

BERLINER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

Herausgegeben von Margot Böse, Peter-Jürgen Ergenzinger, Dieter Jäkel, Hans-Joachim Pachur
und Wilhelm Wöhlke

Schriftleitung: Dieter Jäkel

Heft 61

Jürgen Schmidt

**Entwicklung und Anwendung eines physikalisch
begründeten
Simulationsmodells für die Erosion geneigter
landwirtschaftlicher Nutzflächen**

148 Seiten, 87 Abbildungen, 34 Tabellen

1996

Im Selbstverlag des Instituts für Geographische Wissenschaften

ISBN 3-88009-062-9

Jürgen Schmidt

**Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter
landwirtschaftlicher Nutzflächen**

Berliner Geogr. Abh., Heft 61: 1 - 148, Berlin 1996

BERLINER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

Herausgegeben von Margot Böse, Peter-Jürgen Ergenzinger, Dieter Jäkel, Hans-Joachim Pachur
und Wilhelm Wöhlke

Schriftleitung: Dieter Jäkel

Heft 61

Jürgen Schmidt

**Entwicklung und Anwendung eines physikalisch
begründeten
Simulationsmodells für die Erosion geneigter
landwirtschaftlicher Nutzflächen**

148 Seiten, 87 Abbildungen, 34 Tabellen

1996

Im Selbstverlag des Instituts für Geographische Wissenschaften

ISBN 3-88009-062-9

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	12
1. Einführung	13
1.1 Erläuterung der Begriffe "Boden und Bodenerosion"	13
1.2 Erscheinungsformen der Erosion, Ursachen und Folgen	13
1.3 Erosionsschutz	14
2. Kenntnisstand und Ziel der Arbeit	15
2.1 Übersicht	15
2.2 Empirische Erosionsmodelle	15
2.3 Physikalisch begründete Erosionsmodelle	17
2.4 Ziel der Arbeit.....	21
3. Grundlagen	22
3.1 Größen und Einheiten	22
3.2 Theoretische Grundlagen	23
3.2.1 Hydrologische Kenngrößen.....	23
3.2.2 Hydraulische Kenngrößen	27
3.3 Experimentelle Grundlagen	31
3.3.1 Vorgehensweise	32
3.3.2 Aufbau der Versuchsanlage	33
3.3.3 Hydraulische Eigenschaften der Versuchsfläche	34
3.3.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse	36
4. Modellbildung und Programmstruktur.....	38
4.1 Erosionsmodell	38
4.1.1 Vorgehensweise	38
4.1.2 Modellansatz für die Loslösung der Partikel	39
4.1.3 Modellansatz für den Transport der Partikel	43
4.1.4 Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Transportkapazität.....	44
4.1.5 Korngrößenverteilung der transportierten Partikel	45
4.1.6 Erosion/Deposition	47
4.2 Infiltrationsmodell.....	47
4.2.1 Vorgehensweise	47
4.2.2 Modellansatz	48
4.2.3 Ableitung der Modellparameter aus Bodenkennwerten	49
4.3 Programmstruktur und Funktionsweise	51
4.3.1 Überblick	51

4.3.2	Menüstruktur	52
4.3.3	Eingabegrößen und Datenverwaltung	53
4.3.4	Die Prozedur 'Berechnen'	55
4.3.5	Ausgabegrößen	55
4.3.6	Parameter	56
4.3.7	Optionen	59
4.4	Vergleich mit anderen Modellansätzen	60
5.	Modellvalidierung	61
5.1	Vorgehensweise	61
5.2	Erosionsmodell	61
5.2.1	Sensitivitätsanalyse	61
5.2.2	Plausibilitätstests	74
5.2.3	Vergleich mit Meßwerten aus Freilandexperimenten	83
5.3	Infiltrationsmodell	91
5.3.1	Plausibilitätstests	91
5.3.2	Vergleich mit Meßwerten aus Freilandexperimenten	94
5.4	Modellbedingte Einschränkungen und Fehlerursachen	96
6.	Bestimmung und Verhalten der Modellparameter	98
6.1	Überblick	98
6.2	Reliefparameter	98
6.3	Bodenparameter	98
6.3.1	Körnung	98
6.3.2	Lagerungsdichte	99
6.3.3	Organischer Kohlenstoffgehalt	100
6.3.4	Anfangswassergehalt	100
6.3.5	Erosionswiderstand	101
6.3.6	Rauhigkeit	102
6.3.7	Bedeckungsgrad	104
6.4	Niederschlagsparameter	104
6.5	Depositionskoeffizient	106
6.6	Korrekturfaktor	106
7.	Anwendung	108
7.1	Demonstrationsvorhaben Zaisenhausen	108
7.1.1	Problemstellung	108
7.1.2	Untersuchungsgebiet	108
7.1.3	Diskussion der Ergebnisse	109
7.2	Demonstrationsvorhaben Saidenbach/Erzgebirge	121
7.2.1	Problemstellung	121
7.2.2	Untersuchungsgebiet	122
7.2.3	Vorgehensweise und Methoden	122
7.2.4	Diskussion der Ergebnisse	124

8. Zusammenfassung	138
9. Symbole und Einheiten	141
10. Literatur	144

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

	Seite
Abb. 1 : Abhängigkeit des Abflusses vom Füllgrad bearbeitungsspezifischer Hohlformen bei gefällenormaler Bodenbearbeitung und 6% Hangneigung	24
Abb. 2 : Verlauf der Infiltrationsrate bei Beregnung eines ungesättigten Bodens	25
Abb. 3 : Entwicklung des Feuchteprofils in einen homogenen, wasserüberstauten Boden bei konstantem Anfangswassergehalt: a) experimentell ermittelt, b) Modellvorstellung	26
Abb. 4 : Tropfengrößenverteilung natürlicher Niederschläge als Funktion der Niederschlagsintensität	28
Abb. 5 : Abhängigkeit des mittleren Tropfendurchmessers (d_{50}) von der Niederschlagsintensität	28
Abb. 6 : Endgeschwindigkeiten von Wassertropfen in unbewegter Luft in Abhängigkeit von der Tropfengröße	29
Abb. 7 : Mittlere Fallgeschwindigkeit der Tropfen als Funktion der Niederschlagsintensität	30
Abb. 8 : Änderung des Erosionswiderstandes mit der Partikelgröße	30
Abb. 9 : Aufbau der Versuchsanlage	32
Abb. 10 : Vergleich der künstlich erzeugten Tropfen mit der Häufigkeitsverteilung der Tropfendurchmesser natürlichen Regens bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten	33
Abb. 11 : Partikelgrößenverteilung des Versuchsbodens nach dispergierender Vorbehandlung	34
Abb. 12 : Geometrische Struktur der Versuchsfläche (zu Versuchsbeginn)	35
Abb. 13 : Aggregatgrößenverteilung des Versuchsbodens (zu Versuchsbeginn)	36
Abb. 14 : Feststoffmassenstrom q_s als Funktion des Abflußvolumenstromes q mit der Niederschlagsintensität r als Parameter	38
Abb. 15 : Abhängigkeit des Impulsstromes der Strömung vom Abflußvolumenstrom	40
Abb. 16 : Abhängigkeit des Impulsstromes der Tropfen von der Niederschlagsintensität	42
Abb. 17 : Beziehung zwischen dem Feststoffmassenstrom q_s und der Erosionskennzahl E	43

Abb. 18 : Abhängigkeit der Transportkapazität und des Feststoffmassenstromes vom Partikeldurchmesser	45
Abb. 19 : Auswertung der VAN GENUCHTEN-Gleichung für 3 Bodenarten.....	50
Abb. 20 : Auswertung der CAMPBELL-Gleichung für 4 Bodenarten	51
Abb. 21 : EROSION 2D Menüstruktur.....	52
Abb. 22 : Flußdiagramm der Prozedur 'Berechnen'	54
Abb. 23 : Grafische Ausgabe der Berechnungsergebnisse	56
Abb. 24 : Vergleich unterschiedlicher Auflösungen	57
Abb. 25 : Bedeutung der Glättungsparameter	58
Abb. 26 : Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines geraden Hanges	62
Abb. 27 : Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines konvex gewölbten Hanges	63
Abb. 28 : Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines konkav gewölbten Hanges	64
Abb. 29 : Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines konvex-konkav gewölbten Hanges	65
Abb. 30 : Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines unregelmäßig gewölbten Hanges	66
Abb. 31 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Hanggeometrie	67
Abb. 32 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Hangneigung (gerader Hang)	67
Abb. 33 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Hanglänge (gerader Hang)	68
Abb. 34 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Lagerungsdichte	69
Abb. 35 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages vom Anfangswassergehalt	69
Abb. 36 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages vom C_{org} -Gehalt	70
Abb. 37 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages vom Erosionswiderstand	71
Abb. 38 : Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Rauigkeit der überströmten Oberfläche	71
Abb. 39 : Abhängigkeit des Bodenabtrages von der Niederschlagsintensität	72
Abb. 40 : Sensitivität des EROSION 2D Modells gegenüber verschiedenen Eingangsgrößen	73
Abb. 41 : Simulation Acker/Profil A	76
Abb. 42 : Simulation Acker/Profil B	76
Abb. 43 : Simulation Acker/Grünland/Profil A	77
Abb. 44 : Simulation Acker/Grünland/Profil B	77
Abb. 45 : Sedimentkonzentrationen an der Stelle $x = 90\text{m}$ (Übergang Acker/Grünland)	78
Abb. 46 : Simulation Acker/Grünstreifen/Profil A	79
Abb. 47 : Simulation Acker/Grünstreifen/Profil B	79
Abb. 48 : Langfristsimulation Profil A/I	80
Abb. 49 : Langfristsimulation Profil B/I	81
Abb. 50 : Langfristsimulation Profil A/II	82
Abb. 51 : Langfristsimulation Profil A/III	82

Abb. 52 : Langfristsimulation Profil A/III, Erhöhung der Erosionsbasis um 0,5mm	83
Abb. 53 : Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Körnung	92
Abb. 54 : Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte	92
Abb. 55 : Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Gehalt an organischer Substanz	93
Abb. 56 : Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Anfangswassergehalt	93
Abb. 57 : Gemessener und simulierter Infiltrationsverlauf, Meßpunkt 6a (Müncheberg)	94
Abb. 58 : Gemessener und simulierter Infiltrationsverlauf, Meßpunkt 3 (Zaisenhausen)	95
Abb. 59 : Gemessener und simulierter Infiltrationsverlauf, Meßpunkt 2.1 (Saidenbach)	95
Abb. 60 : Vergleich gemessener und simulierter Infiltrationsraten	96
Abb. 61 : Veränderung des Porenvolumens durch Kulturmaßnahmen	99
Abb. 62 : Zusammenhang zwischen Erosionswiderstand und Scherwiderstand	102
Abb. 63 : Abhängigkeit des Korrekturfaktors vom kumulativen Niederschlag im Fall eines frisch bearbeiteten (gelockerten) Bodens aus Löß	107
Abb. 64 : Lage des Testgebietes "Zaisenhausen"	109
Abb. 65 : Untersuchungsgebiet Zaisenhausen, Lage der Meßstellen	110
Abb. 66 : Extremereignis Bretten 13.06.1963	111
Abb. 67 : Simulation der Variante A: Hang: ungegliedert, Nutzung: Rüben, Boden: feucht	112
Abb. 68 : Simulation für Rüben/feucht mit Grasweg bei 92-96m	113
Abb. 69 : Ausschnitt aus Profil Harbuckel mit Kombination Grünstreifen, Weg, Graben	114
Abb. 70 : Simulation für Rüben/feucht mit Kombination Grasstreifen, Weg, Graben bei 92-100m.....	114
Abb. 71 : Minderung des Austrages in Abhängigkeit von der Lage eines hang- parallelen Grabens	116
Abb. 72 : Simulation für Rüben/feucht bei terrassiertem Hang	116
Abb. 73 : Abhängigkeit des Austrages von der Gliederung des Hanges und von der Bodenfeuchte	117
Abb. 74 : Abhängigkeit des Austrages von der Nutzung und der Bodenfeuchte	118
Abb. 75 : Einfluß eines höhenlinien-parallelen Grasweges auf die langfristige Entwicklung des Hangprofils	120
Abb. 76 : Lage des Testgebietes Talsperre "Saidenbach"	121
Abb. 77 : Großberegnungsanlage zur experimentellen Untersuchung erosions- bedingter Stoffausträge	134
Abb. 78 : Gehalte der Schwermetalle Zink, Blei und Arsen im Boden (Versuchs- fläche M3)	125

Abb. 79 : Verteilung der Schwermetalle Zink, Blei und Arsen auf die Kornfraktionen im Ausgangsboden (Versuchsfläche M3)	125
Abb. 80 : Bleigehalte im ausgetragenen Sediment (Versuch M3.1/3.2)	127
Abb. 81 : Vergleich der Kornsummenkurven des Ausgangsbodens und des ausgetragenen Sediments (Versuchsfläche M3, Versuch M3.1)	129
Abb. 82 : Verteilung des Schwermetalls Blei auf die Kornfraktionen im ausgetragenen Sediment	129
Abb. 83 : Kornverteilung des Sediments und des Ausgangsbodens (Versuchsfläche M3)	133
Abb. 84 : Vergleich gemessener und rechnerisch ermittelter Stoffausträge für die Elemente Blei und Zink	135
Abb. 85 : Übersichtskarte des Testgebietes "Saidenbach"	136
Abb. 86 : Rechnerisch generiertes Extremereignis	136
Abb. 87 : Erosion und Deposition im Einzugsgebiet der Saidenbachtalsperre	138
Tab. 1 : Übersicht über Bodenerosionsmodelle	21
Tab. 2 : Größen und Einheiten zur Quantifizierung der Erosion	23
Tab. 3 : Ergebnisse der Erosionsversuche	37
Tab. 4 : Eingabegrößen	53
Tab. 5 : Ausgabegrößen	55
Tab. 6 : Inputgrößen und Werteintervalle zur Berechnung des Sensitivitätsparameters S	73
Tab. 7 : Eingabeparameter für Simulationsrechnungen	75
Tab. 8 : Eigenschaften der Meßparzellen 8 und 11 des Erosionsmeßfeldes Müncheberg	85
Tab. 9 : Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Feststoffausträgen (Parzellen 8 und 11, Müncheberg)	86
Tab. 10 : Eigenschaften der Meßparzellen 'Im Neuenbürger Pfad' (MP 1) und 'Im Ebertsberg' (MP 2)	88
Tab. 11 : Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Feststoffausträgen (Parzellen 1 und 2, Weiherbach)	89
Tab. 12 : Eigenschaften der Meßparzellen C, F, G, des Untersuchungsgebietes Neuenkirchen	90
Tab. 13 : Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Feststoffausträgen (Parzellen C, F, G Untersuchungsgebiet Neuenkirchen)	91
Tab. 14 : Vergleich der Kornverteilungen zweier Versuchsböden bei chemischer und rein mechanischer Vorbehandlung	99
Tab. 15 : Erfahrungswerte der Lagerungsdichte in Abhängigkeit von der Bodenart	100
Tab. 16 : Schwankungsbereiche der Anfangsbodenfeuchte in Abhängigkeit von der Bodenart	100
Tab. 17 : Schwankungsbereiche des Erosionswiderstandes in Abhängigkeit von der Bodenart	101

Tab. 18 :	Körnungsabhängige Rauigkeitsbeiwerte, abgeleitet aus der Aggregatgrößenverteilung an der Bodenoberfläche (GARBRECHT) und aus der Strömungsgeschwindigkeit des Oberflächabflusses (MANNING)	103
Tab. 19 :	Vegetationsabhängige Rauigkeitsbeiwerte	104
Tab. 20 :	Monatliche Mittel des Bedeckungsgrades in Abhängigkeit von der Kulturart	105
Tab. 21 :	Parameterbestimmung Testgebiet Zaisenhausen	119
Tab. 22 :	Abstand des Grabens von der Hangoberkante	115
Tab. 23 :	Jährliche Netto-Austräge (Profil Hardbuckel/Variante A), bezogen auf das Referenzjahr 1955 in Abhängigkeit von der Kulturart	118
Tab. 24 :	Jährliche Bodenverluste im Kraichgau, nach Angaben verschiedener Autoren	119
Tab. 25 :	Schwermetallgehalte im Sediment der Talsperren Klingenberg und Lehmühle (Osterzgebirge)	122
Tab. 26 :	Experimentell ermittelte Modellparameter	123
Tab. 27 :	Schwermetallgehalte im Boden	124
Tab. 28 :	Verteilung der Schwermetalle auf die Kornfraktionen im Ausgangsboden	126
Tab. 29 :	Schwermetallgehalte im Sediment	128
Tab. 30 :	Verteilung der Schwermetalle auf die Kornfraktionen im Sediment	130
Tab. 31 :	Gemessene und berechnete Kornverteilungen (Sedimente und Ausgangsböden)	131
Tab. 32 :	Berechnete Feststoffausträge und Anteile der Kornfraktionen Ton, Schluff und Sand	132
Tab. 33 :	Gemessene und berechnete Stoffausträge	134
Tab. 34 :	Feststoffaustrag und partikelgebundener Stoffaustrag im Jahresmittel und für den Fall eines extremen Einzelereignisses (Profil: Hölzelberg)	137

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Forschungsvorhabens:

"Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen"
(Förderkennzeichen: 0339233).

Das in 6-jähriger Bearbeitungszeit erstellte Prognosemodell richtet sich vor allem auf Anwendungen im Bereich bodenschutzbezogener Planungsvorhaben und auf den Einsatz in Ausbildung und Beratung. Der Kontakt mit potentiellen Anwendern hat gezeigt, daß an einem solchen Modell großes Interesse besteht.

Mein besonderer Dank gilt zunächst dem BMFT, das durch die Bereitstellung der finanziellen Mittel die Entwicklung dieses Modells möglich gemacht hat.

Herzlich danken möchte ich ferner Herrn Prof. Dr. Ergenzinger für das Vertrauen, das er als verantwortlicher Projektleiter dem Bearbeiter des Vorhabens entgegengebracht hat. Darüberhinaus haben zahlreiche MitarbeiterInnen und KollegInnen in unterschiedlicher Weise zu der vorliegen-

den Arbeit beigetragen. Ihnen möchte ich ebenfalls herzlich danken, insbesondere: Frau Michael, Herrn Dr.-Ing. Schramm und Herrn Dr. v. Werner.

Für die Validierung des Modells wurde von zahlreichen Forschungseinrichtungen Datenmaterial zur Verfügung gestellt. Mein Dank gilt in diesem Zusammenhang Frau Prof. Frielinghaus und Herrn Dr. Deumlich (beide ZALF Müncheberg), Herrn Dr.-Ing. Schramm (Univ. Karlsruhe) sowie Herrn Prof. Dr. Bork (TU Braunschweig/TU Berlin).

Außerdem danke ich dem Landesamt für Flurbereinigung, Baden-Württemberg, und dem Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie, durch deren großzügige Unterstützung die praktische Erprobung des Modells in zunächst zwei Demonstrationsvorhaben ermöglicht wurde.

Nicht zuletzt gilt mein Dank den Mitarbeitern des Projektträgers im Forschungszentrum Jülich, Herrn Dr. Schaarschmidt und Herrn Notthoff, die durch ihren Einsatz und ihre Kooperationsbereitschaft zum Gelingen des Projektes beigetragen haben.

Freiberg, im April 1994
Jügen Schmidt

1. Einführung

1.1 Erläuterung der Begriffe "Boden und Bodenerosion"

MONTHEIT (1978) beschreibt den Boden als Reservoir der Stoffe, die zum Aufbau und zum Erhalt lebender Organismen benötigt werden: Wasser, Minerale, Spurenelemente. Die Eigenschaften der Böden bestimmen maßgeblich das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen und damit das Nahrungsangebot für Tiere und Menschen.

Durch Niederschläge und Wind werden stets Bodenpartikel und Nährstoffe von der Bodenoberfläche abgelöst, transportiert und an anderer Stelle wieder abgelagert. Ablösung, Transport und Ablagerung des erodierten Materials faßt man unter dem Begriff Erosion zusammen. Erosion ist prinzipiell ein natürlicher Vorgang. In gewissen Grenzen können die hierbei auftretenden Bodenverluste durch Neubildung wieder ausgeglichen werden. Mit zunehmender anthropogener Inanspruchnahme des Bodens - besonders durch den Ackerbau - nehmen jedoch die erosiven Prozesse erheblich an Intensität zu und übersteigen vielfach das aufgrund der Bodenreuebildung tolerierbare Maß. In Abhängigkeit von der topographischen Lage entstehen einerseits flachgründige, andererseits mächtige kolluviale Böden. Die Erosion führt damit langfristig zu ausgeprägten Flächendifferenzierungen mit z.T. großen Unterschieden in den Substrat-, Wasser-, Humus- und Nährstoffeigenschaften (WEISE, 1990). Einmal eingetretene Bodenverluste sind zumeist nicht wieder rückgängig zu machen. Eine Verknappung der nur begrenzt verfügbaren Ressource Boden ist damit die zwangsläufige Folge.

1.2 Erscheinungsformen der Erosion, Ursachen und Folgen

Auf weitgehend ungegliederten, ebenen Hängen tritt Erosion mehr oder weniger

flächenhaft auf. Ausgeprägt linienförmige Erosionsformen sind zumeist an Tiefenlinien (konvergierendes Gefälle) gebunden, in denen der oberflächliche Abfluß konzentriert abfließt.

Der flächenhafte Abtrag macht sich bei kurzfristiger Betrachtung kaum bemerkbar. Gerade dieser nicht offensichtliche Erosionsverlauf birgt die Gefahr, daß die langfristige Schädigung des Bodens nicht wahrgenommen wird (Nds. MINISTERIUM f. LANDWIRTSCHAFT 1989).

Die Ursachen beschleunigter Erosion der Kulturböden liegen vor allem in der

- unzureichenden Bodenbedeckung durch den Anbau spätdeckender Kulturarten
- fehlenden ganzjährigen Vegetationsdecke, beispielsweise bei Mais, Futter- und Zuckerrüben
- Bewirtschaftung großer Schläge mit langen Hängen
- zu intensiven und zu feinen Bodenbearbeitung mit zu schweren Bearbeitungsmaschinen

(Nds. MINISTERIUM f. LANDWIRTSCHAFT, 1989).

Schäden durch Erosion entstehen sowohl durch die Abfuhr wie auch durch die Ablagerung des erodierten Bodenmaterials an anderer Stelle. Man unterscheidet daher On-site- und Off-site-Schäden. Die On-site-Schäden beziehen sich im wesentlichen auf Schäden an Böden und Pflanzenbestand. Hierunter fallen vor allem:

- der Verlust an durchwurzelbarem Boden, und als Folge davon vermindertes Wasserspeicher- und Filtervermögen
- der Verlust des Bodens an Humus, Tonkolloiden und Pflanzennährstoffen
- die Sortierung der Korngrößen im Oberboden (durch selektiven Transport)
- Verschlechterung der Bodenstruktur
- die Beeinträchtigung des Bodenluft- und Wasserhaushaltes durch Bodenauftrag im Ablagerungsbereich

- die Schädigung der Kulturpflanzen durch Entwurzelung, Verschmutzung und Verschüttung
(Nds. MINISTERIUM f. LANDWIRTSCHAFT, 1989).

Die On-site-Schäden haben unmittelbare Auswirkungen auf die Landwirtschaft, insbesondere durch:

- die langfristige Minderung der Bodenfruchtbarkeit
- Ertragsverluste und verminderte Ertragssicherheit
- Erhöhung des Zeit- und Kostenaufwandes, z.B. für Neubestellung, wiederholte Ausbringung von Düngemitteln und Herbiziden
- Folgekosten durch Verschüttung von Entwässerungssystemen und Wirtschaftswegen
- Erschwerung der Bewirtschaftung durch Unheitlichkeit der Schläge

(Nds. MINISTERIUM f. LANDWIRTSCHAFT, 1989).

Die Off-site-Schäden beziehen sich im wesentlichen auf Auswirkungen der Erosion, die außerhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche liegen. Es handelt sich hierbei hauptsächlich um Schäden, die durch die Ablagerung des erodierten Bodenmaterials entstehen. Für die Schädigung ist hierbei von entscheidender Bedeutung, daß insbesondere die feineren, leicht transportierbaren Bodenpartikel mit Nähr- und Schadstoffen aus Düng- und Pflanzenschutzmitteln behaftet sind, die vor allem in aquatischen Ökosystemen zu folgenschweren Problemen (Eutrophierung, Toxifizierung) führen. Die Intensität der Belastung von Oberflächengewässern mit Nähr- und Schadstoffen hängt vor allem in landwirtschaftlich intensiv genutzten Agrarräumen entscheidend vom Ausmaß der Bodenerosion ab (QUIST, 1984; RAT f. UMWELTFRAGEN, 1985; BORK, 1988).

Zu den Off-site-Schäden sind darüberhinaus zu rechnen:

- die Verlandung von stehenden Gewässern und künstlichen Stauhaltungen

- erhöhte Aufwendungen zur Freihaltung von Gerinnen und wasserbaulichen Anlagen
- die Vernichtung von Laichplätzen durch übermäßigen Sedimenteintrag in Fließgewässern.

Eine umfassende Bestandsaufnahme der Erosionsschäden und der besonders gefährdeten Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland wurde zuletzt im Jahre 1965 vorgelegt (RICHTER, 1965). Konkrete Angaben über das derzeitige Ausmaß der Erosion und der hiermit zusammenhängenden Schäden liegen mit Ausnahme ausgewählter Testgebiete nicht vor.

1.3 Erosionsschutz

Maßnahmen zur Erosionsminderung liegen trotz der genannten nachteiligen Auswirkungen vielfach nicht im ökonomischen Interesse der Landwirte. Wie bereits erwähnt, fallen die Schäden bei kurzfristiger Betrachtung - beispielsweise im Verlauf eines Wirtschaftsjahres - nicht besonders ins Gewicht. Langfristige Schäden und die außerhalb der Ackerfläche liegenden Wirkungen der Erosion (Off-site-Schäden) gehen in die betriebliche Wirtschaftlichkeitsrechnung nicht ein. Erosionsschutzmaßnahmen rentieren sich daher für den Landwirt zu meist nicht (THEURER, 1985).

Der Erosionsschutz muß daher vor allem unter dem Gesichtspunkt der langfristigen Erhaltung der Ressource Boden und der Vermeidung von Off-site-Schäden gesehen werden - unabhängig von kurzfristigen wirtschaftlichen Erwägungen.

Verbindliche gesetzliche oder administrative Vorgaben, wie sie für andere Bereiche des Umweltschutzes seit langem gelten (z.B. TA Luft), gibt es bisher für den Erosionsschutz nicht. Spezifische Vorschriften, die die Erosion mindern oder vermeiden könnten - z.B. Vorschriften zur Bewirtschaftung, Nutzungseinschränkungen für besonders gefährdete Standorte etc. - fehlen bislang. Es ist daher zu erwarten, daß die

Erosionsschäden in der Bundesrepublik Deutschland weiter zunehmen werden, zumal der Anbau spätdeckender Pflanzenarten, wie Mais oder Rüben, stetig zunimmt

und die bewirtschafteten Flächeneinheiten immer größer werden (vgl. Drucksache 10/949 des DEUTSCHEN BUNDESTAGES).

2. Kenntnisstand und Ziel der Arbeit

2.1 Übersicht

Zur Erosion landwirtschaftlicher Nutzflächen liegt ein umfangreiches, kaum überschaubares Schrifttum vor. In Anlehnung an ein Gliederungsschema von AHNERT (1981) lassen sich im wesentlichen folgende Forschungsansätze unterscheiden:

- Kontemporäre Forschung bezieht sich auf die unmittelbare Beobachtung und ggf. meßtechnische oder kartographische Erfassung der Formen und Vorgänge, die die Erosion unter bestimmten boden- und nutzungsabhängigen Randbedingungen kennzeichnen (z.B. RICHTER, 1979; SEILER, 1983; DIKAU, 1986). Eines der größten Probleme liegt hierbei darin, daß die für die Erosion maßgeblichen Einflußgrößen im Freiland einer isolierten Betrachtung nur in sehr begrenztem Maße zugänglich sind. Es wird daher vermehrt experimentelle Forschung betrieben, um zu grundlegenden, verallgemeinerbaren Erkenntnissen zu gelangen (z.B. SCHMIDT, 1988). Zunehmend zielen experimentelle Untersuchungen darauf ab, die notwendigen Daten für Erosionsmodelle (s. prospektive Forschung) zu erheben und die Modelle anhand gemessener Daten zu verifizieren (z.B. SCHRAMM, 1992; ASTALOSCH, 1990).
- Retrospektive Forschung bezieht sich auf die Rekonstruktion der Erosionsvorgänge für einen zurückliegenden Zeitraum anhand von erhalten gebliebenen Oberflächenformen und Sedimenten oder historischen Quellen (z.B. BORK, 1988).
- Prospektive Forschung bezieht sich auf Vorhersagen über den Verlauf und das Ausmaß von Erosionsvorgängen unter

tatsächlichen oder fiktiven Randbedingungen als Beitrag zu Planungsentscheidungen oder als Grundlage für Vorsorge- bzw. Schutzmaßnahmen. Aufgrund der Vielzahl der hierbei zu berücksichtigenden Einflußgrößen können gesicherte Prognosen nur über die Entwicklung und Anwendung empirischer oder physikalisch begründeter Simulationsmodelle erreicht werden.

Die Entwicklung und Überprüfung eines derartigen Modells ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Auf bereits vorhandene Modellansätze soll daher im folgenden näher eingegangen werden.

2.2 Empirische Simulationsmodelle

Die Mehrzahl der gegenwärtig verfügbaren Erosionsmodelle basiert auf der statistischen Auswertung von Testflächenmessungen. Der am weitesten verbreitete Ansatz dieser Art ist die USLE (Universal Soil Loss Equation) von WISCHMEIER & SMITH (1965).

Die USLE beschreibt den mittleren jährlichen Bodenabtrag a als das Produkt mehrerer korrelativ ermittelter Faktoren:

$$a = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Diese Faktoren kennzeichnen:

- R-Faktor: die erodierende Wirksamkeit des Niederschlages
- K-Faktor: die Erodierbarkeit des Bodens unter standardisierten Bedingungen (Parzellenlänge = 22.6 m, Neigung = 9%, Schwarzbrache)

- LS-Faktor: die Veränderung des Bodenabtrages bei von den Standardbedingungen abweichender Hanglänge und Neigung
- C-Faktor: den erosionsmindernden Einfluß verschiedener Kulturpflanzen und Bearbeitungsverfahren gegenüber Schwarzerdbecke
- P-Faktor: die erosionsmindernde Wirkung von Schutzmaßnahmen, z.B. Konturpflügen, Grasstreifen, Terrassen etc. (vgl. HARTGE, 1978, S. 327/328)

Zur Bestimmung des R-Faktors wird zunächst für jeden erosiven Einzelniederschlag das Produkt aus der kinetischen Energie E_{kin} und der maximalen 30-Minuten-Intensität I_{30} berechnet:

$$EI_{30} = E_{kin} \cdot I_{30} \quad (2)$$

Die kinetische Energie E_{kin} (in Joule/m²) kann hierbei gemäß Gl. 3 abgeschätzt werden aus der Intensität der Einzelniederschläge I (in mm/h) und der Regenmenge N (in mm):

$$E_{kin} = \sum_{i=1}^n (11.89 + 8.73 \cdot \log I_i) \cdot N_i \quad (3)$$

Dazu wird der Niederschlag in beliebig viele (n) Teilabschnitte (i) mit annähernd konstanter Intensität (I_i) zerlegt und die zu jedem Teilabschnitt gehörende Niederschlagsmenge (N_i) ermittelt. Die kinetische Energie (E_{kin}) des gesamten Regens ergibt sich dann aus der Summe der Teilabschnitte (SCHWERTMANN u.a., 1990, S. 14; Gl. 3 aus DIKAU, 1986, S. 16).

Die Summe der EI_{30} -Werte aller erosionswirksamen Einzelereignisse eines Jahres ergibt den R-Faktor, bezogen auf ein einzelnes Jahr. Gemittelt über einen längeren Zeitraum (mehrere Jahrzehnte) erhält man aus den R-Faktoren der Einzeljahre den mittleren jährlichen R-Faktor, aus dem schließlich nach Einsetzen in Gl. 1 der mittlere jährliche Bodenabtrag errechnet werden kann. Die übrigen in Gl. 1 enthaltenen Faktoren können hierbei unmittelbar

aus Nomogrammen oder Tabellen abgelesen werden.

Das Gewicht, mit dem die Faktoren in Gl. 1 eingehen, wird bereits bei der Definition der Faktoren selbst festgelegt. Die wesentlichsten Informationen, die die USLE beinhaltet, stecken daher in der Definition der Faktoren bzw. in den Nomogrammen, aus denen die Faktorenwerte abgeleitet werden (DETLING, 1989, S. 88). Die USLE und ihre diversen modifizierten Versionen (MUSLE, ABAG) sind Gegenstand z.T. heftiger Kritik. Dennoch ist die USLE vor allem wegen der Einfachheit ihrer Anwendung der gegenwärtig am weitesten verbreitete, praktisch einsetzbare Modellansatz zur Vorhersage der Erosion.

Die Kritik richtet sich vor allem auf die eingeschränkte Übertragbarkeit der USLE. Rein empirische Modelle sind stets von dem Datenkollektiv abhängig, aus dem sie hergeleitet wurden. Sie sind deshalb nicht allgemein gültig. Die Anwendung der USLE ist daher außerhalb der Vereinigten Staaten, wo sie ursprünglich entwickelt wurde, außerordentlich problematisch (BORK, 1988, S. 166). In jedem Fall müssen die in die Gleichung eingehenden Faktoren zunächst an die regionalen Klima- und Bodenbedingungen angepaßt werden (vgl. SCHWERTMANN et al., 1990).

Weitere Kritikpunkte an der USLE sind:

- Der Definitionsbereich der USLE ist eingeschränkt auf: "... 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 beginnt ... " (SCHWERTMANN et al., 1990, S.29). Die USLE liefert daher keine Angaben zur Deposition des abgetragenen Bodenmaterials (Ort, Menge und Kornverteilung) am Hangfuß bzw. über den Eintrag in das Gewässernetz.
- Die USLE eignet sich nicht zur Abschätzung des Abtrages individueller Erosionsereignisse (FOSTER et al., 1985)

und ist daher für die Planung und Bemessung von Erosionsschutzmaßnahmen wenig geeignet.

- Die Gleichung ist nicht auf beliebig kleine, homogene Kompartimente anwendbar (DETLING, 1989, S. 121). Die Einflüsse des Reliefs, der Bedeckung etc. können daher im Falle in sich differenzierter Hangausschnitte nicht adäquat berücksichtigt werden.

Generell ist gegen rein empirische Modelle wie die USLE einzuwenden, daß sie nur in sehr begrenztem Maße zum Verständnis des komplexen Zusammenwirkens der beteiligten Teilvorgänge beitragen.

2.3 Physikalisch begründete Modelle

Aufgrund der Unzulänglichkeiten der rein empirischen Ansätze hat man begonnen, stärker prozeßorientierte, physikalisch begründete Erosionsmodelle zu entwickeln. In Anbetracht der zunehmenden Bedeutung der Off-site-Schäden sollen diese Modelle über die Quantifizierung des flächenbezogenen Bodenverlustes hinaus auch eine Abschätzung der durch den Eintrag von Feststoffen und Schadstoffen bedingten Gewässerbelastung ermöglichen. Das in dieser Hinsicht umfassendste derzeit verfügbare Modell ist CREAMS (A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems).

CREAMS berechnet den Feststoffaustrag und die Deposition bezogen auf Einzelergebnisse. Das Modell besteht aus drei eigenständigen Submodellen: einem Hydrologiemodell, einem Erosionsmodell und einem Nährstoff- und Pestizidmodell. Hierbei greifen die beiden zuletzt genannten Submodelle jeweils auf die berechneten Daten des vorhergehenden Submodells zurück.

Das Erosionssubmodell unterscheidet zwei Teilprozesse, die den Bodenabtrag steuern:

1. die Loslösung der Bodenpartikel von der Bodenoberfläche und
2. den Transport der Partikel durch die oberflächenparallele Strömung.

Die Loslösung der Bodenpartikel wird mit einer modifizierten Form der USLE getrennt für Zwischenrillen und Rillen berechnet. Hierbei ist die Zwischenrillenerosion abhängig von der Erosivität der Niederschläge EI_{30} , und die Rillenerosion ist abhängig von der Abflußrate q sowie von der Hanglänge x . In die Ansätze für die Rillen- und Zwischenrillenerosion (Gl. 4 bzw. 5) gehen darüberhinaus die aus der USLE bekannten Faktoren K , C und P sowie die Hangneigung α ein:

$$Y_{IR} = 0.210 \cdot EI_{30} \cdot (\sin \alpha + 0.014) \cdot K \cdot C \cdot P \cdot \left(\frac{q_{pk}}{Q} \right) \quad (4)$$

$$Y_R = 37983 \cdot m \cdot q_{pk}^{4/3} \cdot \left(\frac{x}{76.2} \right)^{m-1} \cdot (\sin \alpha)^2 \cdot K \cdot C \cdot P \quad (5)$$

Soweit noch nicht erläutert bedeuten: q_{pk} Spitzenabflußrate, Q Abflußvolumen, m dimensionsloser Hanglängenexponent. (Größen in amerikanischen Einheiten!)

Die Berechnung der Transportkapazität ($q_{s,max}$) der oberflächenparallelen Strömung basiert auf einem Ansatz von YALIN (1963). Die Erläuterung dieses Ansatzes im CREAMS- Handbuch (KNISEL, 1980) ist physikalisch nur bedingt nachvollziehbar. Die nachfolgenden Gleichungen wurden daher unmittelbar der Originalliteratur entnommen.

YALIN beschreibt die Transportkapazität $q_{s,max}$ (s. Gl. 6) als Funktion des dimensionslosen Transportkoeffizienten P_s , der Dichte der Partikel ρ_p und der Flüssigkeit ρ_q , dem Partikeldurchmesser D sowie der Schubspannungsgeschwindigkeit v_* . Die Schubspannungsgeschwindigkeit v_* leitet sich gemäß Gl. 7 ab aus der Erdbeschleunigung g , dem Gefälle S und der Schichtdicke des Abflusses δ :

$$q_{s,max} = P_s \cdot (\rho_p - \rho_q) \cdot D \cdot v_* \quad (6)$$

$$v_* = \sqrt{g \cdot S \cdot \delta} \quad (7)$$

Der in Gl. 6 enthaltene dimensionslose Transportkoeffizient P_s ist definiert als:

$$P_s = 0.635 \cdot s \cdot \left[1 - \frac{1}{\sigma} \cdot \log(1 + \sigma) \right] \quad (8)$$

Die hierin enthaltene Konstante 0.635 ist empirisch bestimmt; s und σ sind weitere dimensionslose Kenngrößen. Hierfür gelten:

$$s = \frac{Y}{Y_{crit}} - 1 \quad (9)$$

$$\sigma = 2.45 \cdot \left(\frac{\rho_q}{\rho_p} \right)^{0.4} \cdot \sqrt{Y_{crit}} \cdot s \quad (10)$$

$$\text{mit } Y = \frac{\rho_q \cdot v_*^2}{(\rho_p - \rho_q) \cdot g \cdot D} \quad (11)$$

Y_{crit} kennzeichnet die kritische dimensionslose Schubspannung, bei der in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl der Partikel ($X = (D \cdot v_*)/\nu$) die Erosion einsetzt. Y_{crit} muß experimentell ermittelt oder aus vorhandenen Daten (s. SHIELDS-Diagramm) abgeschätzt werden.

Gl. 6 gilt in der hier angegebenen Form nur für Gleichkorn-Sedimente. In CREAMS werden die unterschiedlichen Partikelgrößen eines Korngemisches dadurch berücksichtigt, daß jeder Partikelklasse (insgesamt 5) in Abhängigkeit von der Größe der Partikel und ihrem spezifischen Gewicht ein bestimmter Anteil an der Transportkapazität zugewiesen wird. Ist in einer der Partikelklassen die anteilige Transportkapazität größer als die in dieser Klasse tatsächlich transportierte Sedimentmenge und gleichzeitig in einer anderen Klasse ein Sedimentüberschuß vorhanden, so wird die überschüssige Transportkapazität der ersten Klasse der zweiten Klasse zugeordnet. Der Anteil der zweiten Partikelklasse an der verfügbaren Transportkapazität kann damit relativ zu dem Anteil der übrigen Klassen erhöht werden (vgl. ASTALOSCH, 1990).

Ablösung und Transport der Partikel werden segmentweise berechnet - vom höchsten Punkt des Hanges bis zum Hangfuß.

Für den Austrag aus einem Segment sind hierbei maßgebend:

- der Eintrag in das Segment mit dem Zu-
strom von oberhalb
- die innerhalb des Segmentes je Zeitein-
heit und Flächeneinheit abgelöste Sedi-
mentmenge (abhängig von der Erosivität
der Niederschläge, von der Abflußrate
und spezifischen Erodierbarkeit des Bo-
dens)
- die Transportkapazität.

Hierbei kann in einem Segment stets nur soviel Boden abgelöst werden, wie bei Transportkapazität auch abtransportiert werden kann. Ist bereits der Eintrag in das Segment (= potentielle Transportrate) größer als die Transportkapazität, kommt es innerhalb des Segmentes zur Ablagerung des die Transportkapazität übersteigenden Anteils. Die flächenbezogene Depositionsrate γ_D ergibt sich hierbei gemäß:

$$\gamma_D = \varepsilon \cdot \frac{v_p}{q} \cdot (q_{s,max} - q_s) \quad (12)$$

Hierin ist ε ein dimensionsloser, empirisch abgeleiteter Koeffizient, v_p die Sinkgeschwindigkeit der Partikel, q die Abflußrate, $q_{s,max}$ die Transportkapazität und q_s die potentielle Transportrate.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten der Partikel (abhängig vom Durchmesser und von der Dichte, s. Gl. 32 in 3.2.2) berechnet CREAMS die Kornverteilung des transportierten Sedimentes neu, sobald es in einem der Segmente zu Ablagerungen kommt.

Die Vorteile des CREAMS-Modells liegen vor allem in der Möglichkeit, das Erosionsgeschehen zeitlich und örtlich zu differenzieren und in der Berücksichtigung der Deposition. Darüberhinaus liefert CREAMS Angaben über die Korngrößenverteilung des ausgetragenen Sedimentes.

Einschränkungen ergeben sich dagegen aus der Verwendung von Elementen der USLE (s. 2.2). Kritisch zu bewerten ist darüber hinaus die Heranziehung der YALIN-Gleichung zur Beschreibung der Transportkapazität. Die experimentellen Untersuchungen, die zu dieser Gleichung führten, wurden unter Flußbettbedingungen an Gleichkornsedimenten durchgeführt. Es ist zweifelhaft, ob die YALIN-Gleichung auf die spezifischen Bedingungen des Stofftransportes bei inhomogenen Ausgangssubstraten durch im wesentlichen flächenhafte Abflüsse übertragbar ist (ASTALOSCH, 1990, S.60).

Hierbei ist vor allem zu berücksichtigen, daß die hydraulischen Eigenschaften der Abflüsse bei geringer Fließtiefe in sehr viel stärkerem Maße durch die Einwirkung der Niederschläge beeinflusst werden als dies bei größerer Wassertiefe der Fall ist (YOON & WENZEL, 1971; KISISSEL, et al., 1971). Die Einwirkung der Tropfen vergrößert insbesondere die Fähigkeit des Abflusses, Sediment zu transportieren (SCHMIDT, 1988). Dieser Effekt geht in die YALIN-Gleichung nicht ein (GUY & DICKINSON, 1990).

Ein dem CREAMS-Modell vergleichbarer Ansatz zur Beschreibung der Erosion wird in WEPP (Water Erosion Prediction Project) verfolgt. WEPP (FOSTER & LANE, 1987; LANE & NEARING, 1989; FLANAGAN, 1990) befindet sich gegenwärtig noch in der Test- bzw. Entwicklungsphase. Im Unterschied zu CREAMS greift dieses Modell nicht mehr auf USLE-Elemente zurück.

Das WEPP-Modell erlaubt sowohl eine auf individuelle Einzelereignisse bezogene Abschätzung der Erosion als auch eine Prognose über einen längeren Zeitraum (mehrere Jahre). Das Verhalten der für die Erosion maßgeblichen Größen (Pflanzenbedeckung, Erosionswiderstand, Bodenfeuchte etc.) wird hierbei kontinuierlich abgebildet, einschließlich der zwischen den erosionswirksamen Einzelereignissen liegenden

Zeitabschnitte. Die Anfangs- und Randbedingungen müssen daher nur einmal zu Beginn der Simulation eingegeben werden. Die saisonalen Änderungen der Anfangs- und Randbedingungen berechnet das Modell dann selbst. Auch die Klimaparameter Niederschlag, Temperatur und Strahlung können über eine spezifische Komponente des Modells automatisch generiert werden.

Das hydrologische Teilmodell von WEPP beschreibt die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluß (ebenso wie CREAMS) auf der Basis eines modifizierten GREEN & AMPT-Ansatzes (s. 3.2.1). Der Niederschlagsüberschuß wird aufgeteilt in Schicht- und Rillenabfluß, sodaß ähnlich wie in CREAMS zwischen Rillen- und Zwischenrillenerosion unterschieden werden kann.

Zur Berechnung des Abflusses in den Rillen Q_e wird folgende Gleichung zugrundegelegt:

$$Q_e = P_r \cdot L \cdot R_s \quad (13)$$

Hierin bedeuten: P_r die Abflußspende, L die Hanglänge und R_s der mittlere Rillenabstand. R_s muß aufgrund von Erfahrungswerten geschätzt werden.

Die Rillenbreite w wird in Abhängigkeit vom Abfluß Q_e nach folgender Gleichung bestimmt:

$$w = c \cdot Q_e^d \quad (14)$$

Die Parameter c und d sind empirisch ermittelt und besitzen selbst keine physikalische Bedeutung.

Die Ablösung der Bodenpartikel durch die Rillenströmung wird ausgedrückt durch:

$$D_c = k_r \cdot (\tau_f - \tau_c) \quad (15)$$

Hierin bedeuten: D_c die Ablösungskapazität der Strömung, k_r die spezifische Erodierbarkeit des Rillenbodens, τ_f die durch die Rillenströmung auf die Bodenpartikel ausgeübte Scherspannung und τ_c der kritische

Scherwiderstand des Bodens.

Die Scherspannung τ_f wird gemäß Gl. 16 abgeleitet aus dem spezifischen Gewicht von Wasser γ ($\gamma = \rho \cdot g$), dem mittleren Gefälle \bar{S} und dem hydraulischen Radius R .

$$\tau_f = \gamma \cdot \bar{S} \cdot R \cdot (f_s/f_t) \quad (16)$$

Für den Fall, daß der Boden durch Pflanzen o.ä. bedeckt ist, wird durch den Quotienten f_s/f_t berücksichtigt, daß ein Teil der Scherspannung durch im Strömungsquerschnitt liegende Pflanzenteile etc. aufgezehrt wird.

Unter Berücksichtigung der Auslastung der Strömung, gegeben durch das Verhältnis der Sedimentmenge G (s.u.) zur Transportkapazität T_c , ergibt sich der Nettoaustrag D_f in den Rillen gemäß:

$$D_f = D_c \cdot \left[1 - \frac{G}{T_c} \right] \quad (17)$$

Unabhängig von der Ablösungskapazität der Strömung (D_c) ist der Nettoaustrag gleich Null, sobald die durch die Strömung mitgeführte Sedimentmenge (G) der Transportkapazität (T_c) entspricht. Zur Bestimmung der Transportkapazität T_c wird im übrigen (ebenso wie bei CREAMS) eine modifizierte Version der YALIN-Gleichung herangezogen.

Der Austrag aus den Zwischenrillenbereichen wird gemäß Gl. 18 abgeleitet aus: der spezifischen Erodierbarkeit K_i der Zwischenrillenbereiche, der Niederschlagsintensität I_e^2 , den Koeffizienten C_e und G_e (zur Kennzeichnung des Einflusses der Pflanzen- bzw. Bodenbedeckung), des Rillenabstandes R_s und der Rillenbreite w .

$$D_i = K_i \cdot I_e^2 \cdot C_e \cdot G_e \cdot \left(\frac{R_s}{w} \right) \quad (18)$$

Der Gesamtaustrag ergibt sich dann durch Addition der Beiträge aus den Rillen- (D_f)

und den Zwischenrillenbereichen (D_i).

Zu Deposition kommt es, wenn die Sedimentmenge $G_s = (D_f + D_i) \cdot x$ (x = Hanglänge) die Transportkapazität T_c der Rillenströmung übersteigt. Dieser Fall wird beschrieben durch:

$$D_f = \frac{V_f}{q} \cdot (T_c - G) \quad (19)$$

Hierin bedeuten: V_f die Fallgeschwindigkeit der in der Strömung suspendierten Sedimentteilchen und q der auf die Hangbreite bezogene Abfluß. Die übrigen Größen wurden bereits erläutert.

WEPP ist in der Lage, über die hier zusammenfassend dargestellten Zusammenhänge hinaus, das Verhalten zahlreicher, für die Erosion maßgeblicher Kenngrößen über einen größeren Zeitraum hinweg kontinuierlich abzubilden (s.o.). Dies bedingt u.a. eine wesentlich umfassendere Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes. Das Modell schließt aus diesen Gründen weitere Modellansätze ein - etwa zur Beschreibung des Pflanzenwachstums, der Evaporation, des Dränabflusses und der Schneeschmelze. Damit steigt allerdings auch der Bedarf an Daten, die dem Modell zunächst eingegeben werden müssen. Dieser Umstand schränkt die Anwendung des Modells in der Praxis sehr stark ein. Diesem Nachteil, der - wenn auch nicht in gleichem Maße - auch für andere physikalisch begründete Ansätze zutrifft, steht jedoch der Vorteil gegenüber, daß das Modell ohne umfangreiche Anpassungen auf andere Bedingungen übertragbar ist.

Neben den hier genannten Erosionsmodellen existieren zahlreiche weitere Ansätze, die sich jedoch alle nur sehr begrenzt in der Praxis haben durchsetzen können (s. Tab. 1). Da sie den zuvor beschriebenen Modellen teilweise stark ähneln, wird hier auf eine detaillierte Beschreibung dieser Ansätze verzichtet. (Tab. 1 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.)

Tab. 1: Übersicht über Bodenerosionsmodelle

Bezeichnung	Entwickler	räumlicher Bezug	zeitlicher Bezug
rein empirische Ansätze:			
USLE	WISCHMEIER & SMITH 1965	Hang (ungegliedert)	Jahr (langj. Mittel)
MUSLE 87	HENSEL & BORK 1988	Einzugsgebiet (gegliedert)	Jahr (langj. Mittel)
physikalisch begründete Ansätze:			
CREAMS	KNISEL 1980	Hang (gegliedert)	Einzelereignis
OPUS	SMITH 1988	Hang (ungegliedert)	Einzelereignis
ANSWERS	BEASLEY & HUGGINS 1981	Einzugsgebiet (gegliedert)	Einzelereignis
WEPP	LANE & NEARING 1989	Hang (gegliedert), Einzugsgebiets- version in Arbeit	Einzelereignis, Langzeit- simulation
KINEROS/ EUROSEM	WOOLHISER, et. al. 1990/ MORGAN 1992	Einzugsgebiet (gegliedert)	Einzelereignis
EROSION 2D/3D	SCHMIDT 1991 v.WERNER	Hang (gegliedert)	Einzelereignis (zu Sequenzen verknüpfbar)

2.4 Ziel der Arbeit

Im Hinblick auf die Vermeidung bzw. Verminderung von Erosionsschäden wird vor allem von den landwirtschaftlichen Einzelbetrieben eine stärker auf den Erosionsschutz ausgerichtete Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Nutzfläche erwartet (WEIMAR, 1989). Aber auch im Zusammenhang mit staatlichen Planungsentscheidungen - z.B. bei Maßnahmen der Flurberreinigung - sind Gesichtspunkte des Erosionsschutzes stärker als bisher zu berücksichtigen.

Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist, daß das Erosionsrisiko und die Wirksamkeit alternativer Maßnahmen zum Erosionsschutz unter den gegenwärtigen oder ge-

planten Rahmenbedingungen hinreichend genau abgeschätzt werden können. Aufgrund der Vielzahl der hierbei zu berücksichtigen Einzeleinflüsse ist dies nur mit Hilfe computergestützter, mathematischer Modelle möglich.

Es ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, ein solches auf die Planungspraxis und Beratung abgestelltes Prognosemodell zu entwickeln.

Dieses Modell soll auf der Grundlage der für die Erosion maßgeblichen Einzeleinflüsse die Folgewirkungen äußerer Eingriffe abbilden können und damit die Informationen bereitstellen, die notwendig sind, um Erosionsrisiken abzuschätzen und ggf. zu minimieren.

Hieran knüpfen sich folgende Forderungen:

- Es sind zumeist nur wenige Einzelereignisse, die für die Erosionsschäden im Verlauf eines Jahres maßgeblich sind. Die Einflußgrößen, denen die Erosion hierbei unterliegt, variieren in Abhängigkeit von der Bearbeitung, der Pflanzenbedeckung, dem Witterungsverlauf usw. . Die modellhafte Beschreibung der Erosionsvorgänge sollte daher stets auf der Basis individueller Einzelereignisse erfolgen. Dies ist auch deshalb sinnvoll, weil für die Abschätzung der Risiken und für die Bemessung von Schutzmaßnahmen vor allem die Extremsituationen von Interesse sind. Die mittleren Verhältnisse, wie sie etwa durch die USLE beschrieben werden, sind in diesem Zusammenhang weniger relevant.
- Schäden durch Erosion entstehen sowohl durch die Abfuhr wie auch durch die Ablagerung des erodierten Bodenmaterials an anderer Stelle. Das Prognosemodell sollte daher in der Lage sein, neben der Erosion auch die Deposition des erodierten Bodenmaterials und den Eintrag in Oberflächengewässer zu quantifizieren und soweit wie möglich zu lokalisieren.
- Das Transport- und Sedimentationsverhalten der Bodenpartikel ist korngößenabhängig. Aufgrund ihrer geringen Sinkgeschwindigkeit reichern sich die feinen Anteile des erodierten Bodenmaterials -

insbesondere Ton und Schluff - im oberflächlichen Abfluß an und werden daher bevorzugt in die Vorfluter eingetragen, während die gröberen Anteile bei Nachlassen der Strömungsgeschwindigkeit am Hangfuß als Kolluvium abgelagert werden. Als Träger von Schadstoffen (Nährstoffe, Schwermetalle, Pestizide etc.) kommt den Ton- und Schluffpartikeln (aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche) besonders große Bedeutung zu. Die Kenntnis des Anreicherungsverhältnisses ist daher insbesondere im Zusammenhang mit der Abschätzung des Stofftransportes unerlässlich.

- Für Entscheidungen auf Planungsebene werden häufig auch langfristige Prognosen der Erosion verlangt. Hierbei sind die erosions- bzw. depositionsbedingten Änderungen der Geländeoberfläche (einschließlich der hiermit verbundenen Rückkopplungseffekte) angemessen zu berücksichtigen.
- Meist sind die existenten Modelle nur mit Einschränkungen in der Planungspraxis einsetzbar, da die geforderten Informationen über Kenngrößen oft nicht vorliegen. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, die Zahl der Eingabegrößen und den Aufwand zu ihrer Bestimmung so gering wie möglich zu halten.
- Das Modell sollte physikalisch begründet und damit übertragbar sein.

3. Grundlagen

3.1 Größen und Einheiten

Zur Quantifizierung der Erosion werden unterschiedliche Größen herangezogen. Die Verwendung der verschiedenen Begriffe ist nicht immer einheitlich. Um Mißverständnissen vorzubeugen, sind die in dieser Arbeit verwendeten Größen und Einheiten nachfolgend tabellarisch zusammengestellt (Tab. 2).

Diese Größen stehen untereinander in folgender Beziehung:

$$\begin{aligned} \text{Massenstrom} &= \text{Konzentration} \times \text{Abfluß} \\ \text{Austrag} &= \text{Massenstrom}/\text{Hanglänge} \\ \text{Abtrag} &= \text{Austrag}/\text{Lagerungsdichte} \end{aligned}$$

(Abfluß in $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$, Lagerungsdichte in kg/m^3).

Die kumulativen Größen ergeben sich aus

Tab. 2: Größen und Einheiten zur Quantifizierung der Erosion

Zeitl. bezogene Größen	Einheiten
Feststoffkonzentration	kg/m^3 oder m^3/m^3
Feststoffmassenstrom	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
Austrag	$\text{t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ oder $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Abtrag	m/a
Kumulative Größen	
(Kum.) Sedimentmenge	kg/m
(Kum.) Austrag	t/ha oder kg/m^2
(Kum.) Abtrag	m

den zeitlich bezogenen Größen durch Multiplikation mit der Zeit T (z.B. der Dauer eines Einzelereignisses).

3.2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel stellt eine Anzahl wichtiger Gesetzmäßigkeiten zusammen, die für die Modellbildung und -anwendung von Bedeutung sind.

Der erste Abschnitt behandelt die für das Auftreten von oberflächlich abfließendem Wasser maßgeblichen hydrologischen Kenngrößen und Prozesse. Im zweiten Abschnitt werden die hydraulischen Bedingungen beschrieben, unter denen Bodenpartikel von der überströmten Oberfläche abgelöst, transportiert und schließlich wieder abgelagert werden.

3.2.1 Hydrologische Kenngrößen

Zu Beginn eines Niederschlages wird zunächst ein Teil des Niederschlagswassers in der Pflanzendecke zurückgehalten (Interzeption). Dieser Teil verdunstet oder wird von den Pflanzen absorbiert. Im Hinblick auf erosionswirksame Abflußprozesse ist der Interzeptionsverlust allerdings meist vernachlässigbar, da in aller Regel eine geschlossene Pflanzendecke fehlt. Das Rück-

haltevermögen der Pflanzen ist bei den für die Erosion maßgebenden hohen Niederschlagsintensitäten schnell erschöpft.

Der Niederschlag benetzt und durchdringt schließlich die Bodenoberfläche (Infiltration). Übersteigt hierbei der je Zeit- und Flächeneinheit zugeführte Niederschlag die Infiltrationsrate, sammelt sich der nicht infiltrierende Niederschlagsanteil zunächst in Unebenheiten der Geländeoberfläche an (Muldenrückhalt). Erst nachdem diese Unebenheiten aufgefüllt sind, erreicht der oberflächliche Abfluß sein maximales Ausmaß. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 1 anhand des experimentell ermittelten Verlaufs der Abflußrate bei konstanter Niederschlagsintensität und konstanter Infiltrationsrate dargestellt.

Entscheidenden Einfluß auf den oberflächlichen Abfluß hat die Infiltrationsrate. An der Versickerung des Niederschlagswassers im Boden können grundsätzlich zwei physikalisch unterschiedliche Prozesse beteiligt sein, die in Abhängigkeit von der Bodenstruktur und der Intensität der Niederschläge in unterschiedlichem Maße zur Infiltration beitragen. Es sind dies:

- die Versickerung des Oberflächenwassers in den Makroporen (Wurmgänge, Schrumpfungsriffe etc.)
- die Aufnahme des Wassers durch die Bodenmatrix.

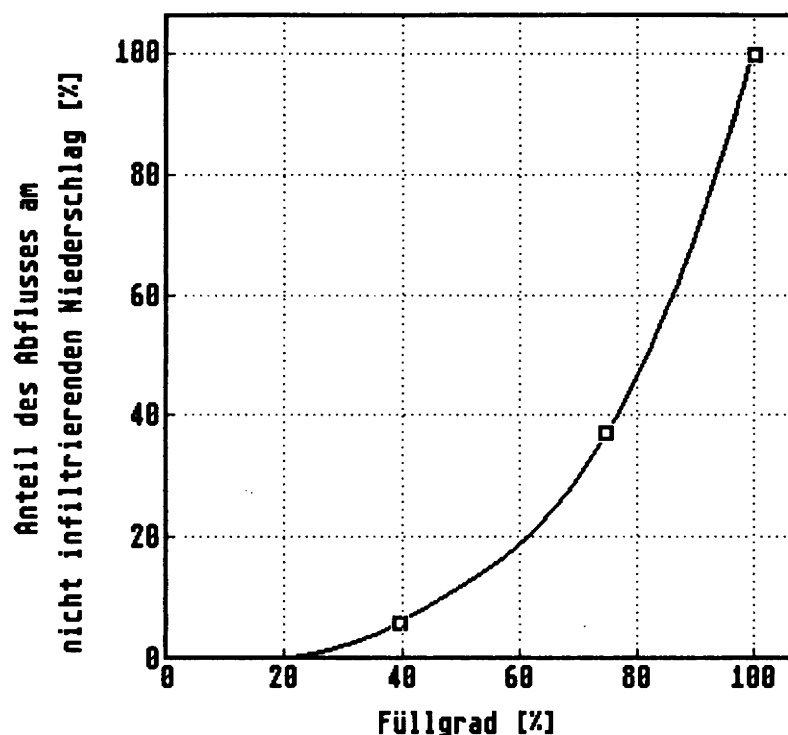


Abb. 1: Abhängigkeit des Abflusses vom Füllgrad bearbeitungsspezifischer Hohlformen bei gefällennormaler Bodenbearbeitung und 6% Hangneigung (aus: SCHMIDT, 1988, S. 67)

Die Durchströmung der Makroporen setzt voraus, daß die umgebende Bodenmatrix bereits annähernd gesättigt ist oder/und die Intensität der Niederschläge das Aufnahmevermögen der Matrix übersteigt. Makroporenfluß tritt daher in bedeutendem Umfang nur im Fall extrem starker Niederschläge auf (BRONSTERT, 1992). Da dies Situationen sind, die zu erheblichen oberflächlichen Abflüssen führen, ist die Größe des Makroporenflusses für das Ausmaß der Bodenerosion häufig von maßgeblicher Bedeutung. Aufgrund der Heterogenität der Makroporen sowie ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität ist jedoch der Makroporenanteil der Infiltrationsrate einer modellmäßigen Beschreibung kaum zugänglich (DIEKKRÜGER, 1992).

Für die Aufnahme des Wassers durch die Bodenmatrix sind die Schwerkraft, die kapillare Saugwirkung der Bodenporen und die

hydraulische Leitfähigkeit des Bodens maßgebend. Der Infiltrationsstrom i (ausgedrückt als Massenstrom, bezogen auf die Bodenoberfläche) kann in Abhängigkeit von der Zeit t unter Verwendung der Fließgleichung nach DARCY beschrieben werden durch:

$$i = q_{i,(z=0)}(t) = -k \cdot \frac{\Delta(\psi_m + \psi_g)}{x_f(t)} \quad (20)$$

Da $\psi_g/x_f(t) = g$, kann auch geschrieben werden:

$$i = -k \cdot \frac{\Delta \psi_m}{x_f(t)} - k \cdot g \quad (21)$$

Hierin bedeuten: k die hydraulische Leitfähigkeit, ψ_m das durch die Saugwirkung der Bodenporen bestimmte Matrixpotential, ψ_g das die Schwerkraftwirkung kennzeichnende Gravitationspotential, $x_f(t)$ die von der In-

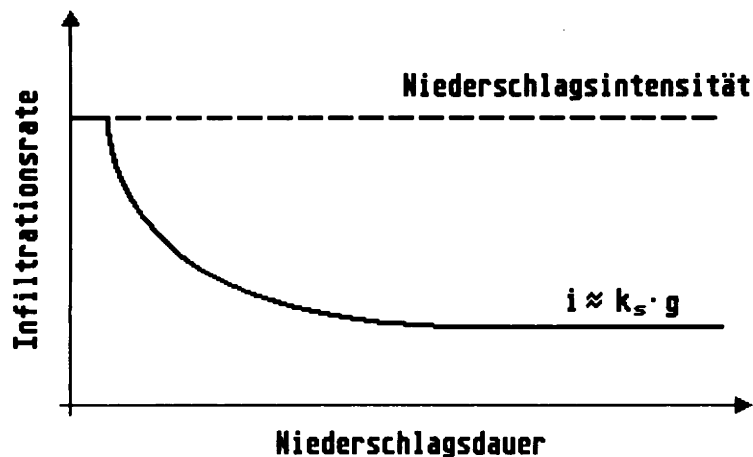


Abb. 2: Verlauf der Infiltrationsrate bei Beregnung eines ungesättigten Bodens

filtrationsdauer abhängige Eindringtiefe der Befeuchtungsfront und g die Erdbeschleunigung (zur Definition der Potentiale siehe HARTGE, 1978, S. 138 ff.).

Bei konstanter Wassernachlieferung nimmt die Infiltrationsrate folgenden, in Abb. 2 schematisch dargestellten Verlauf. Man erkennt, daß der auf die Bodenoberfläche treffende Niederschlag zunächst vollständig in den Boden eindringt ($i = r$). Bei anhaltendem Niederschlag nimmt dann die Infiltrationsrate mit der Regendauer exponentiell ab. Ursache hierfür ist die zunehmende Durchfeuchtung des Bodens bei gleichzeitig wachsender Eindringtiefe der Befeuchtungsfront. Hierdurch nimmt der für die hohen Infiltrationsraten zu Beginn der Beregnung maßgebliche Gradient des Matrixpotentials ($\text{grad } \psi_m = \Delta\psi_m / x_f(t)$) ab und erreicht bei hinreichend großer Niederschlagsintensität und -dauer schließlich vernachlässigbar kleine Werte. Die Infiltrationsrate i stellt sich dann auf den nahezu konstanten Wert der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s , multipliziert mit der Erdbeschleunigung g , ein.

Es ist vielfach versucht worden, das Verhalten der Infiltrationsrate (unter Vernachlässigung des Makroporenflusses) modellhaft zu beschreiben. Eine rein empirische

Gleichung wurde von KOSTIAKOV (1932) vorgeschlagen:

$$I = \gamma \cdot t^\alpha \quad (22)$$

Hierin bedeuten: I die kumulative Infiltration und t die Infiltrationsdauer. Die Parameter γ und α sind bodenabhängige Konstanten ohne physikalische Bedeutung. Die Integration dieser Gleichung führt auf folgenden Ausdruck für die Infiltrationsrate i (vgl. JURY, W.A. 1991, S. 130):

$$i = \alpha \cdot \gamma \cdot t^{\alpha-1} \quad (23)$$

Eine ebenfalls rein empirische Infiltrationsgleichung stammt von HORTON (1939):

$$i = i_f + (i_0 - i_f) \cdot \exp(-\beta t) \quad (24)$$

Hierin bedeuten: i_0 die Anfangsrate der Infiltration ($t = 0$) und i_f die konstante Endrate der Infiltration. Der Parameter β ist ein bodenspezifischer Wert, der den Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Zeit t kennzeichnet.

Den Versuch einer physikalisch annähernd exakten Beschreibung der Infiltration hat PHILIP (1957) unternommen:

$$i = \frac{1}{2} S \cdot t^{-\frac{1}{2}} + A_1 + \frac{3}{2} A_2 \cdot t^{\frac{1}{2}} + \dots \quad (25)$$

Die Gleichung enthält eine Reihe von Gliedern, von denen aber in der Regel nur die beiden ersten für näherungsweise Berechnungen herangezogen werden. Der im Anfangsglied enthaltene Parameter S wird als Sorptivität bezeichnet und beschreibt die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens (als Volumenstrom je Flächeneinheit) in Abhängigkeit vom Anfangswassergehalt $\Theta_0 \cdot A_1, A_2, \dots$ sind bodenabhängige Konstanten, die durch Infiltrationsversuche angepaßt werden müssen. Die übrigen Parameter wurden bereits erläutert.

Die von PHILIP abgeleitete Formel stellt eine Approximation der RICHARDS Gleichung dar:

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} = \frac{\delta [k \cdot (\delta \psi_m / \delta z)]}{\delta z} + \frac{\delta k}{\delta z} \quad (26)$$

Hierin bedeuten: Θ der Wassergehalt, t die Zeit, k die hydraulische Leitfähigkeit, ψ_m das durch die Saugwirkung der Bodenporen bestimmte Matrixpotential und z die Tiefe im Boden (vgl. HARTGE/HORN, 1991, S. 154). Bei der RICHARDS Gleichung handelt

es sich um eine partielle Differentialgleichung, die nur durch Näherungsverfahren gelöst werden kann.

Ein in Verbindung mit Erosionsmodellen (CREAMS, WEPP) häufig verwendeter Infiltrationsansatz geht auf GREEN & AMPT (1911) zurück. Diesem Ansatz liegt die vereinfachende Vorstellung zugrunde, daß das Niederschlagswasser kolbenförmig in den Boden eindringt und hierbei den verfügbaren Porenraum vollständig auffüllt (HARTGE, 1978). Diese Vorstellung entspricht nicht ganz der Beobachtung, wie Abb. 3 zeigt.

Dennoch wird (bei Beschränkung auf wasserüberstauten Boden und konstanter Anfangsbodenfeuchte) das Verhalten der Infiltrationsrate durch das GREEN & AMPT-Modell im wesentlichen zutreffend beschrieben. Deshalb wird dieser Ansatz auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Beschreibung der Infiltrationsrate herangezogen. Die formelmäßige Beschreibung des GREEN & AMPT-Ansatzes erfolgt deshalb erst unter 4.2.2.

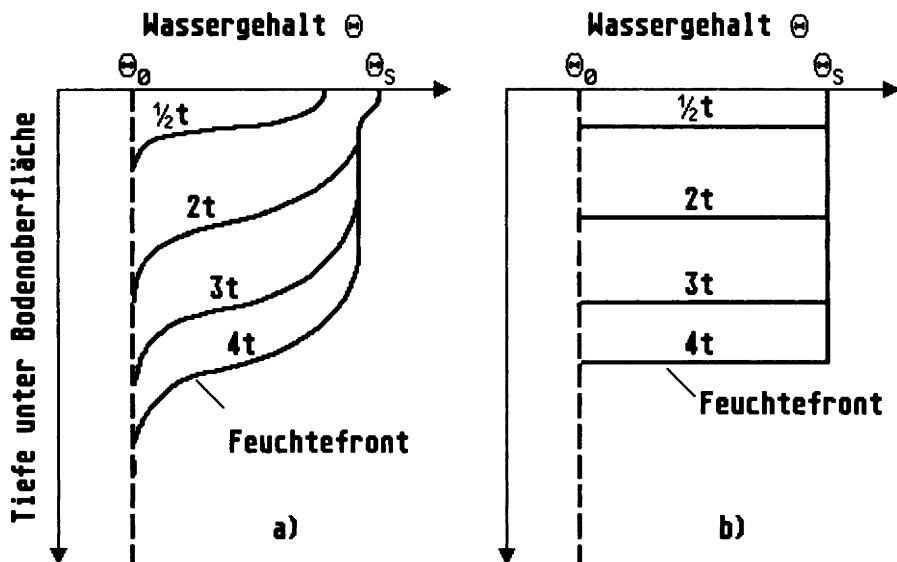


Abb. 3: Entwicklung des Feuchteprofils in einem homogenen, wasserüberstauten Boden bei konstantem Anfangswassergehalt: a) experimentell ermittelt, b) Modellvorstellung (aus DYCK & PESCHKE, 1983, S. 255, verändert)

3.2.2 Hydraulische Kenngrößen

Die Kenntnis der hydrologischen Kenngrößen - Niederschlag, Infiltration, Abfluß etc. - allein läßt noch keine Rückschlüsse auf das Ausmaß der Erosion zu. Es müssen darüberhinaus eine Anzahl hydraulischer Kenngrößen bekannt sein, die das Strömungsverhalten des oberflächlichen Abflusses und die Eigenschaften der überströmten Oberfläche näher kennzeichnen. Zur Erläuterung dieser Kenngrößen ist es sinnvoll, folgende Teilprozesse der Erosion zu unterscheiden:

- die Loslösung der Partikel von der Bodenoberfläche und
- der Transport der Partikel mit der oberflächenparallelen Strömung.

Loslösung der Partikel. Die Loslösung der Partikel von der Bodenoberfläche ist eine unmittelbare Folge der an den Bodenteilchen angreifenden Flüssigkeitskräfte, die bei der Überströmung der Bodenoberfläche und dem Aufprall der Tropfen freigesetzt werden. Übersteigen die Flüssigkeitskräfte den spezifischen Erosionswiderstand des Bodens, werden einzelne Bodenpartikel aus ihrer Ruhelage heraus beschleunigt und bei hinreichender Transportkapazität mit dem Abfluß verfrachtet.

Die durch die Strömung übertragenen Kräfte werden vor allem bestimmt durch die Geschwindigkeit und die Schichtdicke des oberflächlich abfließenden Wasserfilms. Zur Abschätzung dieser Größen werden häufig empirische Gleichungen herangezogen, die - da sie aus der wasserbaulichen Forschung stammen - streng genommen nur für den Abfluß in Gerinnen gelten.

Die am häufigsten verwendete Formel ist die sog. MANNING-Gleichung:

$$v_q = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

Diese Gleichung beschreibt die mittlere Geschwindigkeit v_q einer gleichförmigen, turbulenten Strömung als Funktion des Rau-

heitsbeiwertes n , des hydraulischen Radius R und des Gefälles S .

Bei vorwiegend flächenhaften Abflüssen ist die Tiefe der abfließenden Wasserschicht zumeist sehr viel kleiner als die Fließbreite. In diesem Fall entspricht der hydraulische Radius R näherungsweise der Schichtdicke des abfließenden Wasserfilms δ :

$$R \approx \delta \quad (28)$$

Sollen also vorwiegend flächenhafte Strömungsverhältnisse abgebildet werden, kann in Gl. 27 R durch δ ersetzt werden:

$$v_q = \frac{1}{n} \cdot \delta^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Die Filmdicke δ ist ihrerseits eine Funktion des Abflußvolumenstromes q und der Geschwindigkeit des Flüssigkeitsfilmes v_q :

$$\delta = q / v_q \quad (30)$$

Setzt man Gl. 29 in Gl. 30 ein, so erhält man für die Dicke des Flüssigkeitsfilmes:

$$\delta = \left(\frac{q \cdot n}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (31)$$

Die aus dem Aufprall der Tropfen resultierenden Flüssigkeitskräfte sind abhängig von der Masse der Tropfen (bzw. der Tropfengröße) und der Geschwindigkeit, mit der sie auf die Bodenoberfläche aufprallen. Beide Größen lassen sich unter Freilandbedingungen nur sehr schwer zuverlässig bestimmen. Man versucht daher, sie aus der Niederschlagsintensität abzuschätzen.

LAWS & PARSONS (1943) sowie HUDSON (1965) haben die Tropfengrößenverteilung der Niederschläge in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität experimentell untersucht. Die Ergebnisse von LAWS & PARSONS zeigt Abb. 4. Man erkennt, daß der mittlere Durchmesser der Tropfen (d_{50}) mit der Niederschlagsintensität exponentiell zunimmt.

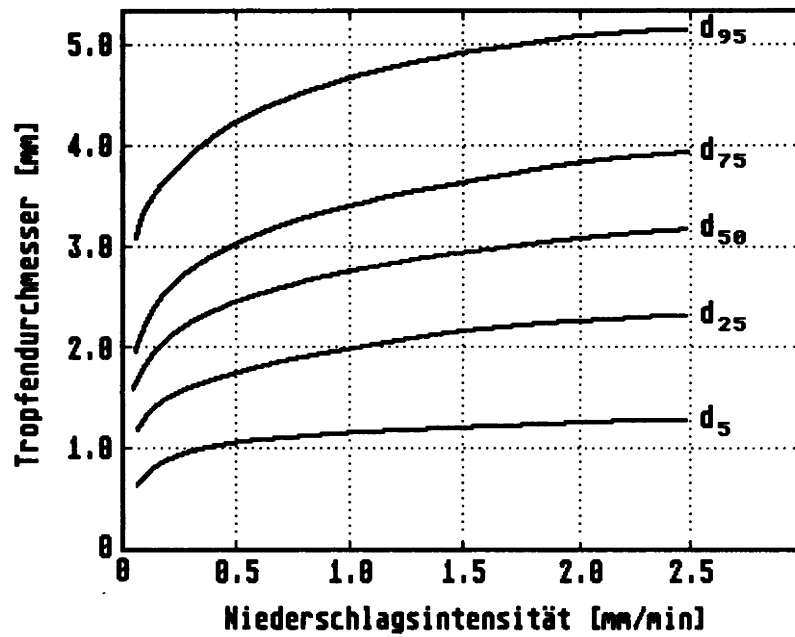


Abb. 4: Tropfengrößenverteilung natürlicher Niederschläge als Funktion der Niederschlagsintensität (aus WISCHMEIER & SMITH, 1958, S. 286 nach Daten von LAWS & PARSONS, 1943)

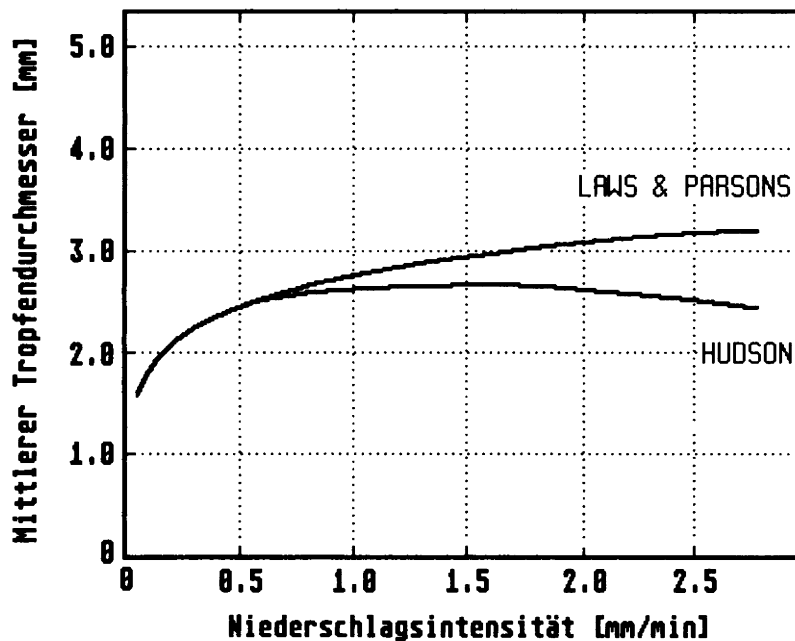


Abb. 5: Abhängigkeit des mittleren Tropfendurchmessers (d_{50}) von der Niederschlagsintensität (aus MORGAN, 1979, S. 18 nach Daten von HUDSON, 1965)

Bis zu einer Intensität von etwa 1mm/min stimmt dieser Verlauf gut mit der von HUDSON (Abb. 5) angegebenen Kurve

überein, sodaß der Zusammenhang für diesen Bereich als gesichert gelten kann. Bei größeren Niederschlagsintensitäten nimmt

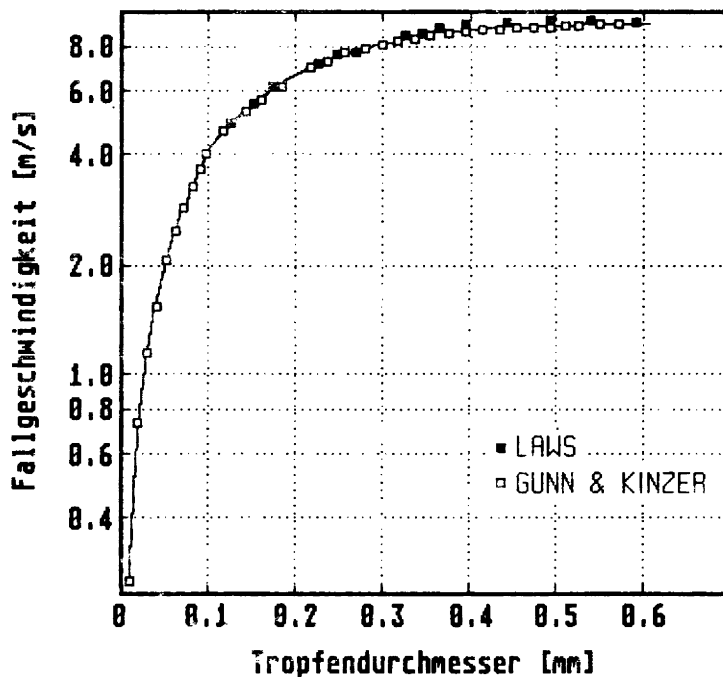


Abb. 6: Endgeschwindigkeiten von Wassertropfen in unbewegter Luft in Abhängigkeit von der Tropfengröße (aus WISCHMEIER & SMITH, 1958 nach Daten von LAWS, 1941 und GUNN & KINZER, 1949)

der mittlere Tropfendurchmesser jedoch nach den Ergebnissen von HUDSON wieder leicht ab, während er nach LAWS & PARSONS weiter ansteigt: bis zu einem Durchmesser von ca. 3 mm.

Die Fallgeschwindigkeit unterschiedlich großer Tropfen ist ebenfalls von LAWS (1941) sowie von GUNN & KINZER (1949) untersucht worden. In Abb. 6 sind die gemessenen Endgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Tropfengröße dargestellt.

Man erkennt, daß die Geschwindigkeit der Tropfen mit dem Tropfendurchmesser exponentiell ansteigt. Die Untersuchungen wurden an künstlichen Tropfen im Labor vorgenommen. Windeinflüsse, die unter Naturbedingungen die Fallgeschwindigkeit u.U. maßgeblich beeinflussen, sind hierbei nicht berücksichtigt.

Zieht man anstelle des Tropfendurchmessers die Niederschlagsintensität als Bezugsgröße für die Tropfengeschwindigkeit heran, so ergibt sich der in Abb. 7 aufgetragene Kurvenzug. Damit können sowohl die Tropfengröße als auch die Tropfengeschwindigkeit unmittelbar aus der Niederschlagsintensität abgeschätzt werden.

Zur Loslösung der Partikel müssen die an der Oberfläche des Bodens angreifenden Flüssigkeitskräfte den spezifischen Erosionswiderstand des Bodens überwinden.

Der Erosionswiderstand ist abhängig von der Kohäsion der Partikel untereinander und von der Schwerkraft. Die Kohäsion ist im allgemeinen um so größer, je kleiner der Durchmesser der Partikel ist. Einfluß auf das Ausmaß der Kohäsion haben aber auch der Wassergehalt, der Gehalt an organischer Substanz und andere physikalisch-

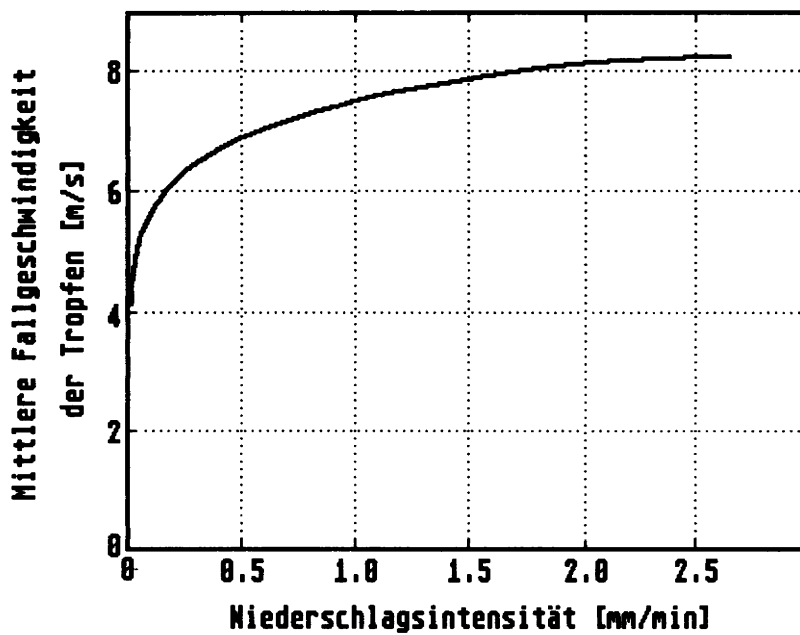


Abb. 7: Mittlere Fallgeschwindigkeit der Tropfen als Funktion der Niederschlagsintensität

chemische Bodenparameter, die hier nicht weiter erläutert werden sollen (vgl. HARTGE, 1978, S. 57).

Im Unterschied zur Kohäsion nimmt der Einfluß der Schwerkraft mit dem Durchmesser der Partikel zu. Aufgrund dieser unterschiedlich gerichteten Einflüsse nimmt der Erosionswiderstand mit zunehmender

Partikelgröße zunächst ab, steigt jedoch bei weiter wachsender Partikelgröße wieder an. Dieser Verlauf ist in Abb. 8 schematisch dargestellt.

Böden mit hohem Tonanteil und Böden aus grobem Sand und Kies sind daher - wie Abb. 8 zeigt - weniger leicht erodierbar als Schluff- und Feinsandböden.

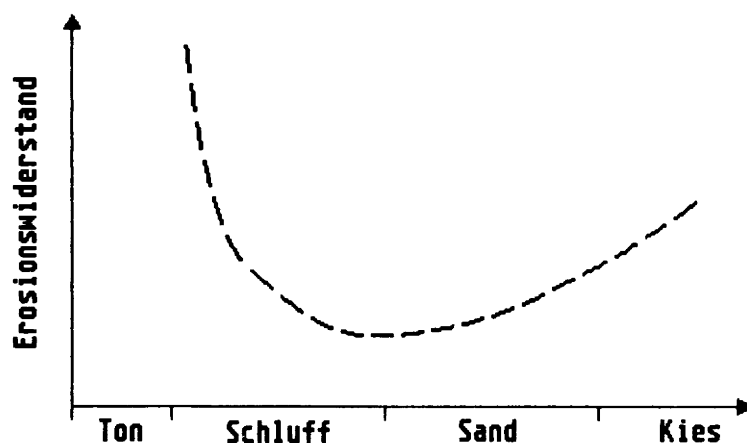


Abb. 8: Änderung des Erosionswiderstandes mit der Partikelgröße (schematisiert)

Transport der Partikel. Damit ein von der Oberfläche des Bodens losgelöstes Teilchen mit dem abfließenden Flüssigkeitsfilm transportiert werden kann, muß die Sinkbewegung des Partikels durch vertikale (turbulente) Strömungskomponenten innerhalb des Flüssigkeitsfilms überwunden werden.

Für den Transport der Partikel sind damit die vertikalen Turbulenzbewegungen innerhalb des Flüssigkeitsfilms und die korngroßenabhängige Sinkbewegung der Partikel entscheidend.

Die Sinkgeschwindigkeit v_p eines in einer Flüssigkeit suspendierten Partikels ist gemäß der STOKESSchen Gleichung

$$v_p = \frac{D^2 \cdot (\rho_p - \rho_q) \cdot g}{18 \cdot \eta} \quad (32)$$

abhängig von dem Partikeldurchmesser D , der Partikeldichte ρ_p , der Flüssigkeitsdichte ρ_q , der Erdbeschleunigung g und der dynamischen Viskosität η . Man erkennt, daß die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels mit dem Quadrat des Partikeldurchmessers anwächst. Dementsprechend verharren kleine Partikel sehr viel länger in Suspension als grobe.

Die der Sinkbewegung der Partikel entgegenwirkenden vertikalen Strömungskomponenten werden im Falle dünnschichtiger Abflüsse in sehr viel stärkerem Maße durch die Einwirkung der Niederschläge beeinflusst als dies bei größerer Wassertiefe der Fall ist.

Nach Untersuchungen von YOON & WENZEL (1971) sowie von KISSEL et al. (1971) ist bei konstant gehaltenen Strömungsbedingungen der Einfluß des Niederschlages auf die Turbulenzintensität um so ausgeprägter, je größer die Niederschlagsintensität ist. Bei konstanter Niederschlagsintensität nimmt der Niederschlagseinfluß mit zunehmendem Abflußvolumenstrom bzw. zunehmender Schichtdicke des Abflusses ab. Die Einwirkung der Tropfen vergrößert damit vor allem im Wasserscheidenbereich

die Fähigkeit der Abflüsse, Sediment zu transportieren (SCHMIDT, 1988).

Die Kontinuitätsgleichung. Die Kontinuitätsgleichung bildet die Grundlage vieler physikalisch begründeter Erosionsmodelle. Sie ist ein Ausdruck für die Feststoffbilanz, bezogen auf ein Hangsegment beliebiger Größe. Folgende Größen gehen in die Bilanz ein: $q_{s,in}$ ist der Sedimentzuström von oberhalb des Hanges, $q_{s,out}$ ist der Sedimentstrom aus dem Segment heraus, und Δx ist die Segmentlänge. Aus der Verknüpfung dieser Größen gemäß Gl. 33 ergibt sich die Erosion ($\gamma > 0$) bzw. Akkumulation ($\gamma < 0$) innerhalb eines Hangsegmentes:

$$\gamma = \left(\frac{q_{s,in} - q_{s,out}}{\Delta x} \right) \quad (33)$$

Die Anwendung der Kontinuitätsgleichung auf eine Folge in sich homogener Segmente und Zeitintervalle erlaubt eine räumlich und zeitlich differenzierte Beschreibung des Bodenaustrages und der Akkumulation. Für die Güte der Abbildung ist hierbei neben anderen Einflüssen entscheidend, wie groß die Segmente bzw. Zeitintervalle gewählt werden. Je stärker ein Geländeausschnitt in sich differenziert ist, desto kleiner müssen die Segmente sein.

3.3 Experimentelle Grundlagen

Der Versuch, einen so komplexen Vorgang wie die Erosion durch ein theoretisches Modell zu beschreiben, bedingt entsprechende Vereinfachungen. Einige Teilvorgänge können zunächst nur qualitativ beschrieben werden. Um zu einer quantitativen Beschreibung dieser Vorgänge zu gelangen, müssen bestimmte Komponenten des Modells zunächst anhand gemessener Werte abgeglichen bzw. "kalibriert" werden. Entsprechende, in diesem Zusammenhang zu nutzende Daten liegen aus einer früheren Arbeit des Verfassers (SCHMIDT, 1988) bereits vor.

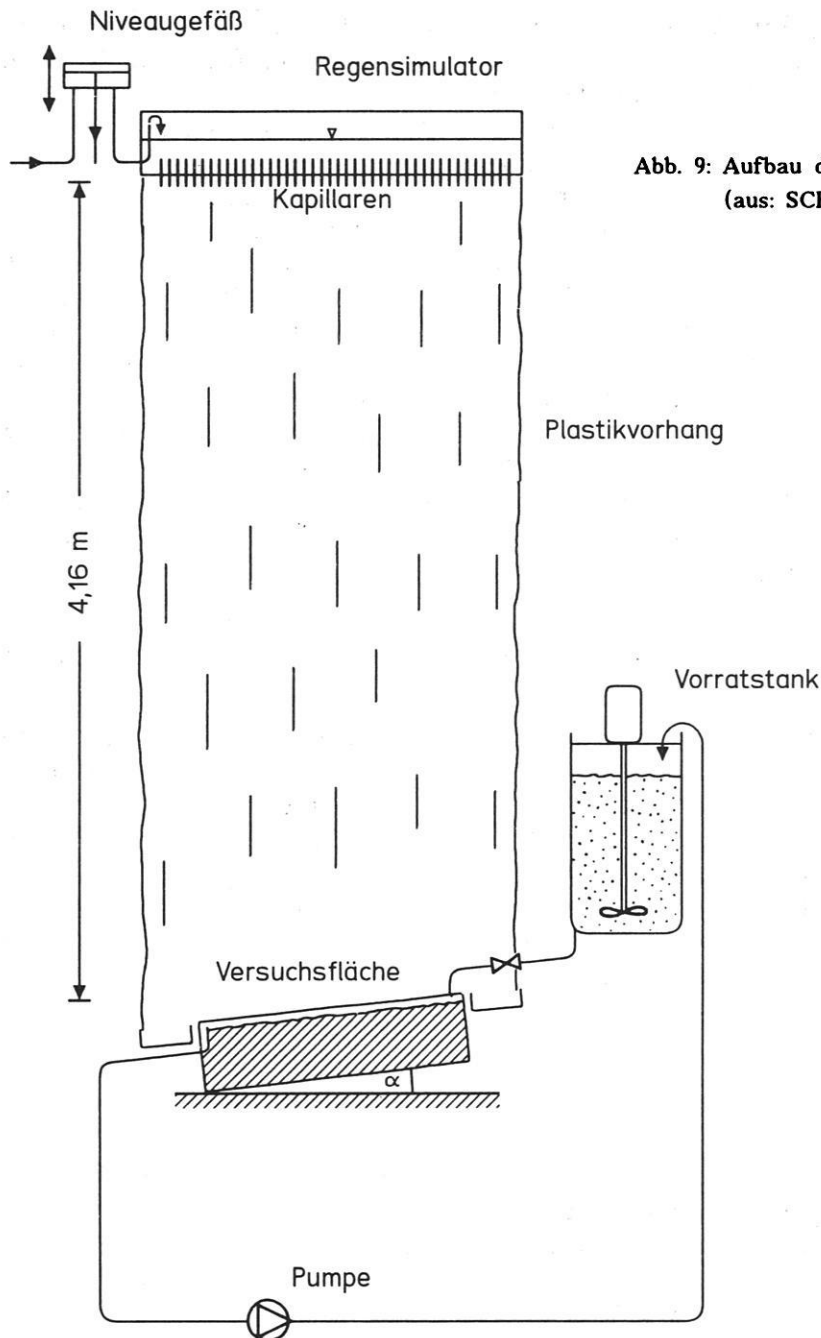


Abb. 9: Aufbau der Versuchsanlage
(aus: SCHMIDT, 1988, S. 26)

"Material und Methoden" dieser Arbeit werden in den folgenden Abschnitten - stark zusammengefaßt - erläutert.

3.3.1 Vorgehensweise

Aufgrund der Vielzahl der auf die Erosion einwirkenden Einflußgrößen ist es unter

Freilandbedingungen nur sehr schwer möglich, den Feststofftransport unter kontrollierbaren und reproduzierbaren Bedingungen zu untersuchen. Davon abgesehen ist die Häufigkeit auswertbarer Abflußereignisse unter Naturbedingungen relativ klein. Es ist daher kaum möglich, mit vertretbarem zeitlichen Aufwand eine hinreichende Anzahl von Meßdaten zu erhalten.

Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurde der Versuch unternommen, die Erosionsvorgänge mit Hilfe eines Labormodells zu simulieren. Diese Vorgehensweise gestattet – im Gegensatz zu Geländeuntersuchungen – kontrollierbare und hinreichend veränderbare Versuchsbedingungen.

3.3.2 Aufbau der Versuchsanlage

Die wichtigsten Komponenten der Versuchsanlage sind in Abb. 9 schematisch dargestellt. Hierbei handelt es sich um:

- die Beregnungsanlage
- den Bodenbehälter mit der Versuchsfläche
- den Vorratstank, von dem aus sedimentbeladenes Wasser in die Versuchsfläche eingespeist werden kann.

Die Beregnungsanlage basiert auf dem Prinzip des Kapillarregners. Die Tropfen

werden hierbei durch einzelne Kapillaren erzeugt, die in einem regelmäßigen Raster über den Boden des Gerätes verteilt angeordnet sind. Wird der an den Kapillaren anliegende Wasserdruck variiert, so ändert sich die Frequenz der Tropfen und damit die Niederschlagsintensität.

Die Größe und die Aufprallgeschwindigkeit der erzeugten Tropfen sind durch den Kapillardurchmesser bzw. die Fallhöhe festgelegt. Es ergeben sich hierfür die folgenden Werte:

- Tropfengröße: 2,8 mm
- Fallhöhe: 4,16 m
- Fallgeschwindigkeit: 6,8 m/s
(n. LAWS, 1941)

Zum Vergleich sind in Abb. 10 die Tropfenspektren einiger natürlicher Starkregen aufgetragen. Wie man hieraus erkennt, fügt sich der Durchmesser der künstlich erzeugten Tropfen gut in die Spektren der natürlichen Niederschläge ein.

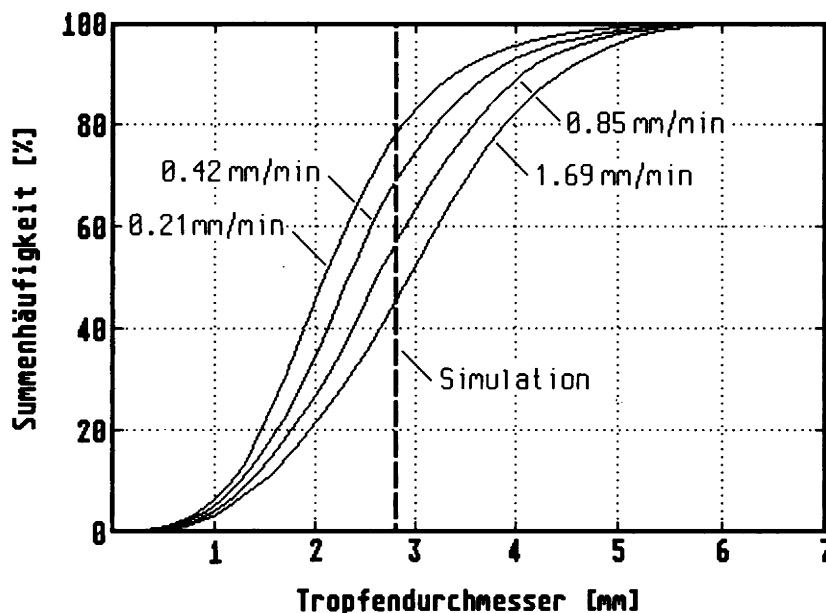


Abb. 10: Vergleich der künstlich erzeugten Tropfen mit der Häufigkeitsverteilung der Tropfendurchmesser natürlichen Regens bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten (n. Daten von LAWS & PARSONS, 1943)

Die Versuchsfläche hat eine Größe von 0,65 m × 0,24 m und eine Neigung von 6%. Zur Vermeidung von Randeffekten wird um die Versuchsfläche herum zusätzlich ein etwa 0,1 m breiter Randstreifen beregnet.

Um auch die Verhältnisse bei größerer Hanglänge simulieren zu können, kann von oberstrom her sedimentbeladenes Wasser in die Versuchsfläche eingespeist werden.

Zu diesem Zweck wird der am unteren Ende der Versuchsfläche austretende Abfluß über eine Pumpe zunächst in einen Vorrats-tank gefördert und von dort aus erneut der Versuchsfläche zugeführt. Ein in den Tank eingebautes Rührwerk dient hierbei der Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Verteilung der Feststoffe in der Flüssigkeit.

3.3.3 Hydraulische Eigenschaften der Versuchsfläche

Das Material für die Versuche entstammt dem A_p-Horizont eines Lößbodens aus dem Raum Algermissen/Hildesheimer Börde. Es besteht überwiegend aus Schluff (2-63 µm) mit einem deutlichen Maximum in der

Grobschluff-Fraktion (20-63 µm, s. Abb. 11). Geringere Anteile entfallen auf die Ton- (< 2 µm) und die Feinsand-Fraktion (63-200 µm).

Die geometrische Struktur und die Rauigkeit der Versuchsfläche wurden soweit als möglich den Verhältnissen am Entnahmeort angepaßt (unmittelbar nach der Aussaat von Sommerweizen).

Einen räumlichen Eindruck von der Struktur der Oberfläche vermittelt Abb. 12. Deutlich zu erkennen sind die parallel zum Gefälle verlaufenden, ca. 3-4 cm tiefen Saatfurchen.

Im Unterschied zu einer völlig ebenen Fläche werden hier dem Abfluß von vornherein feste Fließbahnen vorgegeben. Dies hat den Vorteil, daß bei den Versuchen stets annähernd gleiche Fließbedingungen herrschen, sodaß die gemessenen Einzelergebnisse unmittelbar miteinander verglichen werden können.

Neben der geometrischen Struktur ist für das Strömungsverhalten der Abflüsse vor allem die Rauigkeit der Oberfläche maß-

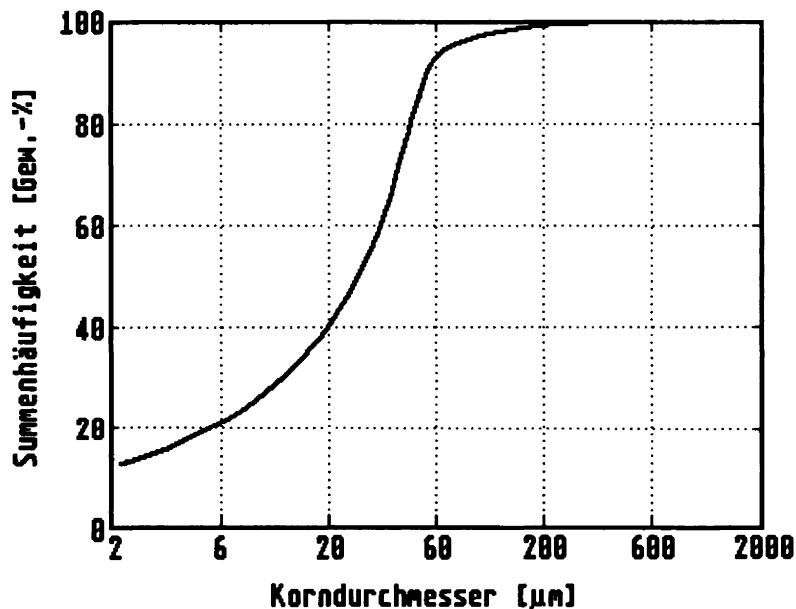


Abb. 11: Partikelgrößenverteilung des Versuchsbodens nach dispergierender Vorbehandlung

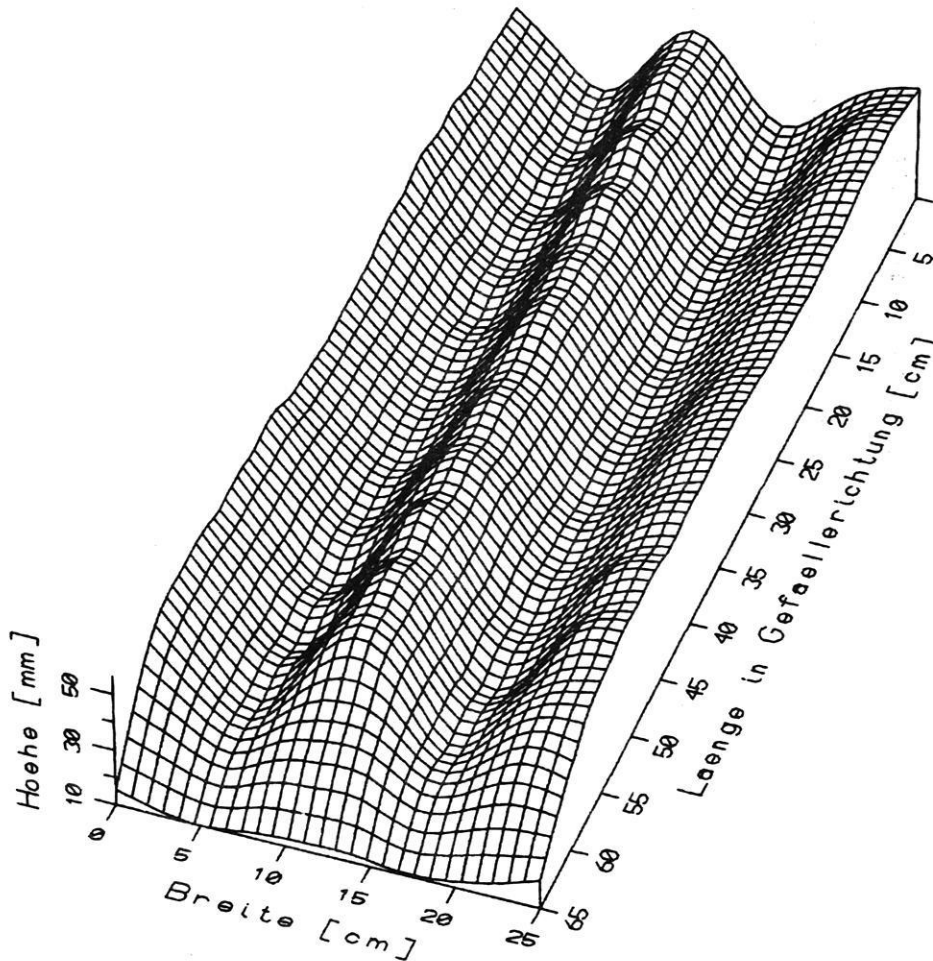


Abb. 12: Geometrische Struktur der Versuchsfläche (zu Versuchsbeginn)

gebend. Diese hängt - wenn der Einfluß der Vegetation unberücksichtigt bleiben kann - im wesentlichen von den Partikeleigenschaften der überströmten Oberfläche ab.

Nach einer Formel von GARBRECHT (1961) kann der Rauigkeitsbeiwert n (s. Gl. 27) unmittelbar aus der Größe der Partikel abgeschätzt werden (vgl. 6.3.6):

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (34)$$

Hierin ist D_{90} der Partikeldurchmesser bei 90% Siebdurchgang.

Bei den meisten Böden liegen die Einzelpartikel nicht voneinander isoliert vor, sondern bilden - wie im vorliegenden Fall - in sich zusammenhängende Aggregate. Zur Abschätzung des Rauigkeitsbeiwertes nach Gl. 34 ist dann anstelle der Einzelpartikel der Durchmesser der Aggregate heranzuziehen. Im vorliegenden Fall verteilen sich die Aggregate im wesentlichen auf die Sand- (0.6 - 2 mm), die Feinkies- (2 - 6 mm) und die Mittelkies-Fraktion (6 - 20 mm, s. Abb. 13). Der Durchmesser bei 90% Siebdurchgang (D_{90}) liegt bei etwa 7×10^{-3} m. Gl. 34 ergibt hierfür einen Rauigkeitsbeiwert von $n = 0.017 \text{ s/m}^{1/3}$. Dieser Wert gilt allerdings streng genommen nur für die Situation zu

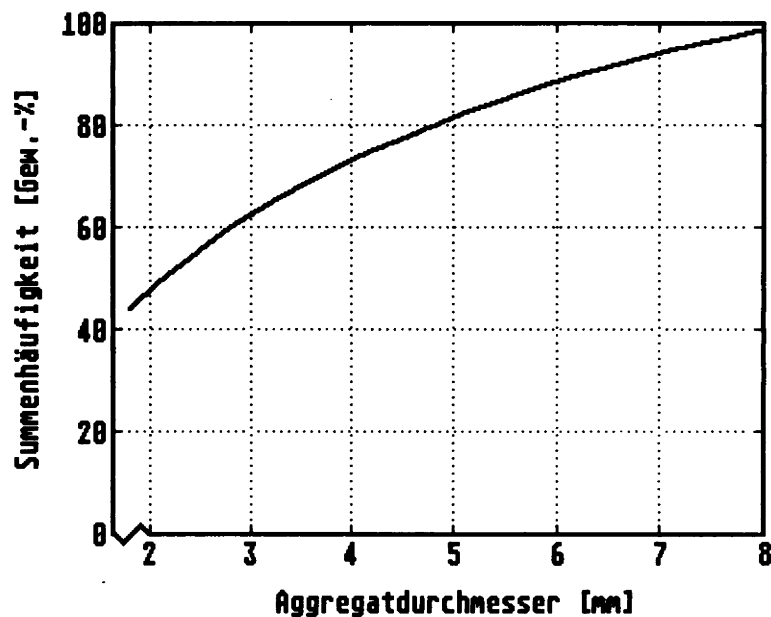


Abb. 13: Aggregatgrößenverteilung des Versuchsbodens (zu Versuchsbeginn)

Versuchsbeginn, da die Aggregate im Unterschied zu den Einzelpartikeln im Verlauf der Beregnung mehr oder weniger schnell wieder zerfallen.

3.3.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Es wurden insgesamt 50 Abflußexperimente durchgeführt, wobei die Intensität der Niederschläge und der Zufluß in die Versuchsfläche variiert wurden.

In den Einzelversuchen wurde bei konstanter Niederschlagsintensität und stationärem Abfluß jeweils die Sedimentkonzentration am Auslauf der Versuchsfläche gemessen und hieraus der Feststoffmassenstrom (= Konzentration \times Abflußvolumenstrom) bestimmt. Ein Teil der Versuche umfaßt Experimente mit reiner Überströmung, d.h. ohne Niederschlag. In diesen Fällen beziehen sich die Experimente auf solche Verhältnisse, bei denen ein unmittelbarer Einfluß der Tropfen nicht vorhanden ist (etwa aufgrund einer geschlossenen Pflanzendecke).

Eine Zusammenstellung der in den Einzelversuchen ermittelten Feststoffmassenströme und der versuchsspezifischen Niederschlags- und Abflußdaten liefert Tab. 3.

In Abb. 14 sind die in Tab. 3 aufgeführten Feststoffmassenströme als Funktion des Abflusses mit der Niederschlagsintensität als Parameter aufgetragen.

Für $r = 0$ (= reine Überströmung) können die eingezeichneten Meßwerte in erster Näherung durch eine Gerade ausgeglichen werden. Dem Verlauf dieser Geraden ist zu entnehmen, daß zunächst ein bestimmter Mindestabfluß überschritten werden muß, bevor es zu einem meßbaren Austrag von Feststoffen kommt (vgl. HJULSTRÖM, 1941 u. HORTON, 1945).

Unter den hier vorliegenden Bedingungen liegt der Mindestabfluß bei etwa $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m} \times \text{s}$. Wird dieser Schwellenwert überschritten, wächst der Feststoffmassenstrom mit zunehmendem Abfluß annähernd linear an. Hierbei zeigt sich, daß bei zusätzlicher Niederschlagseinwirkung der Feststoffmassenstrom stets größer ist als der bei

Tab. 3: Ergebnisse der Erosionsversuche

Nr.	Niederschlag	Abfluß	Konzentration	Massenstrom
	[mm/min]	[m ³ /m × s] × 10 ⁻⁵	[kg ³ /m]	[kg/m × s] × 10 ⁻⁴
1	0,68	3,41	6,3	2,15
2	0,47	3,99	7,5	2,99
3	0,89	4,17	16,8	7,01
4	0,89	4,86	14,9	7,24
5	0,89	4,20	17,9	7,52
6	0,68	4,90	13,2	6,47
7	0,68	4,80	15,0	7,20
8	0,48	4,34	8,2	3,56
9	0,22	3,62	4,4	1,59
10	0,22	4,15	5,2	2,16
11	0,68	4,21	9,7	4,08
12	0,48	4,13	7,9	3,26
13	0,22	3,93	5,3	2,08
14	0,22	10,85	6,2	6,73
15	0,45	10,34	10,2	10,55
16	0,66	10,63	9,3	9,89
17	0,89	9,64	9,9	9,54
18	0,89	10,51	10,6	11,14
19	0,00	11,04	5,7	6,29
20	0,00	10,81	5,4	5,84
21	0,00	10,41	5,6	5,83
22	0,00	11,03	5,3	5,85
23	0,00	4,66	5,1	2,38
24	0,00	4,14	4,4	1,82
25	0,00	4,57	2,9	1,33
26	0,00	4,33	2,6	1,13
27	0,91	7,58	11,2	8,49
28	0,91	7,14	7,8	5,57
29	0,69	8,34	11,0	9,17
30	0,69	6,83	11,0	7,51
31	0,69	6,54	10,0	6,54
32	0,48	7,38	10,0	7,75
33	0,23	7,55	7,5	5,66
34	0,23	7,88	8,5	6,70
35	0,23	7,50	8,2	6,15
36	0,00	7,03	6,1	4,29
37	0,00	7,70	5,8	4,47
38	0,00	7,36	6,4	4,71
39	0,48	7,72	8,3	6,41
40	0,48	7,68	9,8	7,53
41	0,48	7,90	12,8	10,11
42	0,68	7,37	6,4	4,72
43	0,68	6,40	7,6	4,86
44	0,68	9,12	8,5	7,75
45	0,91	7,62	12,6	9,60
46	0,91	7,03	10,5	7,38
47	0,91	6,99	9,0	6,29
48	0,24	6,73	7,4	4,98
49	0,24	6,72	7,2	4,84
50	0,24	6,72	7,2	4,84

reiner Überströmung. Dies bedeutet, daß sich die "erosive Wirkung" der Abflüsse durch die zusätzliche Einwirkung der Niederschläge erhöht. Der Zuwachs des

Feststoffmassenstromes gegenüber der ungestörten Strömung ist dabei umso größer, je größer die Niederschlagsintensität ist.

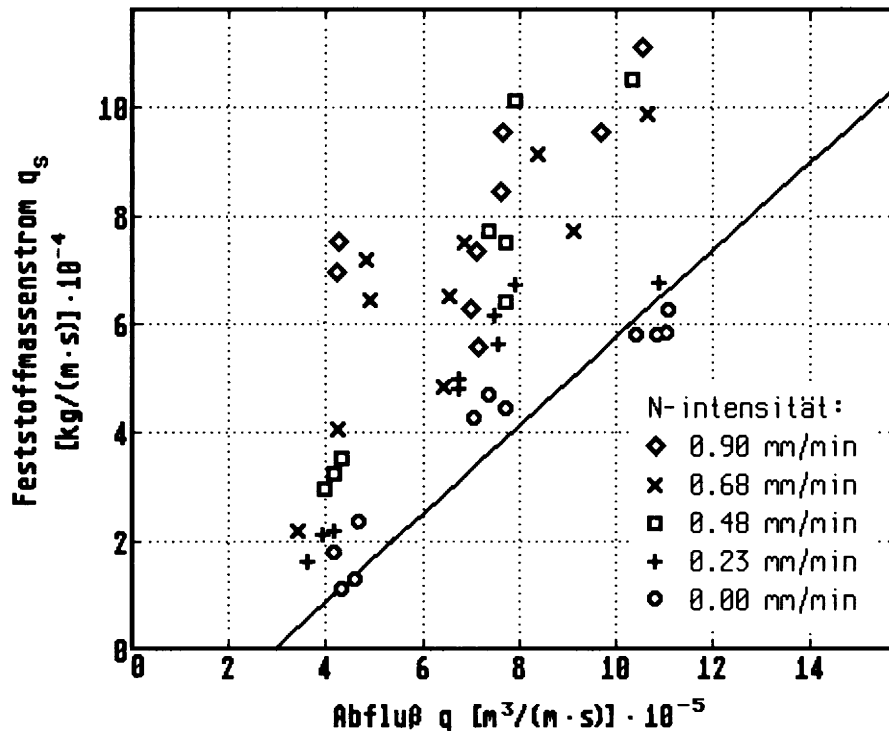


Abb. 14: Feststoffmassenstrom q_s als Funktion des Abflußvolumenstromes q mit der Niederschlagsintensität r als Parameter (aus: SCHMIDT, 1984)

4. Modellbildung und Programmstruktur

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die dem Modell zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge und über die Umsetzung des Modellansatzes in ein PC-basiertes Computerprogramm.

Das Gesamtmodell umfaßt zwei voneinander unabhängige Teilmodelle: Das eigentliche Erosionsmodell beschreibt die Ablösung, den Transport und die Deposition der Bodenpartikel infolge des Aufpralls der Tropfen und der oberflächenparallelen Strömung. Diese Modellkomponente wird

ergänzt durch ein Infiltrationsmodell. Die Ergebnisse dieses Teilmodells werden unmittelbar in das Erosionsmodell übernommen. Zunächst soll der Erosionsteil des Modells erläutert werden.

4.1 Erosionsmodell

4.1.1 Vorgehensweise

Aufgrund seiner Komplexität ist es sinnvoll, den Erosionsvorgang in verschiedene Teilprozesse zu zerlegen und diese jeweils

durch entsprechende Teilmodelle abzubilden. Im folgenden werden zunächst zwei Prozeßkomponenten unterschieden: die Loslösung der Partikel von der Bodenoberfläche und der Transport der Partikel mit der oberflächenparallelen Strömung. Die Kombination der Teilmodelle führt auf ein Gesamtmodell, das den Erosionsvorgang - in den durch die Modellannahmen gesetzten Grenzen - umfassend wiedergibt.

Neben der Komplexität der Prozesse ist bei der Konzeption des Modells der Umstand zu berücksichtigen, daß die für die Erosion maßgeblichen Einflußgrößen räumlich und zeitlich außerordentlich stark variieren. Um das Verhalten der Einflußgrößen unter diesen Bedingungen dennoch adäquat berücksichtigen zu können, werden die Modellgleichungen nicht global auf den gesamten Hang bzw. auf die gesamte Dauer eines Ereignisses angewandt, sondern jeweils nur auf kleine Raum- bzw. Zeitsegmente, die in sich als homogen angesehen werden können. Die Verknüpfung dieser Raum- bzw. Zeitsegmente liefert eine Aussage über den Prozeß insgesamt sowie über dessen räumliche und zeitliche Differenzierung.

4.1.2 Modellansatz für die Loslösung der Partikel

Für das Zustandekommen eines erosiven Prozesses bedarf es zunächst der Loslösung transportfähiger Einzelpartikel von der Bodenoberfläche. Dies ist nur dann möglich, wenn die an der Oberfläche des Bodens angreifenden Flüssigkeitskräfte den Erosionswiderstand des Bodens überwinden. Maßgeblich für den Erosionswiderstand sind hierbei die Kräfte, die die Bodenpartikel in ihrer Lage festhalten. Im wesentlichen sind dies die Kohäsion der Bodenpartikel untereinander und die Schwerkraft (vgl. 3.2.2).

Die Flüssigkeitskräfte resultieren aus der Überströmung der Bodenoberfläche und dem Aufprall der Tropfen. Sie sind vor allem abhängig von der Geschwindigkeit und der

Dicke der abfließenden Wasserschicht sowie von der Geschwindigkeit und der Größe der aufprallenden Tropfen.

Aufgrund der heterogenen Bedingungen an der Bodenoberfläche ist allerdings eine unmittelbare meßtechnische Bestimmung oder theoretische Beschreibung der für die Loslösung eines Einzelpartikels maßgeblichen Kräfte praktisch nicht möglich. Für die modellmäßige Beschreibung der Erosionsprozesse sind daher entsprechende Vereinfachungen nicht zu umgehen, insbesondere muß von der mikroskopischen, auf Einzelpartikel bezogenen Betrachtung zu einer makroskopischen Betrachtungsweise übergegangen werden.

Eine Größe, die die erodierende Wirkung der oberflächenparallelen Strömung und der aufprallenden Tropfen im Sinne einer vereinfachten, makroskopischen Betrachtungsweise beschreibt, ist der in der Strömung bzw. in den Tropfen enthaltene Impulsstrom.

Der in der *Strömung* enthaltene Impulsstrom φ_q ist definiert als:

$$\varphi_q = \frac{w_q \cdot v_q}{\Delta x} \quad (35)$$

Hierin ist w_q der Massenstrom der oberflächenparallelen Strömung je Breitereinheit der überströmten Fläche, Δx die Länge des betrachteten Hangsegmentes und v_q die Abflußgeschwindigkeit.

Der Massenstrom w_q ergibt sich gemäß Gl. 36:

$$w_q = q \cdot \rho_q \quad (36)$$

aus dem Abflußvolumenstrom q und der Flüssigkeitsdichte ρ_q .

Für den Abflußvolumenstrom q gilt hierbei - bezogen auf ein einzelnes Hangsegment - folgende Bilanzgleichung:

$$q = (r_\alpha - i) \cdot \Delta x + q_{in} \quad (37)$$

In diese Gleichung gehen ein: die Niederschlagsintensität r_{α} (bezogen auf die geneigte Hangoberfläche), die Infiltrationsrate i , die Länge des betrachteten Hangsegmentes Δx und (ggf.) der Zufluß q_{in} von oberhalb des Hanges.

Die in Gl. 35 enthaltene Abflußgeschwindigkeit v_q kann für ein hinreichend kleines Zeitintervall als gleichförmig angesehen werden. Unter dieser Voraussetzung kann die mittlere Geschwindigkeit des Abflusses gemäß der MANNING-Gleichung (Gl. 27) abgeschätzt werden aus: dem Rauigkeitsbeiwert n , dem Gefälle S und der Schichtdicke des Abflusses δ :

$$v_q = \frac{1}{n} \cdot \delta^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

Hierbei gilt für δ :

$$\delta = \left(\frac{q \cdot n}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (39)$$

Zur Berechnung der Abflußgeschwindigkeit v_q nach Gl. 38 wird stets von einer geschlossenen, schichtförmigen Überströmung der Hangoberfläche ausgegangen. Alle Einflüsse des Mikroreliefs und des Bewuchses auf das Abflußverhalten werden über den Rauigkeitsbeiwert n berücksichtigt.

Dieses das tatsächliche Verhalten des Abflusses sehr stark vereinfachende Vorgehen ist deshalb angebracht, weil die Fließwege des Wassers aufgrund der heterogenen und sich zeitlich ändernden Bedingungen an der Bodenoberfläche (s.o.) im einzelnen nicht definierbar und damit der modellmäßigen Beschreibung und Erfassung nicht zugänglich sind.

Setzt man die gemäß Gl. 38/39 berechneten Abflußgeschwindigkeiten in Gl. 35 ein, so ergibt sich in Abhängigkeit vom Volumenstrom des Abflusses der in Abb. 15 dargestellte Impulsstromverlauf.

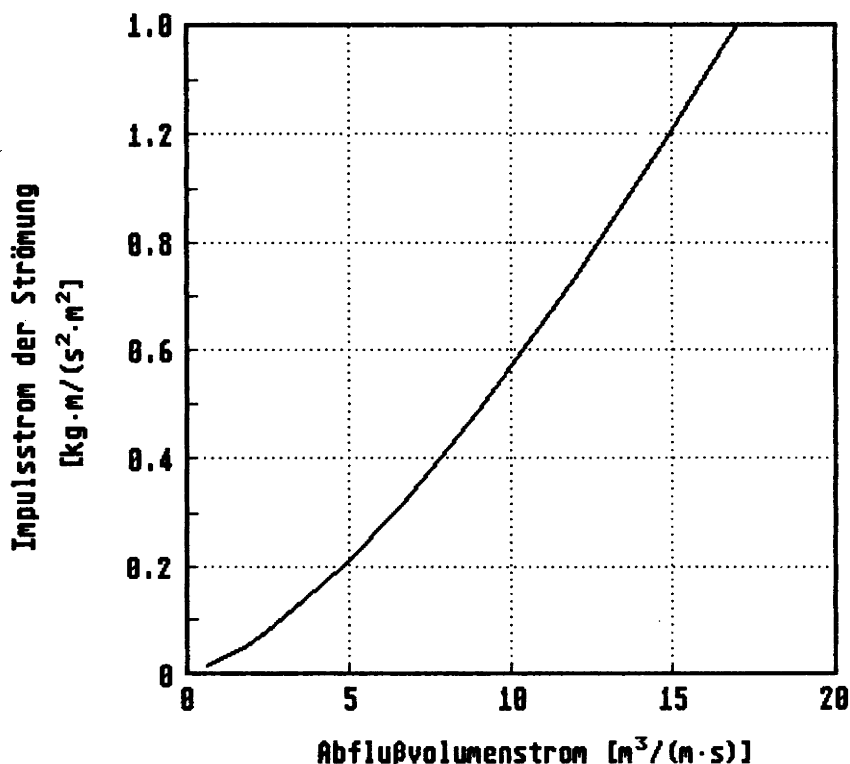


Abb. 15: Abhängigkeit des Impulsstromes der Strömung vom Abflußvolumenstrom

Der in den *Tropfen* enthaltene Impulsstrom φ_r wird analog zu Gl. 35 definiert als:

$$\varphi_r = w_r \cdot v_r \quad (40)$$

Hierin ist w_r der Massenstrom des Niederschlages je Flächeneinheit und v_r die mittlere Fallgeschwindigkeit der Tropfen.

Für die unmittelbare Erosionswirkung der Tropfen (Splash) ist nur die in Gefällerrichtung wirkende Komponente des in den Tropfen enthaltenen Impulsstromes maßgebend:

$$\varphi_{r,\alpha} = w_r \cdot v_r \cdot \sin \alpha \quad (41)$$

Diese Komponente ist bei gering geneigten Hängen fast vernachlässigbar klein.

Der Einfluß einer die Erosionswirkung der Tropfen herabsetzenden Bodenbedeckung wird durch den Bedeckungsgrad C_L berücksichtigt. Er wird als das Verhältnis der durch Pflanzen (oder Pflanzenrückstände) bedeckten Fläche A_{Leaf} zur Gesamtfläche A ausgedrückt:

$$C_L = \frac{A_{Leaf}}{A} \quad (42)$$

Der in Gl. 40 enthaltene Massenstrom des Niederschlages wird bestimmt durch:

$$w_r = r_\alpha \cdot \rho_r \quad (43)$$

Hierin ist r_α die Niederschlagsintensität (bezogen auf die geneigte Hangoberfläche) und ρ_r die Flüssigkeitsdichte des Niederschlages.

Durch Einsetzen in Gl. 40 erhält man schließlich:

$$\varphi_{r,\alpha} = r_\alpha \cdot \rho_r \cdot v_r \cdot \sin \alpha \cdot (1 - C_L) \quad (44)$$

Die in Gl. 40 eingehende Fallgeschwindigkeit der Tropfen kann unter Feldbedingungen nur unter großem Aufwand meßtechnisch erfaßt werden. Die vorliegenden Meßdaten (s. 3.2.2) zeigen, daß der Tropfen-

durchmesser und damit auch die Geschwindigkeit der Tropfen mit der Niederschlagsintensität zunehmen (LAWS 1941, LAWS & PARSONS 1943). Damit läßt sich auf der Basis der gemessenen Daten folgende Abschätzung der mittleren Fallgeschwindigkeit vornehmen:

$$v_r = 4.5 r^{0.12} \quad (45)$$

Hierin ist v_r die Fallgeschwindigkeit der Tropfen in m/s und r die Niederschlagsintensität in mm/h.

Zieht man zur Abschätzung der Fallgeschwindigkeiten der Tropfen die aus den Daten von LAWS und LAWS & PARSONS abgeleitete Gleichung heran, dann ergibt sich zwischen dem Impulsstrom der Tropfen und der Niederschlagsintensität eine nahezu lineare Beziehung. Den Verlauf der Kurve zeigt Abb. 16.

Zur Kennzeichnung des Erosionswiderstandes wird der Umstand ausgenutzt, daß es für das Auftreten eines meßbaren Feststoffaustrages stets eines von den spezifischen Eigenschaften der überströmten Unterlage abhängigen Mindestabflusses q_{crit} bedarf (s. 3.3.4). Dieser Mindestabfluß ist ein Maß für den Widerstand, den die Bodenmatrix den von außen an den Partikeln angreifenden Flüssigkeitskräften entgegensetzt.

Setzt man nun q_{crit} in Gl. 36 bzw. 35 ein, so erhält man mit dem kritischen Impulsstrom φ_{crit} eine Größe, mit der sich die spezifischen Erosionseigenschaften des Bodens analog zu den zuvor abgeleiteten Bestimmungsgleichungen für die Erosionswirkung der Strömung und der Tropfen erfassen lassen:

$$\varphi_{crit} = \frac{q_{crit} \cdot \rho_q \cdot v_q}{\Delta x} \quad (46)$$

Hierin ist q_{crit} der in einem Strömungsver such ermittelte kritische Abfluß, bei dem in Abhängigkeit von den Eigenschaften des jeweils betrachteten Bodens (Bodenart, Bear-

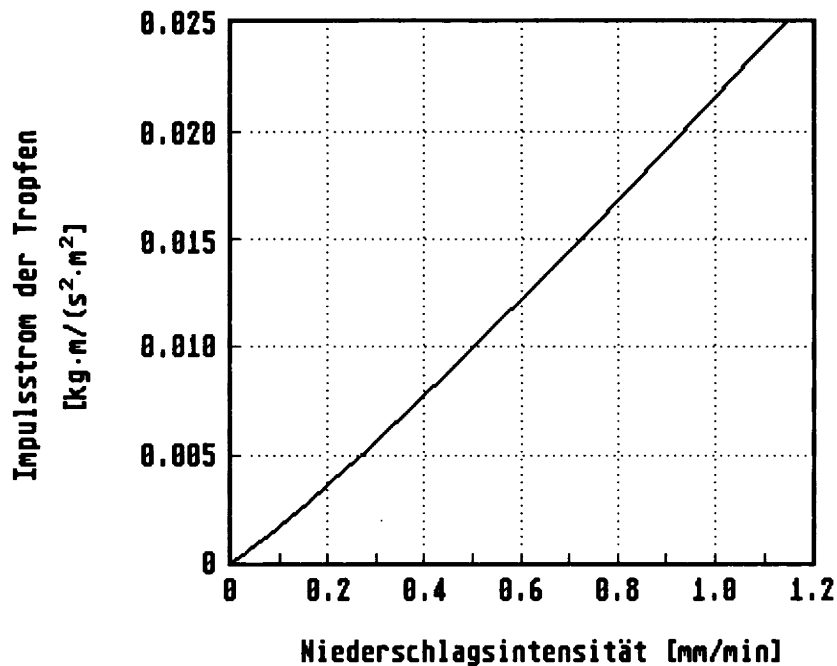


Abb. 16: Abhängigkeit des Impulsstromes der Tropfen von der Niederschlagsintensität

beitungszustand etc.) und in Abhängigkeit von der Neigung die Erosion einsetzt. Darüberhinaus bedeuten: Δx = Länge des betrachteten Hangsegmentes, ρ_q = Flüssigkeitsdichte des Abflusses und v_q = Abfließgeschwindigkeit gemäß Gl. 38.

Aufgrund ihrer formalen Übereinstimmung können nun die Modellansätze zur Beschreibung der Erosionswirkung der Tropfen und des flächenhaften oberflächlichen Abflusses sowie der Ansatz zur Erfassung des Erosionswiderstandes zu einer dimensionslosen Kenngröße verknüpft werden:

$$E = \frac{\varphi_q + \varphi_{r,\alpha}}{\varphi_{\text{crit}}} \quad (47)$$

Dieser Koeffizient kennzeichnet die Fähigkeit einer gegebenen Strömung ($q > 0$), Partikel von der Oberfläche des betrachteten Bodens abzulösen. $E > 1$ bedeutet, daß die Erosionswirkung der oberflächenparallelen Strömung und der Tropfen (= Summe der Impulsströme φ_q und φ_r) den Erosionswiderstand des Bodens (gegeben durch den kritischen Impulsstrom φ_{crit}) übersteigt.

$E \leq 1$ kennzeichnet den erosionsfreien Strömungszustand.

Um zu einer quantitativen Beschreibung der o.g. Zusammenhänge zu gelangen, wurde die Erosionskennzahl E mit den in den Laborversuchen (s. 3.3.4) ermittelten Feststoffmassenströmen $q_{s,\text{pot}}$ korreliert. Dies führte auf folgende lineare Beziehung:

$$q_{s,\text{pot}} = (1.75 \cdot E - 1.75) \cdot 10^{-4} \quad (48)$$

Hierin kennzeichnet $q_{s,\text{pot}}$ den bei hinreichender Transportkapazität (s. 4.1.3) aufgrund der Menge der je Zeit- und Flächeneinheit ablösbaren Partikel möglichen, potentiellen Feststoffmassenstrom.

In Abb. 17 ist der Verlauf der Regressionsgeraden graphisch dargestellt. Da für Werte von $E \leq 1$ der Feststoffmassenstrom definitionsgemäß gleich Null ist, muß die Ausgleichskurve in jedem Fall die x-Achse im Punkt $E = 1$ schneiden. Eine signifikante Abhängigkeit der Erosionskennzahl von der in den Versuchen variierten Niederschlagsintensität ist nicht zu erkennen.

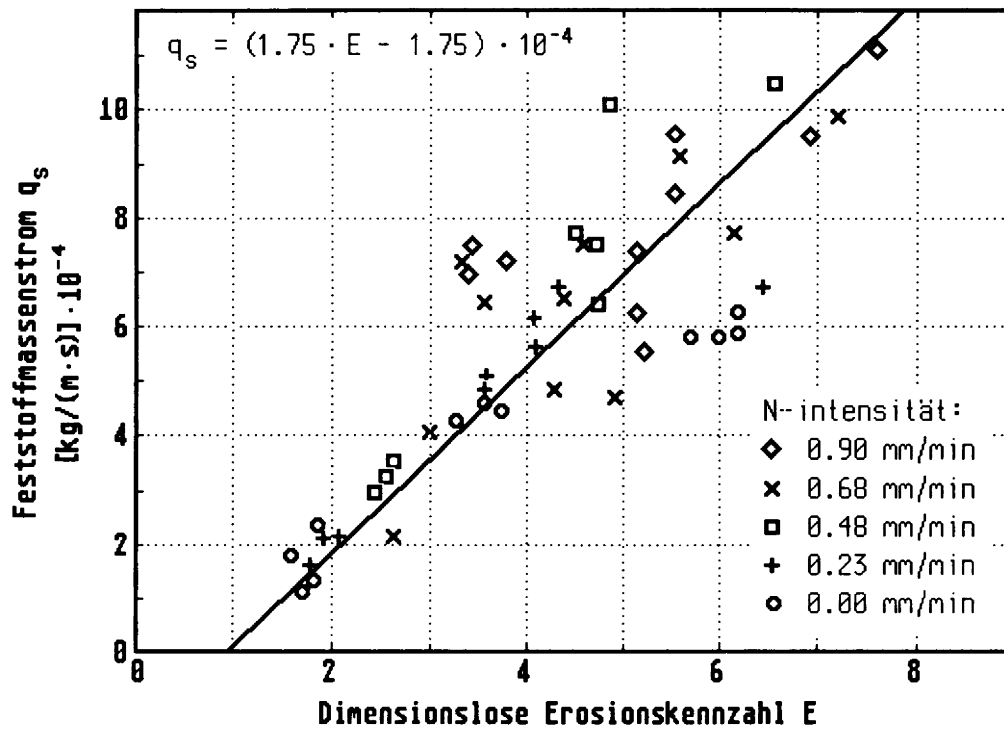


Abb. 17: Beziehung zwischen dem Feststoffmassenstrom q_s und der Erosionskennzahl E (n. Daten von SCHMIDT, 1988)

4.1.3 Modellansatz für den Transport der Partikel

Aufgrund der Wirkung der Schwerkraft sinken in einer Flüssigkeit suspendierte feste Bestandteile mit einer im wesentlichen vom Durchmesser der Partikel abhängigen Geschwindigkeit zu Boden. Diese Sinkbewegung läßt sich nur aufhalten oder verzögern, wenn eine hinreichend große, aufwärtsgerichtete (turbulente) Strömungskomponente der Sinkbewegung entgegenwirkt.

Für den schwebenden Transport der Partikel sind somit die korngößenabhängige Sinkgeschwindigkeit der Partikel und die vertikalen Turbulenzbewegungen innerhalb der oberflächenparallelen Strömung entscheidend.

Die Geschwindigkeit, mit der ein Partikel in einer Flüssigkeit zu Boden sinkt, wird durch die STOKESsche Gleichung

beschrieben (s. 3.2.2):

$$v_p = \frac{D^2 \cdot (\rho_p - \rho_q) \cdot g}{18 \cdot \eta} \quad (49)$$

Hierin ist D der Partikeldurchmesser, ρ_p die Partikeldichte, ρ_q die Flüssigkeitsdichte, g die Erdbeschleunigung und η die dynamische Viskosität der Flüssigkeit.

Streng genommen gilt die STOKESsche Gleichung nur für kugelförmige Partikel, die in einer selbst nicht in Bewegung befindlichen Flüssigkeit ausschließlich der Schwerkraft folgend zu Boden sinken. Aus Gründen der Vereinfachung werden diese Einschränkungen hier außer Acht gelassen, da im vorliegenden Fall weniger der absolute Betrag der Sinkgeschwindigkeit von Interesse ist als vielmehr das relative, vom Korndurchmesser abhängige Verhalten der Partikel beschrieben werden soll.

Vernachlässigt wird außerdem der Umstand, daß sich in der Strömung nicht nur ein einziger Partikel aufhält, sondern daß sich darin viele befinden. Je mehr Partikel aber in der Strömung verteilt sind, desto stärker "behindern" sie sich gegenseitig. Dadurch wird die Sinkbewegung der Partikel mehr oder weniger stark verzögert (vgl. BRAUER, 1971, S. 519).

Durch Multiplikation der Sinkgeschwindigkeit v_p mit dem Massenstrom der absinkenden Partikel w_p erhält man den kritischen Impulsstrom der Partikel $\varphi_{p,crit}$ (analog zu φ_{crit}). Wird dieser unterschritten, können die Partikel nicht in Suspension gehalten werden:

$$\varphi_{p,crit} = w_p \cdot v_p \quad (50)$$

Der Massenstrom der Partikel aus Gl. 50 kann ausgedrückt werden als:

$$w_p = c \cdot \rho_p \cdot v_p \quad (51)$$

Hierin ist c die Konzentration der suspendierten Partikel in der Flüssigkeit, ρ_p die Dichte der Partikel und v_p die Sinkgeschwindigkeit der Partikel gemäß Gl. 49.

Dem kritischen Impulsstrom der Partikel $\varphi_{p,crit}$ wirkt eine vertikale Impulsstromkomponente des Abflusses $\varphi_{q,vert}$ entgegen. Von $\varphi_{q,vert}$ wird angenommen, daß er ein Teil des gesamten Impulsstromes ist, der in der oberflächenparallelen Strömung und in den fallenden Tropfen enthalten ist:

$$\varphi_{q,vert} = \frac{1}{\kappa} (\varphi_q + \varphi_{r,\alpha}) \quad (52)$$

Hierin ist κ ein als Depositionskoeffizient bezeichneter dimensionsloser Faktor, über den der relative Anteil der vertikalen Impulsstromkomponente am Gesamtimpulsstrom festgelegt wird. Die Auswertung experimenteller Daten ergab für κ einen mittleren Wert von ≈ 1000 . Allerdings ist die Zahl geeigneter Versuchsdaten noch zu gering, um κ genauer bestimmen zu können (siehe Kap. 6.5).

Nach Erreichen der Transportkapazität ist

die vertikale Impulsstromkomponente des Abflusses gleich dem kritischen Impulsstrom der in Suspension gehaltenen Partikel:

$$\varphi_{p,crit} = \varphi_{q,vert} \quad (53)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 50, 51 und 52 in Gl. 53 erhält man:

$$c_{max} \cdot \rho_p \cdot v_p^2 = \frac{1}{\kappa} \cdot (\varphi_q + \varphi_{r,\alpha}) \quad (54)$$

Hierin ist c_{max} die Konzentration der Partikel bei Transportkapazität.

Nach Umstellen erhält man:

$$c_{max} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\varphi_q + \varphi_{r,\alpha}}{\rho_p \cdot v_p^2} \quad (55)$$

Die Transportkapazität ergibt sich dann gemäß:

$$q_{s,max} = c_{max} \cdot \rho_p \cdot q \quad (56)$$

4.1.4 Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Transportkapazität

Wie Abb. 18 zeigt, nimmt die Transportkapazität bei doppellogarithmischer Darstellung mit zunehmender Korngröße linear ab. Allerdings hat dieser Kurvenverlauf zunächst lediglich theoretische Bedeutung. Für den Austrag ist die Transportkapazität nur dann von Belang, wenn die Menge der je Zeit- und Flächeneinheit von der Bodenoberfläche ablösbaren Partikel ($q_{s,pot}$) die Transportkapazität übersteigt.

Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhanges ist in Abb. 18 neben der Transportkapazität (Kurve a) auch der Massenstrom der ablösbaren Partikel (gemäß Gl. 48) in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser angegeben (Kurve b). Man erkennt, daß der Feststoffaustrag (q_s) zunächst allein von der Menge der je Zeit- und Flächeneinheit ablösbaren Partikel ($q_{s,pot}$) bestimmt wird. Mit zunehmender Korngröße nähert sich dann der aus der Loslösung der Partikel resultierenden Feststoffmassenstrom

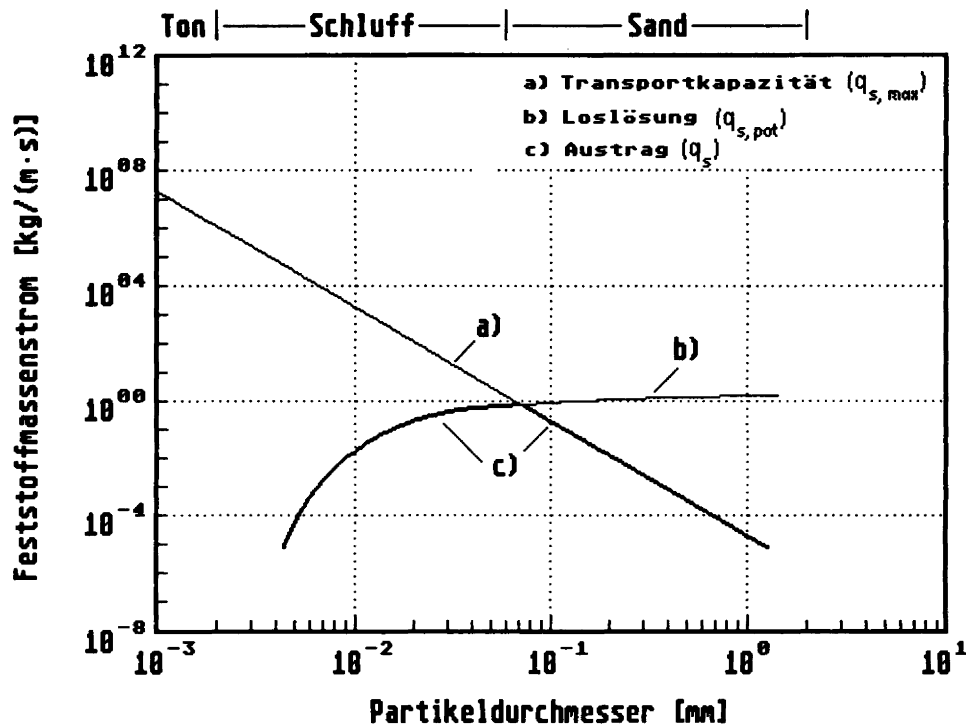


Abb. 18: Abhängigkeit der Transportkapazität und des Feststoffmassenstromes vom Partikeldurchmesser (zugrundeliegende Parameterwerte s. Text)

immer mehr der Transportkapazität an. Bei einem Korndurchmesser von etwa 0,08 mm überschneiden sich beide Kurven. Nun ist nicht mehr die Menge der ablösbaren Partikel entscheidend, sondern die Transportkapazität.

Fügt man jeweils die für den Austrag maßgeblichen Abschnitte der beiden Kurven zusammen, so ergibt sich der in Abb. 18 fett dargestellte Verlauf (Kurve c). Hieraus läßt sich folgendes Verhalten des Austrages ableiten: Zunächst steigt der Austrag mit größer werdendem Partikeldurchmesser an. Die Kurve flacht dann aber immer mehr ab. Im Schnittpunkt der Kurven a) und b) wird schließlich ein Maximum erreicht. Bei einer weiteren Zunahme der Korngröße nimmt dann der Austrag aufgrund der sinkenden Transportkapazität wieder ab.

Die anhand des in Abb. 18 dargestellten Beispieles erläuterten Zusammenhänge zwi-

sehen Körnung und Austrag decken sich weitgehend mit den aus Freilandversuchen vorliegenden Erfahrungswerten. Dies gilt in besonderem Maße für die Tatsache, daß gerade überwiegend aus Grobschluff bestehende Böden in besonderem Maße der Erosion unterliegen (vgl. Abb. 8).

Für die in Abb. 18 wiedergegebenen Modellrechnungen wurden folgende Parameterwerte zugrundegelegt: Niederschlagsintensität: 1,0 mm/min, Abfluß: 0,1 m³/(m · min), Hangneigung: 3°. Die von der Bodenart abhängigen Erosionswiderstände wurden aus experimentell ermittelten Werten (s. Tab. 15) geschätzt.

4.1.5 Korngrößenverteilung der transportierten Partikel

Grundsätzlich ist es über Gl. 56 möglich, die Transportkapazität für beliebige Parti-

keldurchmesser bzw. Partikelklassen isoliert zu berechnen. Man kann daher angeben, welche Menge an Partikeln einer bestimmten Größenklasse unter den gegebenen Strömungsbedingungen - bezogen auf ein definiertes Hangsegment - maximal je Zeiteinheit transportiert werden kann. Dies ist die Voraussetzung dafür, daß außer dem Massenstrom der Partikel auch deren Größenverteilung modellmäßig abgebildet werden kann.

Vereinfachend wird dabei von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die Loslösung der Partikel (s. 4.1.2) von der Bodenoberfläche erfolgt stets in den Anteilen, in denen diese im Boden vorliegen. Die Größenverteilung der losgelösten Partikel entspricht damit zunächst immer derjenigen des Ausgangssubstrates.
- Innerhalb einer Partikelklasse können je Zeit- und Flächeneinheit stets nur so viele Partikel abgelöst werden, wie gleichzeitig entsprechend der korngrößen-spezifischen Transportkapazität auch transportiert werden können.
- Der potentielle Feststoffmassenstrom $q_{s,pot}$ an der Stelle x kann nur größer oder gleich dem potentiellen Feststoffmassenstrom an der Stelle $x - 1$ sein.

Aufgrund dieser Annahmen können theoretisch folgende Fälle des Sedimenttransportes unterschieden werden:

- *Fall 1:* Die korngrößen-spezifische Transportkapazität wird in jeder der betrachteten Korngrößenklassen voll ausgeschöpft ($q_{s,pot} \cong q_{s,max}$). In diesem Fall wird die transportierte Sedimentmenge und die Größenverteilung der Partikel allein durch die korngrößen-spezifische Transportkapazität bestimmt. Für diesen Fall gilt daher:

$$q_s = \sum_{i=1}^n q_{s,max,i} \quad (57)$$

Hierin ist die q_s die je Zeit- und Breitereinheit (Hangbreite) transportierte Sedimentmenge und $q_{s,max,i}$ die Transportkapazität, bezogen auf die Kornklasse i bei Aufteilung der Partikel in n Klassen. Die Größenverteilung der Partikel ergibt sich dann gemäß:

$$FRAC_{s,i} = \frac{q_{s,max,i}}{q_s} \quad (58)$$

Hierin ist $FRAC_{s,i}$ der Anteil der Klasse i , bezogen auf die transportierte Sedimentmenge q_s .

- *Fall 2:* Die korngrößen-spezifische Transportkapazität wird in keiner der betrachteten Klassen voll ausgeschöpft ($q_{s,pot} < q_{s,max}$). In diesem Fall ist die transportierte Sedimentmenge allein abhängig von der Menge der je Zeit- und Flächeneinheit losgelösten Partikel. Dementsprechend gilt:

$$q_s = q_{s,pot} \quad (59)$$

Die Größenverteilung der Partikel entspricht in diesem Fall derjenigen des Ausgangssubstrates:

$$FRAC_{s,i} = FRAC_{init,i} \quad (60)$$

Hierin ist $FRAC_{init,i}$ der Anteil der Klasse i , bezogen auf das Ausgangssubstrat.

- *Fall 3:* Die korngrößen-spezifische Transportkapazität wird nur in einigen der betrachteten Klassen voll ausgeschöpft. Der Massenstrom der Partikel ist damit in diesen Klassen abhängig von der korngrößen-spezifischen Transportkapazität, während der Massenstrom der Partikel in den übrigen Klassen nach wie vor durch die Menge der losgelösten Partikel bestimmt wird. In diesem Fall ergibt sich die transportierte Sedimentmenge aus der Summe der Teilmengen $q_{s,1}$ und $q_{s,2}$.

Gesetzt dem Fall, in n' Klassen sei

$q_{s,pot,i} \cong q_{s,max}$, kann für $q_{s,1}$ geschrieben werden:

$$q_{s,1} = \sum_{i=1}^{n'} q_{s,max,i} \quad (61)$$

Für $q_{s,2}$ ergibt sich analog:

$$q_{s,2} = \sum_{i=1}^{n-n'} q_{s,pot,i} \quad (62)$$

mit

$$q_{s,pot,i} = q_{s,pot} \cdot FRAC_{init,i} \quad (63)$$

Für die Größenverteilung der transportierten Partikel gilt dann:

$$FRAC_{s,i} = \frac{q_{s,i}}{q_s} \quad (64a)$$

mit

$$q_{s,i} = q_{s,max,i} \quad (64b)$$

für

$$q_{s,pot,i} \cong q_{s,max,i} \quad (64c)$$

sowie

$$q_{s,i} = q_{s,pot,i} \quad (64d)$$

für

$$q_{s,pot,i} < q_{s,max,i} \quad (64e)$$

4.1.6 Erosion/Deposition

Erosion und Deposition (je Zeit- und Flächeneinheit) können nun für jedes einzelne Hangsegment gemäß der folgenden Bilanzgleichung (vgl. 3.2.2) berechnet werden:

$$\gamma = \left(\frac{q_{s,in} - q_{s,out}}{\Delta x} \right) \quad (65)$$

Hierin ist $q_{s,in}$ der Sedimentzustrom aus dem oberhalb liegenden Segment, $q_{s,out}$ ist

der Sedimentstrom aus dem Segment heraus, und Δx ist die Segmentlänge.

Ergibt Gl. 65 einen Wert $\gamma < 0$, so ist dies die in dem betreffenden Hangsegment je Zeit- und Flächeneinheit erodierte Sedimentmenge. Positive Werte für γ geben die akkumulierte Sedimentmenge an, sofern $q_{s,out} = q_{s,max}$. Bei $\gamma = 0$ wird weder Material erodiert noch abgelagert.

4.2 Infiltrationsmodell

4.2.1 Vorgehensweise

Ebenso wie die Erosionskomponente stützt sich der Infiltrationsteil des Gesamtmodells auf kleine, in sich homogene Raum- bzw. Zeitsegmente. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung, bedingt aber auch einen großen rechnerischen Aufwand. Bei der modellmäßigen Beschreibung der Infiltration sind daher gewisse Vereinfachungen nicht zu umgehen. Abgesehen davon sind bestimmte Einflüsse, die das Ausmaß der Infiltration maßgeblich bestimmen, ohnehin einer theoretischen Beschreibung nicht zugänglich (Beispiel: Makroporenfluß).

Eine wichtige Vereinfachung besteht darin, daß der Boden als ein in sich starrer Körper betrachtet wird. Dies bedeutet, daß biogene und witterungsbedingte Veränderungen der Bodenstruktur, wie z.B. die Bildung von Makroporen oder die Entstehung oberflächlicher Verkrustungen, in ihrem Einfluß auf die Infiltrationsrate nicht oder nur unzureichend abgebildet werden können.

Eine stärkere Berücksichtigung der Dynamik der Böden würde ein kontinuierlich arbeitendes Modell erfordern, das in der Lage ist, die zeitlichen Änderungen der Bodenstruktur als fortlaufenden Prozeß abzubilden. Entsprechende Ansätze werden derzeit im Rahmen des WEPP-Projektes verfolgt (s. 2.3). Der Datenbedarf und die Ansprüche an die Rechenleistung wachsen aller-

dings bei solchen Modellen so enorm an, daß ihr praktischer Nutzen zweifelhaft ist.

Aus Gründen der Vereinfachung und der Minimierung des Rechenaufwandes wird darüberhinaus unterstellt, daß

- der Boden homogen (d.h. ungeschichtet) ist
- der Anfangswassergehalt über die Tiefe konstant ist
- die Gasphase im Boden vernachlässigt werden kann.

4.2.2 Modellansatz

Grundlage des im folgenden beschriebenen Ansatzes bildet die von GREEN & AMPT (1911) entwickelte Modellvorstellung, die in den Grundzügen bereits in 3.2.1 erläutert wurde.

k_s sei die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens (in der Transportzone), $x_f(t)$ die von der Zeit t abhängige Eindringtiefe der Befeuchtungsfront, ψ_m das Matrixpotential und ψ_g das Gravitationspotential.

Die Verknüpfung dieser Größen entsprechend dem DARCY-Gesetz ergibt die Infiltrationsrate (ausgedrückt als Massenstrom) an der Bodenoberfläche:

$$i = q_{i,(z=0)}(t) = -k \cdot \frac{\Delta(\psi_m + \psi_g)}{x_f(t)} \quad (66)$$

Gl. 66 kann in eine stationäre und eine instationäre Komponente zerlegt werden:

$$i_1 = -k \cdot \frac{\Delta\psi_g}{x_{f_1}} = -k \cdot g \quad (67)$$

(g = Erdbeschleunigung)

instationäre Komponente:

$$i_1 = -k \cdot \frac{\Delta\psi_m}{x_{f_2}} \quad (68)$$

Im Verlauf der Infiltration rückt die Befeuchtungsfront sukzessiv in den Boden vor (s. 3.2.1). Die Vorrückgeschwindigkeit multipliziert mit der Differenz aus dem Anfangswassergehalt und dem Wassergehalt an der Befeuchtungsfront entspricht hierbei genau derjenigen Wassermenge, die innerhalb des betrachteten Zeitintervalles in den Boden infiltriert ist.

Für die stationäre Komponente gilt daher

$$-k \cdot g = \rho_f \cdot \Delta\Theta \cdot dx_{f_1}/dt \quad (69)$$

$$\text{mit } \Delta\Theta = \Theta_s - \Theta_0$$

und analog für die instationäre Komponente

$$-k \cdot \frac{\Delta\psi_m}{x_{f_2}} = \rho_f \cdot \Delta\Theta \cdot dx_{f_2}/dt \quad (70)$$

$$\text{mit } \Delta\psi_m = \psi_{m_0} - \psi_{m_s}$$

Hierin bedeuten ρ_f die Flüssigkeitsdichte, Θ_s der Wassergehalt bei Sättigung, Θ_0 der Anfangswassergehalt, ψ_{m_0} das Matrixpotential, bezogen auf den Anfangswassergehalt Θ_0 , ψ_{m_s} das Matrixpotential, bezogen auf den Wassergehalt in der Transportzone Θ_s , und t die Zeit.

Unter der Voraussetzung, daß in der Transportzone annähernd Sättigung erreicht wird, ist

$$\psi_{m_s} \approx 0 \quad (71)$$

$$\text{sodaß } \Delta\psi_m \approx \psi_{m_0} \quad (72)$$

$$\text{und } k \approx k_s \quad (73)$$

Nach Umstellung und Integretation erhält man die Eindringtiefe der Befeuchtungsfront als stationäre Komponente:

$$x_{f_1} = -k_s \cdot g \cdot t / (\rho_f \cdot \Delta\Theta) \quad (74)$$

und als instationäre Komponente

$$x_{f_2} = -(2 k_s \cdot \psi_{m_0} \cdot t / (\rho_f \cdot \Delta\Theta))^{1/2} \quad (75)$$

Die Addition der Komponenten x_{f1} und x_{f2} ergibt die Eindringtiefe der Befeuchtungsfront x_f zur Zeit t :

$$x_f = - \left[k_s \cdot g \cdot t / (\rho_f \cdot \Delta\Theta) + (2 k_s \cdot \psi_{m_0} \cdot t / (\rho_f \cdot \Delta\Theta))^{1/2} \right] \quad (76)$$

Nach Einsetzen von Gl. 78 in die DARCY-Gleichung (Gl. 66) enthält diese nur noch solche Variablen, die einer unmittelbaren Messung zugänglich sind (Θ_0) oder über Schätzverfahren aus bekannten Größen abgeleitet werden können (ψ_{m_0} , Θ_s , k_s).

4.2.3 Ableitung der Modellparameter aus Bodenkennwerten

Die Größen ψ_{m_0} , Θ_s und k_s sind meßtechnisch nur mit großem Aufwand bestimmbar. Um die sich daraus ergebenden Einschränkungen in der Anwendbarkeit des Modells zu vermeiden, greift das Infiltrationsteilmodell auf verschiedene Schätzverfahren zurück, die im folgenden näher beschrieben werden.

Schätzung des zum Anfangswassergehalt Θ_0 gehörenden Matrixpotentials ψ_{m_0}

Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung wird durch die sog. "Wasserspannungskurve" beschrieben. Durch ein Verfahren von VAN GENUCHTEN (1980) kann der Verlauf dieser Kurve rechnerisch beschrieben werden:

$$\Theta_{\psi_m} = \Theta_r + \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^m} \quad (77)$$

Hierin ist Θ_{ψ_m} der dem Matrixpotential ψ_m (in N/m²) zugeordnete Wassergehalt, Θ_s der Wassergehalt bei Sättigung, Θ_r der Restwassergehalt bei pF 4.2. Die Parameter α , n und m haben keine physikalische Bedeutung. Da n und m voneinander abhängig sind, kann $m = 1$ gesetzt werden (VERECKEN et al., 1989).

Nach Umstellung der Gleichung und Einsetzen des Anfangswassergehaltes Θ_0 für Θ_{ψ_m} erhält man das dem Anfangswassergehalt zugehörige Matrixpotential ψ_{m_0} :

$$\psi_{m_0} = \left[\left(\frac{\Theta_s - \Theta_r}{\Theta_0 - \Theta_r} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\alpha^n} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (78)$$

Die aufgrund der unterschiedlichen Verwendung der Einheiten in Gl. 66 bzw. 77 erforderliche Umrechnung des Matrixpotentials von ψ_{m_0} (in hPa) auf ψ_m (in J/kg) erfolgt gemäß:

$$\psi_{m_0} = \frac{\Psi_{m_0}}{100 \cdot \rho_b} \quad (79)$$

Schätzung des Sättigungswassergehaltes Θ_s , des Restwassergehaltes Θ_r sowie der Parameter α und n

Zur Bestimmung der für Gl. 78 benötigten Parameter Θ_s , Θ_r , α und n geben VERECKEN et al. (1989) folgende Regressionsgleichungen an:

$$\Theta_s = 0.81 - 0.283 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_b + 0.001 \cdot T \quad (80)$$

$$\Theta_r = 0.015 + 0.005 \cdot T + 0.014 \cdot C_{org} \quad (81)$$

$$\log(\alpha) = -2.486 + 0.025 \cdot S - 0.351 \cdot C_{org} - 2.617 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_b - 0.023 \cdot T \quad (82)$$

$$\log(n) = 0.053 - 0.009 \cdot S - 0.013 \cdot T + 0.00015 \cdot S \quad (83)$$

In diese Gleichungen gehen ein: die Lagerungsdichte ρ_b , der Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} sowie der Ton- und Sandgehalt (in Masse-%).

Unter Verwendung der von VERECKEN et al. angegebenen Formeln wurde die VAN GENUCHTEN-Gleichung für drei Bodenarten ausgewertet: Ton, Schluff und Sand. In Abb. 19 sind die rechnerisch

ermittelten Werte des Matrixpotentials (ψ_m) (umgerechnet in $pF = \log \text{ cmWS}$) als Funktion des Wassergehaltes (Θ) dargestellt. Der Verlauf der Kurven spiegelt die unterschiedlichen Körnungs- bzw. Porositätseigenschaften der Böden gut wieder. Man erkennt, daß je feinkörniger und damit feinporiger ein Boden ist, desto stärker wird das Wasser in den Bodenporen bzw. an den Kornoberflächen gebunden. Bei einem gegebenen Wassergehalt ist daher das Matrixpotential umso größer, je ton- bzw. schluffreicher der Boden ist.

Der Vergleich mit aus der Literatur entnommenen Standardkurven (z.B. HARTGE, 1978) zeigt, daß das Berechnungsverfahren nach VAN GENUCHTEN den Verlauf der Wasserspannungskurven im Bereich bis etwa $pF=4$ im wesentlichen korrekt wiedergibt (siehe auch BACHMANN & HARTGE, 1992). Bei pF -Werten >4 weichen jedoch vor allem die Kurven für Ton und Schluff stark von den Erfahrungswerten ab. Verantwortlich hierfür ist vermutlich die zu ungenaue Schätzung der Modellparameter durch die von VERECKEN et al. angegebenen Gleichungen.

Da unter mitteleuropäischen Verhältnissen die sommerliche Austrocknung nur selten zu pF -Werten >4 führt, kann der in diesem Bereich offensichtliche Fehler in Kauf genommen werden.

Für die in Abb. 19 wiedergegebenen Modellrechnungen wurden folgende Parameterwerte zugrundegelegt:

	Anteile in %		
	Ton	Schluff	Sand
Sandboden	7	15	78
Schluffboden	10	85	5
Tonboden	60	25	15

Lagerungsdichte: 1400 kg/m^3
 C_{org} -Gehalt: 1,0 %

Schätzung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s

Ebenso wie die Wassergehalts-Wasserspannungs-Beziehung kann die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s nur unter großen Schwierigkeiten meßtechnisch ermittelt werden. Sie ist im wesentlichen abhängig von der Lagerungsdichte und der

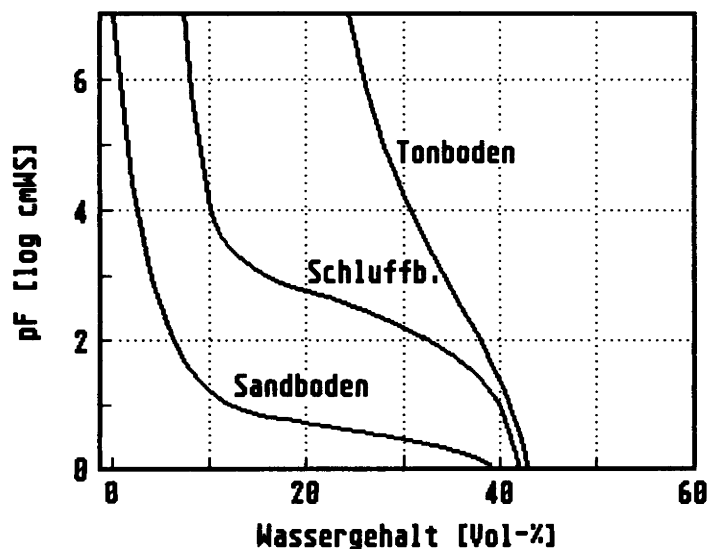


Abb. 19: Auswertung der VAN GENUCHTEN-Gleichung für 3 Bodenarten

Textur. Unter Heranziehung dieser Eigenschaften hat CAMPBELL (1985, S. 54) folgende Näherungsformel abgeleitet:

$$k_s = 4 \cdot 10^{-3} \cdot (1.3 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_b)^{1.3b} \cdot \exp(-0.069 \cdot T - 0.037 \cdot U) \quad (84)$$

Hierin bedeuten ρ_b Lagerungsdichte, T Tongehalt (in kg/kg), U Schluffgehalt (in kg/kg). Der Parameter b wird gemäß Gl. 85 abgeleitet aus dem mittleren Durchmesser der Bodenpartikel \bar{D} und der dazugehörigen Standardabweichung σ_p .

$$b = (10^{-3} \cdot \bar{D})^{-0.5} + 0.2 \cdot \sigma_p \quad (85)$$

Die Auswertung der von CAMPBELL angegebenen Gleichung (Gl. 84) ergibt eine gute Übereinstimmung mit experimentell bestimmten Erfahrungswerten. In Abb. 20 sind die rechnerisch ermittelten Werte der hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und der Bodenart

aufgetragen. Wie der Verlauf der Kurvenzüge zeigt, nimmt die hydraulische Leitfähigkeit mit zunehmender Lagerungsdichte exponentiell ab. Bei gegebener Dichte ist die hydraulische Leitfähigkeit umso größer, je grobkörniger der Boden ist.

4.3 Programmstruktur und Funktionsweise

4.3.1 Überblick

Das auf der Basis der zuvor beschriebenen Modellgleichungen entwickelte Computerprogramm "EROSION 2D" ist vor allem ausgerichtet auf den Einsatz in der landwirtschaftlichen Beratung und auf den Einsatz bei Fachplanungen auf regionaler und kommunaler Ebene. Die Anwendungsmöglichkeiten in der Planung beziehen sich beispielsweise auf

- Planung und Bemessung von Maßnahmen zur Verringerung der Gewässerbelastung durch Stoffeinträge aus landwirtschaftlichen Nutzflächen

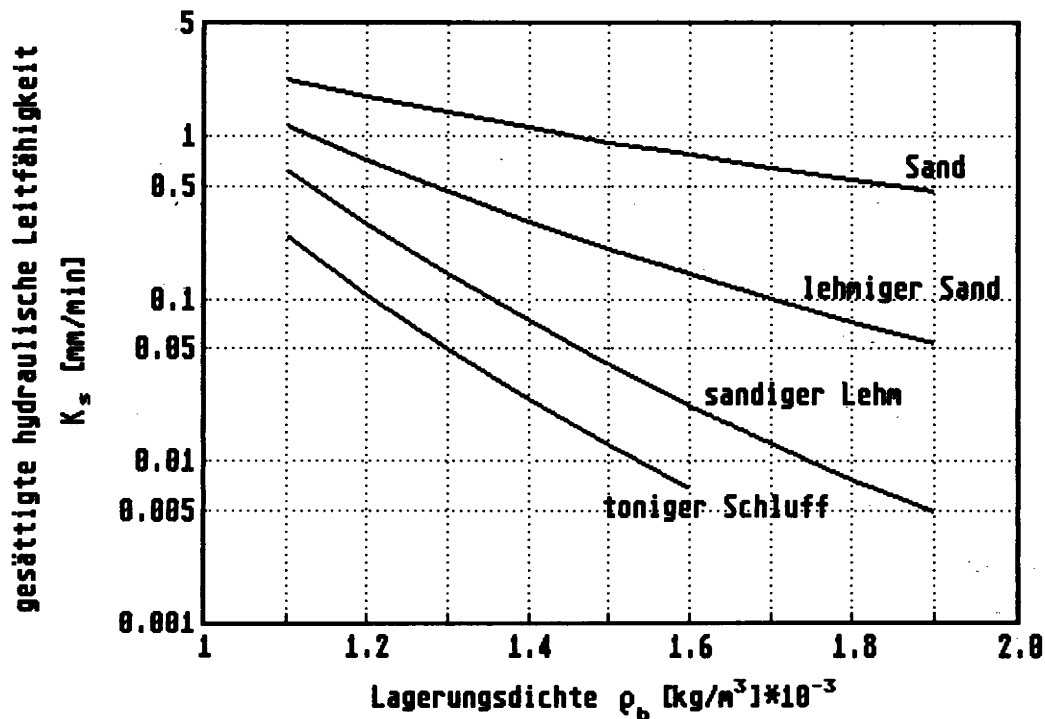


Abb. 20: Auswertung der CAMPBELL-Gleichung für 4 Bodenarten

- umweltverträgliche Planung von Flurbereinigungsmaßnahmen
- Beurteilung von Gefährdungen durch lateralen Schadstoffaustrag aus Deponien und anderen hoch belasteten Flächen.

Die Anforderungen der Planungspraxis wurden bei der Konzeption des Programmes in besonderem Maße berücksichtigt, vor allem durch

- einfache Handhabung aufgrund menügesteuerter Funktionen
- grafikunterstützte Ausgabe der Berechnungsergebnisse
- Einzelereignis- und Langfristsimulation
- wenige, auf ein Minimum beschränkte Eingabegrößen
- Anpassung an verschiedene PC-Systeme (IBM, ATARI-ST).

4.3.2 Menüstruktur

Einen Überblick über die Menüstruktur des Programmes liefert Abb. 21. Das Hauptmenü umfaßt 6 Einträge. Zu jedem dieser Einträge existiert ein Untermenü, in dem jeweils sachlich verwandte Programmfunktionen zusammengefaßt sind. Das Menü

'Daten' enthält beispielsweise alle Funktionen, die für die Eingabe und Speicherung bzw. für das Einlesen von Daten notwendig sind.

Sämtliche Aktionen des Anwenders auf der Menüebene werden durch das Programm überwacht, d.h. auf ihren logischen Zusammenhang hin überprüft. Die Funktion 'Berechnen' zum Beispiel kann sinnvollerweise nur ausgeführt werden, wenn zuvor die notwendigen Eingangsgrößen eingegeben oder von einem Datenträger geladen wurden. Ist dies nicht der Fall, gibt das Programm eine entsprechende Fehlermeldung aus.

Intern ist das Programm in Unterprogramme bzw. Prozeduren gegliedert. Die modellspezifischen Rechenvorgänge sind in der Prozedur 'Berechnen' zusammengefaßt. Sie übernimmt die Daten aus den 'Eingabe'-Prozeduren und liefert ihrerseits die Daten für die 'Ausgabe'-Prozeduren.

Mit wenigen Ausnahmen werden die Prozeduren direkt über die Auswahl der verschiedenen Menüeinträge angesprochen. Menüstruktur und Programmstruktur sind damit im wesentlichen identisch.

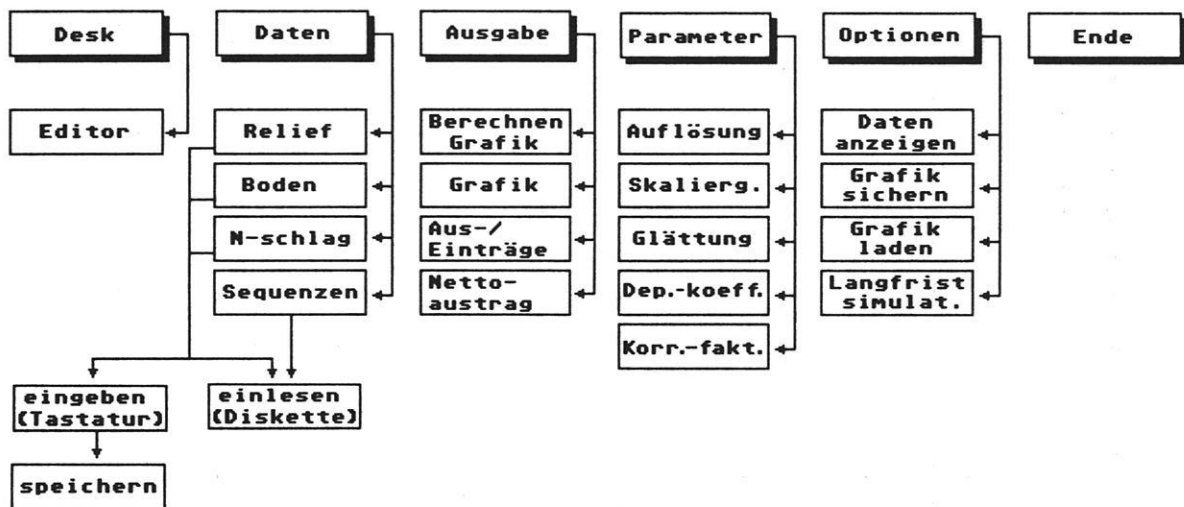


Abb. 21: EROSION 2D Menüstruktur

4.3.3 Eingabegrößen und Datenverwaltung

Die in EROSION 2D verwendeten Eingabegrößen lassen sich in 3 größere Gruppen einteilen: Reliefparameter, Bodenparameter und Niederschlagsparameter. Diese Gruppen umfassen folgende, in Tab. 4 zusammengestellte Einzelgrößen.

Darüber hinaus berücksichtigt das Programm eine Anzahl weiterer Parameter, die jedoch als feste Größen nicht durch den Anwender beeinflusst werden können. Hierzu zählen u.a. die Flüssigkeits- und Partikeldichte, die Viskosität sowie die Erdbeschleunigung. Programmintern festgelegt sind ferner die Segmentlänge und -breite (Δx und Δy) und die Intervalldauer (Δt). Hierfür gelten:

$$\Delta x = 1\text{m}, \Delta y = 1\text{m}, \Delta t = 10\text{min.}$$

Aufgrund der unterschiedlichen Qualität der in Tab. 4 zusammengestellten Parameter ist es zweckmäßig, diese - entsprechend den genannten Gruppen - in getrennten Dateien zu verwalten. Somit ergeben sich 3 Dateitypen: die Reliefparameter-Datei, die Bodenparameter-Datei und die Niederschlagsparameter-Datei.

Die Reliefparameter-Datei enthält die geometrischen Daten des Ausgangsprofils. Die Datei umfaßt mindestens 2 Koordinatenpaare, durch die der obere und untere

Punkt des Hangprofils festgelegt sind. Für eine adäquate Berücksichtigung des Reliefs sind jedoch in der Regel mehr als zwei Stützstellen notwendig.

Die Boden- und Niederschlagsparameter beziehen sich - im Unterschied zu den Reliefparametern - stets auf ein konkretes Einzelereignis oder auf einen zeitlichen Ausschnitt eines solchen Ereignisses.

Die Bodenparameter-Datei enthält die boden- und bedeckungsspezifischen Daten beliebig vieler in sich homogener Hangabschnitte $\geq 1\text{m}$. Je Ereignis kann immer nur ein Parametersatz angelegt werden, d.h. die Bodenparameter werden für die Dauer des Einzelereignisses als stationär angesehen. Es ist jedoch auch möglich, ein einzelnes Ereignis in mehrere zeitliche Abschnitte $\geq 10\text{min}$ zu zerlegen und die entsprechenden Bodenparameter-Dateien zu einer Sequenz zu verknüpfen. Diese Sequenzen werden von dem Programm automatisch erkannt und in der vom Anwender festgelegten Reihenfolge abgearbeitet.

In der Niederschlagsparameter-Datei werden die Niederschlagsdauer und die Niederschlagsintensität (in 10min-Intervallen) abgelegt. Mehrere Niederschlagsparameter-Dateien lassen sich, analog zu den Bodenparameter-Dateien, zu einer Sequenz verknüpfen.

Tab. 4: Eingabegrößen

Reliefparameter	Bodenparameter	Niederschlagsparameter
Hanglänge Hanggeometrie (x-, y-Koordinaten)	Körnung Lagerungsdichte organ. Kohlenstoff Anfangswassergeh. Erosionswiderstand Rauhigkeitsbeiwert Bedeckungsgrad	Niederschlagsdauer Niederschlagsintensität

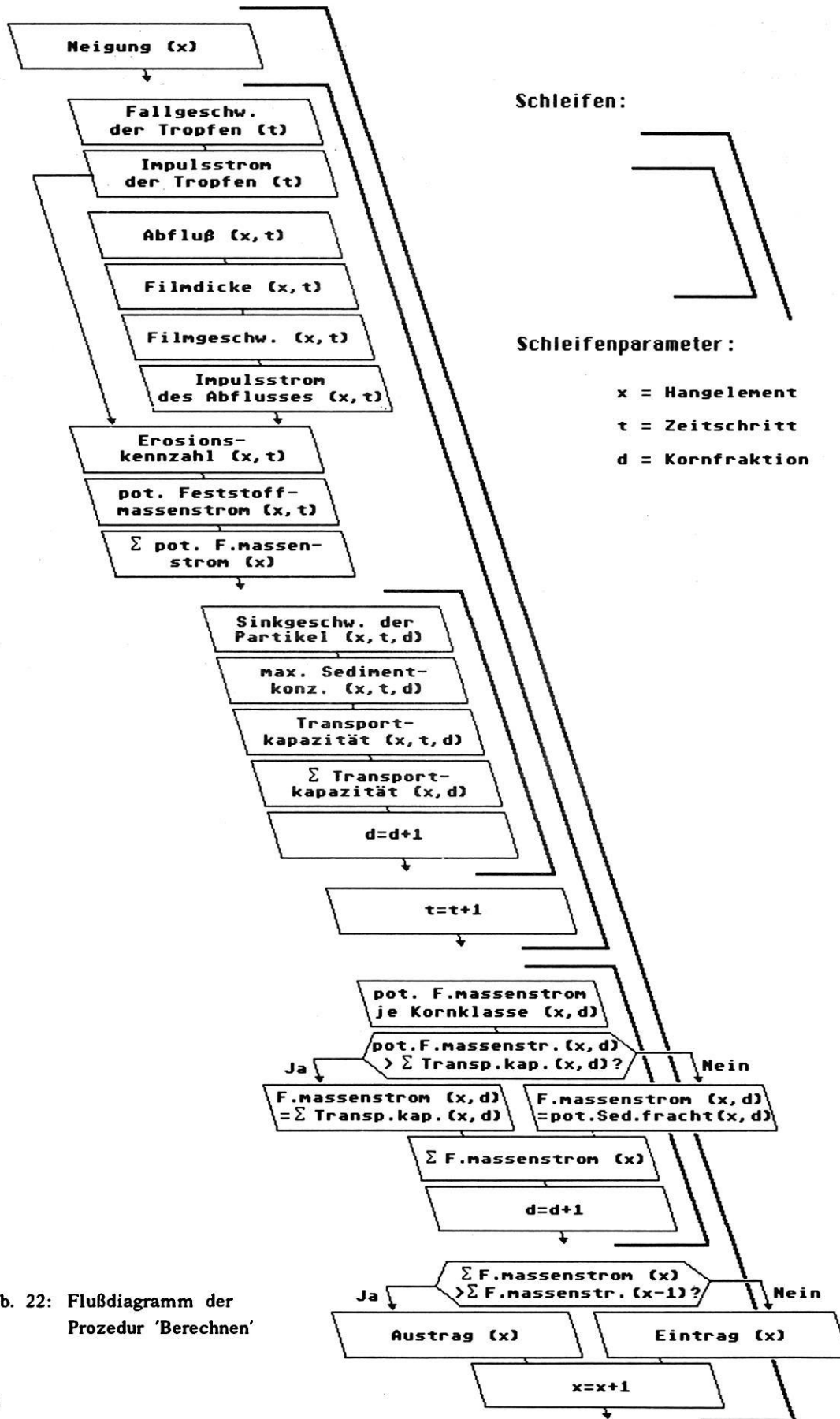


Abb. 22: Flußdiagramm der Prozedur 'Berechnen'

4.3.4 Die Prozedur 'Berechnen'

Abb. 22 zeigt ein vereinfachtes, auf die wesentlichen Einzelschritte reduziertes Schema der Prozedur 'Berechnen'. Alle modellspezifischen Rechenoperationen sind in dieser Prozedur zusammengefaßt.

Die Berechnungsprozedur besteht aus 4 ineinander geschachtelten Schleifen, die in Abhängigkeit von den Schleifenparametern: x (= Anzahl der Hangelemente), t (= Anzahl der Zeitschritte) und d (= Anzahl der Kornfraktionen) mehrmals durchlaufen werden.

Die Anzahl der Hangelemente x entspricht hierbei stets der Hanglänge in Metern, da die Segmentlänge, unabhängig von der jeweils gewählten Auflösung (s. 4.3.6), intern auf $\Delta x = 1\text{m}$ festgelegt ist. In ähnlicher Weise ergibt sich die Anzahl der Zeitschritte t aus der Niederschlagsdauer T in Minuten, geteilt durch 10 (da $\Delta t = 10\text{min}$). Die Anzahl der Kornfraktionen entspricht stets 9. (Das Programm berücksichtigt die Korngrößenklassen Ton, Schluff und Sand - jeweils unterteilt in fein, mittel, grob.)

Die inneren Schleifen liefern - aufsummiert über die Anzahl der Zeitschritte Δt - den potentiellen, d.h. durch Loslösung bedingten Feststoffmassenstrom ($q_{s,pot}$) und die korngößenspezifische Transportkapazität ($q_{s,max}$). Der Vergleich dieser Größen ergibt den tatsächlichen Feststoffmassenstrom (q_s), abhängig von x .

In der äußeren Schleife wird schließlich gemäß der Kontinuitätsgleichung (Gl. 65) für jedes der Hangelemente der Feststoffeintrag bzw. -austrag berechnet.

4.3.5 Ausgabegrößen

Das Programm liefert die in Tab. 5 zusammengestellten Ausgabegrößen.

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

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

Über das 'Ausgabe'-Menü können die berechneten Daten abgerufen werden. Die flächenbezogenen Größen lassen sich sowohl tabellarisch als auch grafisch ausgeben. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 23. Den oberen Teil der Grafik nimmt die Darstellung des Geländeprofiles ein. Im unteren Teil sind Feststoffaustrag (negative Werte) bzw. -eintrag (positive Werte) aufgetragen.

Tab. 5: Ausgabegrößen

flächenbezogene Größen	punktbezogene Größen
Feststoffaustrag	Abfluß
Feststoffeintrag	Sedimentmenge
	Sedimentkonzentration
	Anteil Ton
	Anteil Schluff
	Austrag (netto)

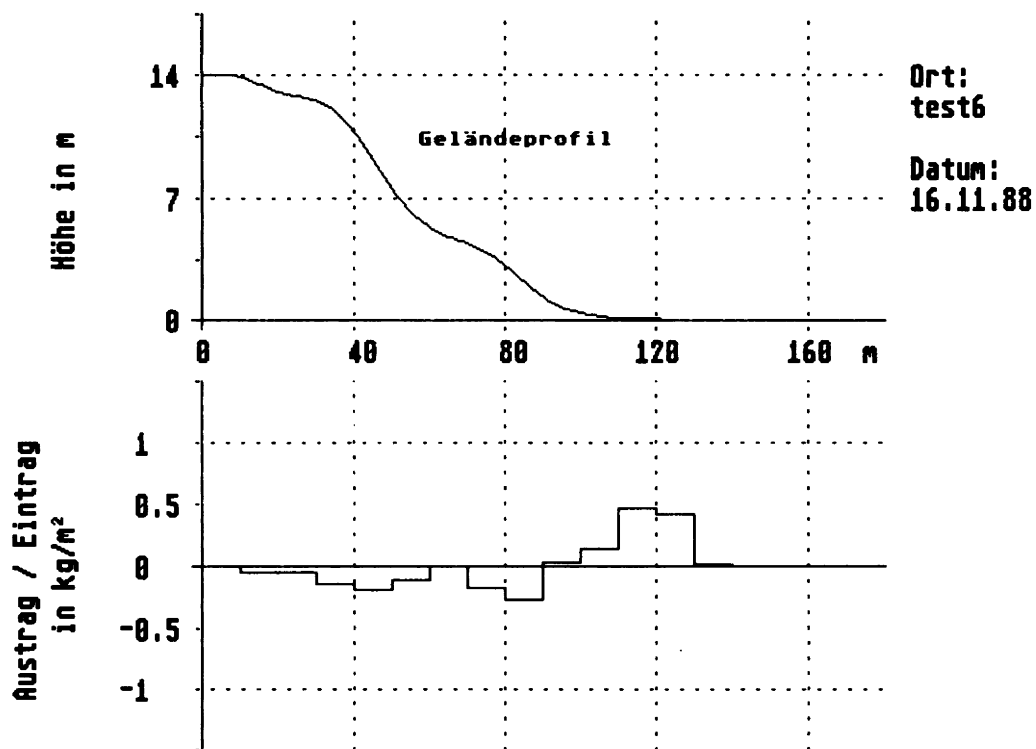


Abb. 23: Grafische Ausgabe der Berechnungsergebnisse

4.3.6 Parameter

Ein Teil der intern voreingestellten Parameter, auf die das Programm während der Berechnung zurückgreift, können bei Bedarf durch den Anwender variiert werden. Dies kann entweder durch ein spezielles Konfigurationsprogramm geschehen (die Änderungen bleiben dann permanent wirksam), oder innerhalb des Programmes selbst - über den Menüpunkt 'Parameter'.

Die Einstellungsmöglichkeiten beziehen sich im einzelnen auf folgende Größen:

Auflösung. Das Programm rechnet intern mit einer Auflösung von $\Delta x = 1\text{m}$, u.a., um Wege, Gräben, Hangstufen etc. adäquat berücksichtigen zu können. Andererseits täuscht diese hohe Auflösung mitunter eine Genauigkeit der Berechnung vor, die schon wegen der begrenzten räumlichen Dichte der Eingangsparameter (Relief- und Boden

parameter) nicht realisierbar ist. Der Anwender kann daher je nach Fragestellung und Datenlage die Auflösung, mit der die Berechnungsergebnisse ausgegeben werden sollen, selbst festlegen. Beliebige Vielfache der internen Auflösung ($\Delta x = 1\text{m}$) sind hierbei erlaubt.

Die interne Auflösung ($\Delta x = 1\text{m}$) bleibt von der durch den Anwender eingestellten Auflösung unberührt. Die zunächst auf der Basis der 1m-Segmente berechneten Daten werden erst in einem weiteren Rechengang, entsprechend der eingegebenen Auflösung, umgerechnet (gemittelt). In Abb. 24 sind anhand eines Beispielen verschiedene Auflösungen gegenübergestellt.

Skalierung. Die Skalierung der durch das Programm erzeugten Grafik (s. Abb. 23) erfolgt automatisch unter Berücksichtigung der in dem darzustellenden Datensatz auftretenden Extremwerte. Der Anwender hat

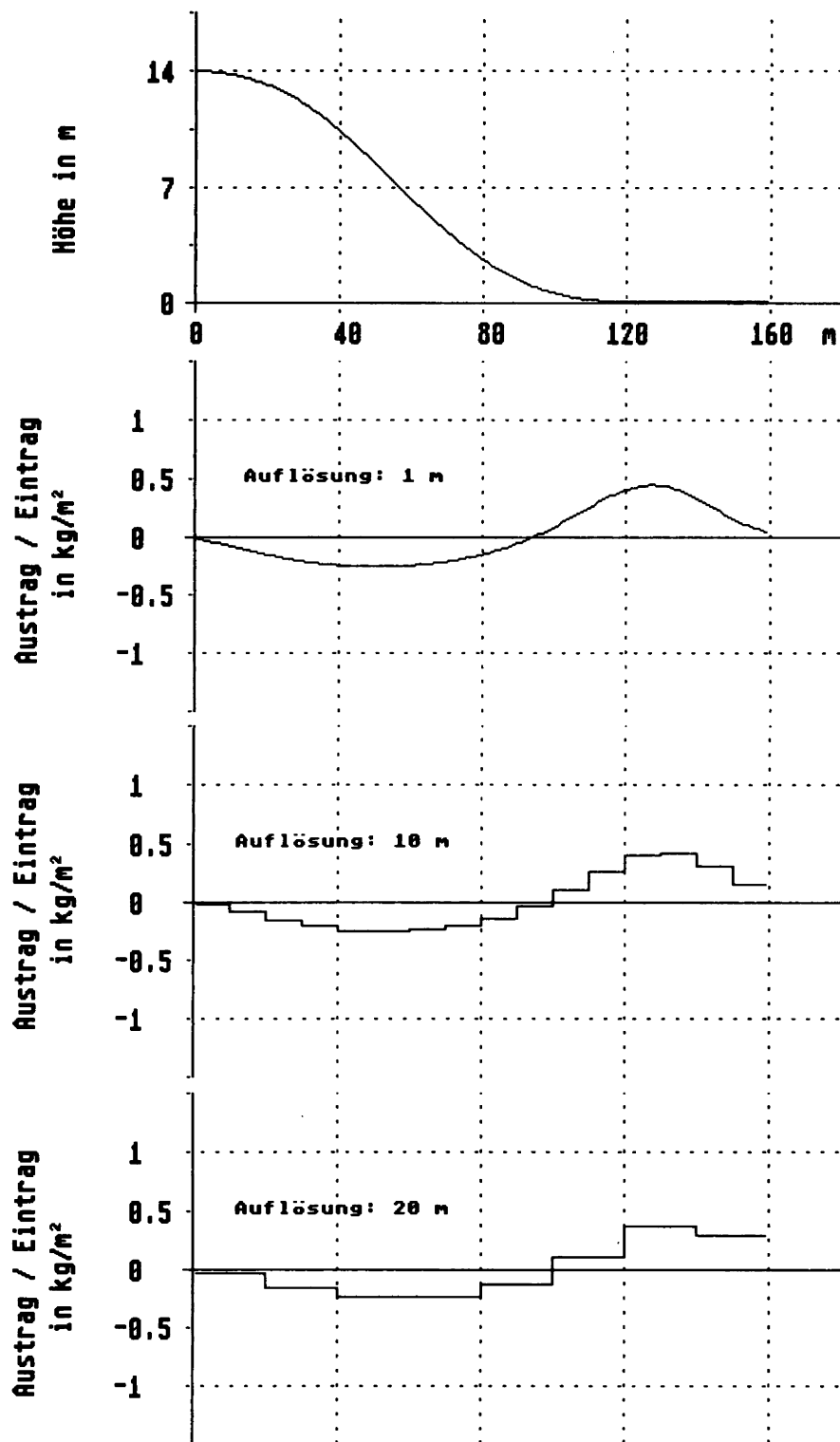


Abb. 24: Vergleich unterschiedlicher Auflösungen

jedoch in begrenztem Maße die Möglichkeit, die Skalierung zu beeinflussen.

Option 1 gestattet, daß die Extreme des Feststoffaustrages bzw. -eintrages den Skalenbereich der Grafik bis um maximal eine Zehnerpotenz überschreiten. Dies kann dazu führen, daß einzelne Werte außerhalb der Grafik liegen und damit nicht mehr sichtbar sind. Option 2 schließt diesen Fall aus, d.h. es liegen stets alle Werte innerhalb des Skalenbereiches.

Glättung. Der Menüpunkt 'Glättung' bezieht sich auf die programminterne Interpolation der eingegebenen Höhenpunkte (x-, y-Koordinaten des Geländeprofiles).

Unabhängig von der jeweils gewählten Auflösung wird intern immer eine Segmentlänge von $\Delta x = 1\text{m}$ zugrundegelegt (s. 4.3.3). Liegen die eingegebenen x-, y-Koordinaten nicht in dieser Genauigkeit vor, interpoliert das Programm die da-

zwischenliegenden Höhenwerte für jeden Meter des Geländeprofiles. Die Glättungsparameter p und q beeinflussen dabei den Verlauf des durch die eingegebenen Höhenpunkte gelegten Kurvenzuges. Die Bedeutung der Parameter verdeutlicht Abb. 25.

Das obere Bild zeigt den interpolierten Verlauf des Geländeprofiles bei korrekter Einstellung der Glättungsparameter. Bei falscher Einstellung ergibt sich der im unteren Bild dargestellte Verlauf.

Depositionskoeffizient. Dieser Koeffizient wurde in Zusammenhang mit der Ableitung der Transportkapazität (s. Kap. 4.1.3) eingeführt und beeinflußt neben der Deposition auch die berechnete Korngrößenzusammensetzung des ausgetragenen Sedimentes. Je größer der Wert des Depositionskoeffizienten ist, desto stärker reichern sich unter ansonsten unveränderten Bedingungen die feineren Sedimentpartikel gegenüber den gröberen an. Die Anpassung des Depo-

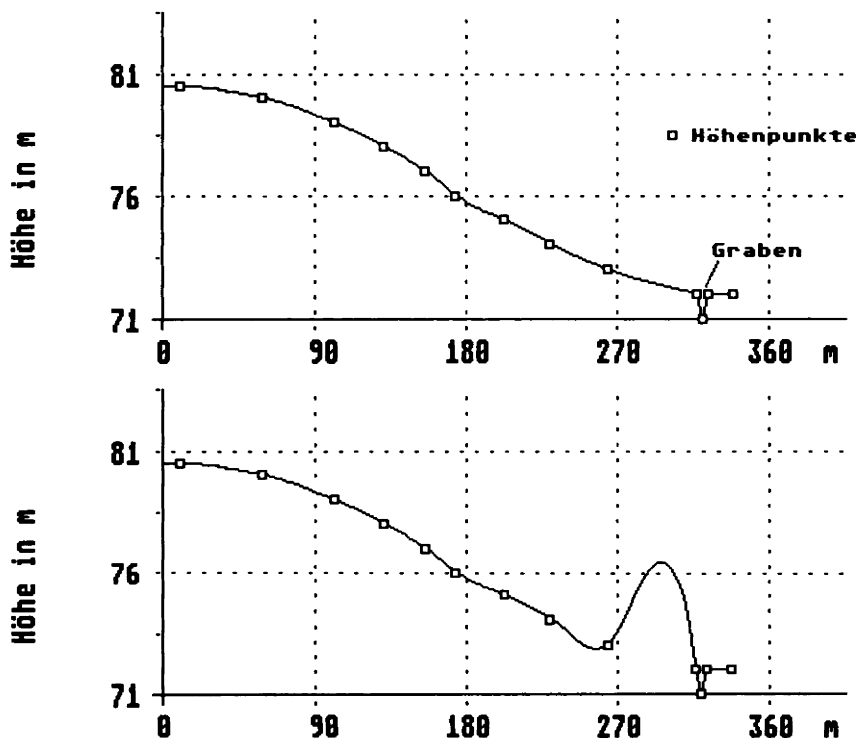


Abb. 25: Bedeutung der Glättungsparameter

sitionskoeffizienten anhand experimentell ermittelter Kornverteilungen ergab ein κ von ≈ 1000 (vgl. Kap. 4.1.3.). Dieser Durchschnittswert ist im Programm voreingestellt. Die ggf. nötige Feinabstimmung des Depositionskoeffizienten beschreibt Kap. 6.5.

Korrekturfaktor. Dieser Faktor ermöglicht die Berücksichtigung im Modell zunächst vernachlässigter Einflüsse auf die Infiltrationsrate. Der Faktor ist auf den Wert 1 (keine Korrektur) voreingestellt. Werte > 1 bewirken eine positive Korrektur der Infiltrationsrate, z. B. zur Berücksichtigung von Makroporenflüssen. Werte < 1 reduzieren die Infiltrationsrate, um etwa die Wirkung von Verkrustungen oder oberflächlichen Verdichtungen zu berücksichtigen.

Der Korrekturfaktor muß empirisch ermittelt oder aus vorhandenen Vergleichsdaten abgeschätzt werden (s. Kap. 6.6).

4.3.7 Optionen

Das Menü 'Optionen' stellt dem Anwender folgende Funktionen zur Verfügung:

Daten zeigen. Beim Einlesen abgespeicherter Daten von Diskette oder Festplatte kann entweder der gesamte Datensatz oder nur der Kopf der Datei am Monitor angezeigt werden. (Option 2 spart Zeit.)

Grafik sichern/laden. Die durch das Programm erzeugten Grafiken können gesichert, d.h. auf Diskette gespeichert oder ausgedruckt werden. Gespeicherte Grafiken lassen sich über die Funktion 'Grafik laden' wieder am Bildschirm sichtbar machen, z.B. um verschiedene Berechnungsvarianten zu vergleichen.

Langfristsimulation. Die langfristige Simulation der Erosions- bzw. Akkumulationsvorgänge basiert auf der Koppelung einer größeren Anzahl erosiv wirksamer Einzelereignisse. Hierzu werden zwei sich ergän-

zende Verfahren angewandt:

Das erste Verfahren besteht in der Verknüpfung mehrerer Einzelereignisse zu einer Sequenz. Eine derartige Sequenz umfaßt beispielsweise die Erosionsereignisse eines Jahres oder einer bestimmten Jahreszeit. Zu jeder der sequentiell verknüpften Einzelereignisse existieren jeweils eine Boden- und eine Niederschlagsparameter-Datei. Sequentielle Dateien werden von dem Programm automatisch erkannt und verarbeitet.

Das sequentielle Verfahren eignet sich besonders für die Simulation des saisonalen und jährlichen Verlaufs der Erosion (bzw. Akkumulation). Soll ein längerer Zeitraum simuliert werden (mehrere Jahre bis mehrere hundert Jahre), so kommt zusätzlich ein iteratives Verfahren zum Einsatz. Basis der Iteration kann hierbei ein einzelnes Ereignis oder eine Sequenz aus mehreren Ereignissen sein (siehe Beispiele in Kap. 5.2.2).

Sowohl bei der sequentiellen als auch bei der kombiniert sequentiell-iterativen Vorgehensweise werden die erosions- bzw. depositionsbedingten Änderungen der Geländeoberfläche kontinuierlich berücksichtigt, d.h. nach jedem Einzelereignis wird das Hangprofil entsprechend dem Austrag oder der Akkumulation verändert.

Bei der Simulation eines größeren Zeitraumes kann es darüber hinaus sinnvoll sein, auch bestimmte, durch das Modell nicht unmittelbar beschreibbare geomorphologische Prozesse - zumindest dem Ergebnis nach - in die Simulation einzubeziehen (beispielsweise Veränderungen des Niveaus der Erosionsbasis oder der Wasserscheide). Zu diesem Zweck kann dem Programm ein fester Wert eingegeben werden, um den die Erosionsbasis bzw. die Wasserscheide je Iterationsschritt vertikal, in positiver oder negativer Richtung, verändert werden soll. Die Erosionsbasis kann darüber hinaus auch

in ihrer horizontalen Lage verschoben werden (etwa um die Effekte durch laterale Erosion eines unmittelbar an den Hang anschließenden Vorfluters abschätzen zu können).

Die Daten des am Ende der Simulation erhaltenen Hangprofils werden in einer gesonderten Datei abgespeichert und können bei Bedarf für weitere Simulationsrechnungen herangezogen werden. Die erosions- bzw. depositionsbedingten Änderungen der Geländeoberfläche werden in der graphischen Ausgabe der Berechnungsergebnisse durch die Überlagerung des Ausgangs- und des Endprofils sichtbar gemacht.

4.4 Vergleich mit anderen Modellansätzen

Zieht man die Modelle CREAMS und WEPP für einen Vergleich mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modellansatz (EROSION 2D) heran, so sind hinsichtlich der grundsätzlichen Vorgehensweise zahlreiche Gemeinsamkeiten festzustellen:

- Die genannten Modelle gehen bei der Beschreibung der Erosion von Einzelergebnissen aus.
- Den räumlichen Bezug bilden Hänge oder kleine Einzugsgebiete.
- Loslösung und Transport der Partikel werden als zwei voneinander unabhängige Teilprozesse beschrieben.
- Austrag und Deposition leiten sich aus der Kontinuitätsgleichung ($\gamma = \Delta q_s / \Delta x$) ab.
- Die hydrologischen Komponenten der Modelle basieren auf dem Infiltrationsansatz von GREEN & AMPT (1911).

In verschiedenen anderen Punkten bestehen dagegen grundlegende Unterschiede:

- CREAMS und WEPP greifen weitgehend auf Ansätze zurück, die ursprünglich zur Beschreibung des Sedimenttransportes in Fließgewässern entwickelt wurden (z.B. YALIN-Gleichung). Dem EROSION 2D Modell liegt im Unterschied dazu ein neuer, bisher für die modellmäßige

Beschreibung der Erosion noch nicht verwendeter Impulsansatz zugrunde (s. 4.1).

- CREAMS und WEPP unterscheiden zwischen Rillen- und Zwischenrillenerosion. Eine solche Unterscheidung ist im Rahmen des EROSION 2D Modells zunächst nicht vorgesehen, da die spezifischen Eigenschaften der Rillen- bzw. Zwischenrillengebiete einer isolierten meßtechnischen Erfassung nur schwer zugänglich sind.

ASTALOSCH (1990) hat anhand eines Anwendungsbeispiels die Modelle CREAMS und EROSION 2D einem praktischen Test unterzogen. Das EROSION 2D Modell stand dabei in einer Vorabversion zur Verfügung, die noch nicht den in dieser Arbeit beschriebenen Funktionsumfang umfaßte.

Die Eingangsgrößen der Modelle wurden für ein Testgebiet im Kraichgau (Baden-Württemberg) unter Verwendung von Ergebnissen aus Berechnungsversuchen ermittelt. Die Auswertung der auf dieser Basis durchgeführten Modellrechnungen ergab:

- CREAMS lieferte bis zu neunfach überhöhte Bodenabträge. Brauchbare Ergebnisse waren nur für unrealistische Erodierbarkeiten und Oberflächenrauigkeiten zu erhalten. Die Anwendung des Modells erforderte - vor allem aufgrund der großen Zahl der Eingabeparameter - einen relativ hohen Arbeitsaufwand.
- Bei der Anwendung des EROSION 2D-Modells lagen die Schwierigkeiten vor allem in der Bestimmung der Modellparameter. Auf die Bedingungen des Untersuchungsgebietes übertragbare Angaben zum Erosionswiderstand waren zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Vorhabens nicht verfügbar - eine von den Versuchsdaten unabhängige Prüfung des Modells daher unmöglich. Positiv angemerkt wurde, daß die Anwendung des Modells mit Kenntnis der wichtigsten Niederschlags- und Bodenparameter ohne größere Einarbeitung möglich ist.

5. Modellvalidierung

5.1 Vorgehensweise

Die im Verlauf isolierter Einzelereignisse ablaufenden Erosionsvorgänge sind einer quantitativen Erfassung nur schwer zugänglich. Eine direkte Überprüfung der Modellergebnisse ist daher nur in wenigen Fällen (und dann auch nur für kleine, in sich homogene Geländeausschnitte) möglich. Die Gültigkeit des Modells kann daher nur unzureichend anhand gemessener Daten überprüft werden. Zur Validierung des Modells werden deshalb folgende Vorgehensweisen miteinander kombiniert:

- Sensitivitätsanalysen
- Plausibilitätstests
- Vergleich mit Meßwerten (soweit vorhanden).

Aufgrund der internen Gliederung des Modells in einen Erosions- und einen Infiltrationsteil kann das Verhalten der Teilmodelle sowohl im Zusammenhang wie auch unabhängig voneinander analysiert werden. Im folgenden wird zunächst der Erosionsteil des Modells betrachtet.

5.2 Erosionsmodell

5.2.1 Sensitivitätsanalysen

In den folgenden Modellrechnungen werden anhand hypothetischer Fallbeispiele einzelne Einflußgrößen - wie beispielsweise die Hangneigung - systematisch variiert. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse gibt Aufschluß darüber, wie sensitiv das Modell gegenüber diesen Parametern reagiert.

Sensitivität gegenüber Eigenschaften des Reliefs

Ein wesentlicher Vorteil des in dieser Arbeit entwickelten Modells besteht darin, daß die Eigenschaften des Reliefs sehr differenziert berücksichtigt werden können.

Es liegt daher nahe, zunächst den Einfluß der Hanggeometrie auf das Verhalten des Austrages zu untersuchen. Hierbei werden folgende Varianten unterschieden:

- gerader (gestreckter) Hang
- konvexer Hang
- konkaver Hang
- konvex-konkaver Hang
- unregelmäßig geformter Hang.

Die Hanglänge beträgt in allen Fällen 130m und die Höhendifferenz zwischen dem obersten Punkt des Hanges und der Hangbasis 14m.

Das Ergebnis der Simulation für den Fall des geraden Hanges zeigt Abb. 26. In der oberen Hälfte des Bildes ist das Hangprofil dargestellt, in der unteren Hälfte der berechnete Bodenabtrag. Man erkennt, daß der Austrag je Flächeneinheit mit der Hanglänge zunimmt, wobei die Zunahme im oberen Teil des Hanges größer ist als im unteren.

Trägt man anstelle des Austrages die transportierte Sedimentmenge ($Q_s = q_s \cdot t$) als Funktion der Hanglänge auf (Abb. 26b), so ist zu erkennen, daß diese zunächst exponentiell, mit weiter zunehmender Hanglänge annähernd linear anwächst.

Bei konvexer Wölbung des Hanges nimmt, wie Abb. 27 zeigt, der Austrag sehr viel stärker zu als im Fall des geraden Hanges. Die transportierte Sedimentmenge steigt über den gesamten Verlauf des Profils exponentiell an.

Ein völlig anderes Bild ergibt sich für den Fall des konkaven Profils. Hier steht dem mit der Hanglänge zunehmenden Abfluß ein abnehmendes Gefälle gegenüber. Die Einflüsse der Hanglänge und der Hangneigung gleichen sich damit nahezu aus. Der Austrag stellt sich infolgedessen bereits im oberen

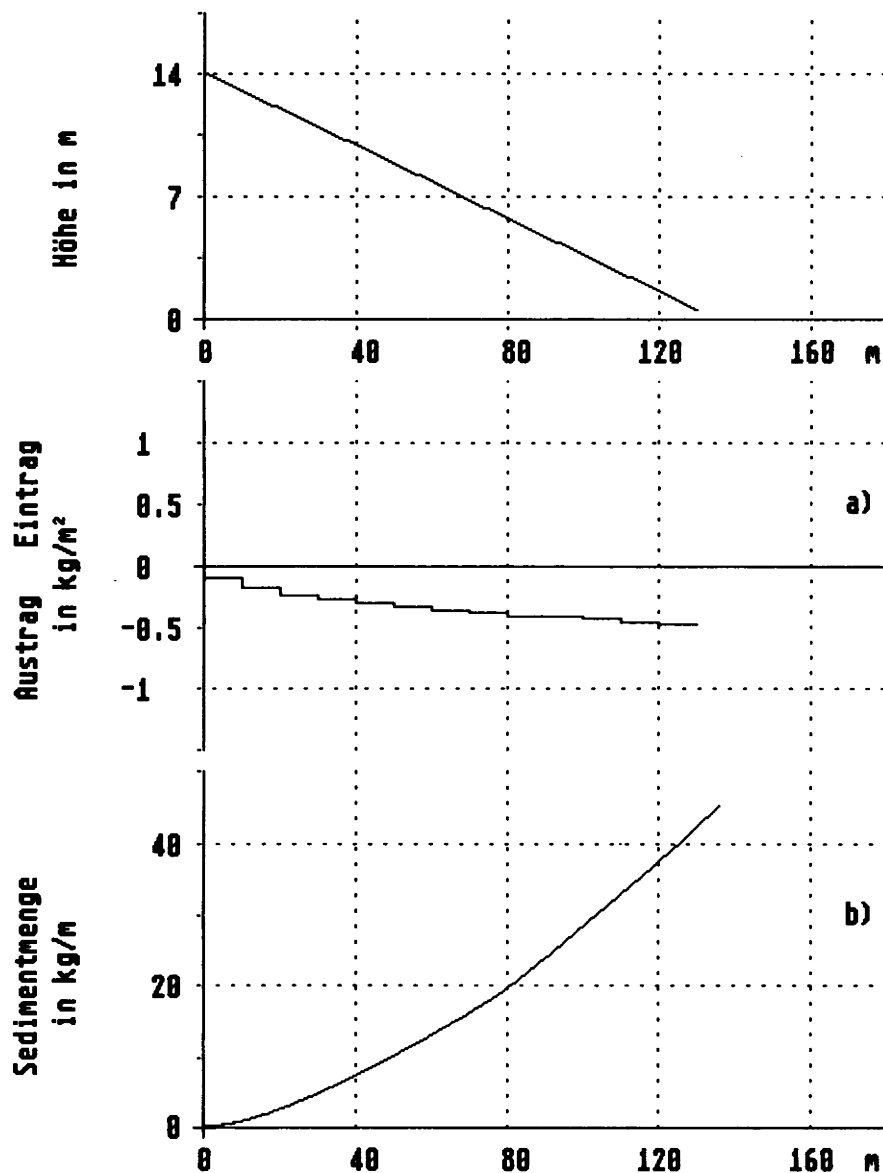


Abb. 26: Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines geraden Hanges

Teil des Hanges auf ein annähernd konstantes Niveau ein (Abb. 28 a). Dementsprechend nimmt die transportierte Sedimentmenge \pm linear mit der Hanglänge zu (Abb. 28 b).

Abb. 29 zeigt das Verhalten des Austrages am Beispiel eines konvex-konkav gewölbten Hanges. Im oberen, konvexen Abschnitt des Hanges nimmt der Austrag zunächst zu, erreicht im mittleren Drittel des Profils

ein Maximum und nimmt mit dem Übergang zum unteren, konkaven Abschnitt des Hanges rasch wieder ab. Am Fuß des Hanges geht der Austrag schließlich gegen Null.

Die transportierte Sedimentmenge (Abb. 29 b) nimmt zunächst exponentiell - dann annähernd linear mit der Hanglänge zu und bewegt sich dann auf einen näherungsweise konstanten Wert zu.

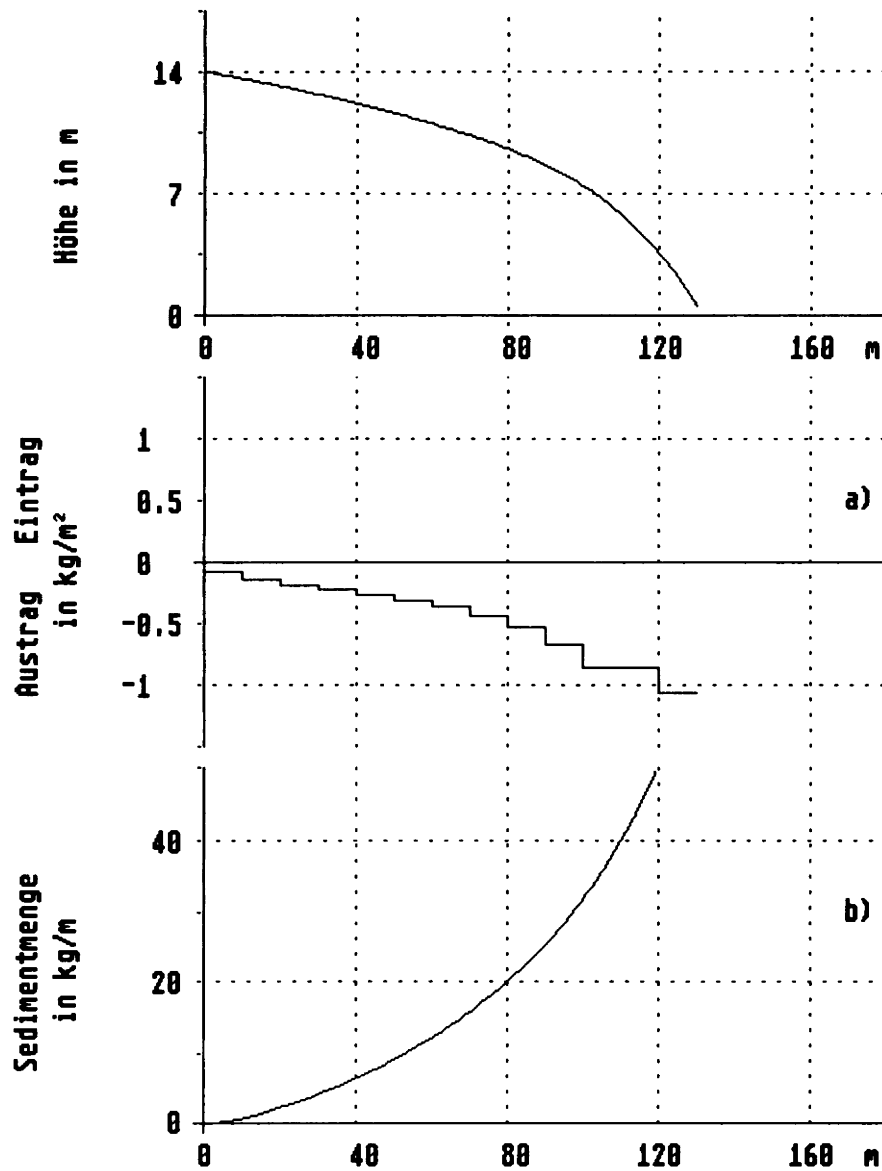


Abb. 27: Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines konvex gewölbten Hanges

Im Falle des stärker gegliederten Hanges (Abb. 30) erreicht der Austrag jeweils im Bereich der konvexen Hangabschnitte ein Maximum, während der konkave Bereich im mittleren Teil des Hanges nur in sehr geringem Maße der Erosion unterliegt. Das Maximum im unteren Teil des Hanges ist aufgrund des größeren Abflusses stärker

ausgeprägt als dasjenige im oberen Hangbereich.

Die transportierte Sedimentmenge steigt jeweils in den konvexen Hangabschnitten steil an. In den konkaven Abschnitten stellt sich dagegen ein annähernd konstanter Wert ein (Abb. 30b).

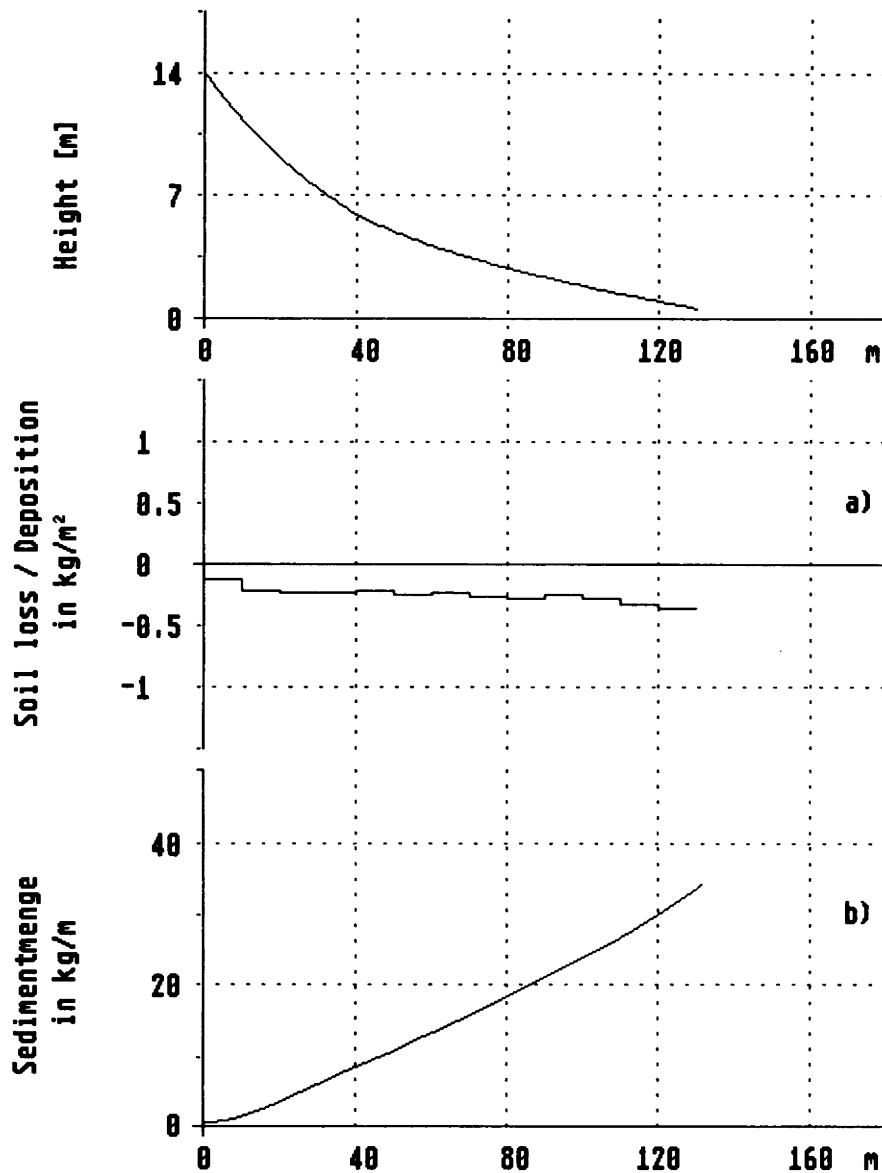


Abb. 28: Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines konkav gewölbten Hanges

Die in den Beispielsrechnungen variierte Geometrie der Hänge bestimmt nicht nur das Verhalten des Austrages mit der Hanglänge, sondern beeinflusst auch die absolute Menge des Austrages. Da die Hanglänge und die Höhendifferenz konstant gehalten wurden, lassen sich die für die verschiedenen Varianten berechneten Netto-Austräge unmittelbar miteinander vergleichen.

Zieht man den Austrag des geraden Hanges als Bezugsgröße heran (= 100%), so ergeben sich die in Abb. 31 dargestellten Abhängigkeiten. Es fällt auf, daß der konvexe Hang mit Abstand den größten Austrag liefert (139%) und als einziger den Austrag des geraden Hanges übersteigt. Der geringste Austrag ergibt sich im Falle des konvex-konkav gewölbten Hanges (57%).

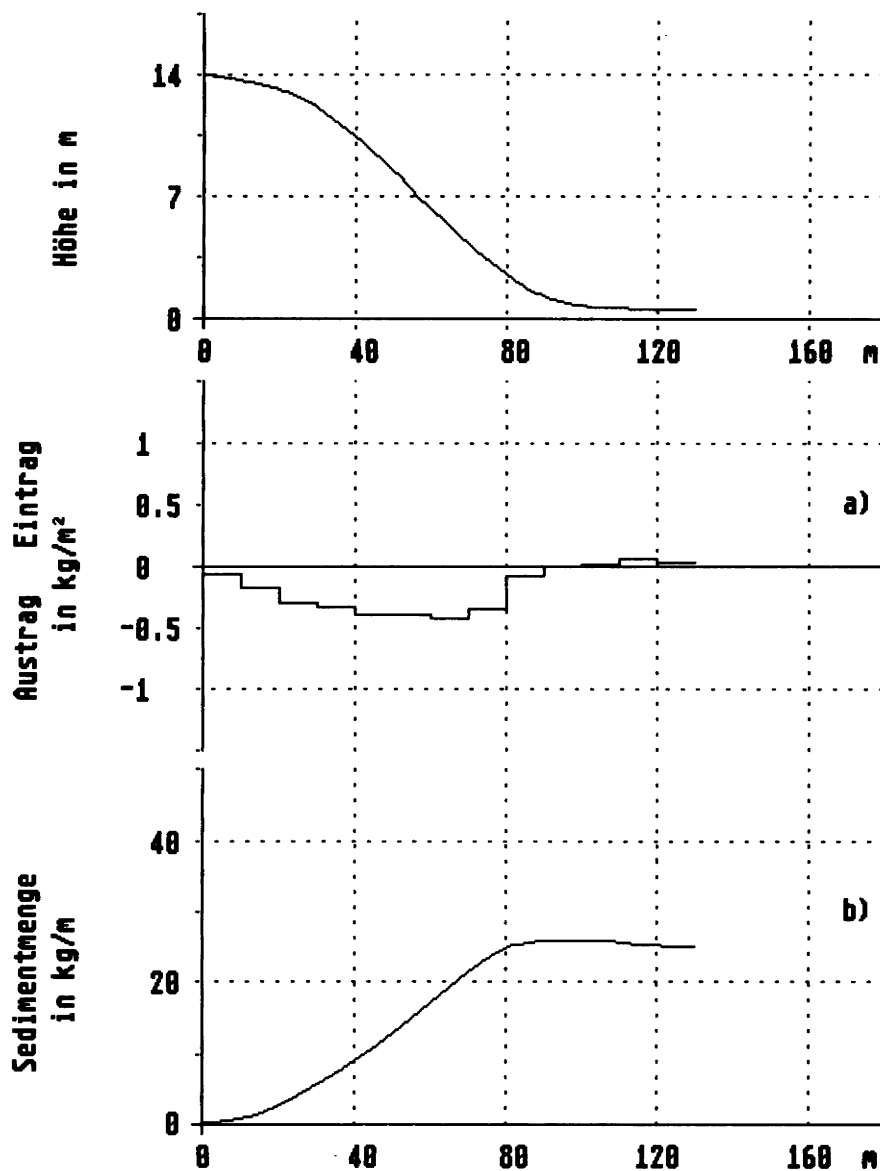


Abb. 29: Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines konvex-konkav gewölbten Hanges

Anhand der soeben erläuterten Beispiele lassen sich die Einflüsse der Hanglänge und der Hangneigung nur schwer voneinander trennen. Für eine isolierte Analyse dieser Einflüsse wird nochmals auf das Beispiel des geraden Hanges (vgl. Abb. 26) zurückgegriffen, da nur in diesem Fall Hanglänge

und Hangneigung unabhängig voneinander variiert werden können.

Zunächst soll der Einfluß der Hangneigung betrachtet werden. In einer Reihe aus 9 Simulationsläufen wurde die Neigung des Hanges schrittweise um jeweils 5° vergrößert.

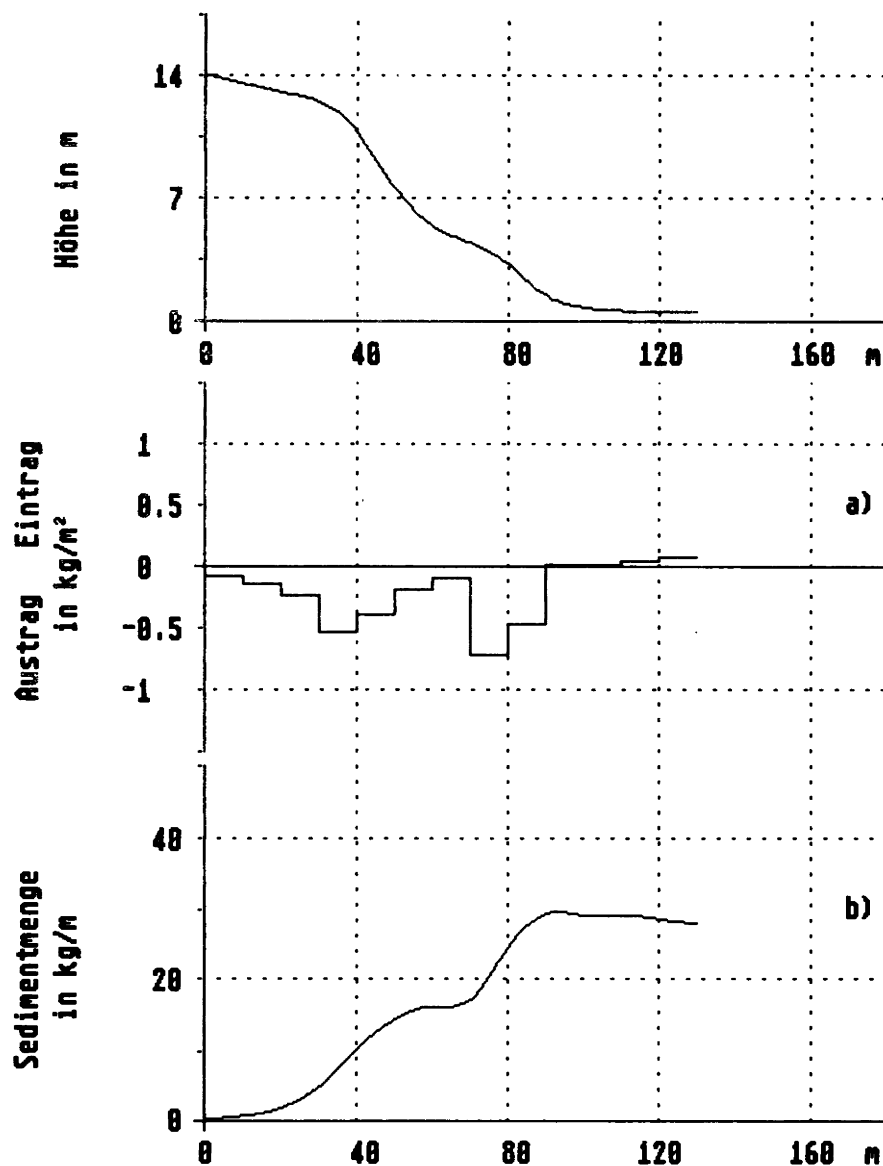


Abb. 30: Feststoffaustrag und Deposition als Funktion der Hanglänge für den Fall eines unregelmäßig gewölbten Hanges

In Abb. 32 sind die auf diese Weise ermittelten Nettoausträge (bezogen auf den Austrag bei 45°) in Abhängigkeit von der jeweiligen Hangneigung aufgetragen. Man erkennt, daß der dargestellte Kurvenzug zunächst sehr steil ansteigt. Mit weiter wachsendem Gefälle flacht dann die Kurve immer mehr ab.

Unterschiedliche Neigungen wirken sich also bei flachen Hängen sehr viel stärker auf den Austrag aus als bei steilen. Maßgeblich hierfür sind eine Vielzahl von z.T. gegenläufigen Effekten, die im einzelnen nur schwer nachvollziehbar sind. Beispielsweise nimmt die in der Hangebene liegende Impulsstromkomponente der Trop-

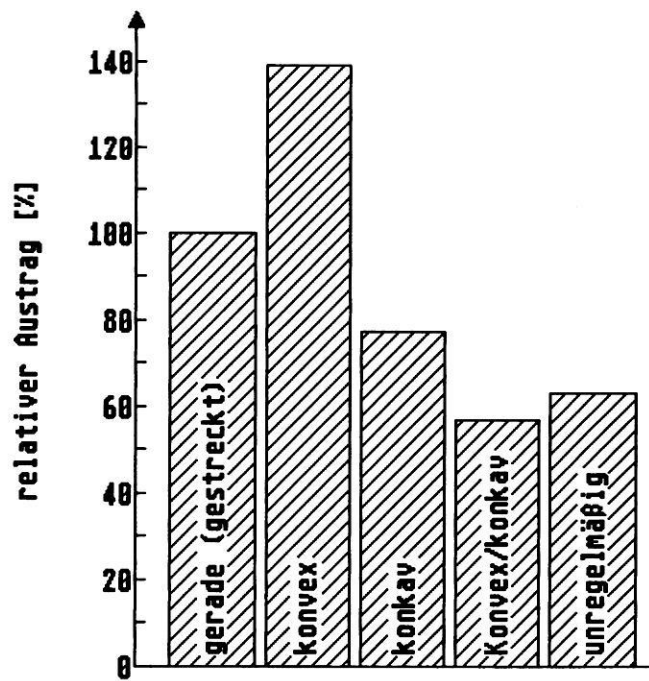


Abb. 31: Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Hanggeometrie

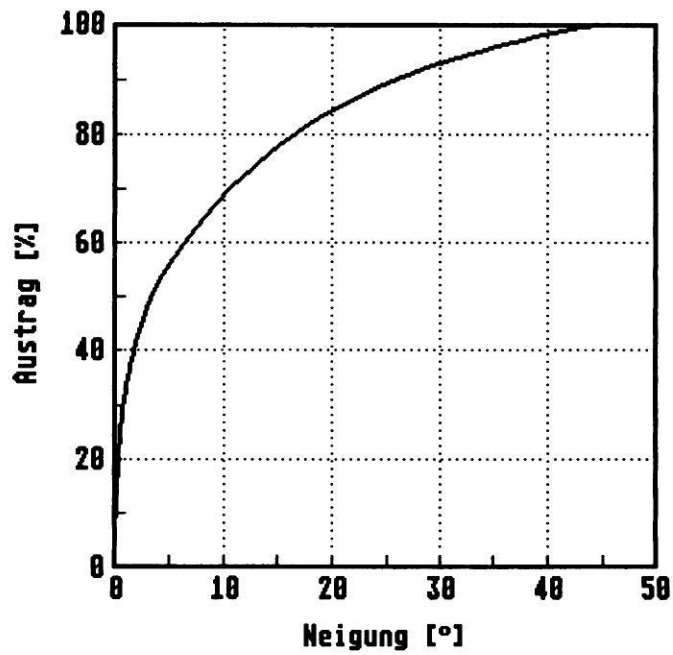


Abb. 32: Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Hangneigung (gerader Hang)

fen (φ_r) mit der Hangneigung zu, während gleichzeitig der auf die Fläche auftreffende effektive Niederschlag (r_α) abnimmt.

Die in Abb. 33 dargestellte Abhängigkeit des Austrages von der Hanglänge zeigt, daß sich eine Änderung der Fließstrecke umso stärker auf den Austrag auswirkt, je kürzer der betrachtete Hang ist. Eine wichtige Konsequenz dieses Sachverhaltes besteht darin, daß Versuchsergebnisse aus Testflächenmessungen nicht unmittelbar (d.h. linear) auf ganze Hänge oder Einzugsgebiete übertragen werden dürfen.

Sensitivität gegenüber Boden- und Oberflächeneigenschaften

Die Boden- und Oberflächeneigenschaften gehen über folgende Parameter in das Modell ein: Körnung, Lagerungsdichte, Anfangswassergehalt, Gehalt an organischer Substanz, Erosionswiderstand, Rauigkeit und Bedeckungsgrad. Zwischen diesen Parametern bestehen z.T. enge Abhängigkeiten, die bei isolierter Betrachtung eines

einzelnen Parameters zwangsläufig unberücksichtigt bleiben. Es ist daher nicht in jedem Fall möglich, aus der Sensitivität des Modells gegenüber einem einzelnen Parameter auf die tatsächliche Bedeutung dieses Parameters zu schließen.

Dies gilt in besonderem Maße für die Parameter 'Körnung' und 'Bedeckungsgrad'. Sie wirken nicht nur auf direktem Wege auf den Austrag ein, sondern beeinflussen auch andere Einflußgrößen wie den Erosionswiderstand oder die Oberflächenrauigkeit. Auf einen isolierten, nur auf den unmittelbaren Einfluß dieser Größen bezogene Sensitivitätsanalyse wird daher verzichtet.

Die Lagerungsdichte, der Anfangswassergehalt und der C_{org} -Gehalt sind Parameter, die über den Infiltrationsteil des Modells in die Berechnung des Austrages eingehen. Jede Veränderung dieser Größen wirkt sich zunächst auf den Abfluß aus. Dies wiederum hat dann eine entsprechend gerichtete Änderung des Austrages zur Folge.

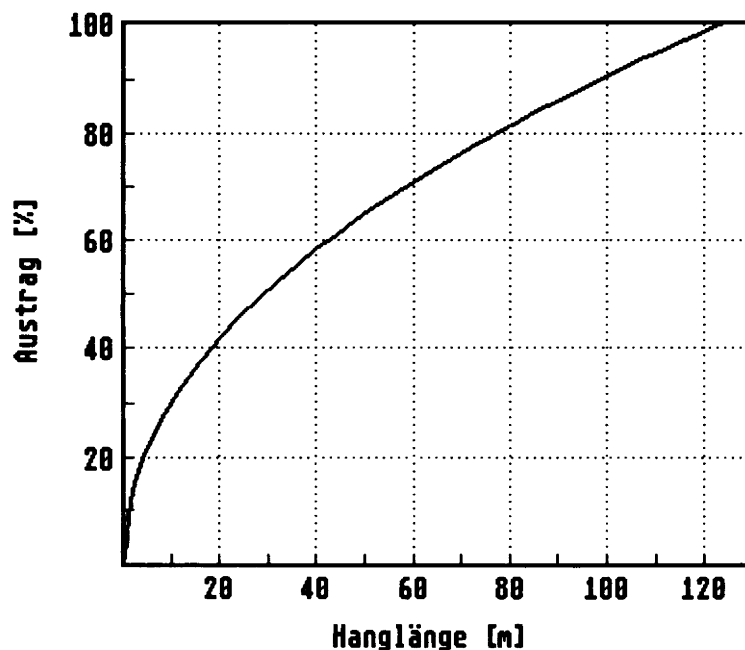


Abb. 33: Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Hanglänge (gerader Hang)

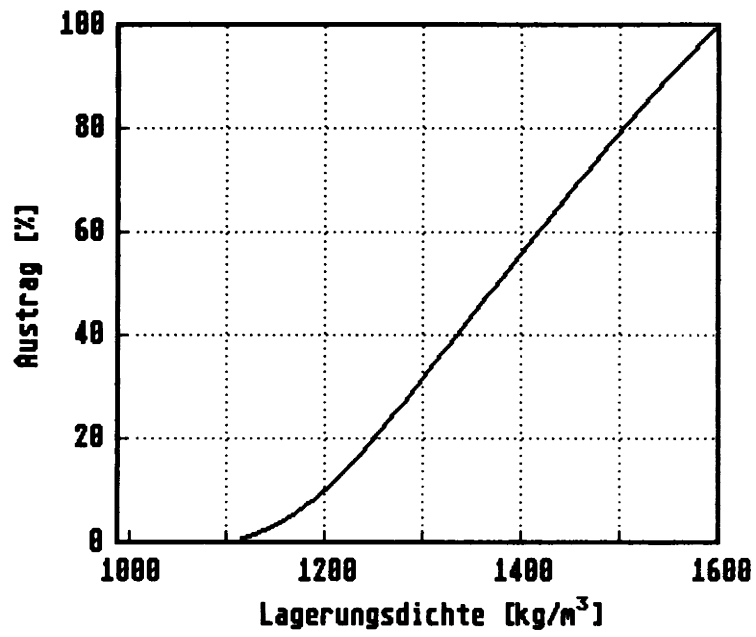


Abb. 34: Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Lagerungsdichte

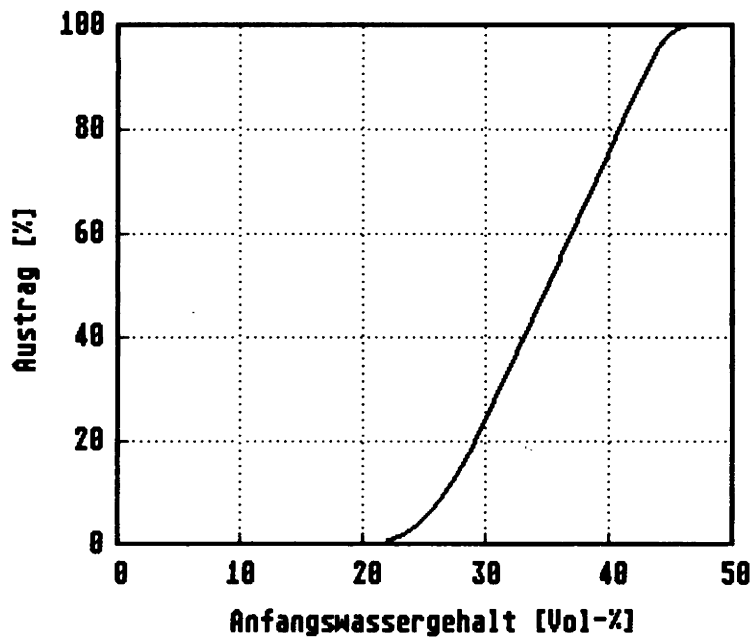


Abb. 35: Abhängigkeit des Feststoffaustrages vom Anfangswassergehalt

Der unmittelbare Vergleich der in den Modellrechnungen variierten Parameterwerte mit den berechneten Austrägen zeigt, daß im Fall der Lagerungsdichte und des Anfangswassergehaltes zunächst ein bestimmter Schwellenwert überschritten werden muß, bevor ein darstellbarer Austrag auftritt. Danach nimmt der Austrag annähernd linear zu (Abb. 34 u. 35).

Eine Zunahme des C_{org} - Gehaltes hat genau den gegenteiligen Effekt, d.h. der Austrag nimmt zunächst ab und ist nach Überschreiten eines Schwellenwertes gleich Null (Abb. 36).

Die Oberflächeneigenschaften der Böden gehen im wesentlichen über die Parameter 'Erosionswiderstand' und 'Oberflächenrauigkeit' in das Modell ein. Der Einfluß dieser Größen wird durch die in Abb. 37 bzw. 38 dargestellten Kurven gekennzeichnet. In beiden Fällen liegt ein nicht linearer Zusammenhang vor. Dies bedeutet, daß das Modell auf eine Veränderung dieser Parameter unterschiedlich stark reagiert, je

nachdem, in welchem Wertebereich sich die Änderung vollzieht. In jedem Falle nimmt der Austrag ab, wenn der Erosionswiderstand oder die Oberflächenrauigkeit zunehmen. Im Bereich kleiner Parameterwerte ist dieser Effekt stärker ausgeprägt als im Bereich großer Werte.

Sensitivität gegenüber der Niederschlagsintensität

Die Abhängigkeit des Austrages von der Intensität der Niederschläge beschreibt Abb. 39. Die Niederschlagsintensität ist als abflußwirksamer Anteil angegeben, d.h. von der tatsächlichen Intensität ist die Infiltrationsrate bereits subtrahiert.

Man erkennt, daß mit wachsendem Niederschlagsüberschuß der Austrag zunächst exponentiell, dann annähernd linear zunimmt. Dieser Verlauf ist einerseits darauf zurückzuführen, daß mit der Intensität der Niederschläge die direkte Erosionswirkung der Tropfen, gegeben durch den Impulsstrom der Tropfen φ_r , zunimmt. Dieser unmittelbare Einfluß des Niederschlages wirkt sich

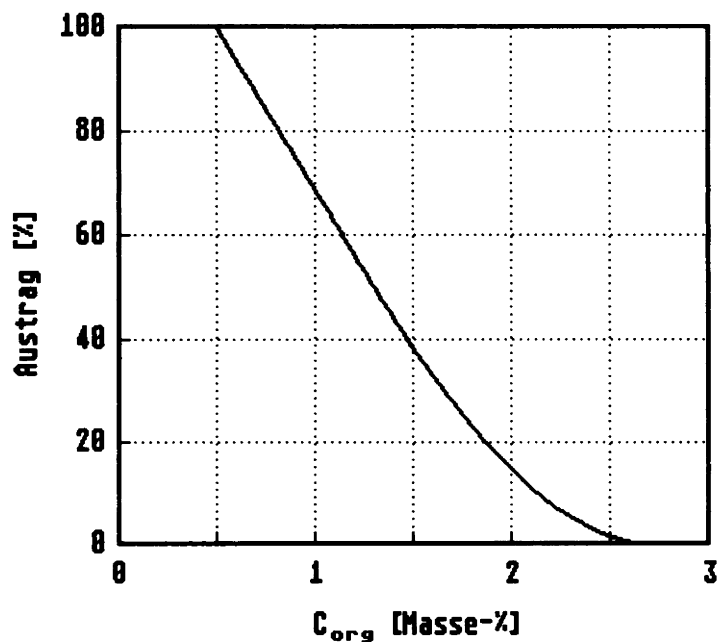


Abb. 36: Abhängigkeit des Feststoffaustrages vom C_{org} -Gehalt

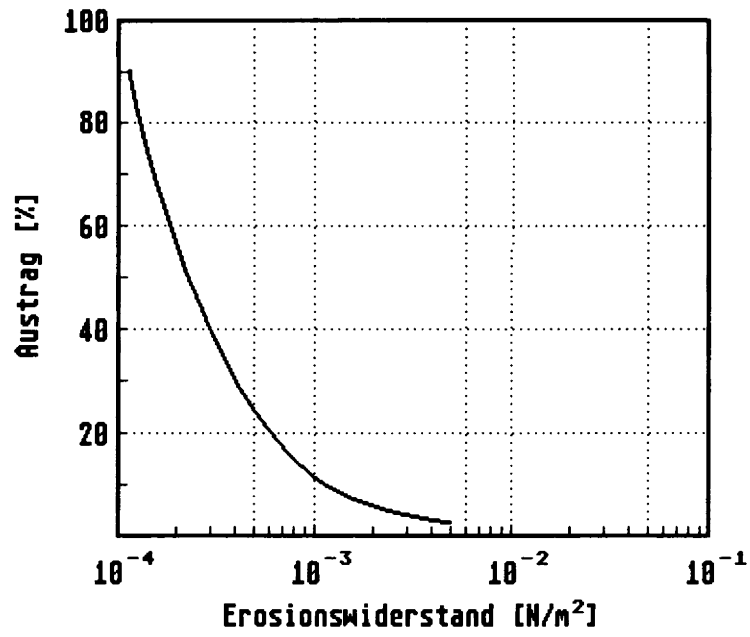


Abb. 37: Abhängigkeit des Feststoffaustrages vom Erosionswiderstand

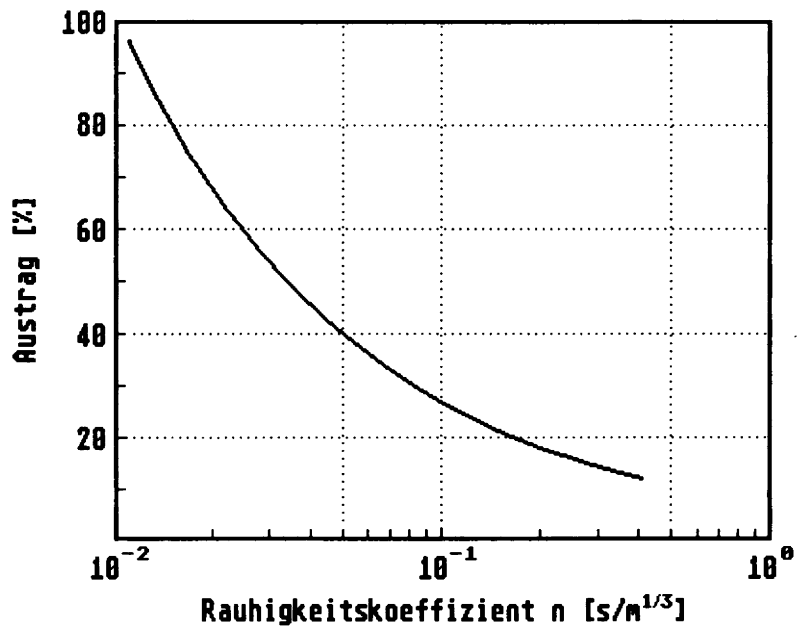


Abb. 38: Abhängigkeit des Feststoffaustrages von der Rauigkeit der überströmten Oberfläche

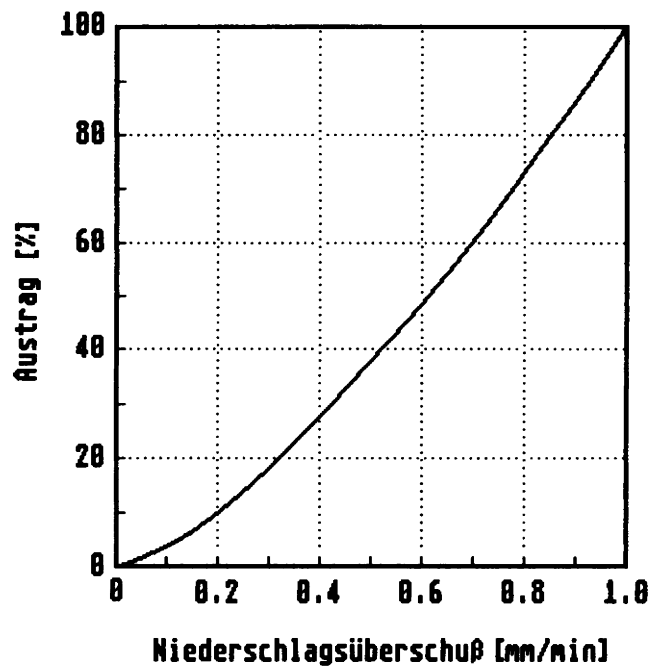


Abb. 39: Abhängigkeit des Bodenabtrages von der Niederschlagsintensität (Hanglänge: 130)

allerdings nur bei geringen Hanglängen entscheidend auf den Austrag aus (SCHMIDT, 1988). Von größerer Bedeutung ist daher, daß mit der Niederschlagsintensität der oberflächliche Abfluß zunimmt und damit mittelbar auch der darin enthaltene Impulsstrom φ_q . Dies hat dann vor allem bei größerer Hanglänge eine, wie Abb. 39 zeigt, exponentielle Zunahme des Austrages zur Folge.

Zusammenfassung und Vergleich der Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivität des Modells gegenüber den in den Beispielsrechnungen variierten Einzelgrößen ist unterschiedlich groß. Die relative Bedeutung der verschiedenen Einzeleinfüsse kann durch Gl. 86 quantitativ erfaßt werden (vgl. NEARING et al., 1990):

$$S = \left(\frac{O_2 - O_1}{O_{\bar{12}}} \right) / \left(\frac{I_2 - I_1}{I_{\bar{12}}} \right) \quad (86)$$

In Gl. 86 sind einzusetzen: das Minimum (I_1) bzw. Maximum (I_2) der Inputgröße, der aus I_1 und I_2 zu bildende Mittelwert ($I_{\bar{12}}$), die für I_1 bzw. I_2 berechneten Werte der Outputgröße (O_1 bzw. O_2) und der entsprechende Mittelwert ($O_{\bar{12}}$).

Der mittels Gl. 86 auf Basis eines konkreten Werteintervalls berechnete Sensitivitätsparameter S ist nur dann auf beliebige andere Werteintervalle übertragbar, wenn zwischen der In- und der Outputgröße ein linearer Zusammenhang besteht. Dies ist, wie zuvor gezeigt wurde, nur bei wenigen Parametern der Fall. Streng genommen gilt in diesen Fällen der errechnete Sensitivitätsparameter nur für das eine Werteintervall, welches der Berechnung ursprünglich zugrundelag.

In Abb. 40 sind für die wichtigsten Eingangsgrößen des Modells die gemäß Gl. 86 berechneten Sensitivitätsparameter dargestellt. (Die hierbei zugrundegelegten Werteintervalle sind Tab. 6 zu entnehmen.) Man

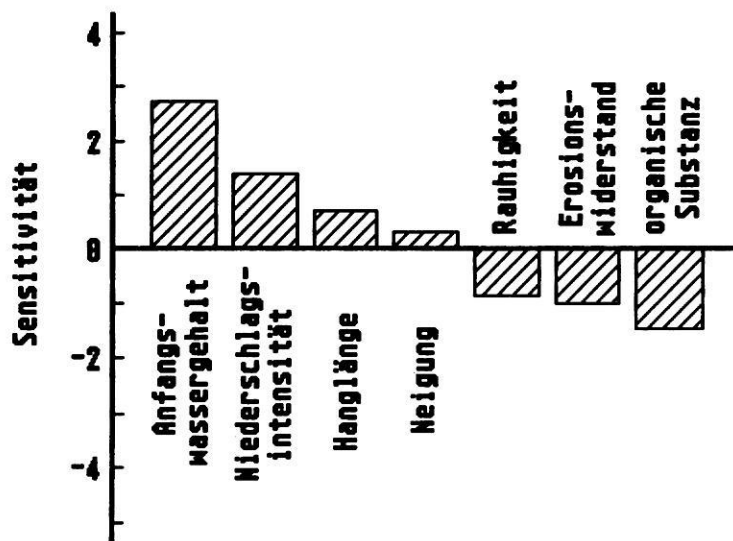


Abb. 40: Sensitivität des EROSION 2D-Modells gegenüber verschiedenen Eingangsgrößen

erkennt, daß der Sensitivitätsparameter sowohl positive wie auch negative Werte annehmen kann. Ein positiver Wert ($S > 0$) bedeutet, daß jede Änderung der Inputgröße eine gleichgerichtete Änderung der Outputgröße zur Folge hat. Dies trifft für den Anfangswassergehalt, die Niederschlagsintensität, die Hanglänge und die Hangneigung zu.

Im Fall eines negativen Wertes ($S < 0$) verhalten sich die Input- und die Outputgröße genau umgekehrt, d.h. einer Änderung der Inputgröße steht eine entgegengesetzt gerichtete Änderung der Outputgröße ge-

genüber. Dies gilt für die Oberflächenrauigkeit, den Erosionswiderstand und den Gehalt an organischer Substanz.

Läßt man das Vorzeichen des Sensitivitätsparameters unberücksichtigt, können die Eingangsgrößen des Modells - soweit sie in diese Analyse einbezogen wurden - ihrer relativen Bedeutung nach in folgende Reihenfolge gebracht werden:

1. Anfangswassergehalt
2. Gehalt an organischer Substanz
3. Niederschlagsintensität

Tab. 6: Inputgrößen und Werteintervalle zur Berechnung des Sensitivitätsparameters S

Inputgröße	Min. - Max.	Sensitivität
Anfangswg. [Vol.-%]	25 - 50	2,72
org. Substanz [Masse-%]	0,5 - 2,5	-1,45
N.-intensität [mm/min]	0,2 - 1,0	1,38
E.-widerstand [N/m^2]	0,001 - 0,1	-1,00
Rauigkeit [$s/m^{1/3}$]	0,01 - 0,40	-0,84
Hanglänge [m]	5 - 125	0,72
Hangneigung [$^\circ$]	5 - 45	0,33

4. Erosionswiderstand (\leftarrow Körnung)
5. Rauigkeit (\leftarrow Körnung, \leftarrow Bedeckungsgrad)
6. Hanglänge

Wie bereits erwähnt, liegt dieser Analyse eine in mehrerer Hinsicht stark vereinfachte Betrachtungsweise zugrunde. Die Ergebnisse sind daher mit Vorsicht zu interpretieren. Deutlich wird aber, daß die Eigenschaften des Bodens (C_{org} -Gehalt, Erosionswiderstand, Oberflächenrauigkeit) offenbar einen größeren Einfluß auf das Ausmaß des Bodenabtrages ausüben, als die Eigenschaften des Reliefs (Hanglänge, Hangneigung).

5.2.2. Plausibilitätstests

Im vorausgegangenen Kapitel wurde das Verhalten des Modells zunächst am Beispiel sehr stark vereinfachter Prozeß-Varianten untersucht.

In einem weiteren Schritt der Validierung soll nun anhand der Realität bereits stark angenäherter Rechenbeispiele überprüft werden, inwieweit das Modell auch für den Fall sich vielfältig überlagernder Einflüsse das in der Natur beobachtbare Verhalten der Erosions- bzw. Depositionsvorgänge zutreffend zu beschreiben vermag.

Simulation räumlich und zeitlich variierender Nutzungseinflüsse

Die im folgenden näher beschriebenen Modellrechnungen beziehen sich auf 2 jeweils 130m lange Hangausschnitte (Profil A bzw. B). Die simulierten Einzelereignisse sind so angelegt, daß sie die im Jahresverlauf unterschiedlichen Bedingungen der Erosion beispielhaft wiedergeben. Ereignis 1 repräsentiert eine Frühjahrs-, Ereignis 2 eine Fröhsommer-, Ereignisse 3 und 4 repräsentieren eine Hochsommer- bzw. Spätsommer-Situation.

Die Niederschlagsdauer beträgt - der besseren Vergleichbarkeit wegen - bei allen

Ereignissen 40 min. Darüber hinaus werden exemplarisch folgende Nutzungsvarianten berücksichtigt:

- I. durchgehende Ackernutzung
- II. Ackernutzung, gefolgt von Grünland am Hangfuß
- III. Ackernutzung, unterbrochen von Grünstreifen.

Einen Überblick über die im einzelnen zugrundegelegten Eingabegrößen liefert Tab. 7.

Die Einflüsse des Reliefs auf das Verhalten des Austrages wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich (s. 5.2.1) diskutiert. Im folgenden gilt das Hauptinteresse dem Einfluß der verschiedenen Nutzungsvarianten.

In Abb. 41 und 42 sind zunächst die Verhältnisse bei reiner Ackernutzung dargestellt. Der Vergleich der Einzelereignisse zeigt, daß - obgleich die Niederschlagsintensität während des 1. Ereignisses (Frühjahr) sehr viel geringer ist als bei den folgenden - der simulierte Austrag ebenso groß oder sogar größer ist als im Verlauf der nachfolgenden Ereignisse.

Maßgebend hierfür ist die den Modellrechnungen zugrundeliegende Annahme, daß:

- zu Beginn der Vegetationsperiode jegliche Pflanzendecke fehlt (\rightarrow Bedeckungsgrad = 0; \rightarrow Rauigkeitsbeiwert = $0,01s/m^{1/3}$)
- der Erosionswiderstand aufgrund der Frühjahrsbearbeitung des Bodens (Vorbereitung des Saatbettes) geringer ist als in der Folgezeit.

Der in Abb. 41/42 dargestellte Fall der reinen Ackernutzung hat sich aufgrund des Rationalisierungsdruckes in der Landwirtschaft und des damit verbundenen Trends zu immer größeren Bewirtschaftungseinheiten vielerorts durchgesetzt. Dennoch wird vor allem aus Gründen des Naturschutzes und der Landschaftspflege neuerdings wie-

Tab. 7: Eingabeparameter für Simulationsrechnungen

Körnung				
	fein	mittel	grob	Summe
Ton	2	5	5	12
Schluff	8	20	48	76
Sand	8	3	1	12
Bodenparameter/Acker				
Ereignis	1	2	3	4
Infiltrationsrate	0,1	0,2	0,2	0,2
Erosionswiderstand	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020
Rauhigkeitsbeiwert	0,01	0,02	0,03	0,04
Bedeckungsgrad	0	20	50	80
Bodenparameter/Grünstreifen/Wiese				
Infiltrationsrate	2,2	0,5		
Erosionswiderstand	0,0100	0,0050		
Rauhigkeitsbeiwert	0,16	0,12		
Bedeckungsgrad	100	90		
Niederschlagsintensität				
Ereignis	1	2	3	4
0 - 10 min	0,2	0,2	0,2	0,4
10 - 20 min	0,3	0,7	0,4	0,8
20 - 30 min	0,3	0,8	0,5	1,2
30 - 40 min	0,2	0,2	0,3	0,6

Einheiten: Körnung [%], Infiltrationsrate [mm/min], Erosionswiderstand [N/m^2],
 Rauhigkeitsbeiwert [$s/m^{1/3}$], Bedeckungsgrad [%], Niederschlagsintensität [mm/min]

der eine stärker gegliederte Flächennutzung angestrebt. Im folgenden werden dazu einige Beispiele vorgestellt.

In Abb. 43/44 sind zunächst die Verhältnisse bei einer Kombination aus Ackernutzung am Ober- und Mittelhang und Grünlandnutzung am Hangfuß dargestellt. Man erkennt, daß mit dem Übergang zu einer geschlossenen Vegetationsdecke ein Teil

des weiter oberhalb am Hang erodierten Bodenmaterials wieder abgelagert wird. Der durch den Nutzungswechsel bedingte Sedimentationseffekt ist hierbei umso größer, je stärker sich die Bedeckungsverhältnisse am Hang unterscheiden. Der Sedimentationseffekt kommt daher im Verlauf des 1. Ereignisses deutlich stärker zum Tragen als im Verlauf der folgenden Ereignisse.

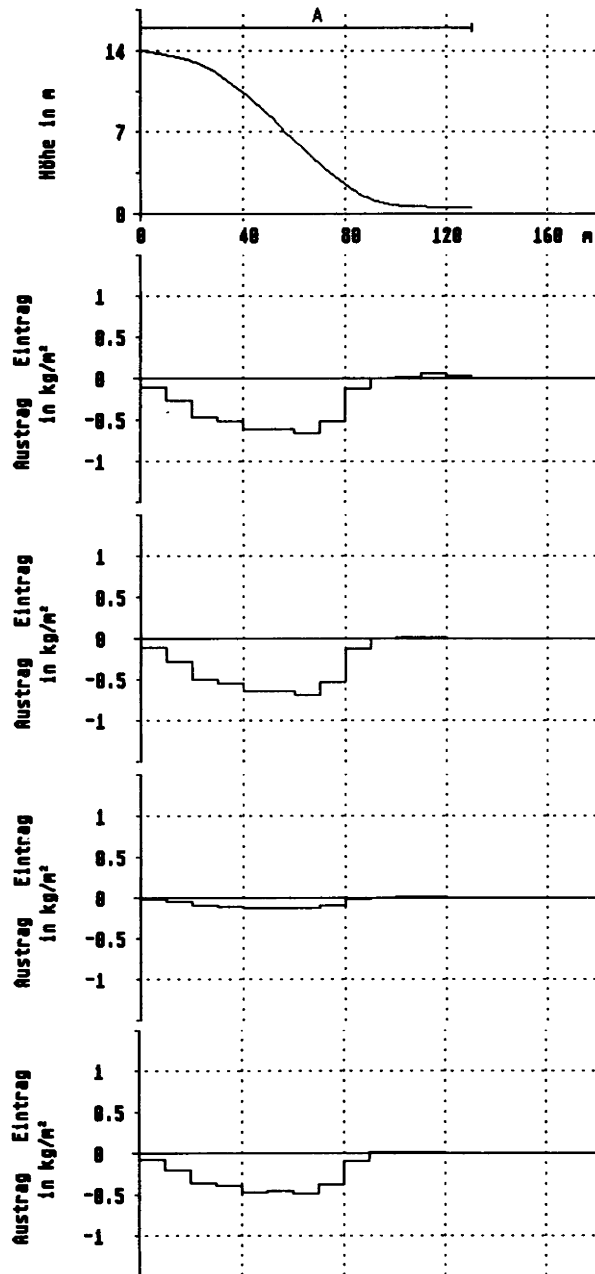


Abb. 41: Simulation Acker/Profil A

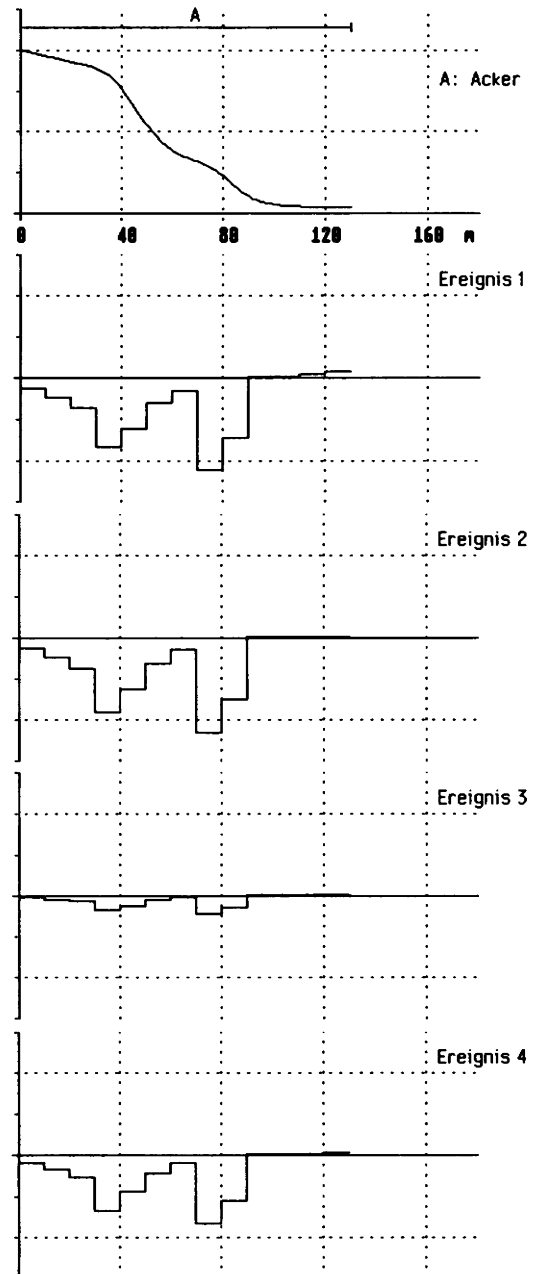


Abb. 42: Simulation Acker/Profil B

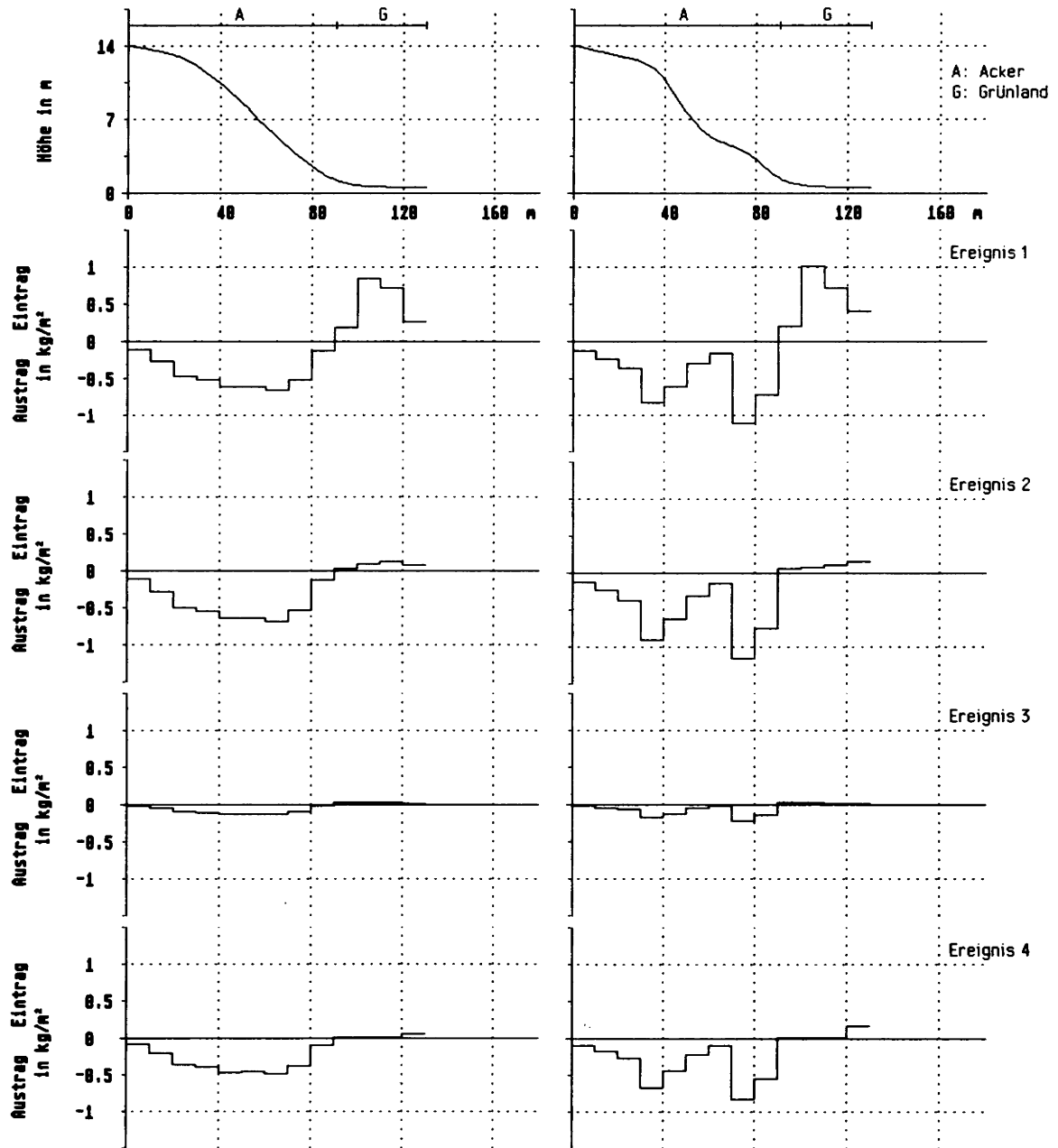


Abb. 43: Simulation Acker/Grünland/Profil A

Abb. 44: Simulation Acker/Grünland/Profil B

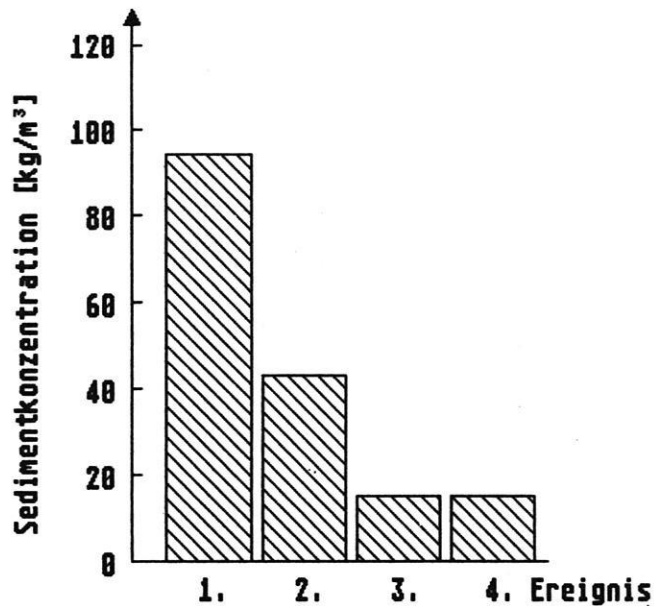


Abb. 45: Sedimentkonzentrationen an der Stelle $x = 90\text{m}$ (Übergang Acker/Grünland)

Die Ursachen für das unterschiedliche Ausmaß der Sedimentation verdeutlicht Abb. 45. Hierin sind, bezogen auf den Eintrittspunkt in den Grünlandbereich, die für die Einzelereignisse berechneten Sedimentkonzentrationen gegenübergestellt. Man erkennt, daß der oberflächliche Abfluß im Fall des 1. Ereignisses sehr viel stärker mit Sediment beladen ist als bei den folgenden. Infolgedessen wird, sobald die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Transportkapazität nachlassen, sehr viel mehr Material sedimentiert als bei den folgenden Ereignissen.

Abb. 46/47 beschreiben die Verhältnisse bei Aufteilung des Hanges in 3 Ackerparzellen, die durch höhenlinienparallele Grünstreifen getrennt werden. In früheren Zeiten waren derartige Grünstreifen vor allem in Gebieten mit kleinteiliger Bodennutzung weit verbreitet. Der Erhaltung solcher Grünstreifen wird heute aus allgemein ökologischen Gründen, aber auch mit Blick auf

den Erosionsschutz große Bedeutung beimessen, was jedoch - wie im folgenden erläutert wird - nicht in jedem Fall gerechtfertigt ist. Die Grünstreifen verzögern aufgrund des größeren Strömungswiderstandes der Pflanzendecke den oberflächlichen Abfluß und führen damit zur teilweisen oder vollständigen Ablagerung des weiter oberhalb am Hang erodierten Bodenmaterials. Da der Abfluß beim Austritt aus den Grünstreifen kein oder nur noch wenig Sediment führt, setzt die Erosion jedoch hinter dem Grünstreifen mit umso größerer Intensität wieder ein.

Je mehr Wasser oberflächlich abfließt, und je weniger Sediment dabei transportiert wird, desto mehr überwiegt der unerwünschte Erosionseffekt der Grünstreifen gegenüber dem erwünschten Sedimentationseffekt. Von Grünstreifen ist daher nicht unbedingt - wie häufig behauptet wird - eine Verbesserung des Erosionsschutzes zu erwarten (vgl. 7.1.3).

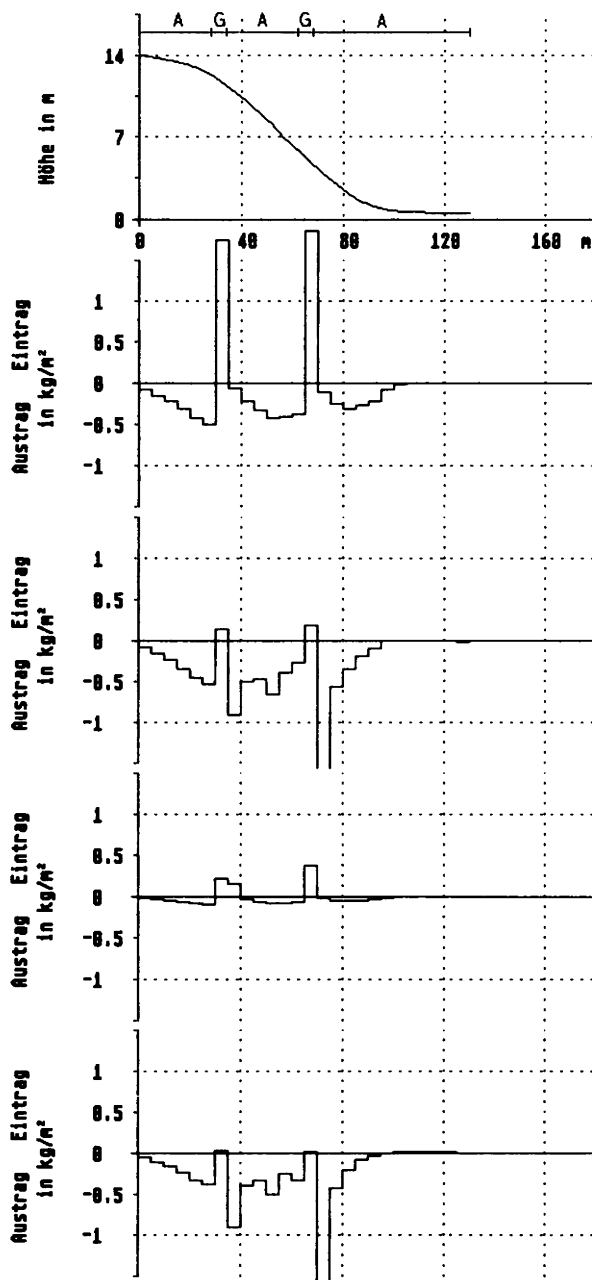


Abb. 46: Simulation Acker/Grünstreifen/Profil A

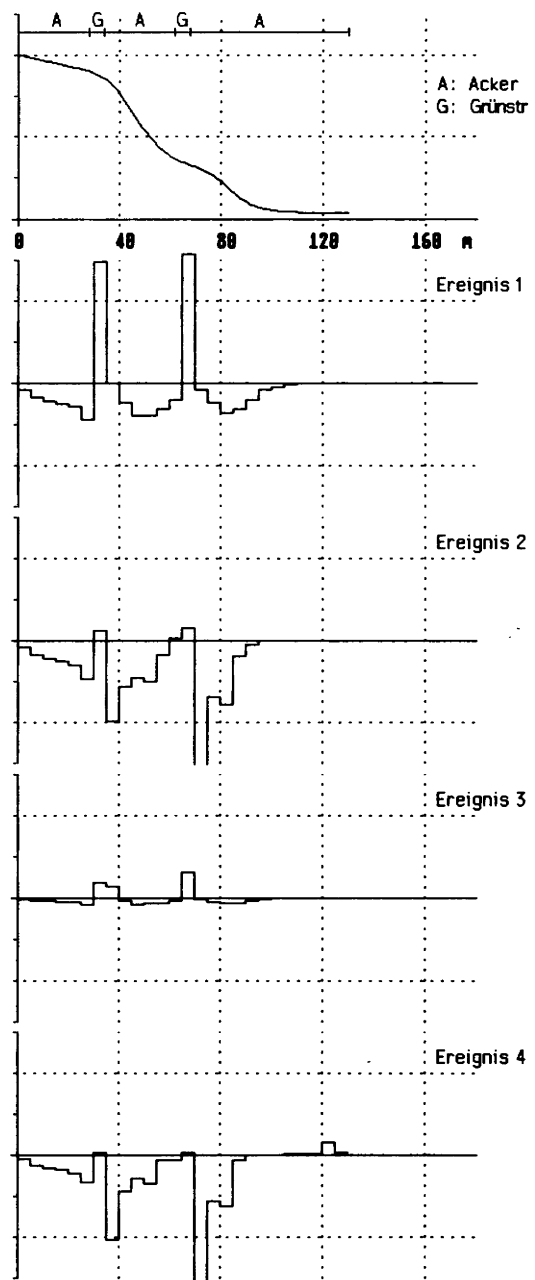


Abb. 47: Simulation Acker/Grünstreifen/Profil B

Modellrechnungen zur Simulation langfristiger geomorphologischer Folgewirkungen

Die mit der Erosion verbundenen Transportprozesse sind bei einer auf Einzelereignisse bezogenen Betrachtungsweise nur schwer im Gelände überprüfbar. Langfristig führen diese Vorgänge jedoch zu charakteristischen Veränderungen des Oberflächenreliefs und der Böden, die im Gelände sehr viel leichter zu erkennen und quantitativ zu erfassen sind als die Prozesse selbst. Es liegt daher nahe, im Rahmen der Plausibilitätsprüfung des Modells zu untersuchen, inwieweit das Modell in der Lage ist, solche langfristigen Veränderungen des Oberflächenreliefs wirklichkeitsgetreu abzubilden.

Die zu diesem Zweck durchgeführten Langfristsimulationen basieren auf der Iteration der oben erläuterten Einzelereignisse, entsprechend dem bereits in 4.3.7 näher beschriebenen sequentiell-iterativen Verfahren.

Abb. 48 - 52 zeigen jeweils das Ausgangsprofil des Hanges, überlagert mit dem berechneten Verlauf des Geländeprofiles nach 250 Iterationen. Darüberhinaus sind im unteren Teil der Graphiken die kumulierten Feststoffaus- und -einträge aufgetragen.

In Abb. 48 und 49 sind zunächst die Verhältnisse bei reiner Ackernutzung dargestellt. Wie Abb. 48 zeigt, wird ein mehr oder weniger glatter, konvex-konkav gewölbter Hang fast parallel zurückverlagert, ohne daß sich seine Geometrie dabei wesentlich verändert. Dies ist bei einem stärker gegliederten Hang (Profil B) nicht der Fall. Hier führt die Erosion zu einem bevorzugten Abbau der das generelle Hangprofil überlagernden konvexen Wölbungen. Diese Tendenz ist im unteren Teil des Hanges aufgrund des größeren Abflusses stärker ausgeprägt als im oberen. Der am Ende der Simulation erhaltene Verlauf des Geländeprofiles ist in diesem Fall insgesamt wesentlich glatter als das Ausgangsprofil.

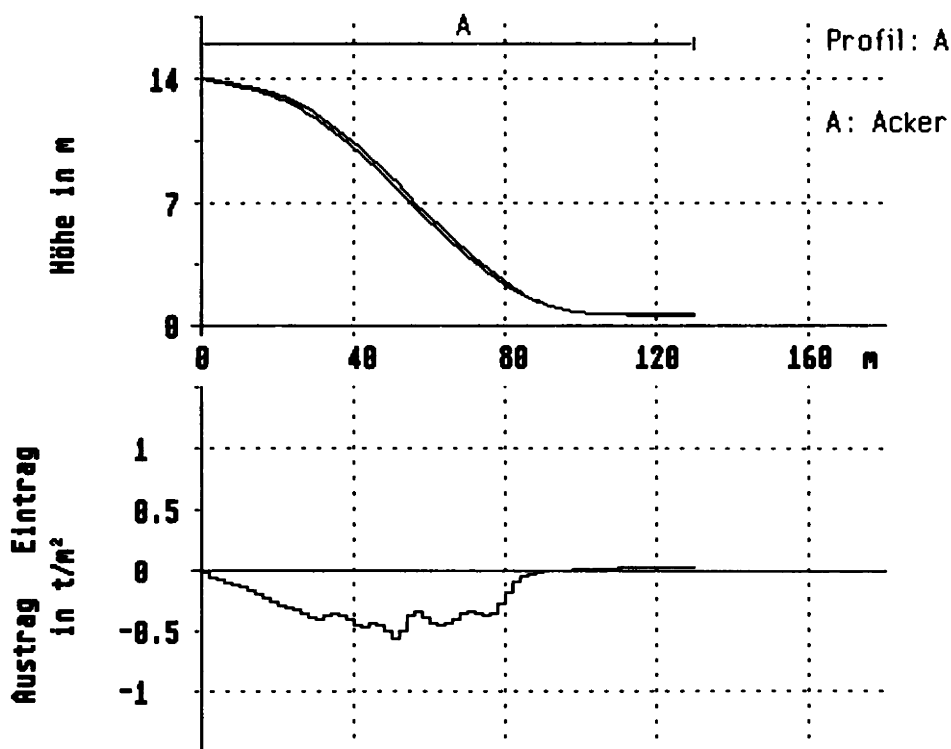


Abb. 48: Langfristsimulation Profil A/I

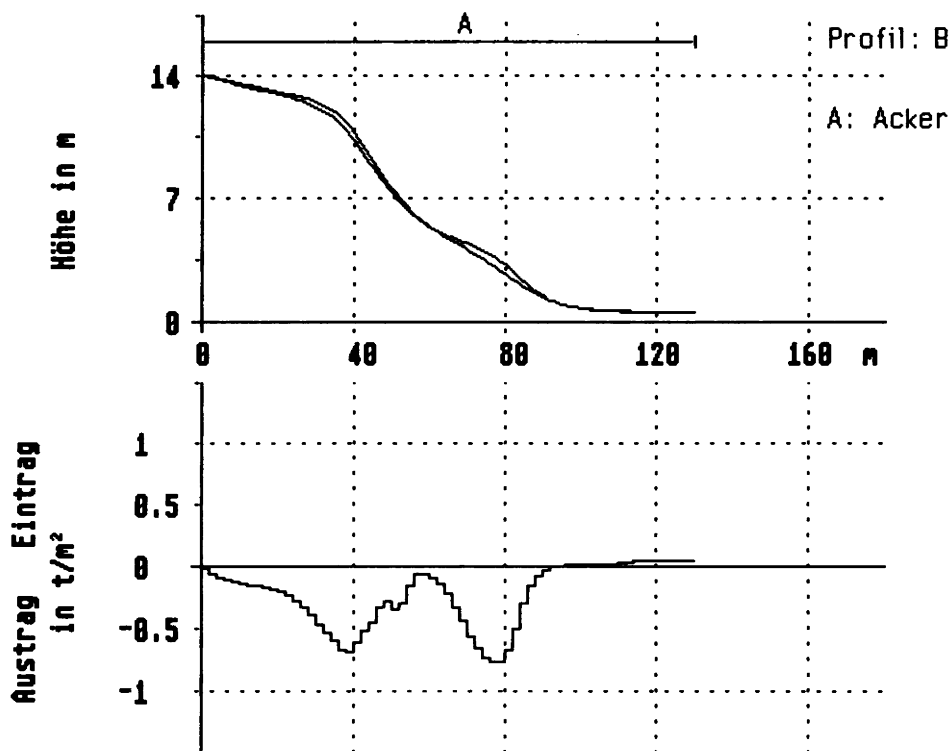


Abb. 49: Langfristsimulation Profil B/1

Die folgenden Beispiele stellen die geometrischen Veränderungen des Geländeprofiles bei uneinheitlicher Nutzung des Hanges dar. Abb. 50 beschreibt zunächst die Verhältnisse bei Aufteilung des Hanges in 3 Parzellen, die durch Grünstreifen getrennt werden.

Wie bereits anhand der Einzelereignisse gezeigt werden konnte, gehen von den Grünstreifen zwei völlig entgegengesetzte Effekte aus: Während innerhalb der Grünstreifen bereits erodiertes Bodenmaterial aus dem Abfluß "herausgefiltert" wird, setzt die Erosion unterhalb der Grünstreifen mit umso größerer Intensität wieder ein. Das Zusammenwirken dieser beiden Vorgänge führt - wie der Verlauf des überlagernden Geländeprofiles zeigt - zur Herausbildung kleinerer Geländestufen. Entsprechende Kleinformen sind in vielen intensiv

landwirtschaftlich genutzten Landschaften (z.B. im Kraichgau) weit verbreitet. Anhand des Rechenbeispiels wird deutlich, daß es sich hierbei nicht, wie häufig angenommen wird, um reine Akkumulationsformen handeln muß. Eine Kombination aus Akkumulation und Erosion ist sehr viel wahrscheinlicher.

In den folgenden Beispielen (Abb. 51 u. 52) teilt sich die Nutzung des Hanges auf in eine Ackerfläche am Ober- und Mittelhang und eine Grünlandfläche am Hangfuß. Hierbei zeigt sich, daß - wie im Falle der Grünstreifen - weiter oberhalb erodiertes Bodenmaterial innerhalb des Grünlandbereiches sedimentiert wird.

Aus dem Verlauf des Feststoffeintrages ist zu erkennen, daß die Sedimentation beim Eintritt des Oberflächenabflusses in den

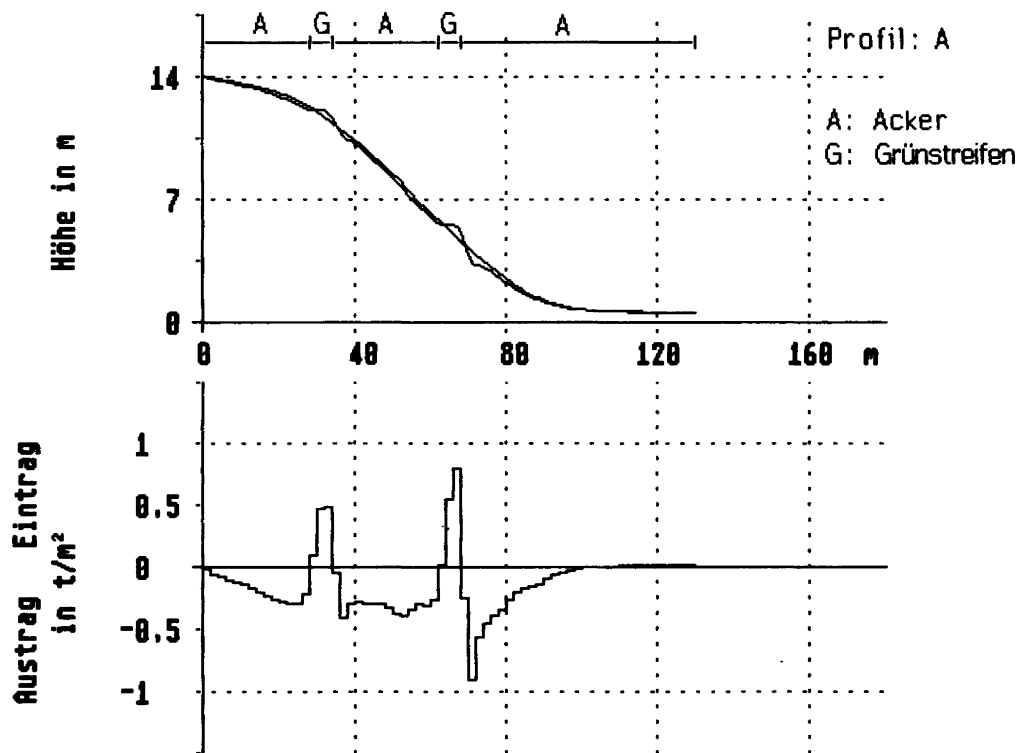


Abb. 50: Langfristsimulation Profil A/II

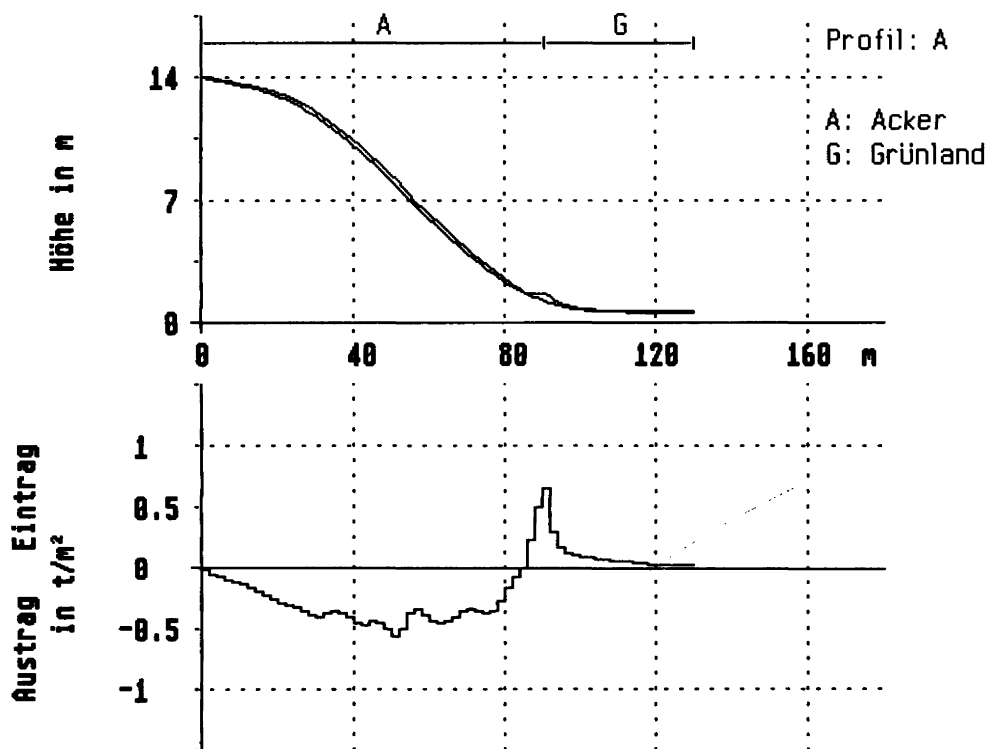


Abb. 51: Langfristsimulation Profil A/III

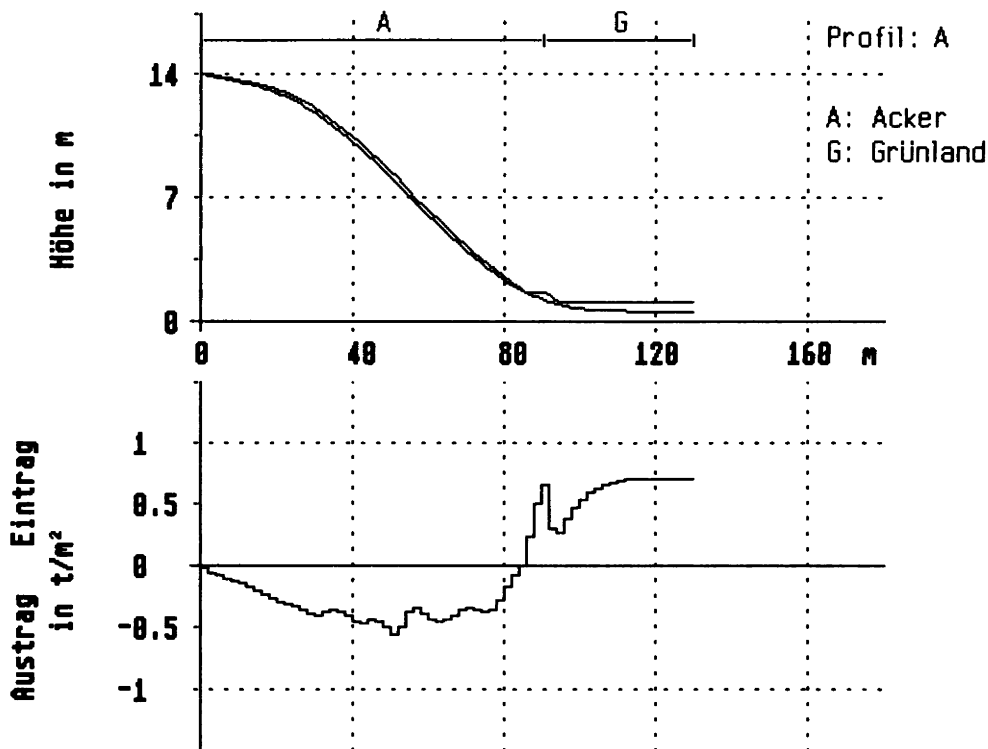


Abb. 52: Langfristsimulation Profil A/III, Erhöhung der Erosionsbasis um 0,5mm

Grünlandbereich sehr schnell ein Maximum erreicht und dann gegen das Ende des Hanges kontinuierlich abnimmt. Die stetige Anhäufung von Bodenmaterial im Übergangsbereich zwischen Acker und Grünland führt schließlich ebenfalls zur Herausbildung einer kleineren Stufe, die jedoch im Unterschied zu den zuvor beschriebenen Stufen eine rein kolluviale Bildung ist.

Das letzte Beispiel (Abb. 52) beschreibt eine Situation, bei der der Hangfuß zusätzlich der direkten Beeinflussung durch den Vorfluter unterliegt. Im vorliegenden Fall wird unterstellt, daß sich die Erosionsbasis durch die Ablagerung von Hochflutsedimenten je Iterationsschritt um 0,5mm erhöht. Im Unterschied zu den vorhergehenden Beispielen geht der Hangfuß nun in eine völlig ebene Sedimentationsfläche über. Im übrigen unterscheidet sich das Profil nicht wesentlich von dem in Abb. 51 gezeigten Verlauf.

5.2.3 Vergleich mit Meßwerten aus Freilandexperimenten

Die im vorangehenden Kapitel erläuterten Simulationsrechnungen liefern plausible Ergebnisse. Man kann daher davon ausgehen, daß das Modell die Prozesse der wasserbedingten Erosion zumindest qualitativ zutreffend beschreibt. Für eine weitergehende Validierung des Modells bedarf es jedoch darüber hinaus des Vergleichs mit im Gelände gemessenen Abtragswerten.

Ein derartiger Vergleich ist gegenwärtig mit folgenden Problemen behaftet:

- Die Zahl der verfügbaren Datensätze ist gering.
- Für einige Eingangsgrößen (Rauhigkeit, Bodenbedeckung) liegen nur grobe Schätzwerte vor.
- Die Erosionswiderstände der Böden sind der unmittelbaren meßtechnischen Erfassung nur schwer zugänglich. Sie müssen

auf indirektem Wege aus den Abtragsdaten berechnet werden (s. 6.3.4).

Um gemessene und berechnete Bodenabträge direkt miteinander vergleichen zu können, müssen von einer Testfläche mindestens zwei unabhängig voneinander ermittelte Datensätze verfügbar sein. Aus dem 1. Datensatz wird der jeweilige bodenspezifische Erosionswiderstand bestimmt, der 2. Datensatz kann dann für den eigentlichen Vergleich herangezogen werden. (Der Versuch, den Erosionswiderstand unabhängig von den gemessenen Erosionsdaten, z.B. aus dem Scherwiderstand der Böden zu schätzen, ist bisher experimentell noch nicht hinreichend abgesichert (siehe 6.3.4)).

Aufgrund äußerer Einflüsse, biologischer Aktivität etc. unterliegt die Struktur der Böden - und damit auch ihr Erosionswiderstand - nicht unerheblichen zeitlichen Änderungen. Der Erosionswiderstand ist daher keine konstante Bodeneigenschaft. Die Übertragung des auf der Basis eines Einzelereignisses bestimmten Erosionswiderstandes auf ein nachfolgendes oder vorangehendes Ereignis ist daher grundsätzlich mit einem mehr oder weniger großen Fehler behaftet. Genau genommen müßte der Erosionswiderstand unter den Bedingungen jedes einzelnen Ereignisses erneut bestimmt werden.

Der Grad der Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Abtragswerten hängt daher nicht allein von der Qualität des Modells selbst ab, sondern ganz wesentlich von der Zuverlässigkeit der Eingangsdaten. Die Ergebnisse der folgenden Vergleichsrechnungen dürfen daher nicht überbewertet werden. Die für die Vergleichsrechnungen ausgewerteten Datensätze wurden zur Verfügung gestellt durch:

- das Zentrum für Agrarlandschaftsforschung ZALF (Müncheberg/Brandenburg)
- das Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (BMFT-Vorhaben: "Prognosemodell für

die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet")

- das Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Technischen Universität Braunschweig (SFB 179: "Wasser- und Stoffdynamik in Agrar-Ökosystemen").

Vergleich mit den Daten des ZALF Müncheberg

Die Daten des ZALF stammen von den Parzellen 8 und 11 des Erosionsmeßfeldes in Müncheberg. Die spezifischen Eigenschaften der Parzellen sind in Tab. 8 zusammengestellt. Die Daten beziehen sich auf 2 Ereignisse. Das erste Ereignis ist datiert vom 10.07.1986, das zweite vom 31.08.1990.

Von den in Tab. 8 aufgelisteten Parametern wurden folgende Größen unmittelbar am Ort ermittelt: Gefälle, Körnung, Bedeckungsgrad, Niederschlagsintensität und -dauer.

Zur Bestimmung der übrigen Größen wurde wie folgt vorgegangen:

Infiltrationsrate. Infiltrationsmessungen am Ort - durchgeführt mit einem Doppelring-Infiltrometer - ergaben eine mittlere Infiltrationsrate von ca. 0,25 mm/min (DEUM-LICH, 1990). Der auf der Basis dieses Wertes berechnete Oberflächenabfluß stimmt allerdings nur in einem Fall (Ereignis vom 31.08.1990/Parzelle 11) mit dem tatsächlich gemessenen Abfluß überein. Für die übrigen Ereignisse wurde daher die Infiltrationsrate i unmittelbar aus den gemessenen Abflüssen bestimmt:

$$i = \frac{(\bar{\tau} \cdot \Delta x) - \frac{Q}{\Delta t}}{\Delta x} \quad (87)$$

In Gl. 87 bedeuten: $\bar{\tau}$ die über das abflußwirksame Zeitintervall Δt gemittelte Niederschlagsintensität, Δx die Parzellenlänge und Q die gemessene Abflußmenge.

Tab. 8: Eigenschaften der Meßparzellen 8 und 11 des Erosionsmeßfeldes Müncheberg (n. Angaben von DEUMLICH, 1990)

Relief:				
Parzelle	8		11	
Länge/Breite	20/2,5		20/2,5	
Gefälle	14,6		14,9	
Körnung: (Parz. 8 = Parz. 11)				
	fein	mittel	grob	Summe
Ton	0	0	10	10
Schluff	3	5	15	23
Sand	60	7	0	67
Bodenparameter/Schwarzbrache (gelockert)				
Parzelle	8		11	
Ereignis	10.07.1986	31.08.1990	10.07.1986	31.08.1990
Infiltrationsrate	0,35	0,30	0,43	0,25
Erosionswiderstand	1,00	0,39	0,90	0,61
Referenzwert A	0,73	0,73	0,73	0,73
Referenzwert B	0,95	0,50	0,95	0,50
Rauhigkeitsbeiwert	0,03	0,03	0,03	0,03
Bedeckungsgrad	0	0	0	0
Niederschlagsintensität (Parz. 8 = Parz. 11)				
Ereignis	10.07.1986		31.08.1990	
0 - 10 min	0,01		0,40	
10 - 20 min	0,02		0,46	
20 - 30 min	0,02		0,03	
30 - 40 min	0,43		0,10	
40 - 50 min	0,58		0,02	
50 - 60 min	0,15		0,02	
60 - 70 min	0,13		--	

Einheiten: Parzellenlänge, -breite [m], Gefälle [%], Körnung [%], Infiltrationsrate [mm/min], Erosionswiderstand [N/m^2] $\times 10^{-4}$, Rauhigkeitsbeiwert [$\text{s/m}^{1/3}$], Bedeckungsgrad [%], Niederschlagsintensität [mm/min]

Erosionswiderstand. Da bisher noch keine unabhängig ermittelten Werte des Erosionswiderstandes vorliegen, kann dieser nur aus den gemessenen Feststoffausträgen selbst bestimmt werden. Zunächst wurde für jede Parzelle der Erosionswiderstand so lange variiert, bis der berechnete Austrag dem gemessenen entsprach. Hieraus ergaben sich insgesamt 4 Werte - jeweils 2 je Parzelle. Aus diesen Werten wurden durch Mittelung 2 Referenzwerte gebildet: Referenzwert A durch Mittelung aller Werte, Referenzwert B durch Mittelung der Werte je eines Termins.

Rauhigkeitsbeiwert. Der Rauhigkeitsbeiwert n kann nach einer Formel von GARBRECHT (1961) unmittelbar aus der Größe der Partikel abgeschätzt werden (siehe 6.3.6):

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (88)$$

Hierin ist D_{90} der Partikeldurchmesser bei 90% Siebdurchgang.

Im vorliegenden Fall ergibt die Kornverteilung ein D_{90} von 0,2mm. Eingesetzt in Gl. 88 erhält man einen Rauhigkeitsbeiwert von $n = 0.03 \text{ s/m}^{1/3}$. Allerdings wird durch die-

sen Wert nur die körnungsbedingte Rauhigkeit der Oberfläche erfaßt - nicht jedoch die bearbeitungsspezifische Rauhigkeit des Mikroreliefs.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen sind in Tab. 9 den tatsächlich gemessenen Werten gegenübergestellt. Wird für den Erosionswiderstand der Referenzwert A herangezogen, so liegt die mittlere Abweichung der berechneten Feststoffausträge bei ca. 30%. Wird hingegen Referenzwert B zugrundegelegt, so beträgt die mittlere Abweichung nur 10%.

Referenzwert A führt im Falle des Ereignisses vom 10.07.1986 zu einer Überschätzung des Austrages während der Austrag vom 31.08.1990 unterschätzt wird. Dies gilt sowohl für Parzelle 8 als auch für Parzelle 11. Es ist daher wenig sinnvoll - wie bei der Ableitung des über alle Termine gemittelten Referenzwertes unterstellt - für beide Ereignisse annähernd gleiche Bedingungen anzunehmen. Vielmehr muß der Erosionswiderstand für das Ereignis vom 10.07.1986 deutlich höher angesetzt werden als für das Ereignis vom 31.08.1990. Die Ursache für derartige temporäre (körnungsunabhängige) Unterschiede des Erosionswiderstandes können z.B. durch Düngung (Gülle, Mist), Fruchtfolge, Verschlammung

Tab. 9: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Feststoffausträgen (Parzellen 8 und 11, Müncheberg)

Feststoffaustrag in t/ha			
Parzelle 8	gemessen	berechnet	
Datum:		Referenzwert A	Referenzwert B
10.07.1986	1,5	2,0 (+33%)	1,5 (+ 0%)
31.08.1990	2,6	1,5 (-42%)	2,1 (-19%)
Parzelle 11			
10.07.1986	0,7	0,9 (+29%)	0,7 (+ 0%)
31.08.1990	2,8	2,3 (-18%)	3,4 (+21%)

und andere nicht näher bekannte Umstände bedingt sein.

Vergleich mit den Daten der Universität Karlsruhe

Die vom Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe gelieferten Daten sind - im Unterschied zu den Daten aus Müncheberg - experimentell, d.h. unter künstlicher Beregnung ermittelt. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsanlage gibt SCHRAMM (1992).

Die Durchführung der Versuche erfolgte im Rahmen des BMFT-Vorhabens: "Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet". Das Projektgebiet liegt im Einzugsgebiet des Weiherbaches im Zentrum des Kraichgaues. Für die Beregnungsversuche wurden zwei Meßparzellen ausgewählt. Die spezifischen Eigenschaften dieser Parzellen enthält Tab. 10.

Die der unmittelbaren Erfassung im Gelände nicht zugänglichen Größen - Infiltrationsrate, Erosionswiderstand, Rauigkeitsbeiwert - wurden in ähnlicher Weise bestimmt wie zuvor beschrieben. Vereinfachend werden diese Größen über die Beregnungsdauer als konstant angesehen.

Der Erosionswiderstand wurde zunächst für jeden der Einzelversuche getrennt angepaßt (entsprechend dem beschriebenen Verfahren) und daraus durch Mittelung für jede der Meßparzellen der für die Simulationsrechnungen verwendete Referenzwert gebildet.

In Tab. 11 sind die gemessenen wie auch die berechneten Feststoffausträge zusammengestellt. Der Vergleich der Werte ergibt eine mittlere relative Abweichung von ca. 6% für Parzelle 1 und ca. 14% für Parzelle 2.

Die im Vergleich zu den zuvor erläuterten Simulationsrechnungen sehr viel geringeren

Abweichungen sind in diesem Fall darauf zurückzuführen, daß die Versuche mit nur wenigen Tagen Abstand auf jeweils den gleichen Meßflächen durchgeführt wurden. Unter diesen Bedingungen ändern sich die für die Erosion maßgeblichen Einflußgrößen der Erosion nur wenig - dementsprechend bleibt auch der Fehler relativ gering, der dadurch entsteht, daß bei der Simulation diese Änderungen nicht berücksichtigt wurden.

Vergleich mit den Daten der Universität Braunschweig (SFB 179)

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 179 der Technischen Universität Braunschweig "Wasser- und Stoffdynamik in Agrar-Ökosystemen" sind im Untersuchungsgebiet Neuenkirchen an 6 Standorten die Feststoffausträge bei unterschiedlicher Pflanzenbedeckung experimentell untersucht worden. Die Durchführung der Beregnungsversuche und die Ergebnisse hat NIEDER (1984) im Detail beschrieben.

Der im folgenden vorgenommene Vergleich zwischen gemessenen und mit dem Modell berechneten Werten bezieht sich auf die Standorte C, F und G. Die für die Simulation maßgeblichen Kenngrößen dieser Standorte sind in Tab. 12 zusammengestellt.

Die Standorte A und E erwiesen sich aufgrund der stark von der Gefällerrichtung abweichenden Bearbeitungsrichtung nicht für die Simulation geeignet. Für Standort D lag nur ein isolierter Austragswert vor. Die der Messung im Gelände nicht unmittelbar zugänglichen Größen wurden - mit Ausnahme des Rauigkeitsbeiwertes - wiederum nach dem bereits beschriebenen Verfahren ermittelt.

Die in den vorangegangenen Beispielen zur Abschätzung des Rauigkeitsbeiwertes herangezogene Formel von Garbrecht beschreibt - wie bereits erwähnt - nur die körnungsbedingten Rauigkeitseffekte. Für

Tab. 10: Eigenschaften der Meßparzellen 'Im Neuenbürger Pfad' (MP 1) und 'Im Ebertsberg' (MP 2) (n. Angaben von ASTALOSCH, 1990 u. SCHRAMM, 1992)

Relief:								
Parzelle	1				2			
Länge/Breite	22/4				22/4			
Gefälle	16,8				24,2			
Körnung: (Parz. 1 Parz. 2)								
	fein		mittel		grob		Summe	
Ton	0	0	3	3	10	11	13	14
Schluff	17	16	28	30	37	20	82	66
Sand	5	15	0	5	0	0	5	20
Bodenparameter/Schwarzbrache (unbearbeitet)								
Parzelle	1				2			
Versuch	19.10.1990				23.08.1990			
Infiltrationsrate	0,44				0,45			
Erosionswiderstand	$4,1 \times 10^{-4}$ ¹⁾				$2,2 \times 10^{-4}$ ¹⁾			
Rauhigkeitsbeiwert	0,01 ²⁾				0,01 ²⁾			
Bedeckungsgrad	0				0			
Bodenparameter/Schwarzbrache (gelockert)								
Parzelle	1				2			
Versuch	24.10.1990				27.08.1990		29.08.1990	
Infiltrationsrate	0,24				0,41		0,32	
Erosionswiderstand	$4,1 \times 10^{-4}$ ¹⁾				$2,2 \times 10^{-4}$ ¹⁾		$2,2 \times 10^{-4}$ ¹⁾	
Rauhigkeitsbeiwert	0,01 ²⁾				0,01 ²⁾		0,01 ²⁾	
Bedeckungsgrad	0				0		0	
Niederschlag								
Versuch:	Dauer				Intensität			
23.08.1990	70				0,56			
27.08.1990	60				0,61			
29.08.1990	50				0,55			
19.10.1990	50				0,74			
24.10.1990	50				0,55			

Einheiten: Parzellenlänge, -breite [m], Gefälle [%], Körnung [%], Infiltrationsrate [mm/min], Erosionswiderstand [N/m²], Rauhigkeitsbeiwert [s/m^{1/3}], Bedeckungsgrad [%], Niederschlagsintensität [mm/min], Niederschlagsdauer [min]

Anmerkungen: ¹⁾ Erosionswiderstand anhand der gemessenen Feststoffausträge angepaßt; ²⁾ Rauhigkeitsbeiwert n. GARBRECHT, aus der Kornverteilung berechnet.

Tab. 11: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Feststoffausträgen
(Parzellen 1 und 2, Weierbach)

Feststoffaustrag in t/ha				
Parzelle	1		2	
Datum:	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet
23.08.1990			3,79	4,02
27.08.1990			7,73	8,75
29.08.1990			11,87	9,12
19.10.1990	7,66	7,15		
24.10.1990	7,30	7,75		

vegetationslose Flächen kann damit der Rauigkeitsbeiwert mit hinreichender Genauigkeit abgeschätzt werden (s. Tab. 16). Im Falle pflanzenbestandener Flächen ist dies jedoch nicht möglich. Hier kann der Rauigkeitsbeiwert nur experimentell ermittelt oder aus vorhandenen Versuchsergebnissen abgeschätzt werden.

Im vorliegenden Fall konnte zur Abschätzung des Rauigkeitsbeiwertes auf Daten von RASPINI (zit. bei BORK, 1988, S. 146/147) zurückgegriffen werden, die dieser im Zusammenhang mit den o.g. Arbeiten im Untersuchungsgebiet Neuenkirchen für verschiedene Bedeckungsverhältnisse ermittelt hat.

Wie den in Tab. 12 angegebenen Werten zu entnehmen ist, liegen die von RASPINI bestimmten Rauigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad um mehr als eine Zehnerpotenz über den Werten, die unter sonst gleichen Bedingungen für unbedeckte Böden angegeben werden. Dementsprechend stark wirkt sich die Pflanzenbedeckung auf den Erosionsverlust aus.

In Tab. 13 sind die gemessenen Feststoffausträge den simulierten Werten gegen-

übergestellt. Die mittlere relative Abweichung beträgt 22%, bezogen auf alle Werte. Die größten Abweichungen entstehen bei Standort G (max. 96%). Hier treten auch - bedingt durch die weniger dichte Pflanzenbedeckung und der damit sehr viel geringeren Rauigkeit - die größten Austräge auf.

Zusammenfassende Bewertung der Simulationsergebnisse

In Anbetracht der teilweise nur grob abschätzbaren Eingabegrößen und der in den Meßwerten liegenden Fehler (s. ASTALOSCH, 1990, S. 36/37) bewegen sich die Abweichungen in dem erwarteten Rahmen. Für eine Beurteilung der mit dem Modell erreichbaren Vorhersagegenauigkeit reichen jedoch die hier herangezogenen Daten noch nicht aus. Insbesondere müßten die Eingabegrößen genauer als bisher abschätzbar sein, um die tatsächlich auf das Modell zurückzuführenden Berechnungsfehler ermitteln zu können. Da in dieser Hinsicht jedoch nur in sehr begrenztem Maße Verbesserungen möglich sein werden, kann nur über eine möglichst große Zahl von Meßwerten versucht werden, den Fehlerbereich zumindest statistisch besser zu erfassen.

Tab. 12: Eigenschaften der Meßparzellen C, F, G des Untersuchungsgebietes Neuenkirchen
(n. Angaben von NIEDER, 1984)

Relief:			
Parzelle	C	F	G
Länge/Breite	12,4/4		
Gefälle	5,0	6,3	4,2
Körnung (Summen):			
	C	F	G
Ton	18	20	18
Schluff	80	78	80
Sand	2	2	2
Bodenparameter			
Parzelle	C	F	G
Infiltrationsrate	0,69	0,76	0,66
Erosionswiderstand	$16,0 \times 10^{-4}$ ¹⁾	$18,0 \times 10^{-4}$ ¹⁾	$1,9 \times 10^{-4}$ ¹⁾
Rauhigkeitsbeiwert	0,12 ²⁾	0,47 ²⁾	0,01 ³⁾
Bedeckungsgrad	60 (WG)	98 (WG)	30 (BB)
Niederschlag			
Versuch:	Dauer	Intensität	
C 2	60	1,5	
C 5	60	1,5	
C 7	60	1,5	
F 3	30	1,5	
F 7	60	1,5	
F 9	60	1,5	
G 3	30	1,5	
G 6	50	1,5	
G 9	60	0,75	

Einheiten: Parzellenlänge, -breite [m], Gefälle [%], Körnung [%], Infiltrationsrate [mm/min], Erosionswiderstand [N/m²], Rauhigkeitsbeiwert [s/m^{1/3}], Bedeckungsgrad [%] (WG = Wintergerste, BB = Buschbohnen), Niederschlagsintensität [mm/min], Niederschlagsdauer [min]

Anmerkungen: ¹⁾ Erosionswiderstand anhand der gemessenen Feststoffausträge von C 2, F 7, G 6 angepaßt; ²⁾ Rauhigkeitsbeiwert n. RASPINI; ³⁾ Rauhigkeitsbeiwert n. GARBRECHT, aus der Kornverteilung berechnet

Tab. 13: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Feststoffausträgen
(Parzellen C, F, G Untersuchungsgebiet Neuenkirchen)

Feststoffaustrag in t/ha		
Versuch:	gemessen	berechnet
C 2	1,1	1,08
C 5	1,0	1,08
C 7	0,9	1,08
F 3	0,2	0,20
F 7	0,4	0,41
F 9	0,4	0,41
G 3	10,2	19,99
G 6	33,3	33,30
9	5,8	1,73

5.3 Infiltrationsmodell

Da das Ausmaß der Erosion vor allem davon abhängt, wieviel Wasser im Verlauf eines Niederschlagsereignisses oberflächlich abfließt (oder im Boden versickert), kommt der modellmäßigen Beschreibung der Infiltration innerhalb des Gesamtmodells besonders große Bedeutung zu. Die Gültigkeit dieses Teils des Modells soll im folgenden durch den Vergleich mit gemessenen Daten und durch Plausibilitätstests überprüft werden.

5.3.1 Plausibilitätstests

In die Berechnung der Infiltrationsrate gehen folgende Kenngrößen bzw. Zustandsvariablen ein: Körnung, Lagerungsdichte, organ. Kohlenstoffgehalt und Anfangswassergehalt. Der Einfluß dieser Größen ist unter Freilandbedingungen einer isolierten Betrachtung nur schwer zugänglich. Tendenziell ist das Infiltrationsvermögen umso größer, je grobkörniger und humusreicher der Boden ist, und umso kleiner, je dichter und feuchter er ist. Inwieweit diese aus der allgemeinen Erfahrung heraus abgeleiteten Zusammenhänge mit dem rechnerisch ermittelten Verhalten der Infiltrationsrate

übereinstimmen, wird im folgenden anhand verschiedener Berechnungsbeispiele untersucht.

Das erste Beispiel bezieht sich auf den Einfluß der Körnung. In Abb. 53 ist für zwei verschiedene Bodenarten, einen Sand- und einen Lößboden, jeweils der rechnerisch ermittelte Verlauf der Infiltrationsrate als Funktion der Beregnungsdauer aufgetragen.

Man erkennt, daß die Infiltrationsrate im Fall des Sandbodens zunächst sehr viel stärker abnimmt als im Fall des Lößbodens. Erst nach längerer Beregnungsdauer stellt sich unter den hier zugrundegelegten Bedingungen ein gegenüber dem Lößboden größeres Infiltrationsvermögen des Sandbodens ein.

Der Einfluß der Lagerungsdichte äußert sich, wie Abb. 54 zeigt, in einer annähernd parallelen Verschiebung der Infiltrationskurven entlang der y-Achse. Dabei fällt auf, daß bei konstanter Zunahme der Dichte der Betrag der Verschiebung immer kleiner wird. Im Fall eines lockeren Bodens wirkt sich daher eine Veränderung der Dichte sehr viel stärker auf die Infiltration aus als im Fall eines bereits verdichteten Bodens.

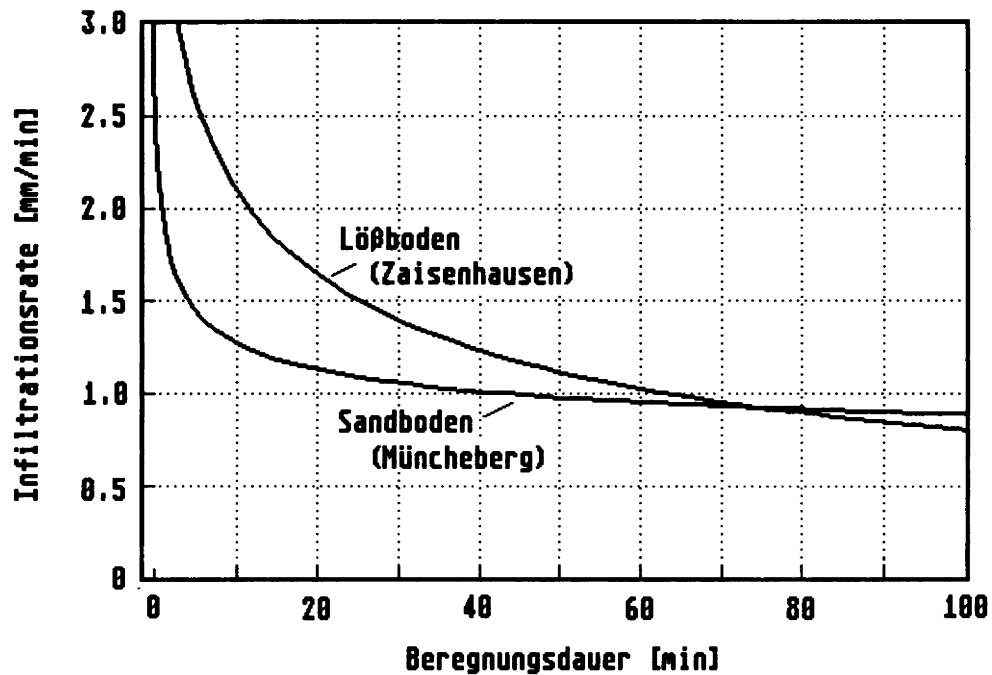


Abb. 53: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Körnung

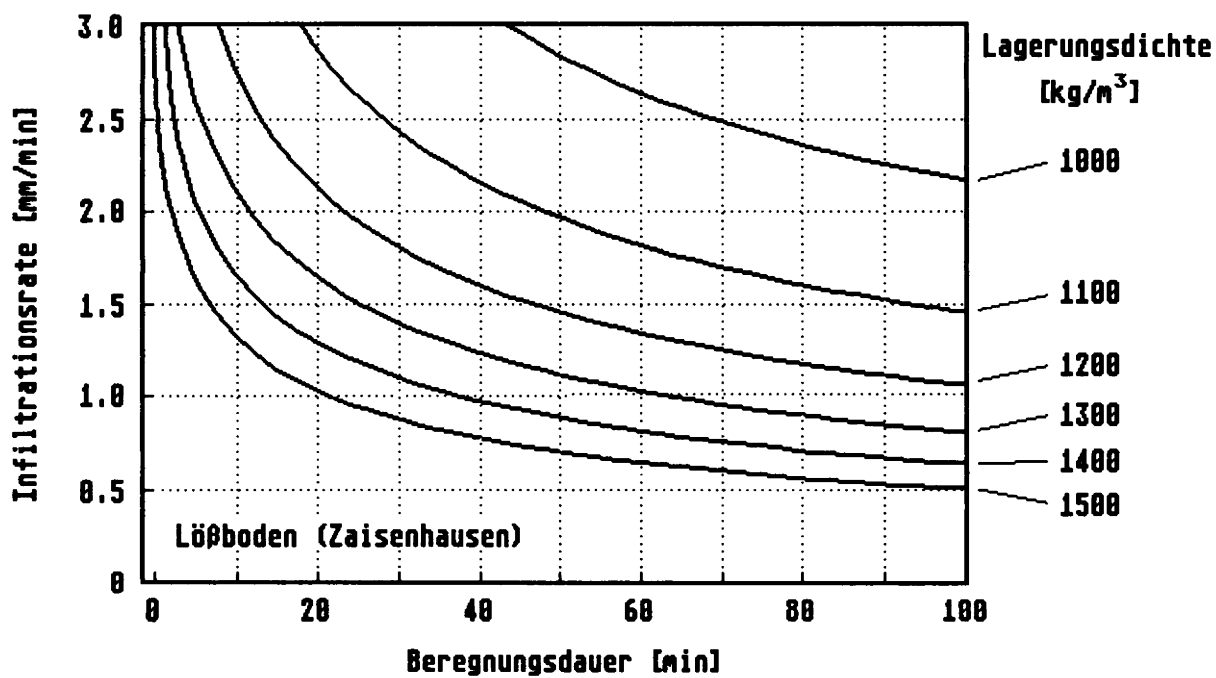


Abb. 54: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte

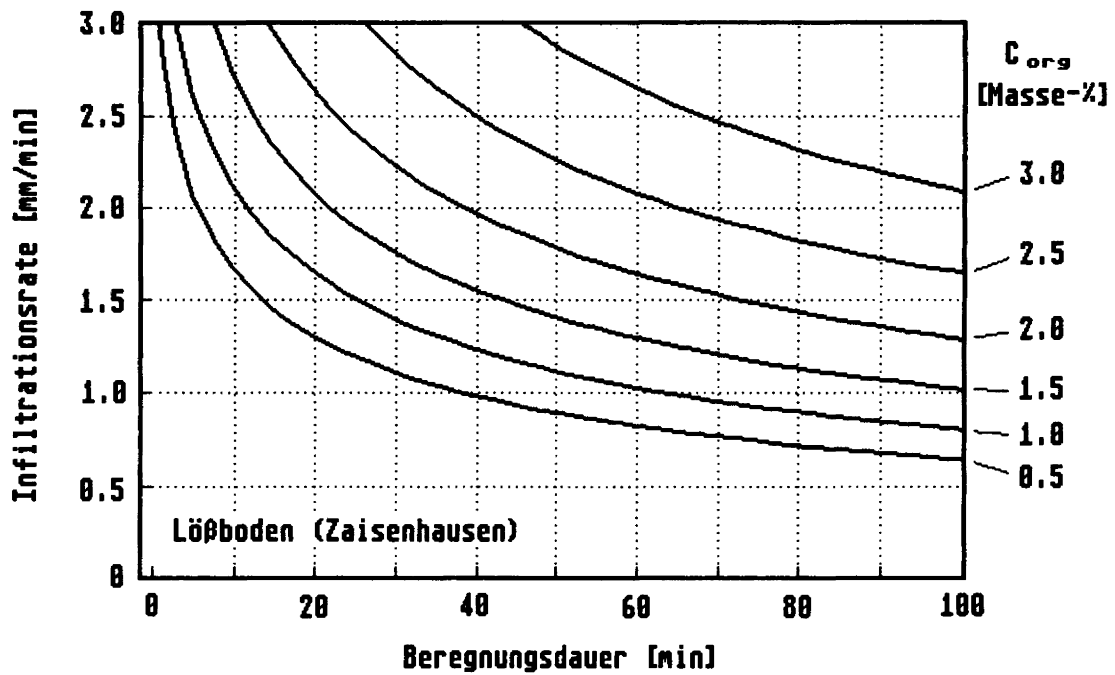


Abb. 55: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Gehalt an organischer Substanz

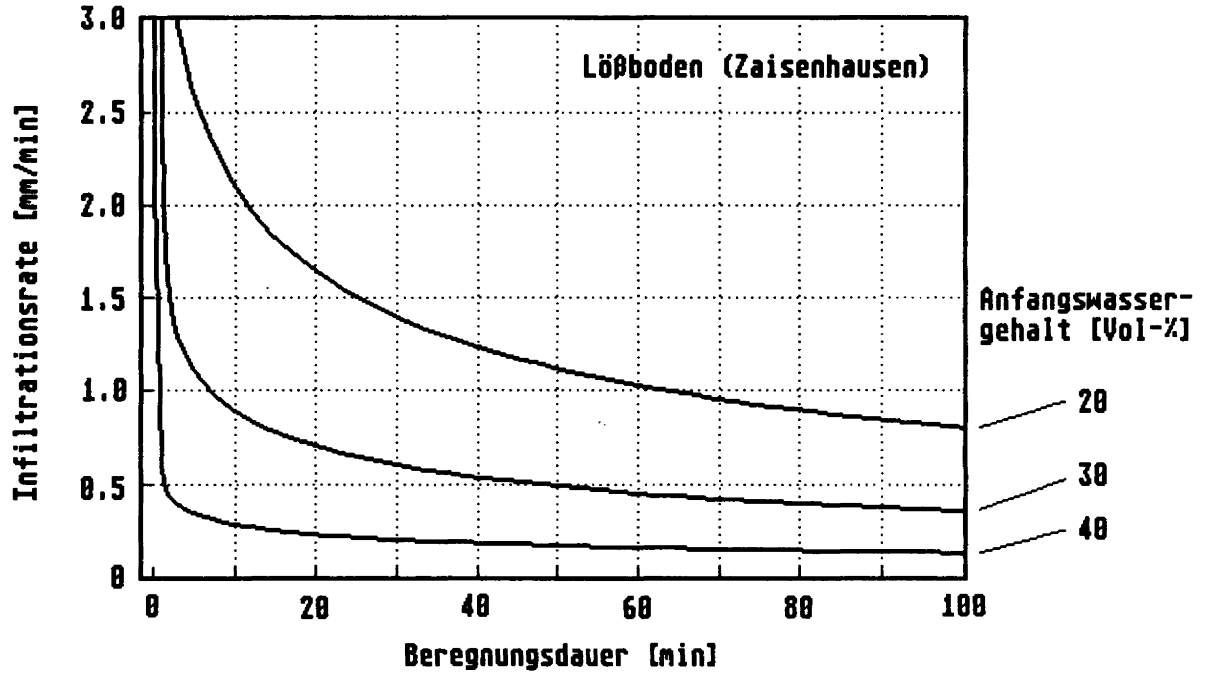


Abb. 56: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate in Abhängigkeit vom Anfangswassergehalt

Dies bestätigt frühere Untersuchungen des Verfassers, bei denen der Zusammenhang zwischen Verdichtung und Infiltrationsrate experimentell untersucht wurde (SCHMIDT, 1988, S. 58).

Der C_{org} -Gehalt wirkt sich in ähnlicher Weise auf das Verhalten der Infiltrationsrate aus wie die Lagerungsdichte (s. Abb. 55). Allerdings nimmt hier die Infiltrationsrate mit dem variierten Parameter zu, während sie im Fall der Lagerungsdichte abnimmt.

Die Anfangsbodenfeuchte beeinflusst stärker als die anderen Einflußgrößen das zeitliche Verhalten der Infiltrationsrate. Je größer die Feuchte ist, desto abrupter fällt die Infiltrationsrate auf das durch die gesättigte, hydraulische Leitfähigkeit gegebene Niveau ab (s. Abb. 56). Die Zeit, die benötigt

wird, um dieses Niveau zu erreichen, wird dementsprechend immer kürzer.

5.3.2 Vergleich mit Meßwerten aus Freilandexperimenten

Um eine Vorstellung von der Größenordnung der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Infiltrationsraten zu gewinnen, wurden 31 Infiltrationsversuche auf Sand-, Löß- und Lehmböden rechnerisch ausgewertet. In Abb. 57, 58 und 59 sind exemplarisch einige der Versuchsergebnisse einschließlich der dazugehörigen Simulationskurven dargestellt. Da die rechnerisch ermittelten Werte sich jeweils auf Zeitschritte von 10 min Dauer beziehen, ergibt sich für die Infiltrationskurven ein annähernd treppenförmiger Verlauf.

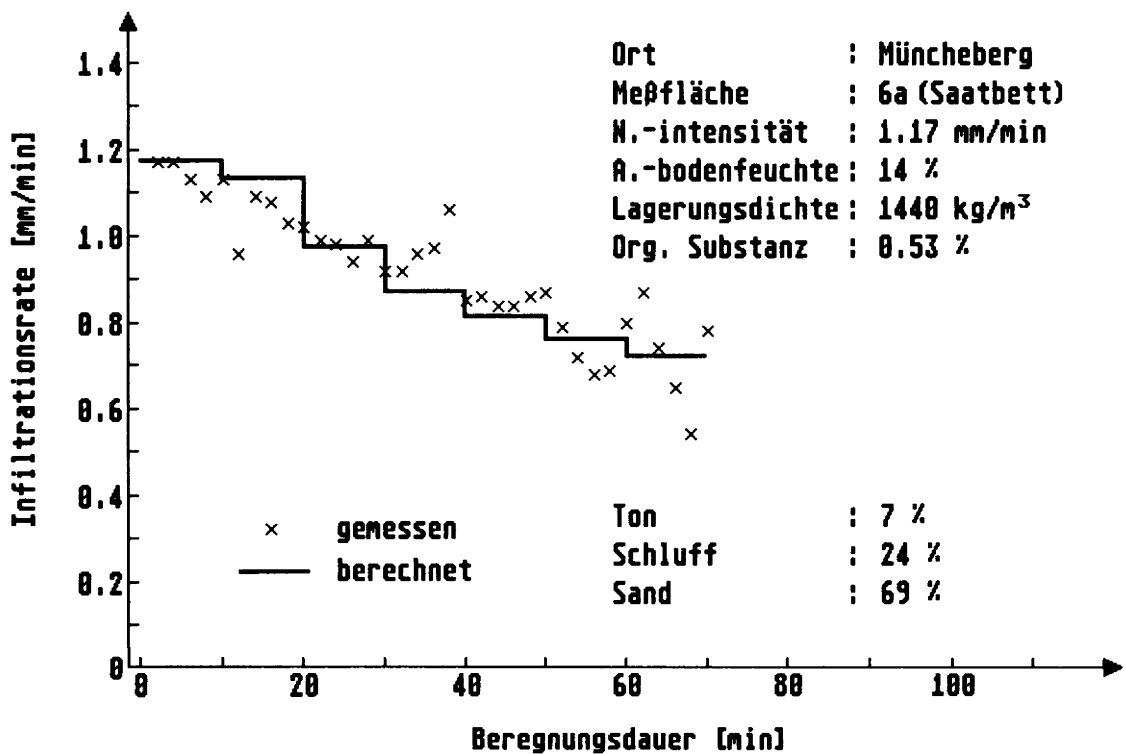


Abb. 57: Gemessener und simulierter Infiltrationsverlauf, Meßpunkt 6a (Müncheberg)
(Quelle: Gross, J. 1992)

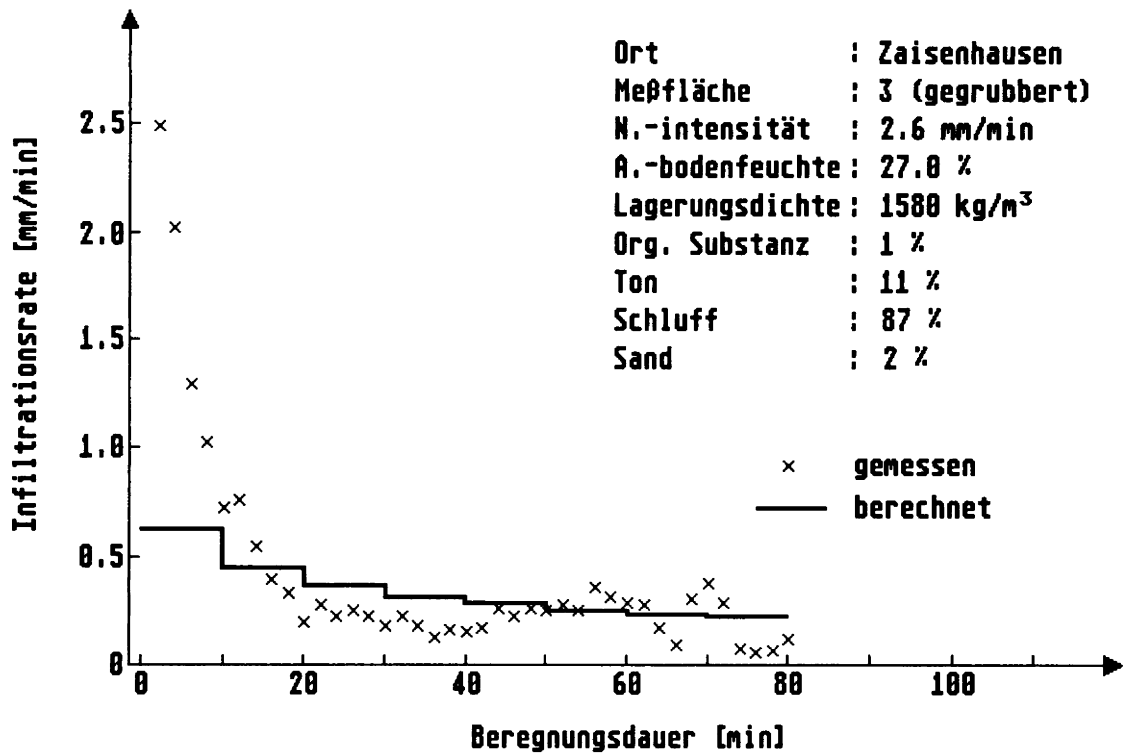


Abb. 58: Gemessener und simulierter Infiltrationsverlauf, Meßpunkt 3 (Zaisenhausen)
 (Quelle: v. Werner, M. 1991)

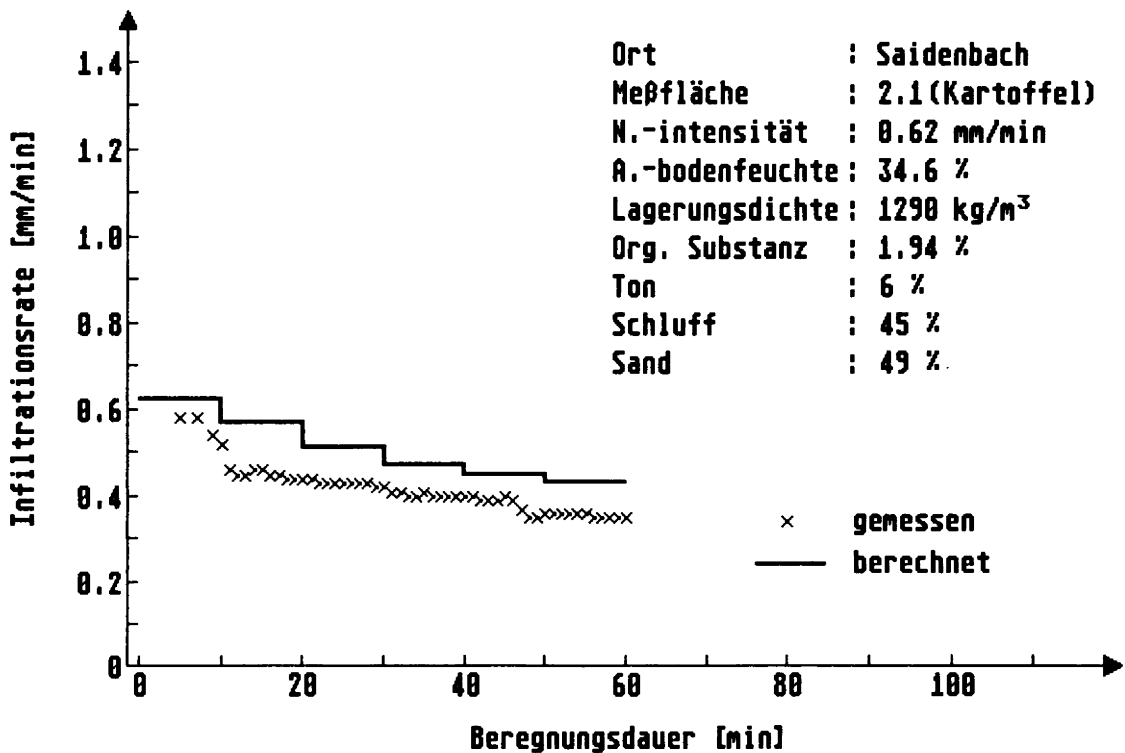


Abb. 59: Gemessener und simulierter Infiltrationsverlauf, Meßpunkt 2.1 (Saidenbach)

Einen Überblick über sämtliche für den Vergleich herangezogenen Meßwerte liefert Abb. 60. Hierin sind die gemessenen Infiltrationsraten unmittelbar über den berechneten unkorrigierten Werten aufgetragen. Um einen direkten Vergleich mit den Rechenwerten zu ermöglichen, wurden die zunächst in zeitlichen Abständen von 1 bzw. 2 Min. vorliegenden Versuchsdaten zu 10 Min. - Mittelwerten zusammengefaßt. Eine quantitative Auswertung dieses Vergleichs ergibt, daß etwa 2/3 der berechneten Werte um mehr als 20% und etwa 1/3 der berechneten Werte um mehr als 50% von den gemessenen Werten abweichen.

Die mitunter erheblichen Abweichungen zwischen gemessenen und mit dem Modell berechneten Infiltrationsraten lassen sich zum Teil auf ganz konkrete Umstände - wie Verkrustungen, Makroporen etc. - zu-

rückführen, die aufgrund von Vereinfachungen im physikalischen Modell zunächst unberücksichtigt bleiben (s. Kap. 4.2.1). Die so entstehenden Fehler sind innerhalb gewisser Grenzen reproduzierbar und können daher durch entsprechende, empirisch ermittelte Korrekturalgorithmen ausgeglichen werden (s. Kap. 6.6). Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere potentielle Fehlerquellen, die außerhalb des Modells liegen (z.B. Unzulänglichkeiten und Fehler bei der Ermittlung der Modellparameter). Sie können programmseitig nicht minimiert werden.

5.4 Modellbedingte Einschränkungen und Fehlerursachen

Der Versuch, die Realität mit einem physikalisch plausiblen mathematischen Modell zu beschreiben, bedingt ent-

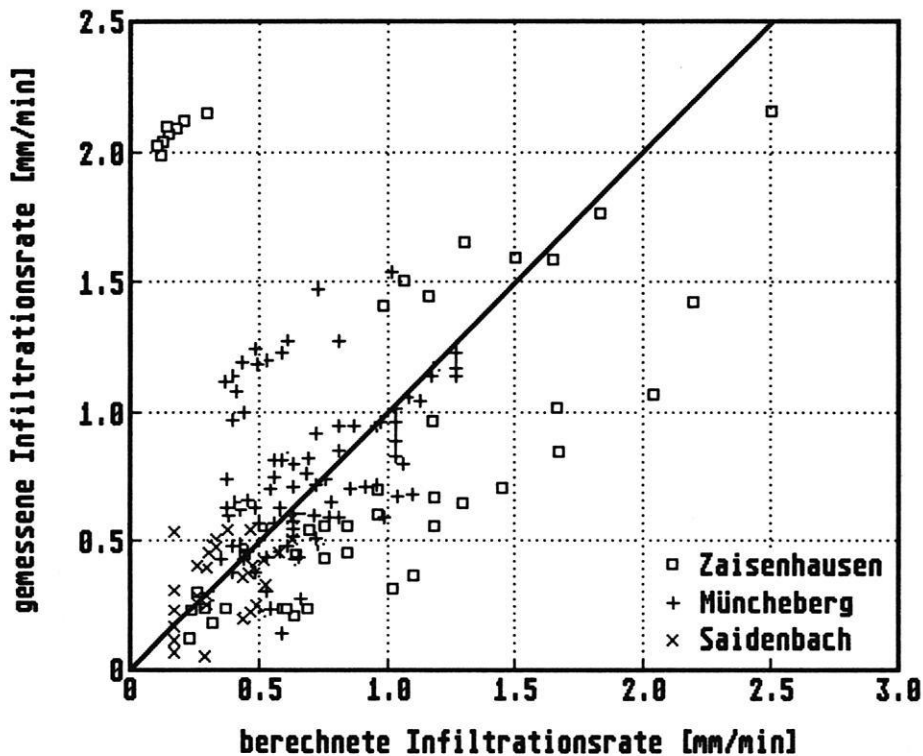


Abb. 60: Vergleich gemessener und simulierter Infiltrationsraten

sprechende Vereinfachungen. Dies schränkt unter bestimmten Umständen die Anwendbarkeit des Modells ein und hat gewisse modellbedingte Berechnungsfehler zur Folge. Davon abgesehen hängt aber die Zuverlässigkeit des Modells vor allem davon ab, wie genau die Eingangsgrößen des Modells geschätzt oder meßtechnisch erfaßt werden können.

Da der Genauigkeit der Eingangsgrößen bei vertretbarem meßtechnischen Aufwand gewisse Grenzen gesetzt sind, würde ein geringeres Maß an Vereinfachung die Zuverlässigkeit des Modells nicht unbedingt erhöhen. Die Komplexität des Modells und der damit verbundene rechen-technische Aufwand müssen mit der Genauigkeit und Verfügbarkeit der Eingangsgrößen in einem angemessenen Verhältnis stehen. Im vorliegenden Fall führte dies zu folgenden Vereinfachungen bzw. Einschränkungen:

- Das Modell gilt nur für den Fall vorwiegend flächenhafter Erosion. Die 2D-Version des Modells enthält keinen Ansatz zur Beschreibung der Fließwege (abhängig von Gefälle, Bodenbearbeitung und Bewuchs).
- Der Einfluß suspendierter Feststoffe auf das Verhalten des Abflusses bleibt unberücksichtigt.
- Das Modell bezieht sich nur auf den Transport von Bodenteilchen (Primärpartikel) in der Suspensionsphase. Hierbei werden die Bodenpartikel durch Kraftwirkungen der turbulenten Strömung bewegt. Der Transport größerer Partikel

(>1 mm) und Aggregate als Bodenfracht (nicht in Suspension) wird durch das Modell nicht abgebildet.

- Bei den Modellrechnungen wird unterstellt, daß sich der Niederschlag gleichmäßig über den betrachteten Hangausschnitt verteilt. Der Einschlagwinkel der Regentropfen und der Einfluß des Windes auf das Verhalten der Tropfen bleibt unberücksichtigt.
- Die Erosionswirkung der von Blattwerk und Stengeln herabfallenden sekundären Tropfen wird vernachlässigt. Je nach Blattform und Höhe der Pflanzen können diese Tropfen ebenfalls Erosion auslösen.
- Fremdwasserzuflüsse und austretender Interflow bleiben unberücksichtigt.
- Muldenspeicherung und Interzeption gehen nicht als selbständige Parameter in das Modell ein, können jedoch als Zuschläge zur Anfangsinfiltrationsrate berücksichtigt werden.
- Der Versickerungsbeitrag der Makroporen wird vernachlässigt.
- Der Infiltrationskomponente des Modells liegt die vereinfachende Annahme zugrunde, daß sich die Bodenmatrix wie ein starrer, in sich homogener Körper verhält. Dies ist insbesondere in den oberen, belebten Horizonten der Böden nur selten der Fall. Daraus folgt u.a., daß:
 - dynamische Prozesse (z.B. Verschlammung der Bodenoberfläche, Luftpolster-effekte), die das Verhalten der Infiltration beeinflussen, nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden können.

6. Bestimmung und Verhalten der Modellparameter

6.1 Überblick

Die Anwendung des Modells setzt die Kenntnis der folgenden Größen voraus:

Reliefparameter: x-, y-Koordinaten des Geländeprofiles

Bodenparameter: Körnung, Lagerungsdichte, organischer Kohlenstoffgehalt, Anfangswassergehalt, Erosionswiderstand, Oberflächenrauigkeit (Mannings n) u. Bedeckungsgrad

Niederschlagsparameter: Niederschlagsdauer u. -intensität

Depositionskoeffizient: (optional)

Korrekturfaktor: (optional)

Ogleich die Zahl der Eingabegrößen so gering wie möglich gehalten wurde, ist die unmittelbare Bestimmung dieser Größen u.U. mit einem nicht vertretbaren meßtechnischen Aufwand verbunden. Vielfach muß daher anstelle eines Meßwertes eine möglichst genaue Schätzgröße herangezogen werden. Soweit dazu bisher Erfahrungen vorliegen, sind diese in den folgenden Abschnitten in Form von Übersichtstabellen und Diagrammen zusammengestellt.

6.2 Reliefparameter

Zur Bestimmung der Reliefparameter bilden die amtlichen, topographischen Karten im Maßstab 1: 25 000 (Meßtischblätter) in der Regel eine ausreichende Grundlage. Allerdings sind lineare Reliefelemente, wie Akkerrandstufen, aufgeschüttete oder eingetiefte Wege, Entwässerungsgräben etc., häufig nicht genau genug aus den Kartenunterlagen zu entnehmen. Nachvermessungen sind daher in Einzelfällen nicht zu umgehen.

6.3 Bodenparameter

6.3.1 Körnung

Die Korngrößenverteilung ist besser als andere Bodeneigenschaften dokumentiert. Die Nutzung dieser Daten ist jedoch nicht ganz unproblematisch, weil die Proben in aller Regel chemisch vorbehandelt (dispergiert) werden. Ziel der Vorbehandlung ist es, die Bodenpartikel in stabile, eindeutig definierte mineralische Einzelkomponenten zu zerlegen. Dazu müssen sämtliche Kittsubstanzen - wie Kalk, Fe- und Mn-Oxide oder Humustoffe - chemisch zerstört werden. Die so ermittelten Kornverteilungen sind zwar besser reproduzierbar als solche ohne chemische Vorbehandlung, sie geben jedoch einen Zustand wieder, der u.U. mit der Realität wenig zu tun hat.

In der Natur liegen die Einzelpartikel nämlich zumeist nicht voneinander isoliert vor, sondern bilden in sich zusammenhängende Aggregate unterschiedlicher Größe und Form. Sie können bei mechanischer Beanspruchung in mehr oder weniger große Bruchstücke zerfallen. Daher ist es nicht ohne weiteres möglich, die für das physikalische Verhalten der Böden tatsächlich relevanten Partikeldurchmesser festzustellen. Eine Methode, die den für die Erosion wichtigen Zerfallsprozeß der Aggregate gut abzubilden vermag, ist die Behandlung der Proben im Ultraschallbad. Die Bodenaggregate werden dabei nicht in dem Maße zerstört wie bei der chemischen Vorbehandlung. Sofern die Möglichkeit dazu besteht, sollten daher die Proben nur im Ultraschallbad - d.h. nur mechanisch - vorbehandelt werden.

In welchem Maße die Probenvorbehandlung die Korngrößenverteilung beeinflusst, zeigt exemplarisch Tab. 14. Während sich die Schluff- und Sandteile wenig oder überhaupt nicht unterscheiden, weichen die

Tab. 14: Vergleich der Kornverteilungen zweier Versuchsböden bei chemischer und rein mechanischer Vorbehandlung

Versuchsboden	Kornfraktion Gew-%	Vorbehandlung	
		mechanisch	chemisch
Hilbersdorf A	Ton	11	18
	Schluff	55	46
	Sand	34	36
Hilbersdorf B	Ton	9	17
	Schluff	57	49
	Sand	34	34

Tongehalte um bis zu 47% voneinander ab. Die chemische Vorbehandlung führt dabei erwartungsgemäß zu den höheren Tongehalten.

6.3.2 Lagerungsdichte

Aufgrund der Bearbeitungseinflüsse unterliegt die Lagerungsdichte von Ackerböden großen zeitlichen Schwankungen. Die Ver-

änderung der Lagerungsdichte im A_p -Horizont eines Ackerbodens ist in Abb. 61 am Beispiel einer typischen Bewirtschaftungsabfolge dargestellt. Man erkennt, daß der mit der Bearbeitung zunächst verbundene Lockerungseffekt nicht über längere Zeit erhalten bleibt. Aufgrund der mechanischen Beanspruchung der Böden durch nachfolgende Bearbeitungsvorgänge und aufgrund des Eigengewichtes der Böden nimmt die Lagerungsdichte sukzessive wieder zu.

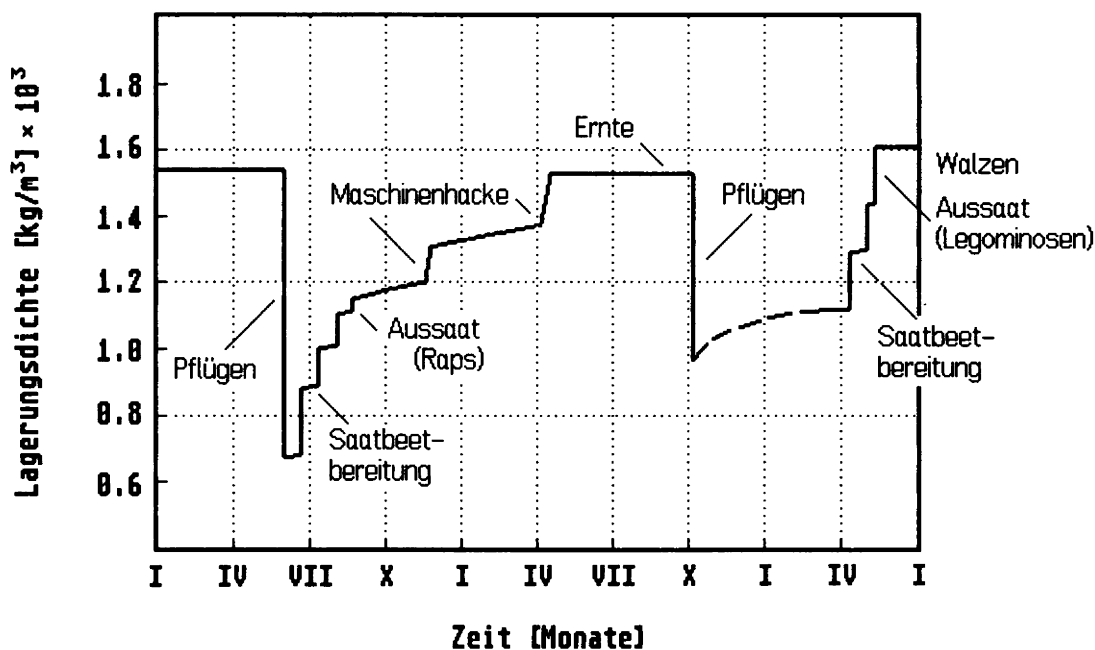


Abb. 61: Veränderung der Lagerungsdichte durch Kulturmaßnahmen (aus: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, S. 162, verändert)

Tab. 15: Erfahrungswerte der Lagerungsdichte in Abhängigkeit von der Bodenart (Angaben in kg/m^3 , n. HARTGE & HORN, 1991, S. 27)

	stark aufgelockert ↔ extrem verdichtet	
Sandböden	1190	1670
Lehmböden	1190	1960
Schluffböden	1190	1530
Tonböden	920	1320

Infolgedessen stellt sich nach einiger Zeit der vor Beginn der Bearbeitung vorhandene Zustand wieder ein.

Aufgrund der sich rasch ändernden Strukturverhältnisse kann die Lagerungsdichte von Ackerböden oft nicht zuverlässig angegeben werden. Einigermaßen stabile Verhältnisse sind in der Regel erst unterhalb des Bearbeitungshorizontes anzutreffen. Obwohl die Struktureigenschaften in unmittelbarer Oberflächennähe eigentlich von größerer Bedeutung sind (vor allem für das Infiltrationsverhalten der Böden), hat es sich doch als zweckmäßig erwiesen, für die Bestimmung der Lagerungsdichte Proben aus größerer Tiefe heranzuziehen (s. Kap. 6.6). Die Entnahmetiefe sollte besonders im Fall bearbeiteter Böden mindestens 20cm betragen.

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Probenahme und der Auswertung der Proben im Labor beschreiben HARTGE & HORN, 1991, S. 27. Eine grobe Schätzung der Lagerungsdichte erlaubt Tab. 15. Hierin sind Erfahrungswerte für einige typische Verdichtungszustände in Abhängigkeit von der Bodenart zusammengestellt.

6.3.3 Organischer Kohlenstoffgehalt

Der organische Kohlenstoffgehalt von Ackerböden liegt im A_p -Horizont im allgemeinen unter 2 Masse-%. Großen Einfluß auf den Kohlenstoffgehalt hat die Menge an Pflanzenrückständen, die nach der Ernte im Boden verbleibt. Bei Getreide ist diese Menge größer als bei Kartoffeln oder Rüben (s. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1992, S. 66). Da intensive Belüftung zu einem verstärkten Abbau der organischen Substanz führt, ist der Kohlenstoffgehalt auch davon abhängig, wie oft und mit welchen Geräten der Boden bearbeitet wird.

6.3.4 Anfangswassergehalt

Die Wassergehalte im Boden unterliegen aufgrund der Witterungs- und Bodenbedingungen unterschiedlich starken Schwankungen. Das Ausmaß der Schwankungen ist u.a. davon abhängig, wie stark oder schwach das Wasser im Boden gebunden wird. Die größten Schwankungen ergeben sich daher beim Sandboden, die geringsten beim Tonboden (s. Tab. 16).

Tab. 16: Schwankungsbereiche der Anfangsbodenfeuchte in Abhängigkeit von der Bodenart (Angaben in Vol-%)

	sehr trocken	↔	extrem feucht
Sandböden	6		40
Lehmböden	28		48
Schluffböden	17		46
Tonböden	48		60

6.3.5 Erosionswiderstand

Sofern alle anderen Modellparameter bekannt sind, kann der Erosionswiderstand durch Anpassung an vorhandene Abtragsdaten rechnerisch ermittelt werden. Dazu wird der Erosionswiderstand solange variiert, bis der mit dem Modell berechnete Abtrag mit dem gemessenen Abtrag übereinstimmt.

Dieses Verfahren ist außerordentlich aufwendig, da die als Vergleichsgrößen benötigten Abtragsdaten nur mit großem technischen Aufwand experimentell bestimmt werden können (s. 7.2.3). Deshalb wurde versucht, den Erosionswiderstand aus anderen, einfacher zu bestimmenden Parametern abzuschätzen.

Hierbei lag es nahe, zunächst zu prüfen, inwieweit die Korngrößenzusammensetzung der Böden (bzw. die Bodenart) zur Abschätzung des Erosionswiderstandes herangezogen werden kann. Die auf der Basis der vorliegenden Abtragsangaben ermittelten Widerstandswerte wurden dazu der jeweiligen Bodenart der Versuchsstandorte zugeordnet (Tab. 17). Die relative große Schwankungsbreite der Erosionswiderstände innerhalb der einzelnen Bodenartengruppen ist vor allem darauf zurückzuführen, daß neben der Körnung weitere physikalisch-chemische Bodeneigenschaften auf den Erosionswiderstand modifizierend einwirken - z.B. der Bearbeitungszustand, die Aggregatstabilität, der Humusgehalt, die Durchwurzelung etc. .

Eine physikalisch dem Erosionswiderstand weitgehend äquivalente Größe ist der Scherwiderstand. Beide Größen - Erosions- und Scherwiderstand - können in der Einheit N/m^2 angegeben werden.

Die Scherwiderstandsmessung ist bei Verwendung eines sog. Pocket Shearmeters mit sehr geringem meßtechnischen Aufwand verbunden. Dadurch ist es möglich, eine große Zahl von Parallelmessungen durchzuführen, was die Sicherheit der Messung stark verbessert. Dennoch sind, nach den bisherigen Erfahrungen, die Meßdaten nicht sehr zuverlässig. Vor allem ist zu berücksichtigen, daß der Scherwiderstand stark vom Wassergehalt abhängig ist. Die Messung muß daher stets unter definierten Bedingungen vorgenommen werden. Da Erosion nur auftritt, wenn die Oberfläche des Bodens wassergesättigt ist (nur unter dieser Voraussetzung entsteht Oberflächenabfluß), ist es sinnvoll, den Scherwiderstand stets bei Wassersättigung zu bestimmen.

In Abb. 62 ist auf der Basis der bisher verfügbaren Daten die Beziehung zwischen Erosions- und Scherwiderstand dargestellt. Man erkennt, daß der Erosionswiderstand bei einfach-logarithmischer Darstellung annähernd linear mit dem Scherwiderstand ansteigt. Die Streuung der Meßwerte ist vergleichsweise groß, allerdings liegen bisher noch nicht hinreichend viele Daten vor, um diesbezüglich zu einer abschließenden Beurteilung zu kommen.

Tab. 17: Schwankungsbereiche des Erosionswiderstandes in Abhängigkeit von der Bodenart

	Erosionswiderstand [N/m^2] $\times 10^{-3}$	Daten- sätze
Sandböden	< 0,5	4
Schluffböden		
> 70% U	0,5 - 2,5	21
< 70% U	2,5 - 5,0	13
Lehmböden	> 5,0	7

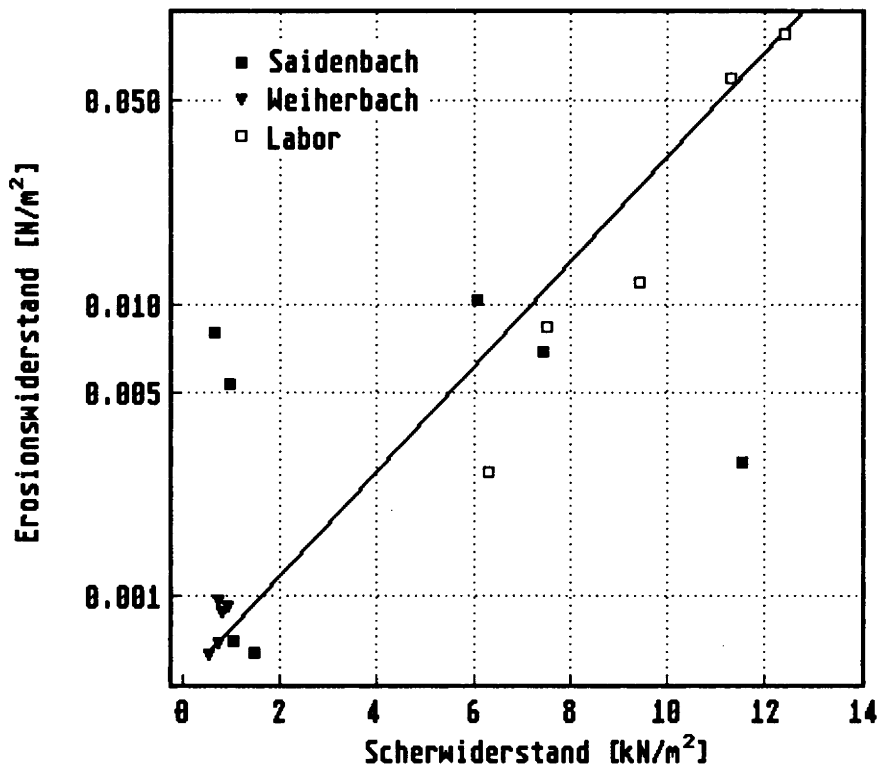


Abb. 62: Zusammenhang zwischen Erosionswiderstand und Scherwiderstand

6.3.6 Rauhgkeit

Der Rauhgkeitsbeiwert (n) läßt sich ebenso wie der Erosionswiderstand nicht unmittelbar meßtechnisch erfassen. Um ihn rechnerisch zu bestimmen, muß zunächst die Strömungsgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses (v_q) in einem Tracer-Experiment ermittelt werden (z.B. mit Rhodamin B oder Salzlösung). Der Rauhgkeitsbeiwert kann dann durch Einsetzen der Strömungsgeschwindigkeit in die MANNING-Gleichung (s. 3.2.2) berechnet werden.

Die MANNING-Gleichung

$$v_q = n^{-\frac{3}{5}} \cdot q^{\frac{2}{5}} \cdot S^{\frac{3}{10}} \quad (89)$$

wird dazu wie folgt umgestellt:

$$n = v_q^{-\frac{5}{3}} \cdot q^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (90)$$

(mit q = Abflußvolumenstrom und S = Gefälle).

Auch hier ist die experimentelle Bestimmung der erforderlichen Parameter sehr aufwendig. Deshalb wurde untersucht, inwieweit eine zur Ermittlung der Rauhgkeit von Flußsohlen entwickelte Näherungsformel auf die Abflußverhältnisse an Hängen, d.h. bei sehr geringer Schichtdicke, übertragbar ist. Die von GARBRECHT, 1961, entwickelte Formel lautet:

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (91)$$

Da im Falle der Böden in der Regel nicht die Einzelpartikel für die Rauhgkeit maßgebend sind, sondern die Bodenaggregate, muß zur Bestimmung des maßgeblichen Partikeldurchmessers (D_{90}) anstelle der Korngrößen- die Aggregatgrößenverteilung

herangezogen werden. Es sei denn, daß - wie im Falle reiner Sand- oder Kiesböden - die Primärpartikel unstrukturiert an der Bodenoberfläche vorliegen.

Zur Bestimmung der Aggregatgrößenverteilung hat sich folgendes Vorgehen als zweckmäßig erwiesen: Die Oberfläche der zu untersuchenden Fläche wird zunächst fotografiert, und dann werden die auf den Aufnahmen makroskopisch differenzierbaren Aggregatgrößenklassen ausgezählt. Auf der Basis der hieraus abgeleiteten Verteilungen wurden gemäß Gl. 46 folgende Rauigkeitsbeiwerte berechnet: (Tab. 18).

Wie der Vergleich der in Tab. 18 angegebenen Werte zeigt, kann mit Hilfe der GARBRECHT-Gleichung im allgemeinen eine recht gute Annäherung an die experimentell bestimmten Rauigkeitswerte erreicht werden.

Im Unterschied zu den Primärpartikeln des Bodens verhalten sich die Bodenaggregate

zumeist wenig stabil, wenn sie den Witterungseinflüssen, insbesondere dem Aufprall der Regentropfen, unmittelbar ausgesetzt sind. Dementsprechend ändert sich die Struktur der Bodenoberfläche und damit auch die Rauigkeit mit der Zeit. Im allgemeinen ist die Rauigkeit unmittelbar nach der Bodenbearbeitung am größten und nimmt dann mit der Zeit ab.

Gl. 81 bildet nur den Rauigkeitseinfluß der Bodenpartikel ab. Die Einflüsse der Vegetation bleiben unberücksichtigt. Da die Vegetation in ihrer Dichte und ihrer Ausprägung örtlich und zeitlich sehr stark variiert, unterliegen auch die damit verbundenen Rauigkeitseffekte großen Schwankungen. Es ist bisher nicht gelungen, diese Effekte durch eine einfach zu handhabende Formel zu beschreiben. Man behilft sich daher mit Vergleichstabellen, in denen die für verschiedene Pflanzenbestände und Entwicklungszustände vorhandenen Daten zusammengestellt sind. In Tab. 19 sind die in der Literatur verfügbaren Daten aufgelistet.

Tab. 18: Körnungsabhängige Rauigkeitsbeiwerte, abgeleitet aus der Aggregatgrößenverteilung an der Bodenoberfläche (GARBRECHT) und aus der Strömungsgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses (MANNING)

Bearbeitungs- zustand	D ₉₀	Rauigkeitsbeiwert [s/m ^{1/3}]	
	[mm]	n. GARBRECHT	n. MANNING
gepflügt	45	0,023	0,024
gepflügt	35	0,022	0,013
gegrubbert	46	0,023	0,028
gegrubbert	27	0,021	0,008
geeggt	27	0,021	0,021
geeggt	20	0,020	0,019
geeggt	8	0,017	0,010
gewalzt	4	0,015	0,010
gewalzt	2	0,013	0,011
gedrillt	11	0,018	0,010

Tab. 19: Vegetationsabhängige Rauigkeitsbeiwerte n. KNISEL, 1980 (1); FOSTER & LANE, 1987 (2); RASPINI in BORK, 1988 (3); MICHAEL, 1994 (4)

Fruchtart	Zustand	Rauigkeitsbeiwert	
		[s/m ^{1/3}]	
Weizenstrohmulch	Brache	0,015 - 0,074	(1)
Getreide	Reifestadium	0,018 - 0,046	(1)
Mais	geerntet, Pflz.-rückstände	0,020 - 0,070	(1)
Grünland	spärlich - sehr dicht	0,015 - 0,400	(1)
Mais	Reifestadium	0,050 - 0,130	(2)
Weizen	Reifestadium	0,060 - 0,250	(2)
Getreide	Bestockungsstadium	0,070	(3)
Wintergetreide	Reifestadium	0,400	(3)
Zuckerrüben	Entwicklungsstadium	0,040	(3)
Zuckerrüben	Reifestadium	0,080	(3)
Wintergerste	Aufgangsstadium	0,028	(4)
Wintergerste	Dreiblattstadium	0,013	(4)
Wintergerste	Vierblattstadium	0,067	(4)
Winterroggen	Zweiblattstadium	0,010	(4)
Raps	Sechsbblattstadium	0,020	(4)
Phacelia		0,010	(4)
Kartoffeln	vor Ernte (ohne Kraut)	0,019	(4)
Mais	geerntet, Pflz.-rückstände	0,032	(4)

6.3.7 Bedeckungsgrad

In Tab. 20 sind für einige wichtige Kulturarten die im Jahresverlauf variierenden Bedeckungsverhältnisse angegeben. Obwohl die phänologische Entwicklung der Kulturpflanzen gewisse Regelmäßigkeiten aufweist, wirken die von Jahr zu Jahr unterschiedlichen Witterungsverhältnisse in Abhängigkeit von den standortspezifischen Bedingungen (Boden, Exposition, Gefälle etc.) und der Art der Bewirtschaftung (Düngung, Bewässerung) modifizierend auf den Bedeckungsgrad ein. Deshalb können die Tabellenwerte nur eine grobe Orientierung geben.

Bezogen auf einen konkreten Termin kann der Bedeckungsgrad ohne großen Aufwand unmittelbar im Gelände geschätzt oder fotografisch erfaßt werden.

6.4 Niederschlagsparameter

Niederschlagsdaten liegen beim Deutschen Wetterdienst (Offenbach) für ein relativ dichtes Stationsnetz vor. Die zeitliche Auflösung der Daten beträgt in der Regel 5 Minuten. Allerdings umfassen die Datensätze häufig nur die Sommermonate von Mai bis September. Da jedoch die für die

Tab. 20: Monatliche Mittel des Bedeckungsgrades in Abhängigkeit von der Kulturart (n. MICHAEL, 1994)

Monat	Wintergetreide			Sommergetreide		
	Gerste	Weizen	Roggen	Gerste	Hafer	Silomais
Januar	15%	5%	60%	0%	0%	0%
Februar	15%	5%	60%	0%	0%	0%
März	15%	5%	62%	0%	0%	0%
April	32%	13%	65%	0%	0%	0%
Mai	66%	40%	79%	14%	15%	6%
Juni	92%	80%	95%	62%	55%	25%
Juli	100%	100%	100%			
August	100%	96%	98%	92%	93%	81%
September	0%	0%	0%	0%	87%	91%
Oktober	2%	0%	0%	0%	0%	89%
November	6%	0%	0%	0%	0%	0%
Dezember	10%	2%	30%	0%	0%	0%

Monat	Spätkartoffeln	Zuckerrüben
Januar	0%	0%
Februar	0%	0%
März	0%	0%
April	0%	0%
Mai	14%	13%
Juni	52%	61%
Juli	86%	95%
August	93%	95%
September	73%	93%
Oktober	28%	0%
November	0%	0%
Dezember	0%	0%

Erosion relevanten Starkregenereignisse bevorzugt in diesem Zeitraum auftreten, kann diese Einschränkung i.d.R. hingenommen werden.

Um die vom Wetterdienst gelieferten Niederschlagsdaten sinnvoll nutzen zu können, müssen aus der Gesamtzahl der erfaßten Einzelereignisse zunächst diejenigen extra-

hiert werden, die für die Erosion relevant sind. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Zur Abschätzung von Extremsituationen können zunächst einzelne Starkregenereignisse herausgegriffen werden. Als Auswahlkriterien sind hierbei sowohl die Niederschlagsintensität als auch die Niederschlagsdauer heranzuziehen.

2. Zur Abschätzung des langfristigen, mittleren Bodenabtrages kann aus der Gesamtzahl der Ereignisse ein Referenzjahr abgeleitet werden, das die durchschnittliche Häufigkeit und Verteilung der Starkregen im Jahresverlauf widerspiegelt.

Zur Festlegung des Referenzjahres hat v. WERNER (1991) die Zahl der Starkregenergebnisse zunächst dekadenweise ausgewertet. Die Häufigkeitsverteilungen der Einzeljahre wurden dann mit der Häufigkeitsverteilung über alle Beobachtungsjahre verglichen. Das Jahr mit den geringsten Abweichungen ist dann das Referenzjahr (zur Anwendung des Referenzjahres s. Kap. 7.1.3 u. 7.2.4).

6.5 Depositionskoeffizient

Die bisher ausgewerteten Versuchsdaten ergaben mit $\kappa \approx 1000$ einen nahezu konstanten Wert des Depositionskoeffizienten. Die Zahl der zugrundegelegten Meßwerte ist allerdings noch zu gering, um sicher sagen zu können, ob der so bestimmte Koeffizient tatsächlich eine Konstante ist. Der im Programm voreingestellte Wert ($\kappa = 1000$) kann daher bei Bedarf verändert werden.

Der Depositionskoeffizient ist einer direkten meßtechnischen Erfassung nicht zugänglich. Die Kalibrierung kann daher nur über Größen erfolgen, die direkt oder indirekt durch den Depositionskoeffizienten beeinflusst werden. Dies sind:

- die Transportkapazität
- der Feststoffaustrag (bzw. -eintrag)
- die Kornverteilung des transportierten Sediments.

Die Transportkapazität ist selbst nur schwer zu bestimmen, weil in der Regel nicht zuverlässig beurteilt werden kann, ob unter den gegebenen Strömungsbedingungen die maximale Feststoffkonzentration tatsächlich erreicht ist. Die Transportkapazität scheidet daher als Eichgröße aus.

Der Feststoffaustrag wird bereits zur Anpassung des Erosionswiderstandes benötigt (s. Kap. 6.3.5) und kann daher nicht auch noch zur Kalibrierung des Depositionskoeffizienten herangezogen werden.

Es verbleibt somit nur die Kornverteilung des transportierten Sediments. In diesem Fall sind experimentelle Vergleichsdaten (sofern nicht ohnehin vorhanden) vergleichsweise einfach zu ermitteln - eine wesentliche Voraussetzung zur Kalibrierung des Depositionskoeffizienten ist damit gegeben.

Wie im Fall des Erosionswiderstandes wird der Depositionskoeffizient zunächst solange variiert, bis die mit dem Modell vorhergesagte Kornverteilung näherungsweise mit der gemessenen Verteilung (s. Kap. 6.3.1) übereinstimmt. Da eine Änderung des Depositionskoeffizienten auch den durch das Modell berechneten Feststoffaustrag verändert, ist meist ein erneuter Abgleich des Erosionswiderstandes notwendig. Diese Prozedur muß u.U. mehrfach wiederholt werden, um sowohl den Depositionskoeffizienten wie auch den Erosionswiderstand mit hinreichender Genauigkeit zu anzupassen.

6.6 Korrekturfaktor

Die mit dem Modell berechneten Infiltrationsraten sind unter ungünstigen Umständen mit erheblichen Fehlern behaftet (s. Kap. 5.3.2). Verantwortlich hierfür sind Vereinfachungen und Einschränkungen im Modellansatz und Unzulänglichkeiten bei der Ermittlung der Modellparameter (s. Kap. 5.4). Mit Hilfe des Korrekturfaktors kann ein Teil dieser Fehler ausgeglichen werden (s. Kap. 4.3.6).

Die praktische Anwendung des Modells zeigt, daß die Notwendigkeit einer Korrektur vor allem dann besteht, wenn die Infiltrationseigenschaften der Böden durch äußere Eingriffe (Bearbeitung, Verdichtung

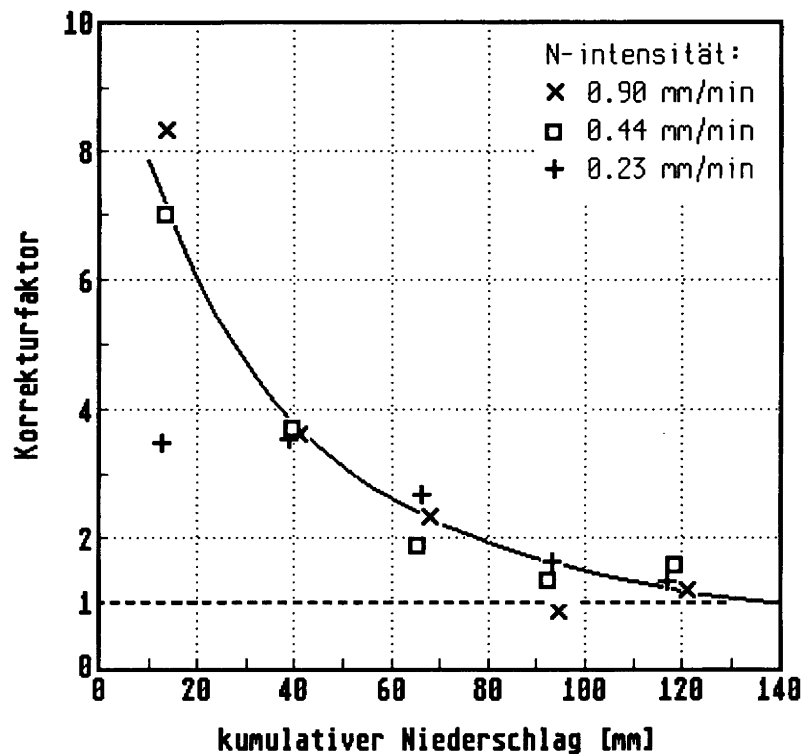


Abb. 63: Abhängigkeit des Korrekturfaktors vom kumulativen Niederschlag im Fall eines frisch bearbeiteten (gelockerten) Bodens aus Löß. (Modellrechnungen unter Heranziehung der Lagerungsdichte in 20cm Tiefe; Daten aus Schmidt, 1988).

usw.) wesentlich beeinflusst werden. Ein solcher Fall ist in Abb. 63 exemplarisch dargestellt.

Die abgebildeten Daten beziehen sich auf einen frisch bearbeiteten Ackerboden aus Löß, der in jeweils 5 aufeinanderfolgenden Experimenten mit unterschiedlicher Intensität beregnet wurde (vgl. 3.3). Die für jeden Einzelversuch bestimmten Korrekturfaktoren sind als Funktion des kumulativen Niederschlages mit der Niederschlagsintensität als Parameter aufgetragen. Als Eingangsgröße der Modellrechnungen wurde aus den bereits in Kap. 6.3.2 genannten Gründen jeweils die mittlere Lagerungsdichte unterhalb des Bearbeitungshorizontes herangezogen (in diesem Fall 1390 kg/m^3). Die Einflüsse der Bodenbearbeitung auf das Infiltrationsverhalten werden daher ausschließlich durch den Korrekturfaktor berücksichtigt!

Wie Abb. 63 zeigt, nähert sich der Korrekturfaktor im Verlauf der Beregnung asymptotisch dem Wert 1 (keine Korrektur). Die in den Beregnungsexperimenten variierte Niederschlagsintensität hat offenbar keinen Einfluß auf das Verhalten des Korrekturfaktors.

Die hohen Werte des Korrekturfaktors zu Beginn der Beregnung kennzeichnen den stark gelockerten und damit extrem durchlässigen Zustand des Bodens unmittelbar nach der Bearbeitung. Wie bereits erläutert, ist dieser Zustand wenig stabil (s. Kap. 6.3.2). Deshalb geht mit zunehmender Niederschlagsmenge der Einfluß der Bearbeitung immer mehr verloren und verschwindet schließlich ganz.

Das dargestellte Beispiel gibt Orientierungswerte, die eine grobe Abschätzung des

Korrekturfaktors für vergleichbare Umstände erlauben. Als Parameter muß allerdings der nach der Bearbeitung gefallene kumulative Niederschlag bekannt sein.

Existieren experimentelle Vergleichsdaten, so kann der Korrekturfaktor unmittelbar bestimmt

werden. Dazu wird dieser solange variiert, bis der mit dem Modell berechnete Oberflächenabfluß mit dem gemessenen Abfluß übereinstimmt. Ein direkter Abgleich der Infiltrationsraten ist nicht möglich, da diese nur programmintern geführt und damit dem Anwender nicht zugänglich sind.

7. Anwendung

Die Beeinflussung der Bodennutzung im Sinne des Erosionsschutzes ist aufgrund der noch fehlenden gesetzlichen Rahmenbedingungen bisher nur sehr bedingt möglich. Dies gilt umso mehr, als Maßnahmen zum Erosionsschutz vielfach den wirtschaftlichen Ansprüchen an den Boden zuwiderlaufen (s. 1.3). Umso wichtiger ist es, Möglichkeiten der Erosionsverminderung dort zu nutzen, wo von staatlicher Seite aus Eingriffsmöglichkeiten im Rahmen regionaler und kommunaler Planungen gegeben sind; z.B. bei der Ausweisung von Wasser- und Naturschutzgebieten oder im Zusammenhang mit Flurbereinigungsverfahren.

Eines der wichtigsten Ziele des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Simulationsmodells ist es, für derartige Fachplanungen wissenschaftlich fundierte Entscheidungsgrundlagen bereitzustellen. In bisher zwei Demonstrationsvorhaben (Zaisenhausen und Saidenbach) ist untersucht worden, inwieweit dies mit Hilfe des Modells möglich ist. Hierbei wurden u.a. folgende Fragestellungen berührt:

- Vorhersage der Auswirkungen der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf den Abtrag (Prognose und Risikoabschätzung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung bzw. der Fruchtart)
- Vorhersage der Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen
- Beurteilung der Auswirkungen von Flurbereinigungsmaßnahmen

- Abschätzung des lateralen Stoffaustrages aus schadstoffbelasteten Flächen
- Abschätzung des Eintrages von erodiertem Bodenmaterial und partikelgebundenen Schadstoffen, insbesondere Schwermetalle in Oberflächengewässer
- Simulation von Langzeitwirkungen

7.1 Demonstrationsvorhaben Zaisenhausen

7.1.1 Problemstellung

Ziel des Vorhabens ist es, exemplarisch verschiedene Anwendungsmöglichkeiten des EROSION 2D Modells im Rahmen der agraren Nutzungsplanung und in diesem Zusammenhang auch der Flurbereinigung darzustellen. Die hierfür herangezogenen Modellrechnungen basieren im wesentlichen auf Daten, die mit Unterstützung des Landesamtes für Flurbereinigung, Baden-Württemberg, im Rahmen einer Diplomarbeit (v. WERNER, 1991) für verschiedene Beispielflächen des Flurbereinigungsgebietes Zaisenhausen/Kraichgau erhoben wurden.

7.1.2 Untersuchungsgebiet

Als Testgebiet für die Anwendung des EROSION 2D Modells wurde ein Teilbereich des Flurbereinigungsgebietes Zaisenhausen ausgewählt. Zaisenhausen liegt im Zentrum des Kraichgaus (Abb. 64) - einer überwiegend mit Löß bedeckten Hügelland-

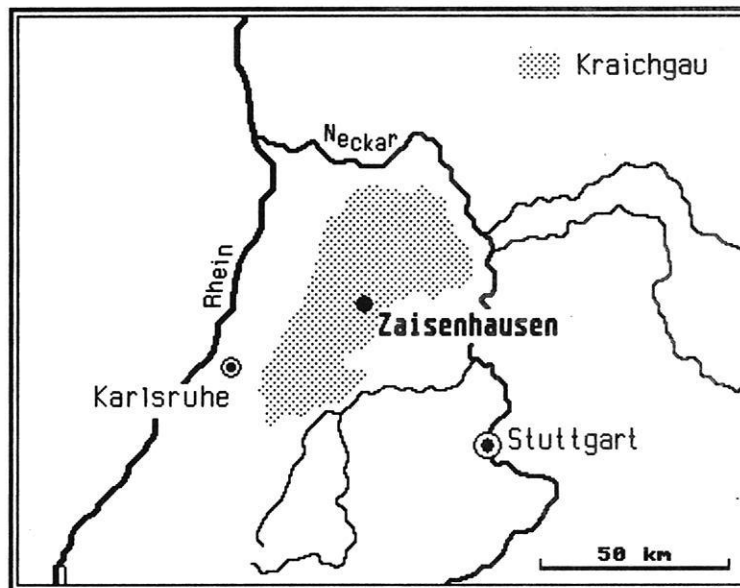


Abb. 64: Lage des Testgebietes

schaft, die vorwiegend landwirtschaftlich genutzt wird. Zeugnisse einer intensiven Erosion der Böden sind, bedingt durch die über Jahrhunderte währende ackerbauliche Nutzung und die besonders erosionsanfälligen Lößböden, allenthalben sichtbar (Hangstufen, Hohlwege etc.).

Der größte Teil des Testgebietes weist Hangneigungen von 3 - 8° und Hanglängen bis etwa 300m auf. Kleinräumig treten auch größere Neigungen (> 22°) auf, z.B. am Südhang des Hedrichsberges (s. Abb. 65). Kennzeichnend für die Böden des Testgebietes ist der hohe Schluffanteil (85-90%). Die Böden werden überwiegend (mit Ausnahme der Wirtschaftswege) ackerbaulich genutzt (Getreide und Hackfrüchte). Die Bearbeitung folgt in der Regel dem Gefälle. Besondere Maßnahmen, die dem Erosionsschutz dienen, existieren bisher nicht.

Die für Erosion relevanten Starkregenereignisse häufen sich in den Sommermonaten (Hitzegewitter). Nach Angaben von QUIST (1986) beträgt der Anteil der Starkregen an der Niederschlagsmenge in den Monaten

Mai und Juni zwischen 60 und 80%. Diese Angaben beziehen sich auf den Kraichgau insgesamt - für das Testgebiet selbst stehen Klimadaten nicht zur Verfügung! Die dem Gebiet räumlich am nächsten gelegene Klimastation ist Bretten - Entfernung ca. 10km.

Die Basisdaten für die Anwendung des Modells wurden repräsentativ an 6 über das Testgebiet verteilten Meßstellen erhoben (s. Abb. 65). Einen Überblick über die an den Meßstellen experimentell bestimmten Größen liefert Tab. 21. Die Bestimmung der Modellparameter wurden bereits in Kap. 6. ausführlich dargestellt. Auf eine Erläuterung der Methoden wird daher hier verzichtet.

7.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Abschätzung der Erosion für ein extremes Einzelereignis

Für eine differenzierte Bewertung des Erosionsrisikos reichen Prognosen über den mittleren jährlichen Abtrag (WISCHMEIER-Gleichung) selten aus. Vor allem bei der

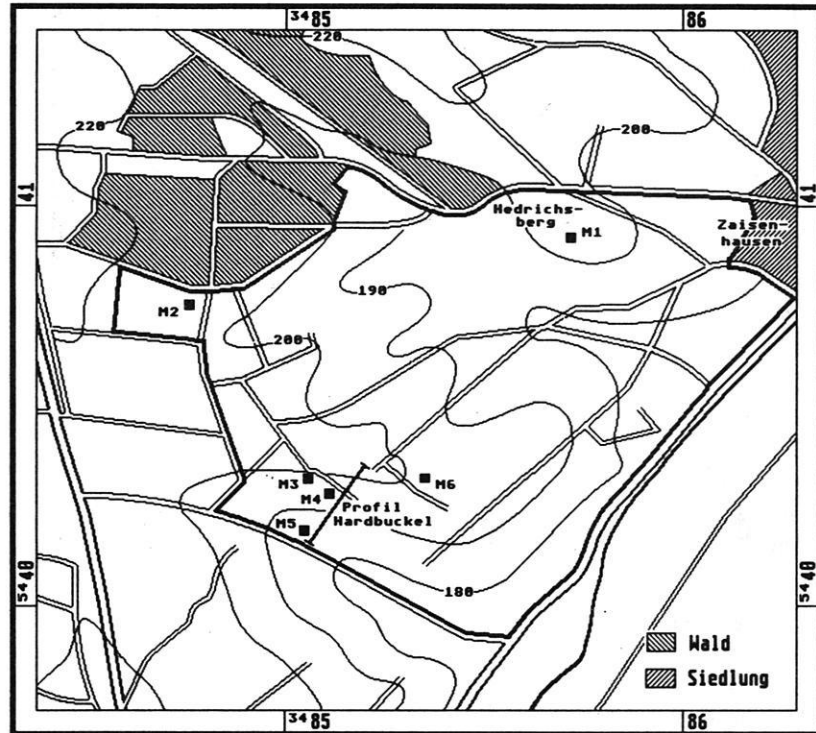


Abb. 65: Untersuchungsgebiet Zaisenhausen, Lage der Meßstellen (Kartengrundlage: Topographische Karte 1 : 25000 Blatt 6818 Odenheim und Blatt 6918 Bretten)

Tab. 21: Parameterbestimmung Testgebiet Zaisenhausen

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

Planung und Bemessung von Schutzmaßnahmen sind Abschätzungen, bezogen auf kurzzeitige Extremsituationen, unerlässlich.

Im folgenden soll zunächst eine solche Extremsituation am Beispiel des Profils

Hardbuckel betrachtet werden. Als Grundlage dient hierbei das Starkregenereignis Bretten/13.06.1963 (s. Abb.66). Auf dieser Basis werden in den Modellrechnungen folgende Varianten der Hanggliederung, der Nutzung und des aktuellen Feuchte-

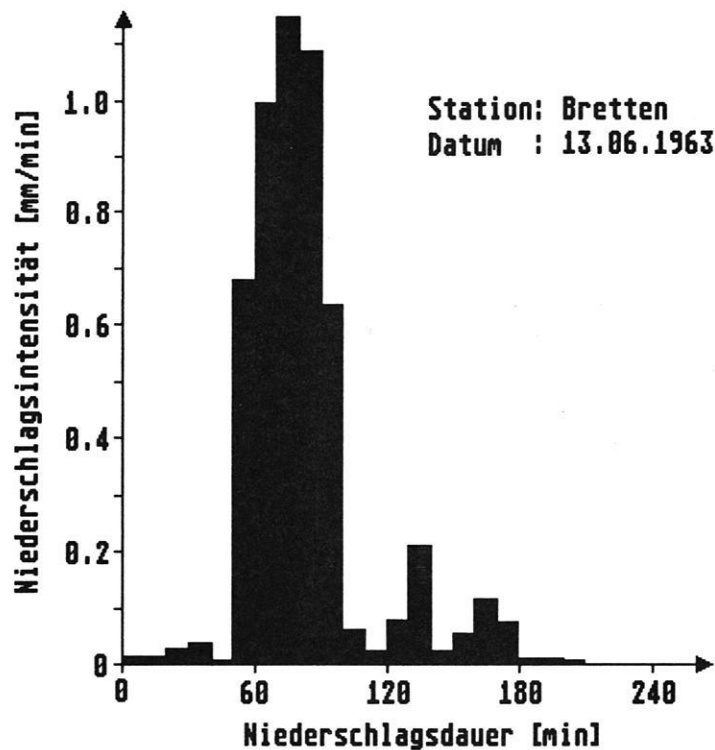


Abb. 66: Extremereignis Bretten 13.06.1963 (Niederschlagsintensität, bezogen auf Intervalle von 10min, Quelle: DEUTSCHER WETTERDIENST)

zustandes gegenübergestellt (vgl. Schmidt, 1992a):

Varianten der Hanggliederung:

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

Varianten der Nutzung:

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

Varianten der aktuellen Bodenfeuchte:

- I : feucht
- II : trocken

Variante A: Hang ungegliedert

Die Simulation der Variante A (Nutzung: Rüben; Boden: feucht) liefert das in Abb. 67

dargestellte Ergebnis. Der obere Teil der Abbildung zeigt das Geländeprofil, der untere den Feststoffaustrag bzw. die Deposition.

Das Profil Hardbuckel ist 275m lang - im oberen Bereich konvex und im unteren Bereich konkav gewölbt. Die maximale Hangneigung beträgt 11% bzw $6,3^\circ$.

Der Austrag (je Flächeneinheit) nimmt zunächst mit der Hanglänge (und -neigung) zu. Das Maximum des Austrages wird bei etwa 100m erreicht. Ab etwa 170m nimmt der Austrag dann wieder ab. Kleinere, das generelle Hangprofil überlagernde Wölbungen bilden sich deutlich im Verlauf der Austragskurve ab. Besonders gut sichtbar ist dies im unteren Hangbereich - etwa bei 200m Hanglänge. Der Austrag zeigt an dieser Stelle ein deutliches Minimum. Am Hangfuß wird ein - allerdings sehr geringer - Teil des erodierten Bodens wieder abgelagert.

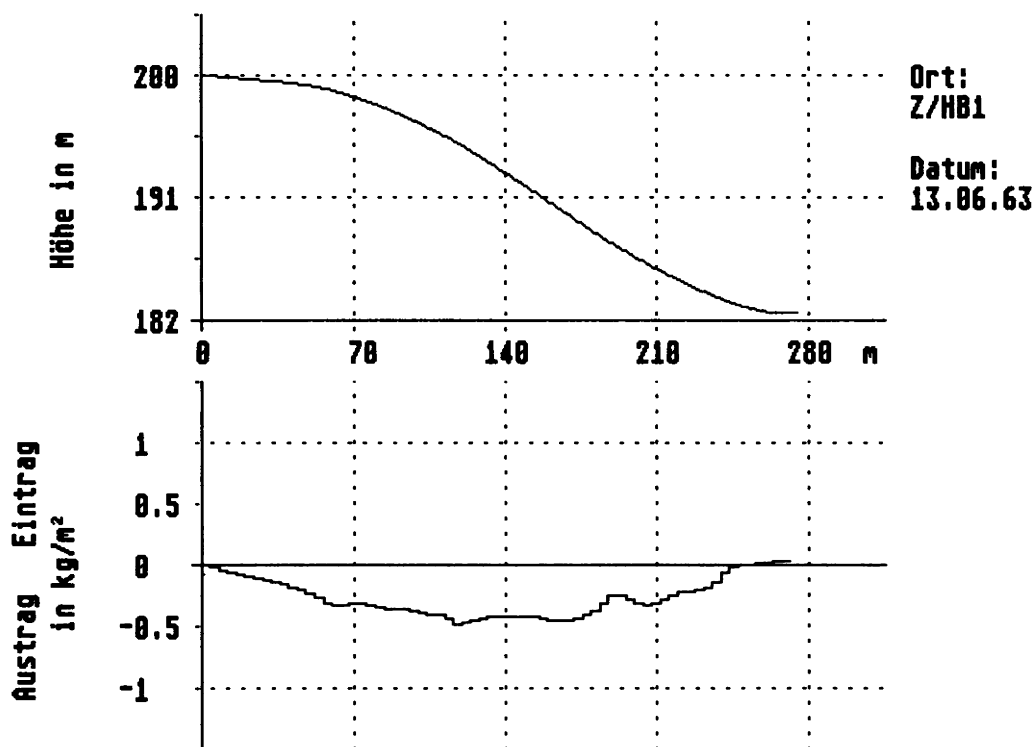


Abb. 67: Simulation der Variante A: Hang: ungliedert, Nutzung: Rüben, Boden: feucht

Variante B: Hang gegliedert durch hangparallelen Grasweg

Der in Abb. 66 dargestellte Fall des ungliederten, d.h. vollständig als Acker genutzten Hanges entspricht nicht der aktuellen, heute vorhandenen Situation. Gegenwärtig teilt ein Grasweg den Hang in einen oberen, flacheren Hangabschnitt und in einen unteren, steileren Abschnitt. Die damit verbundenen Effekte zeigt Abb. 68.

Der Weg verzögert aufgrund der geschlossenen Grasbedeckung den oberflächlichen Abfluß. Aus diesem Grunde wird in diesem Bereich nicht erodiert, sondern - wenn auch in sehr geringem Maße - akkumuliert. Unterhalb des Weges setzt allerdings die Erosion mit umso größerer Intensität wieder ein. Dies hängt vor allem mit der geringeren Sedimentbelastung des Abflusses zusammen, die sich als Folge der Sedimentation im Bereich des Weges einstellt. Darüber hinaus ist die Oberfläche des Weges

infolge des Befahrens stark verdichtet, so daß dort nur wenig Wasser infiltriert. Dadurch nimmt der Abfluß in diesem Bereich stark zu, und der Sedimentstrom wird weiter verdünnt. Unterhalb des Weges kann daher zunächst sehr viel Sediment aufgenommen werden, bis sich erneut ein "Quasi-Gleichgewicht" einstellt. Es wird dann in jedem Hangsegment nur noch soviel Sediment erodiert und zusätzlich aufgenommen, wie unter Aufrechterhaltung des Gleichgewichts (Transportkapazität) zum Ausgleich der niederschlagsbedingten Verdünnung notwendig ist.

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

Die Untergliederung des Hanges entsprechend der in Abb. 68 dargestellten Variante ist unter dem Gesichtspunkt des Erosionsschutzes wenig sinnvoll, da die verstärkte Erosion unterhalb des Weges den positiven

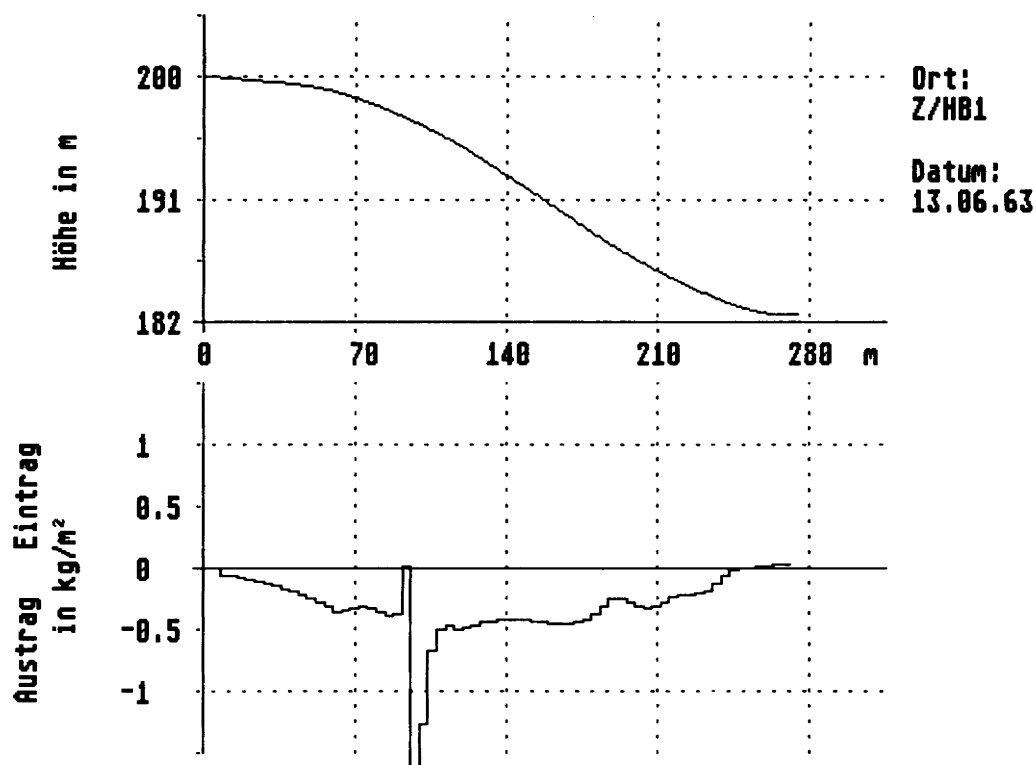


Abb. 68: Simulation für Rüben/feucht mit Grasweg bei 92-96m

Sedimentationseffekt des Weges weit übersteigt. Abb. 69 zeigt die Variante eines Wirtschaftsweges, bei der die zuvor beschriebenen nachteiligen Wirkungen vermieden werden können. Oberhalb des Weges befindet sich ein Grünstreifen, unterhalb ein Graben, um den Abfluß aus dem darüber gelegenen Hangabschnitt abzuführen.

Ersetzt man den Grasweg aus Abb. 68 durch die in Abb. 69 dargestellte Variante, so ergibt sich die in Abb. 70 wiedergegebene Verteilung des Austrages am Hang. Deutlich zu erkennen ist zunächst die Wirkung des Grünstreifens oberhalb des Weges. In diesem Bereich geht die Erosion bis gegen Null zurück. Allerdings reicht der Grünstreifen - zumindest unter den hier gegebenen extremen Niederschlags- und Abflußverhältnissen - nicht aus, um einen we-

sentlichen Teil des weiter oberhalb erodierten Materials zur Ablagerung zu bringen. Dazu müßte der Grünstreifen erheblich breiter sein.

Der Weg selbst wird nicht erodiert, da eine befestigte Oberfläche (Asphalt oder Beton) unterstellt wurde. Der Graben unterhalb des Weges leitet den oberflächlichen Abfluß parallel zum Hang ab, dadurch werden auf der hangabwärts folgenden Ackerfläche extreme Schäden vermieden.

Ein Vergleich mit Abb. 67 zeigt, daß mit einem gemäß Abb. 69 gestalteten hangparallelen Wirtschaftsweg die Erosion wesentlich reduziert werden kann. Da mit der Flurbereinigung in der Regel auch die Anlage eines neuen Wegenetzes verbunden ist, kann über eine entsprechend ausgerichtete Planung ein - wenn auch begrenzter - Beitrag

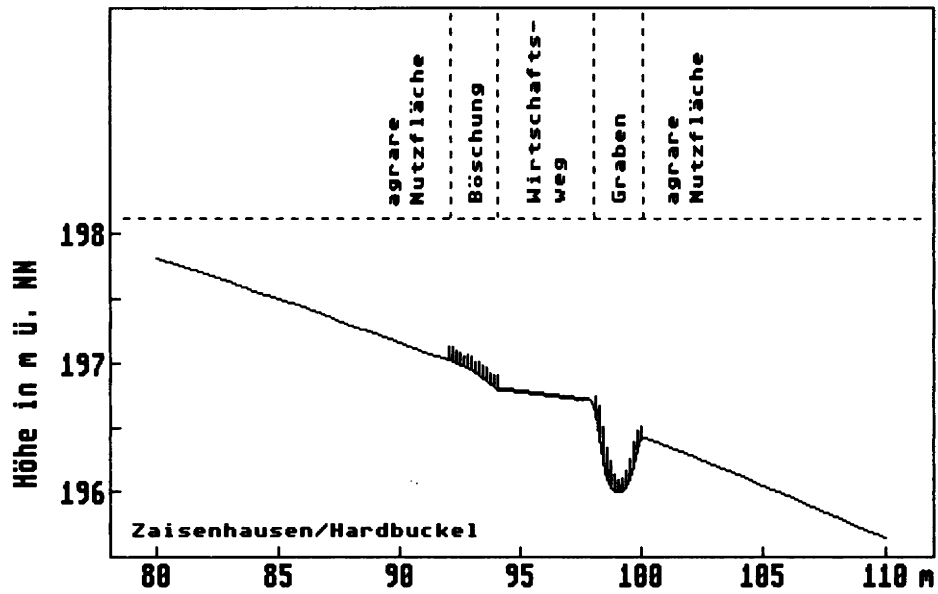


Abb. 69: Ausschnitt aus Profil Hardbuckel mit Kombination Grünstreifen, Weg, Graben (alternativ zu vorhandenem Grasweg)

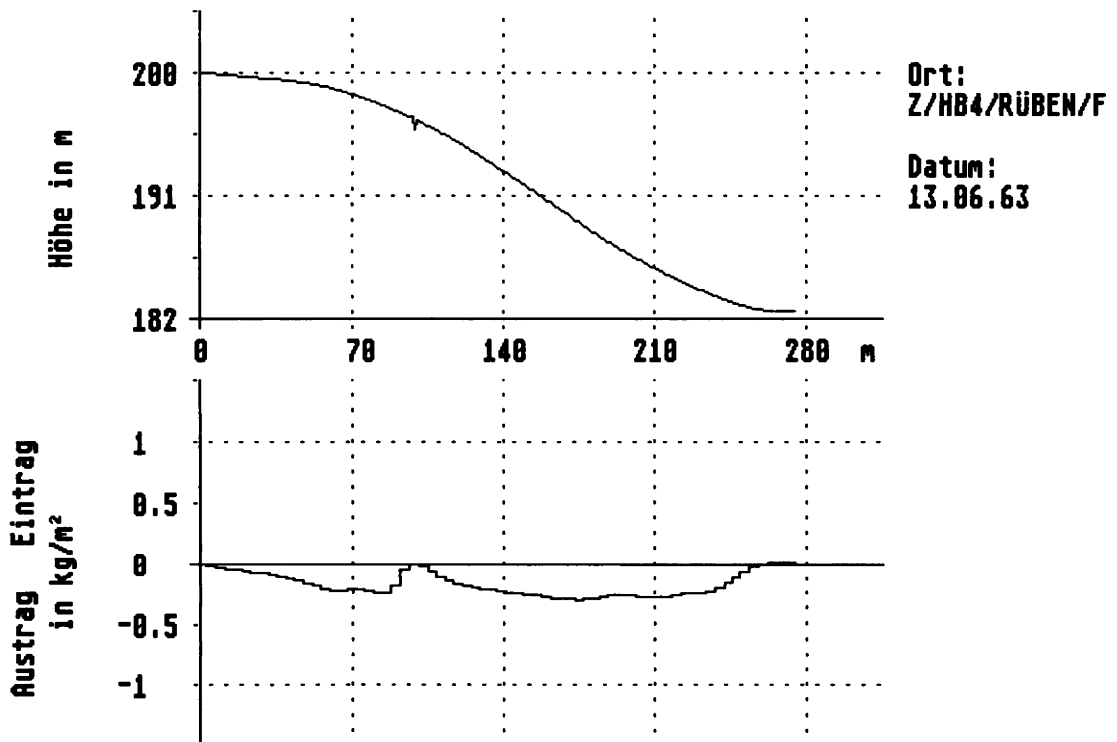


Abb. 70: Simulation für Rüben/feucht mit Kombination Grasstreifen, Weg, Graben bei 92-100m

zum Erosionsschutz geleistet werden. Hierbei ist neben der Ausgestaltung der Wege auch deren Lage am Hang von Bedeutung. Um diesen Einfluß genauer zu untersuchen, wurden anhand der in Abb. 69 dargestellten Kombination aus Grünstreifen, Weg und Graben die in Tab. 22 zusammengestellten Lage-Varianten untersucht.

Tab. 22: Abstand des Grabens von der Hangoberkante

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

* entspricht ungegliedertem Hang

Für jede dieser Varianten wurde der Austrag, bezogen auf den Gesamthang, berechnet und mit dem Austrag des ungegliederten Hanges (Variante I) in Beziehung gesetzt. Die auf diese Weise ermittelten relativen Austräge sind in Abb. 71 in Abhängigkeit von der Hanglänge aufgetragen. Anhand des durch die berechneten Punkte hindurchgelegten Kurvenzuges ist folgendes zu erkennen:

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

gen auf den Austrag des ungegliederten Hanges).

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

Variante D: Hang gegliedert durch hangparallele Terrassen

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

Die Aufteilung des Testhanges (Profil Hardbuckel) in Terrassen unterschiedlicher Breite zeigt Abb. 72. Die Höhendifferenz zwischen benachbarten Terrassen beträgt einheitlich etwa 2,5m. Die Neigung der Terrassenflächen liegt im Mittel bei 2,5%.

Wie die Simulation zeigt, nimmt die Erosion durch die Anlage der Terrassen zwar stark ab, kann aber dennoch nicht völlig unterbunden werden. Die Verminderung des Austrages gegenüber dem unveränderten Hang beträgt unter den hier zugrundegelegten Bedingungen aber immerhin 69%.

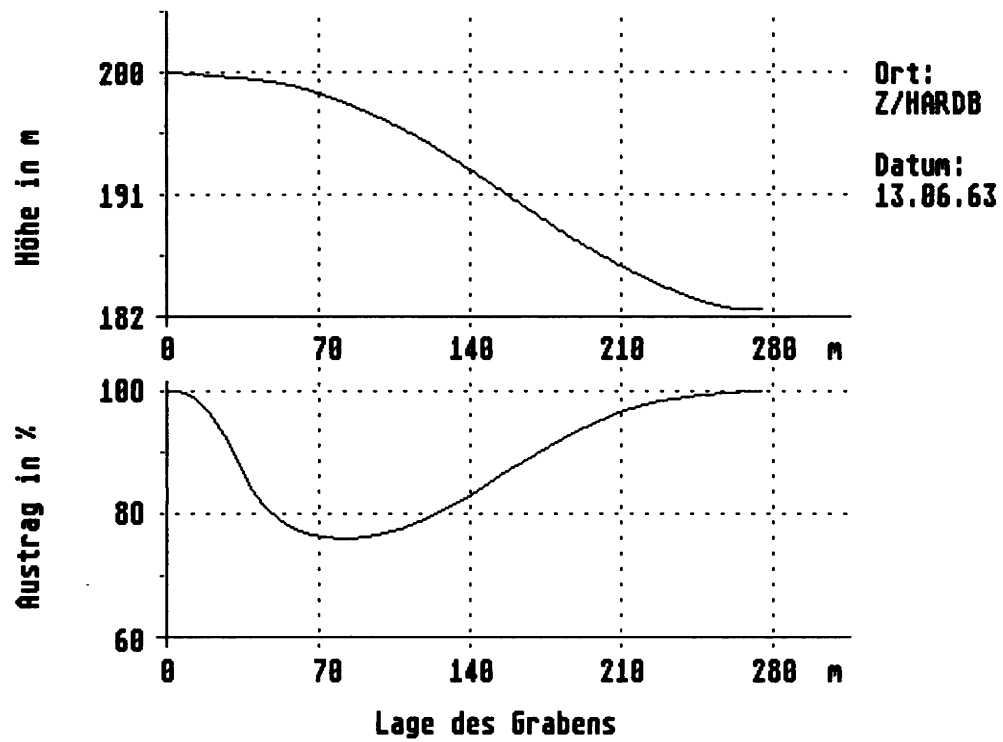


Abb. 71: Minderung des Austrages in Abhängigkeit von der Lage eines hangparallelen Grabens

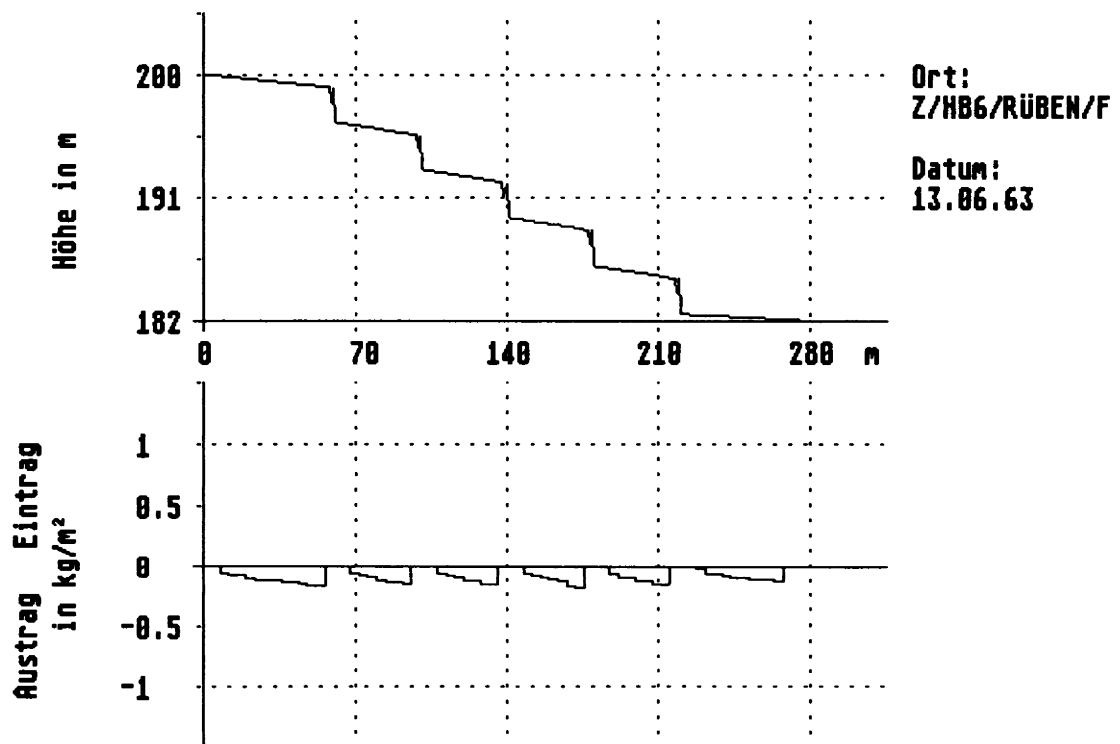


Abb. 72: Simulation für Rüben/feucht bei terrassiertem Hang

Zusammenstellung und Vergleich der unterschiedlichen Varianten

In Abb. 73 sind die in den vorangegangenen Kapiteln angesprochenen Varianten der Hanggliederung in ihrer Wirkung auf den Austrag nochmals gegenübergestellt. Darüber hinaus ist der jeweilige Einfluß der Anfangsbodenfeuchte dargestellt.

Man erkennt zunächst, daß - wie zu erwarten war - der Austrag bei vorbefeuchtetem Boden deutlich größer ist als ohne Vorbefeuchtung. Es ist bekannt, daß mit zunehmendem Anfangswassergehalt die Infiltrationskapazität des Bodens abnimmt - insbesondere zu Beginn des Ereignisses (s. 5.3.1). Ein entsprechend größerer Teil des Niederschlagswassers fließt oberflächlich ab. Dies führt zwangsläufig zu einer Zunahme des Austrages, sofern - wie in diesem Beispiel - alle übrigen Einflußgrößen der Erosion als konstant angenommen werden.

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

Abb. 74 veranschaulicht den Einfluß der Nutzung bzw. des Nutzungszustandes auf den Austrag (am Beispiel der Variante C). Zusätzlich ist auch hier wieder der Einfluß der Anfangsfeuchte angegeben. Die dargestellten Ergebnisse belegen, daß die Nutzung einen sehr viel größeren Einfluß auf den Austrag hat als etwa die Gliederung des Hanges durch Gräben oder Terrassen. Im Zustand der Brache (Saatbeet) werden nach Vorbefeuchtung knapp 12t/ha, ohne Vorbefeuchtung knapp 7t/ha Boden ausgetragen. Im Falle des Weizenfeldes tritt dagegen praktisch keine

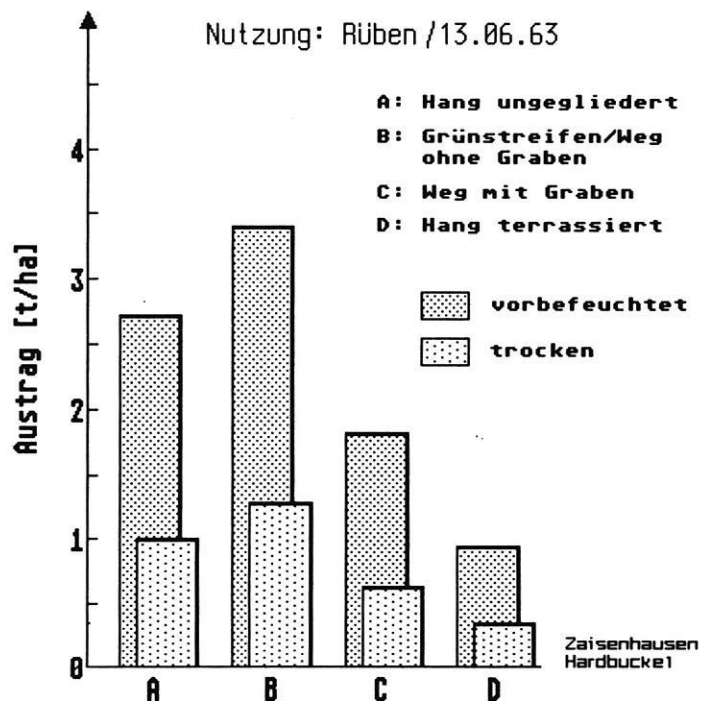


Abb. 73: Abhängigkeit des Austrages von der Gliederung des Hanges und von der Bodenfeuchte

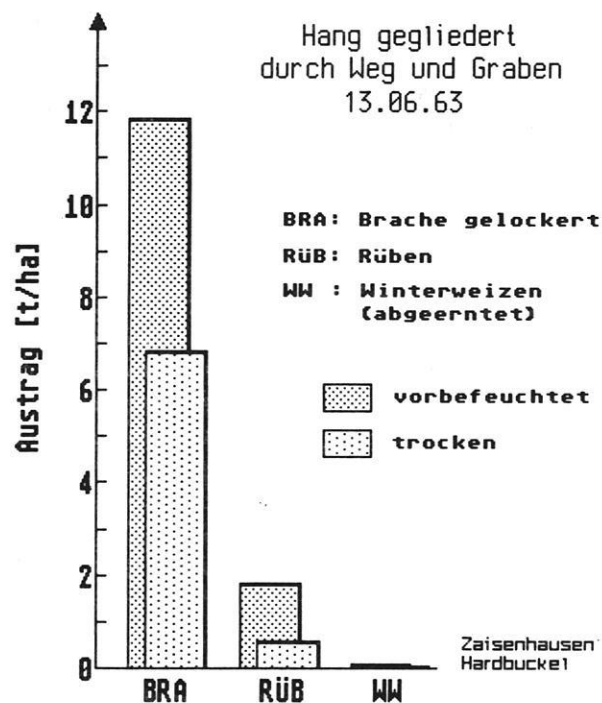


Abb. 74: Abhängigkeit des Austrages von der Nutzung und der Bodenfeuchte

Erosion auf. Unter Rüben bleibt der Austrag unter 2t/ha.

Abschätzung des mittleren jährlichen Austrages

Neben der Simulation einzelner Erosionsereignisse gestattet das EROSION 2D Modell auch die Berechnung sog. Ereignissequenzen. Unter Zugrundelegung eines Referenzjahres (s. 6.4) kann so u.a. der mittlere jährliche Austrag ermittelt werden. Dieser Wert ist vor allem für die Beurteilung der durchschnittlichen langfristigen Erosionsgefährdung von Interesse.

In Tab. 23 sind die für das Profil Hardbuckel/Variante A berechneten jährlichen Nettoausträge zusammengestellt (bezogen auf das Referenzjahr 1955 und die Nutzungen Brache/gelockert, Rüben und Winterweizen - vgl. SCHMIDT, 1992a). Der Wert für Brache/gelockert repräsentiert hierbei den denkbar ungünstigsten Fall. Dieser Wert ist vor allem als Bezugsgröße von Interesse. Unter Rüben reduziert sich

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

Tab. 23: Jährliche Netto-Austräge (Profil Hardbuckel/Variante A), bezogen auf das Referenzjahr 1955 in Abhängigkeit von der Kulturart

Nutzung	Netto-Austrag t/ha · a
Brache/ gelockert	13,4
Rüben	6,2
Winterweizen	0,1

Zum Vergleich sind in Tab. 24 einige Angaben über jährliche Bodenverluste zusam-

Tab. 24: Jährliche Bodenverluste im Kraichgau, nach Angaben verschiedener Autoren

Autoren	Netto-Austrag t/ha · a	Nutzung
Quist (1984)	24 - 115	Rüben
Boll u. Beckert (1985)	40 - 45 30 - 35	Mais Rüben
Dikau (1986)	max. 36 max. 277	Mais Rüben
Böhrer u. Leicht (1988)	44 40	Mais Rüben
Schramm (1992)	max. 2	Mais

mengestellt, die im Kraichgau von verschiedenen Autoren mit unterschiedlichen Methoden gemessen wurden. Es fällt auf, daß die Angaben sehr stark schwanken. Insgesamt liegen die Werte jedoch deutlich höher als die berechneten Werte. Lediglich die Messungen von SCHRAMM (1992, S. 245) ergaben einen geringeren Austrag als berechnet.

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

- Die gemessenen Werte beruhen auf nicht repräsentativen, kurzzeitigen Untersuchungen. Einzelne Extremereignisse liefern - wie die vorangegangenen Berechnungen gezeigt haben - u.U. erheblich größere Austräge als unter Normalbedingungen im jährlichen Mittel.
- Die Übertragung der Ergebnisse von Testflächenmessungen auf ganze Hänge führt tendenziell zu einer Überschätzung der Austräge. Die Übertragbarkeit ist umso weniger gegeben, je kleiner die Testflächen sind (s. SCHMIDT, 1991a, S. 16). Die "Nagelmethode" (QUIST, 1984) als Alternative zu den Testflächenmessungen liefert ebenfalls zu große Austragswerte, da sich die erosions-

bedingten Niveauveränderungen der Bodenoberfläche von den mit der Bodenbearbeitung verbundenen Sackungserscheinungen nicht trennen lassen (s. SCHMIDT, 1988, S. 52).

- Für die Berechnung der Austräge mit Hilfe des Modells standen nur die Niederschlagsdaten aus den Sommerhalbjahren (Mai - Sept.) zur Verfügung. Die Simulationsrechnungen liefern daher, bezogen auf das Jahr insgesamt, zu geringe Austräge.
- Neigung, Bearbeitung etc. der Meßflächen stimmen nicht überein. Dies schränkt die Vergleichbarkeit der Daten zusätzlich ein.

Abschätzung der langfristigen erosiven Änderungen des Geländeprofiles

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

Die bisher dargestellten Modellrechnungen richteten sich einerseits auf die Abschätzung der Erosion unter den Bedingungen eines extremen Einzelereignisses und an-

dererseits auf die Abschätzung der Erosion im jährlichen Mittel (Referenzjahr). In einem weiteren Schritt soll nun versucht werden, auch die langfristigen Effekte der Erosion modellmäßig abzubilden.

Bei der Simulation über lange Zeiträume (100 und mehr Jahre) ergeben sich typische, vor allem von der Nutzung abhängige Veränderungen der Geländegeometrie (s. SCHMIDT, 1991c). Ein solches Beispiel zeigt Abb. 75.

Die in diesem Beispiel dargestellte Simulation basiert auf der Iteration des bereits erwähnten Referenzjahres. Als Beispiel für die Berechnung dient wiederum das Profil Hardbuckel/Variante B. Abb. 75 zeigt das Ausgangsprofil des Hanges und den berechneten Verlauf des Gelände- profils nach 250 Iterationen - also etwa nach 250 Jahren.

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

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

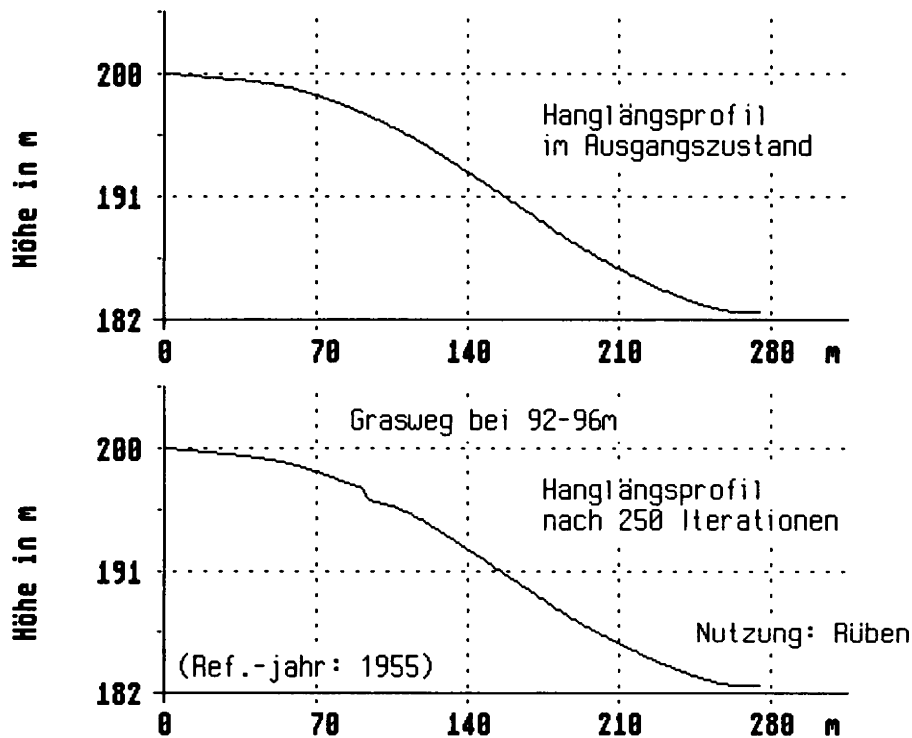


Abb. 75: Einfluß eines höhenlinien-parallelen Grasweges auf die langfristige Entwicklung des Hangprofils

7.2 Demonstrationsvorhaben Saidenbach/ Erzgebirge

7.2.1 Problemstellung

Durch den Eintrag partikelgebundener Schadstoffe sind die Sedimente von Oberflächengewässern und künstlichen Stauhaltungen häufig hochgradig belastet. Vielfach müssen abgebagerte Schlämme aufgrund der hohen Schadstoffgehalte gesondert entsorgt oder behandelt werden.

Für die starke Anreicherung von Schwermetallen und anderen Schadstoffen im Sediment von Talsperren und ähnlichen Oberflächengewässern werden (abgesehen von direkten Einleitungen) vor allem folgende Ursachen verantwortlich gemacht:

- Zahlreiche Schadstoffe (insbesondere Schwermetalle) werden im Boden adsorptiv gebunden. Aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche laden sich hierbei vor allem die feinen Bodenpartikel (Ton und Schluff) mit Schadstoffen auf.
- Die feinen, besonders stark mit Schadstoffen behafteten Partikel können im

Fall der Erosion über große Strecken transportiert werden. Die groben, weniger schadstoffbehafteten Partikel werden hingegen bereits am Hang selbst oder am Hangfuß wieder sedimentiert. In die Gewässer gelangen damit bevorzugt die feinen, hochbelasteten Partikel, die sich dann bei Nachlassen der Fließgeschwindigkeit - z.B. im Bereich von Stauhaltungen - in den Sedimenten anreichern.

Die Quantifizierung und räumliche Zuordnung der skizzierten Transport- und Anreicherungs Vorgänge ist im einzelnen sehr schwierig. Bisher existieren lediglich grobe Schätzungen (z.B.: NOLTE & WERNER, 1991). Für die Entwicklung und praktische Umsetzung geeigneter Vorsorgemaßnahmen fehlen daher wichtige Grundlagen.

Mit Hilfe des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Modellansatzes ist es prinzipiell möglich, das Korngrößenabhängige Transport- und Sedimentationsverhalten der Bodenpartikel zu beschreiben. Das Modell sollte daher auch in der Lage sein, die da-

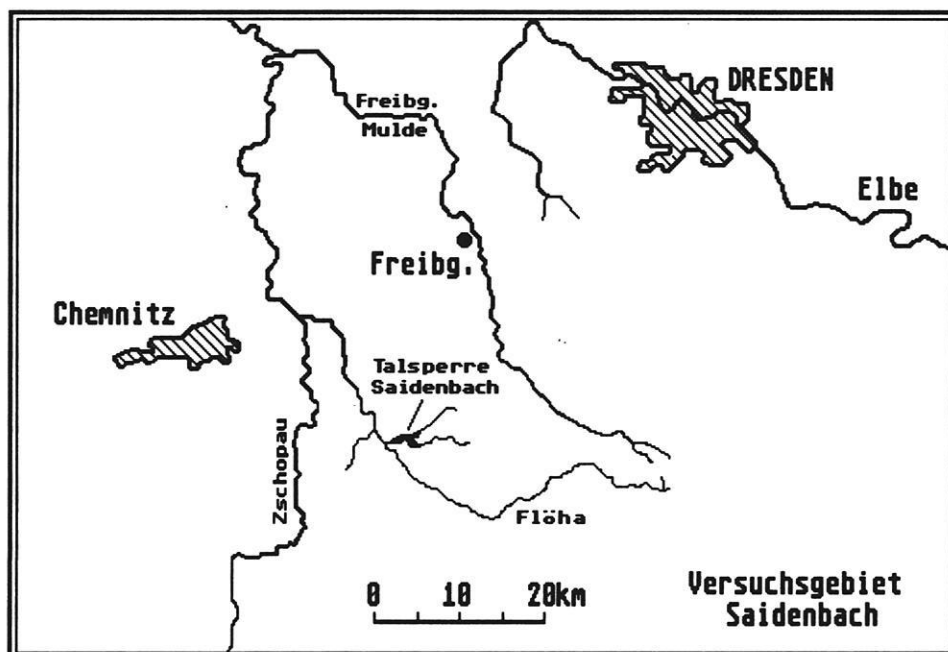


Abb. 76: Lage des Testgebietes "Talsperre Saidenbach"

mit einhergehende Anreicherung schadstoff-behafter Partikel rechnerisch abzubilden. Dies soll im Rahmen dieses Demonstration-vorhabens mit Hilfe experimenteller Untersuchungen überprüft werden.

7.2.2 Untersuchungsgebiet

Als Testobjekt für das Vorhaben wurde das Einzugsgebiet der Saidenbachtalsperre im Osterzgebirge ausgewählt (Abb. 76). Die Böden des Gebietes sind überwiegend in einer sandig-lehmigen, lößbeeinflußten Fließerde entwickelt. Im wesentlichen handelt es sich um Braunerde- und Staugley-Böden. Wie in anderen Teilen des Erzgebirges weisen die Böden vergleichsweise hohe geogene Schwermetallgehalte auf.

Über den Sedimenteintrag in die Saidenbach-Talsperre ist bisher wenig bekannt. Da der überwiegende Teil des Einzugsgebietes (ca. 63%) großflächig ackerbaulich genutzt wird, ist jedoch mit erheblichen erosionsbedingten Einträgen zu rechnen.

Die Schwermetallbelastung der Sedimente ist ebenfalls bisher nicht untersucht worden. Für einige benachbarte Talsperren wur-

den jedoch bereits entsprechende Analysen durchgeführt (Tab. 25). Die ermittelten Gehalte liegen teilweise weit über einschlägigen Grenzwerten (gemäß LAGA-Richtlinie).

7.2.3 Vorgehensweise und Methoden

Zur experimentellen Bestimmung der Modellparameter und zur Generierung von Vergleichsdaten wurden an vier ausgewählten Testhängen des Einzugsgebietes (s. Abb. 84) Versuche mit einer Großberegnungsanlage (Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, 1992) durchgeführt.

Die Beregnungsanlage basiert im wesentlichen auf dem von FOSTER et al. (1982) entwickelten Funktionsprinzip. Sie besteht aus 30 Düseneinheiten, die auf einem zerlegbaren Gestell montiert werden (Abb. 77). Um eine gleichmäßige Niederschlagsverteilung zu erzielen, werden die Einzeldüsen abwechselnd über die Beregnungsfläche geschwenkt. Zur Veränderung der Niederschlagsintensität kann entweder der Düsen-vordruck oder die Verweildauer der Düsen in den Umkehrpunkten variiert werden (s. SCHRAMM, 1992).

Tab. 25: Schwermetallgehalte im Sediment der Talsperren Klingenberg und Lehmühle (Osterzgebirge)

Element	Grenzwert (Z0) [mg/kg]	Talsperren	
		Klingenberg [mg/kg]	Lehmühle [mg/kg]
Pb	100	200-300	200-400
Zn	120	600-1500	300-800
Cd	0,6	10-30	4-12
As	20	50-70	40-60
Hg	0,3	0.3-0.7	0.1-0.3

Quelle: Ingenieurgesellschaft terra nova GmbH 1993: Qualität und Quantität des Sediments in den Trinkwassertalsperren Klingenberg und Lehmühle. Studie i. A. der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen

Z0: Grenzwert für uneingeschränkten Einbau mineralischer Reststoffe gemäß LAGA-Richtlinie: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von Reststoffen/Abfällen (Entwurf II/94)

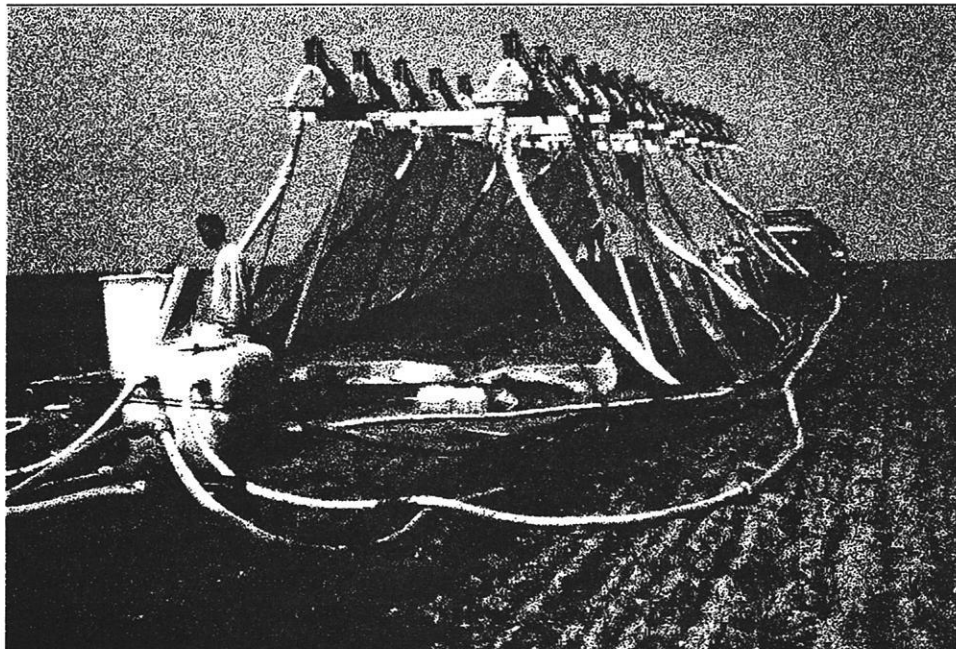


Abb. 77: Großberegnungsanlage zur experimentellen Untersuchung erosionsbedingter Stoffausträge

Die Anlage ist in der Lage, natürliche Starkregen hinsichtlich Aufprallgeschwindigkeit und Größe der Tropfen weitgehend nachzubilden. Die im Rahmen dieses Vorhabens verwendeten Niederschlagsintensitäten lagen zwischen 0,55 und 0,62 mm/min. Die Be-

regnungsdauer betrug zwischen 20 und 60 min. Auf den Testflächen wurde jeweils ein Trocken- und ein Feuchtlauf durchgeführt.

Die Beregnungsversuche liefern die in Tab. 26 zusammengestellten Modellparameter.

Tab. 26: Experimentell ermittelte Modellparameter

	Versuchsflächen			
	M1	M2	M3	M4
Länge/Neigung [m, %]	22/10	22/9	22/10	14/9
T/U/S [%]	6/51/43	6/45/49	6/51/43	6/40/54
Dichte [kg/m ³]	1330/1440	1340/1350	1330/1450	1320/--
org. C [%]	1,94	1,75	2,46	2,50
Anfangswg. [Vol-%]	38/44	37/39	41/45	48/--
Regenint. [mm/min]	0,55	0,62	0,62	0,55
Erosionsw. [10 ⁻³ N/m ²]	5,3/3,4	6,5/2,8	5,2/4,0	1,6/--
Rauhigkeit [s m ^{1/3}]	0,023	0,020	0,016	0,032
Bedeckung [%]	0	10	5	20
	ohne/mit Vorregen			

Zur Abschätzung des partikelgebundenen Stoffaustrages muß zusätzlich zu den in Tab. 26 genannten Größen die Schadstoffbelastung des Ausgangsbodens bekannt sein. Für die vorliegende Untersuchung wurden die Gehalte der Elemente Blei, Zink, Cadmium, Arsen und Quecksilber bestimmt (Perchlorsäure-Aufschluß) und zwar sowohl an den Gesamtproben als auch an den jeweiligen Ton-, Schluff- und Sandanteilen. Außer für die Ausgangsböden wurden die Gehalte der o.g. Schwermetalle auch für die bei den Beregnungsversuchen ausgetragenen Sedimente bestimmt. Die Analysen wurden in allen Fällen durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) durchgeführt.

7.2.4. Diskussion der Ergebnisse

Schwermetallgehalte der Ausgangsböden

In Tab. 27 sind die durch die Analysen ermittelten Elementgehalte der Ausgangsböden zusammengestellt. Die Werte beziehen sich jeweils auf den Gesamtboden (<2mm) bzw. auf die abgetrennten Anteile der Ton-, Schluff- und Sandfraktion. Zu Vergleichszwecken sind wiederum die elementspezifischen Grenzwerte Z0 (gemäß LAGA-Richtlinie) angegeben.

In Abb. 78 sind die fraktionsbezogenen Gehalte an Blei, Zink und Arsen beispielhaft für Versuchsfläche M3 graphisch dargestellt. Das Beispiel belegt den bereits er-

Tab. 27: Schwermetallgehalte im Boden

Versuchsfläche	Elemente	Elementgehalte in [mg/kg]				
		Grenzwert (Z0)	Gesamtboden	Ton	Schluff	Sand
M1	Pb	100	74	154	68	70
	Zn	120	145	410	143	109
	Cd	0,6	3,1	4,6	3,2	2,8
	As	20	-	40	-	-
	Hg	0,3	0,20	0,44	0,13	0,23
M2	Pb	100	87	178	94	68
	Zn	120	153	434	171	100
	Cd	0,6	2,9	3,6	2,7	3,0
	As	20	-	33	-	-
	Hg	0,3	0,17	0,40	0,25	0,07
M3	Pb	100	92	216	98	66
	Zn	120	135	330	156	80
	Cd	0,6	2,6	3,6	2,1	3,1
	As	20	19	69	22	9
	Hg	0,3	0,20	0,32	0,23	0,14
M4	Pb	100	95	192	94	82
	Zn	120	133	354	154	87
	Cd	0,6	1,0	1,5	1,0	1,0
	As	20	-	-	-	6
	Hg	0,3	0,29	0,43	0,25	0,30

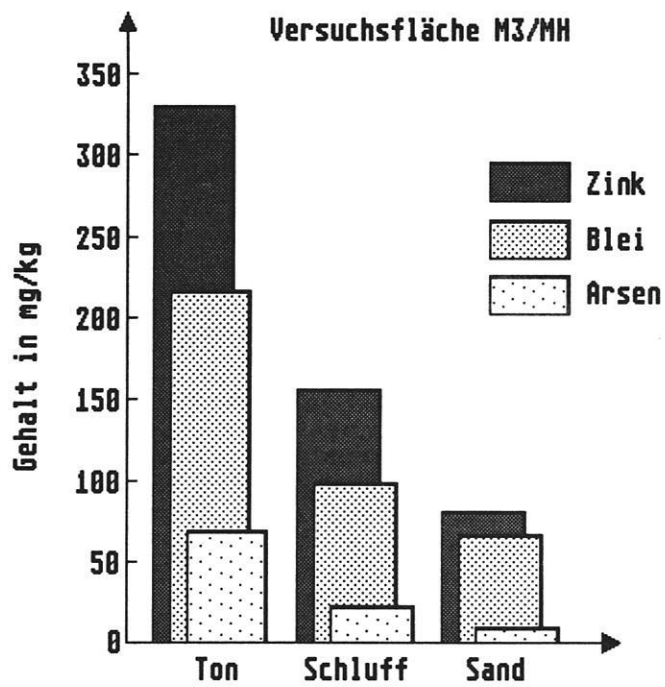


Abb. 78: Gehalte der Schwermetalle Zink, Blei und Arsen im Boden (Versuchsfläche M3)

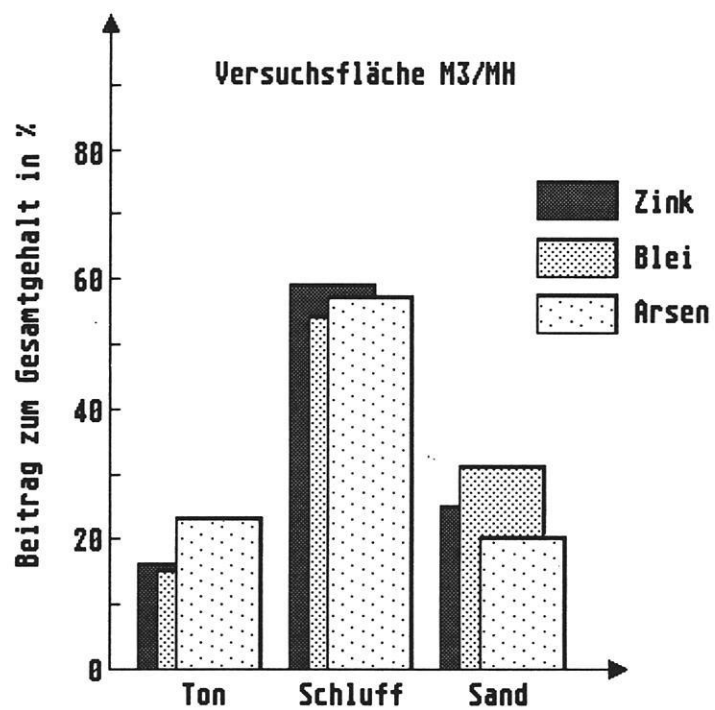


Abb. 79: Verteilung der Schwermetalle Zink, Blei und Arsen auf die Kornfraktionen im Ausgangsboden (Versuchsfläche M3)

läuterten Zusammenhang, daß die spezifischen Schwermetallgehalte mit zunehmender Korngröße stark abnehmen.

Da die Kornfraktionen selbst in unterschiedlichen Anteilen im Boden vertreten sind, sagen die spezifischen Elementgehalte der einzelnen Fraktionen noch nichts über die tatsächliche Verteilung der Schwermetalle im Boden aus. Die fraktionsspezifischen Elementgehalte müssen dazu zunächst auf die Anteile der jeweiligen Kornfraktionen umgerechnet werden. Es ergeben sich dann die in Tab. 28 zusammengestellten Werte.

In Abb. 79 sind exemplarisch für Versuchsfläche M3 die in Tab. 28 angegebenen relativen Beiträge der Kornfraktionen bezogen auf die Elemente Zink, Blei und Arsen graphisch dargestellt. Es zeigt sich, daß mehr als 50% der Schwermetalle in der Schlufffraktion gebunden sind. Dieser Beitrag entspricht näherungsweise dem Schluffanteil am Gesamtboden. Die Tonfraktion trägt demgegenüber nur in vergleichsweise geringem Maße zur Gesamtbelastung der Böden bei, obwohl diese weit aus stärker mit Schwermetallen behaftet ist als die Schluff- bzw. Sandfraktion. Maß-

Tab. 28: Verteilung der Schwermetalle auf die Kornfraktionen im Ausgangsboden

Versuchsfläche	Elemente	Beitrag zum Gesamtgehalt in %		
		Ton	Schluff	Sand
M1	Körnungsanteile	6,5	49,7	43,8
	Pb	13,5	45,3	41,2
	Zn	18,1	48,9	33,0
	Cd	9,7	51,5	38,8
	As	-	-	-
	Hg	15,0	35,0	50,0
M2	Körnungsanteile	6,2	45,2	48,6
	Pb	12,7	49,1	38,2
	Zn	17,6	50,6	31,8
	Cd	7,6	42,1	50,3
	As	-	-	-
	Hg	17,7	64,7	17,6
M3	Körnungsanteile	6,4	50,7	42,9
	Pb	15,0	54,1	30,9
	Zn	15,7	58,8	25,5
	Cd	8,8	41,8	49,4
	As	22,5	57,5	20,0
	Hg	10,0	60,0	30,0
M4	Körnungsanteile	7,1	40,6	52,3
	Pb	14,4	40,3	45,3
	Zn	18,9	46,9	34,2
	Cd	10,5	39,3	50,2
	As	-	-	-
	Hg	10,3	34,5	55,2

geblich hierfür ist der Umstand, daß der Anteil der Tonfraktion, bezogen auf den Gesamtboden, nur zwischen 6 und 7% beträgt.

Schwermetallgehalte der Sedimente

Die Gehalte der o.g. Schwermetalle in den ausgetragenen Sedimenten sind deutlich größer als diejenigen der entsprechenden Ausgangsböden (siehe Tab. 29). Eine Ausnahme bilden dabei nur die Cadmiumgehalte.

Betrachtet man allerdings die fraktionsbezogenen Gehalte der verschiedenen Schwermetalle (siehe Abb. 80 für Blei), so unterscheiden sich Sedimente und Böden nur unwesentlich voneinander. Die Zunahme der Gesamtgehalte der Schwermetalle im Sediment kann daher nur damit zusammenhängen, daß sich im Zuge des erosiven Transportes die stärker mit Schwermetallen behafteten Ton- und Schluffteilchen gegenüber den weniger belasteten Sandpartikeln anreichern.

Anhand der in Abb. 81 exemplarisch für Versuchsfläche M3 dargestellten Kornsummenkurven des Ausgangsbodens und des ausgetragenen Sediments ist unschwer zu erkennen, daß die Kornsummenkurve des Sediments deutlich gegenüber derjenigen des Bodens nach links, d.h. zu den feineren Bodenpartikeln hin, verschoben ist. Dies bedeutet, daß sich der Ton- und der Schluffanteil erhöhen (von 6,4% auf 13,3% bzw. von 50,7% auf 81,8%), während der Sandteil stark abnimmt (von 42,9% auf 4,9%).

Dementsprechend nimmt, wie Abb. 82 am Beispiel des Elementes Blei zeigt, der Beitrag der Ton- und vor allem der Schlufffraktion zur Gesamtschwermetallbelastung deutlich zu, während der Beitrag der Sandfraktion im Vergleich zum Ausgangsboden stark abnimmt.

Eine Zusammenstellung sämtlicher Daten zur Verteilung der Schwermetalle auf die Kornfraktionen liefert Tab. 30.

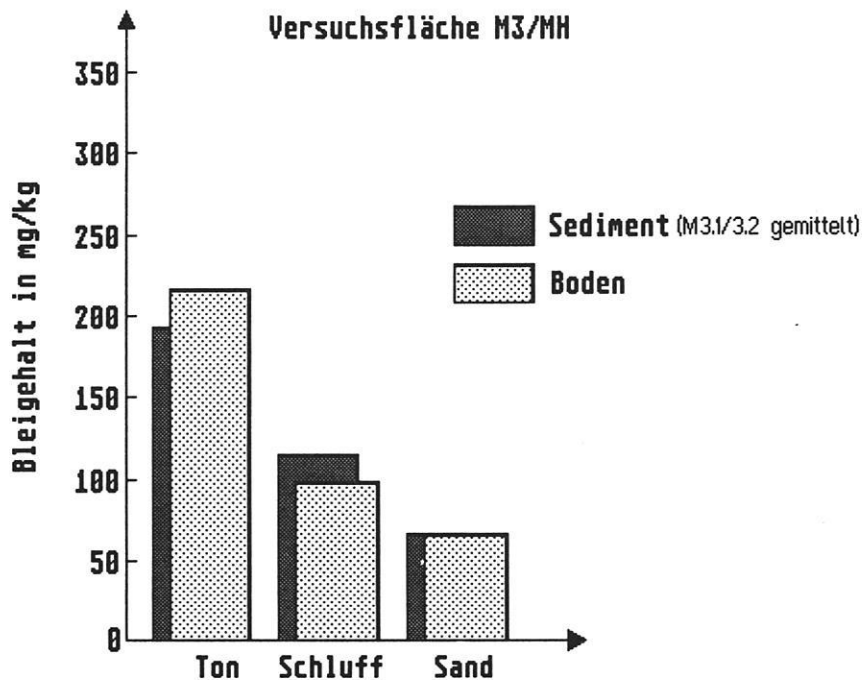


Abb. 80: Bleigehalte im ausgetragenen Sediment (Versuch M3.1/3.2)

Tab. 29: Schwermetallgehalte im Sediment

Versuch	Elemente	Elementgehalte in [mg/kg]				
		Grenzwert (Z0)	Gesamt-sediment	Ton	Schluff	Sand
M1. 2	Pb	100	105	142	96	75
	Zn	120	328	536	277	335
	Cd	0,6	1,2	1,2	1,2	1,0
	As	20	-	37	21	-
	Hg	0,3	-	0,6	0,14	-
M1. 3	Pb	100	95	172	78	67
	Zn	120	203	386	161	156
	Cd	0,6	2,5	3,0	2,4	2,5
	As	20	-	33	-	10
	Hg	0,3	0,37	0,95	0,20	0,73
M2. 1	Pb	100	123	184	104	60
	Zn	120	351	611	271	124
	Cd	0,6	1,6	1,8	1,5	0,5
	As	20	33,2	65	23	12
	Hg	0,3	0,46	0,36	0,48	0,73
M2. 2	Pb	100	110	198	92	60
	Zn	120	229	434	188	96
	Cd	0,6	2,02	2,8	2,2	1,2
	As	20	-	-	27	9
	Hg	0,3	0,35	0,43	0,32	0,35
M3. 1	Pb	100	115	180	108	60
	Zn	120	211	191	217	156
	Cd	0,6	2,6	2,8	2,6	2,4
	As	20	-	-	29	16
	Hg	0,3	0,32	0,36	0,31	0,43
M3. 2	Pb	100	119	186	110	66
	Zn	120	219	351	196	175
	Cd	0,6	2,1	3,2	1,9	1,6
	As	20	-	-	-	-
	Hg	0,3	0,29	0,31	0,27	0,52
M4. 1	Pb	100	174	178	105	70
	Zn	120	448	441	249	210
	Cd	0,6	2,4	1,8	1,6	1,1
	As	20	-	50	40	-
	Hg	0,3	-	0,68	0,26	0,30

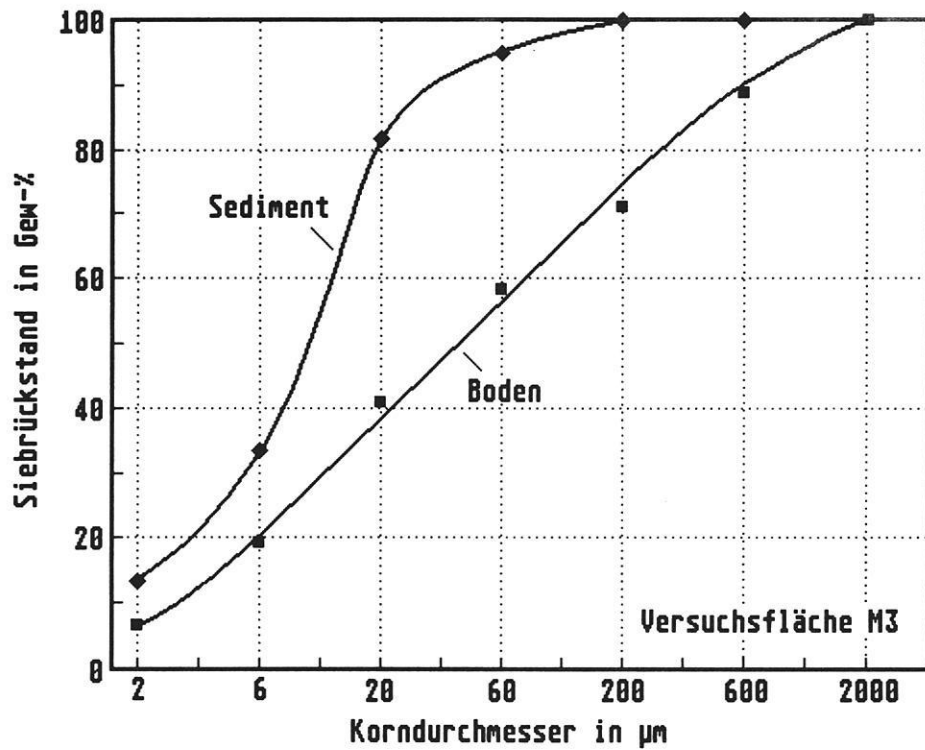


Abb. 81: Vergleich der Kornsummenkurven des Ausgangsbodens und des ausgetragenen Sediments (Versuchsfläche M3, Versuch M3.1)

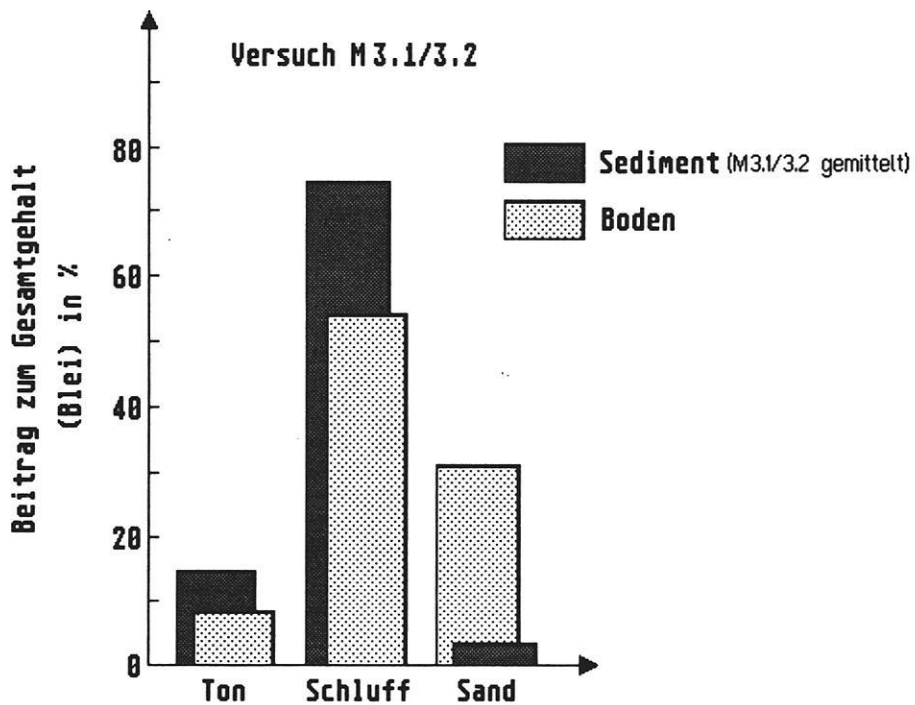


Abb. 82: Verteilung des Schwermetalls Blei auf die Kornfraktionen im ausgetragenen Sediment (Versuch M3.1/M3.2)

Tab. 30: Verteilung der Schwermetalle auf die Kornfraktionen im Sediment

Versuch	Elemente	Beitrag zum Gesamtgehalt in %		
		Ton	Schluff	Sand
M1. 2	Körnungsanteile	19,5	80,5	0,0
	Pb	26,4	73,6	0,0
	Zn	31,9	68,1	0,0
	Cd	19,2	80,8	0,0
	As	-	-	-
	Hg	-	-	-
M1. 3	Körnungsanteile	18,8	75,6	5,6
	Pb	34,0	62,0	4,0
	Zn	35,7	59,9	4,4
	Cd	22,3	72,1	5,6
	As	-	-	-
	Hg	48,7	40,5	10,8
M2. 1	Körnungsanteile	25,0	71,9	3,1
	Pb	37,5	61,0	1,5
	Zn	43,5	55,5	1,0
	Cd	29,0	69,7	1,3
	As	49,0	49,9	1,1
	Hg	19,6	76,1	4,4
M2. 2	Körnungsanteile	20,1	70,2	9,7
	Pb	36,1	58,6	5,3
	Zn	38,2	57,7	4,1
	Cd	25,2	69,4	5,4
	As	-	-	-
	Hg	25,7	67,7	8,6
M3. 1	Körnungsanteile	13,3	81,8	4,9
	Pb	20,8	76,7	2,5
	Zn	12,1	84,3	3,6
	Cd	14,1	81,3	4,6
	As	-	-	-
	Hg	15,6	78,1	6,3
M3. 2	Körnungsanteile	15,8	78,0	6,2
	Pb	24,6	71,9	3,5
	Zn	25,3	69,8	4,9
	Cd	24,4	70,8	4,8
	As	-	-	-
	Hg	17,2	72,4	10,4
M4. 1	Körnungsanteile	28,3	70,5	1,2
	Pb	29,0	42,6	28,4
	Zn	27,8	39,2	33,0
	Cd	21,1	46,7	32,2
	As	-	-	-
	Hg	-	-	-

Simulationsrechnungen

Die in 7.2.1 genannten Ursachen für die Schadstoffanreicherung im Sediment werden durch die zuvor beschriebenen Ergebnisse der Beregnungsexperimente bestätigt. Entscheidend für die Anreicherung ist der Umstand, daß bevorzugt die am stärksten schadstoffbehafteten, feinen Bodenpartikel (Ton und Schluff) von der Erosion erfaßt und mit dem oberflächlichen Abfluß abtransportiert werden, während die groben, weniger schadstoffbehafteten Partikel an der Oberfläche des Bodens zurückbleiben.

Für die rechnerische Beschreibung des partikelgebundenen Stoffaustretes ist daher entscheidend, mit welcher Genauigkeit der selektive, vom Korndurchmesser abhängige Transport der Bodenpartikel durch den zugrundegelegten Modellansatz (s. 4.1.3) abgebildet werden kann.

Um dies beurteilen zu können, sind in Tab. 31 die gemessenen und mit Hilfe des Modells berechneten Anteile der transportierten Kornfraktionen gegenübergestellt. (Zum Vergleich sind außerdem die Kornverteilun-

Tab. 31: Gemessene und berechnete Kornverteilungen (Sedimente und Ausgangsböden)

Versuch	Kornfraktion	Ausgangsboden	Sediment		Abweichung
			gemessen	berechnet	
		[%]	[%]	[%]	[%]
M1.2	T	6	20	10	-10
	U	51	80	89	+9
	S	43	0	1	+1
M1.3	T		19	10	-9
	U		76	88	+12
	S		5	2	-3
M2.1	T	6	25	12	-13
	U	45	72	87	+15
	S	49	3	1	-2
M2.2	T		20	12	-8
	U		70	87	+17
	S		10	1	-9
M3.1	T	6	13	10	-3
	U	51	82	88	+6
	S	43	5	2	-3
M3.2	T		16	10	-6
	U		78	88	+10
	S		6	2	-4
M4.1	T	6	28	13	-15
	U	40	71	86	+15
	S	54	1	1	0

gen der jeweiligen Ausgangsböden angegeben.) Man erkennt, daß der Anteil der Tonfraktion durch das Modell stets unterschätzt, der des Schluffanteils überschätzt wird. Die Abweichungen betragen im Mittel -9%-Punkte für die Tonfraktion, +12%-Punkte für die Schlufffraktion und -3%-Punkte für die Sandfraktion.

Auch die exemplarisch für Versuchsfläche M3 vorgenommene graphische Auswertung der Körnungsdaten (Abb. 83) zeigt, daß die mit Hilfe des Modells errechneten Anteile der Kornfraktionen z.T. deutlich von den gemessenen Werten abweichen. Der Vergleich mit dem Ausgangsboden zeigt jedoch, daß die Anreicherung der feinen Bodenpartikel trotz der genannten Abweichungen im wesentlichen richtig wiedergegeben wird. Für die rechnerische Ableitung des partikelgebundenen Stoffaustrages ist damit eine wesentliche Voraussetzung erfüllt.

Folgende Rechenschritte sind dazu notwendig:

1. Das Modell liefert zunächst folgende Ausgangsgrößen: den Feststoffaustrag (in kg/m) und die darauf bezogenen prozentualen Anteile der Ton-, Schluff- und Sandfraktion. In einem ersten Auswertungsschritt werden die relativen Anteile der Kornfraktionen in absolute Werte

umgerechnet (Umrechnung von Masse-% in kg/m, s. Tab. 32).

2. Die so ermittelten Teilkomponenten des Austrages werden mit den entsprechenden fraktionsbezogenen Elementgehalten des Ausgangsbodens (in mg/kg) multipliziert. Hieraus ergeben sich Stoffausträge je Fraktion (in mg/m).
3. Die fraktionsbezogenen Teilkomponenten werden aufaddiert, sodaß sich für jedes Element der Gesamtaustrag ergibt (ebenfalls in mg/m).

Die gemessenen und nach der o.g. Vorgehensweise rechnerisch ermittelten Stoffausträge sind in Tab. 33 zusammengestellt. Eine graphische Gegenüberstellung der Werte für Blei und Zink liefert zudem Abb. 83. Man erkennt, daß die Modellrechnungen teilweise deutlich geringere Stoffausträge ergeben als gemessen wurde. Die für das Element Blei ermittelten Austräge liegen mit einer mittleren relativen Abweichung von 13,5% noch in einem akzeptablen Genauigkeitsbereich. Bei Zink beträgt der relative Fehler allerdings bereits 28,4%. Es ist daher zu untersuchen, worauf diese Fehler zurückzuführen sind, und welche Möglichkeiten der Verbesserung bestehen.

Neben den bereits in 5.4 genannten modellbedingten Fehlerquellen müssen zur Er-

Tab. 32: Berechnete Feststoffausträge und Anteile der Kornfraktionen Ton, Schluff und Sand

Versuch	Feststoffaustrag	Anteile		
	[kg/m]	Ton [kg/m]	Schluff [kg/m]	Sand [kg/m]
M1. 2	0,159	0,016	0,142	0,002
M1. 3	2,473	0,247	2,176	0,050
M2. 1	0,277	0,033	0,241	0,003
M2. 2	1,001	0,120	0,871	0,010
M3. 1	1,410	0,141	1,241	0,028
M3. 2	1,535	0,154	1,351	0,031
M4. 1	0,377	0,049	0,324	0,004

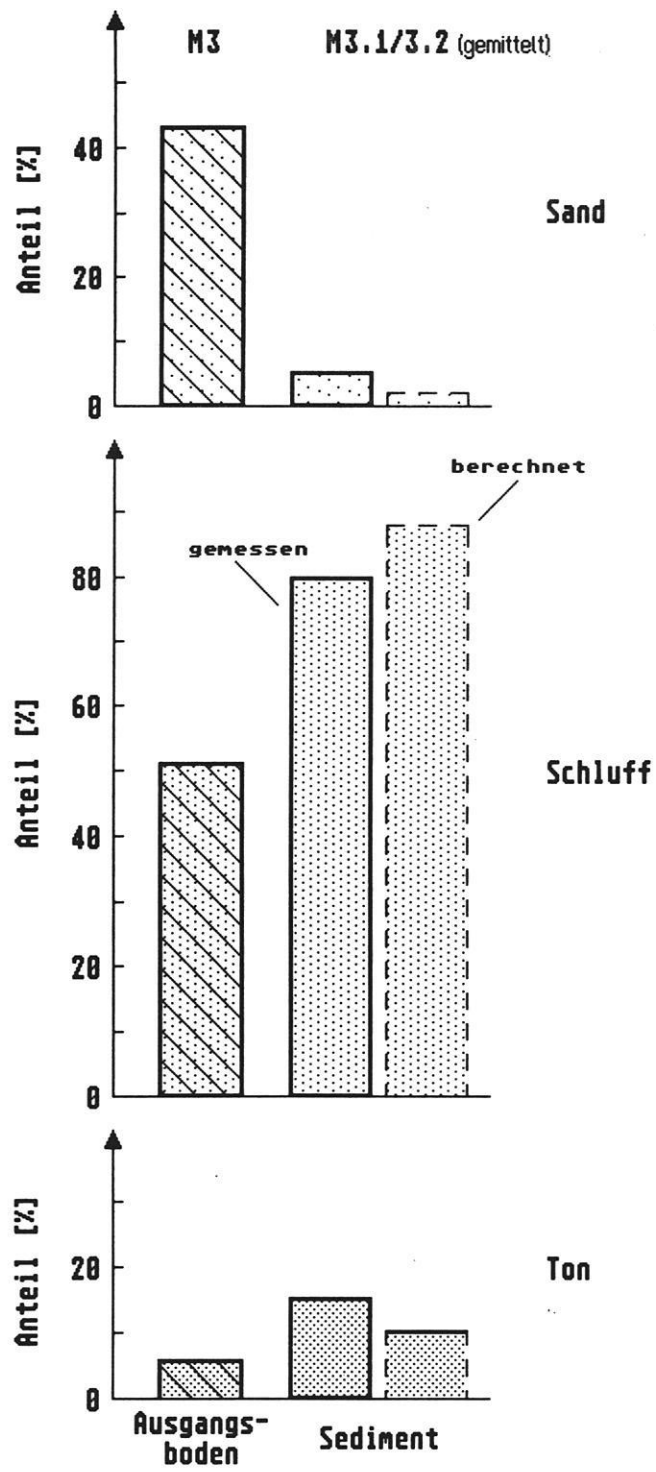


Abb. 83: Kornverteilung des Sediments und des Ausgangsbodens (Versuchsfläche M3)

Tab. 33: Gemessene und berechnete Stoffausträge (für As unzureichende Daten)

Element	Versuch	Stoffaustrag		Abweichung
		gemessen	berechnet	
		[mg/m]		[%]
Pb	M 1.2	15,9	12,2	-23
	M 1.3	235,7	189,5	-20
	M 2.1	34,2	28,8	-16
	M 2.2	110,0	103,9	- 6
	M 3.1	162,2	153,9	- 5
	M 3.2	181,3	167,6	- 8
	M 4.1	48,4	40,2	-17
Zn	M 1.2	49,7	26,9	-45
	M 1.3	503,2	418,0	-17
	M 2.1	98,2	55,8	-43
	M 2.2	228,0	202,0	-11
	M 3.1	297,1	242,4	-18
	M 3.2	333,0	263,8	-21
	M 4.1	117,0	67,6	-42
Cd	M 1.2	0,2	0,5	+150
	M 1.3	6,2	8,2	+32
	M 2.1	0,4	0,8	+100
	M 2.2	2,1	2,8	+33
	M 3.1	3,7	3,2	+14
	M 3.2	3,2	3,5	+ 9
	M 4.1	0,6	0,4	-33
Hg	M 1.2	-	-	-
	M 1.3	0,9	0,4	-44
	M 2.1	0,1	0,1	± 0
	M 2.2	0,4	0,3	-25
	M 3.1	0,5	0,3	-40
	M 3.2	0,4	0,4	± 0
	M 4.1	-	-	-

klärung der Abweichungen vor allem Unzulänglichkeiten bei der Bestimmung der Modellparameter herangezogen werden. Vergleichsanalysen ergaben besonders bei den Korngrößenanalysen z.T. erhebliche Unterschiede (vgl. ZIMMERMANN, U., 1994). Große, nicht reproduzierbare Abweichungen sind auch bei Doppelbestimmungen einiger Elemente aufgetreten. Dies trifft insbeson-

dere auf die hier zugrundegelegten Cadmiumwerte zu, die insgesamt als wenig vertrauenswürdig anzusehen sind.

Eine nähere Betrachtung der Fehlerquellen zeigt also, daß die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse durch eine qualitative Verbesserung der Analysendaten erheblich gesteigert werden kann. Es ist daher davon

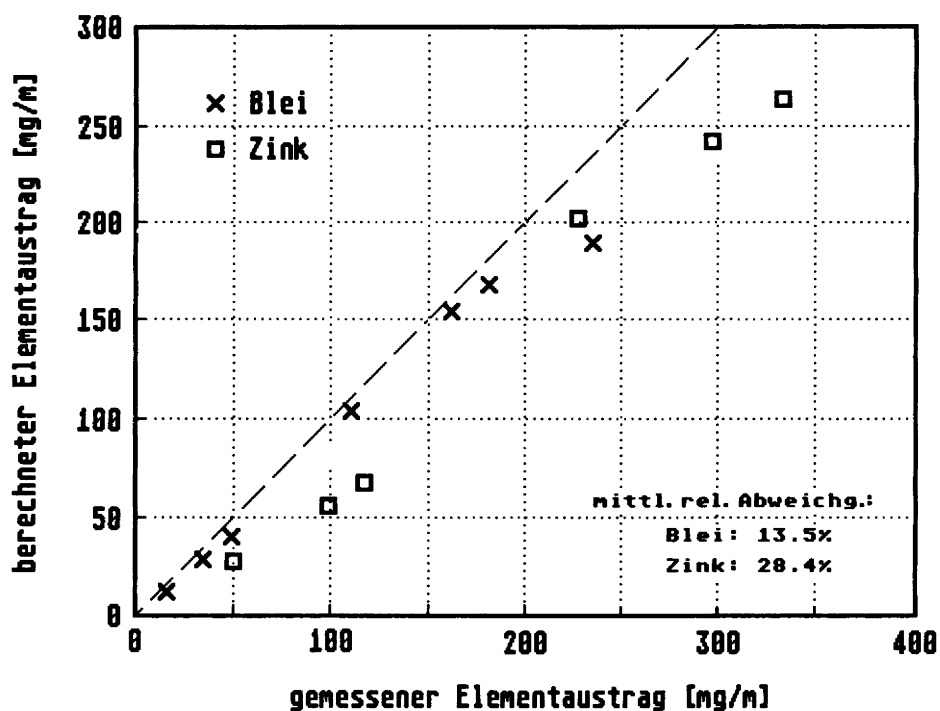


Abb. 84: Vergleich gemessener und rechnerisch ermittelter Stoffausträge für die Elemente Blei und Zink

auszugehen, daß das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell grundsätzlich eine - gemessen an der Komplexität der zugrundeliegenden Prozesse - hinreichend genaue Abschätzung des partikelgebundenen Stofftransportes zu liefern vermag.

Übertragung der Modellergebnisse auf einzelne Hänge bzw. das ganze Einzugsgebiet

Für die Abschätzung des Eintrages partikelgebundener Schadstoffe in die Saidenbachtalsperre muß die Simulation der Transportvorgänge, die zunächst nur für einzelne, räumlich eng begrenzte Testflächen vorgenommen wurde, auf ganze Hänge bzw. das Einzugsgebiet insgesamt ausgedehnt werden. Exemplarisch wird hierfür das Profil "Hölzelberg" herangezogen (Länge: 335 m, Neigung: max. $7,2^\circ$, Lage: s. Abb. 85).

Da für das Untersuchungsgebiet gemessene Niederschlagsdaten in der nötigen Auflösung nicht zur Verfügung stehen, muß im vorliegenden Fall auf rechnerisch gene-

rierte Daten zurückgegriffen werden (s. MICHAEL, 1994). Grundlage der Modellrechnungen sind daher nicht tatsächlich gemessene Niederschlagsereignisse, sondern hypothetische Ereignisse, die unter Verwendung von Wahrscheinlichkeitsannahmen rechnerisch ermittelt wurden (DEUTSCHER WETTERDIENST, 1994).

In den Modellrechnungen werden folgende Varianten der Nutzung gegenübergestellt:

- Wintergerste (Referenzjahr)
- Mais (Referenzjahr)
- Brache (Extremereignis, s. Abb. 86).

Eine Zusammenstellung der Modellergebnisse für die verschiedenen Berechnungsvarianten liefert Tab. 34. Der Gesamtaustrag liegt - in Abhängigkeit von der Nutzung - zwischen 2,7 und $7t/(ha \cdot a)$. Der für die Kombination "Extremereignis/Brache" ermittelte Austrag kennzeichnet den sog. "worst case". Der Austrag liegt in diesem Fall deutlich über dem für Wintergerste bzw. Mais berechneten jährlichen Mittel.

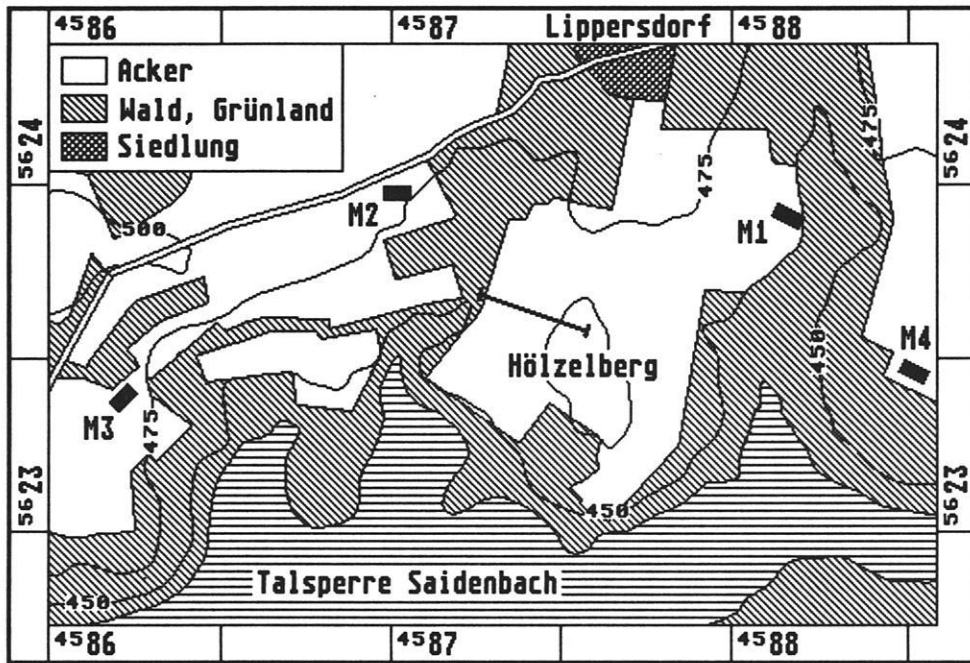


Abb. 85: Übersichtskarte des Testgebietes "Saldenbach" (Kartengrundlage: Topographische Karte 1:10 000, Blatt 1308-342 Lengefeld und Blatt 1308-431 Forchheim)

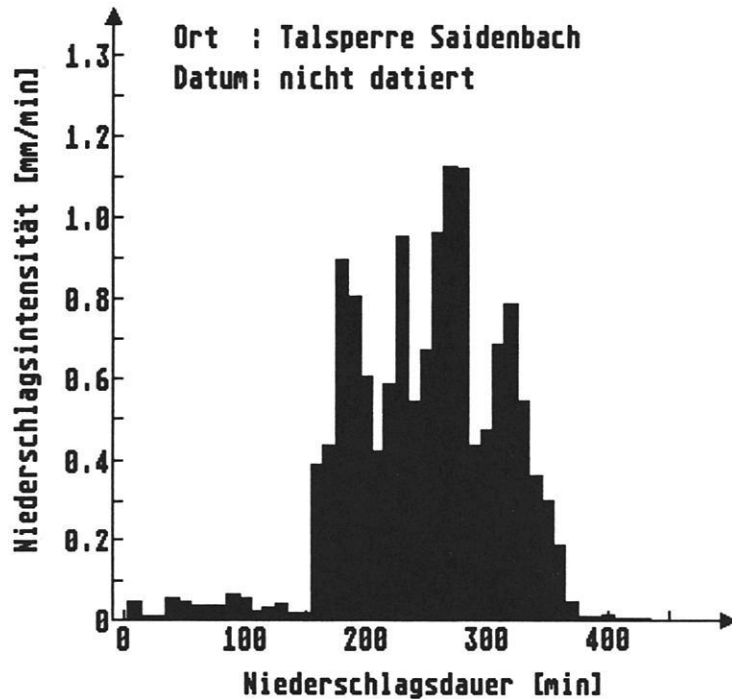


Abb. 86: Rechnerisch generiertes Extremereignis (Niederschlagsintensität, bezogen auf Intervalle von 10 min, Quelle: DEUTSCHER WETTERDIENST, 1994)

Tab. 34: Feststoffaustrag und partikelgebundener Stoffaustrag im Jahresmittel und für den Fall eines extremen Einzelereignisses (Profil: Hölzelberg)

zeitl. Bezug	Referenzjahr		Extremereignis
	Nutzung	Wintergerste	Mais
Austrag (gesamt) [t/ha]	2,659	7,081	8,636
Stoffaustrag [kg/ha]			
Blei	0,197	0,528	0,658
Zink	0,410	1,258	1,372
Cadmium	$8,4 \times 10^{-3}$	$22,4 \times 10^{-3}$	$27,9 \times 10^{-3}$
Quecksilber	$0,7 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-3}$

Multipliziert man die ermittelten jährlichen Hektarausträge mit der Ackerfläche des Gesamteinzugsgebietes (ca. 2800 ha), kommt man für die Elemente Blei und Zink zu Größenordnungen von 600-1500 bzw. 1100-3500 kg/a (je nach Nutzung). Für Cadmium und Quecksilber liegt der auf das Gesamteinzugsgebiet bezogene Austrag bei 20-60 bzw. bei 2-4kg/a. Allerdings ist eine Hochrechnung der für einen Einzelhang ermittelten Austräge auf ein größeres Einzugsgebiet mit großen Fehlern behaftet, weil die räumlichen Unterschiede innerhalb des Einzugsgebietes bei der Betrachtung eines einzelnen Hanges nicht berücksichtigt werden können. Die genannten Zahlen können daher nur eine ganz grobe Größenvorstellung geben.

Die Ausprägung der Strömungs- und Transportprozesse läßt sich für ein größeres, in sich differenziertes Gebiet letztlich nur durch ein dreidimensionales, flächendeckendes Modell in befriedigender Weise beschreiben. Mit der Entwicklung eines solchen Modells wurde bereits begonnen (M. v. WERNER, 1995). Die vorhandenen physikalischen Ansätze des zweidimen-

sionalen Modells (EROSION 2D) bilden dazu die Grundlage.

Das 3D-Modell stützt sich auf ein System von über die Fläche gelegten, quadratischen Rasterelementen. Hierbei werden die modellrelevanten Parameter innerhalb eines Rasterelementes als konstant angesehen. Dadurch, daß sich aus dem Abfluß des einen Rasterelementes jeweils der Zufluß in eines der benachbarten Elemente ergibt, sind alle Elemente miteinander verknüpft. Welchem der benachbarten Elemente hierbei der Abfluß zufließt, ist abhängig von der jeweiligen Richtung des Gefälles.

Für einen ersten Test wurde die derzeit verfügbare EROSION 3D-Version auf ein Teileinzugsgebiet der Saidenbach-Talsperre angewandt. Hierbei wurden allerdings einige vereinfachende Annahmen gemacht - u.a. wurde unterstellt, daß das gesamte Gebiet einer einheitlichen Nutzung (Acker) unterliegt.

Das Ergebnis der Simulation ist in Abb. 86 anhand eines Ausschnittes aus der Originalkarte dargestellt.

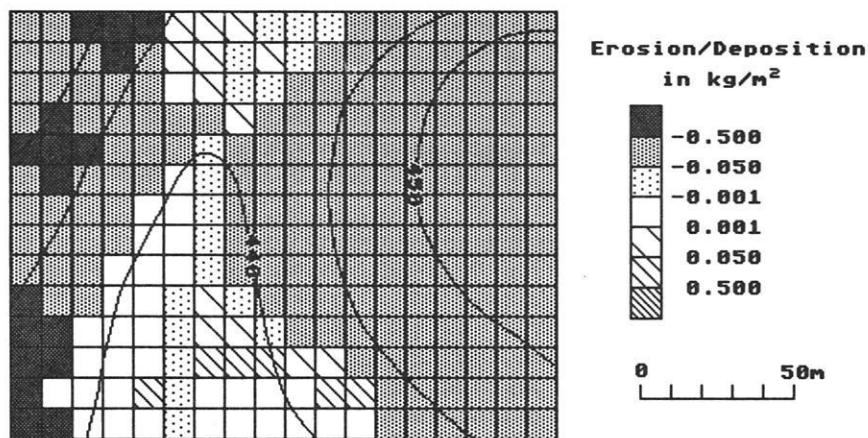


Abb. 87: Erosion und Deposition im Einzugsgebiet der Saidenbachtalsperre (vergrößerter Ausschnitt aus der farbigen Originalkarte, Quelle: v. WERNER, 1994)

8. Zusammenfassung

Eine wichtige Voraussetzung für die Einführung geeigneter Erosionsschutzmaßnahmen in die landwirtschaftliche Praxis ist eine möglichst genaue, schlagbezogene Quantifizierung der Erosion bzw. des Erosionsrisikos einschließlich der damit verbundenen, langfristigen Folgewirkungen (vgl. RAT FÜR UMWELTFRAGEN, 1985, S. 330ff). Aufgrund der Vielzahl der hierbei zu berücksichtigenden Einzeleinflüsse ist dies nur mit Hilfe computergestützter, mathematischer Modelle möglich.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein solches, auf die praktischen Belange des Boden- und Gewässerschutzes abgestelltes Bodenerosionsmodell zu entwickeln.

Die Mehrzahl der gegenwärtig bereits vorhandenen Bodenerosionsmodelle basieren auf der statistischen Auswertung von Testflächenmessungen. Das bekannteste dieser Modelle ist die sog. Universal Soil Loss Equation (USLE) von WISCHMEIER und SMITH (1965). Ein gravierender Mangel dieser rein empirischen Modelle besteht

darin, daß sie außerhalb des Raumes, für den sie ursprünglich entwickelt wurden, nur begrenzt gültig sind (vgl. BORK, 1988, S. 166). In jedem Fall müssen die in das Modell eingehenden Parameter zunächst an die regionalen Klima- und Bodenbedingungen angepaßt werden. Man bemüht sich daher, in zunehmendem Maße physikalisch begründete und damit übertragbare Modelle zu entwickeln (z.B. CREAMS/WEPP). Bisher haben diese Modelle jedoch kaum Eingang in die Praxis gefunden, weil die Zahl der Parameter, die zur ihrer Anwendung benötigt werden, sehr groß und die Handhabung der Modelle insgesamt recht kompliziert ist.

An das in dieser Arbeit entwickelte Modell wurden daher folgende Anforderungen gestellt. Es soll:

- einfach zu handhaben sein
- möglichst wenige Eingabegrößen erfordern
- physikalisch begründet und damit übertragbar sein
- auf der Simulation von Einzelereignissen basieren

- eine für Planungszwecke hinreichende räumliche Auflösung liefern und
- außer der Erosion auch die Deposition (einschließlich des Eintrages in Oberflächengewässer) abbilden können.

Der für das Modell gewählte Ansatz unterscheidet folgende Teilprozesse:

- die Infiltration des Niederschlagswasser in den Boden und die davon abhängige Entstehung von oberflächlichem Abfluß
- die Ablösung der Bodenpartikel infolge der Überströmung der Bodenoberfläche und des Aufpralls der Tropfen
- den hydraulischen Transport der Partikel mit der oberflächenparallelen Strömung.

Jeder dieser Vorgänge wird zunächst für kleine in sich als homogen betrachtete Raum- bzw. Zeitsegmente beschrieben. Die Verknüpfung dieser Segmente liefert dann eine Aussage über den Prozeß insgesamt sowie über dessen räumliche und zeitliche Verteilung.

Zur Quantifizierung der Ablösung werden die in der Wasserströmung bzw. in den aufprallenden Tropfen enthaltenen Impulsströme berechnet und mit einem kritischen Impulsstrom (= Erosionswiderstand) verglichen, der die spezifische Erodierbarkeit der überströmten Bodenoberfläche kennzeichnet. Aus diesem Vergleich resultiert eine dimensionslose Kennzahl, die mit der je Zeit- und Flächeneinheit abgelösten Partikelmenge durch eine Korrelationsgleichung verknüpft wird. Erosion tritt auf, wenn die Summe der Impulsströme aus Tropfen und Oberflächenabfluß den kritischen Impulsstrom übersteigt.

Zur Beschreibung der Transportkapazität wird der kritische Impulsstrom der Partikel (abgeleitet aus der Sinkgeschwindigkeit der Partikel und der Konzentration) mit der vertikalen Impulsstromkomponente der oberflächenparallelen Strömung verglichen. Die Transportkapazität ist erreicht, wenn die vertikale Impulsstromkomponente der

oberflächenparallelen Strömung gerade noch ausreicht, um den kritischen Impulsstrom der Partikel auszugleichen. Wird der kritische Impulsstrom der Partikel unterschritten, tritt Sedimentation ein.

Die Infiltration wird unabhängig von dem eigentlichen Erosionsmodell durch ein selbstständiges Teilmodell beschrieben. Die diesem Teilmodell zugrundeliegende Modellvorstellung basiert auf einem von GREEN & AMPT (1911) entwickelten Ansatz. Hierbei wird vereinfachend angenommen, daß das Niederschlagswasser kolbenförmig in den Boden eindringt und dabei den verfügbaren Porenraum vollständig auffüllt. Unter dieser Voraussetzung kann der vertikale Fluß an der Bodenoberfläche unter Verwendung der DARCY- Gleichung rechnerisch bestimmt werden. Die hierbei eingehenden Größen, das Matrixpotential an der Befeuchtungsfront und die hydraulische Leitfähigkeit in der Transportzone, werden durch Näherungsgleichungen (n. VAN GENUCHTEN, 1980, VERECKEN, 1989 u. CAMPBELL, 1985) aus der Körnung, der Lagerungsdichte, dem org. Kohlenstoffgehalt und der Anfangsbodenfeuchte abgeschätzt.

Zusätzlich zu diesen Größen gehen folgende Parameter in das Gesamtmodell ein:

- die Höhenkoordinaten und die Länge des Ausgangsprofils
- der Erosionswiderstand des anstehenden Bodens
- der Rauigkeitsbeiwert und der Bedeckungsgrad der überströmten Bodenoberfläche
- die Niederschlagsdauer und -intensität.

Die soeben genannten Eingangsgrößen können sowohl örtlich (über das Hanglängsprofil) wie auch zeitlich variieren. Hierbei beträgt die maximale räumliche Auflösung 1m und die maximale zeitliche Auflösung 10min.

Die Berechnung des Feststoffaustrages erfolgt stets auf der Basis einzelner Nieder-

schlags- bzw. Erosionsereignisse. Mehrere Einzelereignisse können zu Sequenzen verknüpft werden, die den Zeitraum eines Monats oder eines Jahres repräsentieren. Daher ist es mit Hilfe des Modells auch möglich, den mittleren jährlichen Bodenabtrag für verschiedene Fruchtfolgen und Bearbeitungsbedingungen zu ermitteln.

Zur Validierung des Modells wurden unterschiedliche Verfahrensweisen kombiniert:

- Vergleich mit Meßdaten
- Plausibilitätstests
- Sensitivitätsanalysen.

Der unmittelbare Vergleich mit experimentell ermittelten Feststoffausträgen ergab Abweichungen zwischen 6 und 30% (bezogen auf den jeweils im Gelände erfaßten Austrag). Dies liegt innerhalb der angestrebten Genauigkeitsgrenzen. Allerdings reichen die bisher herangezogenen Daten qualitativ und quantitativ nicht aus, um die mit dem Modell erreichbare Vorhersagegenauigkeit tatsächlich beurteilen zu können. Vor allem in Bezug auf ganze Hänge fehlen entsprechende Vergleichsdaten.

Über den unmittelbaren Vergleich zwischen Meßdaten und Modellergebnissen hinaus wurden daher eine Vielzahl sog. Plausibilitätstests durchgeführt. Hierbei wurde anhand realitätsnaher Fallbeispiele untersucht, inwieweit die durch das Modell gelieferten Ergebnisse vom Prinzip her mit dem in der Natur beobachtbaren Verhalten der Erosions- und Depositionsvorgänge übereinstimmen. Die Auswertung der verschiedenen Testrechnungen ergab, daß das Modell (auch bei langfristiger Betrachtung) plausible Resultate liefert.

Ziel der durchgeführten Sensitivitätsanalysen war es, das Verhalten des Modells gegenüber einzelnen Einflußgrößen kritisch zu überprüfen. Dazu wurde jeweils eine einzelne Einflußgröße - wie z.B. die Hangneigung - systematisch variiert, während die anderen konstant gehalten wurden. Die Modellrechnungen ergaben, daß zwischen dem

Austrag und den variierten Modellparametern nur in wenigen Fällen ein linearer Zusammenhang besteht. Dies bedeutet, daß das Modell auf eine Veränderung der Parameter unterschiedlich stark reagiert, je nachdem in welchem Wertebereich sich die Änderung vollzieht.

Anhand zweier Anwendungsbeispiele (Demonstrationsvorhaben) wurde das Modell unter praxisnahen Bedingungen getestet. Hierbei wurden u.a. folgende Fragestellungen berührt:

- Vorhersage der Auswirkungen der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf den Abtrag (Prognose und Risikoabschätzung in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung bzw. der Fruchtart)
- Vorhersage der Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen
- Beurteilung der Auswirkungen von Flurbereinigungsmaßnahmen
- Abschätzung des lateralen Stoffaustrages aus schadstoffbelasteten Flächen
- Abschätzung des Eintrages von erodiertem Bodenmaterial und partikelgebundenen Schadstoffen (insbesondere Schwermetalle) in Oberflächengewässer
- Simulation von Langzeitwirkungen

Die verschiedenen Berechnungsbeispiele geben einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten des Modells im Rahmen bodenschutzorientierter Planungsvorhaben, z.B.:

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

Bisher stellt der mit der Erfassung der Eingabegrößen verbundene Aufwand noch ein gewisses Problem für die routinemäßige Anwendung des Modells dar. Durch die Entwicklung von Nomogrammen und spezi-

ellen Prozeduren soll dieser Aufwand zukünftig soweit reduziert werden, daß vorhandene bodenkundliche und topographische Informationen ausreichen, um das Modell in der Praxis anzuwenden.

Vor allem zur Kenntnis des Erosionswiderstandes und zur Validierung des Modells sind weitere Versuche bzw. die Auswertung vorhandener Erosionsdaten notwendig. Gleichzeitig muß auch versucht werden, den Erosionswiderstand über bodenphysikalische Untersuchungen zu bestimmen - beispielsweise über die Ermittlung des Schwerwiderstandes. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich einer genaueren Quantifizierung der Rauigkeitsbeiwerte - insbesondere unter Vegetationsbedeckung.

Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, geht dieser Parameter relativ stark in die Berechnung des Feststoffaustrages ein.

Die Vorteile des Modellkonzeptes gegenüber bereits vorhandenen Ansätzen (USLE, CREAMS, WEPP) liegen vor allem in der einfachen menügesteuerten Handhabung und dem vergleichsweise geringen Datenbedarf. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung können Nutzungs- und Substratwechsel (z.B. Wege, Hecken etc.) unmittelbar in das Modell eingegeben und bei der Berechnung entsprechend berücksichtigt werden. Damit ist eine differenzierte Analyse der Erosionsvorgänge möglich, wie sie die bisher verfügbaren Modelle in vergleichbarer Weise nicht liefern können.

9. Symbole und Einheiten

Soweit es sich um modellspezifische Größen handelt, ist das jeweilige Modell (USLE, CREAMS, EROSION 2D) in der Erläuterung

angegeben. Es gelten die nachfolgend aufgeführten Einheiten, sofern im Text nicht ausdrücklich eine andere Einheit angegeben ist.

A	Fläche des betrachteten Hangsegmentes (EROSION 2D) [m ²]
A	Parameter der PHILIP-Gleichung
a	mittlerer jährlicher Bodenabtrag (USLE) [t/(ha · a)]
b	Parameter der CAMPBELL-Gleichung
C	Bodenbearbeitungs-Faktor (USLE)
C _e	Pflanzenbedeckungsfaktor (WEPP)
C _L	dimensionsloser Bedeckungsgrad (EROSION 2D)
C _{org}	organischer Kohlenstoffgehalt [Masse-%]
c	Parameter (WEPP)
c _{max}	Konzentration der Partikel bei Transportkapazität [m ³ /m ³]
D	Partikeldurchmesser [m]
D _c	Ablösungskapazität der Strömung (WEPP) [kg/(s · m ²)]
D _f	Rillenaustrag (WEPP) [kg/(s · m ²)]
D _i	Zwischenrillenaustrag (WEPP) [kg/(s · m ²)]
d	Parameter (WEPP)
E	dimensionslose Erosionskennzahl (EROSION 2D)
E _{kin}	kinetische Energie des Niederschlages (USLE) [J/m ²]

d	Parameter (WEPP)
E	dimensionslose Erosionskennzahl (EROSION 2D)
E_{kin}	kinetische Energie des Niederschlages (USLE) [J/m^2]
$FRAC_{init,i}$	Anteil der Kornfraktion i bezogen auf das Ausgangssubstrat (EROSION 2D)
$FRAC_{s,i}$	Anteil der Kornfraktion i bezogen auf die transportierte Sedimentmenge q_s (EROSION 2D)
f_s	Widerstandsbeiwert (WEPP)
G	Feststoffmassenstrom (WEPP) [$kg/(s \cdot m)$]
G_e	Bodenbedeckungsfaktor (WEPP)
g	Erdbeschleunigung [m/s^2]
I	kumulative Infiltration [mm]
I_e	Niederschlagsintensität (WEPP) [m/s]
I_{30}	30-Minuten-Intensität des Niederschlages (USLE) [mm/h]
i	Infiltrationsrate (Volumenstrom) [m/s]
i	Infiltrationsrate (Massenstrom) [$kg/(m^2 \cdot s)$]
i_0	Anfangsrate der Infiltration (HORTON-Gleichung) [m/s]
i_0	konstante Endrate der Infiltration (HORTON-Gleichung) [m/s]
K	Erodibilitätsfaktor (USLE)
K_r	Rillen-Erodibilitätsfaktor (WEPP) [s/m]
K_i	Zwischenrillen-Erodibilitätsfaktor (WEPP) [$(kg \cdot s)/m^4$]
k	hydraulische Leitfähigkeit [$(kg \cdot s)/m^3$]
L	Hanglänge (WEPP) [m]
LS	kombinierter Hanglängen/Hangneigungs-Faktor (USLE)
m	dimensionsloser Hanglängenexponent (CREAMS)
m	Parameter der VAN GENUCHTEN-Gleichung
N	Regenmenge [mm]
n	MANNING-Rauhigkeitsbeiwert [$s/m^{1/3}$]
n	Parameter der VAN GENUCHTEN-Gleichung
P	Erosionsschutz-Faktor (USLE)
P_r	Abflußspende (WEPP) [m/s]
P_s	dimensionsloser Transportkoeffizient (CREAMS/YALIN)
Q	Abflußmenge [m^3/m] (CREAMS) [ft^3/ft^2]
Q	Abflußrate am Hangende (WEPP) [$m^3/(m \cdot s)$]
q	Abflußrate (WEPP) [$m^3/(m \cdot s)$]
q	Abflußrate [$m^3/(m \cdot s)$]
q_{crit}	kritische Abflußrate (EROSION 2D) [$m^3/(m \cdot s)$]
q_{pk}	Spitzenabflußrate (CREAMS) [ft/s]
q_s	Feststoffmassenstrom [$kg/(m \cdot s)$]
$q_{s,pot}$	potentieller Feststoffmassenstrom [$kg/(m \cdot s)$]
$q_{s,max}$	maximaler Feststoffmassenstrom (=Transportkapazität) [$kg/(m \cdot s)$]

R	Erosivitäts-Faktor (USLE)
R	hydraulischer Radius [m]
R_s	Rillenabstand (WEPP) [m]
r	Niederschlagsintensität [m/s]
S	Gefälle [m/m]
S	Sorptivität (PHILIP-Gleichung) [cm/s]
S	Sandgehalt [kg/kg], [Masse-%]
s	dimensionslose Kenngröße (CREAMS/YALIN)
T	Tongehalt [kg/kg], [Masse-%]
T_c	Transportkapazität (WEPP) [kg/(s · m)]
t	Zeit [s]
U	Sandgehalt [kg/kg], [Masse-%]
V_f	Sinkgeschwindigkeit der Partikel (WEPP) [m/s]
v_*	Schergeschwindigkeit [m/s]
v_p	Sinkgeschwindigkeit der Partikel [m/s]
v_q	mittlere Abflußgeschwindigkeit [m/s]
v_r	mittlere Fallgeschwindigkeit der Tropfen [m/s]
w	Rillenbreite (WEPP) [m]
w_p	Massenstrom der Partikel [kg/(m ² · s)]
w_q	Massenstrom der oberflächenparallelen Strömung [kg/(m · s)]
w_r	Massenstrom des Niederschlages [kg/(m ² · s)]
X	Reynoldszahl der Partikel (CREAMS/SHIELDS)
x	Hanglänge [m]
x_f	Eindringtiefe der Befeuchtungsfront [m]
Y	dimensionslose Schubspannung (CREAMS/SHIELDS)
y	Hangbreite (EROSION 2D) [m]
z	Tiefe im Boden [m]
α	Neigungswinkel
α	Parameter der VAN GENUCHTEN-Gleichung
α	Parameter der KOSTIAKOV-Gleichung
β	Parameter der HORTON-Gleichung
γ	spezifisches Gewicht von Wasser (WEPP) [kg/(m ² · s ²)]
γ	Feststoffaustrag ($\gamma < 0$) oder Feststoffeintrag ($\gamma > 0$) (EROSION 2D) [kg/(m ² · s)]
γ_D	Akkumulationsrate (CREAMS) [lb/(ft ² · s)]
γ_{IR}	Zwischenrillenablösungsrate (CREAMS) [lb/(ft ² · s)]
γ_R	Rillenablösungsrate (CREAMS) [lb/(ft ² · s)]
δ	mittlere Schichtdicke des Abflusses [m]
ϵ	dimensionsloser Koeffizient (CREAMS)
κ	dimensionsloser Depositionskoeffizient (EROSION 2D)

η	dynamische Viskosität der Flüssigkeit [kg/(m · s)]
ρ_b	Bodendichte (= Lagerungsdichte) [kg/m ³]
ρ_p	Partikeldichte [kg/m ³]
$\rho_{q,r}$	Flüssigkeitsdichte [kg/m ³]
σ	dimensionslose Kenngröße (CREAMS/YALIN)
σ_p	Standardabweichung des mittleren Partikeldurchmessers
Θ	Wassergehalt [m ³ /m ³]
τ_c	kritischer Scherwiderstand (WEPP) [Pa]
τ_f	von der Strömung ausgeübte Scherspannung (WEPP) [Pa]
φ_{crit}	kritischer Impulsstrom (EROSION 2D) [N/m ²]
$\varphi_{p,crit}$	kritischer Impulsstrom der Partikel (EROSION 2D) [N/m ²]
φ_q	Impulsstrom der oberflächenparallelen Strömung (EROSION 2D) [N/m ²]
$\varphi_{q,vert}$	vertikale Impulsstromkomponente der oberflächenparallelen Strömung (EROSION 2D) [N/m ²]
φ_r	Impulsstrom der Tropfen (EROSION 2D) [N/m ²]
ψ_g	Gravitationspotential [J/kg]
ψ_m	Matrixpotential [J/kg] = [(N · m)/kg]
Ψ_m	Matrixpotential [hPa] = [100 N/m ²]

10. Literatur

- AG BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. 3. Aufl., Hannover
- ASTALOSCH, R. (1990): Beregnungsversuche zur Parameterbestimmung zeitlich differenzierter Erosionsmodelle. Unveröffentlichte Vertieferarbeit am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.
- BACHMANN, J., HARTGE, K.H. (1992): Die Berechnung von Wasserspannungskurven aus Primärdaten - Ein Methodenvergleich. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 155, S. 109-114, Weinheim
- BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F. (1981): ANSWERS - user manual. EPA-Report, 905/9-82-001, Chicago
- BÖHRER, R., LEICHT, K. (1988): Entwicklung eines Bewertungssystems zur Beurteilung der Erosionsgefährdung im Flurbereinigungsverfahren Zaisenhausen, Landkreis Karlsruhe. Unveröff. Diplomarbeit FH Karlsruhe
- BOLL, H., BECKERT, T. (1985): Vorkehrungen und Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenerosionen im Flurbereinigungsverfahren Zaisenhausen, Landkreis Karlsruhe. Unveröff. Diplomarbeit FH Karlsruhe
- BORK, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, H. 13
- BRAUER, H. (1971): Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmung. Frankfurt
- BRONSTERT, A. (1992): Erstellung des Hangmodells. In: PLATE (Hrsg.): Prognosemodell für die Gewässerbelastung aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet (Weiherbach-Projekt). S. 47-110, Karlsruhe
- CAMPBELL, G. S. 1985: Soil physics with basic. Transport models for soil-

- plant systems
- DEUTSCHER BUNDESTAG (1984): Antwort der Bundesregierung auf die große Anfrage der SPD-Fraktion zum Schutz des Bodens. Drucksache 10/949 v. 01.02.1984, Bonn
- DEUTSCHER WETTERDIENST (1993): Digitalisierte 5-min-Werte der Niederschlagshöhe für einen 10jährigen Zeitraum einer gedachten Station "Mitteldorf", welche das Niederschlagsgeschehen im Raum Lippersdorf - Mittelsaida - Reifland etwa widerspiegeln.. DWD Az.: ZHEA/60.20.08/25-93 v. 04.08.1993
- DETTLING, W. (1989): Die Genauigkeit geökologischer Feldmethoden und die statistischen Fehler qualitativer Modelle. *Physiogeographica - Basler Beiträge zur Physiogeographie* 11, Basel
- DEUMLICH, D. (1990): persönliche Mitteilung
- DIEKKRÜGER, B. (1992): Standort- und Gebietsmodelle zur Simulation der Wasserbewegung in Agrarökosystemen. *Landschaftsökologie und Umweltforschung* 19, Braunschweig
- DIKAU, R. (1986): Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen. *Heidelberger Geographische Arbeiten* 81, Heidelberg
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1983): Grundlagen der Hydrologie. Berlin
- EMMETT, W.W. (1970): The hydraulics of overland flow on hillslopes. U.S. Geological Survey Paper, 662, A.
- FLANAGAN, D.C. (ed.) (1990): Water erosion prediction project - hillslope profile model documentation corrections and additions. NSERL Report 4 (USDA-ARS National Soil Erosion Laboratory), West Lafayette, Indiana (USA)
- FOSTER, G.R., LAFLEN, J.M., ALONSO, C.V. (1985): A replacement for the Universal Soil Loss Equation (USLE). In: DeCOURSEY (ed.): Proceedings of the Natural Resources Modeling Symposium, USDA, ARS-30, S. 468-472, Pingree Park, CO
- FOSTER, G.R., NEIBLING, W.H., NATTERMANN, R.A. (1982): A programmable rainfall simulator. ASAE Paper no. 82-270, St. Joseph, MI
- FOSTER, G.R., LANE, L.J. (1987): User requirements. USDA-Water erosion prediction project (WEPP). National Soil Erosion Research Laboratory Report, 1, West Lafayette, Indiana (USA)
- GARBRECHT, G. (1961): Abflußberechnungen für Flüsse und Kanäle (Teil 1). *Die Wasserwirtschaft*, 2, S. 40-45
- GARBRECHT, G. (1961): Abflußberechnungen für Flüsse und Kanäle (Teil 2). *Die Wasserwirtschaft*, 3, S. 72-77
- v. GENUCHTEN, M. TH. 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, S.892-898
- GREEN, W.H.; AMPT, G.A. (1911): Studies on soil physics. I: The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.* 4, S. 1-24
- GROSS, J. 1992: Der Infiltrationsprozeß von Niederschlagswasser als steuernder Faktor für die Bodenerosion. Diplomarbeit FU Berlin
- GUNN, R., KINZER, G.D. (1949): The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6, S. 243-247
- GUY, B.T., DICKINSON, W.T. (1990): Inception of sediment transport in shallow overland flow. *Catena Supplement*, 17, S. 91-109, Cremlingen
- HARTGE, K.H. (1978): Einführung in die Bodenphysik, Stuttgart
- HARTGE, K.H., HORN, R. (1989): Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Aufl., Stuttgart
- HARTGE, K.H., HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart
- HENSEL, H., BORK, H.-R. (1988): EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation in kleinen Einzugs-

- gebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. Landschaftsökologisches Messen und Auswerten, 2, 2/3, S. 107-136, Braunschweig
- HJULSTRÖM, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bulletin of the University of Upsala.
- HORTON, R.E. (1939): Analyses of runoff-plot experiments with varying infiltration-capacity. Reports and Papers, Hydrologie, S. 693-711
- HORTON, R.E. (1945): Erosional development of streams and their drainage basins. Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 56, 213-370
- HUDSON, N.W. (1965): The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to Southern Rhodesia. Unpublished MSc thesis, University of Cape Town
- JURY, W.A., GARDNER, W.R., GARDNER, W.M. (1991): Soil Physics. New York/Chichester
- KISSEL, I.T., DELLEUR, J.W., RAO, R.A. (1971): Turbulence characteristics of overland flow. Proc. of the Congress of IAHR, 1, S. 119-126, Paris
- KNISEL, W.G. (1980; Hrsg.): CREAMS - A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report 26 (USDA), Washington
- KOSTIAKOV, A.N. (1932): On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from a dynamic view for the purposes of amelioration. Trans. 6th Congr. Int. Soc. Soil Sci., Russian part A: 17-21 (zit. in: JURY et al (1991): Soil Physics)
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL - LAGA (1994): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln (Entwurf II/94). Hamburg
- LANE, L.J., NEARING, M.A. (eds.) (1989): USDA - Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation. NSERL Report 2 (USDA-ARS National Soil Erosion Laboratory), West Lafayette, Indiana (USA)
- LAWS, J.D. (1941): Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops. Transactions American Geophysical Union, Part. 3, 21, 709-721.
- LAWS, J.D., PARSONS, D.A. (1943). The relation of raindrop size to intensity. Transactions American Geophysical Union, 24, 52-460
- MICHAEL, A. (1994): Anwendung des Bodenerosionsmodells "EROSION 2D" unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Variabilität bodenphysikalischer, meteorologischer und nutzungsbezogener Modellparameter in einem kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet. Diplomarbeit TU Dresden
- MONTEITH, J.L. (1978): Grundzüge der Umweltphysik. Darmstadt
- MORGAN, R.P.C. (1979): Soil erosion, New York
- MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., RICKSON, R.J. (1992): EUROSEM: Documentation manual (Silsoe College). Silsoe, UK
- NEARING, M.A., DEER-ASCOUGH, L., LAFLEN, J.M. (1990): Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. Transactions of the ASAE 33(3)
- NIEDER, H. (1984): Bodenwasser- und Bodenerosionsmessungen unter simuliertem Niederschlag und die Anwendung des CREAMS- Modellsystems. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie der Technischen Universität Braunschweig
- NDS. MIN. LANDWIRTSCHAFT (1989): Erhaltung des Bodens durch Erosionsschutz. Hannover

- NOLTE, C., WERNER, W. 1991: Stickstoff- und Phosphateintrag über diffuse Quellen in Fließgewässer des Elbeinzugsgebietes im Bereich der ehemaligen DDR. Forschungsbericht i. A. des Umweltbundesamtes (Nr. 102 04 382)
- PEARCE, A.J. (1976): Magnitude and frequency of erosion by Hortonian overland flow. *Journal of Geology*, 84, S. 65-80
- PHILIP, J.R. (1957): The theory of infiltration. 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83, S. 345-357
- QUIST, D. (1984): Zur Erosion im Zuckerrübenanbau des Kraichgau. Diss. Universität Heidelberg
- QUIST, D. (1986): Zur Bodenerosion im Kraichgau. *Verhandlungen d. Gesellschaft f. Ökologie (Hohenheim 1984)*, 14, S. 37-51
- RAT FÜR UMWELTFRAGEN (1985): Umweltprobleme der Landwirtschaft. Frankfurt
- RICHTER, G. (1965): Bodenerosion - Schäden und gefährdete Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland. *Forschungen z. deutschen Landeskunde*, 152
- RICHTER, G. (1979): Bodenerosion in Reblagen des Modelgebietes. *Ergebnisse quantitativer Untersuchungen 1974-1977*. Forschungsstelle Bodenerosion d. Univ. Trier, Mertesdorf, 3, Trier
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Aufl., Stuttgart
- SCHMIDT, J. (1984): Experimentelle Untersuchungen und Modellvorstellungen zur Bodenerosion durch Wasser. *Mitteilg. Dtsch. Bodenkdl. Gesellsch.*, Bd. 39, S. 139-144
- SCHMIDT, J. (1988): Wasserhaushalt und Feststofftransport an geneigten, landwirtschaftlich bearbeiteten Nutzflächen. Diss. FU Berlin
- SCHMIDT, J. (1991a): The Impact of Rainfall on Sediment Transport by Sheetflow. In: BORK, H.-R., DE PLOEY, J., SCHICK, A. P. (eds.): erosion, transport and deposition processes - theorie and models. *Catena Supplement*, 19, S. 9-17
- SCHMIDT, J. (1991b): A Mathematical Model to Simulate Rainfall Erosion. In: BORK, H.-R., DE PLOEY, J., SCHICK, A. P. (eds.): Erosion, Transport and deposition processes - theorie and models. *Catena Supplement*, 19, S. 101-109
- SCHMIDT, J. (1991c): Anwendung eines theoretischen Modells zur Langfrist-simulation von Erosions- und Akkumulationsprozessen an Hängen. In: MÄCKEL u. RÖHRIG: *Forschungen zur Fluß- und Hangdynamik*. *Freiburger Geographische Hefte*, 33, S. 145-165
- SCHMIDT, J. (1992a): Anwendung des EROSION 2D Modells zur Untersuchung des Einflusses von Flurbereinigungsmaßnahmen auf den Bodenabtrag am Beispiel des Flurbereinigungsgebietes Zaisenhausen. *Gutachten für das Landesamt für Flurbereinigung Baden-Württemberg*
- SCHMIDT, J. (1992b): Modeling long-term soil loss and landform change. In: ABRAHAMS, A. J. & PARSONS, A. D.: *Overland Flow - Hydraulics and Erosion Mechanics*. University College London Press, London
- SCHRAMM, M. (1992): Bestimmung des Bodenabtrags und des Stoffaustrags im Vorfluter eines kleinen ländlichen Einzugsgebietes. In: PLATE, E.J.: *Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet*. *Schlußbericht BMFT-Verbundprojekt*, S. 229-256
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W., KAINZ, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser. *Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*, 2. Aufl., Stuttgart
- SEILER, W. (1983): Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt unter Einfluß der rezenten Bodenerosion am Beispiel zweier Einzugsgebiete im Basler

- Tafeljura bei Rothenfluh und Anwil. Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie, 5, Basel
- SMITH, R.E. (1988): OPUS - an advanced simulation model for non-point source pollution transport at the field scale. Draft. USDA-ARS, Ft. Collins, CO
- TERRA NOVA GmbH (1993): Qualität und Quantität des Sediments in den Trinkwassertalsperren Klingenberg und Lehmühle. Studie i.A. der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen.
- THEURER, F.D. (1985): Evaluating impacts of soil and water conservation measures. In: DeCOURSEY (ed.): Proceedings of the Natural Resources Symposium, USDA, ARS-30, S. 1-11, Pingree Park, CO
- VERECKEN, H. et al. 1989: Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. Soil Science 148(6), S.389-403
- WEIMAR, K. (1989): Umweltpolitik des Landes Hessen am Beispiel von Gewässer- und Bodenbelastung. Second International Conference on Geomorphology, Frankfurt (Tischvorlage)
- WEISE, R. (1990): Zu einigen Aspekten der wasserbedingten Bodenerosion auf industriemäßig bewirtschafteten Obstplantagen glazialer Gebiete bei Potsdam. Arch. Gartenbau, 38, 1, S. 21-35, Berlin
- v. WERNER, M. 1991: Anwendung des Bodenerosionsmodells "EROSION-2D" in der agraren Nutzungsplanung. Diplomarbeit FU Berlin
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1958): Rainfall energy and its relation to soil loss. Transactions American Geophysical Union, 39, 2, S. 285-291
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1965): Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains.- Agr. Handbook 282 (USDA), Washington D.C.
- WOOLHISER, D.A., SMITH, R.E., GOODRICH, D.C. (1990): KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. USDA-ARS-77
- YALIN, M.S. (1963): An expression for bed-load transportation. J. Hydraulics Division Proc. Amer. Soc. of Civil Eng., 89, HY3, S. 221-250
- YOON, Y.N., WENZEL, H.G. (1971): Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. J. Hydraulics Division Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 97, HY9, S. 1367-1386
- ZIMMERMANN, U. (1993): Auswertung von Beregnungsversuchen zur Untersuchung erosionsbedingter Stoffausträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. Dipl. Arbeit TU Bergakademie Freiberg

Berliner Geographische Abhandlungen

Im Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie der Freien Universität Berlin,
Altensteinstraße 19, D-1000 Berlin 33 (Preise zuzüglich Versandkosten)

- Heft 1: **HIERSEMENZEL, Sigrid-Elisabeth (1964)**
Britische Agrarlandschaften im Rhythmus des landwirtschaftlichen Arbeitsjahres, untersucht an 7 Einzelbeispielen. - 46 S., 7 Karten, 10 Diagramme.
ISBN 3-88009-000-9 (vergriffen)
- Heft 2: **ERGENZINGER, Peter (1965)**
Morphologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Ilz (Bayerischer Wald). - 48 S., 62 Abb.
ISBN 3-88009-001-7 (vergriffen)
- Heft 3: **ABDUL-SALAM, Adel (1966)**
Morphologische Studien in der Syrischen Wüste und dem Antilibanon. - 52 S., 27 Abb. im Text, 4 Skizzen, 2 Profile, 2 Karten, 36 Bilder im Anhang.
ISBN 3-88009-002-5 (vergriffen)
- Heft 4: **PACHUR, Hans-Joachim (1966)**
Untersuchungen zur morphoskopischen Sandanalyse. - 35 S., 37 Diagramme, 2 Tab., 21 Abb.
ISBN 3-88009-003-3 (vergriffen)
- Heft 5: **Arbeitsberichte aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. I. Feldarbeiten 1964/65 (1967)**
65 S., 34 Abb., 1 Karte.
ISBN 3-88009-004-1 (vergriffen)
- Heft 6: **ROSTANKOWSKI, Peter (1969)**
Siedlungsentwicklung und Siedlungsformen in den Ländern der russischen Kosakenheere. - 84 S., 15 Abb., 16 Bilder, 2 Karten.
ISBN 3-88009-005-X (DM 15,-)
- Heft 7: **SCHÜLZ, Georg (1969)**
Versuch einer optimalen geographischen Inhaltsgestaltung der topographischen Karte 1 : 25 000 am Beispiel eines Kartenausschnittes. - 28 S. 6 Abb. im Text, 1 Karte im Anhang.
ISBN 3-88009-006-8 (DM 10,-)
- Heft 8: **Arbeitsberichte aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. II. Feldarbeiten 1965/66 (1969)**
82 S., 15 Abb., 27 Fig., 13 Tafeln, 11 Karten.
ISBN 3-88009-007-6 (DM 15,-)
- Heft 9: **JANNSEN, Gert (1970)**
Morphologische Untersuchungen im nördlichen Tarso Voon (Zentrales Tibesti). - 66 S., 12 Abb., 41 Bilder, 3 Karten.
ISBN 3-88009-008-4 (DM 15,-)
- Heft 10: **JÄKEL, Dieter (1971)**
Erosion und Akkumulation im Enneri Bardague-Araye des Tibesti-Gebirges (zentrale Sahara) während des Pleistozäns und Holozäns. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti, 55 S., 13 Abb., 54 Bilder, 3 Tab., 1 Nivellement (4 Teile), 60 Profile, 3 Karten (6 Teile).
ISBN 3-88009-009-2 (vergriffen)
- Heft 11: **MÜLLER, Konrad (1971)**
Arbeitsaufwand und Arbeitsrhythmus in den Agrarlandschaften Süd- und Südostfrankreichs: Les Dombes bis Bouches-du-Rhône. - 64 S., 18 Karten, 26 Diagramme, 10 Fig., zahlreiche Tabellen.
ISBN 3-88009-010-6 (DM 25,-)
- Heft 12: **OBENAUF, K. Peter (1971)**
Die Enneris Gonoa, Toudoufou, Oudingueur und Nemagayesko im nordwestlichen Tibesti. Beobachtungen zu Formen und Formung in den Tälern eines ariden Gebirges. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 70 S., 6 Abb., 10 Tab., 21 Photos, 34 Querprofile, 1 Längsprofil, 9 Karten.
ISBN 3-88009-011-4 (DM 20,-)
- Heft 13: **MOLLE, Hans-Georg (1971)**
Gliederung und Aufbau fluviatiler Terrassenakkumulation im Gebiet des Enneri Zoumri (Tibesti-Gebirge). - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 53 S., 26 Photos, 28 Fig., 11 Profile, 5 Tab., 2 Karten.
ISBN 3-88009-012-2 (DM 10,-)
- Heft 14: **STOCK Peter (1972)**
Photogeologische und tektonische Untersuchungen am Nordrand des Tibesti-Gebirges, Zentral-Sahara, Tchad. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 73 S., 47 Abb., 4 Karten.
ISBN 3-88009-013-0 (DM 15,-)
- Heft 15: **BIEWALD, Dieter (1973)**
Die Bestimmungen eiszeitlicher Meeresoberflächentemperaturen mit der Ansatztiefe typischer Korallenriffe. - 40 S., 16 Abb., 26 Seiten Fig. und Karten.
ISBN 3-88009-015-7 (DM 10,-)
- Heft 16: **Arbeitsberichte aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. III. Feldarbeiten 1966/67 (1972)**
156 S., 133 Abb., 41 Fig., 34 Tab., 1 Karte.
ISBN 3-88009-014-9 (DM 45,-)

Berliner Geographische Abhandlungen

Im Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie der Freien Universität Berlin,
Altensteinstraße 19, D-1000 Berlin 33 (Preise zuzüglich Versandkosten)

- Heft 17: PACHUR, Hans-Joachim (1973)
Geomorphologische Untersuchungen im Raum der Serir Tibesti (Zentralsahara). - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/ Tibesti. 58. S., 39 Photos, 16 Fig. und Profile, 9 Tab., 1 Karte.
ISBN 3-88009-016-5 (DM 25,-)
- Heft 18: BUSCHE, Detlef (1973)
Die Entstehung von Pedimenten und ihre Überformung, untersucht an Beispielen aus dem Tibesti-Gebirge, Republique du Tchad. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 130 S., 57 Abb., 22 Fig., 1 Tab., 6 Karten.
ISBN 3-88009-017-3 (DM 40,-)
- Heft 19: ROLAND, Norbert W. (1973)
Anwendung der Photointerpretation zur Lösung stratigraphischer und tektonischer Probleme im Bereich von Bardai und Aozou (Tibesti-Gebirge, Zentral-Sahara). - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 48 S., 35 Abb., 10 Fig., 4 Tab., 2 Karten.
ISBN 3-88009-018-1 (DM 20,-)
- Heft 20: SCHULZ, Georg (1974)
Die Atlaskartographie in Vergangenheit und Gegenwart und die darauf aufbauende Entwicklung eines neuen ErdAtlas. - 59 S., 3 Abb., 8 Fig., 23 Tab., 8 Karten.
ISBN 3-88009-019-X (DM 35,-)
- Heft 21: HABERLAND, Wolfram (1975)
Untersuchungen an Krusten, Wüstenlacken und Polituren auf Gesteinsoberflächen der nördlichen und mittleren Sahara (Libyen und Tchad). - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 71 S., 62 Abb. 24 Fig., 10 Tab.
ISBN 3-88009-020-3 (DM 50,-)
- Heft 22: GRUNERT, Jörg (1975)
Beiträge zum Problem der Talbildung in ariden Gebieten, am Beispiel des zentralen Tibesti-Gebirges (Rep. du Tchad). - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 96 S., 3 Tab., 6 Fig., 58 Profile, 41 Abb., 2 Karten.
ISBN 3-88009-021-1 (DM 35,-)
- Heft 23: ERGENZINGER, Peter Jürgen (1978)
Das Gebiet des Enneri Misky im Tibesti-Gebirge, République du Tchad - Erläuterungen zu einer geomorphologischen Karte 1 : 200 000. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 60 S., 6 Tab., 24 Fig., 24 Photos, 2 Karten.
ISBN 3-88009-022-X (DM 40,-)
- Heft 24: Arbeitsberichte aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. IV. Feldarbeiten 1967/68, 1969/70, 1974 (1976)
24 Fig., 79 Abb., 12 Tab., 2 Karten.
ISBN 3-88009-023-8 (DM 30,-)
- Heft 25: MOLLE, Hans-Georg (1979)
Untersuchungen zur Entwicklung der vorzeitlichen Morphodynamik im Tibesti-Gebirge (Zentral-Sahara) und in Tunesien. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 104 S., 22 Abb., 40 Fig., 15 Tab., 3 Karten.
ISBN 3-88009-024-6 (DM 35,-)
- Heft 26: BRIEM, Elmar (1977)
Beiträge zur Genese und Morphodynamik des ariden Formenschatzes unter besonderer Berücksichtigung des Problems der Flächenbildung am Beispiel der Sandschwemmebenen in der östlichen Zentralsahara. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 89 S., 38 Abb., 23 Fig., 8 Tab., 155 Diagramme, 2 Karten.
ISBN 3-88009-025-4 (DM 25,-)
- Heft 27: GABRIEL, Baldur (1977)
Zum ökologischen Wandel im Neolithikum der östlichen Zentralsahara. - Arbeit aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. 111 S., 9 Tab., 32 Fig., 41 Photos, 2 Karten.
ISBN 3-88009-026-2 (DM 35,-)
- Heft 28: BÖSE, Margot (1979)
Die geomorphologische Entwicklung im westlichen Berlin nach neueren stratigraphischen Untersuchungen. - 46 S., 3 Tab., 14 Abb., 25 Photos, 1 Karte.
ISBN 3-88009-027-0 (*vergriffen*)
- Heft 29: GEHRENKEMPER, Johannes (1978)
Rañas und Reliefgenerationen der Montes de Toledo in Zentralspanien. - 81 S., 68 Abb., 3 Tab., 32 Photos, 2 Karten.
ISBN 3-88009-028-9 (DM 20,-)
- Heft 30: STÄBLEIN, Gerhard (Hrsg.) (1978)
Geomorphologische Detailaufnahme. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm I. - 90 S., 38 Abb. und Beilagen, 17 Tab.
ISBN 3-88009-029-7 (DM 18,-)
- Heft 31: BARSCH, Dietrich & LIEDTKE, Herbert (Hrsg.) (1980)
Methoden und Anwendbarkeit geomorphologischer Detailkarten. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm II. - 104 S., 25 Abb., 5 Tab.
ISBN 3-88009-030-0 (DM 17,-)

Berliner Geographische Abhandlungen

Im Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie der Freien Universität Berlin,
Altensteinstraße 19, D-1000 Berlin 33 (Preise zuzüglich Versandkosten)

- Heft 32: **Arbeitsberichte aus der Forschungsstation Bardai/Tibesti. V. Abschlußbericht (1982)**
182 S., 63 Fig. und Abb., 84 Photos, 4 Tab., 5 Karten.
ISBN 3-88009-031-9 (DM 60,-)
- Heft 33: **TRETER, Uwe (1981)**
Zum Wasserhaushalt schleswig-holsteinischer Seengebiete. - 168 S., 102 Abb., 57 Tab.
ISBN 3-88009-033-5 (DM 40,-)
- Heft 34: **GEHRENKEMPER, Kirsten (1981)**
Rezenter Hangabtrag und geoökologische Faktoren in den Montes de Toledo. Zentralspanien. - 78 S., 39 Abb., 13 Tab., 24 Photos, 4 Karten.
ISBN 3-88009-032-7 (DM 20,-)
- Heft 35: **BARSCHE, Dietrich & STÄBLEIN, Gerhard (Hrsg.) (1982)**
Erträge und Fortschritte der geomorphologischen Detailkartierung. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm III. - 134 S., 23 Abb., 5 Tab., 5 Beilagen.
ISBN 3-88009-034-3 (DM 30,-)
- Heft 36: **STÄBLEIN, Gerhard (Hrsg.) (1984)**
Regionale Beiträge zur Geomorphologie. Vorträge des Ferdinand von Richthofen-Symposiums, Berlin 1983. - 140 S., 67 Abb., 6 Tab.
ISBN 3-88009-035-1 (DM 35,-)
- Heft 37: **ZILLBACH, Käthe (1984)**
Geoökologische Gefügemuster in Süd-Marokko. Arbeit im Forschungsprojekt Mobilität aktiver Kontinentalränder. - 95 S., 61 Abb., 2 Tab., 3 Karten.
ISBN 3-88009-036-X (DM 18,-)
- Heft 38: **WAGNER, Peter (1984)**
Rezente Abtragung und geomorphologische Bedingungen im Becken von Ouarzazate (Süd-Marokko). Arbeit im Forschungsprojekt Mobilität aktiver Kontinentalränder. - 112 S., 63 Abb., 48 Tab., 3 Karten.
ISBN 3-88009-037-8 (DM 18,-)
- Heft 39: **BARSCHE, Dietrich & LIEDTKE, Herbert (Hrsg.) (1985)**
Geomorphological Mapping in the Federal Republic of Germany. Contributions to the GMK priority program IV. - 89 S., 16 Abb., 5 Tab.
ISBN 3-88009-038-6 (DM 22,50)
- Heft 40: **MÄUSBACHER, Roland (1985)**
Die Verwendbarkeit der geomorphologischen Karte 1 : 25 000 (GMK 25) der Bundesrepublik Deutschland für Nachbarwissenschaften und Planung. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm V. - 97 S., 15 Abb., 31 Tab., 21 Karten.
ISBN 3-88009-039-4 (DM 18,-)
- Heft 41: **STÄBLEIN, Gerhard (Hrsg.) (1986)**
Geo- und biowissenschaftliche Forschungen der Freien Universität Berlin im Werra-Meißner-Kreis (Nordhessen). Beiträge zur Werra-Meißner-Forschung I. - 265 S., 82 Abb., 45 Tab., 3 Karten.
ISBN 3-88009-040-8 (DM 28,-)
- Heft 42: **BARSCHE, Dietrich & LESER, Hartmut (Hrsg.) (1987)**
Regionale Beispiele zur geomorphologischen Kartierung in verschiedenen Maßstäben (1 : 5 000 bis 1 : 200 000). Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm VI. - 80 S., 10 Abb., 9 Beilagen.
ISBN 3-88009-041-6 (DM 35,-)
- Heft 43: **VAHRSON, Wilhelm-Günther (1987)**
Aspekte bodenphysikalischer Untersuchungen in der libyschen Wüste. Ein Beitrag zur Frage spätpleistozäner und holozäner Grundwasserbildung. - 92 S., 12 Abb., 56 Fig., 7 Tab., 1 Karte.
ISBN 3-88009-042-4 (DM 18,-)
- Heft 44: **PACHUR, Hans-Joachim & RÖPER, Hans-Peter (1987)**
Zur Paläolimnologie Berliner Seen. - 150 S., 42 Abb., 28 Tab.
ISBN 3-88009-043-2 (DM 30,-)
- Heft 45: **BERTZEN, Günter (1987)**
Diatomeenanalytische Untersuchungen an spätpleistozänen und holozänen Sedimenten des Tegeler Sees. - 150 S., 19 Fig., 2 Tab., 38 Abb., 7 Anlagen
ISBN 3-88009-044-0 (DM 30,-)
- Heft 46: **FRANK, Felix (1987)**
Die Auswertung großmaßstäbiger Geomorphologischer Karten (GMK 25) für den Schulunterricht. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm VII. - 100 S., 29 Abb., Legende der Geomorphologischen Karte 1 : 25 000 (GMK 25).
ISBN 3-88009-045-9 (DM 18,-)
- Heft 47: **LIEDTKE, Herbert (Hrsg.) (1988)**
Untersuchungen zur Geomorphologie der Bundesrepublik Deutschland - Neue Ergebnisse der Geomorphologischen Kartierung. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm VIII. - 225 S., 77 Abb., 12 Tab.
ISBN 3-88009-046-7 (DM 60,-)

Berliner Geographische Abhandlungen

Im Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie der Freien Universität Berlin,
Altensteinstraße 19, D-1000 Berlin 33 (Preise zuzüglich Versandkosten)

- Heft 48:** MÖLLER, Klaus (1988)
Reliefentwicklung und Auslaugung in der Umgebung des Unterwerra-Sattels (Nordhessen). - 187 S., 55 Abb., 20 Tab., 2 Karten.
ISBN 3-88009-047-5 (DM 25,-)
- Heft 49:** SCHMIDT, Karl-Heinz (1988)
Die Reliefentwicklung des Colorado Plateaus. - 183 S., 50 Abb., 17 Photos, 20 Tab., 2 Karten.
ISBN 3-88009-048-3 (DM 60,-)
- Heft 50:** STÜVE, Peter (1988)
Die Schneeschmelze eines nordskandinavischen Einzugsgebietes ermittelt über die räumlich-zeitliche Variation des Strahlungs- und Energiehaushalts. - 119 S., 42 Abb., 13 Tab., 21 Karten.
ISBN 3-88009-050-1 (DM 30,-)
- Heft 51:** BÖSE, Margot (1989)
Methodisch-stratigraphische Studien und paläomorphologische Untersuchungen zum Pleistozän südlich der Ostsee. - 114 S., 54 Abb., 17 Tab., 1 Bild.
ISBN 3-88009-051-3 (DM 25,-)
- Heft 52:** WALTHER, Michael (1990)
Untersuchungsergebnisse zur jungpleistozänen Landschaftsentwicklung Schwansens (Schleswig-Holstein). - 143 S., 60 Abb., 4 Tab., 9 Fotos.
ISBN 3-88009-052-1 (DM 20,-)
- Heft 53:** KARRASCH, Heinz (Hrsg.) (1990)
Prozeßabläufe bei der Landschafts- und Landesentwicklung: Methoden, Ergebnisse, Anwendungen. Festschrift für Wilhelm Wöhlke zum 65. Geburtstag. - 300 S., 121 Abb., 35 Tab.
ISBN 3-88009-053-X (DM 80,-)
- Heft 54:** KRÖPELIN, Stefan (1993)
Zur Rekonstruktion der spätquartären Umwelt am Unteren Wadi Howar (Südöstliche Sahara/NW-Sudan). In Vorbereitung.
ISBN 3-88009-055-6
- Heft 55:** WÜNNEMANN, Bernd (1993)
Ergebnisse zur jungpleistozänen Entwicklung der Langseerinne Südangelns in Schleswig-Holstein. - 167 S., 59 Abb., 8 Tab., 15 Bilder.
ISBN 3-88009-056-4 (DM 20,-)
- Heft 56:** JACOBSHAGEN, Volker, MÖLLER, Klaus & JÄKEL, Dieter (Hrsg.) (1993)
Hoher Meißner und Eschweger Becken. Geowissenschaftliche und vegetationskundliche Charakteristik einer Nordhessischen Landschaft. (In Vorbereitung).
ISBN 3-88009-057-2
- Heft 57:** HOFMANN, Jürgen (1993)
Geomorphologische Untersuchungen zur jungquartären Klimaentwicklung des Helan Shan und seines westlichen Vorlandes (Autonomes Gebiet Innere Mongolei/VR China). - 187 S., 46 Abb., 23 Tab., 85 Photos, 7 Beilagen.
ISBN 3-88009-058-0 (DM 25,-)
- Heft 58:** SCHULZ, Georg (1995)
Die pleistozäne Vergletscherung der Anden Perus und Boliviens abgeleitet aus Formen einer flächendeckend-integrativen Höhenlinienanalyse.
ISBN 3-88009-059-9 (DM 68,-).
- Heft 59:** DE JONG, Carmen (1995)
Temporal and spatial interactions between river bed roughness, geometry, bedload transport and flow hydraulics in mountainstreams - examples from SquawCreek, Montana (USA) and Lainbach/Schmiedlaine, Upper Bavaria (Germany).
229 S., 225 Abb., 7 Tab.
ISBN 3-88009-060-2 (DM 60,-).
- Heft 60:** ROWINSKY, Volkmar (1995)
Hydrologische und stratigraphische Studien zur Entwicklungsgeschichte von Brandenburger Kesselmooren.
155 S., 38 Abb., 28 Tab., 2 Photos, 7 Anlagen.
ISBN 3-88009-061-0 (DM 25,-).
- Heft 61:** SCHMIDT, Jürgen (1996)
Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geeigneter landwirtschaftlicher Nutzflächen. - 148 S., 87 Abb., 34 Tab.
ISBN 3-88009-062-9 (DM 30,-).