, siehe Bodenerodierbarkeitsfaktor  
Erosionsanfälligkeit von Früchten 51  
Erosionsfaktoren 9f.  
Erosionsschutzfaktor P 10, **53ff.**  
Erosionsschutzmaßnahmen 42, 60  
erosive Hanglänge 29ff.  
erosiver Niederschlag 14  
Erosivität der Niederschläge 9  
Fahrspuren 53  
Feinsand, Feinstsand 19ff.  
Feldgrenzen 36  
Feldrain 29, 36, 54  
Flurbereinigung 37  
Fruchtfolge 38ff.  
Futterpflanzen 49  
Futterrüben, siehe Zuckerrüben  
Gürtelweg 30, 36  
Gefügeverschlechterung **42ff.**, 51  
Gerste 45f.  
Getreide 42ff.  
Gründung 40  
Gründigkeit 12  
Grünlandbeschrieb 12  
Großlandschaften Bayerns 21  
Hafer 46  
Hanglänge 29ff.  
Hanglängenexponent 29ff., 37  
Hanglängenfaktor L 9  
Hangneigung 29ff., 53  
Hangneigungsfaktor S 10  
Hangstufen 36  
Hopfen 50  
 $I_{30}$  14  
Isoerodentkarte von Bayern 16  
Jahres-R-Verteilung **44ff.**, 51  
Jahresniederschlag 15  
Körnerraps 43, 46  
K-Faktor 9, **19ff.**, 35  
K-Faktor-Nomogramm 22f.

- K-Faktor-Restriktionen 22  
 K-Faktor-Umrechnung 25  
 Kartoffeln **42ff.**, 46  
 Kationen 26  
 kinetische Energie 14  
 Klee, Kleegras 49  
 komplexe Hänge, s. ungleichm. Hänge  
 konkave Hänge 35  
 Konturnutzung 37, **53ff.**  
 konvexe Hänge 35  
 Korngrößenzusammensetzung 19  
 Kulturmaßnahmen 38  
 Kulturperioden **41**, 44ff.  
 Kulturpflanzen 38ff.  
 L-Faktor 9  
 Landschaften Bayerns 21  
 LS-Faktor 29  
 LS-Nomogramm 31ff.  
 Luzerne 49  
 M 22  
 m, siehe Hanglängenexponent  
 Mais **42ff.**, 46  
 maximale 30-Minuten-Intensität 14  
 Minimalbodenbearbeitung 42ff.  
 Morphologie, siehe Topographiefaktor,  
     komplexe Hänge  
 Mulch 39  
 Mulchsaat 42ff.  
 N (Jahresniederschlag) 15  
 Ns (Sommerniederschlag) 15  
 Nutzungswise, siehe C-, P-Faktor  
 Oberflächenrauhigkeit 38  
 organische Substanz 19ff.  
 P-Faktor 10  
 Perioden 41  
 Permeabilität, s. Durchlässigkeitsklasse  
 Querbewirtschaftung 53ff.  
 Querstreifen 53  
 R-Faktor 9  
 R-Faktoranteil **45ff.**, 51  
 R-Faktoren der bayer. Landkreise 17  
 Ranken 36  
 Raps **42ff.**, 45f.  
 Rauhigkeit 38  
 RBA, siehe Relativer Bodenabtrag  
 reduzierte Bodenbearbeitung 39ff.  
 Regen- und Oberflächenabflußfak-  
     tor R 9, **14ff.**  
 Regenenergie; -dichte 14  
 Regenschreiberkurven 14  
 Reichsbodenschätzung 12, 24ff.  
 Relativer Bodenertrag 38  
 Roggen 46  
 Rüben, siehe Zuckerrüben  
 S-Faktor 10  
 Saatbeet 40  
 Schlaggrenzen 29  
 Schluff 19  
 Schneeschmelze 15f.  
 Schutzmaßnahmen 53ff., 60  
 Schwarzbrache **19**, 38  
 Sedimentation 29  
 Sommerniederschlag 15  
 Spargel 50  
 Spurlockerung 42ff.  
 Stallmist 44  
 Standardhang 19  
 Starkregen 18  
 Steine, Steinbedeckung 22  
 Stoppeln 40  
 Streifennutzung 53ff.  
 Stroh 40  
 Strohmulch 50  
 T-Wert, siehe Toleranzgrenze  
 Terrassen 36, 53  
 Toleranzgrenze 10, **12ff.**, 32, 36, 52  
 tolerierbare Hanglänge 32  
 tolerierbarer C-Faktor 52  
 tolerierbarer L-Faktor 36  
 Topographiefaktor LS 29ff.  
 ungleichmäßige Hänge 35ff.  
 Universal Soil Loss Equation 9  
 Untersaat 50  
 USLE 9  
 Vegetation 39  
 Vegetationsperioden, siehe Kultur-  
     perioden  
 W, siehe Wichtigsfaktor  
 Wasserleitfähigkeit, siehe Durchlässig-  
     keitsklasse  
 Weizen 46  
 Wichtigsfaktor 35ff.  
 Wintererosion, siehe Schneeschmelze  
 Wintergerstenreiheneinsaat 42ff.  
 Winterzwischenfrucht 42ff.  
 Zuckerrüben **42ff.**, 46