

Aktuelle Erodierbarkeit von Böden in verschiedenen Landschaftstypen  
der Schweiz – Methoden und Modelle

**Inauguraldissertation**

zur  
Erlangung der Würde eines Doktors der Philosophie  
vorgelegt der  
Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Basel

von

Sabine Siegrist  
aus Murgenthal (AG)

Basel, 2004

Genehmigt von der Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
auf Antrag von: Prof. Dr. Hartmut Leser und PD Dr. Daniel Schaub

Basel, den 8. Juli 2003

Prof. Dr. Marcel Tanner

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	I
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	V
<b>Tabellenverzeichnis</b>	VII
<b>Anhangsverzeichnis</b>	X
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	XI
<b>Vorwort</b>	XIII

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Einleitung</b>	1
1.1 Erosion als Bodenschutzproblem	1
1.2 Bodenerosionsforschung am Geografischen Institut der Universität Basel	2
1.3 Erosion und Erodierbarkeit	3
1.4 Erodierbarkeit im Feld und im Modell	5
1.5 Ausgangslage und Ziele dieser Arbeit	7
<b>2. Material und Methoden</b>	10
2.1 Untersuchungsraum	10
2.2 Methodisches Konzept	13
2.2.1 Bearbeitung, Ausstattung und Probenahmedesign auf den Testparzellen	15
2.2.2 Feld- und Labormethoden	19
2.2.3 Verschiedene Erodierbarkeits-Indices	20
2.2.4 Theoretisches Konzept der Erodierbarkeit in der vorliegenden Arbeit	21
2.3 Charakterisierung der Untersuchungsstandorte	23
2.3.1 Erosionstestparzellen	23
2.3.2 Landwirtschafts-Parzellen	25
2.4 Datenverarbeitung und statistisches Vorgehen	26
2.4.1 Korrelation	27
2.4.2 Einfachstmodellierung mit schrittweiser Regression	28
2.5 Hard- und Software	29

<b>3. Resultate und Diskussion der Messungen und Modellierungen auf den Erosionstestparzellen T1 und T50</b>	<b>30</b>
3.1 Niederschlags- und Erosionsgeschehen	30
3.1.1 Niederschlagsverteilung	30
3.1.1.1 Niederschlagsmengen	30
3.1.1.2 Niederschlagserosivität	31
3.1.2 Abtrags- und Abflussgeschehen	35
3.1.3 Das Erosionsgeschehen auf der T50 im langjährigen Vergleich	40
3.1.3.1 Abtrag und Abfluss im langjährigen Vergleich	41
3.1.3.2 Die Erodierbarkeit im langjährigen Vergleich	41
3.2 Zeitliche und räumliche Variabilität der Bodenparameter	46
3.3 Spezielle Untersuchungen zur Erodierbarkeit	46
3.3.1 Verhalten verschiedener Bodenfaktoren im Jahresverlauf und in verschiedenen Hanglagen	46
3.3.1.1 Aggregatstabilität	46
3.3.1.2 Scherwiderstand	50
3.3.1.3 Oberflächenrauigkeit	52
3.3.1.4 Bodenwassergehalt	54
3.3.1.5 pH-Wert	57
3.3.2 Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und variierenden Randbedingungen auf der T50	58
3.3.2.1 Bodenwassergehalt und pH-Wert	58
3.3.2.2 Niederschlagsfaktoren	59
3.4 Modellierungen der Erodierbarkeit auf der T50	63
3.4.1 Verschiedene Modellerodierbarkeiten im Jahresverlauf	63
3.4.2 Zusammenhang der verschiedenen Modellerodierbarkeits-Indices untereinander	66
3.4.3 Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität, Oberflächenrauigkeit, Scherwiderstand und verschiedenen Modellerodierbarkeits-Indices	66
3.4.3.1 Korrelation der Erodierbarkeit mit nachfolgenden Bodenmessungen	66
3.4.3.2 Korrelation der Erodierbarkeit mit vorausgehenden Bodenmessungen	67
3.4.4 Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit als Modell der momentanen Erodierbarkeit?	68
3.4.4.1 Ohne Berücksichtigung von Niederschlagsparametern	68
3.4.4.2 Unter Berücksichtigung von Niederschlagsparametern	69

3.5 Zusammenhang zwischen dem Abfluss- und Abtragsgeschehen und der momentanen Erodierbarkeit, ausgedrückt in Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit	70
3.5.1 Ohne Berücksichtigung von Niederschlagsparametern	70
3.5.2 Unter Berücksichtigung von Niederschlagsparametern	71
<b>4. Resultate und Diskussion der Messungen auf den Landwirtschaftspartellen</b>	<b>74</b>
4.1 Die Messungen auf den Landwirtschaftspartellen	74
4.1.1 Niederschlag	74
4.1.2 Abtrag	76
4.1.3 Abfluss	78
4.1.4 Splash	78
4.2 Spezielle Untersuchungen zur Erodierbarkeit der Landwirtschaftspartellen	82
4.2.1 Verhalten verschiedener Bodenfaktoren im Jahresverlauf und in verschiedenen Hanglagen	82
4.2.1.1 Aggregatstabilität	82
4.2.1.2 Scherwiderstand	84
4.2.1.3 Bodenwassergehalt	85
4.2.2 Zusammenhang der einzelnen Faktoren untereinander und mit Abtrag, Abfluss, Splash und Niederschlagsmenge	86
4.2.2.1 Einfluss von Abfluss, Abtrag, Splash und Niederschlag auf die Bodenfaktoren	87
4.2.2.2 Voraussage von Abfluss, Abtrag und Splash durch die Bodenfaktoren und die Niederschlagsmenge?	89
4.3 Schlussfolgerungen für verschiedene Standorte und Bodenarten	92
<b>5. Eine neue Methode zur Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit aufgrund von Mikroreliefstrukturen</b>	<b>93</b>
5.1 Grundlagen und erste Erkenntnisse	93
5.2 Methodik	96
5.2.1 Die Foto-Methode - das Vorgehen	96
5.2.1.1 Die Merkmale der verschiedenen Mikroreliefstrukturen	97
5.2.1.2 Von der Mikroreliefstruktur zum Erodierbarkeits-Kennwert – zwei verschiedene Berechnungsvarianten	100
5.2.2 Vergleich mit der Methode nach BERGSMÄ (1992)	102
5.3 Resultate der verschiedenen Partellenmessungen	103

5.4 Validierung der Foto-Methode	108
5.4.1 Zusammenhang mit Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit	108
5.4.2 Zusammenhang mit Abtrag, Abfluss und Splash resp. Niederschlag	110
5.4.2.1 Wie gut repräsentieren die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode die aktuelle Erodierbarkeit?	110
5.4.2.2 Wie gut widerspiegeln die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode das vorherige Erosions- und Niederschlags- geschehen?	112
5.4.3 Zusammenhang mit Modellerodierbarkeits-Indices	114
5.5 Möglichkeiten und Grenzen der Fotomethode	116
5.5.1 Aussagen zur momentanen Erodierbarkeit resp. zum Abfluss- und Abtragungsgeschehen	116
5.5.2 Anwendbarkeit bei verschiedenen Bodenarten und Standorten	121
<b>6. Schlussfolgerungen zur Variabilität der Erodierbarkeit aus landschaftsökologischer Sicht</b>	123
6.1 Die zeitliche und räumliche Variabilität der Erodierbarkeit	128
6.1.1 Die zeitliche Variabilität	128
6.1.2 Die räumliche Variabilität	129
6.2 Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit durch die Messung bekannter Bodenparameter	130
6.3 Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit mit der Fotomethode	132
<b>7. Zusammenfassung</b>	134
<b>8. Literaturverzeichnis</b>	138
<b>9. Anhang</b>	150

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage der untersuchten Standorte in der Region Basel	11
Abb. 2: Naturraumtypen der Region Basel (aus DRÄYER 1996, nach LESER 1982 und MOSIMANN 1985)	12
Abb. 3: Erosionstestparzellen: Probenahmedesign	17
Abb. 4: Aufnahme der Erosionstestparzellen T1 (rechts) resp. T50 (links)	17
Abb. 5: Landwirtschaftsparzellen: Probenahmedesign	18
Abb. 6: Abb. Aufnahme der Landwirtschaftsparzellen (Diegten)	18
Abb. 7: Wirkungszusammenhänge beim Erosionsprozess	22
Abb. 8: Niederschlagsmengen auf der T50	32
Abb. 9: Summenkurven der Niederschlagsintensitäten auf der T50	33
Abb. 10: Niederschlagsmengen auf der T1	34
Abb. 11: Summenkurven der Niederschlagsintensitäten auf der T1	35
Abb. 12: Abtrag und Abfluss 1995 - 1997 auf der Erosionstestparzelle T50	38
Abb. 13: Abtrag und Abfluss 1995 und 1996 auf der Erosionstestparzelle T1	40
Abb. 14: Langjährige Abtragsereignisse auf der T50 von 1983 - 1997	41
Abb. 15: Perkolationsstabilität und Abtrag auf der Testparzelle T50	48
Abb. 16: Perkolationsstabilität auf der Testparzelle T1	49
Abb. 17: Scherwiderstand auf der Testparzelle T50	50
Abb. 18: Scherwiderstand auf der Testparzelle T1	51
Abb. 19: Die Oberflächenrauigkeit auf der Testparzelle T50	53
Abb. 20: Die Oberflächenrauigkeit auf der Testparzelle T1	54
Abb. 21: Der Bodenwassergehalt auf der Testparzelle T50	55
Abb. 22: Der Bodenwassergehalt auf der Testparzelle T1	56
Abb. 23: Die pH-Werte in H <sub>2</sub> O resp. KCl gemessen auf der Testparzelle T50	57
Abb. 24: Verlauf der K-Werte nach RUSLE	64
Abb. 25: Interrillenerodierbarkeit und Rillenerodierbarkeit modelliert mit WEPP	65
Abb. 26: Niederschlagsdiagramm: Summenkurve der Niederschlagsmengen an den vier Landwirtschaftsstandorten	75
Abb. 27: Das Abtragsgeschehen auf den vier Landwirtschaftsparzellen während drei Messperioden	77
Abb. 28: Das Abflussgeschehen auf den vier Landwirtschaftsparzellen während drei Messperioden	79
Abb. 29: Die Splasherosion auf den vier Landwirtschaftsparzellen während zwei Messperioden	80
Abb. 30: Die Aggregatstabilität der vier Landwirtschaftsstandorte im Jahresverlauf	83
Abb. 31: Der Scherwiderstand der vier Landwirtschaftsstandorte im Jahresverlauf	84
Abb. 32: Der Bodenwassergehalt der vier Landwirtschaftsstandorte im Jahresverlauf	85
Abb. 33: Der Fotorahmen zur Aufnahme des Mikroreliefzustandes	97
Abb. 34: Die verschiedenen Mikroreliefausprägungen bei der Fotomethode	97
Abb. 35: Die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode auf der T50	103
Abb. 36: Verschiedene Mikroreliefzustände im Verlauf der Vegetationsperiode auf der T50	103

Abb. 37: Die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode auf der T1	104
Abb. 38: Die unterschiedliche Ausprägung des Mikroreliefs der Parzellen der T1 zu verschiedenen Zeitpunkten während der Vegetationsperiode	105
Abb. 39: Die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode auf den Landwirtschafts-parzellen	106
Abb. 40: Die unterschiedliche Ausprägung des Mikroreliefs der Landwirtschafts-parzellen zu einem Zeitpunkt	107
Abb. 41: Die Entwicklung des Mikroreliefs im Verlaufe verschiedener Niederschlags-ereignisse bei einem schluffreichen Lössboden (a) resp. einem tonreichen Boden (b)	122
Abb. 42: Regelkreis der Bodenerosion nach SCHAUB (1998), verändert	125
Abb. 43: Der Wirkungszusammenhang zwischen Mikrorelief, Erodierbarkeit, Abtrag und Abfluss unter Einbezug des vorherigen Erosionsgeschehens	127



## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Vor- und Nachteile der Erosions- und Landwirtschafts-Testparzellen	14
Tab. 2:	Tab. Das Was - Wann - Wo der Parzellenmessungen	15
Tab. 3:	Feldmethoden zur Bestimmung der Erodierbarkeit	19
Tab. 4:	Feldmethoden zur Bestimmung von Erosion und Erosivität	19
Tab. 5:	Labormethoden zur Untersuchung von Bodenproben	20
Tab. 6:	T1: Die Erosionstestparzelle T1 im Möhliner Feld	23
Tab. 7:	T50: Die Erosionstestparzelle T50 im Baselbieter Tafeljura	24
Tab. 8:	Kurzcharakterisierung der zwölf Landwirtschafts-Parzellen	25
Tab. 9:	Einteilung der Testparzellen in drei Gruppen	26
Tab.10:	Statistische Datentransformation und Abkürzungen	28
Tab.11:	Die Kenngrößen der schrittweisen Regression	29
Tab.12:	Niederschlagsmengen, r-Werte auf der T50	32
Tab.13:	Niederschlagsmengen, r-Werte auf der T1	34
Tab.14:	Abfluss und Abtrag 1991 - 1997 auf der Erosionstestparzelle T50	36
Tab.15:	Abfluss und Abtrag 1995 und 1996 auf der Erosionstestparzelle T1	40
Tab.16:	Abträge gemessen und modelliert nach USLE	42
Tab.17:	Räumliche und zeitliche Variabilität der chemischen und physikalischen Bodenparameter auf der T50	43
Tab.18:	Räumliche und zeitliche Variabilität der chemischen und physikalischen Bodenparameter auf der T1	44
Tab.19:	(E2) Korrelationsmatrix Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit mit Bodenwassergehalt und pH-Wert	59
Tab.20:	(E4b) Korrelationsmatrix Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit mit Niederschlagsfaktoren	60
Tab.21:	Schrittweise Regression zur Beschreibung von Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit durch Niederschlagsgrößen	61
Tab.22:	Schrittweise Regression zur Beschreibung von Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit durch Niederschlagsgrößen und Bodenwassergehalt	62
Tab.23:	Verschiedene Erodierbarkeits-Indices, Erodierbarkeitswerte der Fotomethode, Abtrag, Abfluss und Niederschlag auf der Testparzelle T50	63
Tab.24:	Korrelationsmatrix der verschiedenen Modellerodierbarkeiten untereinander	66
Tab.25:	(E4)Korrelationsmatrix der Modellerodierbarkeiten der Erosionsereignisse mit <b>nachher</b> gemessener Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit	67
Tab.26:	(E3a) Korrelationsmatrix der Modellerodierbarkeiten der Erosionsereignisse mit <b>vorher</b> gemessener Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit	67
Tab.27:	Schrittweise Regression zur Beschreibung der momentanen Erodierbarkeit durch <b>vorher</b> gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit	68

Tab.28:	Schrittweise Regression zur Beschreibung der momentanen Erodierbarkeit durch <b>vorher</b> gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und Niederschlagsparameter	69
Tab.29:	(E3a) Korrelationsmatrix Abtrag / Abfluss mit Modellerodierbarkeiten	70
Tab.30:	(E3a) Korrelationsmatrix Abtrag / Abfluss mit <b>vorher</b> gemessenen Bodenparametern	70
Tab.31:	Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss resp. Abtrag durch <b>vorher</b> gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und Bodenwassergehalt	70
Tab.32:	(E4b) Korrelation Abtrag / Abfluss mit <b>nachher</b> gemessenen Bodenparametern	71
Tab.33:	(E3a) Korrelation Abtrag / Abfluss mit dem <b>davor</b> stattfindenden Niederschlagsgeschehen	72
Tab.34:	Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss resp. Abtrag durch <b>davor</b> stattfindendes Niederschlagsgeschehen	72
Tab.35:	Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss resp. Abtrag durch <b>vorher</b> gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit, Bodenwassergehalt sowie dem <b>davor</b> stattfindenden Niederschlagsgeschehen	73
Tab.36:	(E2) Korrelationsmatrix der Bodenfaktoren bei Landwirtschaftsparzellen	86
Tab.37:	(E5b) Korrelationsmatrix der Erosionsereignisse mit den <b>danach</b> gemessenen Bodenfaktoren	88
Tab.38:	(E5a) Korrelationsmatrix der Erosionsereignisse mit den <b>vorher</b> gemessenen Bodenfaktoren	89
Tab.39:	Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss, Abtrag und Splash durch <b>vorher</b> gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Bodenwassergehalt sowie Niederschlagsmenge	91
Tab.40:	Formular Fotobeobachtungen	100
Tab.41:	Beurteilung der Erosionsneigung bei tonreichen, lehmigen und schluffreichen Böden	102
Tab.42:	Methodenvergleich Fotomethode und Methode nach BERGSMA (1992)	102
Tab.43:	(E5) Korrelationsmatrix zwischen Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und Bodenfaktoren der T50	108
Tab.44:	(E2) Korrelationsmatrix zwischen Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und Bodenfaktoren der Landwirtschaftsparzellen	109
Tab.45:	(E5a) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem <b>danach</b> gemessenen Abtrag, Abfluss und den berechneten Modell-Erodierbarkeiten auf der T50	110
Tab.46:	(E5a) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem <b>danach</b> gemessenen Abtrag, Abfluss und Splash auf den Landwirtschaftsparzellen	111
Tab.47:	(E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem <b>vorherigen</b> Erosions- und Niederschlagsgeschehen auf der T50	112

Tab.48:	(E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Differenzen der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode und dem <b>vorherigen</b> Erosions- und Niederschlags- geschehen auf der T50	112
Tab.49:	(E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem <b>vorherigen</b> Erosions- und Niederschlagsgeschehen auf den Landwirtschaftsparzellen	113
Tab.50:	(E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Differenzen der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode und dem <b>vorherigen</b> Erosions- und Niederschlags- geschehen auf den Landwirtschaftsparzellen	114
Tab.51:	(E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Foto- methode und dem <b>vorher</b> gemessenen Abtrag, Abfluss und den berechneten Modell-Erodierbarkeiten auf der T50	115
Tab.52:	Schrittweise Regression zur Modellierung der Erodierbarkeit (ausgedrückt im $K_{\text{berechnet}}$ ) auf der Erosionstestparzelle T50	116
Tab.53:	Schrittweise Regression zur Modellierung des reellen Abtrags auf der Erosionstestparzelle T50	117
Tab.54:	Schrittweise Regression zur Modellierung des reellen Abflusses auf den Landwirtschaftsparzellen	118
Tab.55:	Schrittweise Regression zur Modellierung des reellen Abtrags auf den Landwirtschaftsparzellen	119
Tab.56:	Schrittweise Regression zur Modellierung der Splasherosion auf den Landwirtschaftsparzellen	120
Tab. 57:	Das Prinzip der Untersuchungen der Bodenerosionsdynamik in der vorliegenden (nach SCHAUB 1998, verändert)	126

## Anhangsverzeichnis

A1: Die K-Faktoren nach SCHWERTMANN ET AL. 1990 der Erosionstestparzellen T1 und T50 während der Untersuchungszeit	151
A2: Die K-Faktoren nach SCHWERTMANN ET AL. 1990 der Landwirtschaftsparzellen während der Untersuchungszeit	151
A3: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftsparzelle in Therwil	152
A4: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftsparzelle in Münchenstein	153
A5: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftsparzelle in Basel	154
A6: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftsparzelle in Diegten	155
A7: Detaillierte Kennwerte der physikalischen und chemischen Bodenmessungen auf der Erosionstestparzelle T50 von 1995 bis 1997	156
A8: Detaillierte Kennwerte der physikalischen und chemischen Bodenmessungen auf der Erosionstestparzelle T1 von 1995 bis 1996	158
A9: Bearbeitung auf den Landwirtschaftsparzellen während der Untersuchungsperiode	159
A10: Detaillierte Kennwerte der physikalischen und chemischen Bodenmessungen auf den Landwirtschaftsparzellen Therwil, Münchenstein, Basel und Diegten während der Untersuchungsperiode	160
A11: Detaillierte Kennwerte der Erodierbarkeitsmessungen mit der Fotomethode auf allen Messstandorten	164
A12: Hilfstabelle mit den Prozentwerten für die Beobachtungen bei der Fotomethode	165

## Abkürzungsverzeichnis

AS	Aggregatstabilität
BM	Landwirtschaftsparzelle Münchenstein (vgl. Tab.8)
DEX <sub>FotoB</sub>	Differenz der Erodierbarkeitswerte (Kap. 5.4.2.2)
DG	Dauergrünland
E2D	Erosionswiderstand des E-2D
E-2D	Modell Erosion-2D
EXa	siehe Kap. 2.4, X dient der Identifizierung der Ursprungsdatentabellen
EXb	siehe Kap. 2.4, X dient der Identifizierung der Ursprungsdatentabellen
EX <sub>FotoA</sub>	Erodierbarkeitswert der Fotomethode, Berechnungsvariante A (Kap. 5.2.1.2)
EX <sub>FotoB</sub>	Erodierbarkeitswert der Fotomethode, Berechnungsvariante B (Kap. 5.2.1.2)
F-Wert	(Tab. 11, Kap. 2.4.1)
F to enter	(Tab. 11, Kap. 2.4.1)
F to remove	(Tab. 11, Kap. 2.4.1)
GT	Landwirtschaftsparzelle Therwil (vgl. Tab.8)
JB	Landwirtschaftsparzelle Basel (vgl. Tab.8)
JD/ND	Landwirtschaftsparzelle Diegten (vgl. Tab.8)
K	K-Wert gerechnet (ereignisbezogene Erodierbarkeit, rückgerechnet aus der USLE)
K-Faktor	über die USLE berechnete Jahreserodierbarkeit
K rusle	K-Wert (Erodierbarkeitswert) RUSLE
k-Wert oder K-Wert	ereignisbezogener Erodierbarkeitswert
Ki	Interrillen-Erodierbarkeit WEPP
Kr	Rillen-Erodierbarkeit WEPP
LW	Landwirtschaft
mi	mittlerer Parzellenabschnitt
Mittel	Mittelwert (Kap. 2.4)
n	Anzahl Messwerte (Tab. 11)
n.a.	nicht analysiert
NE	Niederschlagsenergie
NM	Niederschlagsmenge
NEW	Niederschlagsenergie Woche
NMW	Niederschlagsmenge Woche
NS	Niederschlag
ob	oberer Parzellenabschnitt
OR	Oberflächenrauigkeit
P	Irrtumswahrscheinlichkeit der Signifikanzrechnung (Kap. 2.4.1)

p-Wert	Irrtumswahrscheinlichkeit des Varianzquotienten-Tests (Kap. 2.4.2)
P1, P2, P3	Unterparzellen der T1
p-Wert	Irrtumswahrscheinlichkeit (Tab. 11, Kap. 2.4.1)
r	Korrelationskoeffizient
R	r-Wert (ereignisbezogener Erosivitätswert)
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmass Quadrat des Regressionskoeffizienten R (Tab. 11)
R-Faktor	über die USLE berechnete Jahreserosivität
r-Wert oder R-Wert	ereignisbezogener Erosivitätswert
RUSLE	Revised USLE
RW	R-Wert Woche
SD	Standardabweichung (Kap. 2.4)
SW	Scherwiderstand
T1	langjährige Erosionstestparzelle "Hochrhein" in Möhlin (vgl. Tab. 6)
T50	langjährige Erosionstestparzelle "Tafeljura" in Rothenfluh (vgl. Tab. 7)
TE	Tage seit letztem Erosionsereignis
TN	Tage seit letztem Niederschlag
TS	Trockensubstanz
un	unterer Parzellenabschnitt
USLE	Universal Soil Loss Equation
VK	Variationskoeffizient (Kap. 2.4)
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WG	Bodenwassergehalt

## Vorwort und Dank

Als ich mich nach Beendigung meiner Diplomarbeit zu einer weiteren Forschungsarbeit im Bereich Bodenerosion am Geographischen Institut der Universität Basel entschloss, glaubte ich zu wissen, worauf ich mich "einliess". Ich hatte bereits genügend Forschungsluft an verschiedenen internationalen Tagungen geschnuppert, kannte die bisherigen Forschungsarbeiten am Institut und wusste, dass ich eine Arbeit machen wollte, welche sich nicht nur an der Forschungsfront orientiert, sondern auch der angewandten Bodenforschung einen Nutzen bringen würde. Ein ehrgeiziger Wunsch, der nur durch die Nutzung der langjährigen Datenreihen der verschiedenen Untersuchungsgebiete, die Modellierungen durch andere KollegInnen und den intensiven Austausch mit Forschungsgruppen anderer Universitäten zu erfüllen war. Damit habe ich mich gleich mehreren Herausforderungen gestellt, welche unter anderem dazu beigetragen haben, dass die Arbeit nicht innerhalb der geplanten Assistenz- und Doktorandinnen-Zeit an der Universität fertiggestellt werden konnte. Dass ich dennoch neben der späteren Berufstätigkeit in einem mir neuen Umweltbereich die Energie hatte, diese Arbeit fertigzustellen, verdanke ich einerseits dem spannenden Thema, aber vor allem der Unterstützung und dem Verständnis vieler Menschen, die mir nahe stehen.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Professor H. Leser, welcher es mir ermöglichte, mich dem Thema der Bodenerodierbarkeitsforschung zu widmen und welcher seine Geduld bei der Fertigstellung der Arbeit bewies. Fachliche Unterstützung, hilfreiche Feedbacks und Hinweise, viele Inputs in ungezählten Diskussionen, ganz praktische Inputs für Vorträge und wissenschaftliche Papers und nicht zuletzt motivierende Worte für die Fertigstellung erhielt ich von meinem Betreuer und Koreferenten Privatdozent Dr. Daniel Schaub sowie von meinem Kollegen Bernd Hebel, auch ihnen mein inniger Dank.

Viele weitere Leute haben mich auf vielfältige Weise bei der Arbeit unterstützt, sei es durch konkrete Hilfe bei der Feld- und Laborarbeit, durch aufmunternde Worte, durch fachliche Diskussionen, das zur Verfügung Stellen von Daten oder das Durchlesen des Manuskriptes. Ihnen allen möchte ich von Herzen danken für die wertvolle Unterstützung, die sie mir während den langen Jahren bis zur Fertigstellung dieser Arbeit gaben: Alois Schwarzentruher und seine Laborcrew, Boris Spycher, Caroline Roggo, Christian Döbeli, Christoph Seiberth, Dieter Dräyer, Eelko Bersma (ITC, Holland), Heidi Strohm und ihre Laborcrew, Heinz Urben, Jochen Fröhlich, Leena Baumann, Madeleine Imhof, Marcel van der Heijden (Botanisches Institut, Universität Basel), Marion Potschin, Marius Menz, Pascal Simon (LZE, Sissach), Paul Mäder (FIBL, Frick), Paul Müller, Peter Marxer, Roland Bono (Bodenschutzfachstelle

Liestal), Simon Rolli, Stefan Meier-Zielinski, Stephan Dällenbach, Urs Vökt (Bodenschutzzfachstelle Bern), Valerio Ponziani und seine Feldcrew, Viktor Marty, Volker Prasuhn (IUL, Liebefeld) und Urs Walter.

Speziell und ganz herzlich bedanken möchte ich mich aber auch bei den Familien Hans Ueli Gerber (Therwil), Walter Banga (Münchenstein), Ulrich Joss-Brunner und André Nyffeler-Leibundgut (Diegten) sowie Kurt Jordi-Jutzeler (Basel), welche mir ihre Felder für die Untersuchungen zur Verfügung stellten, den Mehraufwand bei der Ackerbewirtschaftung auf sich nahmen, mir geduldig jegliche Fragen beantworteten, mir Bewirtschaftungspläne und anderes Material anvertrauten und mir mit manchem Süssmost, Kaffee oder gar Mittagessen über die Härten der Feldarbeit hinweg halfen. Ihrer Arbeit und ihrem Einsatz gebührt mein grösster Respekt.

Den Studentinnen und Studenten danke ich für ihr Engagement, das mich motivierte meine Assistenzzeit zu beenden. Sie haben mir durch ihre kritischen Fragen bei verschiedensten Exkursionen und Arbeitsgemeinschaften, im Laborkurs und ganz konkret im Feld geholfen, meine fachlichen Erkenntnisse aber auch mich persönlich weiterzuentwickeln. Sie lassen mich mit Hoffnung auf die künftige ForscherInnen-Generation schauen.

Wie viele Forschungs-Arbeiten würden wohl nicht beendet, wenn nicht viele nette Leute durch ihre private Unterstützung das Durchhalten ermöglichten? Meinen Freundinnen und Freunden und meinen jeweiligen Lebenspartnern danke ich deshalb von ganzem Herzen für ihre motivierenden Worte, ihre Geduld und ihr Verständnis und die tatkräftige Unterstützung durch Einladungen zum Abendessen oder zu belohnenden Kinobesuchen.

Mein letzter und grösster Dank aber geht an meine Eltern Hans und Marlis Siegrist-Buchmann. Sie haben mir auf grosszügige Weise und unter manchem persönlichen Verzicht das Studium ermöglicht, wodurch diese Forschungsarbeit entstehen konnte. Sie sind meine treuesten und stolzesten Fans, ihnen widme ich diese Arbeit.



# 1. Einleitung

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der aktuellen Erodierbarkeit verschiedener Böden und deren Variabilität von Niederschlag zu Niederschlag, von Erosionsereignis zu Erosionsereignis, im Verlaufe einer Vegetationsperiode und während den klimatischen Jahreszeiten. Ganz im Sinne des landschaftsökologischen Pragmatismus (LESER 1996) wurde eine einfache und zweckgerichtete Methode entwickelt und geprüft, welche die Veränderungen der Bodenerodierbarkeit im Feld rasch erfassen kann.

## 1.1 Erosion als Bodenschutzproblem

Heute ist die Bodenerosion ein weltweit erkanntes und dennoch schleichend fortschreitendes Umweltproblem (z.B. MORGAN 1999, BREBURDA & RICHTER 1998) und ihre Auswirkungen stellen längerfristig eine gravierende Bedrohung für eine nachhaltige Bodennutzung dar. Traditionell wurde die Bodenerosion vor allem mit der Landwirtschaft in tropischen und subtropischen Gebieten assoziiert. Unterdessen ist aber auch in den gemässigten Breiten die zunehmende Gefährdung der Lebensgrundlage Boden durch die Bodenerosion ins Bewusstsein einer breiteren Öffentlichkeit gerückt. Besondere Brisanz erhält das Thema natürlich auch in Zusammenhang mit der stetig steigenden Weltbevölkerungszahl und der damit verbundenen Notwendigkeit einer nachhaltigen Landwirtschaft. Aufrüttelnd sind Zahlen, welche sich mit der Frage von Bodenverlusten und Bodenreuebildung beschäftigen. So braucht nach gängigen Lehrbüchern die Schaffung von 2.5 cm Oberboden unter landwirtschaftlicher Nutzung je nach Ausgangsgestein und Verwitterungsbedingungen zwischen 300 und 1000 Jahren (HUDSON 1986). Im Vergleich dazu gibt zum Beispiel BARROW (1991) die jährlichen Bodenverluste für die Tropen und Subtropen mit rund 30 - 40 Tonnen pro Hektar und für die USA und Europa mit durchschnittlich 17 Tonnen pro Hektar an, das heisst, dass bereits nach rund 22 Jahren in Europa die Bodenverluste die oben beschriebene Bodenreuebildungsrate überschritten hätten. In anderen Studien wird gezeigt, dass sich die landwirtschaftliche Nutzfläche jährlich aufgrund landwirtschaftlicher Bodendegradation durch Bodenerosion und andere Faktoren irreversibel um zwischen sechs und mehr als zehn Millionen Hektaren vermindert (PIMENTAL ET AL. 1995, DUDAL 1981). Gerade da die Diskussion um Bodenreuebildungs- und Bodenverlusten noch lange nicht abgeschlossen sein dürfte, muss es sich eine nachhaltige Landwirtschaft zum Ziel setzen, Bodenerosion möglichst vollständig zu vermeiden.

Weltweit sind zum Thema Bodenerosions-Verminderung intensive Forschungsarbeiten im Gange. Dabei kam es zu einer Verschiebung der Forschungsschwerpunkte von der reinen

Prozessforschung und Abtragsquantifizierung hin zur Modellierung (z.B. MORGAN & RICKSON 1994). Die verschiedenen Modelle ermöglichen es nicht mehr nur retrospektiv das Geschehene nachzuvollziehen, sondern prospektive Aussagen zu einem möglichen Geschehen bei Veränderungen zu machen. So können Modelle helfen, vorbeugende Massnahmen zu ergreifen und Schäden zu vermeiden. Gerade in der Praxis und im Vollzug sind dabei jedoch immer wieder einfach zu handhabende Modelle und Modellgrössen gefragt, welche helfen auch bei komplexen Systemen eine fundierte Entscheidung über Massnahmen zu treffen.

In der Schweiz wurde das Thema Bodenerosion durch die Arbeiten der **Forschungsgruppe Bodenerosion Basel, FBB** (z.B. SCHMIDT 1979, SEILER 1983, VAVRUCH 1988, SCHAUB 1989, PRASUHN 1991, DRÄYER 1996) und durch die Arbeiten im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes 22, "Nutzung des Bodens in der Schweiz" (z.B. MOSIMANN ET AL. 1990) als zunehmendes Umweltproblem erkannt. Die Gründe für eine stetige Zunahme der Bodenerosion in der Schweiz sind in verschiedenen Arbeiten der FBB (z.B. PRASUHN 1991, SCHAUB 1991) ausführlich dargelegt worden und lassen sich in drei Kategorien einteilen: Flächennutzungsänderungen, Parzellenumgestaltungen im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren und zunehmende Bodenbeanspruchung und Strukturverschlechterung im Rahmen einer intensivierten Landwirtschaft.

Da die Bodenerosion als ein komplexer Prozess mit diversen natürlichen und anthropogenen Einflussgrössen betrachtet werden muss, ist es folgerichtig, dass über die Art der Landnutzung durch den Menschen die natürlich vorgegebene Erosionsanfälligkeit eines Bodens beeinflusst wird. Durch die vermehrte Förderung einer ökologischen Landwirtschaft durch den Bundesrat (Agrarpolitik 2002) und die im Rahmen der Revision des schweizerischen Umweltschutzgesetzes (Dez. 1995) neu erarbeitete "Verordnung über Belastungen des Bodens", VBBo (EDI 1998, EDI 2001), wurde ein weiterer Schritt in Richtung Nachhaltigkeit getan. Im Art. 6 der VBBo wird erstmalig in der Schweiz bei den Bestimmungen zur Vermeidung nachhaltiger physikalischer Bodenbelastungen auch die Erosion aufgeführt. In diesem Zusammenhang werden Fragen der Voraussagbarkeit von Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Erosionsanfälligkeit des Bodens sowie der Erfolgskontrolle von Bodenschutzmassnahmen zukünftig noch vermehrt an Wichtigkeit gewinnen.

## **1.2 Bodenerosionsforschung am Geografischen Institut der Universität Basel**

Seit 1975 wird am Geografischen Institut der Universität Basel in geoökologisch unterschiedlichen Untersuchungsgebieten Bodenerosionsforschung betrieben (FBB 2001). Die vorliegende Arbeit greift auf die langjährigen Datenreihen und die Einrichtungen der Dauerbeobachtungsflächen "Hochrhein" und "Tafeljura" (Abb. 1) zurück. Die Bodenerosion wird bei der FBB als Transportprozess im Landschaftsökosystem verstanden und ist stark stofflich-wasserhaushaltlich gewichtet (LESER ET AL. 1998). Sie wird durch verschiedene natürliche Faktoren wie Boden, Relief und Klima und durch anthropogene Faktoren wie Agrarpolitik, Ökonomie und Landnutzungssysteme beeinflusst.

Seit 1975 haben sich die Ziele des Forschungsprogrammes der FBB laufend verändert resp. wurden diversifiziert (LESER 1988, SIEGRIST & FRÖHLICH 1996, ROLLI & MEIER 1997):

1. Phase (1975 - heute): *Quantitative Bodenerosionsforschung auf schweizerischen Agrarflächen*

Stichworte: Entwicklung des Erfassungs-Instrumentariums, Prozessforschung, Dauerbeobachtungen, Quantifizierung von Abträgen, Feld- und Laborexperimente  
z.B. SCHMIDT 1979, SEILER 1983, ROHRER 1985, VAVRUCH 1988, SCHAUB 1989, PRASUHN 1991, RÜTTIMANN ET AL. 1995

2. Phase (1986 - heute): *Stoffumlagerungen in der Landschaft bei Bodenerosionsprozessen und Massnahmen zur Bodenfunktionserhaltung*

Stichworte: Erarbeitung von Bodenschutzmassnahmen, Erfolgskontrolle erosionsmindernder Massnahmen, Schadenskartierungen, Anwendung und Überprüfung von Modellen  
z.B. HERWEG 1988, ROHR ET AL. 1990, LEHMANN 1994, LESER & SCHAUB 1995, UNTERSEHER 1997, SIEGRIST ET AL. 1998)

3. Phase (1991 - heute): *Erfassung und GIS-gestützte Modellierung von Landschaftszuständen und Feststoffbilanzen in chorischer Dimension*

Stichworte: Entwicklung von Modellen, Entwicklung von Erfassungsmethoden für Bodenerodierbarkeits-Indices, GIS-Anwendungen in der Bodenerosionsforschung, Stoffumlagerungen, präferentielle Fliesswege, Übertrittsstellen, Remobilisierung, Sedimentanlieferungsverhältnis  
z.B. FRÖHLICH ET AL. 1994, DRÄYER 1996, SCHAUB ET AL. 1997, HEBEL & SIEGRIST 1998, HEBEL IN VORBER.

Die vorliegende Arbeit entstand in der Phase 3 und hatte zum Ziel, eine einfache Methode zur Erfassung der Dynamik der Bodenerodierbarkeit zu entwickeln. Dies soll schliesslich in einem verbesserten und voraussage-tauglichen Modell dieses Teilprozesses resultieren. In bestehenden Modellen wird die Prozessgrösse Bodenerodierbarkeit nämlich entweder als einfach zu bestimmende statische oder schwierig resp. aufwändig zu bestimmende dynamische Grösse behandelt, was die Anwendbarkeit jeweils stark einschränkt.

### 1.3 Erosion und Erodierbarkeit

Erodierbarkeit (synonym mit Erodibilität, Erosionsneigung resp. Erosionsempfindlichkeit oder englisch *erodibility*) ist per Definition **der Widerstand des Bodens sowohl gegen Ablösung als auch gegen Transport** (MORGAN 1999). Der in dieser Arbeit verwendete Begriff Erodierbarkeit wird als gleichbedeutend mit der Erosionsneigung eines Bodens interpretiert. Die Erodierbarkeit ist aber nicht gleichbedeutend mit der Erosionsgefährdung eines Standortes, welche als das Zusammenwirken von Erodierbarkeit, Hangneigung und -lage

sowie Bearbeitung verstanden wird.

Obwohl der Widerstand gegen Erosion zum Teil auch von der topografischen Lage, der Hangneigung oder der landwirtschaftlichen Bearbeitung abhängt, sind dennoch Bodenfaktoren die wichtigsten Einflussgrößen. So ist die Erodierbarkeit abhängig von

- Bodenart
- Aggregatstabilität
- Scherwiderstand
- Infiltrationskapazität
- organischen und anorganischen Bestandteilen wie Humusgehalt, Mikroorganismen, Carbonatgehalt etc.

Bei der **Bodenart** spielt vor allem der Tongehalt eine zentrale Rolle. So zeigt es sich, dass Böden mit einem geringen Tonanteil von zwischen 9-30% die höchste Erosionsanfälligkeit aufweisen (MORGAN 1999). Dabei spielt vor allem die bindende Wirkung der Tonminerale und die Möglichkeit der Ausbildung von stabilen Ton-Humus-Komplexen eine zentrale Rolle.

Verschiedenste Quellen bezeichnen die **Aggregatstabilität** als die Grösse, welche die Erodierbarkeit am besten beschreibt (BRYAN 1968, BRYAN ET AL. 1989, BAUMGARTL & HORN 1993, LE BISSONNAIS 1993). Die Aggregatstabilität ist die Summe mehrerer Einflüsse, welche anorganische und organische Bodenpartikel zu einem Aggregat zusammenhalten. Die Basisliteratur und verschiedenste Detailuntersuchungen nennen vor allem die Wirkung der Tonminerale, der Humusstoffe und des  $\text{CaCO}_3$  sowie der Mykorrhiza und der Ausscheidungsprodukte von Mikroorganismen und Regenwürmern. Die Stabilität der Aggregate hat einen wichtigen Einfluss darauf, wie schnell und in welcher Form diese bei äusserer Krafteinwirkung in Bruchstücke zerfallen. Die Grösse der Bruchstücke wiederum bestimmt, wie gut sie transportierbar sind, resp. wie weit sie transportiert werden können. Der wichtigste Zusammenhang besteht aber wohl zwischen der Aggregatstabilität und der **Verschlämmung**. Erst mit dem Aggregatzerfall und der Ablösung einzelner Bodenpartikel kann eine Verschlämmschicht entstehen, welche durch die Verstopfung der Bodenporen eine Herabsetzung der Infiltrationsrate bewirken kann.

Die Scherfestigkeit ist ein Mass der Bindigkeit eines Bodens und des Widerstandes, den er Scherkräften wie Druck, Belastung und fluide Bewegung entgegensetzen kann. Es wird deshalb auch oft der Begriff **Scherwiderstand** benutzt. Der Scherwiderstand ist abhängig vom Wassergehalt des Bodens, d.h. je höher umso plastischer verhält sich der Boden.

Die **Infiltrationskapazität** - also die maximale Rate, mit der ein Boden Wasser absorbiert - ist abhängig von Porengrösse und -stabilität. Böden mit stabilen Aggregaten und Tonminerale, die nicht quellen, können ihre Porenräume länger stabil halten. Ausserdem wirkt, wie bereits oben erwähnt, eine Verschlämmschicht infiltrations-hemmend.

Die **organischen und anorganischen Bodenbestandteile** wie auch das Bodenwasser sind

vor allem auf Grund ihrer Wirkung als aggregatstabilisierende Faktoren für die Erodierbarkeit von Bedeutung. Einen guten Überblick über die einzelnen Wirkungen gibt die Arbeit von GERLINGER (1997, 19ff).

Erosion findet während eines Niederschlagsereignisses grundsätzlich **in drei Phasen** statt: Nach der Ablösung von Bodenpartikeln durch Regentropfen (Splasherosion) oder fließendes Wasser erfolgt bei ungenügender Infiltration oder bei Wassersättigung des Bodens der Transport dieser Partikel in flächenhafter (Flächen- oder Interrillenerosion resp. *wash*) oder kanalisierter Form (Rillenerosion) und schliesslich die Ablagerung des Materials im Akkumulationsbereich. Die Erodierbarkeit hat auf die beiden ersten Phasen des Erosionsprozesses Einfluss: Eine hohe Aggregatstabilität oder ein hoher Scherwiderstand können dem Ablösungsprozess entgegenwirken und ausserdem die Verschlämmung verlangsamen oder verhindern, was wiederum die Infiltrationskapazität hoch hält. Eine hohe Aggregatstabilität bewirkt ausserdem eine rauhere Bodenoberfläche und verlangsamt über eine hohe Mulden-speicherkapazität die Bildung von Oberflächenabfluss.

Eine spezielle Rolle spielt dabei die **Verschlämmung**: Einerseits reduziert sie die Infiltrationskapazität des Bodens und fördert damit den Oberflächenabfluss, andererseits kann sie aber die Scherfestigkeit erhöhen und damit rückkoppelnd die Splashwirkung hinuntersetzen.

## 1.4 Erodierbarkeit im Feld und im Modell

Verschiedenste Untersuchungen haben es bereits gezeigt: Die Bodenerodierbarkeit ist eine stark variable Grösse (z.B. BAJRACHARYA & LAL 1992, YOUNG ET AL. 1990, ALBERTS ET AL., RÖMKENS 1985). Sie variiert während eines **Niederschlagsereignisses** aufgrund der Veränderungen der Bodenoberfläche.

Die Erodierbarkeit variiert aber auch innerhalb einer **Vegetationsperiode**. Durch Bearbeitung wird die Bodenoberfläche verändert und Austrocknungs-Zyklen können die Aggregatstabilität erhöhen. Nach wiederholten Niederschlägen bildet sich eine Verschlämmschicht aus, welche die Infiltration herabsetzt. Im trockenen Zustand bewirkt die Verschlämmung eine Reduktion des Anfangswiderstandes des Bodens gegen Niederschlag (SCHAUB 1989) und andererseits bei Luftsprengung der Kruste eine Erhöhung der Infiltration aber auch eine Erhöhung der Sedimentkonzentration im Oberflächenabfluss, (AUERSWALD 1993). Gemäss Lehrbuchmeinung ist die Wirkung der mikrobiellen Aktivität auf die Aggregatstabilität im Mai, Juni und Juli am niedrigsten, im August und September am höchsten (MORGAN 1999).

Letztlich variiert die Erodierbarkeit auch im Verlaufe eines Jahres mit dem Wechsel der Jahreszeiten. Manche Untersuchungen fanden eine aufgrund der durch Gefrieren und Auftauen herabgesetzten Kohäsion eine erhöhte Erodierbarkeit der Böden (z.B. COOTE ET AL. 1988 resp. YOUNG ET AL. 1990). Aufgrund der eingeschränkten mikrobiellen Aktivität während des Winters wird für Januar und Februar oft ein Minimum und für August ein Maximum der Aggregatstabilität angenommen mit entsprechender Konsequenz für die Erodierbarkeit.

Für die Messung der Erodierbarkeit gibt es noch keine standardisierten Verfahren. Da die Erodierbarkeit die Summe verschiedener Bodenfaktoren ist, kann ihre Messung über die Bestimmung dieser einzelnen Faktoren erfolgen. Dies ist beispielsweise beim Erodierbarkeitsfaktors (K-Faktor) der USLE der Fall, der aus den vier Bodeneigenschaften Bodenart, organische Substanz, Aggregatklasse und Durchlässigkeitsklasse berechnet wird. (WISHMEIER & SMITH 1978). Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Erodierbarkeit als langfristig konstanter Wert dargestellt wird, was den realen Verhältnissen aber widerspricht. Unter diesem Gesichtspunkt scheint die Bestimmung der Erodierbarkeit über eine dynamische Größe, wie sie z.B. die Aggregatstabilität darstellt, bedeutend wirklichkeitsnäher. Allerdings besteht auch bei diesem Ansatz kein standardisiertes Vorgehen. Einige Verfahren testen die Aggregatstabilität eher auf ihr Verhalten während einer Beregnung (z.B. Beregnung nach PRASUHN 1989), andere untersuchen die Verschlammungsanfälligkeit (z.B. Nasssiebung nach HARTGE & HORN 1991; Perkulationsverfahren nach SEKERA & BRUNNER 1943). In verschiedenen Untersuchungen werden also verschiedene Methoden verwendet, was eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert bis verunmöglicht.

Die Heterogenität bei der Messung der Erodierbarkeit zeigt sich auch in der unterschiedlichen Anlage von Erodierbarkeitsgrößen in Modellen. In der Erosionsforschung haben sich grundsätzlich zwei Typen von Modellen etabliert:

**Empirische Modelle:** Sie stellen aufgrund von Beobachtungen statistische Beziehungen zwischen Variablen dar (z.B. Universal Soil Loss Equation (USLE), WISCHMEIER & SMITH 1965 oder die Revised USLE (RUSLE), Renard & Ferreira 1993). Wie im vollständigen Erosionsmodell wird auch die durch die statistische Analyse einer riesigen Datengrundlage errechnet. Während in der USLE die Erodierbarkeit übers Jahr als Konstante angesehen wird, verändert sie sich in der RUSLE alle 14 Tage in Abhängigkeit klimatischer Faktoren und stellt damit das tatsächliche Geschehen besser dar. Als problematischster Aspekt bei dieser Form von Modellen muss die Übertragbarkeit auf Gebiete, die stark von denjenigen abweichen, in denen die Daten für die statistische Analyse erhoben wurden und die Unmöglichkeit von Voraussagen für Einzelereignisse angesehen werden.

**Prozessorientierte Modelle:** Sie stützen ihre Berechnungen auf physikalische Grundlagen und stellen die entsprechenden Prozesse durch Differentialgleichungen dar (z.B. Water Erosion Prediction Project (WEPP), NEARING ET AL. 1989 ; European Soil Erosion Model (EUROSEM), MORGAN ET AL. 1994; Erosion-2D (E2D), SCHMIDT 1991). Bei dieser Art von Modell wird auch die Erodierbarkeit durch physikalisch fundierte Gleichungen ausgedrückt. Trotzdem müssen bei der Anwendung der Modelle oft empirische Untersuchungen beigezogen werden, da der komplexe Wirkungszusammenhang auch durch mathematische Gleichungen nur ungenügend beschrieben werden kann oder die Komplexität dieser Gleichungen eine kaum mehr zu bewältigende Faktorenbestimmung nach sich zöge.

Eine Übersicht zu den Erosionsmodellen liefert GERLINGER (1997). Diskussionen zu ihrer Anwendung geben z.B. BORK & SCHRÖDER (1996), DE ROO (1993), SCHAUB & PRASUHN (1991).

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Empirische Modelle eignen sich gut, um langfristig gültige Schätzungen der Erosionsgefährdung zu machen. Der Aufwand zur Datenbeschaffung ist eher gering, weshalb sie auch auf grosse Gebiete angewandt werden können. Sie können aber keine Aussage zu Einzelereignissen machen. Prozessorientierte Modelle hingegen können zwar Aussagen zu Einzelereignissen machen, der Aufwand zur Datenbeschaffung und für die Berechnungen ist aber so hoch, dass sie meist nicht für grössere Gebiete angewandt werden können. Es fehlen also Methoden, welche eine einfache aber realistische Bestimmung von stark variablen Parametern, wie z. B. der Erodierbarkeit, ermöglichen.

## 1.5 Ausgangslage und Ziele dieser Arbeit

In der angewandten Erosionsforschung geht es immer wieder darum, die Erosionsanfälligkeit eines bestimmten Standortes oder eines bestimmten Bodens voraussagen zu können. Das ermöglicht präventiv - durch entsprechende Bewirtschaftung oder gezielte Schutzmassnahmen - die oft über lange Zeiträume schleichend vor sich gehenden Bodenverluste zu verhindern oder mindestens auf ein tolerierbares Mass zu reduzieren. Dies kommt nicht nur dem Boden selbst, sondern auch den Gewässern und bei einer langfristigen, ökonomischen Betrachtung den Bewirtschafterinnen und Bewirtschaftern zugute.

Beim gesetzlich verankerten Bodenschutz laufen derzeit Diskussionen, welche Erosionsmodelle benutzt werden können, um für Einzelschläge die Erosionsanfälligkeit abschätzen und daraus adäquate Bewirtschaftungen ableiten zu können. Aber auch um Grenzwerte für die Bodenverluste festzulegen, ab welchen konkrete Schutzmassnahmen eingeleitet werden müssen (CHAROLLAIS & SCHAUB 1999) und um kritische Gebiete zu identifizieren, welche einer Überwachung bedürfen. Solche grossflächigen Erhebungen basieren oft auf empirischen Modellen mit räumlich und zeitlich generalisierten Ableitungen von Erosivitäts-Indices und Grössen wie Hangneigung, Bodenart oder Bewirtschaftung. Das Endprodukt ist häufig eine Karte der landwirtschaftlichen Nutzungseignung. So sind die in der Schweiz verwendeten Berechnungsgrundlagen für das Erosionsrisiko meist von der USLE (WISCHMEIER & SMITH 1965) abgeleitet, welche den mittleren jährlichen Abtrag eines Standortes berechnet.

Erosion ist ein Prozess, der für einen mittelfristigen Betrachtungsmassstab mit den oben erwähnten Methoden genügend gut erfasst werden kann. Für die Planung von Schutzmassnahmen im Jahresverlauf und für die Wahl eines adäquaten Bewirtschaftungsverfahrens sind aber Methoden oder Modelle notwendig, welche eine zeitlich und räumlich detailliertere Betrachtung ermöglichen. Wie verschiedenste Untersuchungen im Feld ergeben haben (CHISCI & MORGAN 1988; PRASUHN 1991) finden nämlich unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen die grössten Erosionsschäden bei einzelnen Starkniederschlagsereignissen statt, die im Durchschnitt zwei- bis dreimal pro Jahr auftreten. Wirksamer Erosionsschutz sollte sich also auf Untersuchungen von Einzelereignissen, mindestens jedoch von saisonalen Differenzen stützen können.

Eine Differenzierung in der Aussage bedeutet aber immer auch einen grösseren Aufwand bei der Datenerhebung und verlangt die Anwendung komplexerer Erosionsmodelle mit entsprechend grösserem Berechnungsaufwand. Das widerspricht wiederum der zeitlichen, ökonomischen und planerischen Realität, wo möglichst simple, einfach und rasch anzuwendende Methoden gefragt sind, welche aber möglichst differenzierte Aussagen ermöglichen. Aus diesem Bedürfnis nach einer einfachen Methode zur Bestimmung der Variabilität der Erosionsanfälligkeit im Feld ist die vorliegende Arbeit entstanden. Bei einer detaillierten Betrachtung der Erosionsanfälligkeit im Hinblick auf adäquate Bewirtschaftung oder Schutzmassnahmen ist die Erodierbarkeit von besonderer Bedeutung, da sie der Faktor ist, der nebst der Vegetationsbedeckung positiv beeinflussbar ist. Der Zusammenhang mit dem oberflächlichen Mikrorelief wurde bereits im Kapitel 1.3 aufgezeigt. Da der Zustand des Mikrorelief im Erosionsprozess eine zentrale Rolle spielt, konzentriert sich die Messung der Erodierbarkeit auf diesen Parameter.

Zusammenfassend gesagt, ist das Ziel meiner Forschungsarbeit die Entwicklung einer einfachen Methode, welche aufgrund von Oberflächenmerkmalen die momentane Erodierbarkeit bestimmen kann und dadurch eine Prognose des potentiellen Erosionsgeschehens ermöglicht.

**Die Zielsetzungen im Detail sind:**

- (1) Das Entwickeln einer Methode, welche
  - im Feld verwendbar ist
  - einfach und detailliert genug ist, um zeitlich und räumlich hochaufgelöste Aussagen machen zu können
- (2) Das Testen dieser Methode unter verschiedenen Rahmenbedingungen und an verschiedenen Standorten:
  - auf Erosionstestparzellen, welche unter standardisierten Bedingungen quantifizierbare Aussagen zum Erosionsgeschehen ermöglichen
  - auf landwirtschaftlich genutzten Standorten, welche reale Feldbedingungen aufweisen
- (3) Aussagen über die räumliche Variabilität der Erodierbarkeit zu machen:
  - aufgrund des Bodentyps respektive der Bodenart
  - aufgrund der Lage im Hang
- (4) Aussagen über die zeitliche Variabilität der Erodierbarkeit zu machen:
  - im Jahresverlauf
  - im Verlauf des saisonalen Erosionsgeschehens
- (5) Das Validieren der Methode:
  - durch den Vergleich mit Grössen, welche als Erodierbarkeitsparameter gelten: Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit



- durch den Vergleich mit anderen Erodierbarkeits-Indices

(6) Das Aufzeigen der Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der Methode:

- durch die Untersuchung eines Zusammenhanges mit den effektiven Abfluss-, Abtrags- und Splashereignissen
- durch die Differenzierung der Methode für verschiedene Bodenarten und verschiedene Standorte
- durch die Einordnung in die landschaftsökologische Forschung

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsraum

Die untersuchten Standorte liegen alle in der Nordwestschweiz, im Umkreis von rund 30 km um Basel (Abb. Lage). Die Erosions-Testparzellen T1 und T50 liegen im Hochrheintal resp. im Tafeljura. Die landwirtschaftlich genutzten Parzellen (im weiteren LW-Parzellen oder Landwirtschaftsparzellen genannt) befinden sich ebenfalls im Tafeljura (Diegten) und an dessen Abhängen (Münchenstein) sowie im Sundgauer Hügelland (Therwil, Basel).

Nach Mosimann (1985) ist die Region Basel durch die Lage im Übergangsbereich der drei tektonischen Haupteinheiten Schwarzwald, Rheintalgraben und Jura mit einer grossen naturräumlichen Vielfalt gekennzeichnet. (Abb. 2).

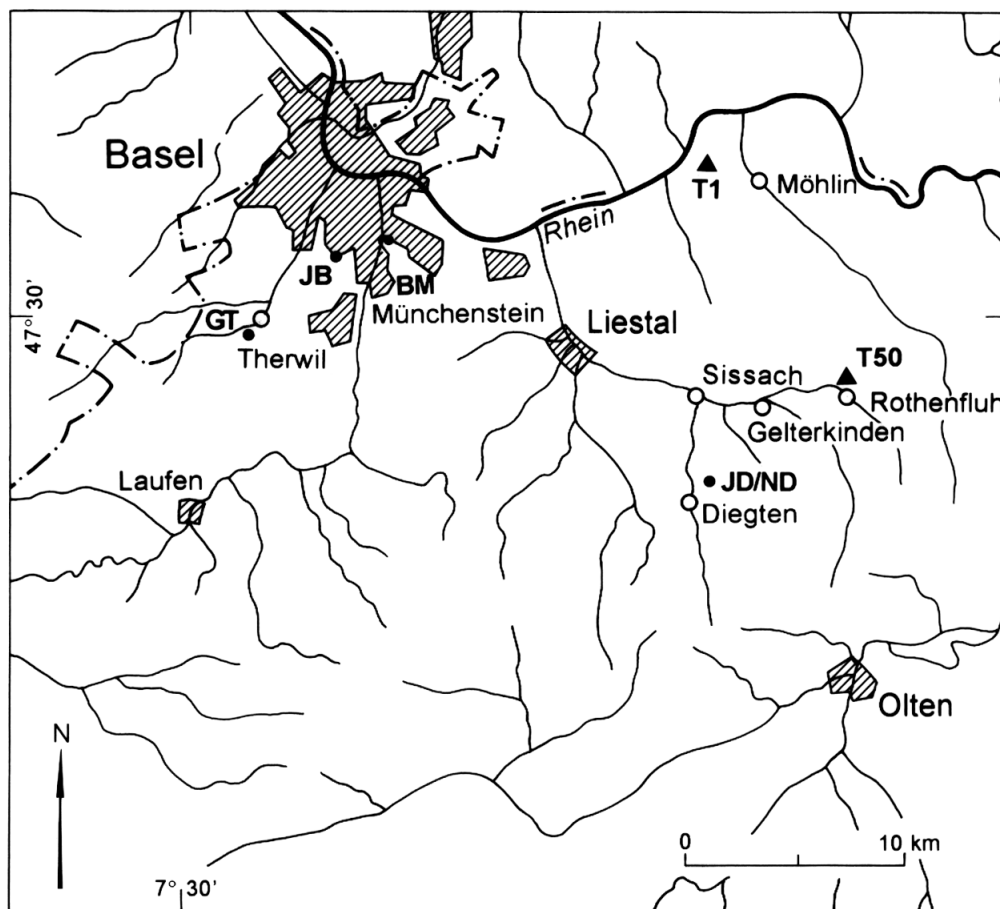
Im Schwarzwald dominieren kristalline Gesteine. Im Hochrheintal wurden im Verlauf der Grabenabsenkung tertiäre Sedimente abgelagert, welche vor allem aus Tonen, Tonmergeln und sandigen Mergeln bestehen. Sie wurden grossflächig von mächtigen quartären Ablagerungen (Schotter und Löss) überdeckt. Der Löss wurde während der Eiszeiten aus den unbewachsenen Alluvialebenen des Rheintalbodens ausgeweht. Er wurde im Hügelland der Grabenränder flächendeckend und in geringerem Umfang auch im Tafel- und Faltenjura abgelagert. Tafel- und Faltenjura sind aus einer mesozoischen Gesteinsserie aufgebaut, deren stratigraphische Abfolge aus harten Kalken, Mergeln und Tonmergeln die Herausbildung der Oberflächenformen wesentlich vorgegeben hat.

Aber auch periglaziale Prozesse wie Frostverwitterung und Solifluktion haben im Jura und im Hügelland des Oberrheingrabens form- und substratbildend gewirkt. Während sich im Jura auf grossen Flächen mächtige Gehängeschuttdecken periglazialen Ursprungs finden, entstanden im Sundgauer Hügelland durch periglaziale Formung Dellen (flache, wenig tiefe Hangmulden) und asymmetrische Muldentäler. Auch die Umlagerung des Löss und den in diesem Zusammenhang entstehenden Verwitterungslehmdecken haben bereits unter periglazialen Bedingungen stattgefunden.

Aus der vielfältigen Gesteins- und Substratsituation (Deckschichten) sowie den teilweise beachtlichen Höhererestreckungen ergibt sich eine grosse Klima-, Vegetations- und Nutzungsvariation. Ausgehend von der "Trockeninsel" der Oberrheinischen Tiefebene mit Jahresniederschlägen unter 550 mm steigen die Niederschläge nach Süden hin an und erreichen unmittelbar nördlich von Basel 700 mm. Durch orographisch bedingte Staueffekte nimmt die jährliche Niederschlagsmenge dann nach W, S und E rasch zu und erreicht im Tafeljura

bis 1100 mm. Die tieferen Lagen der Region Basel gehören mit Jahresmitteln der Temperatur von 9.5 °C zu den wärmsten Gebieten der Schweiz nördlich der Alpen. Die Jahresmitteltemperaturen nehmen aber mit zunehmender Höhenlage ab und liegen im Jura bereits bei rund 8 °C. Das Rheintal ist bei Ausstrahlungswetter eine riesige Kaltluftmulde.

Das Bodennutzungssystem in der Region Basel kann als Futterbau-Getreidebau-Wirtschaft bezeichnet werden. Während sich im Jura die landwirtschaftliche Nutzfläche etwa zu gleichen Teilen in Fruchtfolgeflächen und Dauergrünland aufteilt, nimmt in den flacheren Talgebieten der Anteil der Fruchtfolgeflächen deutlich zu. Nähere Angaben zu den untersuchten Standorten finden sich in den Kapiteln (Erosionstestparzellen/ LW-Parzellen 3.1 & 3.2).



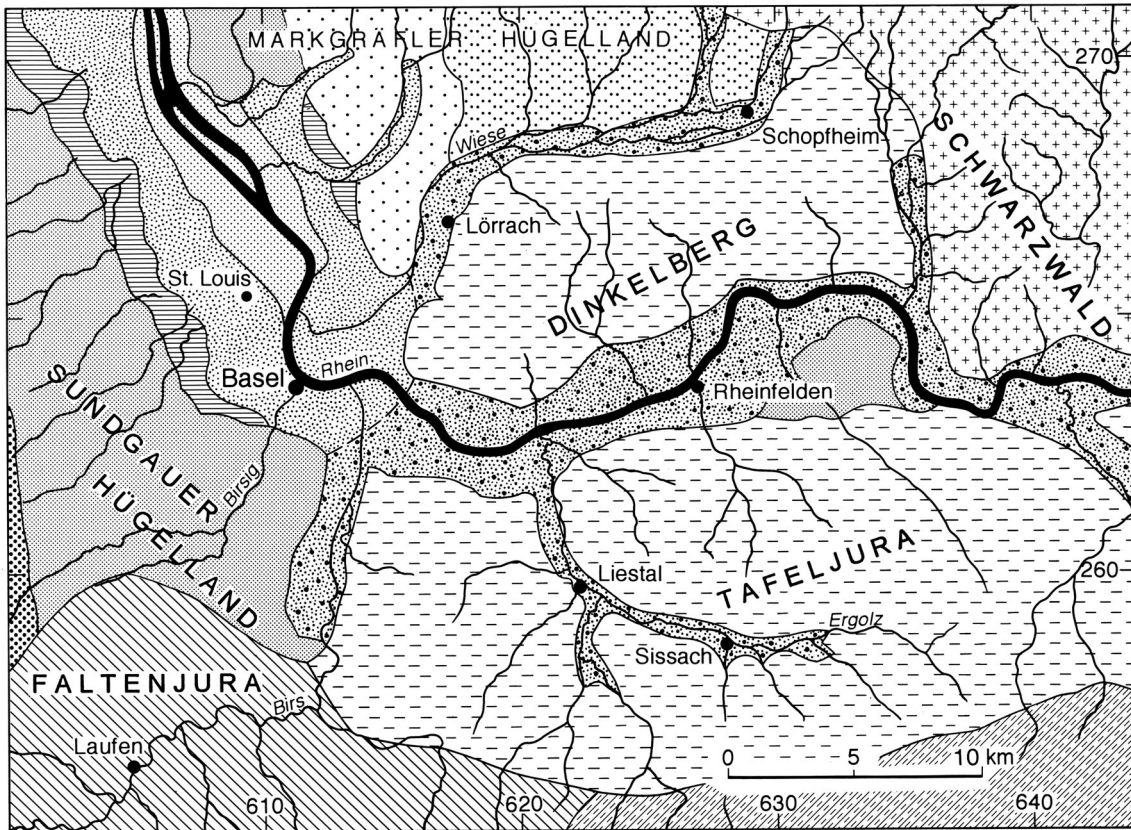
**Legende:**

- ▲ Langjährige Erosionstestparzellen
- Landwirtschafts-Parzellen

*Abb. 1: Lage der untersuchten Standorte in der Region Basel.*

*T1 „Hochrhein“, T50 „Tafeljura“ = langjährige Erosions-Testparzellen*

*GT = Landwirtschaftsparzelle Therwil, BM = Landwirtschaftsparzelle Münchenstein, JB = Landwirtschaftsparzelle Basel, JD/ND = Landwirtschaftsparzelle Diegten. Ausführlichere Daten im Anhang A3 - A6.*



Naturraumtyp	Relieftyp	Substrattyp	Böden	Wärmestufe	Niederschlag (mm)
rezente Rheinaue	z.T. wellige Auenflächen	sandige Schotter (kalkig-kristallin-gemischt und rein kalkig)	braune Auenböden, Regosole, vereinzelt Gleye	warm	700 - 750
Niederterrassenflächen des Oberrheingrabens	Schotterfelder mit Rinnen, Kanten und Wellen	Sande und Lehme	Braunerden, Regosole, ferralitisierete Braunerden	warm	700 - 800
Schotterflächen des Hochrheintals und der Seitentäler			Pararendzinen, Braunerde-Rendzinen	ziemlich warm bis warm	800 - 1000
Hohe Niederterrassenflächen am Talrand	flache Hügel mit Muldentallrelief	Schwemmlöss und Schwemmlöss über Schotter	Braunerden	warm	700 - 800
Niedriges Hügelland		Löss und Schwemmlöss	Parabraunerden, Pararendzinen, Kolluvia	ziemlich warm bis warm	750 - 800
Niedriges Hügelland (niederschlagsreichere Variante)	Platten und Hügel mit Muldentallrelief	sandige Mergel, Lehm, Löss	Parabraunerden, (z.T. stauvergleyt, Pararendzinen, Mergelrendzinen)	sehr mild bis ziemlich warm	800 - 900
Hohes Hügelland					800 - 900
Tafelhügel- und -bergland	wellige Karsthochflächen mit Mulden und Sohlentälern	Kalk- u. Mergelverwitterungsdecken, vereinzelt Löss und Schwemmlöss	Rendzinen, Braunerde-Rendzinen, Braunerden,	ziemlich kühl bis ziemlich mild	900 - 1000
Kettenjura	Faltzüge und Muldentäler	Kalk-, Mergel- und Tonverwitterungsdecken	Parabraunerden, Staugleye, Pelosole	ziemlich mild bis kühl	950 - 1100
hoher Kettenjura				kühl bis rau	1100
Buntsandstein-Tafelbergland	Tafelbergrelief mit Sohlen- und Kerbtälern	Sandsteine und Mergel, Tertiär-schotter	basenarme Braunerden, podsolige Braunerden, Staugleye	ziemlich kühl	900 - 1100
hohes Kuppenbergland (Schwarzwald)	kerbtal-zerschnittene Kuppen und Flachrücken	Gneis- und Granit-schutte, Sandsteine	Braunerden, podsolige Braunerden, Podsole	sehr kühl bis sehr rau	1200 - 1800

Naturraumtypen der Region Basel (nach H. LESER 1982)

Abb. 2: Naturraumtypen der Region Basel (aus DRÄYER 1996, nach LESER 1982 und MOSIMANN 1985).

Weiterführende Literatur:

**zu den Gebieten der Erosionstestparzellen**

T50: DRÄYER (1996), PRASUHN (1991), VAURUCH (1988) und weitere Arbeiten aus dem Schriftenverzeichnis der FBB (2003)

T1: UNTERSEHER (1997), SCHAUB (1989), SCHMIDT (1979) und weitere Arbeiten aus dem Schriftenverzeichnis der FBB (1998)

**zur Region Basel**

Naturraum: BUD (1989), MOSIMANN (1985), LESER (1982), MOSIMANN (1980)

Geologie: GÜRLER ET AL. (1987), FISCHER ET AL. (1971)

Böden: Bodenkarten der Gemeinden des Kantons Basel-Landschaft (1996), MOSIMANN & SEILER (1982)

Klima: MANGOLD (1997), MOSER (1984), SCHÜEPP (1982)

Vegetation: MOOR (1962)

Landwirtschaftliche Nutzung: GALLUSSER & DANIELLI (1982)

## 2.2 Methodisches Konzept

Gemäss der Komplexität des Prozesses Bodenerosion wird bei der Forschung der FBB generell auf einen holistischen (ganzheitlichen) Ansatz zurückgegriffen. Dieser beruht auf den Grundprinzipien der Landschaftsökologie und hat ein entsprechendes methodisches Instrumentarium (LESER 1986). Der Prozess Bodenerosion wird dabei in verschiedenen räumlichen Dimensionen erfasst (mehrstufige Messmethodik, entwickelt von SCHMIDT 1979; dargestellt z.B. in SCHAUB 1999). Dabei werden einerseits einzelne Komplexgrössen des Standort-Regelkreises, welcher das Prozessgefüge der Bodenerosion in den landschaftsökologisch homogenen Raumeinheiten (Topen) repräsentiert, auf grössere Dimensionen zu extrapolieren versucht. Andererseits wird aber auch der die Top-Grenze überschreitende Charakter des Transportprozesses Bodenerosion ausgenutzt, um aufgrund punktueller Messungen (z.B. Stoffausträge im Vorfluter) Aussagen in der chorischen Dimension (Stoffaustrag aus einem Einzugsgebiet) machen zu können.

Entsprechend dem Ziel "Entwicklung einer einfach und mit geringem Aufwand anzuwendenden Methode zur Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit", fanden die Messungen in der topischen bis subtopischen Dimension auf verschiedenen Testparzellen statt. Für die Bestimmung der Erodierbarkeit gibt es bis jetzt keine Standardmethode (MORGAN 1999). Das Erfassen von Parametern, die oft als Schätzgrössen für die Erodierbarkeit genannt werden (LE BISSONNAIS 1989, BRYAN ET AL. 1993), sollte deshalb als Vergleichsgrösse zu der neuen Methode dienen. Diese Parameter sind die Aggregatstabilität und der oberflächliche Scherwiderstand. Als weitere Hilfsgrösse wurde auf den Erosionstestparzellen zudem die Oberflächenrauigkeit bestimmt.

Die Feldmessungen und die Probenahme für die Labortests fanden einerseits auf den langjährigen Erosionstestparzellen in den Gebieten "Hochrhein" (T1) und "Tafeljura" (T50) und andererseits auf kurzfristig ausgeschiedenen Testparzellen auf landwirtschaftlich genutzten

Flächen - den Landwirtschaftsparzellen GT, BM, JB, JD/ND - statt (vgl. auch Kap. 2.3). Die Untersuchung auf diesen beiden Typen von Testparzellen schien sinnvoll, da beide gewisse Vor- und Nachteile aufweisen:

Tab. 1:

Vor- und Nachteile der Erosions- und Landwirtschafts-Testparzellen

	Erosionstestparzellen	Landwirtschaftsparzellen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durch Abgrenzung, Flächenbezug möglich</li> <li>• Bedingungen auf der Parzelle einigermassen homogen</li> <li>• durch Schwarzbrache: Bodenmerkmale besser evaluierbar (restliche Randbedingungen* sind bekannt und konstant)</li> <li>• hochaufgelöste Daten zu Niederschlagsintensitäten</li> <li>• Vergleichbarkeit zu anderen Testparzellen gewährleistet</li> <li>• Eigenregie bei Bearbeitung</li> <li>• Flurschäden egal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• realistisches Szenario</li> <li>• mehr Möglichkeiten für Feldexperimente und Probenahme, ohne die eigentliche Testfläche zu stören</li> <li>• Aufwand zum Einrichten gering -&gt; flexibel</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durch Schwarzbrache: unrealistisches Szenario</li> <li>• Veränderung der Bedingungen durch Bodenprobenahme -&gt; Testfläche sollte möglichst nicht gestört werden</li> <li>• Aufwand zum Einrichten sehr hoch -&gt; unflexibel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wegen fehlender Abgrenzung kein Flächenbezug möglich</li> <li>• Bedingungen auf der Parzelle oft inhomogen (durch Vegetation &amp; Bearbeitung)</li> <li>• Randbedingungen* können Bodenmerkmale überdecken</li> <li>• Niederschlagsdaten von naheliegenden Meteo-Stationen (Tageswerte, keine Intensitäten)</li> <li>• Bearbeitung durch Landwirte nur schwierig zu koordinieren</li> <li>• Vergleichbarkeit durch wechselnde Rahmenbedingungen schwierig</li> <li>• Flurschäden mussten möglichst vermieden werden</li> </ul>

\* aktuelle Nutzung, Bearbeitung

## 2.2.1 Bearbeitung, Ausstattung und Probenahmedesign auf den Testparzellen

Auf den verschiedenen Parzellen wurde entsprechend ihren Vor- und Nachteilen während rund zwei resp. drei Jahren verschiedene Messungen durchgeführt (Tab. Was/Wann). Bei den **Erosionstestparzellen** standen für die T50 auch modellierte Daten zur Verfügung, weshalb sich auch die Feldmessungen hauptsächlich auf diesen Standort ausrichteten. Die Erosionstestparzellen dienten dazu, vielfältige Messungen unter standardisierten Bedingungen durchzuführen und es standen ausführliche Daten zu Niederschlagsintensitäten zur Verfügung. Die **Landwirtschaftsparzellen** stellen hingegen ein realistisches Szenario dar, welches einen späteren Gebrauch in der Praxis gewährleistet. Hier wurde auf eigene Messeinrichtungen für den Niederschlag verzichtet und auf vorhandene Daten der Klimastationen der SMA zurückgegriffen. Dies ermöglicht das Überprüfen der Anwendbarkeit der Methode mit einer Datengrundlage, die in der Praxis leicht zu beschaffen ist. Aufgrund des geringeren Aufwandes bei der Messstellen-Errichtung und -Betreibung konnten ausserdem eine grössere Anzahl von Parzellen und damit von Bodenformen resp. -arten in regelmässigen, kurzen Abständen untersucht werden.

Als schwierig zu interpretieren erwies sich das unterschiedliche Vorgehen der Bauern, welche die Messeinrichtungen beim Bearbeiten zum Teil entfernten, zum Teil stehen liessen und darum herum fuhren. Ausführlichere Angaben zu den Parzellenstandorten finden sich in Kap. 2.3. und im Anhang (A3-A6). Eine detaillierte Beschreibung der Bearbeitung ist ebenfalls im Anhang zu finden (A9).

Tab. 2: Das Was - Wann - Wo der Parzellenmessungen

		94	1995												1996												1997											
		N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J J A S O N D																				
chem.-physikal. Bodenanalyse	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
pH-Wert	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Wassergehalt	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Aggregatstabilität	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Schenwiderstand	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Oberflächenrauigkeit	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Photos	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Splash	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Abfluss und Abtrag	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					
Niederschlagsmenge und -erosivität	T1																																					
	T50																																					
	LW																																					

LW: Gebiete GT, BM, JB und JD/ND zusammengefaßt

Messzeitraum  
 Standort 1 WW 1995/96  
 Standort 2 Mai 1996  
 Standort 2 WW 1996/97

### **Ableserhythmus**

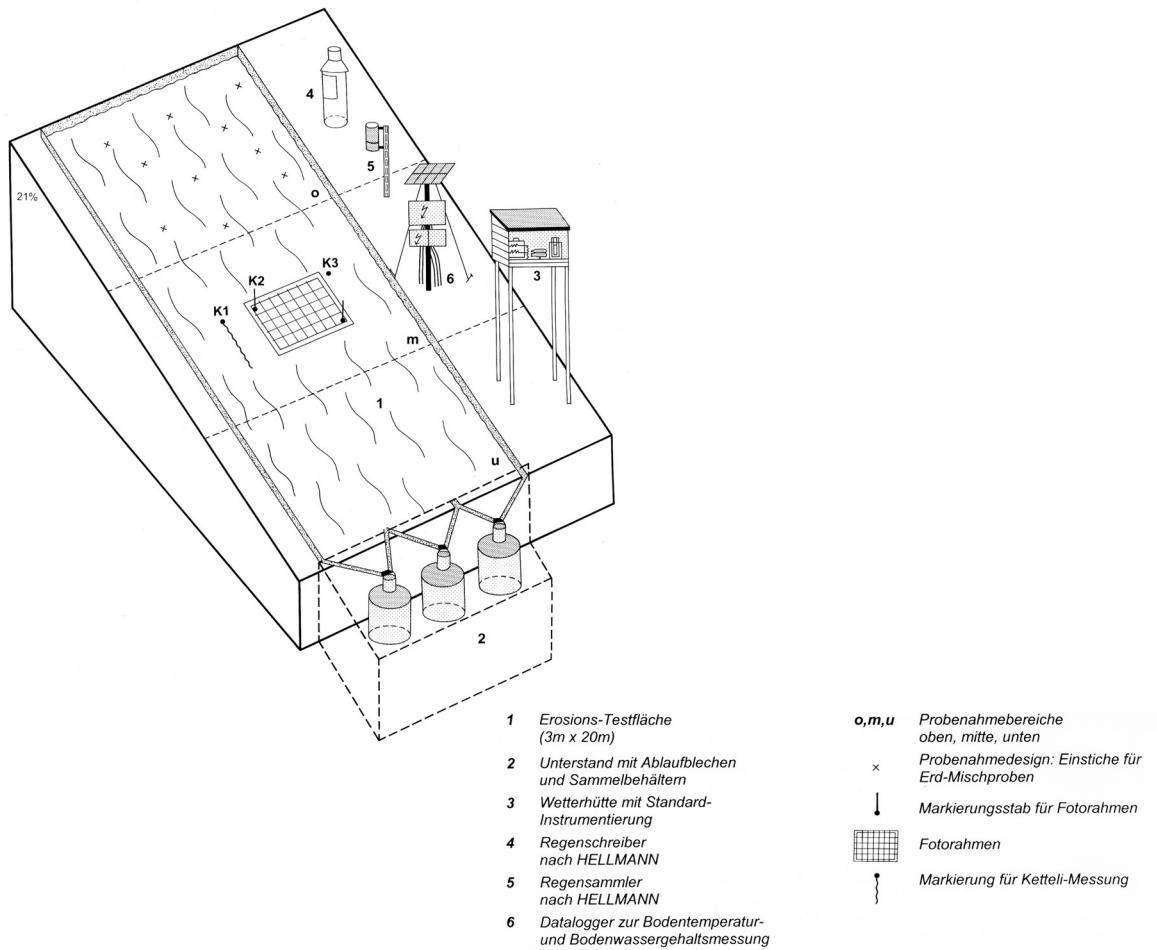
Bei den **Erosionstestparzellen** fanden die Ablesungen (Abfluss, Abtrag, Niederschlagsmenge- und Intensität) wöchentlich und zusätzlich nach grösseren Niederschlagsereignissen statt. Die Bodenprobenahme für die Wassergehalts-, pH- und Aggregatstabilitätsuntersuchungen im Labor sowie die Bestimmung von Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und Oberflächenzustand (Foto- und BERGSMA-Methode) erfolgte in einem zwei- bis dreiwöchigen Rhythmus und nach intensiven Niederschlägen. Im Winterhalbjahr wurden nur die Ablesungen durchgeführt, da in dieser Zeit auf den Testparzellen kaum Erosion stattfindet (PRASUHN 1991). Das Bearbeitungsmanagement auf den Testparzellen erfolgte jeweils im Frühling und Herbst entsprechend der Saatbettbereitung und Ernte auf den umliegenden Maisfeldern. Es wurde - in möglichst trockenem Zustand - zuerst umgespatet und dann grob gereicht. Zwischen diesen beiden Bearbeitungszeitpunkten wurden die Testparzellen nicht gestört, die Unkrautentfernung erfolgte in regelmässigen Abständen von Hand.

Da die **Landwirtschaftsparzellen** von den Bauern normal bearbeitet wurden, wurde sonst auf jegliche Bearbeitung verzichtet. Das Unkraut wurde manuell etwa in den gleichen Zustand gebracht, wie auf dem restlichen Schlag. Die Bestimmung des Oberflächenzustandes (Fotomethode), die Leerung von Feldkästen und Splashgeräten wurden in einem zwei- bis dreiwöchigen Rhythmus und nach intensiveren Niederschlägen durchgeführt. Die Bodenprobenahme für die Wassergehalts-, pH- und Aggregatstabilitätsuntersuchungen im Labor sowie die Bestimmung des Scherwiderstandes erfolgte meistens gleichzeitig. Im Winter war nicht immer eine Probenahme resp. Messungen möglich, weil die Bodenoberfläche mit Schnee bedeckt oder gefroren war. Die Niederschlagsmessungen (Tagesmengen) stammen von nahegelegenen Stationen der SMA (Abb. 26).

### **Ausstattung und Probenahmedesign**

Die instrumentelle Ausrüstung der **Erosionstestparzellen** wurde in den letzten Jahren entsprechend den wechselnden Forschungszielen im Vergleich zu ihrer ursprünglichen Ausstattung (vgl. PRASUHN 1991, 28) reduziert oder verändert und ist in Abb. 3 und 4 sichtbar. Die Probenahmen für die Laboruntersuchungen erfolgten immer in den Bereichen oben, mitte und unten, wobei jeweils 10 gleichmässig über die Fläche verteilte Einstiche in den Oberboden (0-10cm) eine Mischprobe ergab.





**Abb. 3: Erosionstestparzellen: Probenahmedesign**

Schematische Zeichnung der Testparzelle T50 mit entsprechenden Messgeräten. Die Bodenprobenahme fand jeweils in den Bereichen oben, mitte und unten statt, was Oberhang, Mittelhang und Unterhang entspricht



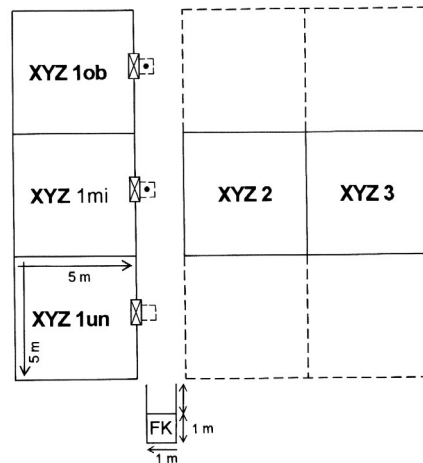
**Abb. 4: Aufnahme der geschlossenen Erosionstestparzellen:**

Die dreigeteilte T1 im Möhliner Feld (links) und die T50 im Länenbachtal (rechts):

T1: Aufnahme vom Oberhang abwärts, Blickrichtung Nord, 21.07.1995

T50: Aufnahme vom Hangfuss aufwärts, Blickrichtung Osten, 21.07.1995

Die Ausstattung der **Landwirtschaftsparzellen** wurde sehr einfach gehalten und besteht aus einem Feldkasten, drei Splashgeräten und den Markierungen für die Fotoaufnahmen (Abb. 3 und 4). Auch hier erfolgte die Bodenprobenahme mit demselben Vorgehen in den Bereichen oben, mitte, unten und für die Bestimmung der chemischen Kennwerte zusätzlich in den Bereichen 2 und 3.



Legende:

XYZ	Parzellenidentifikation	X ... Name des Betriebsleiters
		Y ... Gemeinde
		Z ... Frucht (Triticale, Winterweizen oder Mais)
	vertical Splashboard	
	Splashparzelle	
	← Seitenbegrenzung	
	Feldkasten	

**Abb. 5: Landwirtschaftsparzellen: Probenahmedesign**

Es wurden jeweils in drei Hangabschnitten Bodenproben entnommen, resp. Splashmessungen durchgeführt. Der Feldkasten wurde möglichst am Fuss eines gestreckten Hangabschnittes platziert



**Abb. 6: Aufnahme der offenen Landwirtschaftsparzelle in Diegten**  
Feldkasten am Hangfuss des Triticale-Ackers, Blickrichtung Osten, 01.11.1995

## 2.2.2 Feld- und Labormethoden

Die Feld- und Labormethoden mit entsprechenden Referenzen sind tabellarisch zusammengestellt.

Tab. 3: Feldmethoden zur Bestimmung der Erodierbarkeit

Messung	Methode
Aggregatstabilität [g H <sub>2</sub> O / 10 min]	im Perkolationsverfahren nach SIEGRIST 1995 resp. BECHER & KAINZ 1983 in Anlehnung AN SEKERA & BRUNNER 1943
Rauhigkeitsindex [ohne Masseinheit]	Oberflächenrauigkeit mit der Kettelimethode nach PRASUHN 1992; Rauhigkeitsindex = $(100 / 100 - \text{'Kettenverkürzung'})^{-1}$
Scherwiderstand [kg / m <sup>2</sup> ]	mit dem Pocket Vane Tester von Eijkelkamp mit dem Flügelrad CL-102 (0-2.5 kg/cm <sup>2</sup> )
Erodierbarkeit [ohne Masseinheit]	über den Mikroreliefzustand mit Fotomethode (Kap. 5) nach BERGSMÄ 1992

Tab. 4: Feldmethoden zur Bestimmung von Erosion und Erosivität

Messung	Methode
Abtrag und Abfluss auf den Erosionstestparzellen [tTS / ha] resp. [mm]	nach PRASUHN 1991
Abtrag und Abfluss mit Feldkästen [tTS / ha]	nach Seiler 1983 resp. RÜTTIMANN et al. 1995, ohne Überlaufbehälter
Splash [tTS / ha]	nach HERWEG 1988
Niederschlagsintens. [N/h]	mit Hellmann Niederschlagsschreiber, nach PRASUHN 1991; detailliertere Angaben dazu im Kap. 3.1.1.2

Die Bodenproben resp. das Material aus den Splashgeräten, Feldkästen (Landwirtschafts-parzellen) und Fässern (Erosionstestparzellen) wurde jeweils ins Labor transportiert und folgendermassen weiterverarbeitet:

- Bodenproben: Auf Zeitungspapier ausgelegt, bei Raumtemperatur luftgetrocknet und sorgfältig in die gewünschten Aggregatgrössen-Fractionen gesiebt resp. für die chemischen Analysen gesiebt oder gemahlen.
- Material Splashgeräte: Gravimetrische Trocknung des in Plastikflaschen überführten Splashmaterials bei 105° C.
- Feldkästen: Die Wassermenge wurde im Feld bestimmt und das klare Wasser oben abgeschöpft. Das Bodenmaterial wurde gravimetrisch bei 105° C getrocknet.
- Fässer (210l Volumen):
  - (i) Abflussmengen < 30 l: Die gesamte Menge wird ins Labor transportiert.
  - (ii) Abflussmengen > 30l: Es erfolgt von Hand eine Probeteilung im Feld. Das klare, überstehende Wasser wird mit 10-Liter-Eimern oben abgeschöpft. Die letzten 20 l werden mit dem am Boden des Fasses sedimentierten Bodenmaterial ins Labor mitgenommen.
- Im Labor wird das Feuchtgewicht der Proben bestimmt, das Material mehrere Tage stehen gelassen, das klare Wasser abgegossen und die Masse des Bodenmaterials gravimetrisch nach 105° C Trocknung bestimmt.

Tab. 5: Labormethoden zur Untersuchung von Bodenproben

Die verwendeten Analysegeräte sind: Atomabsorptionsspektrometer (AAS) "Varian SpectraAA-800", Photometer "Perkin Elmer UV/VIS Spectrometer Lambda 2", pH-Meter "Metrohm 691", Gaselementaranalysator "Leco CHN-1000" und „CC-100“.

Analyse	Methode
Korngrößenanalyse [Massen-%]	Kombiniertes Sieb- und Sedimentationsverfahren nach KÖHN (in HARTGE & HORN 1992)
gravimetrischer Bodenwassergehalt [Massen-%]	Nach Trocknung bei 105 °C
pH-Wert	in H <sub>2</sub> O und 1n KCl, 15 g Boden auf 52.5 ml H <sub>2</sub> O resp. KCl, Messung mit pH-Meter (feldfrische Proben)
Kalk und Dolomit [Massen-%]	durch komplexometrische Titration nach Schwarzenbach (in Müller 1964)
C <sub>anorg</sub> [Massen-%]	Vorbehandlung der Probe im HCl-Bad des CC, Analyse des freigesetzten CO <sub>2</sub> durch die IR-Zellen des CHN
C <sub>tot</sub> , C <sub>org</sub> [Massen-%]	Verbrennung der Probe bei 1050° C, Messung mit IR- resp. TC-Zellen im CHN
N <sub>org</sub> [Massen-%]	Verbrennung der Probe bei 1050° C, Messung mit IR- resp. TC-Zellen im CHN
K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> [mg/kg]	Extraktion in CO <sub>2</sub> gesättigtem Wasser (1:10) nach DIRKS-SCHEFFER (in FAC 1989), Messung im AAS
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg/kg]	Extraktion in CO <sub>2</sub> gesättigtem Wasser (1:10) nach DIRKS-SCHEFFER (in FAC 1989), Messung fotometrisch nach Fällung im Molybdänkomplex bei 700 nm
KAK <sub>pot</sub> [mmolc/100g]	Eintausch von Ba <sup>2+</sup> im Perkolationsverfahren bei pH 8.3, Rücktausch mit Mg <sup>2+</sup> (nach SCHLICHTING ET AL. 1995) Bestimmung im AAS

### 2.2.3 Verschiedene Erodierbarkeits-Indices

In der Universal Soil Loss Equation (USLE, WISCHMEIER & SMITH 1965) gibt der Boden-erodierbarkeitsfaktor K (auch kurz K-Faktor genannt) über die Erosionsgefährdung des Bodens Auskunft. Er wird durch fünf Bodeneigenschaften beschrieben:

- Gehalt an der Korngröße 0.002-0.1mm (Schluff und Feinstsand)
- Gehalt an der Korngröße 0.1mm (Sand abzüglich Feinstsand)
- Gehalt an organischer Substanz
- Aggregatklasse
- Durchlässigkeitsklasse

Dass sich diese Bodeneigenschaften langfristig nur wenig ändern, zeigt, dass die Erodierbarkeit in der **USLE** als statische Größe betrachtet wird. Die Berechnung des K-Faktors wird in SCHWERTMANN ET. AL. (1990) detailliert beschrieben. Der K-Faktor in der USLE wurde als langfristig gültiges Mass für die durchschnittliche jährliche Erodierbarkeit empirisch festgelegt und sollte auch nur für langfristig gültige Aussagen verwendet werden.

Als Weiterentwicklung des statisch angelegten K-Faktors in der USLE gilt der K-Faktor in der Revised USLE (**RUSLE**, RENARD & FERREIRA 1993). Dieser verändert sich alle 2 Wochen in Ab-

hängigkeit der klimatischen Verhältnisse (Lufttemperatur). Dies ermöglicht es, die Erodierbarkeit beeinflussende Faktoren wie das Gefrieren des Bodens oder den Bodenwassergehalt in die Berechnungen miteinzubeziehen und ergibt damit einen saisonal variierenden K-Faktor. Weder bei der USLE noch bei der RUSLE ist ein direktes Messen der Erodierbarkeit im Felde notwendig, allerdings müssen verschiedene andere Bodeneigenschaften im Feld bestimmt werden.

Das von SCHMIDT (1996) auf Grundlage einfacher physikalischer Beziehungen entwickelte, prozessorientierte Modell EROSION 2D (**E 2D**) legt die Erodierbarkeit des Bodens im Erosionswiderstand fest. Dieser wird durch Anpassung an vorhandene Abtrags-Daten ermittelt, wenn alle anderen Modellparameter bekannt sind. Dieses Verfahren liefert zwangsläufig gute Ergebnisse, ist aber sehr aufwändig, weshalb Schmidt empfiehlt, den Scherwiderstand bei wassergesättigtem Boden als äquivalente Grösse zu messen. Zur Bestimmung der Erodierbarkeit müssen bei E 2D also Abtrags-Messungen im Feld durchgeführt werden. Ob der Scherwiderstand als Alternative dazu eine wirklich brauchbare Grösse ist, bleibt eine offene Frage.

Das ebenfalls prozessorientierte Modell **WEPP** (Water Erosion Prediction Project, NEARING ET AL. 1989) sollte eigentlich die USLE in der Bodenerosions-Vorhersage ablösen (FLANAGAN & NEARING 1995). Mit dem Modell können die zeitliche und räumliche Verteilung von Bodenabtrag und Akkumulation sowohl bei Einzelhängen wie auch in Kleineinzugsgebieten bestimmt werden. Das Modell arbeitet sowohl ereignisbezogen wie auch mit Tageswerten. Die Erodierbarkeit wird als Rillen- ( $K_r$ ) und Zwischenrillenerodierbarkeit ( $K_i$ ) erfasst. Die Rillenerodierbarkeit wird aufgrund des Gehaltes an Feinstsand resp. Ton und der organischen Substanz abgeschätzt. Die Zwischenrillenerodierbarkeit, welche hier vor allem von Interesse ist, wird durch verschiedene Faktoren, wie z.B. Wurzelgehalt, Pflanzenbedeckungsgrad, Krusten- und Verschlammungsgrad oder den Gefrier- Auftau-Faktor bestimmt und im Modell täglich angepasst. Da WEPP in erster Linie für die langfristige Simulation der Bodenerosion entwickelt wurde, wird das Verhalten zahlreicher, für die Erosion massgeblicher Grössen über einen längeren Zeitraum kontinuierlich simuliert. Damit steigt allerdings auch der Bedarf an Daten, die dem Modell zuerst eingegeben werden müssen.

#### **2.2.4 Theoretisches Konzept der Erodierbarkeit in der vorliegenden Arbeit**

Bei der vorliegenden Arbeit wurde nach einer einfachen Methode gesucht, welche die Bestimmung der Erodierbarkeit im Feld ermöglicht. Diese Methode (Fotomethode, Kap. 5) sollte es ermöglichen, aufgrund einfacher Oberflächenmerkmale die momentane Erodierbarkeit zu bestimmen. Die Resultate der Fotomethode wurden durch Korrelationen (Kap. 2.4, 3.3, 3.4, 4.2) mit ausgewiesenen Erodierbarkeitsgrössen wie Aggregatstabilität, Oberflächenrauigkeit und Scherwiderstand, aber auch mit den oben erwähnten Erodierbarkeits-Indices validiert.

Für den Erosionsprozess wurden grundsätzlich zwei Hypothesen aufgestellt und untersucht (Abb. 7):

- Die momentane Erodierbarkeit (oder Aggregatstabilität oder Scherwiderstand oder Oberflächenrauigkeit) wird beeinflusst durch das **vorherige** Niederschlagsgeschehen **und** das **vorherige** Abtrags- und Abflussgeschehen.
- Die momentane Erodierbarkeit (oder Aggregatstabilität oder Scherwiderstand oder Oberflächenrauigkeit) beeinflusst die Möglichkeit eines **nächsten** Abtrags- oder Abflussereignisses.

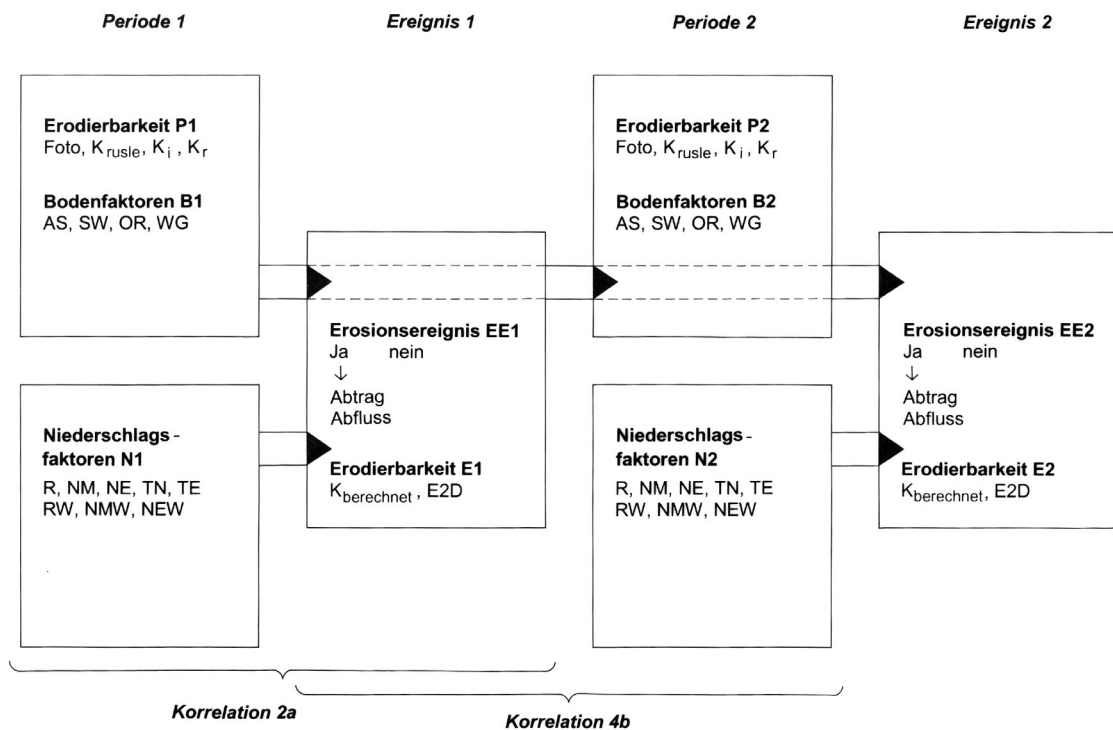


Abb. 7: Wirkungszusammenhang beim Erosionsprozess

Die momentane Erodierbarkeit wird durch das vorherige Niederschlags- und Erosionsgeschehen verändert und beeinflusst selber die Möglichkeit eines nachfolgenden Erosionsereignisses.

## 2.3 Charakterisierung der Untersuchungsstandorte

Ein allgemeiner Überblick über den Naturraum der Region Basel erfolgte in Kap. 2.1. Hier werden die untersuchten Standorte nun differenzierter und vor allem in Hinblick auf ihre Bodenmerkmale und ihre Erosionsdisposition charakterisiert. Die Berechnung der jeweiligen K-Faktoren nach der USLE (Schwertmann et al. 1990) findet sich im Anhang (A1 und A2).

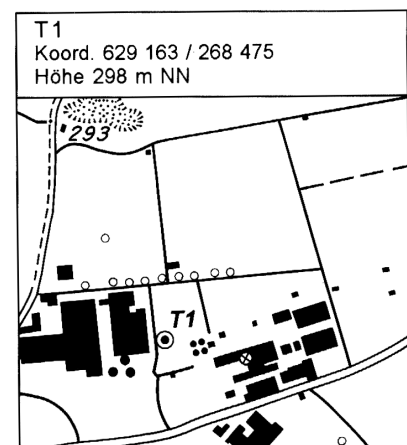
### 2.3.1 Erosionstestparzellen

Die Erosionstestparzelle T1 im Möhliner Feld wird seit 1975 betrieben, die Erosionstestparzelle T50 im Baselbieter Tafeljura seit 1983. Über die Messungen auf diesen Testparzellen wurden bereits zahlreiche Arbeiten publiziert (z.B. Unterseher 1997, Prasuhn 1991, Schaub 1989). Hier werden deshalb nur die selbst erhobenen sowie zusätzlich die für die vorliegende Untersuchung relevanten Daten aufgeführt. Genauere Angaben zu den Bodenprofilen finden sich für die T50 bei Prasuhn (1991) und für die T1 bei Schmidt (1979) und für vergleichbare Böden bei Schaub (1987). Die genaue Beschreibung der Probenahme, der Ausrüstung der Testparzellen und der verwendeten Methoden erfolgte in Kap. 2.2.

*Tab. 6: Die Erosionstestparzelle T1 im Möhliner Feld*

*Allgemeine Charakterisierung sowie chemische und physikalische Kennwerte des Oberbodens. Die T1 wurde 1975 durch Grünlandumbruch und z.T. künstliche Schüttung angelegt und seither grösstenteils schwarzbrach gehalten.*

Laufzeit:	seit 1975
Anzahl Parzellen:	3 (P1, P2, P3)
Parzellenmasse:	je 10m x 1m (10m <sup>2</sup> )
Hangneigung:	14%
Bodenform:	Schwemmlöss-Schotter-Braunerde
Bodenart (Ah):	Lt2 (schwach toniger Lehm)
K-Faktor:	1995*: P1 0.25; P2 0.26; P3 0.26
[th / ha N]	1996*: P1 0.24; P2 0.26; P3 0.25
	* Berechnung siehe Anhang (A1)
Bearbeitung:	Frühling & Herbst (Umspaten und Rechen)
Bearb.-Variante:	P2 wird seit 1992 nicht bearbeitet (nur Unkrautentfernung)
Erosionsformen:	Splasherosion und Flächenspülung in Kleinstrillen



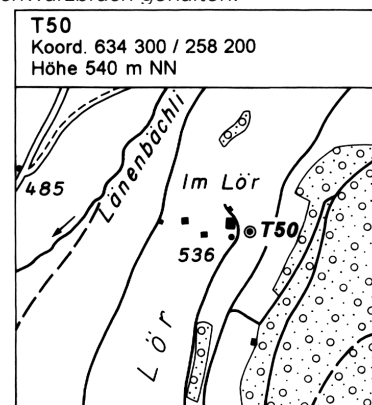
Standort Unterparzellen		Wiese 21. Jul 95	T1 21. Jul.95			T1 8. Okt.96		
			P1	P2	P3	P1	P2	P3
Korngrößenverteil.	>2mm (%)	<b>5.1</b>	4.1	3.4	3.3	5.0	6.5	7.4
	Stot (%)	<b>32.0</b>	19.4	23.6	18.8	18.2	17.0	18.1
	ffS (%)	<b>7.66</b>	5.44	7.42	5.32	4.89	4.67	4.85
	Utot (%)	<b>46.1</b>	47.6	44.6	48.1	49.2	50.1	48.28
	Ttot (%)	<b>21.9</b>	33.0	31.8	33.1	34.6	33.0	33.7
pH	H2O	<b>6.4</b>	7.6	7.6	7.6	8.0	7.9	8.0
	K Cl	<b>5.5</b>	6.7	6.7	6.7	6.9	6.8	6.8
Humus	Corg (%)	<b>4.1</b>	1.49	1.82	1.91	1.92	2.24	2.04
	Norg (%)	<b>0.37</b>	0.16	0.19	0.19	0.18	0.19	0.18
	C / N (%)	<b>11.1</b>	9.3	9.6	10.1	10.7	11.8	11.3
Kalk	Canorg (%)	<b>0.18</b>	0.23 *	0.36 *	0.34 *	0.04	0.05	0.05
	Dolomit (%)	<b>0.65</b>	1.58	1.07	1.12	-	-	-
	Dolomit (%)	<b>0.71</b>	0.32	1.72	1.53	-	-	-
KAK	S-Wert (mmolc/100g)	<b>13.72</b>	23.11	27.5	26.43	-	-	-
	T-Wert (mmolc/100g)	<b>21.18</b>	23.55	27.12	26.03	-	-	-
	V-Wert (%)	<b>64.78</b>	98.22	> 100	> 100	-	-	-

Die Analysen wurden an Mischproben aus 10 Einstichen in 0-10 cm Tiefe durchgeführt, hier wird der Mittelwert von 5 Mischproben angegeben.  
\* rechnerisch aus Kalk- und Dolomit-Werten

Tab. 7: Die Erosionstestparzelle T50 im Baselbieter Tafeljura

Allgemeine Charakterisierung sowie chemische und physikalische Kennwerte des Oberbodens. Die T50 wurde 1983 nach Grünlandumbruch angelegt und seither permanent schwarzbrach gehalten:

Laufzeit: seit 1983  
 Parzellenmasse: 3m \* 20m (60 m2)  
 Hangneigung: 21%  
 Bodenform: Hanglehm/Hangschutt-Rendzina-Braunerde  
 Bodenart (Ah) Lt3 (mittel toniger Lehm)  
 K-Faktor: 1995\*: 0.21 th / haN  
 1996\*: 0.17 th / haN  
 \* Berechnung siehe Anhang (A1)



Bearbeitung: Frühling & Herbst (Umspaten und Rechen)  
 Erosionsformen: Splasherosion, Flächenspülung, Rillenerosion

Standort Zeitpunkt	T50 1991 n. Prasuhn	Wiese 21. Jul 95	T50 95		T50 96		T50 97		
			21. Jul 95	15. Nov 95	6. Jun 96	9. Okt 96	27. Mai 97	27. Sept 97	
Korngrößenverteil.	>2mm (%)	-	<b>0.3</b>	4.7	10.4	10.6	11.8	-	-
	Stot (%)	17.4	<b>10.8</b>	12.7	10.5	11.5	12.2	-	-
	ffS (%)	-	<b>8.1</b>	8.7	7.0	7.1	7.9	-	-
	Utot (%)	46.6	<b>46.1</b>	45.8	49.5	46.5	47.8	-	-
	Ttot (%)	36.0	<b>43.1</b>	41.5	40.0	42.0	40.0	-	-
pH	H2O	7.4	<b>7.3</b>	7.7	7.8	7.7	7.9	7.8	7.9
	K Cl	6.9	<b>6.7</b>	6.9	6.8	6.7	7.0	6.9	7.1
Humus	Corg (%)	2.60	<b>4.11</b>	2.33	2.22	2.40	2.46	2.41	-
	Norg (%)	0.37	<b>0.37</b>	0.24	0.24	0.22	0.23	0.24	-
	C / N (%)	7.0	<b>11.1</b>	9.7	9.3	10.9	10.7	10.0	-
Kalk	Canorg (%)	2.29 *	<b>0.65</b>	0.64	0.71	0.54	0.53	0.46	-
	Dolomit (%)	17.4	<b>1.5</b>	3.3	-	-	-	-	-
	Dolomit (%)	1.6	<b>3.6</b>	1.9	-	-	-	-	-
KAK	S-Wert (mmolc/100g)	-	<b>40.61</b>	32.15	-	-	-	-	-
	T-Wert (mmolc/100g)	26.7	<b>35.82</b>	30.45	-	-	-	-	-
	V-Wert (%)	-	<b>&gt;100</b>	>100	-	-	-	-	-

Die Analysen wurden an Mischproben aus 10 Einstichen in 0-10 cm Tiefe durchgeführt, hier wird der Mittelwert von 5 Mischproben angegeben.  
\* rechnerisch aus Kalk- und Dolomit-Werten



### 2.3.2 Landwirtschafts-Parzellen

Die Standorte der Landwirtschaftsparzellen liegen in Gebieten, welche gemäss einer Studie über die Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft (Mosimann & Mitarbeiter 1994 & 1993) als erosionsgefährdet bezeichnet werden müssen. Alle angefragten Betriebsleiter stellten mir für die vorliegende Untersuchung Standorte innerhalb ihrer Fruchtfolgeflächen zur Verfügung. Zu Beginn der Messungen wurde die Bodenform mit Hilfe von Pürckhauereinschlägen bestimmt. Die eigenen Erhebungen wurden durch Informationen von den jeweiligen Bodenkarten der Gemeinden (VSD, diverse Jahrgänge) ergänzt. Die Angaben zu den Betrieben und zur Bearbeitung auf den jeweiligen Standorten (Tab. 8, Anhang A3-A6, A9) stammen von den Betriebsleitern. Die genaue Beschreibung der Probenahme, der Ausrüstung der Testparzellen und der verwendeten Methoden erfolgte in Kap. 2.2.

Tab. 8: Kurzcharakterisierung der zwölf Landwirtschaftsparzellen

Ausführlichere Daten zu den Betrieben und zur Bearbeitung während der Untersuchungsperiode finden sich im Anhang (A3-A6, A9).

	GTW 95	GTM 96	GTW 96	BMW 95	BMM 96	BMW 96	JBW 95	JBM 96	JBW 96	JDT 95	NDM 96	NDW 96
Frucht 1)	WW	M	WW	WW	M	WW	WW	M	WW	T	M	WW
Vorfrucht 1)	Kart.	WW	M	M	KW (3 J.)	M	KW	WW / KW	M	WW / KW	NW (5 J.)	M
Flurname	Bettenacker	Marchbach-rain	Marchbach-rain	Langacker	Mulden-acker	Aspacker	Hunds-buckel	beim Kompost	beim Kompost	-	Mätten-bol	Mätten-bol
Naturraumtyp 2)	NH	NH	NH	ÜTHB	ÜTHB	ÜTHB	NH	NH	NH	THB	THB	THB
Hangform: vert. 3)	V	V	V	G	G	V	V	V	V	G	X	X
horiz. 3)	G	G	G	V	V	X	X	G	G	G	G	G
Schlaggrösse [ha]	1.60	4.40	4.40	2.30	0.60	2.30	1.15	1.60	1.60	0.85	1.50	1.50
Hangneigung [%]	6	8	8	14	18	20	10	14	14	22	20	20
Exposition	N	SSO	SSO	N	NNW	NNO	O	NNO	NNO	NNW	NNO	NNO
Erosive Hanglänge [m]	192	240	240	60	60	90	75	30	30	65	100	100
BR 4)	längs	quer	längs	quer	quer	längs ?	längs	längs	längs	quer	quer	quer
Feldkasten												
Lage im Schlag 5)	U	S	S	U	U	U	U	S	S	U	U	U
Länge am Hang 6)	F	M - U	M - U	M	M	U	F	F	F	M	M	M
Ausrichtung zur BR	längs	quer	längs	quer	quer	schräg	längs	schräg	schräg	quer	quer	quer
Substrat	Auenschwemm-Löss	Auenlehm	Auenlehm	Löss auf Mergel	Handlehm	Löss / Handlehm	Löss-kolluvium	Lösslehm	Lösslehm	Handlehm (Dogger)	Handlehm (Dogger)	Handlehm (Dogger)
Bodentyp	Braunerde-Parabraunerde	Kolluvium	Kolluvium	Parabraunerde-Braunerde	Braunerde	Braunerde	Braunerde	Para-braunerde	Para-braunerde	braunerde	braunerde	braunerde
Bodenart im Ap 7)	Ut4	Lu	Lu	Tu3	Tu2	Tu3	Ut4	Ut4	Ut4	Tu2	Tu2	Tu2
K-Faktor 8)	0.54	0.41	0.41	0.30	0.22	0.30	0.42	0.53	0.53	0.15	0.18	0.18

1) WW ... Winterweizen, K ... Kartoffel, M ... Mais, KW ... Kunzwiese, T ... Triticale, NW ... Naturwiese

2) nach: H. Leser (1982), NH ... Niedriges Hügelland, THB ... Tafelhügel- und -Bergland, ÜTHB ... THB im Übergangsbereich zu Schotterflächen des Hochrheintals und Seitentäler

3) V ... konkav, G ... gestreckt, X ... konvex

4) = Bearbeitungsrichtung

5) U ... unterer Rand, S ... seitlicher Rand

6) F ... Hangfuss, M ... Mittelhang, U ... Unterhang

7) nach: AG Boden (1994)

8) nach: Schwertmann et al. (1987)

Die Landwirtschafts-Standorte sind in Absprache mit den Betriebsleitern vor allem aufgrund ihrer aktuellen Nutzung ausgewählt worden. Es wurden drei Fruchtfolgeperioden - Winterweizen 1995 / 1996, Mais 1996 und Winterweizen 1996 / 1997 - untersucht. Die Landwirtschafts-Parzellen sind untereinander sonst nur bedingt vergleichbar, denn sie weisen bezüglich verschiedener Merkmale wie Bodenform, Lage im Hang und Hangneigung Unterschiede auf (Tab. 8). Generell handelt es sich vor allem um Braunerden und Übergangsformen davon oder um Kolluvien, die nach der Schweizerischen Bodensystematik als Kalkbraunerden bezeichnet werden. Die Hangneigungen und Substrate sind typisch für den ausgewiesenen Naturraum. So finden sich im Niederen Hügelland eher geringere Hangneigungen und die Substrate sind stark lössgeprägt. Im Tafelhügel und -bergland sind die Hangneigungen grösser und die Substrate sind tonhaltiger und oft Mischungen aus Handlehmen und Löss.

Die Standorte wurden in drei Gruppen eingeteilt, welche sich vor allem auf den Naturraum und die Bodenart im Ap-Horizont abstützt. Diese grobe Einteilung ist für weitere Interpretationen und eine Übertragung auf andere Standorte nützlich.

Tab. 9: Einteilung der Testparzellen in drei Gruppen

Die Erosions- und Landwirtschaftsparzellen wurden aufgrund ihrer Bodenart in tonige, lehmige und schluffige Böden eingeteilt (kursiv: Erosionstestparzellen).

Gruppen	Standorte	Bodenart genau*	Bodenart-Hauptgruppe*	Bodenart genau**	Bodenart-Gruppe**	K-Fakt *** [t h/haN]
Tonige Böden	BMM 96	Tu2	T-L	IT	tL-IT	0.22
	JDT 95	Tu2		IT		0.18
	NDMW 96	Tu2		IT		0.19
	T50	Lt3		fL		0.19
Lehmige Böden	GTM/W 96	Lu	L-T	uL	uL-tL	0.37
	BMW 95	Tu3		utL		0.30
	BMW 96	Tu3		utL		0.30
	T7	Lt2		fL		0.25
Schluffige Böden	GTW 95	Uk4	U	U	U	0.54
	JBW 95	Uk4		U		0.42
	JBM/W 96	Uk4		U		0.53

\*nach AG Boden 1994

\*\* nach AG Bodenkunde 1982

\*\*\* detaillierte Berechnung siehe Anhang (A2)

## 2.4 Datenverarbeitung und statistisches Vorgehen

Für die Verarbeitung der Daten wurden vor allem deskriptive Statistikgrößen verwendet.

Für eine erste Darstellung der Werte wurden folgende Größen erhoben:

- Mittelwert (*Mitte*): beschreibt das arithmetische Mittel der Messreihe.
- Standardabweichung (*SD*): beschreibt, wie sehr die einzelnen Messwerte vom Mittelwert abweichen, d.h. wie gross die Streuung der Messwerte ist.
- Variationskoeffizient (*VK*): ist die relative Standardabweichung, die aussagt, ob die Streuung der Messwerte als stark oder schwach einzuschätzen ist. Er beschreibt damit, wie gut der Mittelwert die Messreihe wirklich repräsentiert.

Für die weiteren Berechnungen (Kap. 2.4.1 und 2.4.2) wurden die Datenreihen grundsätzlich in zwei Formen tabellarisch festgehalten (Abb. 7):

a) Tabellenendung -a: Vom **Abtrags- resp. Abflussereignis** mit dem dazugehörigen **Niederschlagsereignis** ausgehend, Korrelation mit der **vorher stattgefundenen Bodenprobenahme** resp. -aufnahme.

Fragen:

- Besteht eine enge Beziehung zwischen Bodenaufnahme und nachfolgendem Abtrags- oder Abflussereignis? D.h. ist eine Voraussage von Abtrag und Abfluss aufgrund der Bodenparameter möglich?
- Besteht eine enge Beziehung zwischen dem Abtrags- oder Abflussereignis und dem dazugehörigen Niederschlagsereignis? D.h. ist eine Voraussage von Abtrag und Abfluss aufgrund der Niederschläge möglich?

b) Tabellenendung -b: Von der **Bodenprobenahme** resp. -aufnahme ausgehend, Korrelation **mit dem letzten vorher stattgefundenen Abtrags- oder Abflussereignis** resp. dem maximal 10 Tage zuvor stattgefundenen Niederschlagsereignis. Für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Bodenfaktoren und vorherigem Abtrag oder Abfluss wurden die Fälle nicht berücksichtigt, wo die Zeit zwischen Erosionsereignis und Bodenprobenahme länger als 14 Tage betrug. Diese Limite wurde so festgelegt, da auch in der RUSLE die Erodierbarkeit im Zweiwochen-Rhythmus neu berechnet wird.

Fragen:

- Besteht eine enge Beziehung der gemessenen Bodenparametern untereinander?
- Besteht eine enge Beziehung zwischen den vorher fallenden Niederschlägen und den gemessenen Bodenparametern? D.h. ist eine Voraussage für die Bodenparameter aufgrund der Niederschläge möglich?
- Ist eine eventuelle Beziehung zwischen Niederschlägen und Bodenparametern abhängig von der Zeit, die zwischen Niederschlag und Bodenprobenahme vergangen ist?
- Besteht eine enge Beziehung zwischen den Bodenparametern und dem vorher stattgefundenen Abtrag oder Abfluss? D.h. wie beeinflusst das vorherige Erosionsgeschehen die Bodenparameter?
- Ist eine eventuelle Beziehung zwischen Niederschlägen und Bodenparametern abhängig von der Zeit, die zwischen Abtrag resp. Abfluss und Bodenprobenahme vergangen ist?

### 2.4.1 Korrelation

Um zu prüfen, ob verschiedene Parameter einen signifikanten statistischen Zusammenhang aufweisen, wurde der Korrelationskoeffizient berechnet (paarweiser Vergleich). Er beschreibt die Stärke des linearen Zusammenhangs zweier metrischer Messgrößen. Bedingung für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten ist die Normalverteilung der Daten. Weisen Daten einen signifikanten Zusammenhang auf, kann daraus - als erster Schritt in Richtung Modellierung - eine simple Regressionsgleichung berechnet werden.

Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten waren folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Die Daten im Statistikprogramm auf ihre Normalverteilung prüfen und
- gegebenenfalls durch Transformation auf Normalverteilung umrechnen.

Tab. 10: Statistische Datentransformation und Abkürzungen

Damit die Daten einer Normalverteilung folgen, wurden die folgenden Datentransformationen durchgeführt.

Parameter	Abkürzung	Transf. Testparz.	Transformation Landwirtschaftsparzelle				
			alle	GT	BM	JB	ND
Aggregatstabilität	AS	log(x)	log(x)	log(x)	-	log(x)	log(x)
Scherwiderstand	SW	-	-	-	log(x)	log(x)	-
Oberflächen- rauhigkeit	OR	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Bodenwasser gehalt	WG	-	-	-	$x^{1/2}$	$x^{1/3}$	-
pH (H2O)	pH (H2O)	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
pH (KCl)	pH (KCl)	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Abtrag	Abtrag	log(x)	ln(x)	log(x)	-	-	$x^3$
Abfluss	Abfluss	log(x)	log(x)	log(x)	log(x)	log(x)	log(x)
Splash	Splash		ln(x)	log(x)	log(x)	$x^{1/2}$	log(x)
R-Wert	R	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Niederschlagsmenge	NM	log(x)	$x^{1/2}$	$x^{1/2}$	$x^{1/3}$	-	-
Niederschlagsenergie	NE	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tage seit letztem Niederschlag	TN	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tage seit letztem Erosionsereignis	TE	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
R-Wert Woche	RW	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Niederschlagsmenge Woche	NMW	-	$x^{1/2}$	log(x)	$x^{1/2}$	$x^{1/2}$	$x^{1/2}$
Niederschlagsenergie Woche	NEW	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
K-Wert gerechnet	K	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
K-Wert RUSLE	K rusle	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ki WEPP	Ki	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Kr WEPP	Kr	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Erosionswiderstand des E-2D	E2D	log(x)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
EX <sub>Foto A</sub>	EX <sub>Foto A</sub>	log(x)	-	$x^2$	-	-	-
EX <sub>Foto B</sub>	EX <sub>Foto B</sub>	log(x)	-	$x^2$	-	-	-

n.a. = nicht analysiert

- Für die normalverteilten Daten Korrelationskoeffizienten (r) berechnen und anhand des P-Wertes eines zweiseitigen Tests auf ihre Signifikanz prüfen. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit  $P > 0.1$  wird als nicht signifikant angenommen. Die restliche Einteilung entspricht der geläufigen Nomenklatur:  
[†]  $0.1 \geq P > 0.05$ , [\*]  $0.05 \geq P > 0.01$ , [\*\*]  $0.01 \geq P > 0.001$ , [\*\*\*]  $P < 0.001$ .
- Für die signifikant korrelierten Daten Regressionsgleichungen berechnen.

### 2.4.2 Einfachstmodellierung mit schrittweiser Regression

Die Regressionsrechnung ermöglicht es, den Zusammenhang zwischen verschiedenen Variablen zu definieren. Bei der einfachen Regression wird dabei die Abhängigkeit einer Variablen y von einer anderen Variablen x als Gleichung dargestellt. Oft ist aber eine Variable y von verschiedenen Variablen  $x_n$  abhängig. Die schrittweise Regression ist ein Verfahren,

welches hilft, aus einer Vielzahl von Variablen  $x_n$ , diejenigen herauszufinden, welche die abhängige Variable  $y$  am besten beschreiben und daraus eine Gleichung der Qualität

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

wobei  $b_0$  den Achsenabschnitt und  $b_1$ - $b_n$  die partiellen Regressionskoeffizienten der einzelnen Variablen repräsentieren. Von den standardmässig durch das Programm erhobenen Grössen werden folgende für die Qualität des Modelles wichtige Grössen angegeben:

Tab. 11 Die Kenngrössen der schrittweisen Regression

n Anzahl Messwerte	
R Regressionskoeffizient	gibt Auskunft über die Art der Abhängigkeit zweier Variablen $x$ , $y$
$R^2$ Bestimmtheitsmass	gibt Auskunft, wie viel der Variabilität einer Variablen $y$ sich durch eine oder mehrere Variablen $x$ erklären lassen
F to enter F to remove	Kritische partielle F-Ratio's, welche definieren, ob eine Variable ins Modell Eingang findet oder nicht: $x > F$ to enter $\rightarrow$ Wert wird ins Modell aufgenommen
F-Wert ANOVA (Varianzquotienten-Test)	Gibt Auskunft, wie wichtig eine Variable $x$ für die Bestimmung der Variablen $y$ ist
p-Wert ANOVA	gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass der gefundene F-Wert nur Zufall ist.
Nicht berücksichtigte Parameter	Parameter, die nicht ins Modell aufgenommen wurden
Regressionsgleichung	mit Parametern, die ins Modell aufgenommen wurden, ihren Regressionskoeffizienten ( $b_1$ - $b_n$ ) und dem Interzept ( $b_0$ )

## 2.5 Hard- und Software

Die vorliegende Arbeit wurde auf einem Macintosh Performa 630 geschrieben. Für die Datenverarbeitung wurden folgende Programme verwendet:

Textverarbeitung: Microsoft Word 6.0.1  
 Tabellenkalkulation: Excel 5.0  
 Grafik: Deltagraph 4.0.1  
 Statistik: StatView 4.51

## 3. Resultate und Diskussion der Messungen und Modellierungen auf den Erosionstestparzellen T1 und T50

### 3.1 Niederschlags- und Erosionsgeschehen

#### 3.1.1 Niederschlagsverteilung

##### 3.1.1.1 Niederschlagsmengen

###### T50

Langjährige Messungen auf benachbarten, amtlichen Messstationen der T50 ergeben folgende Jahresmittel für die Niederschlagsmenge:

Breitenhof, 558 m NN (1931 - 1960):	1063 mm
Kilchberg, 578 m NN (1931 - 1960):	1034 mm
Oltingen, 580 m NN (1941 - 1980):	1087 mm
T50, 540 m NN (1983 - 1997):	1019 mm (nach DRÄYER 1996, ergänzt)

Ausführliche Hinweise zu den langjährigen klimatischen Verhältnissen im Gebiet der Erosionstestparzelle finden sich bei SEILER (1983).

Die bei den Untersuchungen berücksichtigten hydrologischen (Nov. - Okt.) Jahre 1995 - 1997 zeigen bezüglich des Niederschlagsgeschehens ein recht unterschiedliches Bild (Tab. 12, Abb. 8):

- 1995 war ein deutlich überdurchschnittlich feuchtes Jahr. Auf ein sehr feuchtes Winterhalbjahr mit überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen im Dezember und Januar folgte ein ebenfalls sehr feuchtes Sommerhalbjahr, was v.a. durch die ausserordentlich hohen Niederschläge in den Monaten Mai, August und September verursacht wurde. Auffällig ist dabei die Regenperiode vom 23.-29. August, welche insgesamt 94.1 mm Niederschlag erbrachte und zum grössten Abtragsereignis seit Bestehen der T50 führte (Abb. Abträge seit 1983).
- 1996 war im Gegensatz zu 1995 mit nur 861.2 mm ein sehr trockenes Jahr. Auf ein sehr trockenes Winterhalbjahr folgte ein eher durchschnittlich feuchtes Sommerhalbjahr, wobei die Niederschlagsmengen von Mai bis Juli von ganz wenigen ergiebigen Tagesereignissen verursacht wurden.
- 1997 zeigte sich sogar noch trockener als 1996. Auf ein trockenes Winterhalbjahr folgte ein ebenfalls trockenes Sommerhalbjahr, in dem der Juni, zwar ausserordentlich hohe, die restlichen Monate - und vor allem der August - aber sehr niedrige Niederschlagsmengen aufwies. Obwohl es, ausser im September, häufig regnete, waren die Mengen der einzelnen Ereignisse meistens sehr gering.

## T1

Das langjährige Mittel der amtlichen Messstation Rheinfelden (Höhe 280 m NN) liegt bei 974 mm Niederschlag (Tab. 13) und damit nur wenig tiefer als das Mittel der oben erwähnten Stationen im Jura. Ausführliche Hinweise zu den langjährigen klimatischen Verhältnissen im Gebiet der Erosionstestparzelle finden sich bei SCHAUB (1989).

Die bei den Untersuchungen berücksichtigten Jahre 1995 und 1996 zeigen bezüglich dem Niederschlagsgeschehen ein unterschiedliches Bild (Tab. 13, Abb. 10):

- 1995 ist mit 1123.1mm ein überdurchschnittlich feuchtes Jahr, was v.a. auf das sehr feuchte Winterhalbjahr zurückzuführen ist. Dabei zeigten die Monate Dezember bis März ausserordentlich hohe Niederschlagssummen. Im Sommerhalbjahr zeigten die Monate Juli bis September ebenfalls überdurchschnittlich hohe Niederschlagssummen, welche auf eher wenige, mengenmässig sehr ergiebige Ereignisse zurückzuführen sind.
- 1996 war mit etwas mehr als der Hälfte der Jahressumme von 1995 ein extrem trockenes Jahr. Auf ein trockenes Winterhalbjahr folgte ein ebenso trockenes Sommerhalbjahr. Die ausserordentlich tiefen Monatssummen von Juni bis August wurden durch ganz wenige, ergiebige Niederschläge verursacht.

### 3.1.1.2 Niederschlagserosivität

Die kinetische Energie eines Niederschlages ist ausschlaggebend für die Bodenablösung durch Tropfenaufprall, während die Niederschlagsintensität den für die Abflussbildung relevanteren Parameter darstellt. Indices zur Charakterisierung der Niederschlagserosivität sollten also diese beiden Parameter berücksichtigen. In dieser Arbeit wurde die Niederschlagserosivität durch den von WISCHMEIER (1959) vorgeschlagene  $EI_{30}$ -Index beschrieben. Dieser errechnet sich aus dem Produkt der aufsummierten kinetischen Energie eines Niederschlagsereignisses ( $E$ ) und dessen maximaler 30-Minuten-Intensität. Die Erosivität von Einzelniederschlägen ( $EI_{30}$ -Index) wird in dieser Arbeit als  $r$ -Wert [ $N h^{-1}$ ], die Jahressumme der  $r$ -Werte als  $R$ -Faktor [ $N h^{-1}$ ] bezeichnet, die Berechnung erfolgt nach DETTLING (1989).

Als erosive Niederschläge, welche für die Berechnung des  $R$ -Faktors berücksichtigt werden, gelten solche Niederschläge, die entweder aufgrund der Überschreitung einer Schwellenintensität oder infolge einer Mindestmenge an Gesamtniederschlag in der Lage sind, Wassererosion auszulösen. Dies schliesst nicht aus, dass auch Niederschläge mit Intensitäten unterhalb des Schwellenwertes Niederschläge auslösen (ROTH 1996). In der vorliegenden Arbeit wurde, wie auch schon in früheren Arbeiten der FBB, auf die von ROGLER & SCHWERTMANN (1981) vorgeschlagenen Schwellenwerte von 10 mm Gesamtniederschlag oder 10  $mm h^{-1}$  Mindestintensität während 30 Minuten ( $I_{30}$ ) zurückgegriffen. Als Niederschlag gelten Ereignisse mit  $< 1$  mm Niederschlagsmenge, welche durch einen niederschlagsfreien Zeitraum von mindestens sechs Stunden voneinander getrennt sind.

**T50**

Der Jahresverlauf der Erosivität (Abb. 9) zeigt deutlich, dass fast nur die Monate des hydrologischen Sommerhalbjahres und zwar v.a. der Juni, Juli und August, zur Erosivität beitragen. Das heisst, es sind wenige sommerliche, hocherosive Ereignisse, welche den Kurvenverlauf dominieren und die meisten Abträge (Abb. 12) auslösen. Daraus lässt sich auch die bereits in PRASUHN (1991, 64) beschriebene, extrem linksschiefe Häufigkeitsverteilung der r-Werte ableiten.

Wie schon bei der Regenmenge unterscheiden sich die untersuchten Jahre deutlich bei der Niederschlagserosivität (Abb. 9, Tab. 12). So fällt das Jahr 1995 durch seine ausserordentlich hohe, die Jahre 1996 und 1997 aber durch ihre unterdurchschnittlich tiefe Niederschlagserosivität auf. Der R-Faktor von 1995 wird dabei zur Hälfte alleine durch zwei Niederschlagsereignisse im Juli mit je über 50 N\*h<sup>-1</sup> verursacht. Weitere, ausführliche Überlegungen zum R-Faktor und zu dessen Anwendbarkeit im Untersuchungsgebiet finden sich bei PRASUHN (1991).

Tab. 12: Niederschlagsmengen, r-Werte auf der T50

Monatliche Niederschlagssummen und r-Werte sowie R-Faktoren für die hydrologischen Jahre 1995 - 1997 der Messstation T50. WHJ = hydrologisches Winterhalbjahr, SHJ = hydrologisches Sommerhalbjahr, HJ = Hydrologisches Jahr.

		Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	WHJ	SHJ	HJ
Niederschlag [mm]	1995	40.5	137.4	128.2	83.0	90.1	47.5	138.5	96.2	126.6	167.5	115.6	12.2	526.7	656.6	1183.3
	1996	79.2	83.2	13.1	44.4	26.2	17.1	89.0	93.3	113.3	124.0	68.1	110.3	263.2	598.0	861.2
	1997	93.1	64.0	10.3	70.1	29.7	87.8	46.1	159.0	100.1	59.3	58.5	77.0	355.0	500.0	855.0
	1983-97*	89.4	77.9	57.7	56.7	62.7	85.2	108.4	118.6	97.7	91.0	101.9	72.6	429.6	590.2	1019.8
R-Faktor [N/h]	1995	0.0	5.1	0.0	1.3	2.7	3.5	7.2	7.1	123.7	47.4	10.2	0.0	12.6	195.6	208.2
	1996	6.1	2.1	0.9	0.0	0.0	0.5	2.2	14.7	21.3	23.4	11.4	6.1	9.6	79.1	88.7
	1997	2.4	1.2	0	2.6	0	4.4	2.3	25.2	14.4	11.2	11.4	8.7	10.6	73.2	83.8
	1986-97*	3.3	2.8	1.1	1.1	2.8	3.6	9.6	19.5	32.2	29.9	14.2	7.2	14.7	112.6	127.3

\*nach Dräyer 1996 ergänzt

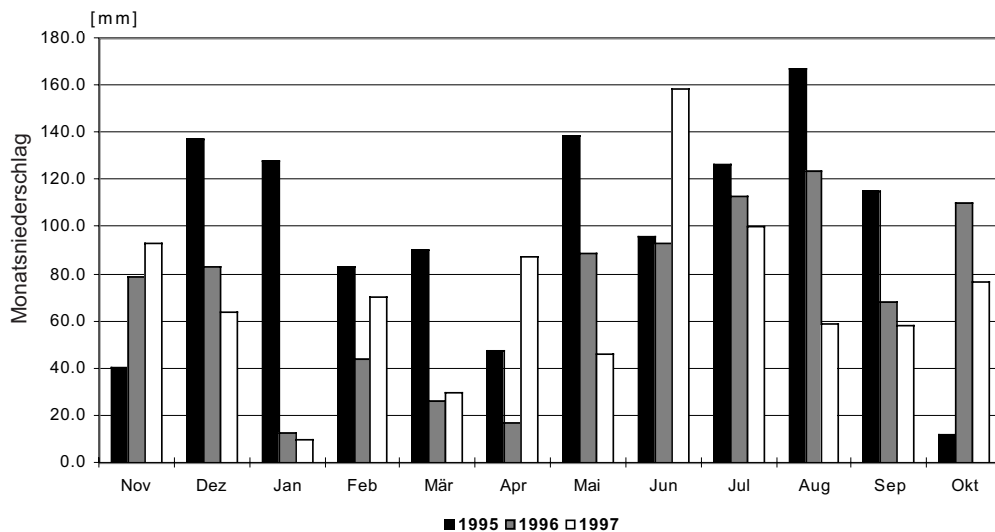
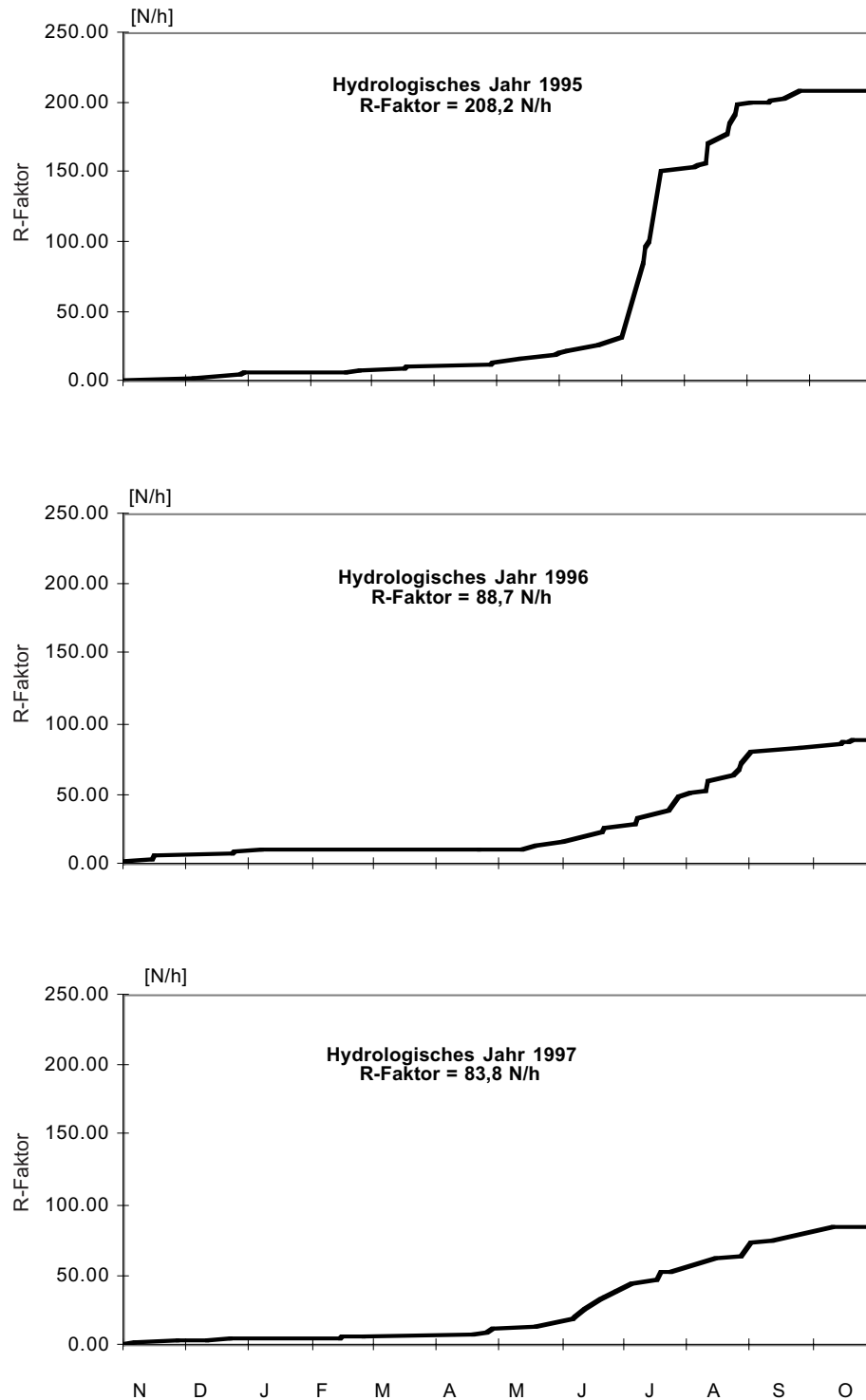


Abb. 8: Niederschlagsmengen auf der T50

Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen für die Jahre 1995 - 1997 der Messstation T50.





**Abb. 9: Summenkurven der Niederschlagsintensitäten auf der T50**

Summenkurve der r-Werte für die hydrologischen Jahre 1995-1997 der Messstation T50. Die Jahre zeigen erhebliche Unterschiede, wobei immer einzelne Ereignisse während den Sommermonaten Juni bis August den Kurvenverlauf prägen.

**T1**

Auch bei der T1 zeigen die Jahre 1995 und 1996 erhebliche Unterschiede in ihrer Erosivität (Abb. Summenkurve). 1995 zeigt sich zwar der typische (UNTERSEHER 1997, 34), durch die Sommermonate dominierte Jahresverlauf. Im Jahr 1996 liegen hingegen beinahe alle, speziell aber die Monate Mai bis August, deutlich unter dem langjährigen Durchschnitt. Die Monate des hydrologischen Sommerhalbjahres tragen denn auch kaum wesentlich zum R-Faktor bei, als die restlichen Monate. Weitere, ausführliche Überlegungen zum R-Faktor und zu dessen Anwendbarkeit im Untersuchungsgebiet finden sich bei SCHAUB (1989) und UNTERSEHER (1997).

Tab. 13: Niederschlagsmengen, r-Werte auf der T1

Monatliche Niederschlagssummen und r-Werte sowie R-Faktoren für die hydrologischen Jahre 1995 - 1996 der Messstation T1. WHJ = hydrologisches Winterhalbjahr, SHJ = hydrologisches Sommerhalbjahr, HJ = Hydrologisches Jahr.

		Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	WHJ	SHJ	HJ
Niederschlag	1995	46.8	131.6	114.2	104.5	90.4	48.5	127.7	59.9	122.9	148.6	113.6	14.4	536.0	587.1	1123.1
	1996	81.0	108.6	8.3	42.5	8.0	7.5	65.1	36.8	52.5	70.1	40.3	92.5	255.9	357.3	613.2
	1961-90*	78.5	80.3	73.6	67.9	69.3	77.9	97.4	99.7	86.4	102.1	75.1	65.8	447.5	526.5	974.0
R-Faktor	1995	0.8	7.6	2.3	3.1	3.2	1.3	6.7	7.5	66.1	53.2	6.0	0.0	18.3	139.5	157.8
	1996	7.9	3.9	0.0	1.4	0.0	0.0	3.8	3.8	6.3	3.1	0.5	4.4	13.2	21.9	35.1
	1975-92**	3.0	2.8	1.3	2.2	1.8	1.9	11.0	16.5	22.7	13.8	14.5	4.1	13.0	82.6	95.6

\*Meteorologische Station Rheinfelden 280 mNN  
 \*\* nach Unterseher 1997

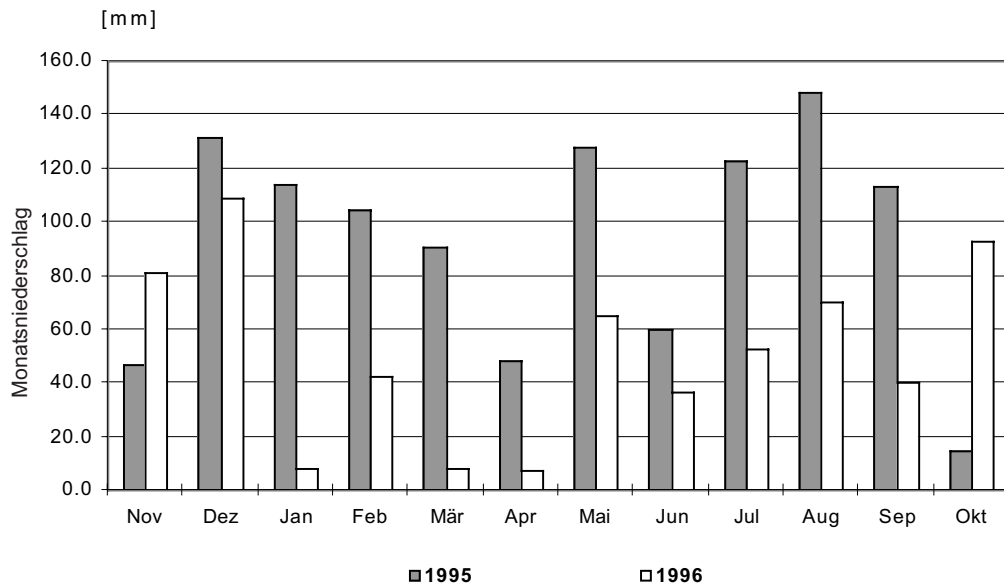


Abb. 10: Niederschlagsmengen auf der T1

Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen für die Jahre 1995 - 1996 der Messstation T1.

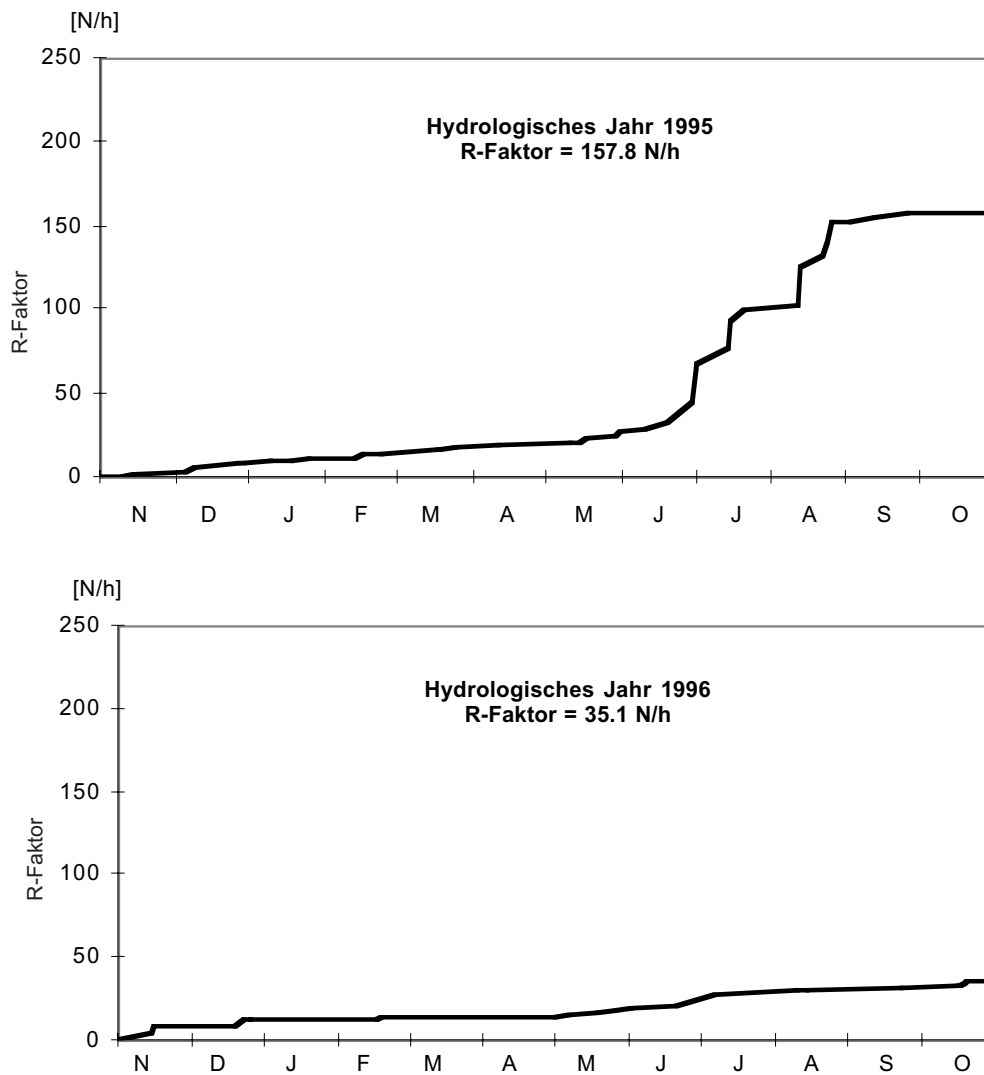


Abb. 11: Summenkurven der Niederschlagsintensitäten auf der T1

Summenkurve der  $r$ -Werte für die hydrologischen Jahre 1995-1996 der Messstation T1. Die Jahre zeigen erhebliche Unterschiede: 1995 prägen einzelne Ereignisse während den Sommermonaten Juni bis August den Kurvenverlauf, 1996 muss als ausserordentlich "ereignislos" angesehen werden.

### 3.1.2 Abtrags- und Abflussgeschehen

Da die quantitativen Erosionsmessungen auf den Testparzellen bei dieser Arbeit nicht im Vordergrund standen, wird hier nur ein kurzer Überblick über das Geschehen der Untersuchungsjahre gegeben. Die Daten wurden aber für weitere Berechnungen in späteren Kapiteln verwendet und werden dort weiter interpretiert. Eine zusammenfassende Beurteilung des Einsatzes von Testparzellen bei der FBB liefert PRASUHN (1991, 170-183).

## T50

Um der Vollständigkeit der Dokumentation willen, werden auch die Abtrags- und Abflussdaten von 1991 - 1994 aufgeführt, welche von DRÄYER (1996) erhoben, aber nicht verarbeitet und veröffentlicht wurden. Diese wurden zum Teil für Berechnungen herangezogen, sonst aber nicht weiter interpretiert.

Tab. 14: Abfluss und Abtrag 1991 - 1997 auf der Erosionstestparzelle T50

Die Ursprungsdaten von 1991 - 1995 stammen von M. POTSCHIN und D. DRÄYER.

I Datum	II NS-Menge [mm]	III R-Werte [N/h]	IV Abflußmenge [mm]	V Abtragsmenge [tTS/ha]	VI K-Faktor [(t h)/(ha N)]
22. Jun 91	19.5	18.7	?	2.105	0.031
28. Jun 91	13.5	3.1	?	0.262	0.024
24. Jul 91	16.5	11.8	?	0.028	0.001
26. Jul 91	19.9	7.2	?	1.233	0.048
22. Sept 91	34.4	15.0	0.792	0.170	0.003
26. Sept 91	24.5	1.5	0.658	0.082	0.015
06. Okt 91	17.3	1.7	?	0.048	0.008
<b>SUMME '91</b>	<b>145.6</b>	<b>59.0</b>	<b>1.450</b>	<b>3.928</b>	
<b>MITTEL '91</b>	<b>20.8</b>	<b>8.4</b>	<b>0.725</b>	<b>0.561</b>	<b>0.018</b>
03. Jun 92	23.0	2.0	?	1.283	0.179
25. Jun 92	32.7	11.5	0.675	0.267	0.006
06. Jul 92	36.5	4.6	5.600	3.767	0.228
10. Jul 92	8.3	1.0	0.867	0.200	0.056
31. Aug 92	26.4	4.0	0.443	-	-
<b>SUMME '92</b>	<b>126.9</b>	<b>23.1</b>	<b>7.585</b>	<b>5.517</b>	
<b>MITTEL '92</b>	<b>25.4</b>	<b>4.6</b>	<b>1.896</b>	<b>1.379</b>	<b>0.117</b>
05. Jul 93	38.3	20.7	3.092	5.215	0.070
10. Jul 93	65.9	9.9	4.933	2.773	0.078
17. Jul 93	14.6	8.0	2.230	3.527	0.123
21.-22.Jul.93	7.0	-	0.058	0.029	-
30. Jul 93	23.6	11.7	1.813	2.207	0.053
08. Sept 93	19.3	3.2	0.027	1.085	0.094
<b>SUMME '93</b>	<b>168.7</b>	<b>53.5</b>	<b>12.153</b>	<b>14.836</b>	
<b>MITTEL '93</b>	<b>28.1</b>	<b>10.7</b>	<b>2.026</b>	<b>2.473</b>	<b>0.084</b>
21. Mai 94	12.8	2.6	4.937	0.257	0.027
25. Jun 94	29.5	41.5	3.467	9.642	0.065
19. Jul 94	7.5	0.5	1.017	1.165	0.649
06. Aug 94	38.3	72.5	7.500	38.497	0.148
17. Aug 94	16.8	6.6	0.458	0.133	0.006
22. Aug 94	17.4	9.0	2.125	8.895	0.275
14. Sept 94	26.0	11.6	1.492	0.610	0.015
<b>SUMME '94</b>	<b>148.3</b>	<b>144.3</b>	<b>20.995</b>	<b>59.198</b>	
<b>MITTEL '94</b>	<b>21.2</b>	<b>20.6</b>	<b>2.999</b>	<b>8.457</b>	<b>0.169</b>

Tab. 14: Fortsetzung

5. Jun 95	7.4	1.6	0.750	0.020	0.003
3. Jul 95	15.9	5.1	0.110	0.020	0.001
13. Jul 95	32.9	52.4	7,500 *	52.970	0.282
21. Jul 95	31.6	50.3	5.680	15.400	0.085
13. Aug 95	20.4	13.9	1.350	0.420	0.008
23.-28.Aug.95	79.2	28.2	7,500 *	58.470	0.578
<b>SUMME '95</b>	<b>187.4</b>	<b>149.9</b>	<b>22,14</b>	<b>127.280</b>	
<b>MITTEL '95</b>	<b>31.2</b>	<b>25.3</b>	<b>1.973</b>	<b>21.217</b>	<b>0.160</b>
1. Mai 96	8.6	0.7	2.700	9.380	3.733
19. Mai 96	15.5	1.6	0.610	0.200	0.035
7.-8.Jul.96	48.5	7.3	0.270	0.020	0.001
23. Jul 96	9.6	4.2	0.020	0.020	0.001
28. Jul 96	14.8	9.8	0.230	0.020	0.001
2. Aug 96	15.1	3.2	0.005	0.020	0.002
10.-11.Aug.96	9.9	3.6	0.390	0.030	0.002
11. Aug 96	12.0	3.0	0.680	0.070	0.006
27. Aug 96	12.3	3.1	0.590	2.740	0.246
1. Sept 96	16.4	8.5	0.740	1.340	0.044
25. Sept 96	10.6	2.9	0.140	0.030	0.003
<b>SUMME '96</b>	<b>173.3</b>	<b>47.9</b>	<b>6.370</b>	<b>13.790</b>	
<b>MITTEL '96</b>	<b>15.8</b>	<b>4.4</b>	<b>0.580</b>	<b>1.261</b>	<b>0.370</b>
<b>MITTEL '96*</b>					<b>0.034*</b>
29. Apr 97	21.4	1.6	0.600	-	-
19. Mai 97	12.0	2.3	0.130	-	-
13. Jun 97	20.1	8.0	0.020	0.003	0.000
21.-22.Jun.97	51.0	5.7	0.330	-	-
26. Jun 97	4.5	0.1	0.050	-	-
6. Jul 97	12.3	6.3	0.140	0.033	0.001
20. Jul 97	11.1	4.6	2.640	3.360	0.203
16. Aug 97	19.0	10.0	0.060	0.004	0.000
2. Sept 97	30.5	9.7	0.090	0.001	0.000
<b>SUMME '97</b>	<b>118.0</b>	<b>34.7</b>	<b>3.240</b>	<b>3.400</b>	
<b>MITTEL '97</b>	<b>19.7</b>	<b>5.8</b>	<b>0.540</b>	<b>0.850</b>	<b>0.051</b>

Berechnung der Erodierbarkeit:  $C = 1$ ,  $P = 1$ ,  $LS = 3.59$

\* ohne den Wert vom 1. Mai 96

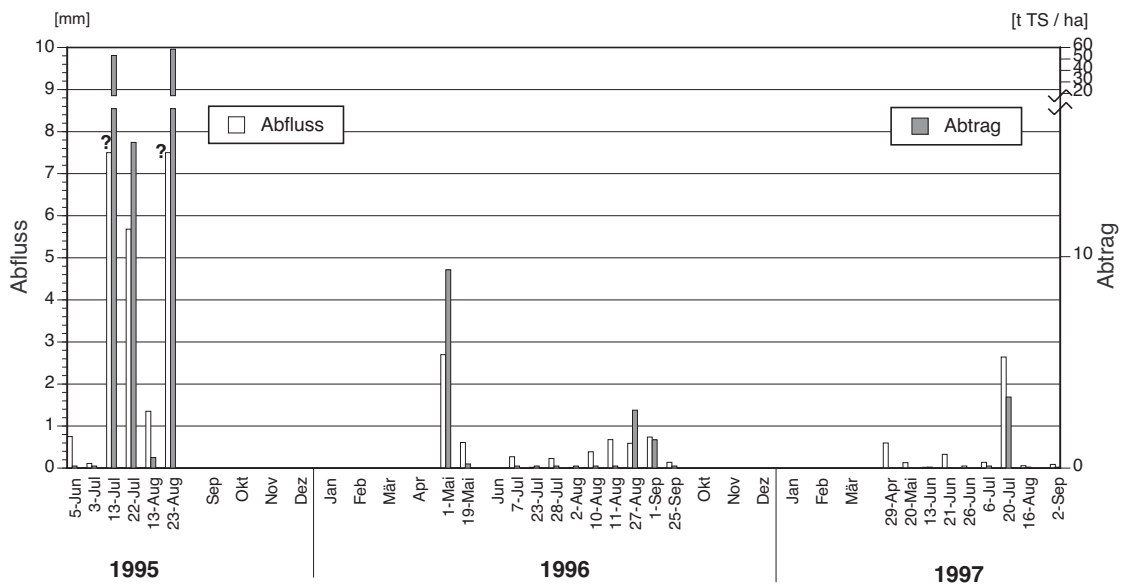


Abb. 12: Abtrag und Abfluss 1995 - 1997 auf der Erosionstestparzelle T50.

Das Jahr 1995 ist das erosionsreichste seit der Installation der Testparzelle 1983. Zu beachten ist die Stauung der Abtragsachse!

Entsprechend der Erosivität der Niederschläge (Abb. 9) konzentrieren sich auch die Abträge und Abflüsse auf der T50 sozusagen ausschliesslich auf das hydrologische Sommerhalbjahr (Tab. 14, Abb. 12). Dies ist vergleichbar mit früheren Messungen, steht aber nach PRASUHN (1991; 115-116) in klarer Diskrepanz zu den Feldkartierungen auf den umliegenden Ackerflächen. Dort wurden die Erosionsschäden fast ausschliesslich im Winterhalbjahr festgestellt. Dass die Feld- und Testparzellenmessungen so verschiedene Ergebnisse liefern, begründet er vor allem mit dem Auftreten unterschiedlicher Erosionsformen und der Bearbeitung oder der Pflanzenbedeckung.

Das Jahr 1995 zeigt sich als das erosivste Jahr seit dem Anlegen der Testparzelle (Abb. 14). Fast der gesamte Jahresabtrag wird von den beiden Ereignissen vom 13. Juli und 23.-28. August verursacht (Abb. 12). Das Ereignis im Juli mit 53 t ha<sup>-1</sup> Abtrag ist auf einen sehr erosiven Regen mit einem R-Faktor von 52.4 N h<sup>-1</sup> zurückzuführen. Das Ereignis vom 21. Juli, mit einem vergleichbaren r-Wert (50.3 N h<sup>-1</sup>) verursacht hingegen "nur" einen Abtrag von 15 t ha<sup>-1</sup>. Im Gegensatz dazu wurde das Ereignis vom 23.-28. August durch lang andauernde Niederschläge verursacht, welche einen aufsummierten r-Wert von nur 28.2 N h<sup>-1</sup> aufwiesen. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Niederschlagserosivität kein zuverlässiges Mass für das Erosionsgeschehen darstellt. Der wahrscheinlichste Grund für die unterschiedlichen Abträge bei gleichem r-Wert resp. vergleichbaren Abträgen bei unterschiedlichem r-Wert ist eine Veränderung der Erodierbarkeit durch das vorhergehende Niederschlags- und Erosionsgeschehen. PRASUHN (1991) führt die schlechte Korrelation auf Hagelschlag, welcher im r-Wert nicht berücksichtigt wird, auf den Einfluss der Bodenfeuchte und auf die Zunahme der Erodibilität durch Krustenbildung zurück.

Die Untersuchungen von POTRATZ ET AL. (1991) mit simulierten Starkregen auf unterschiedlich vorbefeuchteten und aggregierten Lössböden zeigt, dass eine vorbefeuchtete Oberfläche im aggregierten Zustand eine hohe Erosionsresistenz aufweist, während sie im verschlammten Zustand extrem erosionsanfällig ist. Dies bestätigt, dass bei gleicher Erosivität sowohl die Anfangsbodenfeuchte wie auch die Erodierbarkeit eine zentrale Rolle für das effektive Erosionsgeschehen spielen. Das Ereignis vom 21. Juli 95 dürfte eine ausgeprägte Schlammsschicht produziert haben, welche wahrscheinlich beim Ereignis vom 23.-28. August 95 zu den entsprechend hohen Abtragswerten führte.

BAJRACHARYA & LAL (1992) zeigen, dass es keinen Zusammenhang gibt zwischen der Erodierbarkeit des Bodens und der Erosivität. Die höchste Erodierbarkeit tritt nicht bei der höchsten Erosivität auf, woraus auch sie schliessen, dass die Erosion stark durch kurzfristig ändernde Bodenfaktoren und den Zustand der Bodenoberfläche - also die Erodierbarkeit - beeinflusst wird, welche kurzfristig sehr variabel sein kann.

In den Jahren 1996 und 1997 gibt es fast ausschliesslich kleine Abtrags- und Abflussereignisse. Eine Ausnahme bildet das Ereignis vom 1. Mai 1996, welches bei einem  $r$ -Wert von nur  $0.7 \text{ N h}^{-1}$  einen Abtrag von  $9.4 \text{ t ha}^{-1}$  und einen Abfluss von  $2.7 \text{ mm}$  liefert. Die Ursache hierfür ist nicht ganz klar, es ist jedoch möglich, dass die Parzelle kurz vor der Bearbeitung im Frühling schon sehr labile Bodenverhältnisse zeigte. Dies widerspricht allerdings den langjährigen Erfahrungen der FBB (Schaub 1999) und muss auf spezielle klimatische Verhältnisse zurückgeführt werden.

## **T1**

1995 führten insgesamt 6 Ereignisse zu Abfluss und 4 auch zu Abtrag. Wie schon bei der T50 führen die Ereignisse mit der höchsten Erosivität (3. Juli, 27. August) zwar zur höchsten Abflussmenge, aber nicht zum grössten Abtrag. Die Unterparzellen, P1, P2 und P3 unterscheiden sich nicht auffällig bezüglich der Abflussmenge. Die seit längerer Zeit unbearbeitete P2 weist sogar zu Beginn grössere Abflussmengen auf als die beiden anderen. Dies wird auf die schon zu diesem Zeitpunkt ausgebildete Kruste zurückgeführt. Beim Abtrag bestehen jedoch sehr deutliche Unterschiede. So weist die unbearbeitete P2 erstens deutlich niedrigere Abtragsmengen auf als die anderen Parzellen, zweitens bewegen sich die Mengen immer im ähnlichen Bereich (zwischen  $3\text{-}4 \text{ t*ha}^{-1}$ ). Es scheint sich also auch bei unbearbeiteten Schwarzbracheparzellen eine Art "steady state" in Bezug auf die Bodenablösung einzustellen, während die Abflussmengen wie bei den bearbeiteten Parzellen variieren. Auch AUERSWALD (1993) stellt eine kontinuierliche Abnahme der Erodierbarkeit nach der Bodenbearbeitung durch eine Konsolidierung der Bodenoberfläche fest.

Tab. 15: Abfluss und Abtrag 1995 und 1996 auf der Erosionstestparzelle T1

Während sich das Jahr 1995 als sehr erosionsreich darstellt, wurde 1996 überhaupt kein Abtrag oder Abfluss gemessen. Die Daten wurden von J. Fröhlich zur Verfügung gestellt.

I Datum	II NS-Menge [mm]	III R-Werte [N/h]	IV Abflußmenge [mm]				V Abtragsmenge [tTS/ha]				VI K-Werte [(t h)/(ha N)]			
			P1	P2	P3	Mittel	P1	P2	P3	Mittel	P1	P2	P3	Mittel
3. Jul1995 *	55.8	36.1	17.0	17.0	17.0	17.0	11.1	3.9	12.2	9.1	0.235	0.082	0.258	0.192
16. Jul 95	34.1	25.1	12.4	15.6	12.3	13.4	6.8	3.7	7.3	5.9	0.206	0.111	0.221	0.179
22. Jul 95	13.3	6.0	0.3	0.4	0.2	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
13. Aug 95	41.2	26.6	15.6	13.5	16.1	15.1	14.2	3.1	12.3	9.8	0.407	0.088	0.354	0.283
27. Aug1995 *	73.8	26.6	17.0	17.0	17.0	17.0	14.3	3.1	8.4	8.6	0.411	0.090	0.240	0.247
13. Sept 95	32.4	4.1	0.4	0.1	0.1	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SUMME '95</b>	<b>250.6</b>	<b>124.5</b>	<b>62.7</b>	<b>63.6</b>	<b>62.7</b>	<b>63.0</b>	<b>46.3</b>	<b>13.7</b>	<b>40.1</b>	<b>33.4</b>	<b>1.3</b>	<b>0.4</b>	<b>1.1</b>	<b>0.9</b>
<b>MITTEL '95</b>	<b>41.8</b>	<b>20.8</b>	<b>10.5</b>	<b>10.6</b>	<b>10.5</b>	<b>10.5</b>	<b>11.6</b>	<b>3.4</b>	<b>10.0</b>	<b>8.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>
<b>1996</b>	-	-	Keine Abfluß- bzw. Abtragswirksamen Ereignisse auf den drei Teilparzellen											

Berechnung der Erodierbarkeit: C = 1, P = 1, LS = 1.308

\* Auffangbehälter übergelaufen

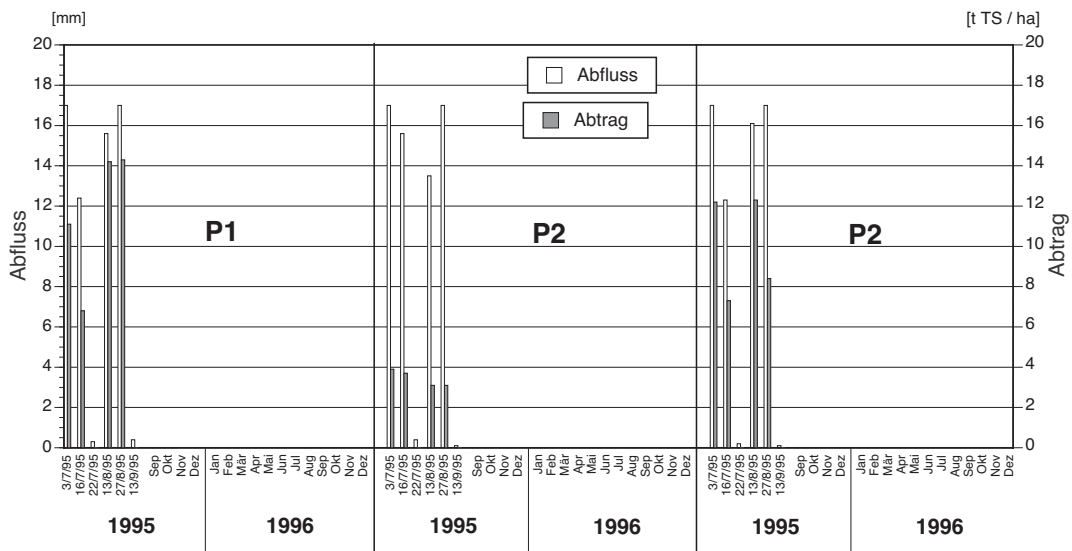


Abb. 13: Abtrag und Abfluss 1995 und 1996 auf der Erosionstestparzelle T1

Die seit 1992 unbearbeitete Parzelle P2 zeigt ähnliche Abflusswerte, aber deutlich weniger Abtrag als die beiden anderen Parzellen P1 und P2. Die Daten wurden von J. Fröhlich zur Verfügung gestellt.

### 3.1.3 Das Erosionsgeschehen auf der T50 im langjährigen Vergleich

Von 1983 bis 1997 wurden auf der Erosionstestparzelle T50 insgesamt 93 Abtragsereignisse registriert. Diese Zahl ist aus messtechnischen Gründen (der Abtrag wird nicht registriert, sondern nur gesammelt) als Mindestangabe zu verstehen, weil eine klare Zuordnung der Abtragsereignisse zu einem erosiven Niederschlag nicht immer möglich ist und es sich so in manchen Fällen auch um mehrere Abtragsereignisse handeln kann, welche als ein einzelnes ausgewertet wurden. Für alle diese Ereignisse wurde über die USLE ein durchschnittlicher jährlicher K-Faktor als  $K_{\text{gemessen}}$  rückgerechnet (Tab. 14, Tab. 16).



### 3.1.3.1 Abtrag und Abfluss im langjährigen Vergleich

Die Verteilung der Messwerte ist bei dieser langjährigen Messreihe extrem linksschief, das heisst wenige grosse Ereignisse liefern den grössten Teil des insgesamt gemessenen Abtrages, die zahlreichen kleinen Ereignisse tragen kaum zum langjährigen Abtrag bei (Abb. 14): So verursachen allein die vier grössten Ereignisse 50% des gesamten Abtrages, die 16 grössten Ereignisse schon über 80%. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch andere Studien (z.B. ARMSTRONG 1990, EDWARDS & OWENS 1991).

Werden die Jahresabträge mit den R-Faktoren verglichen (Tab. 16) zeigt sich zwar die Tendenz zu hohen Jahresabträge bei hohen R-Faktoren (1990, 1994, 1995), aber andererseits zeigen Jahre mit vergleichbarem R-Faktor sehr unterschiedliche Abtragswerte (1988, 1992, 1996, 1997). Dies ist ein weiterer Hinweis, dass mit der USLE und ihren Faktoren nur Aussagen bezüglich langjährigen Mittelwerten gemacht werden können. Auch nach mehr als zehn Jahren scheint also ein von PRASUHN (1991) erwarteter stabiler Bodenzustand, bei welchem sich ein allein von der Erosivität der Niederschläge abhängiger Bodenabtrag einstellen würde, noch nicht erreicht. Die langjährigen durchschnittlichen Bodenabträge liegen noch weit unter den nach der USLE berechneten Abträgen (Tab. 16).

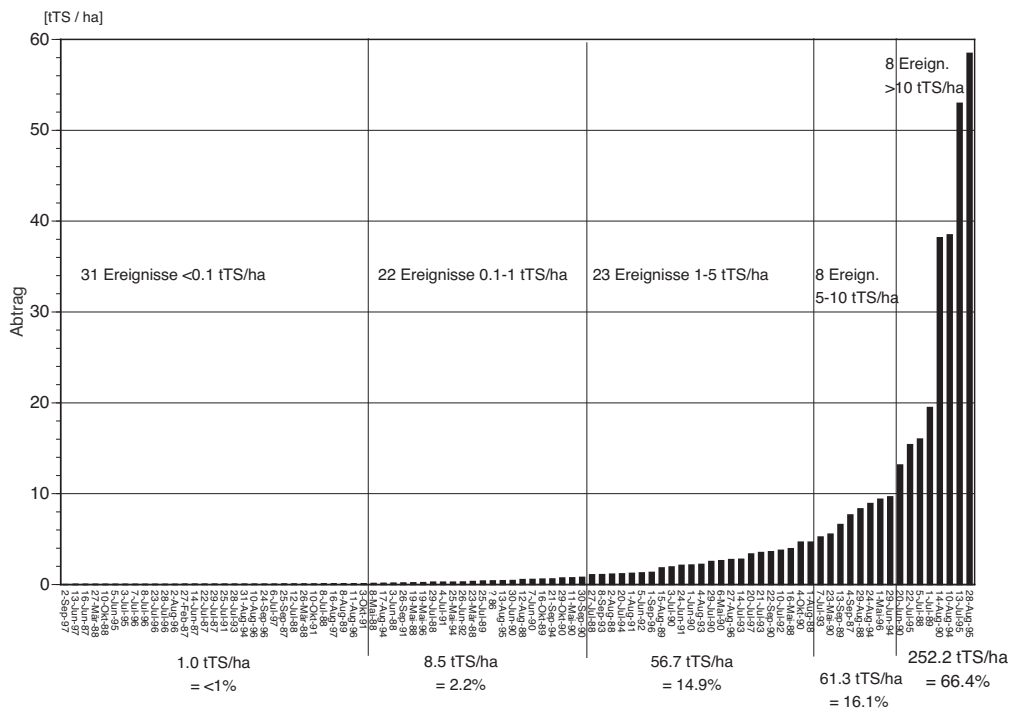


Abb. 14: Langjährige Abtragsereignisse auf der T50 von 1983 - 1997

Die Ereignisse wurden nach der Grösse geordnet. Die vier grössten Ereignisse machen bereits 50 % aller auf der T50 gemessenen Abträge aus, die 16 grössten über 80%. Daten nach PRASUHN 1991, ergänzt (Tab. 14).

### 3.1.3.2 Die Erodierbarkeit im langjährigen Vergleich

Obwohl die extremen Abträge im Jahr 1995 auf eine Zunahme der Erodibilität, wie sie von PRASUHN (1991) angenommen wird, hinweist, kann diese Erwartung auch nach mehr als zehn

Jahren Testparzellenbetrieb nicht bestätigt werden. Der grosse "Sprung" in der Erodibilität dürfte sich in den ersten drei bis fünf Jahren nach Anlegen der Testparzelle mit dem Sinken des organischen Kohlenstoff-Gehaltes auf fast die Hälfte (Tab. 7) des Ausgangszustandes vollzogen haben. Ein einigermaßen stabiler Bodenzustand hat sich also bereits nach rund fünf Jahren eingestellt. Der rückgerechnete K-Faktor  $K_{\text{gemessen}}$  ist auch im langjährigen Durchschnitt mit  $0.095 \text{ t h ha N}^{-1}$  bedeutend tiefer als der nach USLE langjährig konstante K-Faktor von  $0.20 \text{ t h ha N}^{-1}$  (Tab. 16). Die Bestimmung des K-Faktors nach USLE lieferte allerdings auch jährlich unterschiedliche Werte (vgl. Anhang A1).

BAJRACHARYA & LAL (1992) fanden bei ihren Untersuchungen über zwei Jahre zwar eine bessere Übereinstimmung zwischen dem jährlich gemessenen K-Faktor nach USLE und dem rückgerechneten  $K_{\text{gemessen}}$ , aber auch in ihrer Studie war der langjährige konstante K-Faktor deutlich höher als die beiden jährlich bestimmten Werte. Römken et al. (1975) fand entsprechend tiefere, in Berechnungsversuchen gemessene, K-Faktoren als die gemäss USLE bestimmten K-Faktoren. Auch verschiedenste andere Studien bestätigen die zeitliche Variabilität des K-Faktors (ALBERTS ET AL. 1987, FREDE ET AL. 1988, IMESON & KWAAD 1990, YOUNG ET AL. 1990), welcher gemäss den vorliegenden Untersuchungen weder die USLE noch die RUSLE genügend Rechnung tragen.

Die im Vergleich zum langjährigen K-Faktor nach USLE tiefe gemessene Erosionsneigung kann folgende Gründe haben: (i) Regelmässiger Abtrag der erosionsanfälligen Bodenoberfläche exponiert immer wieder intaktes Bodenmaterial von unten mit tieferer Erodierbarkeit (BAJRACHARYA & LAL 1992, ). (ii) Die Bodenerodierbarkeit variiert räumlich sehr stark (KERNER & MURSCHEL 1991, BAJRACHARYA & LAL 1992, MARTZ 1992)

Tab. 16: Abträge gemessen und modelliert nach USLE

Die Abträge wurden nach der USLE mit konstanten resp. jährlich angepassten K-Faktoren modelliert. Auch nach 10 Jahren liegt der konstante K-Faktor deutlich über dem über die reellen Ereignisse zurückgerechneten K-Faktor ( $K_{\text{gemessen}}$ ).

Jahr	R-Faktor [N/h]	Kgemess.3) [(t h)/(ha N)]	Abträge in [tTS ha-1 y-1]			
			gemessen	nach USLE 1) mit Kkonst 2)	nach USLE mit Kgemess. 3)	nach RUSLE 4)
1983	–	–	0.00	–	–	–
1984	–	–	0.00	–	–	–
1985	–	–	0.00	–	–	–
1986	–	–	0.40	–	–	–
1987	140.7	0.010	7.81	101.02	5.05	–
1988	85.5	0.075	36.91	61.39	23.02	–
1989	63.8	0.178	28.96	45.81	40.77	–
1990	180.8	0.154	77.57	129.81	99.96	–
1991	76.2	0.018	3.93	54.71	4.92	–
1992	83.7	0.117	5.52	60.10	35.16	–
1993	186.6	0.084	14.84	133.98	56.27	–
1994	236.2	0.169	59.20	169.59	143.30	–
1995	208.2	0.160	127.28	149.49	119.59	108
1996	88.7	0.034	13.79	63.69	10.83	49
1997	83.8	0.051	3.40	60.17	15.34	54
Summe	–	–	379.61	1029.76	554.21	–
Mittelwert*	130.4	0.095	34.47	93.61	50.38	–

1) nach W. H. Wischmeier & D. D. Smith 1978; LS = 3.59

2) Kkonstant = 0.20

3) Kgemessen: Mittelwert der rückgerechneten K-Faktoren aller Abtragsereignisse dieses Jahres

4) nach K. G. Reanard & V. A. Ferreira (1993)

\* die ersten vier Jahre wurden nicht berücksichtigt

## 3.2 Zeitliche und räumliche Variabilität der Bodenparameter

### T50

Im Vergleich zu den Testparzellen zeigt der Boden des daneben liegenden Dauergrünlandes einen tieferen pH-Wert und einen höheren Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff. Der Gehalt an anorganischem Kohlenstoff ist etwa derselbe. Die Korngrössenanalyse des Grünlandbodens ergibt ausserdem einen leicht höheren Gehalt an Ton und einen entsprechenden tieferen Gehalt an Sand, während beim Schluffgehalt vergleichbare Werte resultieren.

Beim Vergleich der Parzellenabschnitte zeigen vor allem drei Grössen deutliche Unterschiede: Der organische C- und N-Gehalt sind im oberen Parzellenbereich deutlich tiefer als im unteren Bereich. Dies dürfte mit dem Tongehalt zusammenhängen, welcher im unteren Parzellenbereich auch deutlich höher ist als im oberen. Die Werte des mittleren Bereichs liegen meistens dazwischen. Die dauernde Erosion auf der Testparzelle dürfte zu einer oberflächlichen, abwärtsgerichteten Tonverlagerung geführt haben. Im Gegensatz dazu finden sich oben höhere anorganische C-Gehalte als unten. Dies wird durch den regelmässigen Abtransport des oberflächlichen, ausgewaschenen Bodenmaterials begründet, was dazu führt, dass carbonatreicherer Bodenmaterial an die Oberfläche tritt. Entsprechende Resultate lieferte auch eine Untersuchung mit Regensimulationen von MARTZ (1992), allerdings auf kultiviertem, unbearbeitetem Prairieboden und die Studien von PIERSON & MULLA (1990) sowie von GOLLANY ET AL. (1992) auf bewirtschaftetem Ackerland.

Tab. 17: Räumliche und zeitliche Variabilität der chemischen und physikalischen Bodenparameter auf der T50

Datum	Parzellen-Abschnitt	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	C anorg [%]	C org [%]	N org [%]	Korngrössenverteilung			ffS [%]	S(-ffS-ggS) [%]
							Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]		
21. Jul 95	T50 oben	7.8	6.9	0.74	2.21	0.24	13.3	46.0	40.7	8.42	4.52
	T50 mitte	7.6	6.8	0.63	2.34	0.25	12.9	45.4	41.7	9.55	2.92
	T50 unten	7.7	6.9	0.56	2.42	0.25	11.8	46.2	42.0	8.04	3.17
	<b>Mittel</b>	<b>7.7</b>	<b>6.9</b>	<b>0.64</b>	<b>2.32</b>	<b>0.25</b>	<b>12.7</b>	<b>45.9</b>	<b>41.5</b>	<b>8.67</b>	<b>3.54</b>
21. Jul 95	T50 DG oben	7.5	6.7	0.54	4.15	0.44	10.5	45.5	44.0	8.02	2.30
	T50 DG mitte	7.3	6.8	0.73	4.08	0.45	11.5	46.1	42.4	8.46	2.82
	T50 DG unten	7.3	6.6	0.67	4.10	0.20	10.3	46.9	42.8	7.88	2.32
	<b>Mittel</b>	<b>7.3</b>	<b>6.7</b>	<b>0.65</b>	<b>4.11</b>	<b>0.37</b>	<b>10.8</b>	<b>46.2</b>	<b>43.1</b>	<b>8.12</b>	<b>2.48</b>
15. Nov 95	T50 oben	7.8	6.8	0.71	2.22	0.24	11.0	48.7	40.3	6.54	3.26
	T50 mitte	7.8	6.8	0.60	2.30	0.26	11.3	49.1	39.6	7.91	2.89
	T50 unten	7.7	6.8	0.56	2.42	0.26	9.3	50.7	40.1	6.40	1.96
	<b>Mittel</b>	<b>7.8</b>	<b>6.8</b>	<b>0.62</b>	<b>2.31</b>	<b>0.25</b>	<b>10.5</b>	<b>49.5</b>	<b>40.0</b>	<b>6.95</b>	<b>2.70</b>
6. Jun 96	T50 oben	7.8	6.7	0.78	2.10	0.24	12.8	46.4	40.8	7.41	4.40
	T50 mitte	7.7	6.7	0.45	2.51	0.20	11.6	46.0	42.4	7.37	3.13
	T50 unten	7.7	6.7	0.40	2.59	0.22	10.1	47.1	42.8	6.64	2.96
	<b>Mittel</b>	<b>7.7</b>	<b>6.7</b>	<b>0.54</b>	<b>2.40</b>	<b>0.22</b>	<b>11.5</b>	<b>46.5</b>	<b>42.0</b>	<b>7.14</b>	<b>3.50</b>
9. Okt 96	T50 oben	7.9	7.0	0.68	2.24	0.21	12.0	50.9	37.1	7.80	3.76
	T50 mitte	7.9	7.0	0.50	2.54	0.24	12.2	46.9	40.9	8.03	3.97
	T50 unten	7.9	7.0	0.42	2.60	0.24	12.6	45.5	41.9	7.90	3.99
	<b>Mittel</b>	<b>7.9</b>	<b>7.0</b>	<b>0.53</b>	<b>2.46</b>	<b>0.23</b>	<b>12.3</b>	<b>47.8</b>	<b>40.0</b>	<b>7.91</b>	<b>3.91</b>
27. Mai 97	T50 oben	7.8	6.9	0.72	2.18	0.23	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	T50 mitte	7.8	6.9	0.35	2.51	0.24	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	T50 unten	7.7	6.8	0.32	2.55	0.24	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	<b>Mittel</b>	<b>7.8</b>	<b>6.8</b>	<b>0.46</b>	<b>2.41</b>	<b>0.24</b>					

DG = Dauergrünland, Wiese neben Testparzelle  
n.a. = nicht analysiert

Die chemischen Parameter zeigen keine grossen Veränderungen über die Zeit. Der einzige Wert, der im Verlauf der Zeit gesunken ist, ist der anorganische C-Gehalt. Dies wird mit dem Auswaschen (Verwittern) der obersten Zentimeter Boden interpretiert. Der organische C- und N-Gehalt zeigen tendenziell eine leichte Zunahme. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass während dem sehr erosionsreichen Jahr 1995 organisches Material mit der oberflächlichen Tonverlagerung weggeschwemmt wurde, während in den folgenden, erosionsarmen Jahren eher wieder organisches Material (z.B. durch Windeintrag vom umgebenden Grünland) angereichert werden konnte. Dass die Korngrössen-Zusammensetzung im Verlauf der Jahre leicht schwankt, ohne eine klare Auf- oder Abwärtstendenz aufzuweisen, kann ein Hinweis auf die kleinräumige Heterogenität des Bodens und die Messungenauigkeit der Bodenanalysen sein.

## T1

Bei der T1 wurden nur während zwei Zeitpunkten die chemischen Bodenparameter bestimmt, weshalb auf eine Interpretation der zeitlichen Variabilität verzichtet wird. Im Vergleich zu den Testparzellen zeigt das daneben liegende Dauergrünland, wie schon bei der T50, einen tieferen pH-Wert und einen zu erwartenden höheren Gehalt an organischem Kohlenstoff und Stickstoff. Da es sich bei dem Dauergrünland neben der T1 um einen gestörten Boden handelt, was auch an der kleinräumigen, auffälligen Änderung der Bodenart zu erkennen ist, werden keine weiteren Vergleiche zwischen den beiden Standorten angestellt.

Tab. 18: Räumliche und zeitliche Variabilität der chemischen und physikalischen Bodenparameter auf der T1

Datum	Parzellen-Abschnitt	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	C anorg [%]	C org [%]	N org [%]	Korngrössenverteilung			ffS [%]	S(-ffS-ggS) [%]
							Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]		
21. Jul 95	MP1 oben	7.6	6.7	n.a.	1.59	0.18	20.3	46.4	33.3	5.02	14.47
	MP1 unten	7.5	6.6	n.a.	1.38	0.14	18.5	48.8	32.8	5.85	11.81
	<b>Mittel</b>	<b>7.5</b>	<b>6.7</b>		<b>1.49</b>	<b>0.16</b>	<b>19.4</b>	<b>47.6</b>	<b>33.0</b>	<b>5.44</b>	<b>13.14</b>
21. Jul 95	MP2 oben	7.6	6.7	n.a.	2.01	0.21	25.4	42.2	32.5	9.03	15.72
	MP2 unten	7.6	6.7	n.a.	1.63	0.17	21.9	47.1	31.1	5.81	14.74
	<b>Mittel</b>	<b>7.6</b>	<b>6.7</b>		<b>1.82</b>	<b>0.19</b>	<b>23.6</b>	<b>44.6</b>	<b>31.8</b>	<b>7.42</b>	<b>15.23</b>
21. Jul 95	MP3 oben	7.7	6.7	n.a.	2.05	0.21	19.7	46	34.34	5.29	13.58
	MP3 unten	7.5	6.8	n.a.	1.77	0.17	17.9	50.23	31.91	5.35	12.01
	<b>Mittel</b>	<b>7.6</b>	<b>6.7</b>		<b>1.91</b>	<b>0.19</b>	<b>18.8</b>	<b>48.1</b>	<b>33.1</b>	<b>5.32</b>	<b>12.80</b>
21. Jul 95	MDG oben	6.4	5.7	n.a.	3.45	0.28	48.2	34.3	17.5	8.22	38.42
	MDG unten	6.3	5.3	n.a.	4.75	0.45	15.8	57.8	26.4	7.09	8.42
	<b>Mittel</b>	<b>6.4</b>	<b>5.5</b>		<b>4.10</b>	<b>0.37</b>	<b>32.0</b>	<b>46.0</b>	<b>21.9</b>	<b>7.66</b>	<b>23.42</b>
8. Okt 96	MP1 oben	7.9	6.9	0.07	2.33	0.20	19.3	48.4	32.3	4.8	14.0
	MP1 mitte	8.0	6.9	0.04	1.80	0.18	16.9	48.8	34.3	4.8	10.2
	MP1 unten	8.0	6.8	0.00	1.64	0.15	18.4	50.5	37.1	5.1	11.4
	<b>Mittel</b>	<b>7.9</b>	<b>6.9</b>	<b>0.04</b>	<b>1.92</b>	<b>0.18</b>	<b>18.19</b>	<b>49.24</b>	<b>34.58</b>	<b>4.89</b>	<b>11.85</b>
8. Okt 96	MP2 oben	7.9	6.9	0.07	2.25	0.20	16.6	48.4	35.0	4.4	10.8
	MP2 mitte	7.9	6.8	0.05	2.35	0.20	16.5	50.1	33.4	4.7	10.6
	MP2 unten	7.9	6.8	0.03	2.13	0.18	17.8	51.7	30.5	5.0	11.1
	<b>Mittel</b>	<b>7.9</b>	<b>6.8</b>	<b>0.05</b>	<b>2.24</b>	<b>0.19</b>	<b>16.97</b>	<b>50.06</b>	<b>32.97</b>	<b>4.67</b>	<b>10.85</b>
8. Okt 96	MP3 oben	8.0	6.8	0.03	1.85	0.17	17.2	46.8	36.1	4.2	11.7
	MP3 mitte	8.0	6.8	0.07	2.20	0.20	17.8	46.9	35.3	4.9	11.6
	MP3 unten	7.9	6.8	0.05	2.07	0.18	19.3	51.1	29.6	5.5	11.9
	<b>Mittel</b>	<b>8.0</b>	<b>6.8</b>	<b>0.05</b>	<b>2.04</b>	<b>0.18</b>	<b>18.05</b>	<b>48.28</b>	<b>33.67</b>	<b>4.85</b>	<b>11.74</b>

DG = Dauergrünland, Wiese neben Testparzelle  
n.a. = nicht analysiert

Der Vergleich der Parzellenabschnitte ergibt nur bei den organischen C- und N-Gehalten einen Unterschied. Sie sind im oberen Parzellenbereich tendenziell tiefer als im unteren Bereich, wobei die Unterschiede bei der seit mehreren Jahren unbearbeiteten P2 am geringsten ist. Bei der T1 lässt sich das jedoch nicht mit einem entsprechenden Tongehalt begründen. Dieser ist mit einer Ausnahme nämlich auch im oberen Parzellenbereich am höchsten, genauso wie der Sandgehalt. Dafür sind die Schluffwerte im oberen Bereich tendenziell niedriger als am Fusse der Parzellen, was den Erkenntnissen von MARTZ (1992) entspricht. Er interpretiert diese so, dass ein selektiver Partikeltransport durch flächenhafte Erosion (*wash*) Schluffpartikel eher von der Hangschulter und vom Mittelhang zum Unterhang und zum Hangfuss transportiert und Tonpartikel eher vom Mittelhang und Unterhang zum Hangfuss verlagert.

Interessant ist der Vergleich zwischen den drei nebeneinander liegenden Parzellenabschnitten P1, P2, P3. Währenddem P1 und P3 normal bearbeitet werden, wurde P2 seit 1992 nicht mehr umgebrochen und gereicht. Unterschiede zeigen sich vor allem beim organischen C- und N-Gehalt, welcher bei der P2 am höchsten ist, was (i) mit der zeitweiligen Bepflanzung im Rahmen spezieller Untersuchungen (SCHAUB 1989, UNTERSEHER 1997) zusammenhängen kann (ANGERS ET AL. 1992) und (ii) durch geringeren durch Erosion verursachten Materialabtransport begründet sein dürfte. Der organische C- und N-Gehalt ist aber auch bei der P3 deutlich höher als bei der P1. Die Gründe dafür liegen in der Parzellengeschichte. Die P3 wurde bis 1989 längs-gepflügt und war bepflanzt, was insgesamt zu geringerer Erosion und geringerem Gesamtverlust an Nährstoffen führte (SCHAUB 1989). Bei den Bodenarten fällt auf, dass der Tongehalt bei der P2 leicht niedriger ist als bei der P1 und P3. Dies könnte mit einer vertikalen Tonverlagerung in der unbearbeiteten Parzelle zusammenhängen.

#### Fazit

- Bei der steileren T50 kommt es aufgrund des Erosionsgeschehens eher zu einer oberflächlichen Ton- und damit auch  $C_{org}$ -Verlagerung gegen den Parzellenfuss als bei der flacheren T1.
- Im oberen Parzellenbereich werden bei beiden Parzellen eher niedrigere organische C-Gehalte festgestellt, was durch die geringeren Tongehalte aufgrund von hangabwärts Partikeltransport begründet ist.
- Im oberen Parzellenbereich findet sich - wahrscheinlich aufgrund der Freilegung von carbonathaltigem noch nicht ausgewaschenem Bodenmaterial - ein eher höherer anorganischer C-Gehalt.
- Der anorganische C-Gehalt sinkt im Verlauf der Zeit, was auf oberflächliche Auswaschungsvorgänge zurückgeführt wird.

### **3.3 Spezielle Untersuchungen zur Erodierbarkeit**

Die speziellen Untersuchungen zur Erodierbarkeit wurden auf der Erosionstestparzelle T1 während zwei und auf der T50 während drei Jahren durchgeführt. Die statistischen Berechnungen (Korrelationen, Stepwise Regression) wurden nur auf der T50 durchgeführt, da die Datengrundlage auf der T1 zu schmal war.

#### **3.3.1 Verhalten verschiedener Bodenfaktoren im Jahresverlauf und in verschiedenen Hanglagen**

##### **3.3.1.1 Aggregatstabilität**

###### **T50**

Vor allem 1995 schwankt die mit der Perkulationsmethode gemessene Aggregatstabilität (in der Folge Perkulationsstabilität genannt) stark, die höchste Durchflussrate (d.h. höchste Stabilität) liegt bei 300 ml/10min, die tiefste bei weniger als 50 ml. Die höchste Stabilität wird Mitte Juli gemessen, anschliessend sinken die Werte wieder nahezu auf den Anfangszustand zurück.

1996 und vor allem 1997 sind die Schwankungen der Werte bedeutend geringer. 1996 liegen die Höchstwerte noch bei rund 140 ml/10min, 1997 schwanken die Werte durch den ganzen Sommer nur noch gering zwischen 40 und 80 ml.

Verschiedenste Untersuchungen beschäftigten sich bereits mit der zeitlichen Variabilität der Aggregatstabilität (z.B. HOFMAN & APPELMANS 1975, FREDE ET AL. 1988, IMESON & KWAAD 1990, MULLA ET AL. 1992) allerdings fast immer auf Ackerstandorten. Für die Veränderung der Aggregatstabilität werden verschiedene Gründe genannt: Niederschlagsgeschehen, Bodenfeuchte, Bearbeitungsmassnahmen, durch das meteorologische Geschehen beeinflusster Auf- und Abbau von organischem Material, mikrobiologische Prozesse oder der Einfluss von Gefrier-Auftau- resp. Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen. HOFMAN & APPELMANS (1975) fanden z.B. auf bearbeiteten Löss-Ackerböden die tiefste Aggregatstabilität zwischen Januar und März und die höchste zwischen Juli und September. Im Gegensatz dazu fanden IMESON & KWAAD (1990) die höchste Aggregatstabilität von August bis September und die tiefste von Mai bis Juli, und MULLA ET AL. (1992) stellten von Oktober bis März eine Abnahme und von März bis Juni einen Anstieg der Aggregatstabilität fest. Einen guten Überblick über den Zusammenhang zwischen den zeitlichen Schwankungen der Aggregatstabilität und damit verbunden der Erodibilität liefern BRYAN ET AL. (1989) sowie YOUNG ET AL. (1990). Beide zeigen, dass die Aggregatstabilität eine sehr gut geeignete Grösse ist, um den dynamischen Charakter der Erodierbarkeit zu beschreiben. Die vorliegende Untersuchung legt allerdings auch den Schluss nahe, dass die Aggregatstabilität sehr kurzfristig stark schwanken kann und deshalb der Probenahmezeitpunkt eine sehr wichtige Rolle spielt.

Interessant ist dabei sicher der Zusammenhang zwischen dem Niederschlags- resp. Erosionsgeschehen und dem Verhalten der Aggregatstabilität, welcher im Kap. 3.3.2 statistisch untersucht wird. Im Sommer 1995 führten eher wenige, aber sehr erosive Niederschläge zu grossen Abträgen. Im Gegensatz dazu fielen die Niederschläge im Sommer 1996 und 1997 eher gleichmässig, waren kaum erosiv und lösten auch kaum Abtrag oder Abfluss aus (Tab. 14). 1995, als sehr viele erosive Niederschläge fielen und es ein entsprechendes hohes Abtragsvolumen gab, wies die Aggregatstabilität entsprechend hohe Schwankungen auf. In den Jahren mit geringen erosiven Niederschlägen (1996 und 1997) und entsprechend vernachlässigbaren Abträgen war auch die Aggregatstabilität gesamthaft gesehen viel tiefer und die Schwankungen wiesen eine viel geringere Amplitude auf. Das Niederschlags- und Erosionsgeschehen muss also einen Einfluss auf die Aggregatstabilität haben (SIEGRIST 1997). Dabei sind zwei Szenarien wahrscheinlich:

- Fall 1: stark erosiver Niederschlag mit Abtrag -> Bereitstellung von transportierbarem Material -> Abtrag des bereitgestellten Materials -> Aggregatstabilität hoch -> Erodierbarkeit tief.
- Fall 2: schwach erosiver Niederschlag ohne Abtrag -> Bereitstellung von transportierbarem Material -> Bereitgestelltes Material bleibt liegen -> Aggregatstabilität tief -> Erodierbarkeit hoch.

GOLLANY ET AL. (1991) finden allerdings in ihrer Untersuchung mit verschieden stark erodierten Böden, dass je stärker die Erosion des Oberbodens ist, umso stärker auch die Aggregatstabilität abnimmt, was sie mit einer Abnahme im organischen C-Gehalt begründen. Es dürfte also sehr stark vom Ausmass des vorherigen Erosionsgeschehens abhängen, ob die Erosionsneigung eher erhöht oder hinuntergesetzt wird. Bei den seit längeren brach gehaltenen Testparzellen dürfte der grundsätzlich tiefe organische C-Gehalt für die Aggregatstabilität eine weniger zentrale Rolle spielen als bei normal bewirtschafteten Ackerböden.

Interessant ist das unterschiedliche Verhalten der Proben aus den drei Testparzellenbereichen oben, mitte und unten. Obwohl fast immer der mittlere Testparzellenbereich die höchste und der untere Testparzellenbereich die niedrigste Aggregatstabilität aufwies, liessen sich diese Unterschiede statistisch nicht signifikant beweisen ( $p=0.05$ ). Deshalb wurden für weitere Berechnungen jeweils nur die Mittelwerte der drei Parzellenmessungen berücksichtigt. Die tiefe Aggregatstabilität im unteren Parzellenbereich könnte aber darauf zurückzuführen sein, dass sich dort erodiertes Material aus den oberen Bereichen abgelagert hat, welches insgesamt verschlammungsanfälliger ist.

Die Abnahme der Aggregatstabilität zum Hangfuss hin steht im Widerspruch zu den Untersuchungen von PIERSON & MULLA (1990), wo die Aggregatstabilität - allerdings auf bearbeiteten Ackerböden - zum Hangfuss hin abnimmt. Dies dürfte auch durch die Wahl der Methode zur Aggregatstabilitätsmessung begründet sein. So misst die in der vorliegenden Untersuchung verwendete Perkulationsstabilität die Anfälligkeit des Bodens zur Verschlämmung. Diese dynamische Methode (SEKERA & BRUNNER 1942; SIEGRIST 1995), welche die Auswirkungen der Aggregaterstörung misst, scheint deshalb für die Bestimmung der Aggregatstabilität

sehr geeignet, da diese ja als Mass für die Erodierbarkeit im Feld angewandt werden soll. Wie im Kap. 1.4 bereits dargestellt wurde, spielt dabei der Zustand der Bodenoberfläche eine zentrale Rolle, welcher sich im Verlauf eines Niederschlagsereignisses stark dynamisch verhält. PIERSON & MULLA (1990) verwenden in ihrer Studie hingegen eine statische Methode (Hochenergie-Anfeuchtmethode), welche nur der momentanen Aggregatzerstörung Rechnung trägt.

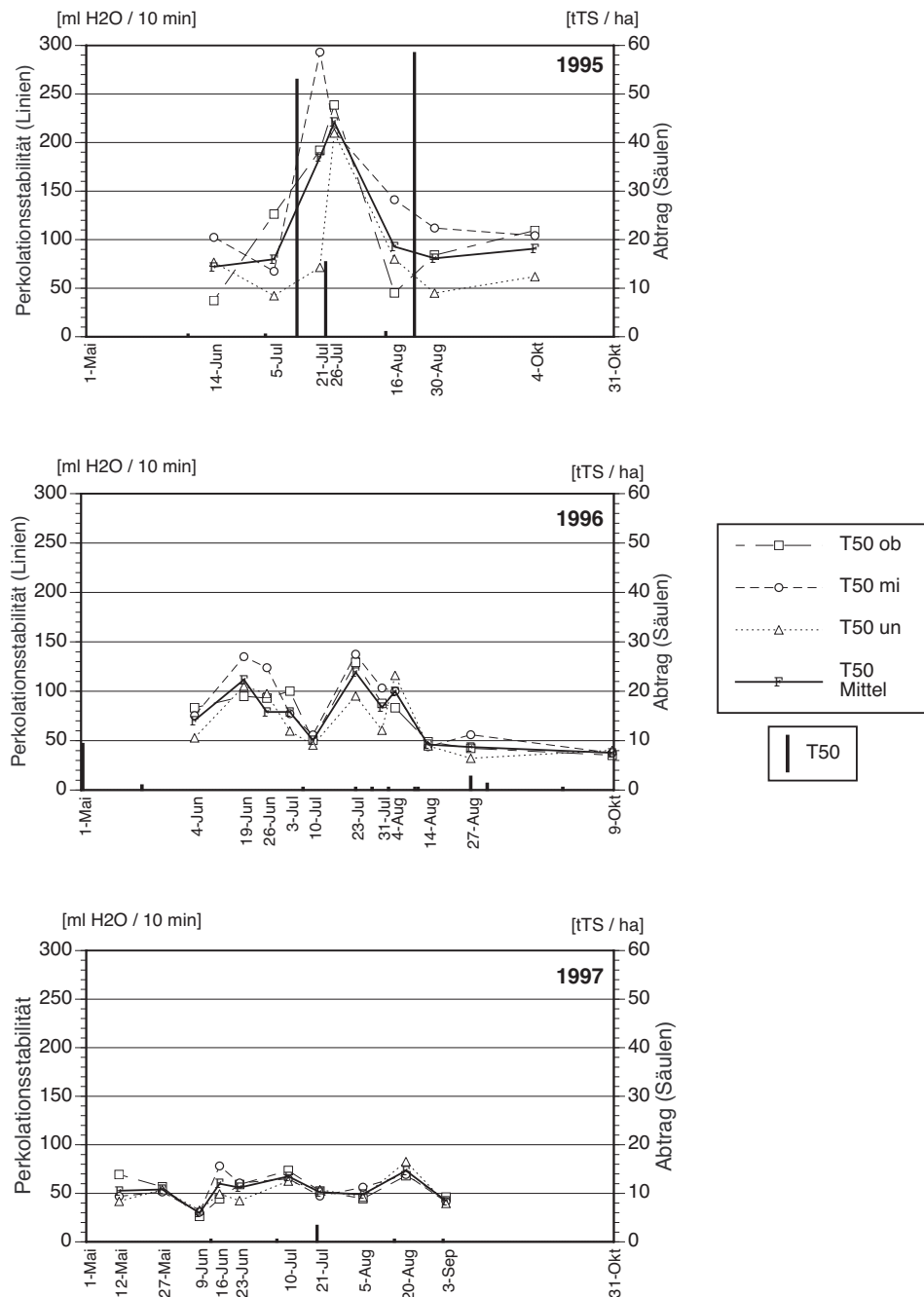


Abb. 15: Perkolationsstabilität und Abtrag auf der Testparzelle T50

Die Perkolationsstabilität weist tendenziell im Juli die höchsten Werte auf. Die Schwankungen sind im abtragsreichen 1995 am grössten. Detailliertere Daten im Anhang (A7).



**T1**

Die Kurven der gemessenen Perkolationsstabilität zeigen 1995 und 1996 einen ähnlichen Verlauf und die Werte liegen in ähnlichen Bereichen. Auch bei der T1 zeigt der obere Bereich höhere Werte als der untere Bereich, was auf den Abtransport von losgelöstem Material zurückgeführt wird. In beiden Jahren zeigt die Parzelle P2, welche seit mehreren Jahren unbearbeitet blieb, die höhere Aggregatstabilität als die beiden bearbeiteten Parzellen. Sowohl 1995 als auch 1996 gibt es im Juli Spitzenwerte, welche in allen drei Parzellen deutlich höher sind als die restlichen Werte. Am auffälligsten ist dieser Spitzenwert aber auch bei der unbearbeiteten Parzelle P2, wo die Werte auf 250 resp. über 300 ml/10min steigen.

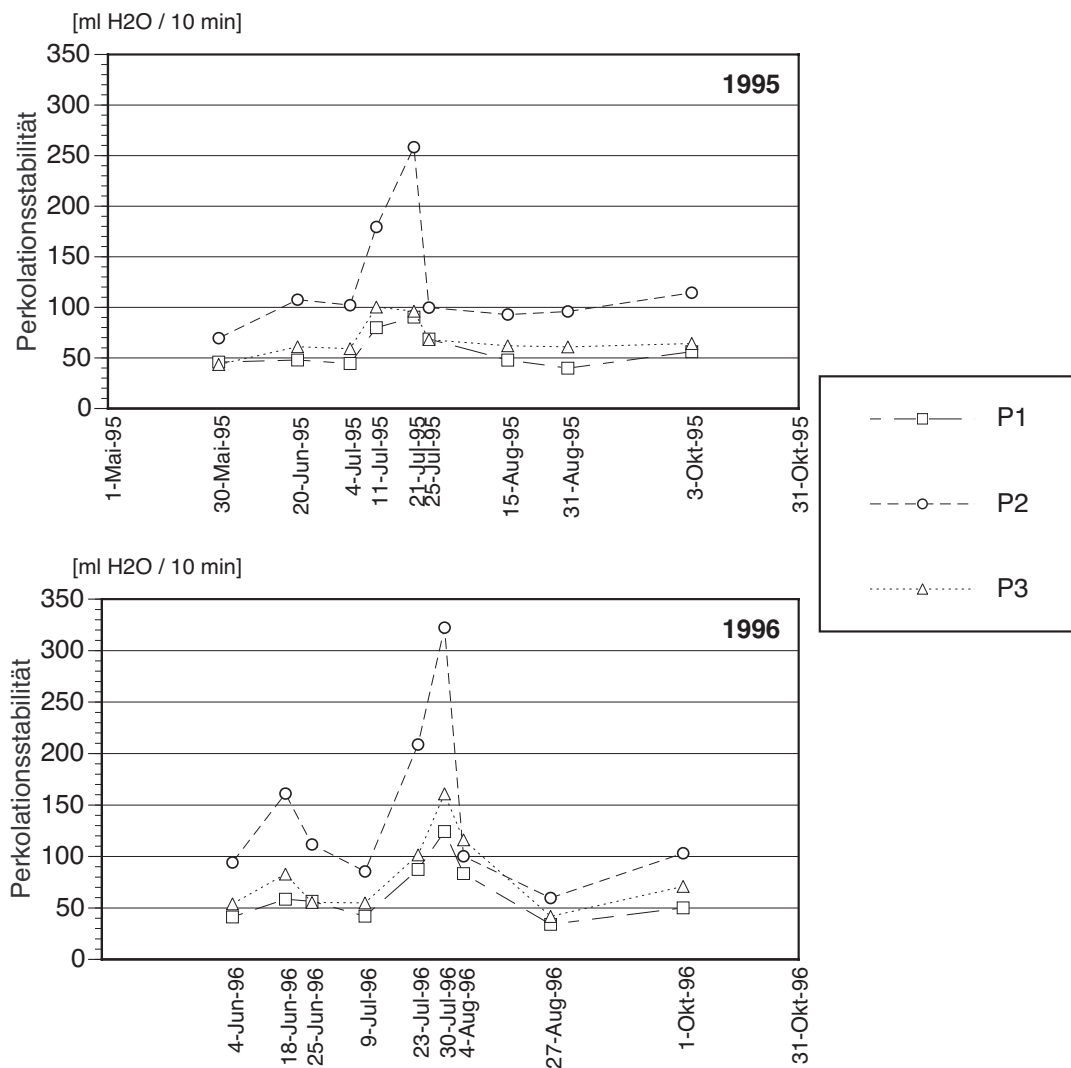


Abb. 16: Perkolationsstabilität auf der Testparzelle T1.

Die Perkolationsstabilität weist tendenziell im Juli die höchsten Werte auf. Die unbearbeitete Parzelle P2 weist zu fast allen Zeitpunkten die höchste Stabilität auf. Detailliertere Daten im Anhang (A8).

**Fazit**

- Trotz höchstem Ton- und organischem C-Gehalt ist die Aggregatstabilität im unteren Parzellenbereich am niedrigsten, was mit der Verschlammungsanfälligkeit des angeschwemmten Materials interpretiert wird.
- Das Niederschlags- und Erosionsgeschehen hat über die Bereitstellung und den Abtransport von losgelöstem instabilem Bodenmaterial einen wichtigen Einfluss auf die Aggregatstabilität.
- Im Verlauf der Vegetationsperiode weist die Aggregatstabilität ein Maximum im Juli auf, um im August eher wieder abzunehmen.
- Längere Zeit unbearbeitete Parzellen zeigen eine höhere Aggregatstabilität als die zweimal pro Jahr bearbeiteten.

**3.3.1.2 Scherwiderstand**

**T50**

Der Scherwiderstand wurde 1996 und 1997 gemessen. 1996 schwanken die Werte zwar stark, allerdings mit relativ geringer Amplitude (zwischen 8 und 12 kg/m<sup>2</sup>\*10<sup>-2</sup>). 1997 ist eine Zunahme des Scherwiderstandes von Juni bis fast Ende Juli zu verzeichnen (von 5 auf 9 kg/m<sup>2</sup>\*10<sup>-2</sup>), anfangs August sinkt dann der Scherwiderstand auf unter 4 kg/m<sup>2</sup>\*10<sup>-2</sup> ab.

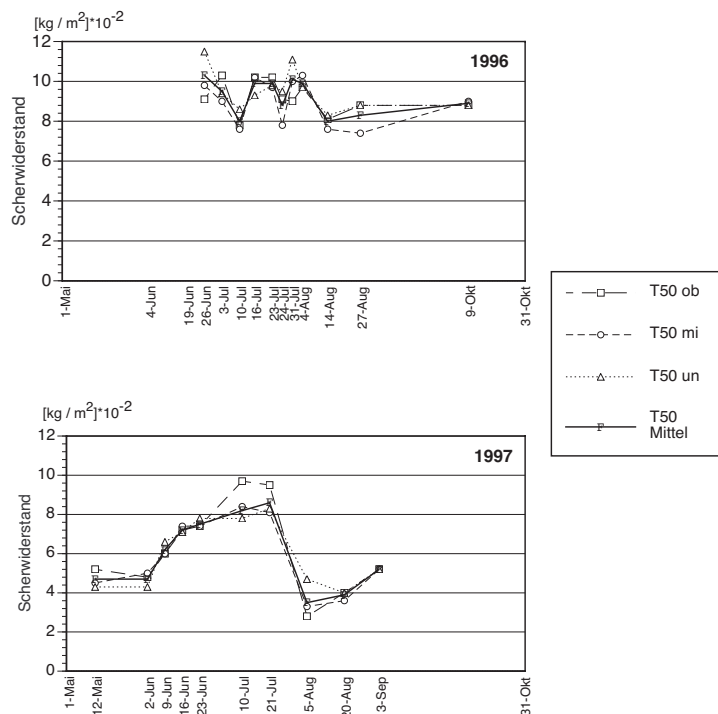


Abb. 17: Scherwiderstand auf der Testparzelle T50

Die Parzellenbereiche oben, mitte, unten lassen sich nicht unterscheiden. Nach einem tendenziellen Anstieg des Scherwiderstandes bis im Juli, fällt er im August wieder auf tiefere Werte ab. Detailliertere Daten im Anhang (A7).

Dabei dürfte der tiefe Anfangswert im Mai 97 vor allem auf kurz zuvor erfolgte Parzellenbearbeitung (und damit die lockere Oberflächenstruktur) zurückzuführen sein. Ähnlich der Aggregatstabilität ist auch der Scherwiderstand 1997 höher als 1996. Zwischen den Proben aus den verschiedenen Parzellenbereichen lassen sich keine statistisch gesicherten Unterschiede erkennen, weshalb auch hier für weitere Berechnungen der Mittelwert aus den drei Bereichen verwendet wurde.

Obwohl der Zusammenhang zwischen Bodenabtrag resp. Erodierbarkeit und Scherwiderstand in verschiedenen Studien untersucht und bestätigt wurde (z.B. ROSE ET AL. 1990, SCHJØNNING 1994, MISRA & ROSE 1995), gibt es doch kaum Untersuchungen, welche die zeitliche Entwicklung des Scherwiderstandes verfolgten. SCHJØNNING (1994) und GERLINGER (1997) führten Untersuchungen im Feld durch, welche mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar sind. Beide fanden, dass der Wassergehalt, bei welchem der Scherwiderstand gemessen wurde, eine dominierende Rolle spielen kann und der Scherwiderstand deshalb grundsätzlich bei einheitlichem Bodenwassergehalt gemessen werden sollte, was in der vorliegenden Studie nicht geschah. SCHJØNNING (a.a.o) bestätigt auch den Zusammenhang zwischen Scherwiderstand und Bodenbearbeitung.

### T1

Die Kurven der drei Parzellen zeigen einen ähnlichen Verlauf wie diejenigen der T50. Beim Scherwiderstand lässt sich jedoch die unbearbeitete Parzelle P2 nicht mehr so klar von den bearbeiteten P1 und P3 unterscheiden wie bei der Aggregatstabilität. Die P1 und die P3 weisen kurz nach der Bearbeitung zwar niedrigere Werte auf, gleichen sich dann aber im Verlaufe der Zeit mit denjenigen der P2 an. Die Werte schwanken zwischen 7 und 11 kg/m<sup>2</sup>\*10<sup>-2</sup>, wobei die Scherfestigkeit im Herbst eher tiefer ist als durch den Sommer, was auf einen negativen Zusammenhang mit der Bodenfeuchte schließen lässt.

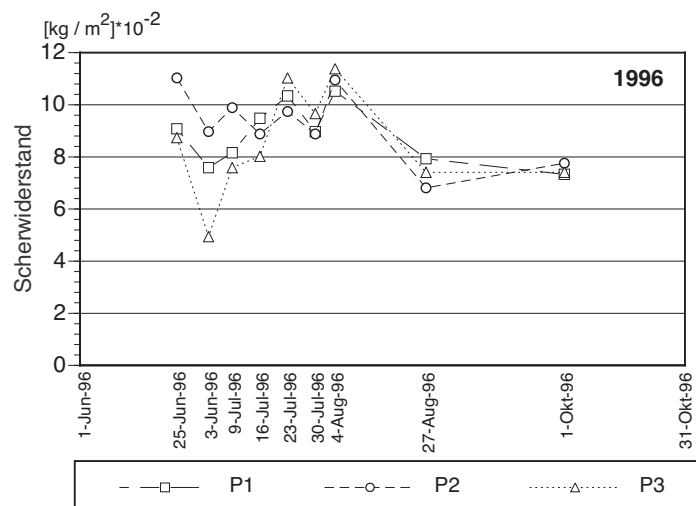


Abb. 18: Scherwiderstand auf der Testparzelle T1

Zu Beginn weist die unbearbeitete Parzelle P2 einen höheren Scherwiderstand auf als die beiden vorher bearbeiteten. Nach einem tendenziellen Anstieg sinkt der Scherwiderstand im August wieder auf tiefere Werte ab. Detailliertere Daten im Anhang (A8).

#### **Fazit**

- Der Scherwiderstand nimmt im Verlauf der Vegetationsperiode mit Schwankungen grundsätzlich zu, sinkt aber im August dann wieder ab, was mit dem Zerfall der verschlammten obersten Bodenschicht erklärt wird.
- Der Scherwiderstand ist in allen drei Parzellenbereichen ähnlich.
- Der Scherwiderstand ist von der Bearbeitung abhängig. Das heisst, bei der unbearbeiteten Parzelle ist er zuerst grösser als bei den bearbeiteten. Mit der Zeit stellt sich aber bei allen Parzellen ein ähnlicher Oberflächenzustand und Scherwiderstand ein.
- Die starke Abhängigkeit von der Bearbeitung schränkt die Brauchbarkeit des Scherwiderstandes als Erodierbarkeitsparameter ein.

### **3.3.1.3 Oberflächenrauigkeit**

#### **T50**

Die Oberflächenrauigkeit, ausgedrückt im Rauigkeitsindex (Kap. 2.2.2), weist für die beiden Jahre 1996 und 1997 ähnliche Verläufe auf. Nach einer anfänglichen stetigen Abnahme der Rauigkeit bis etwa Mitte, Ende Juli schwankt die Rauigkeit dann zwischen 0.05 und 0.1. Die anfängliche Abnahme der Rauigkeit wird vor allem durch die Einebnung des "Saatbeetes" aufgrund der Niederschläge verursacht. Nach dieser anfänglichen Konsolidierungsphase verursachen die Niederschläge dann immer mehr Krater und winzige "Inselberge" (Abb. 36), welche im Wechsel mit der Einebnung zu den Schwankungen der Rauigkeit ab etwa August führt.

MWENDERA & FEYEN (1994) untersuchten die Entwicklung der Oberflächenrauigkeit mit einem Mikroreliefmeter bei verschiedenen Bearbeitungsmassnahmen bei Beregnungsversuchen im Feld. Sie stellten eine grundsätzliche Abnahme der Oberflächenrauigkeit während eines Starkregenereignisses fest, machen aber keine Aussage zur weiteren Entwicklung der Rauigkeit bei weiteren Niederschlagsereignissen. GERLINGER (1997) stellt die Aussagekraft der - wie in der vorliegenden Arbeit durchgeführten - quer zum Hang gemessenen Oberflächenrauigkeit grundsätzlich in Frage und auch PRASUHN (1992) findet keinen Zusammenhang zwischen der relativen Rauigkeitsabnahme und dem Bodenabtrag. Er folgert, dass die kinetische Energie der Niederschläge sowohl für die Rauigkeitsabnahme wie auch für den Bodenabtrag die dominierende Rolle spielt.

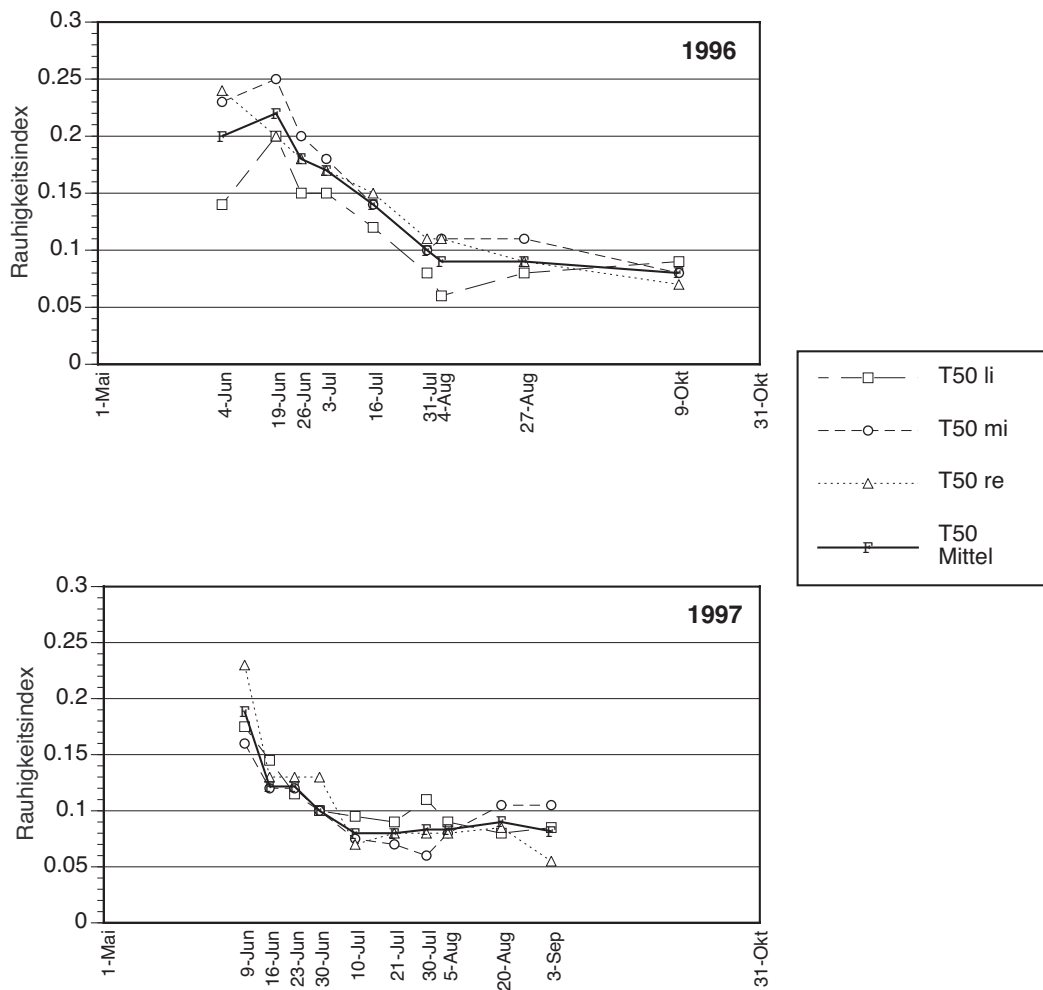


Abb. 19: Die Oberflächenrauigkeit auf der Testparzelle T50

Nach der Bearbeitung nimmt die Oberflächenrauigkeit zuerst kontinuierlich ab und schwankt dann durch einen Wechsel von Einebnung und wieder Aufbrechen der Schlämmschicht um einen konstanten Wert. Detailliertere Daten im Anhang (A7).

### T1

Die Oberflächenrauigkeit ist auf der T1 im Sommer 1995 deutlich tiefer als im Sommer 1996, was auf die deutlich höhere Erosivität der Niederschläge im Sommer 1995 zurückgeführt wird. Während 1995 die Rauigkeit - abgesehen von einigen kleinen Ausnahmen - dauernd abnimmt, nimmt sie 1996 im Verlaufe des Sommers eher zu. Dies steht etwas im Gegensatz zu den meisten anderen Messungen und dürfte auf die grosse Trockenheit dieses Sommers zurückzuführen sein. Aufgrund fehlender Niederschläge blieb die Einebnung teilweise aus und es kam zu grösserer Rauigkeit aufgrund von Trockenrissen und ähnlichem.

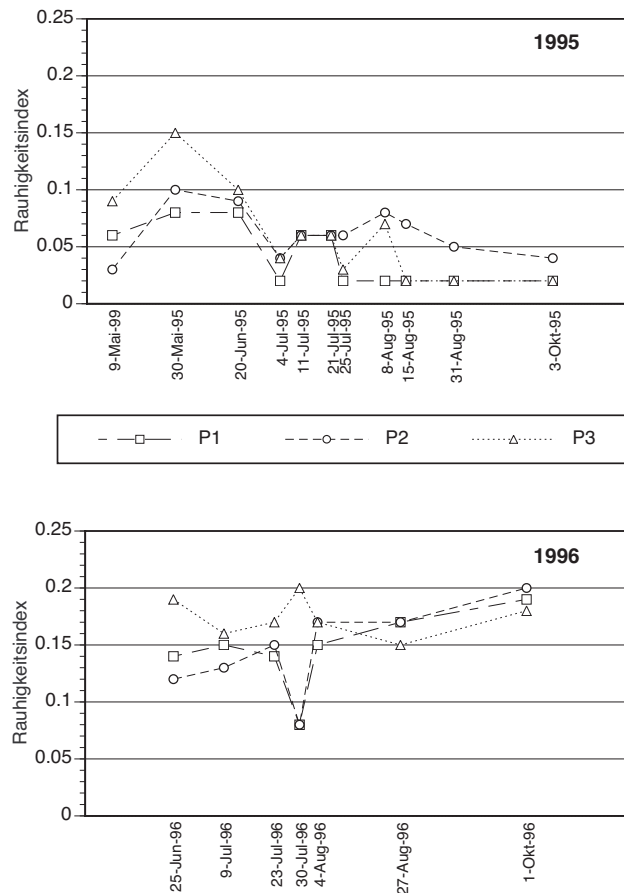


Abb. 20: Die Oberflächenrauhigkeit auf der Testparzelle T1

Da 1996 unterdurchschnittliche Niederschläge fallen, ist kaum eine Abnahme der Oberflächenrauhigkeit zu verzeichnen. Die unbearbeitete Parzelle P2 weist vor allem zu Beginn niedrigere Werte auf als die beiden bearbeiteten Parzellen. Detailliertere Daten im Anhang (A8).

**Fazit**

- Die Oberflächenrauhigkeit nimmt vom Bearbeitungszeitpunkt in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität kontinuierlich bis zu einem "steady state"-Zustand ab. Anschliessend schwankt sie im Wechsel zwischen Einebnung (Schlammsschicht) und der Zerstörung dieser Schlammsschicht durch intensive Niederschläge.

**3.3.1.4 Bodenwassergehalt**

**T50**

1995 sind die Schwankungen im Bodenwassergehalt eher geringer, der Boden bleibt über den ganzen Sommer eher feucht zwischen 20 und 25 Massen-%. Trotz längerer Perioden ohne Niederschlag nimmt die Bodenfeuchte nicht so stark ab wie in den beiden folgenden

Jahren. 1996 und 1997 schwankt der Bodenwassergehalt stark zwischen 15 und 25 Massen-%, wobei längere Perioden ohne Niederschläge zu einer Abnahme im Bodenwassergehalt führen. Es scheint, dass nur über intensive Niederschläge der Boden einen hohen Bodenwassergehalt erreichen kann und damit von ungesättigtem zu gesättigtem Wassertransport übergeht. Ist der Boden erst mal in gesättigtem Zustand, scheint er dank des hohen Tonanteils das Wasser besser halten zu können als im ungesättigten Zustand. Das bedeutet, dass bei tonreichen Böden erst intensive Niederschläge eine Wassersättigung und damit eine längerandauernde hohe Bodenfeuchte bewirken können. Eine wesentliche Rolle dürfte zudem das Niederschlagsgeschehen im Spätfrühling spielen. Fallen dann viele Niederschläge, trocknet der Boden über den Sommer weniger aus, als wenn bereits der Frühling trocken ist.

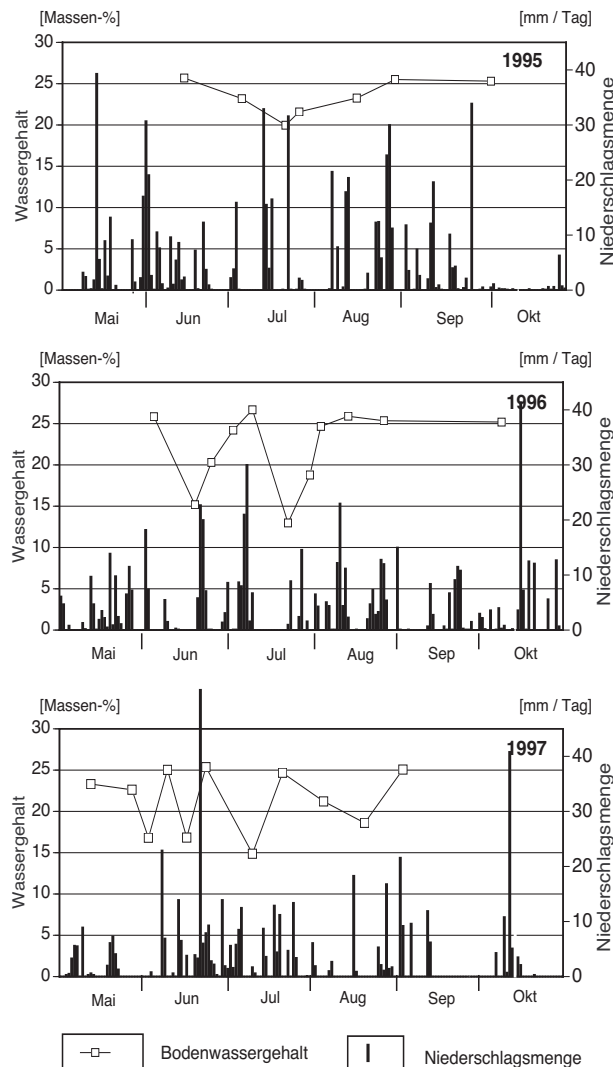


Abb. 21: Der Bodenwassergehalt auf der Testparzelle T50

1995 sind die Schwankungen deutlich geringer als 1996 und 1997, was auf die intensiven Niederschläge im Spätfrühling zurückgeführt wird. Detailliertere Daten im Anhang (A7).

Auch haben die massiven Abträge 1995 dazu beigetragen, dass der Boden weniger austrocknet. Durch ein Abtragereignis werden die obersten Zentimeter Boden, welche vor allem durch die Saatbeetbereitung (Rechen) nur noch schwach mit dem darunterliegenden Boden verbunden sind, abgetragen. Darunter kommt eine neue, "intaktere" und mit dem darunterliegenden Boden noch stärker verbundene Oberfläche zum Vorschein, welche dadurch einen ausgeglicheneren Wasserhaushalt aufweist.

**T1**

Die Kurven auf der T1 weisen einen ähnlichen Verlauf auf wie die Kurven der T50. Prinzipiell sind die Bodenwassergehalte auf der T1 allerdings geringer, was auf den tieferen Tongehalt und die geringeren Niederschlagsmengen zurückgeführt wird. Ähnlich wie auf der T50 kommt es 1995 zu geringeren Schwankungen im Bodenwassergehalt als 1996.

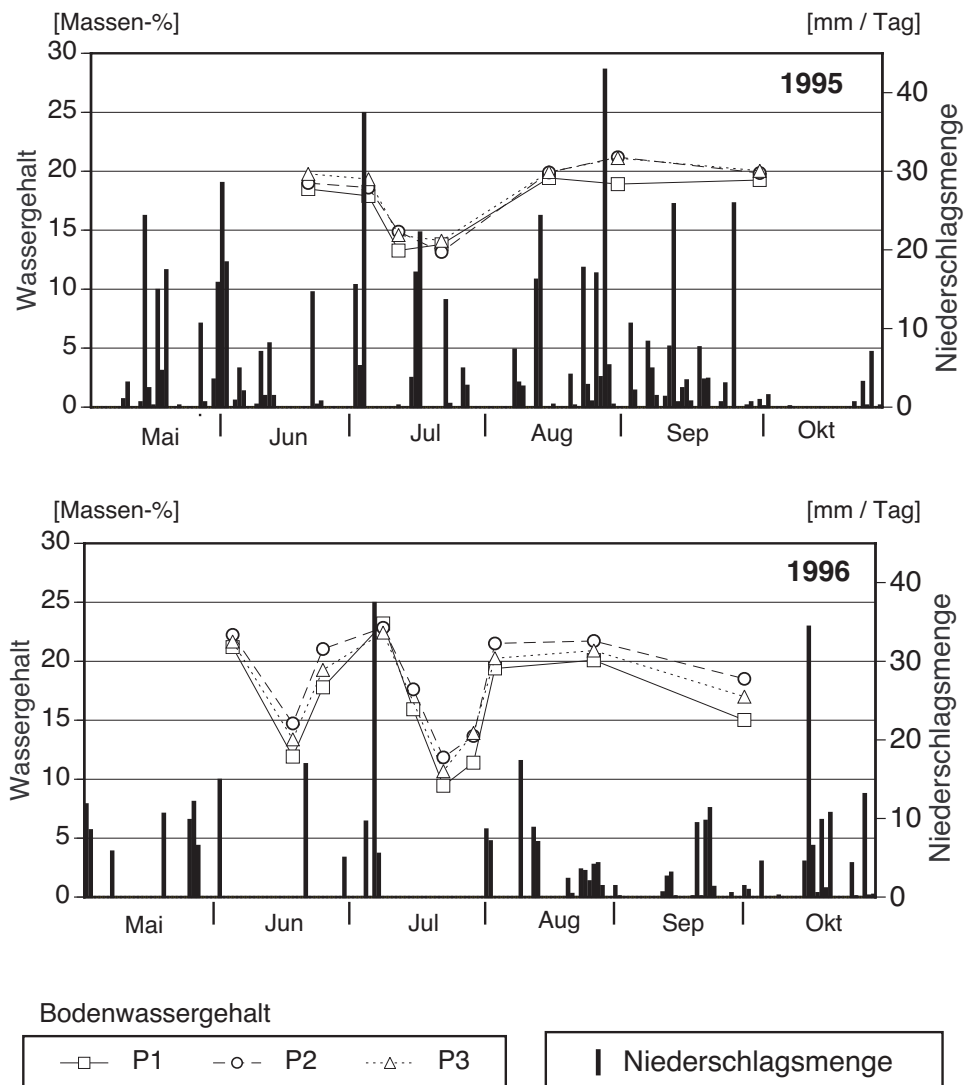


Abb. 22: Der Bodenwassergehalt auf der Testparzelle T1  
 1995 sind die Schwankungen geringer als 1996. Der sehr trockene Sommer von 1996 verursacht eine grössere Austrocknung des Bodens. Detailliertere Daten im Anhang (A8).



**Fazit**

- Das Niederschlagsregime bestimmt stark die Bodenwasserverhältnisse.
- Intensive Niederschlagsphasen im Spätfrühling ergeben eine geringere Austrocknung des Bodens während der ganzen Vegetationsperiode.

**3.3.1.5 pH-Wert**

**T50, T1**

Der pH-Wert wurde an Proben aus dem unteren, mittleren und oberen Parzellenbereich bestimmt. Da sich keine signifikanten Unterschiede ergaben, wurde nur noch mit den Mittelwerten weiter gerechnet. Obwohl sich tendenziell von Mai bis Juli eine Abnahme und von Juli bis Oktober eine Zunahme des pH-Wertes feststellen lässt, sind die Schwankungen so minimal, dass sie für statistische Berechnungen nicht wirklich zu verwenden sind. Die pH-Werte lagen für die T50 und die T1 im neutralen bis leicht sauren Bereich.

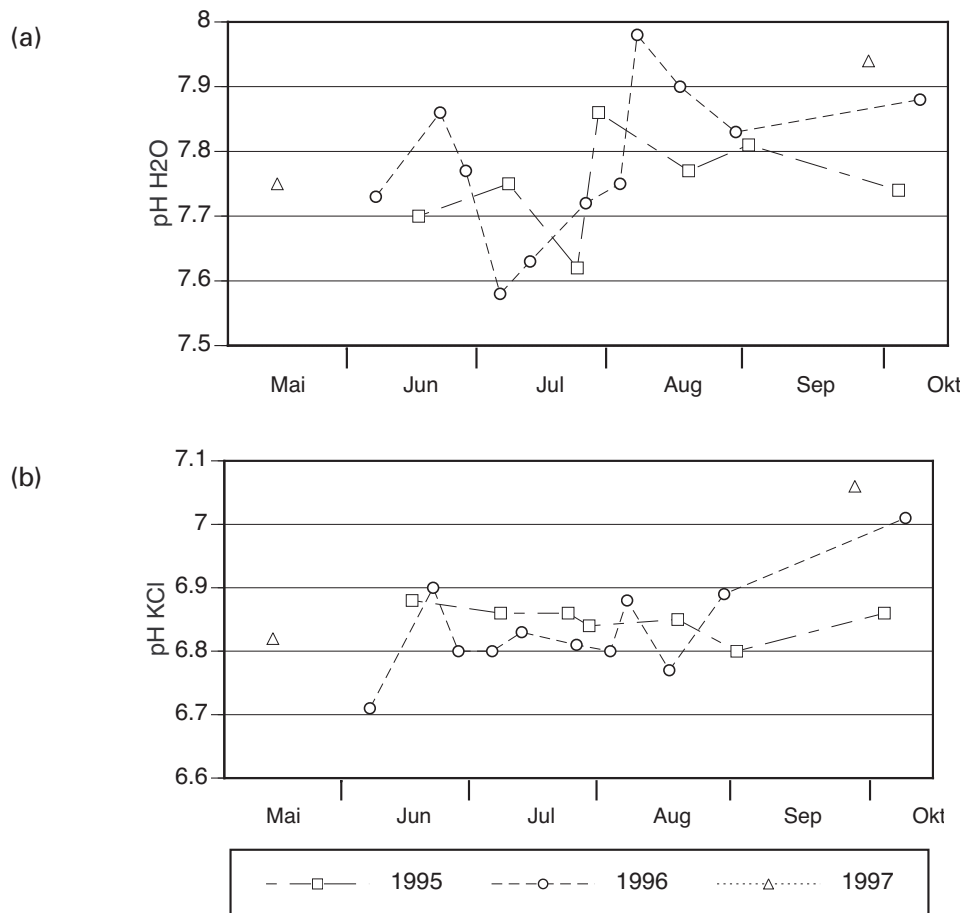


Abb. 23: Die pH-Werte in H<sub>2</sub>O (a) resp. KCl (b) gemessen auf der Testparzelle T50.

Bei beiden Messmethoden schwanken die Werte minimal und verzeichnen im Verlauf der Vegetationsperiode eine leicht ansteigende Tendenz.

Detailliertere Daten im Anhang (A7).

**Fazit**

- Der pH-Wert weist im Verlauf der Vegetationsperiode eine leicht ansteigende Tendenz auf.
- Die geringen Schwankungen des pH-Wertes machen diese Grösse für weitere statistische Berechnungen unbrauchbar.

### **3.3.2 Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und variierenden Randbedingungen auf der T50**

Mit einer einfachen Korrelationsmatrix wurde geprüft, für welche Grössen sich ein linearer Zusammenhang nachweisen lässt. Für diese wurden dann Regressionsgleichungen gerechnet. Mit Hilfe der schrittweisen Regression wurde getestet, wie gut sich die bodenphysikalischen Grössen durch Niederschlagsfaktoren resp. den Bodenwassergehalt beschreiben lassen.

#### **3.3.2.1 Bodenwassergehalt und pH-Wert**

Zwischen den bodenphysikalischen Grössen und dem pH-Wert resp. dem Bodenwassergehalt lässt sich nur in einem Fall ein linearer Zusammenhang feststellen. So korreliert die Aggregatstabilität negativ mit dem Bodenwassergehalt, bei welchem die Proben entnommen wurden ( $P > 0.05$ ), d.h. je grösser der Bodenwassergehalt, desto geringer die mit der Perkolationmethode gemessene Aggregatstabilität, das heisst also, desto grösser die Verschlammungsneigung.

Regressionsgleichung:

$$\log(AS) = 2.36 - 0.023 * WG$$

$$R^2 = 0.194; n = 28$$

Gemäss Lehrbuchmeinung (z.B. Roth 1996) und verschiedenen anderen Untersuchungen (z.B. Le Bissonnais et al. 1989, Auerswald 1993) sind Aggregate bei zunehmender Trockenheit aufgrund der Luftspregung eher zerfallsanfällig. Nur wenige Untersuchungen zeigen ein umgekehrtes Resultat (z.B. Cousen & Farres 1984). Bei der Perkolationmethode werden die Aggregate zuerst luftgetrocknet und dann rasch befeuchtet. Es muss also geschlossen werden, dass sich die Wassergehaltsschwankungen in einem Bereich befanden, in welchem der Einfluss der Luftspregung gegenüber anderen Prozessen, wie z.B. der Einlagerung der abgesprengten Partikel, der Tondispersierung oder dem Entstehen von Mikrorissen in den Aggregaten nach mehreren Feucht-Trocken-Zyklen, abnimmt. Möglich ist auch, dass bei bereits verschlammten Böden die Luftspregung einen geringeren Einfluss auf das weitere Verschlammungsgeschehen hat und die vorher genannten Prozesse wichtiger werden. Die von Auerswald (1994) festgestellte Abnahme der Aggregatstabilität mit zunehmendem pH konnte in dieser Studie nicht bestätigt werden.

Tab. 19: (E2) Korrelationsmatrix Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit mit Bodenwassergehalt und pH-Wert

E2 korr. tr	AS	SW	OR	
<b>WG</b>	<b>*-0.440</b>	<b>0.000</b>	<b>-0.114</b>	
<i>n</i>	28	15	16	
<i>P</i>	0.0181	0.999	0.679	
<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	<b>-0.203</b>	<b>-0.178</b>	<b>-0.496</b>	
<i>n</i>	20	11	9	
<i>P</i>	0.396	0.611	0.182	† P < 0.1
<b>pH (KCl)</b>	<b>-0.297</b>	<b>-0.390</b>	<b>-0.580</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	20	11	9	** P < 0.01
<i>P</i>	0.208	0.244	0.105	*** P < 0.001

### 3.3.2.2 Niederschlagsfaktoren

Ein klarer statistischer Zusammenhang besteht zwischen der Aggregatstabilität und dem R-Wert. Sowohl mit dem R-Wert des letzten grösseren Niederschlages (der maximal 10 Tage vor der Messung stattgefunden hat), wie auch mit dem über 10 Tage aufsummierten R-Wert. Erstaunlicherweise ist dieser Zusammenhang positiv, d.h. je höher der R-Wert ist, umso höher ist auch die Aggregatstabilität. Dies könnte so interpretiert werden, dass mit einem hohen R-Wert oft ein Abtragsereignis einhergeht, welches wiederum oberflächliches, instabiles Bodenmaterial abtransportiert. Zurück bleibt dann eher intaktes Bodenmaterial mit besseren Stabilitätseigenschaften. Interessant ist sicher auch der Trend, dass die Aggregatstabilität zunimmt, je mehr Tage seit einem Abtragsereignis vergangen sind. Dies könnte einerseits auf den Trocknungsvorgang zurückzuführen sein, andererseits aber auch auf eine sekundäre Aggregierung hinweisen, aus welcher Aggregate resultieren, welche stabiler sind als die ursprünglichen Aggregate.

Regressionsgleichung:

$$\log(AS) = 1.70 + .0.189 * \log(R) \quad R^2 = 0.313; n = 24$$

$$\log(AS) = 1.93 + 0.207 * \log(NE) \quad R^2 = 0.141; n = 23$$

$$\log(AS) = 1.71 + 0.012 * RW \quad R^2 = 0.409; n = 24$$

$$\log(AS) = 0.10 + 0.047 * \log(TA) \quad R^2 = 0.219; n = 19$$

LE BISSONNAIS (1990 und 1996) unterscheidet verschiedene Mechanismen des Aggregat-zusammenbruchs: (i) Aufgrund des Kontakts zwischen Wasser und Aggregaten (Verschläm-mung, Mikrorisse). (ii) Aufgrund der kinetischen Energie des Niederschlages (mechanische Zerstörung, Partikelabschlag). Methodisch gesehen bestehen entsprechend grosse Unter-schiede bei der Bestimmung der Aggregatstabilität und: Während bei der Beregnung klar die Niederschlagsintensität eine zentrale Rolle spielt, tritt diese bei der Bestimmung mit anderen Methoden (z.B. Nasssiebung, Perkolationsmethode) eher in den Hintergrund. Oft dürfte das methodische Vorgehen ein Grund für die schlechte Korrelation zwischen Aggregat-stabilitätsuntersuchungen und tatsächlichem Feldverhalten sein (LOCH 1994). In der Litera-tur finden sich verschiedene Aussagen zum Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität und Niederschlagsfaktoren. So schliesst GERLINGER (1997), dass Aggregatstabilitätsmessungen aus Beregnungsversuchen keine zuverlässigen Resultate liefern, weil sie die zeitliche Schwan-

kung nicht aufzeigen können. LOCH & FOLEY (1994) meinen auch, dass die Befeuchtungsgeschwindigkeit der wichtigere Faktor ist, der zum Aggregatzusammenbruch führt, als die Niederschlagsintensität. Dies unterstützt die Methodenwahl (Perkolationsstabilität), die in der vorliegenden Arbeit getroffen wurde. Der Einfluss von im Feld bestimmten Niederschlagsparametern und der im Labor bestimmten Perkolationsstabilität wird in der vorliegenden Arbeit deshalb auch nicht kausal hergeleitet, sondern rein empirisch erfasst. Im Unterschied zu anderen Untersuchungen wurde hier auch nicht der direkte Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität und Niederschlagsfaktoren erfasst, wie sie sich während eines Ereignisses darstellen, sondern es wird untersucht, welchen Aggregatstabilitäts-Zustand ein Niederschlagsereignis zurücklässt (Abb. 7).

Tab. 20: (E4b) Korrelationsmatrix Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit mit Niederschlagsfaktoren

E4b korr. tr	NM	R	NE	NMW	RW	NEW	TA	TN
<b>AS</b>	<b>0.273</b>	<b>**0.560</b>	<b>†0.376</b>	<b>0.052</b>	<b>***0.639</b>	<b>0.200</b>	<b>†0.344</b>	<b>0.305</b>
<i>n</i>	24	24	23	24	24	24	28	28
<i>P</i>	0.199	0.004	0.077	0.811	< 0.001	0.352	0.073	0.115
<b>SW</b>	<b>0.394</b>	<b>*0.521</b>	<b>0.381</b>	<b>0.081</b>	<b>0.329</b>	<b>0.185</b>	<b>0.258</b>	<b>0.110</b>
<i>n</i>	17	17	16	17	17	17	21	21
<i>P</i>	0.119	0.031	0.149	0.760	0.201	0.484	0.262	0.638
<b>OR</b>	<b>†0.435</b>	<b>0.198</b>	<b>0.365</b>	<b>0.165</b>	<b>-0.133</b>	<b>0.155</b>	<b>*0.468</b>	<b>0.216</b>
<i>n</i>	16	16	16	16	16	16	19	19
<i>P</i>	0.093	0.469	0.168	0.549	0.630	0.574	0.043	0.38
<b>WG</b>	<b>0.221</b>	<b>-0.142</b>	<b>0.104</b>	<b>†0.386</b>	<b>-0.071</b>	<b>0.293</b>	<b>-0.289</b>	<b>-0.458</b>
<i>n</i>	24	24	23	24	24	24	29	29
<i>P</i>	0.302	0.513	0.642	0.062	0.744	0.167	0.130	0.012

† P < 0.1  
 \* P < 0.05  
 \*\* P < 0.01  
 \*\*\* P < 0.001

Auch beim Scherwiderstand wurde empirisch untersucht, welche Scherfestigkeit ein Niederschlagsereignis hinterlässt. Der Scherwiderstand weist einen positiven Zusammenhang mit dem R-Wert auf, welcher darauf zurückzuführen ist, dass die nach einem intensiven Niederschlag entstehende oberflächliche "Schlammsschicht" eine höhere Scherfestigkeit aufweist als eine lockere Oberfläche mit vielen Aggregaten, was auch von MISRA & ROSE (1995) beobachtet wurde.

Regressionsgleichung:

$$SW = 0.063 + 0.021 * \log(R)$$

$$R^2 = 0.272; n = 17$$

Bei der Oberflächenrauigkeit zeigt sich ein Trend zu einer grösseren Oberflächenrauigkeit, je grösser die Niederschlagsmenge des letzten Niederschlagsereignisses war. Dieser Trend dürfte mit Vorsicht zu interpretieren sein und könnte evtl . darauf zurückzuführen sein, dass bei grösseren Niederschlagsmengen vermehrt auch Oberflächenabfluss auftreten kann, wodurch Mikro-"Inselberge" entstehen können, welche die Oberflächenrauigkeit vergrössern. Dass die Oberflächenrauigkeit umso grösser ist, je grösser der Abstand der Messung zum letzten Abtragsereignis ist, dürfte ebenfalls aufgrund einer Entwicklung einer sekundären Oberflächenstruktur zustande kommen, welche durch Trockenheit (Risse etc.)

begünstigt wird. Auch GERLINGER (1997) stellt fest, dass bei Berechnungsversuchen erhöhte Wassergehalte am Versuchsende auf eine erhöhte Rauigkeit hinweisen. RUDOLPH (1997) führt die Vergrößerung der Mikroreliefausformung nach der Beregnung bei feuchten Anfangsbedingungen auf das Vorkommen von Einschlagkrater durch Tropfenaufprall und eine Verformung der Aggregate zurück.

Regressionsgleichung:

$$OR = 0.061 + 0.055 * \log(NM) \quad R^2 = 0.189; n = 16$$

$$OR = 1.74 + 0.145 * \log(TA) \quad R^2 = 0.118; n = 28$$

Alle Geraden weisen ein eher tiefes Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) auf. Mit der schrittweisen linearen Regression wurde getestet, ob es ein Modell gibt, bei welchem eine Kombination von verschiedenen Niederschlagsparametern die einzelnen Grössen besser beschreiben. Ein Verfahren, welches auch andere Autoren zur Modellierung von Prozessen im Feld anwandten (z.B. PIERSON & MULLA 1990):

Tab. 21: Schrittweise Regression zur Beschreibung von Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit durch Niederschlagsgrössen

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
3.996	4.0	0.538	13.954	<0.0001	R, NM, NE, TN, NMW, NEW
$\log(AS) = 1.565 + 0.236 * \log(TA) + 0.013 * RW; n = 27$					
F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.474	4.498	0.0193	NM, TN, RW, NMW, NEW
$OR = 0.234 - 0.081 * \log(R) + 0.160 * \log(NE) + 0.037 * \log(TA); n = 19$					
F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.1996	0.2	0.549	2.086	0.1257	R
$SW = 0.065 + 0.037 * \log(NM) - 0.008 * NMW - 0.005 * RW + 0.474 * NEW - 0.045 * \log(NE) + 0.037 * \log(TA) - 0.047 * \log(TN); n = 20$					

Das heisst, die Aggregatstabilität lässt sich am besten durch die Tage, die seit dem letzten Abtragsereignis vergangen sind und die aufsummierten r-Werte der Niederschlagsereignisse innerhalb einer Woche vor der Ablesung, beschreiben. Die Oberflächenrauigkeit hingegen zeigt eine negative Abhängigkeit vom r-Wert und eine positive von der Niederschlagsenergie des letzten Abtragsereignisses und auch von der Anzahl Tage, die seit dem letzten Abtragsereignis vergangen sind. Das Ergebnis der schrittweisen Regression beim Scherwiderstand ist eher mit Vorsicht zu geniessen, so sind zuviele Parameter im Modell und das "F to enter" musste sehr niedrig gehalten werden. Daraus lässt sich schliessen, dass der Scherwiderstand nicht sehr gut direkt durch Niederschlagsparameter beschrieben werden kann.

In einem weiteren Schritt wurde auch der Bodenwassergehalt berücksichtigt. Hier ergibt sich eine leichte Verbesserung des Modells für die Aggregatstabilität und eine leichte Verbesserung beim Scherwiderstand. Es muss aber nach wie vor geschlossen werden, dass der Scherwiderstand durch diese Faktoren nicht genügend gut beschrieben werden kann.

Tab. 22: Schrittweise Regression zur Beschreibung von Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit durch Niederschlagsgrößen und Bodenwassergehalt.

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
2.996	3.0	0.662	14.995	<0.0001	R, NM, NE, TN, NMW, NEW
$\log(AS) = 2.011 + 0.196 * \log(TA) + 0.013 * RW - 0.019 * WG ; n = 27$					

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.1996	0.2	0.340	1.673	0.216	NM, NE, TN, NMW, NEW
$SW = 0.027 + 0.014 * \log(R) + 0.001 * RW + 0.022 * \log(TA) + 0.001 * WG ; n = 18$					

**Fazit**

- Die Aggregatstabilität oder Perkulationsstabilität, ausgedrückt als Widerstand gegen die Verschlämmung, ist umso kleiner, je feuchter der Boden ist.
- Die Aggregatstabilität ist nach intensiven Niederschlägen aufgrund des Abtransportes von losgelöstem, instabilem Bodenmaterial grösser.
- Der Scherwiderstand ist nach intensiven Niederschlägen aufgrund der ausgebildeten Schlämmschicht am grössten, ein Zusammenhang mit dem Bodenwassergehalt konnte nicht nachgewiesen werden.
- Die Aggregatstabilität kann durch die aufsummierte Niederschlagsintensität, die Zeit seit dem letzten Abtragsereignis und den Bodenwassergehalt gut beschrieben werden.

### 3.4 Modellierungen der Erodierbarkeit auf der T50

#### 3.4.1 Verschiedene Erodierbarkeits-Indices im Jahresverlauf

Tab. 23: Verschiedene Erodierbarkeits-Indices, Fotowerte, Abtrag, Abfluss und Niederschlag auf der Testparzelle T50

Die Berechnungen der  $K_i$ - und  $K_r$ -Werte erfolgten durch B. HEBEL, die Berechnungen des Erosionswiderstandes durch S. ROLLI.

I Datum [dd.Mon.JJ]	II NS-Menge [mm]	III r-Werte [N/h]	IV Abflussmenge [mm]	V Abtragsmenge [tS/ha]	VI K-Faktor gerechnet [(t h)/(ha N)]	VII K-Faktor RUSLE [(t h)/(ha N)]	VIII K <sub>i</sub> WEPP [kg*s/m <sup>4</sup> ]	IX K <sub>r</sub> WEPP [s/m]	X Eros.-Wst. Erosion 2D [N/m <sup>2</sup> ]*10 <sup>-3</sup>	XI Foto A	XII Foto B
5. Jun 95	7.4	1.6	0.750	0.020	0.003	0.292	2297324	0.02183	2.50		
3. Jul 95	15.9	5.1	0.110	0.020	0.001	0.216	1694747	0.01299	3.00		
13. Jul 95	32.9	52.4	>7.500 *	52.970	0.282	0.216	1544103	0.01091	0.09		
22. Jul 95	31.6	50.3	5.680	15.400	0.085	0.186	1431120	0.00936	0.11		
13. Aug 95	20.4	13.9	1.350	0.420	0.008	0.159	1242815	0.00650	1.00		
23.-28.Aug.95	79.2	28.2	>7.500 *	58.470	0.578	0.137	1129832	0.00520	0.09		
<b>SUMME '95</b>	<b>187.4</b>	<b>149.9</b>	<b>22.140</b>	<b>127.280</b>							
<b>MITTEL '95</b>	<b>31.2</b>	<b>25.3</b>	<b>1.973</b>	<b>21.217</b>	<b>0.160</b>	<b>0.201</b>	<b>1556657</b>	<b>0.01113</b>	<b>1.13</b>		
1. Mai 96	8.6	0.7	2.700	9.380	3.733	0.598	903865	0.00182	0.03	-	-
19. Mai 96	15.5	1.6	0.610	0.200	0.035	0.507	903865	0.00182	0.50	-	-
7.-8.Jul.96	48.5	7.3	0.270	0.020	0.001	0.306	1694747	0.01325	3.00	15.40	16.54
23. Jul 96	9.6	4.2	0.020	0.020	0.001	0.259	1468781	0.01014	6.00	15.40	15.40
28. Jul 96	14.8	9.8	0.230	0.020	0.001	0.259	1431120	0.00910	5.00	16.04	14.21
2. Aug 96	15.1	3.2	0.005	0.020	0.002	0.217	1355798	0.00832	2.00	11.00	11.00
10.-11.Aug.96	9.9	3.6	0.390	0.030	0.002	0.217	1280476	0.00728	2.50	11.00	17.39
11. Aug 96	12.0	3.0	0.680	0.070	0.006	0.217	1280476	0.00728	-	-	-
27. Aug 96	12.3	3.1	0.590	2.740	0.246	0.184	1167493	0.00572	0.05	28.58	32.13
1. Sept 96	16.4	8.5	0.740	1.340	0.044	0.155	1129832	0.00520	0.12	38.35	36.62
25. Sept 96	10.6	2.9	0.140	0.030	0.003	0.132	1054509	0.00364	3.00	-	-
<b>SUMME '96</b>	<b>173.3</b>	<b>47.9</b>	<b>6.370</b>	<b>13.790</b>							
<b>MITTEL '96</b>	<b>15.8</b>	<b>4.4</b>	<b>0.580</b>	<b>1.261</b>	<b>0.370</b>	<b>0.277</b>	<b>1242815</b>	<b>0.00669</b>	<b>2.22</b>	<b>19.40</b>	<b>20.47</b>
<b>MITTEL '96**</b>					<b>0.034</b>						
29. Apr 97	21.4	1.6	0.600	-	-	0.367				-	-
20. Mai 97	12.0	2.3	0.130	-	-	0.507				11.00	11.00
13. Jun 97	20.1	8.0	0.020	0.003	0.000	0.425				11.00	12.14
21.-22.Jun.97	51.0	5.7	0.330	-	-	0.361				14.15	14.15
26. Jun 97	4.5	0.1	0.050	-	-	0.361				15.40	15.40
6. Jul 97	12.3	6.3	0.140	0.033	0.001	0.306				14.15	14.15
20. Jul 97	11.1	4.6	2.640	3.360	0.203	0.259				12.41	16.24
16. Aug 97	19.0	10.0	0.060	0.004	0.000	0.184				22.95	18.60
2. Sept 97	30.5	9.7	0.090	0.001	0.000	0.155				11.00	12.37
<b>SUMME '97</b>	<b>118.0</b>	<b>34.7</b>	<b>3.240</b>	<b>3.400</b>							
<b>MITTEL '97</b>	<b>20.2</b>	<b>5.4</b>	<b>0.451</b>	<b>0.680</b>	<b>0.041</b>	<b>0.325</b>				<b>14.01</b>	<b>14.26</b>

\*Fässer überlaufen

\*\* ohne das Ereignis vom 1. Mai 96

Für die Jahre 1995 bis 1997 wurden für die Messungen auf der T50 verschiedene Erodierbarkeiten modelliert. Dass der K-Wert nach USLE für die Einzelereignisse berechnet und der Erosionswiderstand für die Einzelereignisse angepasst wurde, zeigt sich deutlich im Verlauf der entsprechenden Kurven: Bei grossen Abträgen ergeben sich entsprechend hohe K-Werte und entsprechend tiefe Erosionswiderstände. Die Korrelation dieser beiden Grössen untereinander (Kap. 3.4.2) und mit dem Abtrag (Kap. 3.5) kann also bereits aus dem Berechnungsverfahren impliziert werden.

Bei den Verläufen von  $K_i$  und  $K_r$  resp. den K-Werten der RUSLE werden hingegen ganze Jahresverläufe simuliert. Interessant ist das Muster dieser Verläufe. So modelliert RUSLE ab etwa Oktober eine Zunahme der Erodierbarkeit, welche im Mai ihren Höhepunkt erreicht

und dann wieder kontinuierlich abnimmt. Die Verläufe der drei Jahre sind relativ ähnlich, wobei 1996 und 1997 die K-Werte höhere Werte erreichen als 1995. Auch WEPP modelliert von Mai bis Oktober eine Abnahme, sowohl der Rillen- wie auch der Zwischenrillen-erodierbarkeit. Diese sind jeweils im Frühling und Herbst, nach der Parzellenbearbeitung am höchsten. Ein Vergleich zwischen den Erodierbarkeits-Indices und dem Abtragsgeschehen auf der T50 findet sich bei HEBEL ET AL. (2003).

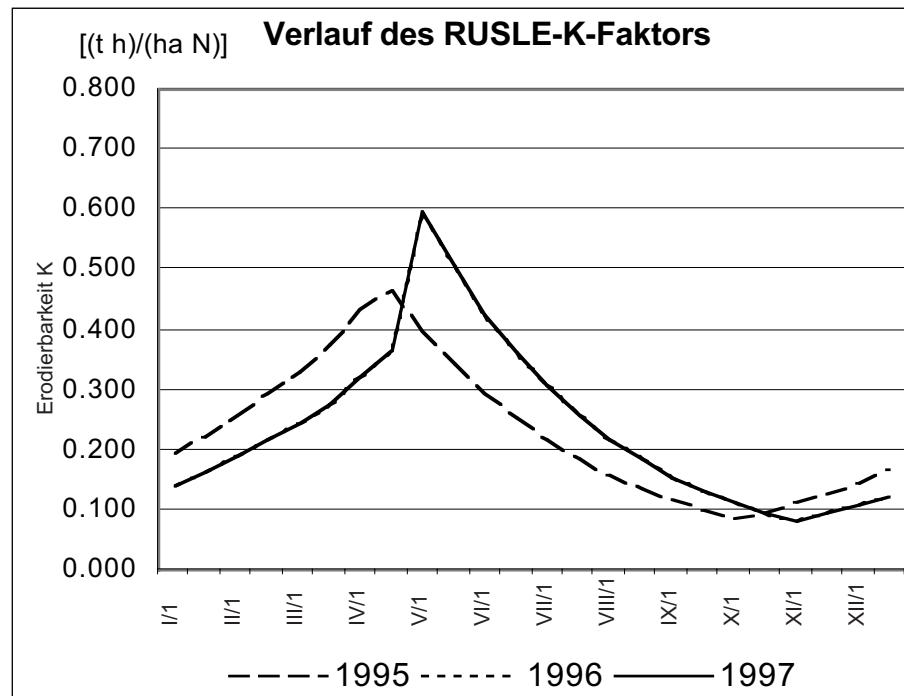


Abb. 24: Verlauf der K-Werte nach RUSLE

Die Verläufe von 1996 und 1997 sind identisch. Die höchsten Werte werden für April / Mai, die tiefsten für Oktober / November modelliert.



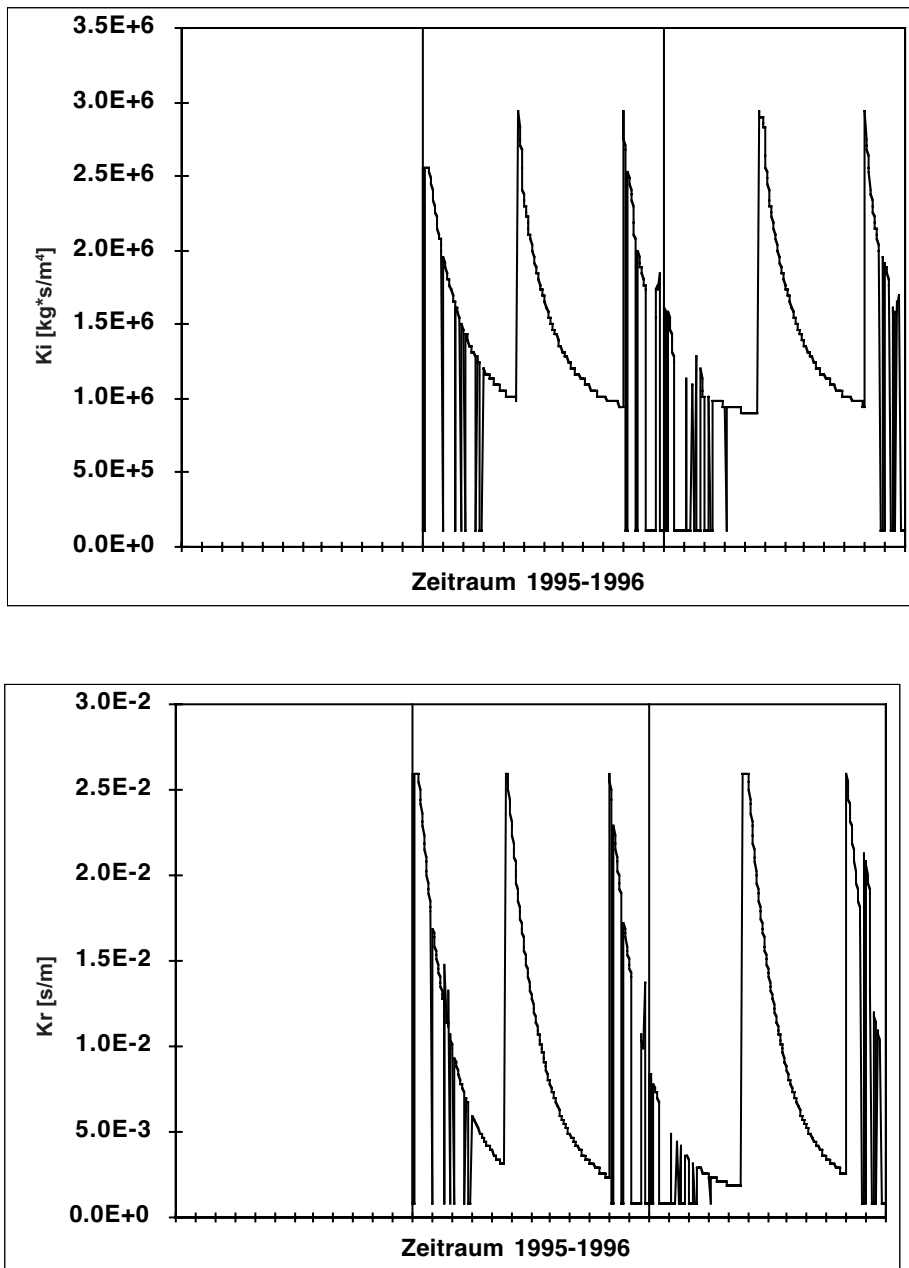


Abb. 25: Zwischenrillenerodierbarkeit (oben) und Rillenerodierbarkeit (unten) modelliert mit WEPP Für beide Erodierbarkeitsparameter werden jeweils nach der Bearbeitung im Frühling und Herbst die höchsten Werte modelliert, welche dann kontinuierlich - mit Schwankungen - abnehmen.

### 3.4.2 Zusammenhang der verschiedenen Erodierbarkeits-Indices untereinander

Für die Korrelationsrechnungen wurden bei allen Erodierbarkeits-Indices einzelereignis-bezogene Werte verwendet (Tab. Erodierbarkeits-Indices). Die aus den Ereignissen rückgerechneten K-Werte korrelieren, wie erwartet, hochsignifikant mit den Erosionswiderständen des Modells Erosion-2D, welche über die gemessenen Abtragsmengen angepasst werden. Daneben weisen nur die Rillen- und Zwischenrillenerodierbarkeit des WEPP einen signifikanten Korrelationskoeffizienten auf. Es wurden keine Regressionsgleichungen gerechnet. Bereits LAFLEN ET AL. (1991) fanden keine Korrelation zwischen dem K-Faktor der USLE und der Zwischenrillenerodierbarkeit  $K_i$  des WEPP.

Tab. 24: Korrelationsmatrix der verschiedenen Erodierbarkeits-Indices untereinander

E3a korr. tr	K berechnet	EW (E2D)	K (RUSLE)	$K_i$ (WEPP)	$K_r$ (WEPP)	
<b>K berechnet</b>	<b>1</b>					
<i>n</i>						
<i>P</i>						
<b>EW (E2D)</b>	<b>***-0.968</b>	<b>1</b>				
<i>n</i>	15					
<i>P</i>	< 0.0001					
<b>K (RUSLE)</b>	<b>-0.220</b>	<b>0.329</b>	<b>1</b>			
<i>n</i>	21	15				
<i>P</i>	0.344	0.237				
<b><math>K_i</math> (WEPP)</b>	<b>-0.400</b>	<b>0.363</b>	<b>0.200</b>	<b>1</b>		
<i>n</i>	16	15	16			
<i>P</i>	0.127	0.188	0.465			† P < 0.1
<b><math>K_r</math> (WEPP)</b>	<b>-0.368</b>	<b>0.306</b>	<b>0.034</b>	<b>***0.967</b>	<b>1</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	16	15	16	16		** P < 0.01
<i>P</i>	0.164	0.273	0.901	< 0.0001		*** P < 0.001

### 3.4.3 Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität, Oberflächenrauigkeit, Scherwiderstand und verschiedenen Erodierbarkeits-Indices

Aufgrund der Annahme, dass sowohl Aggregatstabilität wie auch Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit Grössen sind, welche die momentane Erodierbarkeit eines Bodens beeinflussen, wurde geprüft, ob diese Grössen mit den Modell-Erodierbarkeiten einen linearen Zusammenhang aufweisen.

#### 3.4.3.1 Korrelation der Erodierbarkeit mit nachfolgenden Bodenmessungen

Die nach dem Erosionsereignis gemessene Aggregatstabilität weist eine gute Korrelation mit dem rückgerechneten K-Faktor auf. Das heisst, die Erodierbarkeit eines Ereignisses drückt sich in der danach gemessenen Aggregatstabilität aus. Je höher die Erodierbarkeit ist (das heisst im vorliegenden Fall, je mehr Abtrag stattgefunden hat), umso höher ist auch die Aggregatstabilität. Dies ist wieder ein Hinweis darauf, dass sich durch den Abtrag von Bodenmaterial die Aggregatstabilität erhöht. Die hohe Korrelation der Oberflächenrauigkeit mit dem K-Wert ist durch eine Scheinkorrelation zustande gekommen. Der K-Wert der RUSLE wie auch die Oberflächenrauigkeit nehmen ab einem Maximum im Mai kontinuierlich ab. Allerdings aus unterschiedlichen Gründen: So ist es bei der Oberflächenrauigkeit die Summe

der Niederschlagsenergien und bei den K-Werten der RUSLE sind es Klimaparameter. Die Korrelation zwischen der Oberflächenrauigkeit und der Rillen- sowie Zwischenrillen-erodierbarkeit des WEPP ist zwangsläufig hoch, denn WEPP berechnet seine Erodierbarkeitsfaktoren unter anderem aus der Abnahme der Oberflächenrauigkeit

Tab. 25: (E4b) Korrelationsmatrix der Erodierbarkeits-Indices der Erosionsereignisse mit *nachher* gemessener Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit  
Die Korrelation der Oberflächenrauigkeit mit dem K (RUSLE) ist eine Scheinkorrelation.

E4b korr. tr	K berechnet	EW (E2D)	K (RUSLE)	Ki (WEPP)	Kr (WEPP)	
<b>AS</b>	<b>**0.617</b>	<b>-0.344</b>	<b>-0.173</b>	<b>0.176</b>	<b>0.236</b>	
<i>n</i>	21	11	28	18	18	
<i>P</i>	0.002	0.311	0.383	0.492	0.351	
<b>SW</b>	<b>*0.590</b>	<b>0.336</b>	<b>-0.121</b>	<b>0.415</b>	<b>0.38</b>	
<i>n</i>	17	7	21	11	11	
<i>P</i>	0.011	0.485	0.605	0.212	0.258	
<b>OR</b>	<b>-0.278</b>	<b>0.433</b>	<b>***0.757</b>	<b>***0.935</b>	<b>***0.904</b>	
<i>n</i>	14	4	19	9	9	
<i>P</i>	0.343	0.643	<0.0001	<0.0001	0.0003	† P < 0.1
<b>WG</b>	<b>0.158</b>	<b>0.078</b>	<b>-0.243</b>	<b>-0.196</b>	<b>-0.255</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	22	11	29	18	18	** P < 0.01
<i>P</i>	0.488	0.825	0.207	0.443	0.312	*** P < 0.001

Regressionsgleichungen:

$$\log(K \text{ berechnet}) = 2.107 + 0.098 * \log(AS) \quad R^2 = 0.381; n = 21$$

$$\log(K \text{ berechnet}) = 0.118 + 0.014 * SW \quad R^2 = 0.348; n = 17$$

### 3.4.3.2 Korrelation der Erodierbarkeit mit vorausgehenden Bodenmessungen

Tab. 26: (E3a) Korrelationsmatrix der Erodierbarkeits-Indices der Erosionsereignisse mit *vorher* gemessener Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit  
Die verschiedenen Erodierbarkeitsgrößen weisen kaum Zusammenhänge untereinander auf.

E3a korr. tr	K berechnet	EW (E2D)	K (RUSLE)	Ki (WEPP)	Kr (WEPP)	
<b>AS</b>	<b>0.215</b>	<b>0.265</b>	<b>-0.416</b>	<b>0.147</b>	<b>0.170</b>	
<i>n</i>	15	11	18	11	11	
<i>P</i>	0.45	0.442	0.086	0.674	0.627	
<b>SW</b>	<b>0.452</b>	<b>*0.798</b>	<b>-0.051</b>	<b>0.570</b>	<b>0.621</b>	
<i>n</i>	11	7	14	7	7	
<i>P</i>	0.168	0.029	0.867	0.195	0.147	
<b>OR</b>	<b>-0.425</b>	<b>0.463</b>	<b>**0.817</b>	<b>0.927</b>	<b>0.898</b>	
<i>n</i>	9	4	11	4	4	
<i>P</i>	0.267	0.616	0.001	0.101	0.143	† P < 0.1
<b>WG</b>	<b>0.07</b>	<b>-0.392</b>	<b>-0.006</b>	<b>-0.158</b>	<b>-0.213</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	15	11	18	11	11	** P < 0.01
<i>P</i>	0.809	0.241	0.980	0.652	0.542	*** P < 0.001

Die Aggregatstabilität weist keinen Zusammenhang mit den Erodierbarkeits-Indices nach. Der Scherwiderstand korreliert schwach mit dem Erosionswiderstand, was auch SCHMIDT (1996) bereits empirisch hergeleitet hat. Die Oberflächenrauigkeit korreliert stark mit den K-Werten der RUSLE. Dies dürfte vor allem dadurch zustande kommen, dass sowohl die K-Werte wie auch die Oberflächenrauigkeit ab einem Maximum im Mai kontinuierlich abnehmen. Dabei handelt es sich, wie schon im Kap. 3.4.3.1 ausgeführt, aber um eine Scheinkorrelation. Auf eine Berechnung der Regressionsgeraden wurde deshalb im zweiten Fall verzichtet.

Regressionsgleichung:

$$\log(EW) = -7.118 + 77.918 * SW \quad R^2 = 0.637; n = 7$$

### 3.4.4 Aggregatstabilität, Oberflächenrauigkeit und Scherwiderstand als Ausdruck der momentanen Erodierbarkeit?

Für die Berechnungen und Schlüsse dieses Kapitels wird vorausgesetzt, dass der rückgerechnete K-Wert die momentane Erodierbarkeit am besten repräsentiert. Dieses Verfahren des über die USLE-Gleichung rückgerechneten K-Wertes wurde bereits von verschiedenen Autoren angewandt (z.B. ALBERTS ET AL. 1987, BAJRACHARYA & LAL 1992). Die schrittweise Regression wurde zwischen den rückgerechneten K-Werten und den **vorher** gemessenen Boden- resp. Niederschlagsfaktoren gerechnet.

Die Korrelationsrechnungen zwischen Aggregatstabilität, Oberflächenrauigkeit und Scherwiderstand und der berechneten Erodierbarkeit ergab nur wenig signifikante Zusammenhänge (Tab. 25, 26). Deshalb wurde mit Hilfe der schrittweisen Regression getestet, ob sich durch eine Kombination der bodenphysikalischen Grössen die berechnete Erodierbarkeit besser ausdrücken lässt.

#### 3.4.4.1 Ohne Berücksichtigung von Niederschlagsparametern

Tab. 27: Schrittweise Regression zur Beschreibung der momentanen Erodierbarkeit durch **vorher** gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit

F to remove	F to enter	R2	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	0.689	2.956	0.1612	-
$\log(K) = 3.766 - 4.196 * \log(AS) - 17.142 * OR + 40.2 * SW; n = 8$					

Bei der schrittweisen Regression finden alle drei Bodengrössen Eingang ins Modell, das "F to enter" musste allerdings relativ tief gesetzt werden und der F-Wert ist tief. Das heisst, dass sich diese drei Kenngrössen in einer Näherung eignen, die nach der USLE rückgerechneten K-Werte zu beschreiben, aber auch nicht das optimale Modell bieten.

### 3.4.4.2 Unter Berücksichtigung von Niederschlagsparametern

Tab. 28: Schrittweise Regression zur Beschreibung der momentanen Erodierbarkeit durch **vorher** gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und Niederschlagsparameter

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	0.999	152.325	0.0619	AS, NM, RW, NMW, NEW
$\log(K) = -12.342 + 8.24 * \log(R) + 52.421 * SW - 4.604 * OR - 0.111 * WG - 6.599 * \log(NE) - 1.259 * \log(TN); n = 8$					

Eine sehr gute Modellierung des momentanen, rückgerechneten K-Wertes ergibt sich, wenn die Bodengrößen mit Niederschlagsparametern ergänzt werden, wobei vor allem die Tage seit den letzten Niederschlägen und Größen, welche die Niederschlagsenergie wiedergeben, berücksichtigt werden. Dies illustriert sehr schön, dass die momentane Erodierbarkeit einerseits von Bodenparametern, andererseits aber auch vom vorhergehenden Niederschlagsgeschehen bestimmt wird.

#### Fazit

- Die Erodierbarkeit weist in den dynamischen Erosions-Modellen einen Jahresverlauf auf.
- Die verschiedenen Erodierbarkeits-Indices weisen untereinander kaum Korrelationen auf.
- Die über die USLE rückgerechnete aktuelle Erodierbarkeit drückt sich in der im Anschluss gemessenen Aggregatstabilität resp. im Scherwiderstand aus.
- Während die einzelnen Bodenparameter (Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit) kaum Voraussagen der Erodierbarkeit für ein nächstes Ereignis machen können, ergibt ein Modell, welches Boden- und Niederschlagsparameter berücksichtigt, gute Werte.

### 3.5 Zusammenhang zwischen dem Abfluss- und Abtragungsgeschehen und der momentanen Erodierbarkeit, ausgedrückt in Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit

#### 3.5.1 Ohne Berücksichtigung von Niederschlagsparametern

Eine einfache Korrelation zeigt, welche Bodenfaktoren den grössten Zusammenhang mit dem Abtrags- resp. Abflussgeschehen aufweisen. Zuerst wird die Frage geprüft, ob die **vor** dem Ereignis gemessenen oder simulierten Erodierbarkeiten einen Zusammenhang mit dem Abtrags- und Abflussgeschehen aufweisen, das heisst, ob durch die Erodierbarkeit das Abtrags- oder Abflussgeschehen vorausgesagt werden kann.

Tab. 29: (E3a) Korrelationsmatrix Abtrag / Abfluss mit Erodierbarkeits-Indices

E3a korr. tr	K berechnet	EW (E2D)	K (RUSLE)	Ki (WEPP)	Kr (WEPP)	
<b>Abfluss</b>	<b>***0.795</b>	<b>** -0.700</b>	<b>-0.256</b>	<b>-0.081</b>	<b>-0.087</b>	
n	21	15	25	16	16	
P	< 0.0001	0.003	0.219	0.771	0.755	† P < 0.1
<b>Abtrag</b>	<b>***0.956</b>	<b>*** -0.927</b>	<b>-0.279</b>	<b>-0.280</b>	<b>-0.213</b>	* P < 0.05
n	16	15	21	16	16	** P < 0.01
P	< 0.0001	< 0.0001	0.224	0.300	0.435	*** P < 0.001

Tab. 30: (E3a) Korrelationsmatrix Abtrag / Abfluss mit **vorher** gemessenen Bodenparametern

E3a korr. tr	AS	SW	OR	WG	
<b>Abfluss</b>	<b>0.368</b>	<b>0.164</b>	<b>-0.321</b>	<b>0.002</b>	
n	18	14	11	18	
P	0.135	0.582	0.346	0.993	† P < 0.1
<b>Abtrag</b>	<b>0.276</b>	<b>0.419</b>	<b>-0.347</b>	<b>0.092</b>	* P < 0.05
n	15	11	11	18	** P < 0.01
P	0.326	0.207	0.336	0.348	*** P < 0.001

Es lassen sich keine signifikanten Korrelationen zwischen Abtrag, Abfluss und den Bodenfaktoren berechnen. Bei den Erodierbarkeits-Indices weisen nur der rückgerechnete K-Wert resp. der Erosionswiderstand eine signifikante Korrelation mit dem Abtrags- und Abflussgeschehen auf. Dies ist zu erwarten, da das Abtragungsgeschehen ja für die Berechnungen dieser Faktoren berücksichtigt wird. Auf die Darstellung von Regressionsgleichungen wurde deshalb verzichtet.

Tab. 31: Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss resp. Abtrag durch **vorher** gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und Bodenwassergehalt

F to remove	F to enter	R2	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.496	0.5	0.077	0.665	0.4386	AS, SW, WG
$\log(\text{Abfluss}) = -0.298 - 4.536 * \text{OR}; n = 10$					

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	0.693	3.003	0.1579	WG
$\log(\text{Abtrag}) = 7.124 - 17.919 * \text{OR} + 40.932 * \text{SW} - 5.334 * \log(\text{AS}); n = 8$					

Die schrittweise Regression zeigt, dass nur der Abtrag sich durch die vorherige Aggregatstabilität, die Oberflächenrauigkeit und den Scherwiderstand modellieren lassen. Da der F-Wert allerdings relativ klein ist und das "F to enter" niedrig gehalten werden muss, kann dieses Modell nicht als zuverlässig bezeichnet werden.

Als zweites wurde geprüft, ob sich das Abtragsgeschehen auf die **nachher** gemessenen Bodenerodierbarkeiten auswirkt. Damit kann die Hypothese getestet werden, ob ein Erosionsereignis 2 resp. dessen Erodierbarkeit durch ein vorhergehendes Erosionsereignis beeinflusst wird (vgl. auch Abb. 7).

Tab. 32: (E4b) Korrelation Abtrag / Abfluss mit **nachher** gemessenen Bodenparametern

E4b korr. tr	AS	SW	OR	WG	
<b>Abfluss</b>	<b>0.391</b>	<b>0.046</b>	<b>-0.123</b>	<b>0.233</b>	
<i>n</i>	17	13	10	18	
<i>P</i>	0.122	0.884	0.744	0.359	† P < 0.1
<b>Abtrag</b>	<b>*0.611</b>	<b>0.486</b>	<b>-0.296</b>	<b>0.108</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	15	11	8	15	** P < 0.01
<i>P</i>	0.014	0.133	0.495	0.707	*** P < 0.001

Es zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Abtrag und der nachher gemessenen Aggregatstabilität (vgl. auch Kap. 3.4.3). Dies ist ein Hinweis, dass die gemessene Aggregatstabilität durch das vorherige Abtragsgeschehen beeinflusst wird (SIEGRIST 1997). Ähnliche Erkenntnisse wurden bereits im Kap. 3.3.1.1 diskutiert.

Regressionsgleichung:

$$\log(\text{Abtrag}) = - 8.977 + 4.198 * \log(\text{AS}) \quad R^2 = 0.314; n = 16$$

### 3.5.2 Unter Berücksichtigung von Niederschlagsparametern

In einem weiteren Schritt wurden die Niederschlagsparameter in die Berechnungen miteinbezogen. Hier interessiert allerdings nur die Frage, welchen Einfluss die Niederschläge auf ein mögliches späteres Abfluss- oder Abtragereignis haben und ob sie die Modelle aus Kap. 3.5.1 verbessern können.

Tab. 33: (E3a) Korrelation Abtrag / Abfluss mit dem **davor** stattfindenden Niederschlagsgeschehen.

E3a korr. tr	NM	R	NE	NMW	RW	NEW	T	
<b>Abfluss</b>	<b>†0.385</b>	<b>*0.45</b>	<b>*0.429</b>	<b>0.173</b>	<b>0.164</b>	<b>0.209</b>	<b>-0.336</b>	
<i>n</i>	25	25	25	25	25	25	25	
<i>P</i>	0.057	0.023	0.032	0.412	0.137	0.319	0.101	† P < 0.1
<b>Abtrag</b>	<b>†0.370</b>	<b>*0.511</b>	<b>*0.490</b>	<b>0.076</b>	<b>†0.407</b>	<b>0.198</b>	<b>-0.275</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	21	21	21	21	21	21	21	** P < 0.01
<i>P</i>	0.100	0.017	0.023	0.747	0.067	0.394	0.231	*** P < 0.001

Die beste Korrelation zeigt sich zwischen dem Abtrag / Abfluss und dem R-Wert resp. der Niederschlagsenergie, allerdings ist auch dieser Zusammenhang nur sehr schwach, was eigentlich erstaunt, ist doch der R-Wert die Grösse aus der USLE, welche gemäss Definition einen entsprechenden linearen Zusammenhang mit dem Abtragsgeschehen aufweisen sollte. Hier könnte allerdings eine langjährige Auswertung der Messreihen bedeutend bessere (signifikantere) Resultate liefern. Verschiedene Studien über die Zuverlässigkeit von Modellaussagen empfehlen entsprechend langjährige Datenreihen zur Validierung von Modellen (z.B. FAVIS-MORTLOCK 1998, MORGAN ET AL. 1998, HEBEL ET AL. 2003). Auch ARMSTRONG (1990) testete in seinen Untersuchungen verschiedenste Erosivitäts-Indices auf Schwarzbracheparzellen und fand nur eine schlechte Korrelation zwischen diesen und dem tatsächlichen Abfluss- resp. Abtragsverhalten, was er beispielsweise auf den Einfluss von Bodenwasser-gehalt und Oberflächenzustand zurückführt.

Regressionsgleichungen:

$\log(\text{Abfluss}) = - 1.881 + 1.104 * \log(\text{NM})$	$R^2 = 0.148; n = 25$
$\log(\text{Abfluss}) = - 0.986 + 0.661 * \log(\text{R})$	$R^2 = 0.203; n = 25$
$\log(\text{Abfluss}) = 0.006 + 1.1 * \log(\text{NE})$	$R^2 = 0.184; n = 25$
$\log(\text{Abtrag}) = - 3.41 + 2.011 * \log(\text{NM})$	$R^2 = 0.137; n = 21$
$\log(\text{Abtrag}) = - 2.29 + 1.668 * \log(\text{R})$	$R^2 = 0.261; n = 21$
$\log(\text{Abtrag}) = 0.28 + 2.745 * \log(\text{NE})$	$R^2 = 0.24; n = 21$
$\log(\text{Abtrag}) = - 1.428 + 0.142 * \text{RW}$	$R^2 = 0.166; n = 21$

Eine schrittweise Regression wurde zuerst nur mit den Niederschlagsparametern gemacht. Die Tage seit dem letzten Niederschlagsereignis und der R-Wert beschreiben sowohl den Abfluss wie auch den Abtrag am besten. Das heisst, kurz nach einem intensiven Niederschlagsereignis ist die Wahrscheinlichkeit für Abtrag oder Abfluss am grössten.

Tab. 34: Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss resp. Abtrag durch **davor** stattfindendes Niederschlagsgeschehen

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
3.996	4.0	0.361	6.222	0.0072	NM, NE, RW, NMW, NEW
$\log(\text{Abfluss}) = - 0.610 + 0.738 * \log(\text{R}) - 0.765 * \log(\text{TN}); n = 21$					



F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
3.996	4.0	0.41	6.254	0.0087	NM, NE, RW, NMW, NEW
$\log(\text{Abtrag}) = - 1.849 + 1.926 * \log(R) - 1.224 * \log(TN); n = 21$					

Ausserdem wurde getestet, ob eine Kombination von Niederschlagsparametern und Bodenparametern das Modell verbessern kann. Zwar steigt in diesem Falle das Bestimmtheitsmass R<sup>2</sup>, dafür muss das "F to enter" tiefer gesetzt werden. Trotzdem kann geschlossen werden, dass eine Mischung von bodenphysikalischen und Niederschlagsparametern das beste Modell ergibt.

Tab. 35: Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss resp. Abtrag durch **vorher** gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit, Bodenwassergehalt sowie dem **davor** stattfindenden Niederschlagsgeschehen

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	0.634	2.163	0.2098	AS, OR, WG, NM, NE, NMW, NEW
$\log(\text{Abfluss}) = - 0.556 + 13.918 * SW - 1.664 \log(TN) + 0.665 * \log(R) - 0.165 * (RW); n = 10$					

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	1.0	934005.4	0.0008	OR, TN, RW, NMW, NEW
$\log(\text{Abtrag}) = - 9.695 - 0.244 * WG + 80.849 * SW - 3.578 * \log(NM) + 12.738 * \log(R) - 4.724 * \log(NE) - 0.181 * \log(AS); n = 8$					

**Fazit:**

- Durch die Bestimmung der Bodenparameter alleine ergibt sich kein befriedigendes Modell zur Vorhersage von Abtrag und Abfluss.
- Die Kombination von Bodenparametern mit Niederschlagsfaktoren ergeben hingegen ein gutes Modell für die Voraussage von Abtrag und Abfluss.
- Die Aggregatstabilität wird durch das vorherige Abtragsgeschehen beeinflusst.

## **4. Resultate und Diskussion der Messungen auf den Landwirtschaftsparzellen**

### **4.1 Die Messungen auf den Landwirtschaftsparzellen**

Bei allen Landwirtschaftsstandorten wurden 3 Fruchtfolgeperioden untersucht. Die erste mit Winterweizen oder Triticale dauerte von Oktober 95 bis Mai 96, die zweite mit Mais von Juni 96 bis Oktober 96 und die dritte wieder mit Winterweizen von November 96 bis Mai 97. Da in der Fruchtfolgeperiode nach Winterweizen Grünland angesät wird, musste der Feldkasten nach der ersten Beprobungsperiode bei einem anderen Schlag aufgestellt werden. Dort konnte dann jedoch die Mais- und die nachfolgende Winterweizenbeprobung stattfinden. Detailliertere Angaben zur Bewirtschaftung finden sich im Kap. 2.3.2 und im Anhang (A9).

Verschiedene Untersuchungen (z.B. LUK & MORGAN 1981, RÜTTIGMANN ET AL. 1995) betonen die kleinräumige Variabilität von Faktoren wie Mikrotopographie, Scherwiderstand und Aggregatstabilität, was 3-4 Messungen pro Standort notwendig macht, um repräsentative Aussagen für diesen Standort machen zu können. Bei der vorliegenden Untersuchung standen jedoch die Vergleiche zwischen verschiedenen Standorten im Vordergrund. Entsprechend dem zulässigen Verfahren (RÜTTIGMANN ET AL. 1995) wurde deshalb auf entsprechende Wiederholungen an einem Standort bei den Abfluss- und Abtragsmessungen verzichtet.

#### **4.1.1 Niederschlag**

Beim Niederschlag wurden die Niederschlagsmengen der nächstgelegenen meteorologischen Messstationen untersucht. Die Niederschlagsmenge ist eine Grösse, die nicht unbedingt erosionsrelevant ist, aber einen Hinweis auf niederschlagsbedingte Standortunterschiede gibt.

Über die gesamte Messperiode fallen im Jura mit 1'586 mm die meisten Niederschläge, in Münchenstein mit 1277 mm am zweitmeisten und am wenigsten in Basel und Therwil mit 1181 mm. Die Niederschlagsmengen weisen auch deutliche Unterschiede zwischen Sommer- und Winterperiode auf: Die meisten Niederschläge - ausser im Jura - fallen während der Sommerperiode. Während des ersten Winters fallen ausserdem an allen vier Standorten deutlich mehr Niederschläge als während des zweiten Winters. Wie die Summenkurve zeigt, ist die Regenmenge im ersten Winter auf einige wenige, grosse Ereignisse verteilt, während im zweiten Winter viele kleine Ereignisse stattfinden. Die Periode mit den intensivsten Niederschlägen ist bei allen vier Standorten die Zeit von Mai bis Juli 1996. Im Jura ist ausserdem die Zeit von Oktober bis Dezember 1996 sehr niederschlagsintensiv.

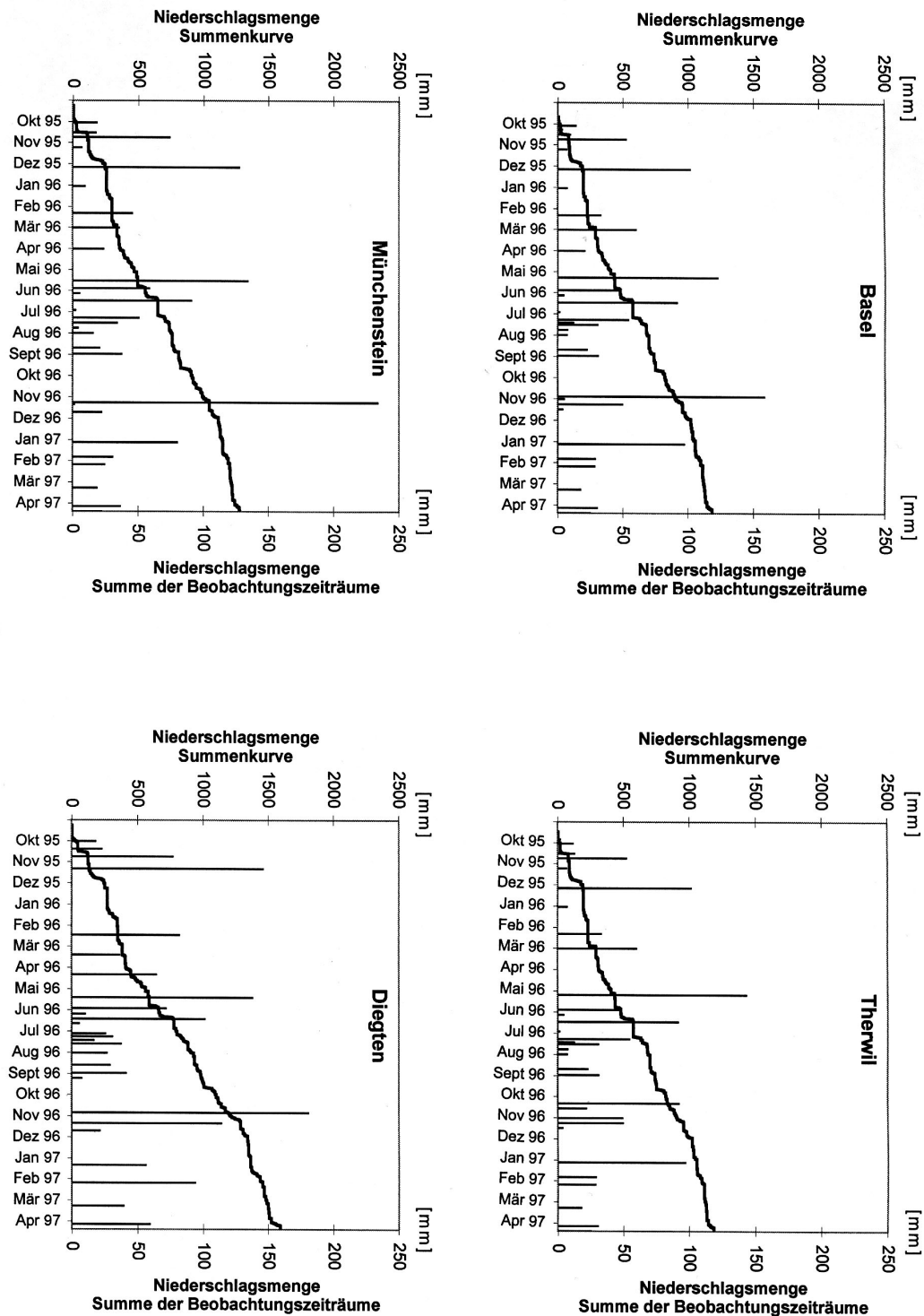


Abb. 26: Niederschlagsdiagramm: Summenkurve der Niederschlagsmengen an den vier Landwirtschaftsstandorten

Die Daten folgender Messstationen der SMA wurden verwendet: Binningen (316 mNN für die Standorte Basel und Therwil, Arlesheim (325 mNN) für den Standort Münchenstein, Eptingen (565 mNN) für den Standort Diegten. Die Säulen zeigen die Niederschlagsmenge, die während eines Beobachtungszeitraumes gefallen ist.

#### 4.1.2 Abtrag

Spritzmaterial, welches ersichtlich (Tropfenform) aus Splasherosion von Bodenmaterial nahe dem Feldkasten stammte, wurde bei den Messungen mit den Feldkästen nicht berücksichtigt. Der Standort Basel (JB) zeigt insgesamt über die drei Messperioden mit 2.329 t/ha die höchste Abtragsmenge, gefolgt vom Jurastandort Diegten (JD/ND) mit 1.293 t/ha, vom Standort Münchenstein (BM) mit 0.65 t/ha und vom Standort Therwil (GT) mit 0.223 t/ha. Mit Ausnahme des Jurastandes sind die Abtragsmengen während dem Maisanbau im Sommer höher als während der Winterperiode mit Winterweizen. Dies ist sicher nicht nur auf die leicht höheren Niederschläge während des Sommers zurückzuführen. Hauptursache für das unterschiedliche Abtragsverhalten dürfte die Bodenart sein. Der stark tonige Schluff (Ut4) beim Standort Basel zeigt die höchste Abtragsmenge, gefolgt vom schwach schluffigen Ton (Tu2) beim Standort Diegten. Am wenigsten Abtrag ergibt sich beim schluffigen Lehm (Lu) des Standortes Therwil resp. beim mittelschluffigen Ton (Tu3) des Standortes Münchenstein. Nebst der Bodenart spielen sicher auch andere Faktoren, wie unterschiedliche Pflanzenbedeckung und Hangneigung, eine wichtige Rolle. So erfolgte zum Beispiel die Saat beim abtragsreichen Standort Basel immer relativ spät, das heisst die Pflanzenbedeckung blieb längere Zeit geringer, holte dann aber - dank dem wärmeren Klima - diesen Rückstand im Verlaufe der Messperiode wieder auf. Die grösste Menge des Abtrages kommt - wie schon im Kapitel 3.1.3.1 diskutiert - durch einige wenige Erosionsereignisse zustande.

Schon RÖMKENS ET AL. (1975) schreiben Unterschiede im Abtrags- und Abflussverhalten von tonreichen Böden (vergleichbar mit den Standorten Diegten und Münchenstein) vor allem dem unterschiedlichen Aggregierungsgrad und der damit verbundenen Verschlammungsneigung und Reduktion der Abflussgeschwindigkeit zu und plädieren deshalb für eine möglichst rauhe Saatbettbereitung. Ähnliche Erkenntnisse werden in ROTH (1996) zusammengefasst. Das Abtrags- und Abflussverhalten von Böden hängt stark von ihrer Oberflächenrauigkeit ab, welche wiederum durch Verschlammung oder Verdichtungen im Fahrspur- und Pflugsohlenbereich verursacht wird. Dabei weisen Böden mit einem Tongehalt von < 25%, zum Beispiel aus Löss, im lufttrockenen Zustand die höchste Zerfallsrate auf und gelten als besonders verschlammungsanfällig.

Grundsätzlich führen vor allem zwei Prozesse zu Verschlammung:

- (i) Verdichtung an der Bodenoberfläche durch kinetische Energie der aufprallenden Regentropfen (Aggregate bleiben intakt) und
- (ii) Einregelung an der Oberfläche und Einwaschung in der Tiefe von Partikeln nach Luftsprengung der Aggregate oder Ablösung von Partikeln von der Aggregatoberfläche und folgender Dispergierung der Partikel.

Bleiben die Aggregate beim ersten Tropfenaufprall intakt, hängt die Verschlammung von der plastischen Verformbarkeit ab. Bei Böden mit noch lockerer Struktur und sandigen Böden ist diese gering und Niederschlag führt eher zu einer Partikellockerung. Bei Schluff- und Tonböden mit hoher Partikelkohäsion hingegen wirken die Regentropfen aufgrund der sich ausbreitenden Druckwelle eher oberflächenverdichtend.

Im Gegensatz zur Aggregatverformung bezieht sich die Einregelung auf zersprengte, losgelöste und dispergierte Partikel und hängt von deren Grösse ab. Während Sandteilchen eher in die Luft spritzen und auf der Oberfläche bleiben, werden Schluffteilchen unter der Bodenoberfläche eingeregelt und mit der Zeit verdichtet. Daraus ergibt sich eine geschichtete Verschlammung. Die Einwaschung von Ton und Feinschluff setzt voraus, dass die Oberfläche noch genügend infiltrationsfähig ist. Auf Schluff- und Sandböden, allgemein bei feuchten Böden und bei geringen Niederschlagsintensitäten kommt es dann zu einer Einwaschung der feinsten Schluff- und Tonteilchen unterhalb der Bodenoberfläche.

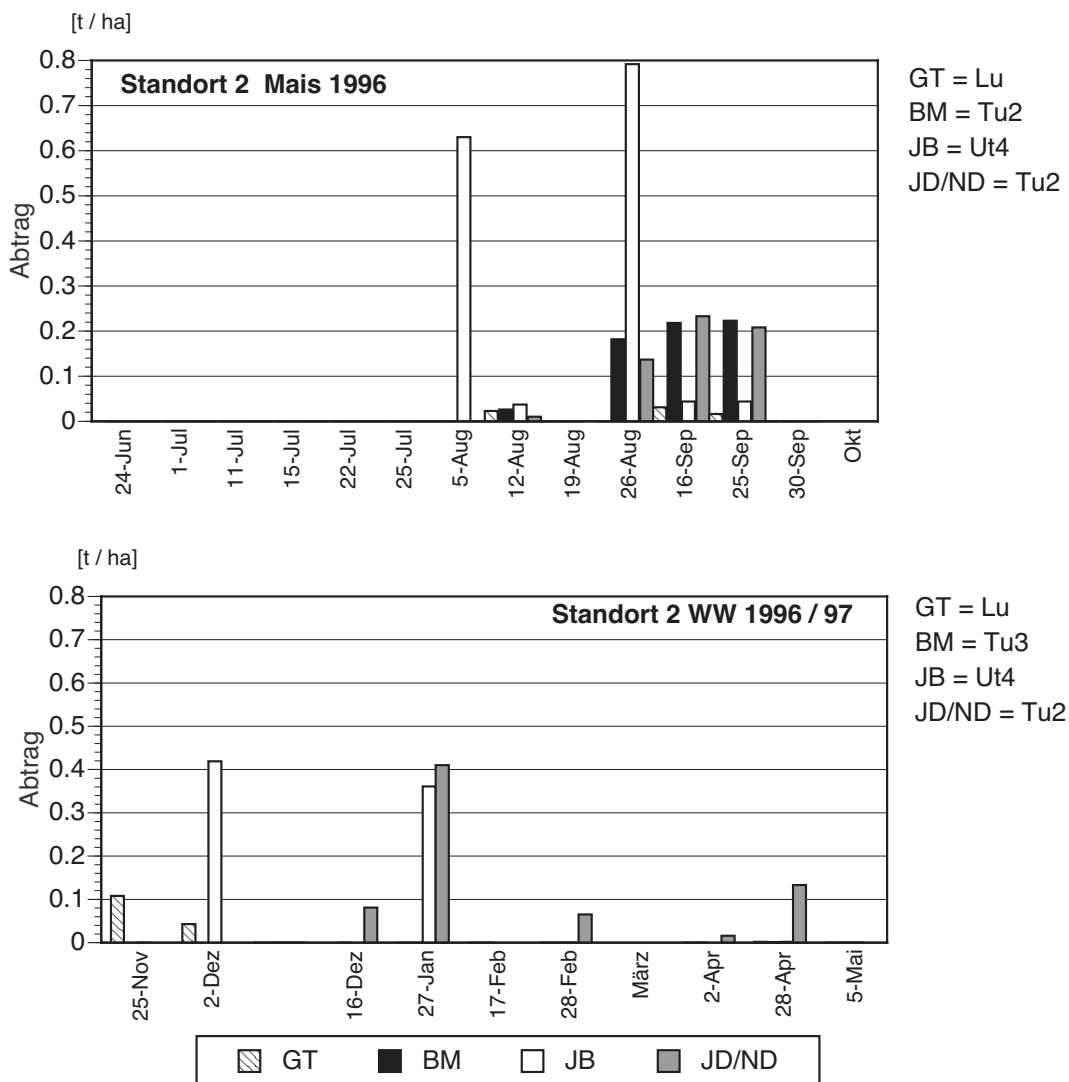


Abb 27. Das Abtragsgeschehen auf den vier Landwirtschaftsparzellen während drei Messperioden. Während der ersten Messperiode konnte bei allen Standorten nur Spritzmaterial festgestellt werden. Tendenziell ist im Sommer - während dem Maisanbau - mehr Abtrag festzustellen. Wie auch auf den vegetationslosen Testparzellen sind es einige wenige Ereignisse, die den grössten Anteil der Abtragsmenge liefern. Ausführlichere Daten im Anhang (A10).

Böden weisen in einer ersten, unverschlämmten Phase nach der Saatbettbereitung aufgrund höherer Infiltrabilität geringere Abflussmengen auf, aber höhere Splasherosionsraten. Nach der Verschlämmung hingegen nimmt die Splasherosion ab, dafür die Abflussneigung zu und damit auch die Wahrscheinlichkeit für Abtrag durch fließendes Wasser, was durch Rillenerosion zu grossen Abträgen führen kann. Dieselben Schlüsse zieht auch RUDOLPH (1997), welcher sagt, dass die oberflächliche Verschlämmung die Bodenablösbarkeit reduziert und also die Konsolidierung der Oberflächenverschlämmung den Einfluss des Mikroreliefs aufhebt. Das Mikrorelief fungiert also nur als Zeitvariable. Ähnlich sehen auch MATHIER & ROY (1993) den Effekt einer oberflächlichen Verschlämmung vergleichbar dem einer zunehmenden Vegetationsdecke.

#### **4.1.3 Abfluss**

Beim Abfluss zeigen die Standorte Basel (JB) und Therwil (GT) über die gesamte Messzeit mit 48.0 resp. 42.55 mm die höchsten Werte. Die geringsten Werte weist mit 9.9 mm der Standort Münchenstein (BM) auf. Im Jura (Diegten, JD/ND) werden 20.3 mm gemessen. Hier scheint sich ein klarer Zusammenhang mit der Körnung abzuzeichnen. So sind die schluffreichen Böden (Ut4, Lu), welche zu oberflächlichen Verschlämmungen neigen, klar abflussanfälliger als die Böden mit geringerem Schluffgehalt. Auch hier machen einige wenige Ereignisse den grössten Anteil an der gemessenen Abflussmenge aus. Wie schon beim Abtrag zeigen sich, mit Ausnahme von Diegten, die grössten Abflussmengen während dem Maisanbau im Sommer 1996.

#### **4.1.4 Splash**

Die durch Spritzerosion verlagerten Bodenmengen sind deutlich höher als diejenigen, welche wirklich abtransportiert wurden. Mit insgesamt 13.1 t/ha über die zwei Messperioden zeigt auch hier der Standort Basel (JB) die höchsten Erosionsmengen, knapp gefolgt von Münchenstein (BM) mit 12.26 t/ha und Diegten (JD/ND) mit 10.22 t/ha. Die geringsten Mengen sind am Standort Therwil (GT) festzustellen (5.64 t/ha). Mit Ausnahme von Basel werden während dem Winterweizenanbau grössere Spritzerosionsmengen gemessen als im Maisanbau. Dies dürfte unter anderem damit zusammenhängen, dass beim Maisanbau der Boden durch Fahrspuren oberflächlich verdichtet wird. Das führt zwar einerseits zu gesteigertem Abflussverhalten, wirkt aber andererseits auf die Splasherosion eher mindernd. Die Resultate aller vier Standorte können dahingehend interpretiert werden, dass durch Spritzerosion Bodenmaterial zum Abtransport bereitgestellt wird, dass jedoch nur ein geringer Anteil davon wirklich auch abtransportiert wird (transportlimitierte Erosion).

Interessanterweise zeigen die Standorte Münchenstein und Diegten, welche sehr niedrige Abfluss- und Abtragswerte aufweisen, relativ hohe Splashwerte. Während der ersten Messperiode sind sie klar höher als diejenigen der Standorte Basel und Therwil. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die oberflächliche Verschlammungsschicht der schluffreichen Böden hier fehlt und entsprechend mehr Bodenmaterial durch Regentropfenerosion losgelöst werden kann. Auch die Untersuchungen beim Standort Basel unterstützen diese Hypothese: Nach dem Hacken und Häufeln im Mais (also nach einer Bodenlockerung) sind plötzlich auch im schluffreichen Boden sehr hohe Splasherosionsmengen feststellbar.

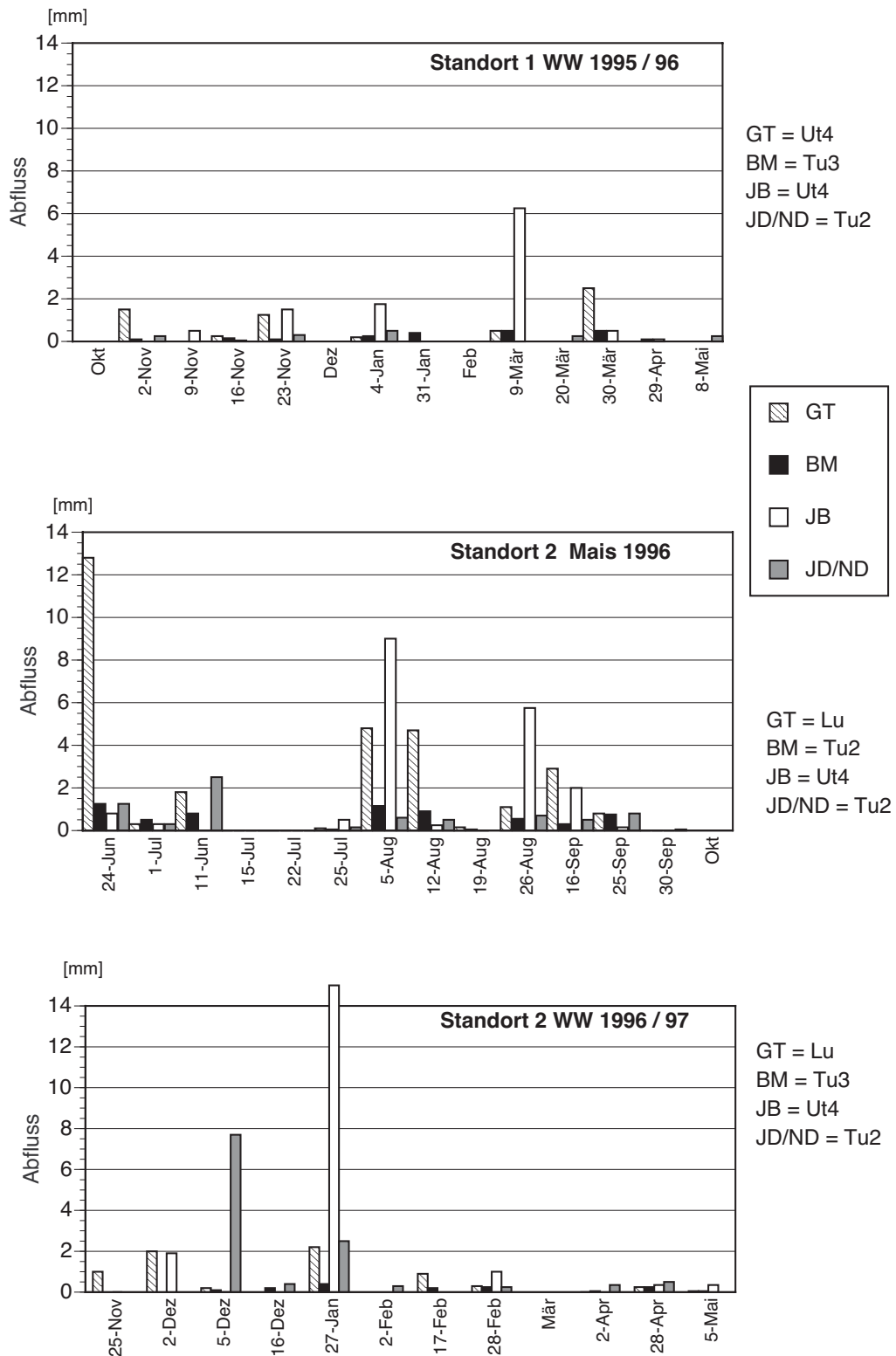


Abb. 28: Das Abflussgeschehen auf den vier Landwirtschaftspartellen während drei Messperioden. Im Sommer - während dem Maisanbau - kommt es vermehrt zu Abfluss. Einige wenige Ereignisse machen den grössten Anteil der Abflussmenge aus. Sie finden vor allem auf den zu oberflächlichen Verschlammungen neigenden schluffreichen Böden (Lu, Ut4) statt. Ausführlichere Daten im Anhang (A10).

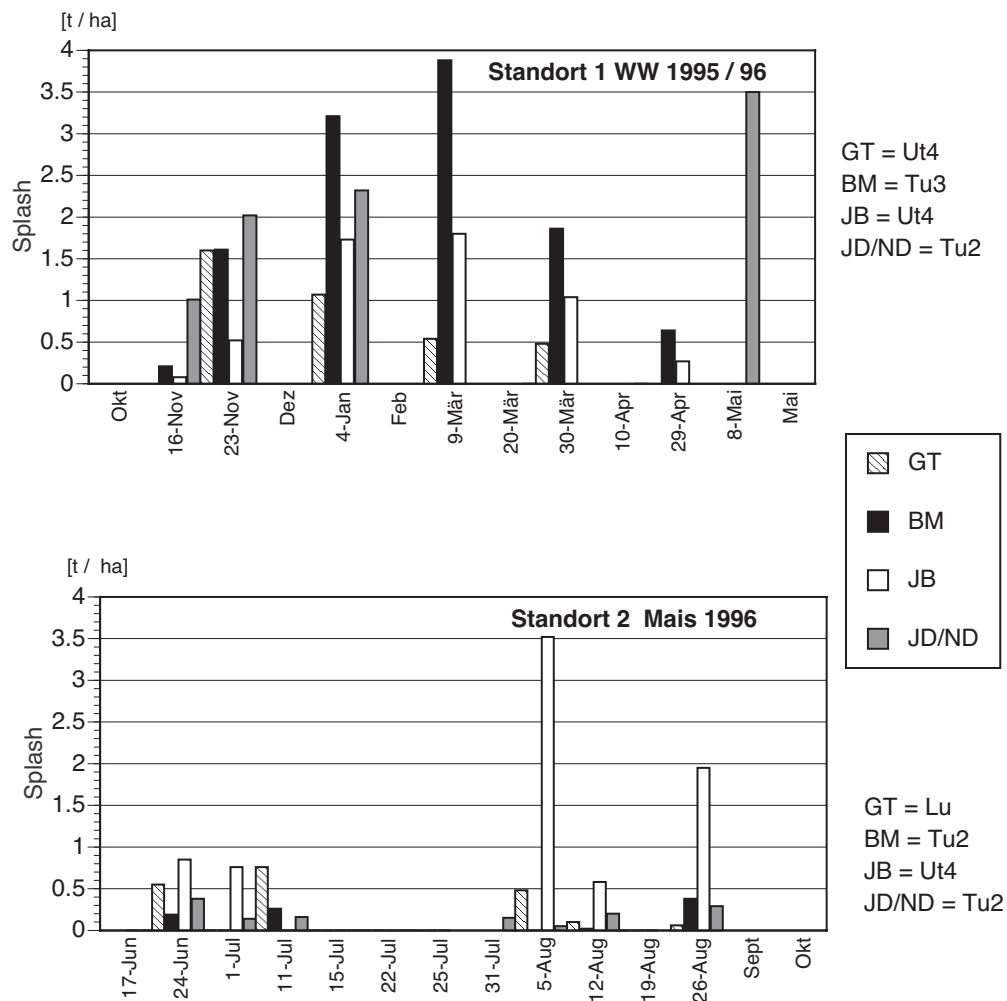


Abb. 29: Die Splasherosion auf den vier Landwirtschaftspartellen während zwei Messperioden. Tendenziell zeigen die schluffreichen Böden (Ut4, Lu), mit einer oberflächlichen Verschlammungsschicht, weniger Splasherosion als die tonreicheren Böden. Auch ist im Maisanbau mit vermehrten Überfahrten (Bearbeitung) und daraus folgend Verdichtungen im obersten Bodenbereich, weniger Splasherosion feststellbar. Ausführlichere Daten im Anhang (A10).

SHARMA ET AL. 1995 finden bei grobkörnigeren Böden, dass die abgelösten Partikel vorwiegend im näheren Umkreis des Ablösungsortes wieder abgelagert werden, dass die Erosion also transportlimitiert ist. Bei feinkörnigeren, tonreicheren Böden hingegen stellen sie kaum Unterschiede zwischen der Splasherosion und dem Sedimentaustrag fest, was auf ablösungslimitierte Erosion hinweist. Diese zweite Aussage kann durch die vorliegende Arbeit nicht bestätigt werden, bleibt doch während der ganzen Untersuchungsperiode die Splasherosionsrate bei allen Böden bedeutend höher als die Abtragsrate. SIEGRIST ET AL. 1998 fand bei Untersuchungen auf Löss, dass Böden mit hoher Aggregatstabilität aufgrund ihrer geringeren Verschlammungsanfälligkeit auch tendenziell geringere Splasherosionsraten aufweisen. Auch BOLLINE (1978) fand eine positive Korrelation zwischen Aggregatstabilität und Splasherosion, während der Abtrag negativ mit der Aggregatstabilität korreliert ist.



**Fazit:**

- Bei allen vier Standorten und bei beiden Feldfrüchten ist die Erosion transportlimitiert. Die Transportlimitierung nimmt entsprechend von:  
Weizen tonig > Weizen schluffig > Mais tonig > Mais schluffig ab.
- Die Wirkung eines groben Mikroreliefs resp. eines höheren Tongehaltes als Reduktoren der Splasherosion scheint bei schluffreichen Lössböden durch die Ausformung einer Verschlämmschicht aufgehoben.
- Schluffreiche Böden, welche oberflächlich stark verschlämmen, neigen im Gegensatz zu tonreichen Böden zu erhöhtem Abflussverhalten und damit verbunden auch zu grösseren Abträgen. Durch die oberflächliche Verschlammungsschicht wird allerdings die Splasherosion eingedämmt.
- Der Maisanbau wirkt durch die ausgeprägten Fahrspuren abtrags- und abflussfördernd, der Weizenanbau durch die lockere Oberfläche splasherosionsfördernd.

## 4.2 Spezielle Untersuchungen zur Erodierbarkeit der Landwirtschaftsparzellen

### 4.2.1 Verhalten verschiedener Bodenfaktoren im Jahresverlauf und in verschiedenen Hanglagen

Die Bodenfaktoren wurden in allen vier Untersuchungsgebieten an zwei (resp. bei BM an drei) Standorten gemessen, welche aufgrund ihrer Fruchtfolge und ihrer Topographie ausgesucht wurden (vgl. Tab. 8). Bei allen Standorten zeigt sich deutlich, dass die Bodenfaktoren im Sommerhalbjahr eine bedeutend grössere Amplitude aufweisen als im Winterhalbjahr. Die Gründe dafür liegen in den grösseren Wassergehalts- und Temperaturschwankungen, der aktiveren Mikrofauna und dem höheren Pflanzenwurzelvorkommen im Sommerhalbjahr.

#### 4.2.1.1 Aggregatstabilität

Der Unterschied in der mit der Perkolationsmethode gemessenen Aggregatstabilität zwischen Winter- und Sommerhalbjahr ist sehr auffällig (Abb. 30). Es zeigt sich auch ein unterschiedliches Verhalten bei stark schluffigen resp. stärker tonigen Böden: schluffige Böden zeigen prinzipiell grössere Schwankungen in ihrer Aggregatstabilität als tonreichere Böden. Diese Schwankungen dürften vor allem aufgrund der Ausbildung der oberflächlichen Verschlämmschicht zustande kommen.

Alle Standorte weisen im Winter eine leichte Abnahme ihrer Stabilität auf (Ausnahme die beiden schluffreichen Böden bei GT und JB am Standort 1). Interessant ist auch der Peak in der Aggregatstabilität im Sommer 96, welcher bei allen Böden auftritt, wobei er beim schluffreichen JB-Boden am ausgeprägtesten ist und beim lehmigen GT-Boden am flachsten. Das Absinken der Aggregatstabilität auf einen Tiefstwert im August 96 erfolgt bei allen Böden in ähnlicher Weise und dürfte vor allem klimatische Gründe haben.

Wie bereits im Kap. 3.3.1.1 diskutiert, werden für die Veränderung der Aggregatstabilität verschiedene Gründe genannt. Die Resultate von HOFMAN & APPELMANS (1975), welche auf bearbeiteten Löss-Ackerböden die tiefste Aggregatstabilität zwischen Januar und März und die höchste zwischen Juli und September fanden, können tendenziell bestätigt werden.

Interessant ist, dass die schluffreichen Böden (Ut4) der Standorte Basel (JB) und Therwil (GT) tendenziell eine höhere Perkolationsstabilität und damit eine geringere Verschlammungsneigung aufweisen als die Böden der anderen Standorte. Dies widerspricht der Theorie, dass schluffreiche Böden stärker verschlammungsanfällig sind als tonreichere (z.B. ROTH 1996). So haben schluffreiche Böden einerseits aufgrund ihrer Korngrösse eine bessere Durchlässigkeit bei Perkolationsversuchen. Andererseits bewirkt ihr geringer Tongehalt eine schlechte Aggregatstabilität. Es zeigt die starke Bodenartenabhängigkeit der Perkolationsmethode, welche einen absoluten Vergleich von Standorten mit sehr unterschiedlichen Bodenarten nicht erlaubt (KAINZ & WEISS 1988, AUERSWALD 1994, GERLINGER 1997). Der relative Vergleich zwischen den Standorten (Verhalten im Jahresverlauf), wie in der vorliegenden Untersuchung durchgeführt, ist jedoch möglich und liefert gute Resultate.

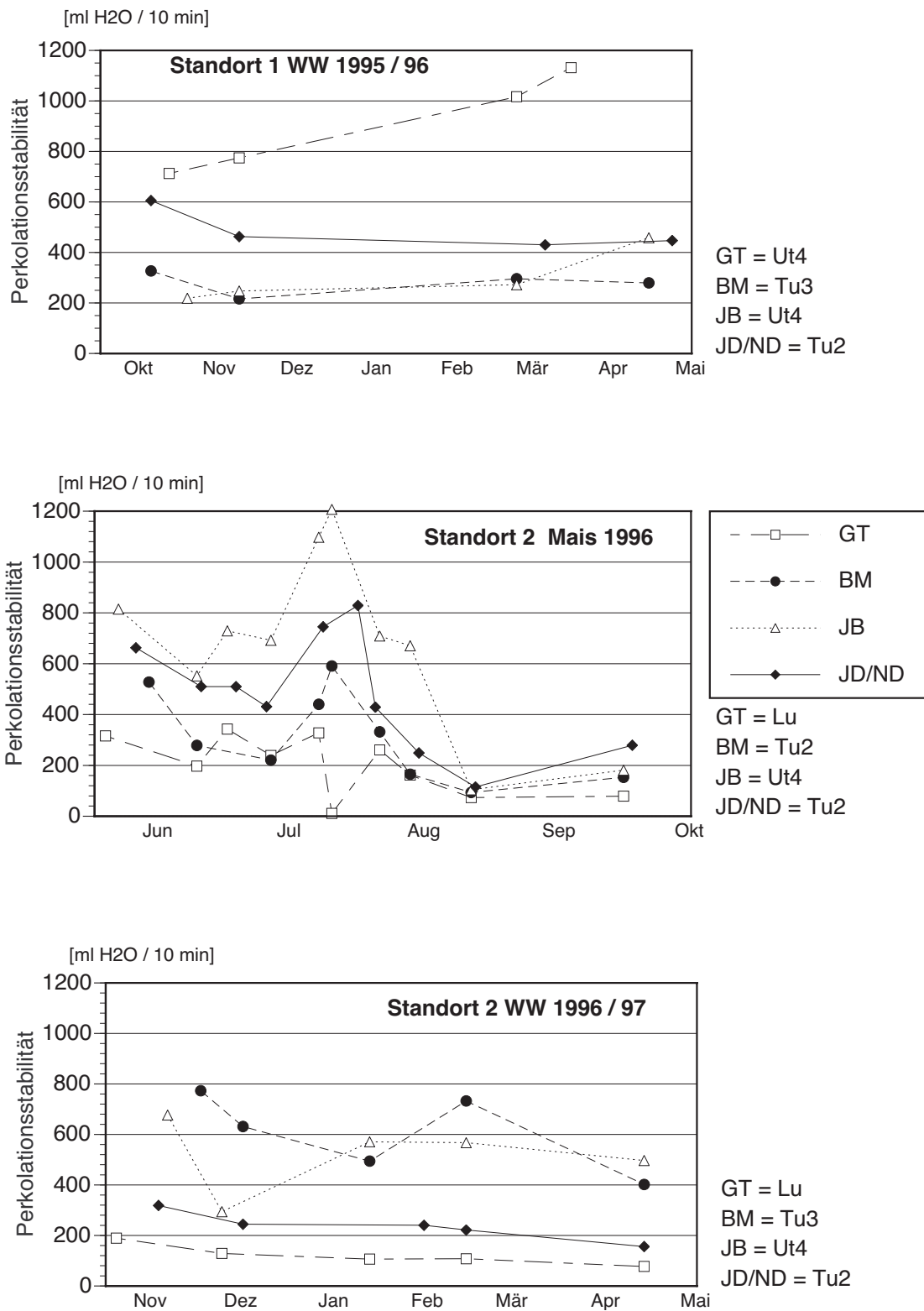


Abb. 30: Die Aggregatstabilität der vier Landwirtschaftsstandorte im Jahresverlauf  
 Die Aggregatstabilität wurde mit der Perkolationsmethode bestimmt. Sie zeigt bei allen Böden deutliche Schwankungen während der Sommerperiode, während die Werte im Winterhalbjahr beständiger bleiben.

#### 4.2.1.2 Scherwiderstand

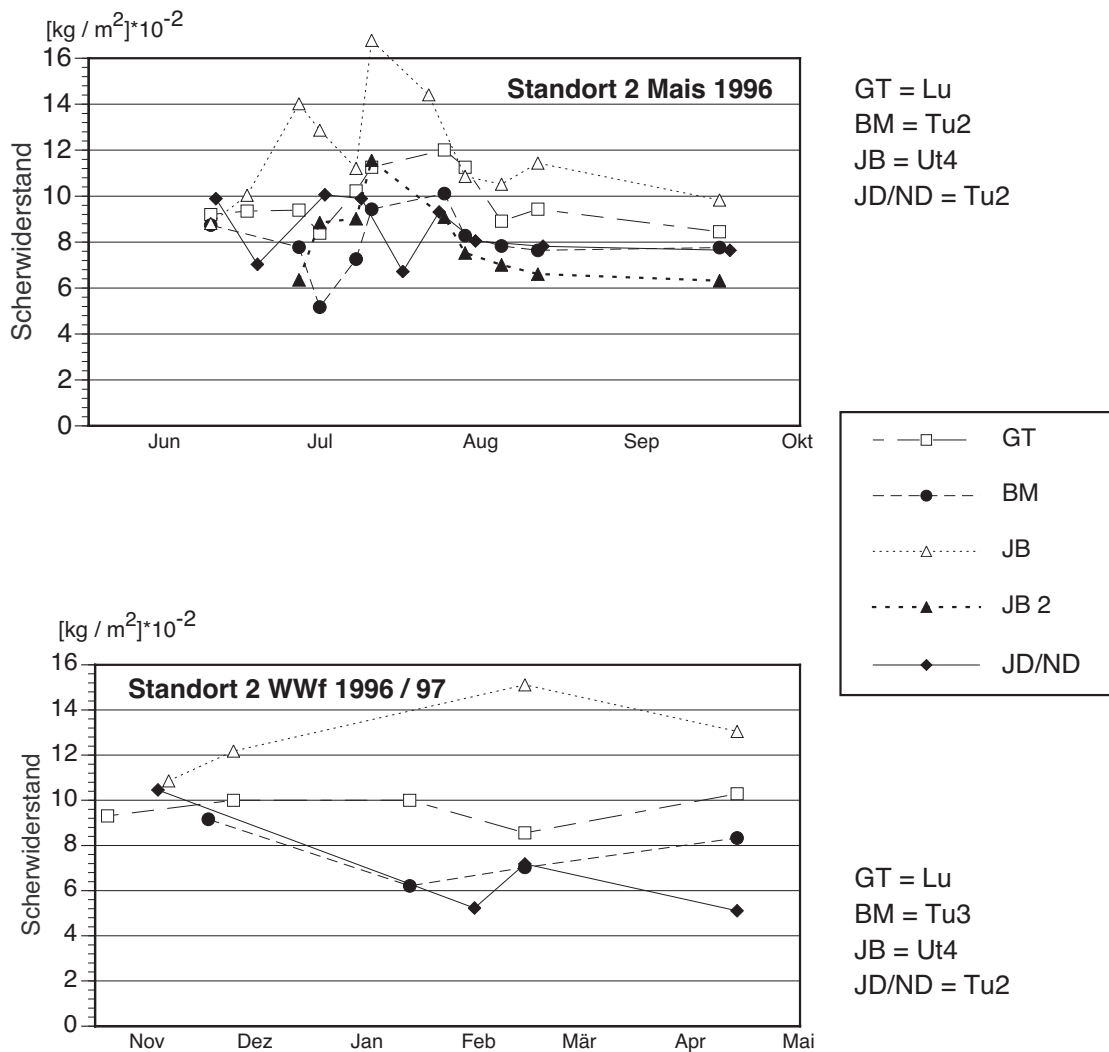


Abb. 31: Der Scherwiderstand der vier Landwirtschaftsstandorte im Jahresverlauf

JB: Messung in der Fläche zwischen den Walmen, JB2: Messung im Walme um die Maispflanzen. Der schluffreiche, verschlammungsanfälligste Boden des Standortes Basel (JB) zeigt die höchste Scherfestigkeit.

Auch der Scherwiderstand schwankt im Sommer deutlich mehr als im Winter, wobei die Werte bei den entsprechenden Böden in ähnlichen Grössenbereichen bleiben: Der schluffreiche Boden bei JB weist das ganze Jahr über die höchsten Scherwiderstände auf, welche sich zwischen 10 und 16  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot 10^{-2}$  bewegen. Dies dürfte vor allem auf die scherfeste, oberflächliche Verschlämmungsschicht zurückzuführen sein. Die geringste Scherfestigkeit (zwischen 5 und 10  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot 10^{-2}$ ) weisen hingegen die tonreichen Böden auf, welche oberflächlich weniger verschlämmen und eher zur Ausbildung von Aggregatbruchstücken neigen. Auffällig sind auch die starken Schwankungen während des Sommers, welche auf die mit dem Niederschlagsgeschehen verbundene zunehmende Verschlämmung resp. das Aufreissen dieser Verschlämmungsschicht beim Trocknen zurückzuführen sein dürfte.

Wie schon im Kap. 3.3.1.2 diskutiert, gibt es kaum Studien zum Jahresgang der Scherfestigkeit. SHARMA ET AL. (1991), MELLIS ET AL. (1996), ROTH (1996) bestätigt die Erhöhung der Scherfestigkeit bei der Ausbildung einer Verschlammungsschicht. SHARMA ET AL. (a.a.o.) stellt gleichzeitig eine erhöhte Scherfestigkeit bei hohem Tongehalt fest. In der vorliegenden Studie scheint aber die Ausbildung der Verschlammungsschicht den Scherwiderstand in grösserem Masse zu beeinflussen als der Tongehalt.

#### 4.2.1.3 Bodenwassergehalt

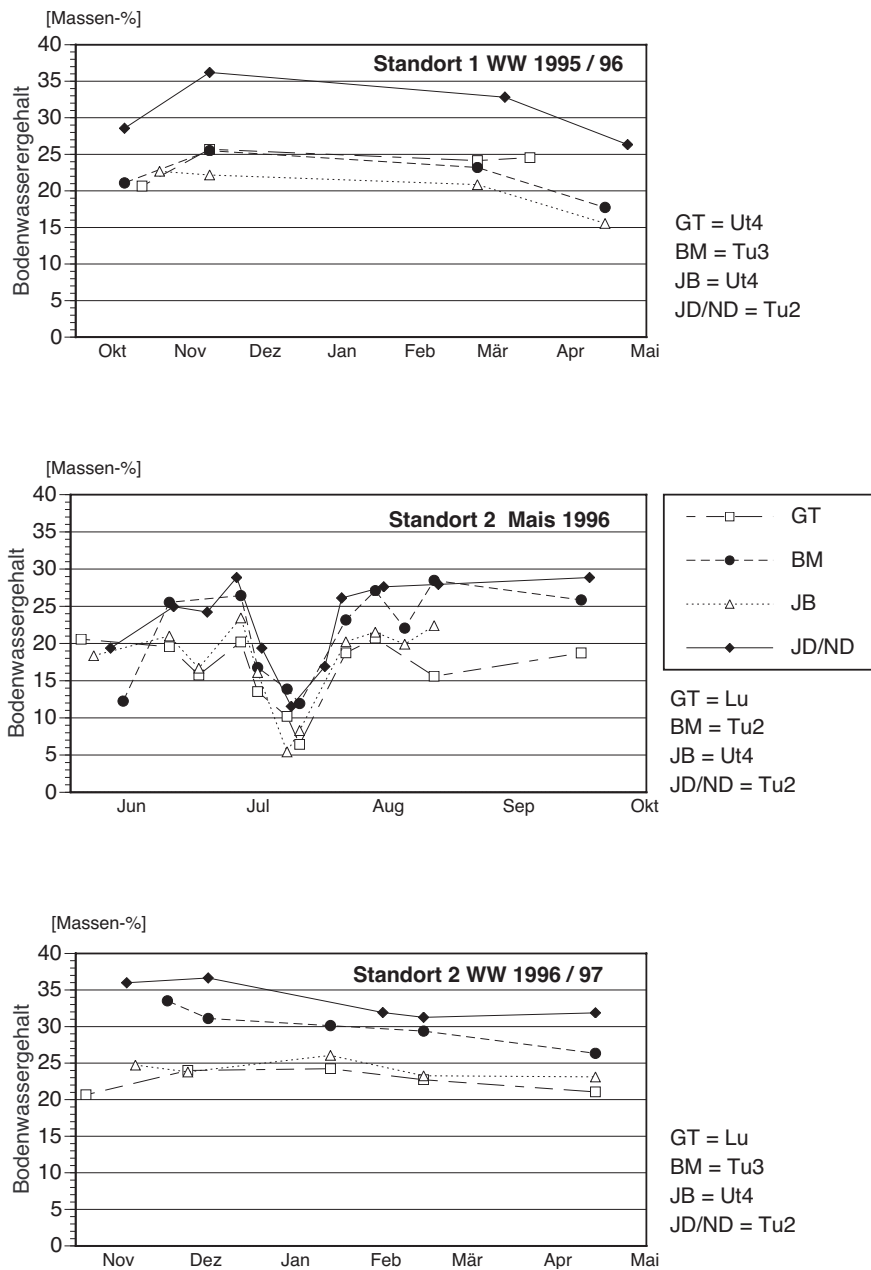


Abb. 32: Der Bodenwassergehalt der vier Landwirtschaftsstandorte im Jahresverlauf. Die tonreichen Böden zeigen den höchsten Bodenwassergehalt.

Erwartungsgemäss sind auch beim Bodenwassergehalt die grossen Schwankungen im Sommerhalbjahr zu verzeichnen. Der Kurvenverlauf zeigt das umgekehrte Bild zu demjenigen der Aggregatstabilität. Dieser Zusammenhang lässt sich allerdings statistisch nicht gesichert beweisen (Tab Korrelationen Bodenfaktoren, LW Parzellen, Kap. 4.2.2). Tendenziell dürfte aber ein hoher Bodenwassergehalt eher zu einer tieferen Aggregatstabilität resp. zu einer grösseren Verschlammungsanfälligkeit führen und umgekehrt. Erwartungsgemäss zeigen die tonreicheren Böden das ganze Jahr durch höhere Wassergehaltswerte als die schluffigen Böden.

#### 4.2.2 Zusammenhang der einzelnen Faktoren untereinander und mit Abtrag, Abfluss, Splash und Niederschlagsmenge

Die statistischen Berechnungen wurden einerseits mit den Werten aller vier Standorte durchgeführt, andererseits aber auch getrennt für die einzelnen Standorte, um bodenartenbedingte Unterschiede zu erfassen. Signifikante statistische Ergebnisse ergeben sich aber nur bei der Betrachtung aller vier Standorte zusammen, da für die Einzelbetrachtungen zu wenig Daten vorhanden sind.

Tab. 36: (E2) Korrelationsmatrix der Bodenfaktoren bei Landwirtschaftsparzellen

Werden die vier Standorte gemeinsam betrachtet, ergeben sich andere Resultate, als wenn sie einzeln analysiert werden. Interessant ist der Vorzeichenwechsel beim Zusammenhang von Aggregatstabilität und Bodenwassergehalt: der sehr tonreiche und schluffarme Juraboden verhält sich umgekehrt zu den schluffreicheren Böden.

E2alle korr. tr	AS	SW	WG
<b>AS</b>	<b>1</b>		
<i>n</i>			
<i>P</i>			
<b>SW</b>	<b>*0.310</b>	<b>1</b>	
<i>n</i>	51		
<i>P</i>	0.027		
<b>WG</b>	<b>-0.158</b>	<b>***-0.441</b>	<b>1</b>
<i>n</i>	74	52	
<i>P</i>	0.179	<0.001	

E2GT korr. tr	AS	SW	WG
<b>AS</b>	<b>1</b>		
<i>n</i>			
<i>P</i>			
<b>SW</b>	<b>0.383</b>	<b>1</b>	
<i>n</i>	14		
<i>P</i>	0.181		
<b>WG</b>	<b>0.127</b>	<b>-0.287</b>	<b>1</b>
<i>n</i>	19	14	
<i>P</i>	0.609	0.328	

E2BM korr. tr	AS	SW	WG
<b>AS</b>	<b>1</b>		
<i>n</i>			
<i>P</i>			
<b>SW</b>	<b>0.013</b>	<b>1</b>	
<i>n</i>	12		
<i>P</i>	0.970		
<b>WG</b>	<b>0.155</b>	<b>-0.243</b>	<b>1</b>
<i>n</i>	18	12	
<i>P</i>	0.545	0.457	

E2JD korr. tr	AS	SW	WG
<b>AS</b>	<b>1</b>		
<i>n</i>			
<i>P</i>			
<b>SW</b>	<b>0.395</b>	<b>1</b>	
<i>n</i>	12		
<i>P</i>	0.210		
<b>WG</b>	<b>** -0.590</b>	<b>-0.223</b>	<b>1</b>
<i>n</i>	19	12	
<i>P</i>	0.007	0.496	

E2JB korr. tr	AS	SW	WG
<b>AS</b>	<b>1</b>		
<i>n</i>			
<i>P</i>			
<b>SW</b>	<b>0.319</b>	<b>1</b>	
<i>n</i>	13		
<i>P</i>	0.296		
<b>WG</b>	<b>†0.428</b>	<b>-0.078</b>	<b>1</b>
<i>n</i>	18	14	
<i>P</i>	0.077	0.795	

† P < 0.1  
 \* P < 0.05  
 \*\* P < 0.01  
 \*\*\* P < 0.001

Während die Betrachtung aller vier Standorte einen stark signifikanten Zusammenhang zwischen Bodenwassergehalt und Scherwiderstand ergibt, was die Untersuchungen von SCHJØNNING (1994) und GERLINGER (1997) bestätigen, zeigt sich dieser in den Betrachtungen der Einzelstandorte nicht. Bei diesen zeigt sich bei zwei Standorten ein Zusammenhang zwischen dem Bodenwassergehalt und der Aggregatstabilität - und zwar bei den Böden mit dem grössten Ton- resp. Schluffgehalt. Interessanterweise ist die Aggregatstabilität beim tonreichen Juraboden negativ mit dem Bodenwassergehalt, beim schluffreichen Lössboden hingegen positiv mit dem Bodenwassergehalt korreliert. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass die Tondispersierung bei der Perkolationsstabilität eine zentrale Rolle spielt. Zusammen mit den Erkenntnissen aus Kap. 3.3.2.1 muss geschlossen werden, dass sich der Einfluss des Bodenwassergehalts auf die Aggregatstabilität bei tonreichen Böden umgekehrt verhält wie bei schluffreichen Böden.

Die Regressionsgleichung für die stark signifikanten Korrelationen lauten:

a) Für alle vier Standorte:

$$SW = 13.079 - 0.154 * WG \quad R^2 = 0.195; n = 52$$

b) für den Standort JD/ND mit der Bodenart schwach schluffiger Ton (Tu2):

$$\log(AS) = 3.143 - 0.021 * WG \quad R^2 = 0.348; n = 19$$

#### 4.2.2.1 Einfluss von Abfluss, Abtrag, Splash und Niederschlagsmenge auf die Bodenfaktoren

Werden die Erosionsereignisse Abtrag, Abfluss und Splash mit den danach gemessenen Bodenfaktoren korreliert, zeigen sich unterschiedliche Resultate, je nachdem, ob die Standorte einzeln oder gemeinsam betrachtet werden. Als sicherster Zusammenhang kann derjenige zwischen der Niederschlagsmenge und dem Bodenwassergehalt betrachtet werden, dieser ist bei den lehmigen Böden der Standorte Therwil (GT) und Münchenstein (BM) am auffälligsten. Auf die Interpretation schwacher Korrelationen wird verzichtet. Interessant ist auch der Zusammenhang zwischen Bodenwassergehalt und Abfluss beim schluffreichen Boden des Standortes Basel (JB). Hierbei dürfte es sich um eine Scheinkorrelation handeln, da sowohl der Bodenwassergehalt wie auch der Abfluss durch die Ausbildung der Verschlämmschicht positiv beeinflusst werden.

Der von KINNELL ET AL. (1996) auf einem Ackerstandort sowie SIEGRIST (1997) auf einer Schwarzbrache-Testparzelle aufgezeigte Einfluss des vorhergehenden Erosionsgeschehens auf die Erodierbarkeit repräsentierende Bodenfaktoren kann somit in der vorliegenden Studie auf Ackerstandorten nicht bestätigt werden, weist doch nur die Aggregatstabilität eines Standortes einen leicht positiven Zusammenhang mit dem vorherigen Splasherosionsgeschehen auf.

E5b alle korr. tr		Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
AS	n	-0.146	-0.146	0.280	0.002	-0.082
	P	0.294	0.581	0.188	0.985	0.487
SW	n	0.239	-0.039	0.134	0.064	-0.021
	P	0.138	0.898	0.640	0.636	0.875
WG	n	0.101	0.093	0.161	***0.473	***0.371
	P	0.470	0.729	0.456	>0.001	>0.001

E5bBM korr. tr		Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
AS	n	-0.430	-0.541	0.435	-0.182	-0.230
	P	0.146	0.545	0.352	0.476	0.365
SW	n	0.064	-	-0.420	†0.499	0.001
	P	0.865		0.654	0.070	0.998
WG	n	0.424	0.310	-0.424	†0.457	*0.559
	P	0.152	0.748	0.365	0.056	0.015

E5bGD korr. tr		Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
AS	n	0.085	-	†0.702	0.196	-0.192
	P	0.778		0.052	0.426	0.437
SW	n	0.212	-	-0.065	0.204	-0.171
	P	0.518		0.927	0.456	0.534
WG	n	0.312	-	†0.678	***0.679	*0.53
	P	0.285		0.065	>0.001	0.018

Abtrag: zu wenig Beobachtungen!

E5bJD korr. tr		Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
AS	n	-0.070	-0.058	-0.003	0.002	-0.155
	P	0.817	0.934	0.995	0.993	0.533
SW	n	0.478	0.241	0.051	0.285	0.440
	P	0.202	0.806	0.929	0.353	0.135
WG	n	0.056	0.130	0.463	0.389	0.073
	P	0.853	0.853	0.220	0.101	0.770

E5bJB korr. tr		Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
AS	n	-0.469	-0.604	-0.146	0.005	0.070
	P	0.107	0.226	0.742	0.984	0.780
SW	n	-0.049	-0.127	†0.849	0.135	-0.060
	P	0.904	0.857	0.077	0.638	0.834
WG	n	**0.702	-0.181	0.324	0.310	0.365
	P	0.006	0.752	0.452	0.186	0.114

† P < 0,1  
 \* P < 0,05  
 \*\* P < 0,01  
 \*\*\* P < 0,001

Tab. 37: (E5b) Korrelationsmatrix der Erosionsereignisse mit den **danach** gemessenen Bodenfaktoren Die Erosionsparameter Abtrag, Abfluss und Splash sowie die Niederschlagsmenge werden mit den **später** gemessenen Bodenfaktoren Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Bodenwassergehalt korreliert: Werden die Bodenfaktoren durch das vorherige Niederschlags- und Erosionsgeschehen beeinflusst?



Die Regressionsgleichung für die stark signifikanten Korrelationen lauten:

a) Für alle vier Standorte:

$$WG = 16.159 + 1.563 * (NM)^{1/2} \quad R^2 = 0.224; n = 76$$

$$WG = 18.259 + 0.913 * (NMW)^{1/2} \quad R^2 = 0.138; n = 76$$

b) für den Standort GT mit der Bodenart stark toniger Schluff (Ut4) resp. schluffiger Lehm (Lu):

$$WG = 13.218 + 1.543 * (NM)^{1/2} \quad R^2 = 0.461; n = 19$$

$$WG = 17.873 + 1.922 * \log(NMW) \quad R^2 = 0.281; n = 19$$

c) für den Standort BM mit der Bodenart mittelschluffiger Ton (Tu3) resp. schwach schluffiger Ton (Tu2):

$$(WG)^2 = 370.057 + 52.689 * (NMW)^{1/2} \quad R^2 = 0.348; n = 19$$

d) für den Standort JB mit der Bodenart stark toniger Schluff (Ut4):

$$\log(\text{Abfluss}) = -0.852 + 1.22E^{-4} * (WG)^{1/3} \quad R^2 = 0.493; n = 13$$

#### 4.2.2.2 Voraussage von Abfluss, Abtrag und Splash durch die Bodenfaktoren und die Niederschlagsmenge?

Tab. 38: (E5a) Korrelationsmatrix der Erosionsereignisse mit den **vorher** gemessenen Bodenfaktoren Die Erosionsparameter Abtrag, Abfluss und Splash werden mit den **vorher** gemessenen Bodenfaktoren Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Bodenwassergehalt korreliert: Können die Bodenfaktoren Hinweis auf das Erosionspotential geben?

E5a alle korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>AS</b>	<b>-0.048</b>	<b>0.091</b>	<b>-0.404</b>
n	51	15	16
P	0.738	0.753	0.886
<b>SW</b>	<b>†0.301</b>	<b>0.093</b>	<b>0.014</b>
n	42	16	12
P	0.053	0.737	0.965
<b>WG</b>	<b>-0.08</b>	<b>-0.013</b>	<b>0.390</b>
n	52	16	16
P	0.577	0.962	0.137

E5aGT korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>AS</b>	<b>0.176</b>	–	<b>0.531</b>
n	14	–	5
P	0.556	–	0.403
<b>SW</b>	<b>0.143</b>	–	<b>0.006</b>
n	12	–	4
P	0.665	–	0.995
<b>WG</b>	<b>-0.172</b>	–	<b>0.143</b>
n	12	–	5
P	0.564	–	0.8385

Abtrag: zu wenig Beobachtungen!

E5aBM korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>AS</b>	<b>0.006</b>	–	–
n	12	–	–
P	0.987	–	–
<b>SW</b>	<b>0.517</b>	–	–
n	9	–	–
P	0.161	–	–
<b>WG</b>	<b>-0.393</b>	–	–
n	12	–	–
P	0.213	–	–

Abtrag und Splash: zu wenig Beobachtungen!

E5aJD korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>AS</b>	<b>-0.200</b>	<b>-0.913</b>	<b>-0.433</b>
n	15	5	8
P	0.502	0.029	0.300
<b>SW</b>	<b>-0.095</b>	<b>-0.497</b>	<b>0.398</b>
n	11	5	6
P	0.787	0.441	0.466
<b>WG</b>	<b>0.371</b>	<b>0.317</b>	<b>*0.810</b>
n	14	5	8
P	0.196	0.643	0.012

E5aJB korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>AS</b>	<b>-0.182</b>	<b>0.616</b>	<b>0.606</b>
n	11	5	4
P	0.602	0.309	0.482
<b>SW</b>	<b>0.224</b>	<b>-0.078</b>	<b>0.490</b>
n	10	6	4
P	0.547	0.893	0.592
<b>WG</b>	<b>0.188</b>	<b>-0.369</b>	<b>*-0.884</b>
n	12	6	5
P	0.568	0.502	0.049

† P < 0.1  
\* P < 0.05  
\*\* P < 0.01  
\*\*\* P < 0.001

Für die Korrelation zwischen den Erosionsparametern und den **vorher** gemessenen Bodenfaktoren kann nur die Betrachtung aller vier Standorte verwendet werden. Auch dort zeigt sich aber nur ein sehr schwacher Zusammenhang zwischen Scherwiderstand und Abfluss. Hierbei dürfte es sich wieder um eine Scheinkorrelation handeln, da sowohl der Scherwiderstand wie auch der Abfluss durch die Ausbildung der Verschlämmschicht beeinflusst werden (MATHIER & ROY 1993). Der aufgrund der Resultate verschiedener anderer Untersuchungen (BARRY ET AL. 1991, SHARMA ET AL. 1991, MISRA & ROSE 1995) erwartete Zusammenhang zwischen der Splasherosion und dem Scherwiderstand konnte in der vorliegenden Arbeit bei keinem Standort bestätigt werden.

Interessant ist allerdings das schon in Kap. 4.2.2 beschriebene Phänomen der unterschiedlichen Abhängigkeit vom Wassergehalt. So zeigt der tonreiche Juraboden eine leichte positive Korrelation zwischen Splasherosion und Wassergehalt. Beim schluffreichen Lössboden hingegen ist die Korrelation negativ. Dies ist in sich logisch, da eine hohe Splasherosion oft einhergeht mit hoher Aggregatstabilität resp. geringer Verschlämmungsneigung und umgekehrt (z.B. BOLLINNE 1978, SIEGRIST 1998). Wiederum dürfte die Verschlämmung der Oberfläche die zentrale Rolle spielen. Je grösser der Wassergehalt bei einem schluffreichen Boden, umso geringer die Aggregatstabilität, umso grösser die Verschlämmungsneigung und umso geringer die Splasherosion.

Die Regressionsgleichung der signifikanten Korrelationen lauten:

a) Für alle vier Standorte:

$$\log(\text{Abfluss}) = -0.771 + 0.9 * SW \quad R^2 = 0.091; n = 42$$

b) für den Standort JB mit der Bodenart stark toniger Schluff (Ut4):

$$(\text{Splash})^{1/2} = 2.938 - 1.656E^{-4} * (WG)^{1/3} \quad R^2 = 0.781; n = 5$$

c) für den Standort JD mit der Bodenart schwach schluffiger Ton (Tu2):

$$\log(\text{Splash}) = -1.754 + 0.064 * WG \quad R^2 = 0.656; n = 8$$

Die Methode der schrittweisen Regression wurde nur für die Werte aller Standorte angewandt. Auch damit lassen sich keine guten Resultate erzielen. Abfluss und Abtrag können besser durch die Niederschlagsmenge charakterisiert werden als durch die Bodenfaktoren. Um die Splasherosion zu erklären, ist der Scherwiderstand die beste Grösse. Das  $R^2$  bleibt aber grundsätzlich zu niedrig, der p-Wert zu hoch und das "F to enter" muss zu tief gesetzt werden, als dass sich wirklich brauchbare Modelle ergeben würden.

Tab. 39: Schrittweise Regression zur Beschreibung von Abfluss, Abtrag und Splash durch **vorher** gemessene Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Bodenwassergehalt sowie Niederschlagsmenge

a) nur Bodenfaktoren

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.196	0.2	0.033	0.409	0.5344	SW, WG
$\ln(\text{Abtrag}) = 1.334 + 0.638 * \log(\text{AS}); n = 14$					
1.996	2.0	0.090	3.648	0.064	AS, WG
$\ln(\text{Abfluss}) = -0.786 + 0.088 * \text{SW}; n = 39$					
0.496	0.5	0.263	0.714	0.579	-
$\ln(\text{Splash}) = 11.258 - 3.209 * \log(\text{AS}) - 0.250 * \text{SW} - 0.081 * \text{WG}; n = 10$					

b) Bodenfaktoren und Niederschlagsmenge

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	0.114	1.543	0.238	AS, SW, WG, NM
$\ln(\text{Abtrag}) = 3.932 - 0.194 * (\text{NMW})^{1/2}; n = 14$					
1.996	2.0	0.090	3.648	0.064	AS, WG, NM, NMW
$\ln(\text{Abfluss}) = -0.786 + 0.088 * \text{SW}; n = 39$					
1.996	2.0	0.299	3.406	0.579	AS, SW, WG, NMW
$\ln(\text{Splash}) = 0.087 - 0.303 * (\text{NM})^{1/2}; n = 10$					

### 4.3 Schlussfolgerungen für verschiedene Standorte und Bodenarten

Lösstandorte wie Basel und zum Teil Therwil mit der Bodenart stark toniger Schluff (Ut4):  
verschlammungsanfällig

- > hoher Scherwiderstand
- > abflussanfällig
- > viel Abtrag (potentiell ablösungs-limitiert, *detachment limited*)
- > weniger Splasherosion

Lehmige Böden wie Münchenstein und zum Teil Therwil mit der Bodenart schluffiger Lehm (Lu) resp. mittelschluffiger Ton (Tu3):

weniger verschlammungsanfällig

- > mittlerer Scherwiderstand
- > wenig abflussanfällig
- > wenig Abtrag (transport-limitiert, *transport limited*)
- > mittlere Splasherosion

Tonige Böden wie in Diegten - Jura - mit der Bodenart schwach schluffiger Ton (Tu2):  
weniger verschlammungsanfällig

- > geringerer Scherwiderstand
- > wenig abflussanfällig
- > mehr Abtrag (transport-limitiert, *transport limited*)
- > mehr Splasherosion

Für die verschiedenen Erosions- resp. Bodenfaktoren ergeben sich zusammenfassend die folgenden Reihenfolgen (U= Schluffiger Boden, L = Lehmiger Boden, T = Toniger Boden):

Aggregatstabilität (gemessen mit der stark bodenartenabhängigen Perkolationsmethode):

U ? L ? T

Scherwiderstand:

U > L > T

Bodenwasser:

T > L = U

Abfluss:

U > L = T

Abtrag:

U > T = L

Splash:

L = T > U

## 5. Eine neue Methode zur Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit aufgrund von Mikroreliefstrukturen

### 5.1 Grundlagen und erste Erkenntnisse

Die Bodenoberfläche ist der Ort, wo sich entscheidet, ob bei einem Niederschlagsereignis Erosion stattfindet oder nicht. Die Ausformung der Bodenoberfläche wird - vor allem im angelsächsischen Raum - mit verschiedenen Begriffen bezeichnet (z.B. surface roughness, surface cloddiness, random roughness; Übersicht in RUDOLPH 1997). Rudolph selbst verwendet den Begriff Mikrorelief, welcher in der vorliegenden Arbeit auch angewandt wird. **Als Mikrorelief wird die Ausformung der Oberfläche durch Bodenbearbeitung definiert.** Sie ist abhängig von Bearbeitungsintensität, Aggregatstabilität und Bodenfeuchte und umso ausgeprägter, je weniger intensiv die **Bearbeitung** selbst ist und je höher die **Aggregatstabilität** des Bodens ist, das heisst, je höher der Ton-, der organische C- und der CaCO<sub>3</sub>-Gehalt sind. Damit ein grobes Mikrorelief entsteht, sollte sich die **Bodenfeuchte** bei der Bearbeitung etwa im Bereich von pF 4 bewegen (KUNTZE ET AL. 1988). Nach dieser ursprünglichen Ausformung bewirken nach Rudolph (1997) aktive und passive Faktoren die weitere Veränderung des Mikrorelief. Die aktiven Faktoren wie Niederschlagsenergie, Niederschlagsintensität und Niederschlagsregime können eine **Einebnung** (HUANG & BRADFORD 1992a) mit oder ohne **Verschlämmungsschicht** (feucht) oder **Kruste** (trocken) bewirken. In einer späteren Phase kann es durch die Wirkung der aktiven Faktoren auch wieder zu eine **Vergroberung** (SADEGHIAN & MITCHELL 1990) des Mikroreliefs kommen. Die passiven Faktoren wie Bodenfeuchte und physikalische resp. chemische Bodeneigenschaften beziehen sich auf den Ist-Zustand des Mikrorelief zum Zeitpunkt des Niederschlages. Sie wirken vor allem über die Aggregatstabilität. Das heisst, Aggregate bleiben länger intakt, wenn sie beim Einsetzen eines Niederschlages bereits feucht sind (AUERSWALD 1993, CHAN & MULLINGS 1994).

Verschiedene andere Untersuchungen beschäftigen sich bereits mit dem Zusammenhang zwischen Mikrorelief-Zustand und Erodierbarkeit (z.B. RÖMKENS ET AL. 1975, BERGSMA 1992, MATHIER & ROY 1993, MELLIS ET AL. 1996, RUDOLPH 1997). Während alle diesen Zusammenhang bestätigen und einige auch eine qualitative Bewertung des Mikroreliefs vorschlagen, wird der Zusammenhang kaum systematisch untersucht und es gibt keine einheitlich akzeptierte Methodik. Diese Lücke versucht die vorliegende Arbeit zu schliessen.

Der Zusammenhang des Mikrorelief mit dem Erosionsgeschehen wurde zum Teil bereits im Kap. 1.2 dargestellt. Als Überblick wird hier nochmals aufgezeichnet, welche Eigenschaften eines **groben Mikroreliefs** die Erosionsneigung, das heisst den Oberflächenabfluss (OA) und den Abtrag (A), eindämmen oder aber auch erhöhen können:

**Wirkung eines groben Mikroreliefs auf den Oberflächenabfluss (OA)**

- Hohe Porosität → Infiltration ↑ → OA ↓
- tiefere Regentropfenfrequenz (Fläche & Zeit) → Ablösung ↓ Verschlämmung ↓ → OA ↓
- Hohe Muldenspeicherkapazität → Wasserrückhaltevermögen ↑ → OA ↓
- Mehr Hindernisse für abfließendes Wasser → OA-Geschwindigkeit ↓ & Transportkapazität ↓ → OA ↓

**Wirkung eines groben Mikroreliefs auf den Abtrag (A)**

- geringere Verschlämmung → Ablösung ↑ → A ↑
- Hohe Muldenspeicherkapazität → Mulden als Sedimentfallen ↑ → A ↓
- Mehr Hindernisse für abfließendes Wasser → OA-Geschwindigkeit ↓ & Transportkapazität ↓ → A ↓

Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Faktoren findet sich bei RUDOLPH (1997: 6-10).

Wichtig sind aber auch die vorherigen Erosions- resp. Niederschlagsereignisse (vgl. Abb. Wirkungszusammenhang 7). Sie haben einen Einfluss auf das Mikrorelief und damit auf das spätere Erosionsgeschehen (z.B. KINNELL ET AL. 1996). Falls Starkniederschlag auf einen Boden auftritt, können folgende Fälle auftreten:

- (Fall 1) **von einem früheren Ereignis ist eine feuchte Verschlammungsschicht vorhanden:** Infiltration ist eingeschränkt, was den OA erhöht; Ablösung durch Splasherosion ist reduziert, was den Abtrag hemmt (*detachment limited* Erosion).
- (Fall 2) **von einem früheren Ereignis ist eine trockene Kruste vorhanden:** Sprengung der Kruste, was die Infiltration erhöht und den OA hemmt; vermehrte Ablösung durch Splash, was den Abtrag fördert (*transport limited* Erosion).
- (Fall 3) **von einem früheren Ereignis ist feuchtes, losgelöstes nicht abtransportiertes Material vorhanden, aber keine Verschlammungsschicht:** Infiltration ungestört, d.h. wenig OA; wenn OA stattfindet auch hohes Potential für Abtrag (*transport limited* Erosion).
- (Fall 4) **von einem früheren Ereignis ist trockenes, losgelöstes, nicht abtransportiertes Material vorhanden, aber keine Kruste:** Sprengung des trockenen Materials kann Verschlammung einleiten, evtl. also Infiltration gestört und OA erhöht; vermehrte Ablösung durch Splash, was den Abtrag fördert (keine Beschränkung der Erosion).
- (Fall 5) **das losgelöste, feuchte Material wurde beim vorherigen Ereignis abtransportiert, keine Verschlammungsschicht ausgebildet:** Infiltration normal, Ablösung normal, OA und Abtrag setzen erst ein, wenn Wassersättigung des Bodens überschritten oder sich eine Verschlammungsschicht ausbildet.
- (Fall 6) **das losgelöste, trockene Material wurde bei vorherigem Ereignis abtransportiert, keine Kruste ausgebildet:** Infiltration ungestört, d.h. wenig OA; Sprengung des tro-

ckenen Materials im Vergleich zu Fall 4 eingeschränkt, kann aber Verschlämmung einleiten, evtl. also Infiltration im Verlauf des Ereignisses gestört und OA erhöht (Erosion kann *transport limited* oder *detachment limited* sein).

**Fazit:**

- Das Mikrorelief wird grundsätzlich von denselben Faktoren beeinflusst wie die Erodierbarkeit: von Aggregatstabilität, Bodenfeuchte und physikalischen sowie chemischen Bodeneigenschaften.
- Es entscheidet sich am Zustand der Bodenoberfläche, ob ein Niederschlagsereignis Erosion auszulösen vermag oder nicht. Es ist deshalb naheliegend, den Mikroreliefzustand als Indikator für die Erodierbarkeit zu verwenden.

## 5.2 Methodik

Im Kap. 5.1 wurde der Einfluss des Bodenoberflächenzustandes auf ein potentielles nächstes Erosionsereignis aufgezeigt. Aufgrund dieses Zusammenhanges wurde eine Methode entwickelt, welche mit Hilfe einer Bewertung von Oberflächenmerkmalen (Mikroreliefmerkmalen) die momentane Erodierbarkeit resp. Erosionsneigung bestimmt.

### 5.2.1 Die Foto-Methode - das Vorgehen

Für die Entwicklung dieser Methode wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der Mikroreliefzustand entspricht der Erodierbarkeit, welche wiederum gleichbedeutend mit der Erosionsneigung des Bodens ist
- Das grobe, ursprüngliche Mikrorelief hat die tiefste Erodierbarkeit
- Die höchste Erodierbarkeit besteht bei feinem Mikrorelief mit Rillen
- Schnee und Vegetation wirken als Schutz gegen Erosion und verringern die Erodierbarkeit

In Anlehnung an BERGSMA (1992) wurde eine Methode entwickelt, welche es ermöglicht, direkt im Feld oder, mit Hilfe von Fotoanalysen, zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt die Erosionsneigung zu bestimmen. Folgendes Vorgehen wird empfohlen:

Auswahl des Untersuchungs-Standortes (1)

Anbringen des Fotorahmens (2)

Durchführung der Aufnahme resp. Foto (3)

Auswertung der Aufnahme (4)

(1) Beim Schlag, für welchen die Erosionsneigung bestimmt werden soll, werden ein oder mehrere Stellen ausgewählt, wo die Aufnahmen gemacht werden. Der / die Bereiche sollten für den Schlag möglichst repräsentativ sein, sich aber nicht im Fahrspurenbereich befinden. (2) An dieser Stelle wird der Fotorahmen (Abb. Fotos) auf die Bodenoberfläche aufgelegt und seine Eckpunkte durch zwei Stöcke markiert, welche für spätere Aufnahmen stehen gelassen werden. Zur eindeutigen Identifikation der Aufnahmen sollte der Fotorahmen mit einer Karte mit Standortbezeichnung und Datum fotografiert werden. (3) Die Aufnahmen der Bodenoberfläche werden dann entweder direkt im Feld auf ein vorbereitetes Formular gemacht, oder es wird in stehender Haltung möglichst senkrecht von oben eine Fotoaufnahme mit einem lichtempfindlichen Film und einer Linse mit möglichst grosser Blende gemacht, welche zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet wird (4).

#### Material:

- Stöcke zum Markieren der Standorte
- Fotorahmen (Abb. 33)

(Rahmen aus dunklem, mattem Material, um Lichtreflexionen zu vermeiden, mit eindeutiger Beschriftung; Gitternetz aus hellen Schnüren als Kontrast zur Bodenoberfläche)  
Innenmasse: 0.5 \* 0.7 m; alle 0.1 m werden Schnüre zu einem Gitternetz von 35 Flächen à 0.1 \* 0.1 m (0.01 m<sup>2</sup>) gespannt



- Fotoapparat mit gutem Objektiv (grosse Blende)
- lichtempfindlicher Film
- Bezeichnung zur eindeutigen Identifikation des Standortes
- Bezeichnung für das Datum
- Aufnahmeformular



Abb. 33: Der Fotorahmen zur Aufnahme des Mikroreliefzustandes

### 5.2.1.1 Die Merkmale der verschiedenen Mikroreliefstrukturen

Die Fotomethode unterscheidet folgende Ausformungen des Mikrorelief:

#### 1 Ausgangsstruktur

entstanden durch Bodenbearbeitungsmassnahmen

##### 1a Ursprüngliche resp. resistente Bodenfragmente (eher bei Ton und Lehm)



Merkmale:

- grosse Einzelteile
- scharfe Bruchkanten
- überhängende Seitenflächen
- ehemalige Bodenoberfläche auf der Fragmentseite
- noch erkennbar
- Steine

##### 1b Ursprüngliche resp. resistente Bodenoberflächen (eher bei Schluff)



Merkmale:

- kleinere Einzelteile, Gesamtwirkung eher flächig
- scharfe Bruchkanten
- ehemalige Bodenoberfläche z.T. auf Fragmentseite noch erkennbar
- Steine

## 2 Erodierte Struktur

entstanden durch Splash- und Disaggregierungsprozesse (Befeuchtung, Trocknung, Verwitterung etc.)

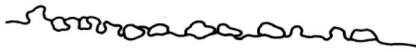
### 2a Erodierte Bodenfragmente (aus 1a)



Merkmale:

- konvexe Formen vorherrschend
- Makroporen z.T. mit abgelöstem Bodenmaterial gefüllt
- Verschlämmte Oberflächen und Einzelfragmente im Wechsel

### 2b Erodierte Bodenoberflächen (aus 1b)



Merkmale:

- konvexe Formen vorherrschend
- Makroporen z.T. mit abgelöstem Bodenmaterial gefüllt
- Verschlämmte Oberflächen und Einzelfragmente im Wechsel (aber weniger ausgeprägt als bei 2a)

### 2c Erodierte, verwitterte Bodenfragmente (aus 1a)

durch Verwitterung (Zerfall) grösserer Bodenfragmente



Merkmale:

- viele scharfe Bruchkanten und konvexe Formen
- Makroporen z.T. mit abgelöstem Bodenmaterial gefüllt
- Verschlämmte Oberflächen und Einzelfragmente im Wechsel (aber mehr kleine Einzelfragmente mit scharfen Bruchkanten als bei 2a)

## 3 Verschlämmte Flächenstruktur

entstanden durch Interrillenerosion resp. Verschlammungsprozesse (Ablösung und Sedimentation)

### 3a Verschlämmte- und Fließflächen



Merkmale:

- geglättete Oberfläche, mit vorherrschend flachen Mikroreliefbereichen
- lineare Muster von parallelen Fließstrukturen erkennbar
- z.T. Risse zwischen den glatten Flächen

#### **4 Rillenstruktur**

entstanden durch kanalisierte Erosion (Rillenerosion)

##### **4a Rillenvorstadien (Prerills)**

Merkmale:

- flache, kleine Kanäle mit leicht konkavem Querschnitt, nicht tiefer als ca. 3 cm
- kein kontinuierliches Kanalsystem

##### **4b Rillen**

Merkmale:

- tieferer Einschnitt in den Boden (bis zum B-Horizont oder zur Pflugsohle)
- U-förmiger Querschnitt mit deutlich ausgeprägtem Rillenboden und seitlichen Steilwänden
- eher kontinuierliches Kanalsystem und dadurch Teil des Minidrainagesystems des Feldes

#### **5 Kleinsthohlformen**

entstanden durch Bodenbearbeitung

Merkmale:

- keine Austrittsöffnung, d.h. "Rückhaltebecken" für Abfluss
- Möglichkeit zur (Zwischen)ablagerung von erodiertem Material

#### **6 Bodenbedeckendes Material**

z.B. Pflanzenrückstände, Pflanzenbedeckung, Schnee etc.

Merkmale:

- bedeckt die Oberfläche und bildet so einen Schutz vor erosiven Niederschlägen

*Abb. 34: Die verschiedenen Mikroreliefausprägungen bei der Fotomethode (1-6)*

Es zeigte sich schon bald, dass die unterschiedlichen Böden auch unterschiedliche Oberflächenmerkmale haben, weshalb die Unterscheidungen in 1a und 1b und 2a, 2b sowie 2c notwendig wurden.



Bei der Berechnungsvariante A wird also für jede Beobachtung ein einzelner, von den anderen (vorherigen und nachherigen) Beobachtungen unabhängiger Wert errechnet.

### **Berechnungsvariante B**

Bei der Konzipierung der Fotomethode wurde angenommen, dass die Werte der einzelnen Beobachtungen die jeweilige momentane Erodierbarkeit des Bodens darstellen. Wenn also in zeitlicher Abfolge mehrere Beobachtungen gemacht werden, kann damit auch überprüft werden, wie gut die Voraussage für ein Erosionsereignis  $X_n$  aufgrund der nach dem vorherigen Ereignis  $X_{n-1}$  bestimmten Erodierbarkeit  $EX_{n-1}$  wirklich war. Das heisst, nach Eintreten von  $X_n$  können rechnerisch nachträglich Korrekturen am Wert  $EX_{n-1}$  vorgenommen werden. Dies wurde bei der Variante B gemacht, wo jeweils auch die Differenz zwischen zwei Beobachtungen in die Berechnungen miteinfliesst. Dabei wurden folgende Fälle unterschieden:

Ist die Differenz  $D$  zwischen zwei Beobachtungen  $X_n$  und  $X_{n-1}$  grösser als ein bestimmter Wert, fand also höchstwahrscheinlich ein grösseres Erosionsereignis statt, wird der Erodierbarkeitswert  $EX_{n-1}$  rechnerisch erhöht ( $EX_{n-1 \text{ korr}}$ ):

$$\text{wenn } D > 25, \text{ dann } EX_{n-1 \text{ korr}} = (EX_{n-1} + D/25)$$

Ist die Differenz  $D$  zwischen zwei Beobachtungen  $X_n$  und  $X_{n-1}$  kleiner als ein bestimmter negativer Wert, fand also aufgrund eines Niederschlages, eines Erosionsereignisses oder zunehmender Bodenbedeckung wieder eine deutliche Verbesserung des Mikroreliefs oder der Erodierbarkeit statt, wird der Erodierbarkeitswert  $EX_{n-1}$  rechnerisch gesenkt ( $EX_{n-1 \text{ korr}}$ ):

$$\text{wenn } D < -25, \text{ dann } EX_{n-1 \text{ korr}} = (EX_{n-1} - D/25)$$

Diese Berechnungsvariante ergibt einen ausgeglicheneren Kurvenverlauf. Es zeigte sich, dass die Berechnungsvariante B bei den statistischen Berechnungen bessere Resultate lieferte.

### **Beurteilung der momentanen Erosionsneigung**

Wenn die Werte  $EX_n$  resp.  $EX_{n-1}$  nicht für Modellierungen oder anderweitige Berechnungen benutzt werden, sondern zur Beurteilung der momentanen Erodierbarkeit, muss ein Beurteilungsraster vorliegen. Da die Bodenart bereits bei der Berechnung des Erodierbarkeitswertes berücksichtigt wurde, gilt diese Einteilung für alle Bodenarten.

Folgendes Raster wurde eingeführt, aber nicht auf seine Tauglichkeit geprüft:

Tab. 41: Beurteilung der Erosionsneigung bei tonreichen, lehmigen und schluffreichen Böden  
Hohe Werte bedeuten grosse Erosionsneigung!

Erosionsneigung nach Klassen	Wertebereich für EX
sehr tief	$\leq 8$
tief	$> 8 \leq 16$
mittel	$> 16 \leq 24$
hoch	$> 24 \leq 32$
sehr hoch	$> 32$

### 5.2.2 Vergleich zur Methode nach BERGSMA (1992)

Die Fotomethode lehnt sich eng an die Methode nach BERGSMA (1992) an. Trotzdem gibt es einige wesentliche Unterschiede, da die Methoden nicht zum selben Zweck entwickelt wurden. Während Bergsma verschiedene Anbauverfahren vergleichen wollte, soll die Fotomethode einen raschen Eindruck der momentanen Erodierbarkeit liefern:

Tab. 42: Methodenvergleich Fotomethode und Methode nach Bergsma

	Fotomethode	Methode nach Bergsma (1992)
<b>Merkmalsausprägungen</b>	ähnliche Grundmerkmale: ursprüngliche, erodierte, verschlammte Struktur, Rillen, Hohlförmungen	
<b>Berücksichtigung verschiedener Bodenarten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• z.T. unterschiedliche Merkmalsausprägung bei schluffigen, tonigen und lehmigen Böden, fliesst direkt in Berechnung ein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einheitliche Merkmalsausprägung, Bodenart fliesst nur in Gesamtbeurteilung ein</li> </ul>
<b>Vorgehen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufnahme jeweils nach Niederschlägen (direkt im Feld oder per Foto im Büro)</li> <li>• Beurteilung der Bodenart im Feld resp. im Labor</li> <li>• Berechnung eines momentanen Erodierbarkeitswertes für den Standort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• regelmässig Aufnahmen direkt im Feld</li> <li>• Berechnung der relativen Erosionsresistenz verschiedener Verfahren zu einem Zeitpunkt</li> <li>• Gesamtbeurteilung der Erosionsresistenz verschiedener Verfahren unter Einbezug weiterer Faktoren</li> </ul>
<b>Zweck, Ziel der Untersuchungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rasche Beurteilung der momentanen Erodierbarkeit eines Standortes</li> <li>• für Modellierungen</li> <li>• zur Einleitung von Massnahmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosionsresistenz verschiedener Anbauverfahren</li> <li>• Erosionsverminderung durch unterschiedliche Anbautechniken</li> </ul>
<b>Zeitaufwand für die Aufnahme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• direkt im Feld 10 Minuten, im Labor (anhand von Fotos) 5 Minuten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur im Feld möglich 1 Stunde</li> </ul>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gibt raschen Eindruck über die momentane Erodierbarkeit eines Standortes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gibt einen umfassenderen Eindruck der Erodierbarkeit eines Bewirtschaftungsverfahrens</li> <li>• Aufnahmen grossflächiger, dadurch repräsentativer</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufnahmen sehr kleinflächig, dadurch eingeschränkte Repräsentativität, falls nicht mehrere Aufnahmen gemacht werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kein Ausdruck über die momentane Erodierbarkeit</li> </ul>

### 5.3 Resultate der verschiedenen Parzellenmessungen

#### Erosionstestparzelle T50

1996 finden sich ab August auf der Erosionstestparzelle T50 von allen Standorten die höchsten Werte (also die höchste Erosionsgefährdung). Während dieser Zeit kommt es auch in Realität zu den beiden grössten Abtragsereignissen auf der T50 (Tab. 14). Die im Juli resp. August festzustellende Abnahme der Werte ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil der verschlammten Oberfläche wieder in kleinere Aggregatsbruchstücke zerfällt. Damit werden diese Oberflächenbereiche statt in der Klasse 3 (Fliessoberfläche) in der Klasse 2c (erodierte Bruchstücke) eingeteilt. Dies ist ein typischer Vorgang, der bei tonreicheren Böden beobachtet werden konnte, welcher z.B. auch von MELLIS ET AL. (1996) berichtet wird.

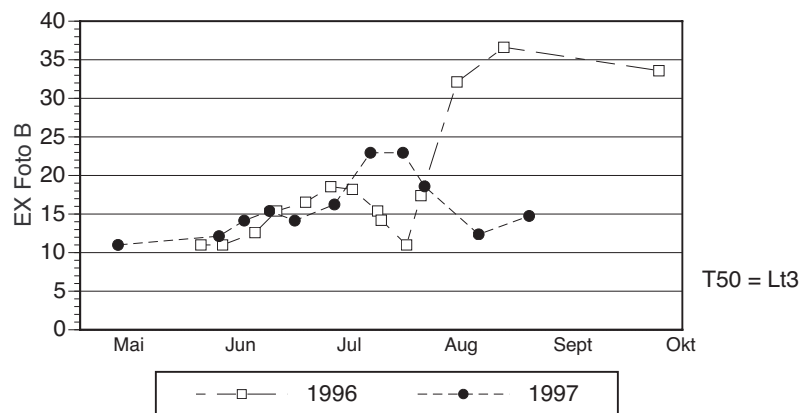


Abb. 35: Die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode auf der T50

Die beiden Kurven von 1996 und 1997 zeigen ähnliche Verläufe. Die Abnahme der Erosionsneigung im Juli resp. August kommt durch das sekundäre Zerfallen der Fliessoberfläche in Aggregatbruchstücke zustande. Detailliertere Daten im Anhang (A11).

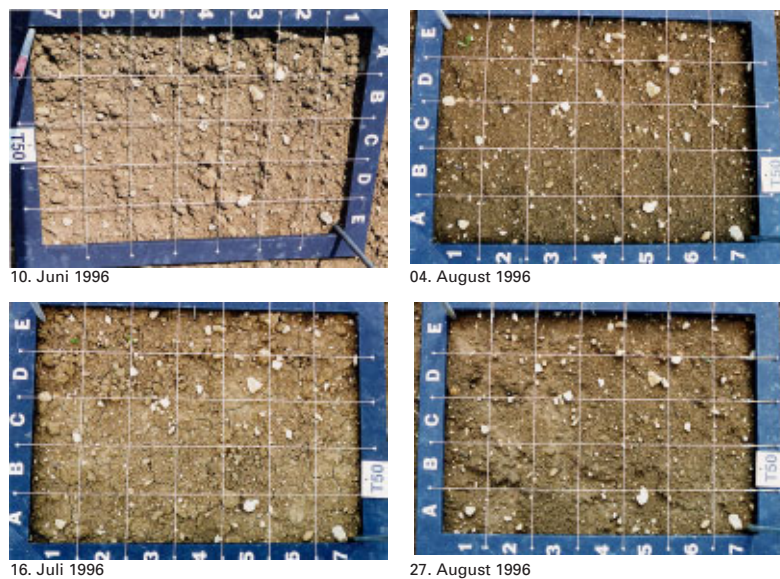


Abb. 36: Verschiedene Mikroreliefzustände im Verlauf der Vegetationsperiode auf der T50

Die Zeitserie zeigt sehr schön, wie das durch die Bearbeitung grobe Mikrorelief langsam in eine Fliessoberfläche übergeht und später durch den Zerfall dieser Oberfläche wieder gröber wird.

### Erosionstestparzelle T1

Aus technischen Gründen wurden nur 1996 Messungen vorgenommen. Dieses Jahr zeigte keine Erosionsereignisse, der höchste gemessene R-Wert betrug allerdings auch nur 6.4 N/h. Die unterschiedliche Bearbeitung der Unterparzellen P1, P3 resp. P2 zeigt sich sehr schön in den unterschiedlichen Anfangswerten der Messungen. So zeigt die unbearbeitete Parzelle P2, ohne ausgeprägtes Mikorelief, schon von Beginn weg relativ hohe Erodierbarkeitswerte, während sie bei P1 und P3 nach der Bearbeitung aufgrund der Niederschlagsereignisse kontinuierlich bis zu ihrem Höchstwert Ende Juli steigen. Die Abnahme der Werte, welche vor allem bei der P2 auffällt, wird durch die Zunahme der oberflächlichen Rauigkeit verursacht, welche bereits im Kapitel 3.4.1.3 diskutiert wurde.

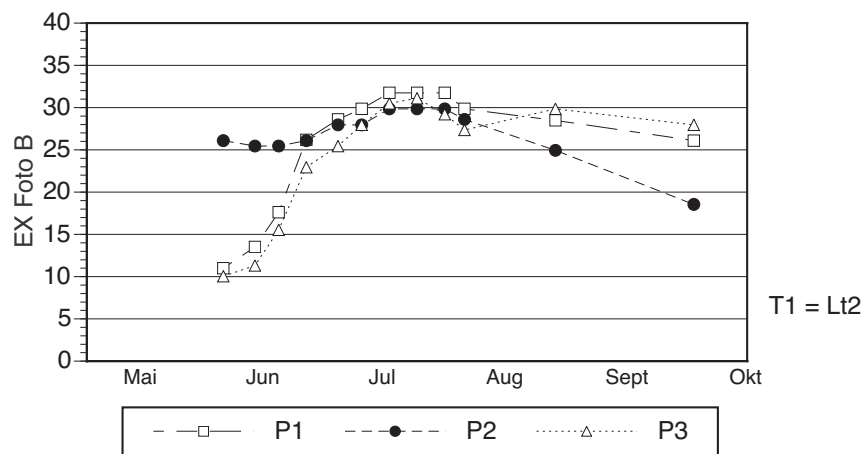


Abb. 37: Die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode auf der T1

Der Verlauf der unbearbeiteten Parzelle P2 unterscheidet sich deutlich von dem der beiden bearbeiteten Parzellen. Detailliertere Daten im Anhang (A11).



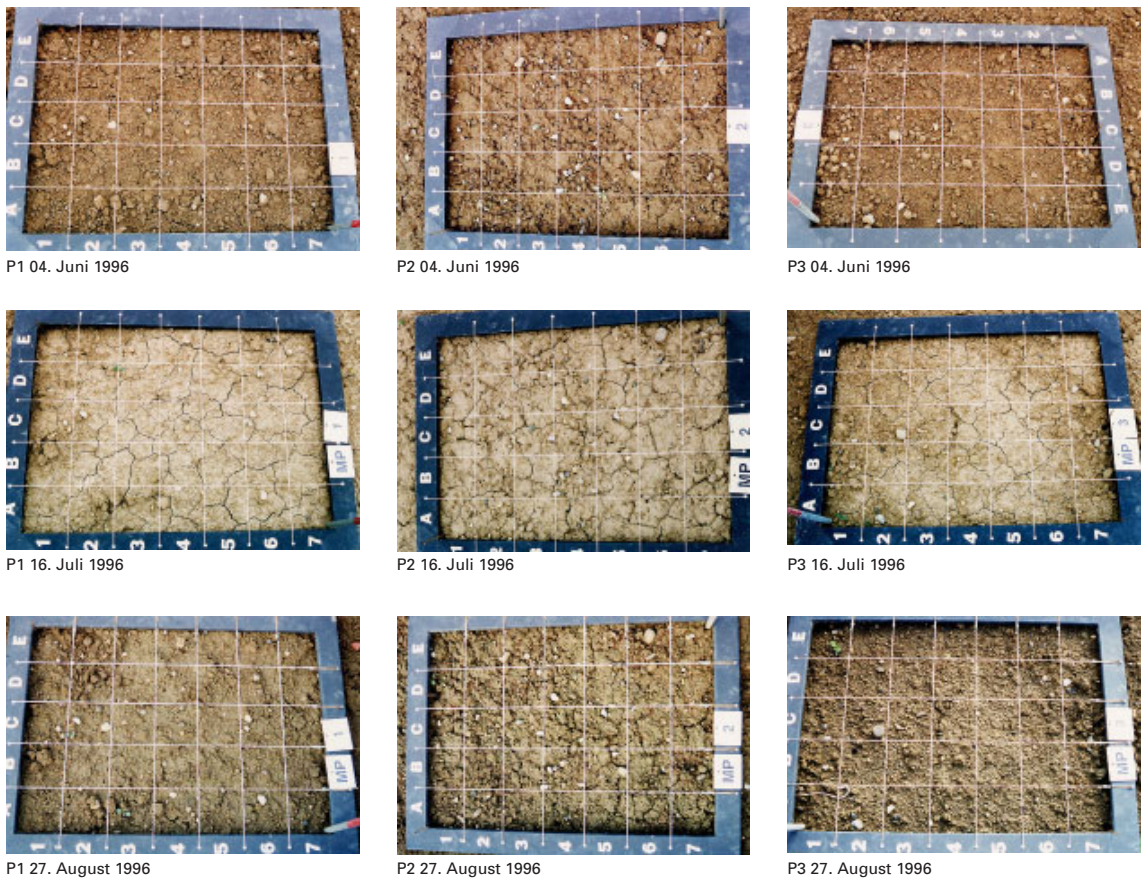


Abb. 38: Die unterschiedliche Ausprägung des Mikroreliefs der Parzellen der T1 zu verschiedenen Zeitpunkten während der Vegetationsperiode

Die unbearbeitete Parzelle P2 zeigt ein anderes Mikrorelief als die beiden bearbeiteten Parzellen.

### Landwirtschaftsparzellen

Bei den Landwirtschaftsparzellen zeigen sich gleich nach der Bearbeitung tiefe Werte, dann ein leichter Anstieg und dann eine Art Plateau, wo die Werte im ähnlichen Bereich bleiben, um dann mit der Zunahme der Vegetationsbedeckung wieder abzunehmen. Während der ersten Messperiode verhalten sich die beiden schluffreichen Standorte Therwil (GT) und Basel (JB) sehr ähnlich, während der Standort Diegten (JD) durch sehr hohe Werte erstaunt. Diese kommen vor allem durch eine starke Einebnung der Oberfläche aufgrund von Frostsprengung zustande. Wahrscheinlich stellt diese Einteilung unter die Klasse 3 (Fließoberfläche) einen Grenzfall dar, und die Oberfläche hätte auch unter die Klasse 2c (erodierte Bruchstücke) erfolgen können, was der Kurve einen ähnlichen Verlauf gegeben hätte, wie derjenigen der zweiten Messperiode. Dies zeigt deutlich, wie sensibel die Einteilung der Klassen ist. Während der zweiten und dritten Messperiode verhalten sich die drei Standorte Therwil (GT), Münchenstein (BM) und Diegten (JD) relativ ähnlich, während der Standort Basel (JB), mit dem schluffreichen Lössboden, ein deutlich anderes Verhalten zeigt. Vor allem während dem Maisanbau 1996 zeigt er klar die höchsten Werte. Die Abnahme der Werte ab Dezember 1996 beim Winterweizen kommt durch eine Mistgabe zustande. Dieses Bild zeigt deutlich, dass sich die lehmigen und tonigen Böden ähnlich verhalten und eine geringere Erodierbarkeit aufweisen als die schluffigen Böden zur selben Zeit.

Einige Untersuchungen (z.B. RÖMKENS ET AL. 1975, IMESON & KWAAD 1990, MWENDERA & FEYEN 1994, SCHJØNNING 1994) weisen auf den Zusammenhang zwischen Bodenbearbeitung und Erosionsanfälligkeit hin. Gröber bearbeitete, gut aggregierte Böden sind weniger erosionsanfällig als fein bearbeitete, schlecht aggregierte Böden. Obwohl der Bearbeitungseinfluss in der vorliegenden Arbeit nicht systematisch untersucht wurde, zeigt sich doch, dass die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode bei den tonreicheren Böden, welche besser aggregieren und ein gröberes Saatbeet ergeben, länger tief bleiben als bei den schluff-reicheren Böden.

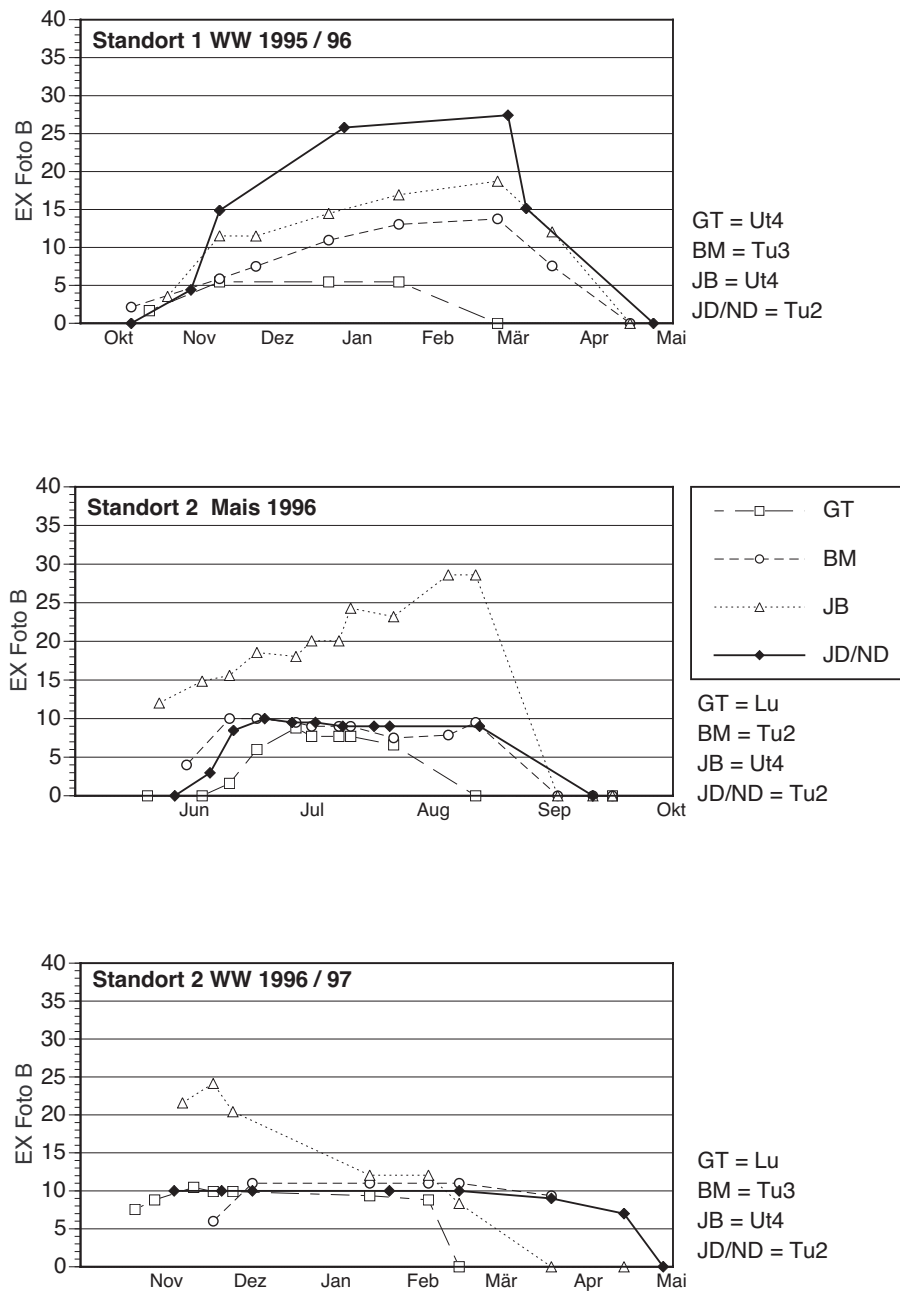


Abb. 39: Die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode auf den Landwirtschaftsparzellen  
 Detailliertere Daten im Anhang (A11)



GT 11. Juli 1996



JB 11. Juli 1996



BM 11. Juli 1996



ND 11. Juli 1996

**Abb. 40:** Die unterschiedliche Ausprägung des Mikroreliefs der Landwirtschaftsparzellen zu einem Zeitpunkt

Beim schluffigen Boden JB ist die Erodierbarkeit aufgrund der Verschlämmung hoch, während bei den tonigen und lehmigen Böden die Einebnung des Mikroreliefs noch nicht so vorangeschritten ist.

## 5.4 Validierung der Foto-Methode

Wie im Kap. 5.1.2 beschrieben, kann es nebst den verschiedenen Berechnungsvarianten der Erodierbarkeit mit der Fotomethode auch eine interessante Fragestellung sein, wie stark sich das oberflächliche Bild von einer Messung zur nächsten verändert. Einige statistische Berechnungen wurden deshalb auch mit diesen so genannten Differenzwerten durchgeführt.

### 5.4.1 Zusammenhang mit Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit

#### Erosionstestparzelle T50

Beide Varianten der Erodierbarkeits-Berechnungen mit der Fotomethode zeigen einen signifikanten negativen Zusammenhang mit der Aggregatstabilität und der Oberflächenrauigkeit. Der Zusammenhang mit der Oberflächenrauigkeit ist einleuchtend. Die Erosionsneigung nimmt zu, wenn die Oberflächenrauigkeit bei der Umwandlung einer erodierenden Fläche zu einer Fließoberfläche abnimmt. Die negative Korrelation zwischen Erosionsneigung und Aggregatstabilität zeigt, dass der Aggregatzerfall bei der Umwandlung der anfänglich grobstrukturierten Oberfläche in eine Fließoberfläche mit der Tendenz zur Verschlammung eine wichtige Rolle spielt.

Tab. 43: (E5) Korrelationsmatrix zwischen Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und Bodenfaktoren der T50

E5 korr. tr	AS	SW	OR	WG
<b>EX Foto A</b>	<b>*-0.470</b>	<b>0.138</b>	<b>*-0.483</b>	<b>0.371</b>
<i>n</i>	20	20	19	20
<i>P</i>	0.036	0.568	0.035	0.108
<b>EX Foto B</b>	<b>†-0.394</b>	<b>0.235</b>	<b>*-0.552</b>	<b>0.367</b>
<i>n</i>	20	20	19	20
<i>P</i>	0.0863	0.324	0.013	0.112

† P < 0.1  
 \* P < 0.05  
 \*\* P < 0.01  
 \*\*\* P < 0.001

Die Regressionsgleichungen lauten:

$$\log(EX_{\text{Foto A}}) = 2.073 - 0.487 * \log(AS) \quad R^2 = 0.221; n = 20$$

$$\log(EX_{\text{Foto A}}) = 1.416 - 1.632 * OR \quad R^2 = 0.233; n = 19$$

$$\log(EX_{\text{Foto B}}) = 1.891 - 0.373 * \log(AS) \quad R^2 = 0.155; n = 20$$

$$\log(EX_{\text{Foto B}}) = 1.433 - 1.619 * OR \quad R^2 = 0.304; n = 19$$

#### Landwirtschaftspartellen

Bei den Korrelationen, die über alle Standorte gerechnet wurden, zeigt sich ein signifikanter positiver Zusammenhang mit dem Scherwiderstand. Dies dürfte darauf hinweisen, dass, je mehr sich die Oberfläche von einer lockeren, grob strukturierten Oberfläche in eine Fließoberfläche umwandelt, umso grösser auch der Scherwiderstand ist. Dies legt nahe, dass der Scherwiderstand eigentlich kein gutes Mass für die momentane Erodierbarkeit eines Bodens darstellt, oder dass ein hoher Scherwiderstand eher ein Mass für den Verschlammungsgrad des Bodens darstellt als für die tatsächliche momentane Erodierbarkeit

des Bodens. Die Auswertungen der Einzelstandorte bringen kein absolut klares Bild. Nur der Standort GT mit dem lehmigen Boden zeigt, wie auch die Testparzelle T50, eine negative Korrelation mit der Aggregatstabilität.

Tab. 44: (E2) Korrelationsmatrix zwischen Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und Bodenfaktoren der Landwirtschaftsparzellen

E2alle korr. tr	AS	SW	WG
<b>EX Foto A</b>	<b>0.087</b>	<b>**0.455</b>	<b>-0.037</b>
<i>n</i>	60	44	62
<i>P</i>	0.51	0.002	0.777
<b>EX Foto B</b>	<b>0.121</b>	<b>**0.456</b>	<b>-0.071</b>
<i>n</i>	60	44	62
<i>P</i>	0.358	0.002	0.583

E2GT korr. tr	AS	SW	WG
<b>EX Foto A</b>	<b>*-0.627</b>	<b>0.105</b>	<b>0.024</b>
<i>n</i>	12	10	12
<i>P</i>	0.027	0.781	0.943
<b>EX Foto B</b>	<b>*-0.628</b>	<b>0.071</b>	<b>0.003</b>
<i>n</i>	12	10	12
<i>P</i>	0.027	0.851	0.994

E2BM korr. tr	AS	SW	WG
<b>EX Foto A</b>	<b>-0.015</b>	<b>-0.446</b>	<b>0.331</b>
<i>n</i>	15	11	15
<i>P</i>	0.958	0.175	0.233
<b>EX Foto B</b>	<b>0.115</b>	<b>-0.497</b>	<b>0.376</b>
<i>n</i>	15	11	15
<i>P</i>	0.690	0.123	0.170

E2JD korr. tr	AS	SW	WG
<b>EX Foto A</b>	<b>-0.165</b>	<b>0.268</b>	<b>0.262</b>
<i>n</i>	16	10	16
<i>P</i>	0.548	0.468	0.334
<b>EX Foto B</b>	<b>-0.197</b>	<b>0.413</b>	<b>0.349</b>
<i>n</i>	16	10	16
<i>P</i>	0.472	0.246	0.189

E2JB korr. tr	AS	SW	WG
<b>EX Foto A</b>	<b>0.044</b>	<b>-0.064</b>	<b>-0.101</b>
<i>n</i>	17	13	19
<i>P</i>	0.868	0.839	0.684
<b>EX Foto B</b>	<b>0.075</b>	<b>-0.054</b>	<b>-0.170</b>
<i>n</i>	17	13	19
<i>P</i>	0.778	0.864	0.493

† P < 0.1  
 \* P < 0.05  
 \*\* P < 0.01  
 \*\*\* P < 0.001

Die Regressionsgleichungen lauten:

a) Für alle vier Standorte:

$$EX_{Foto A} = -1.13 + 1.313 * SW \quad R^2 = 0.207; n = 44$$

$$EX_{Foto B} = -0.647 + 1.274 * SW \quad R^2 = 0.208; n = 44$$

b) für den Standort GT mit der Bodenart Ut4 resp. Lu:

$$(EX_{Foto A})^2 = 250.587 - 84.567 * \log(AS) \quad R^2 = 0.393; n = 12$$

$$(EX_{Foto B})^2 = 244.393 - 81.276 * \log(AS) \quad R^2 = 0.395; n = 12$$

#### Fazit

- Die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode zeigen eine negative Korrelation mit der Aggregatstabilität: je geringer die Aggregatstabilität, umso höher die Erosionsneigung. Das heisst, in der zunehmenden Einebnung des Mikroreliefs drückt sich eine abnehmende Aggregatstabilität und damit eine zunehmende Verschlammungsneigung des Bodens aus.

## 5.4.2 Zusammenhang mit Abtrag, Abfluss und Splash resp. Niederschlag

### 5.4.2.1 Wie gut repräsentieren die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode die aktuelle Erodierbarkeit?

Um zu prüfen, ob die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode eine brauchbare Aussage über die momentane Erodierbarkeit liefern, wurden diese mit den tatsächlichen nachfolgenden Abtrags-, Abfluss- und Splashwerten korreliert.

#### Erosionstestparzelle T50

Vor allem die Variante B der Fotomethode zeigt eine signifikante positive Korrelation zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und den Abtrags- resp. Abflussmengen. Das heisst, je höher die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode sind, umso grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem nächsten Niederschlagsereignis wirklich Abtrag oder Abfluss stattfinden.

Tab. 45: (E5a) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem **danach** gemessenen Abtrag, Abfluss und den berechneten Modell-Erodierbarkeiten auf der T50

E5a korr. tr	Abfluss	Abtrag	K berechnet	EW (E2D)	K (RUSLE)	Ki (WEPP)	Kr (WEPP)	
<b>EX Foto A</b>	<b>0.349</b>	<b>†0.528</b>	<b>0.452</b>	<b>*-0.819</b>	<b>†-0.506</b>	<b>-0.59</b>	<b>-0.635</b>	
<i>n</i>	15	12	12	7	15	7	7	
<i>P</i>	0.2072	0.078	0.144	0.021	0.054	0.176	0.134	† P < 0.1
<b>EX Foto B</b>	<b>*0.548</b>	<b>**0.706</b>	<b>*0.655</b>	<b>** -0.880</b>	<b>*-0.571</b>	<b>†-0.695</b>	<b>†-0.732</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	15	12	12	7	15	7	7	** P < 0.01
<i>P</i>	0.033	0.008	0.018	0.006	0.025	0.086	0.062	*** P < 0.001

Die Regressionsgleichungen lauten:

$$\log(\text{Abtrag}) = -2.663 + 0.074 * \log(\text{EX}_{\text{Foto A}}) \quad R^2 = 0.300; n = 12$$

$$\log(\text{Abfluss}) = -1.689 + 0.048 * \log(\text{EX}_{\text{Foto B}}) \quad R^2 = 0.252; n = 15$$

$$\log(\text{Abtrag}) = -7.639 + 5.098 * \log(\text{EX}_{\text{Foto B}}) \quad R^2 = 0.498; n = 12$$

Korrekterweise hätten die Abfluss- und Abtragswerte über den R-Wert korrigiert werden müssen, was allerdings aufgrund der mageren Datengrundlage nicht möglich war. Interessant ist, dass die R-Werte 1996 und 1997 so niedrig waren (Maximalwert 10.0 N/h), dass sie normalerweise als nicht erosiv bezeichnet würden. Trotzdem kam es in diesen beiden Jahren zu einigen Abfluss- und Abtragsereignissen. Die gute Korrelation zwischen Abtrag resp. Abfluss und den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode dürfte also ein Hinweis darauf sein, dass - jedenfalls bei geringer Erosivität - die momentane Erodierbarkeit beim Erosionsprozess eine wichtige Rolle spielt. Hingegen dürfte bei sehr erosiven Niederschlägen mit sehr hohen R-Werten auch eine tiefe Erodierbarkeit keinen Schutz vor Erosion darstellen. Also bestätigt die vorliegende Untersuchung, dass auch nicht intensive Niederschläge zu grösseren Abträgen führen können, wie dies z.B. bereits RÖMKENS ET AL. (1975) PRASUHN (1991) oder BAJRACHARYA & LAL (1992) festgestellt haben. Die Berechnungen mit den Differenzwerten ergibt keine signifikanten Zusammenhänge.

### Landwirtschaftsparzellen

Während z.B. RUDOLPH (1997) in ihren experimentellen Untersuchungen einen kausalen Zusammenhang zwischen Mikoreliefausprägung, Abfluss und Abtrag beweist, gibt auch sie den Einfluss des Mikoreliefs auf die Splashrate als gering an. In der vorliegenden Arbeit zeigen die Landwirtschaftsparzellen eine schwach signifikante Beziehung zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem Abtragsgeschehen, aber nicht zum Abfluss und zum Splash. Der Zusammenhang zwischen Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und Abtrag wurde allerdings nur bei den Berechnungen über alle vier Standorte gefunden, so dass keine Aussagen über einen Zusammenhang mit den verschiedenen Bodenarten gemacht werden können.

Tab. 46: (E5a) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem **danach** gemessenen Abtrag, Abfluss und Splash auf den Landwirtschaftsparzellen

E5a alle korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>EX Foto A</b>	<b>0.134</b>	<b>*0.438</b>	<b>0.237</b>
<i>n</i>	71	23	23
<i>P</i>	0.268	0.036	0.280
<b>EX Foto B</b>	<b>0.180</b>	<b>*0.453</b>	<b>0.287</b>
<i>n</i>	71	23	23
<i>P</i>	0.133	0.029	0.187

E5aGT korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>EX Foto A</b>	<b>-0.137</b>	–	<b>-0.361</b>
<i>n</i>	16	–	6
<i>P</i>	0.619	–	0.513
<b>EX Foto B</b>	<b>-0.129</b>	–	<b>-0.277</b>
<i>n</i>	16	–	6
<i>P</i>	0.640	–	0.622

Abtrag: zu wenig Beobachtungen!

E5aBM korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>EX Foto A</b>	<b>-0.011</b>	<b>0.296</b>	<b>0.381</b>
<i>n</i>	19	5	8
<i>P</i>	0.965	0.666	0.369
<b>EX Foto B</b>	<b>0.095</b>	<b>0.320</b>	<b>0.524</b>
<i>n</i>	19	5	8
<i>P</i>	0.702	0.639	0.193

E5aJD korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>EX Foto A</b>	<b>-0.161</b>	<b>0.085</b>	<b>0.265</b>
<i>n</i>	18	7	9
<i>P</i>	0.528	0.865	0.507
<b>EX Foto B</b>	<b>-0.109</b>	<b>0.085</b>	<b>0.331</b>
<i>n</i>	18	7	9
<i>P</i>	0.671	0.865	0.400

E5aJB korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash
<b>EX Foto A</b>	<b>0.272</b>	<b>0.305</b>	<b>-0.045</b>
<i>n</i>	18	8	9
<i>P</i>	0.279	0.481	0.912
<b>EX Foto B</b>	<b>0.333</b>	<b>0.388</b>	<b>0.247</b>
<i>n</i>	18	8	9
<i>P</i>	0.180	0.360	0.536

† P < 0.1  
 \* P < 0.05  
 \*\* P < 0.01  
 \*\*\* P < 0.001

Die Regressionsgleichung für die stark signifikanten Korrelationen lauten:

a) Für alle vier Standorte:

$$\log(\text{Abtrag}) = 1.123 + 0.095 * EX_{\text{Foto A}}$$

$$R^2 = 0.192; n = 23$$

$$\log(\text{Abtrag}) = 1.031 + 0.101 * EX_{\text{Foto B}}$$

$$R^2 = 0.205; n = 23$$

#### Fazit

- Die positive Korrelation zwischen Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und nach folgendem tatsächlichem Abtrags- und Abflussgeschehen zeigt, dass sich die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode als Mass für die momentane Erodierbarkeit gut eignen und eine brauchbare Verlässlichkeit zur Voraussage des Erosionsgeschehens aufweisen.

### 5.4.2.2 Wie gut widerspiegeln die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode das vorherige Erosions- und Niederschlagsgeschehen?

#### Erosionstestparzelle T50

Da das oberflächliche Muster eines Bodens durch die Niederschläge und das Abfluss-Abtrags- und Splash-Geschehen beeinflusst werden, wurde erwartet, dass die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode mit dem vorherigen Erosions- und Niederschlagsgeschehen eine hohe Korrelation aufweist. Auf der Testparzelle T50 zeigt sich aber nur eine schwache Korrelation mit dem Abfluss- und Abtragsgeschehen und überhaupt keine mit dem Niederschlagsgeschehen. Ähnliche konnte auch RUDOLPH (1997) in ihren Feldversuchen keinen direkten Zusammenhang zwischen der Mikoreliefausprägung und dem vorherigen Niederschlags- resp. Erosionsgeschehen nachweisen.

Tab. 47: (E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem **vorherigen** Erosions- und Niederschlagsgeschehen auf der T50

E5b korr. tr	Abfluss	Abtrag	NM	R	NE	NMW	RW	NEW	TA	TN
<b>EX Foto A</b>	<b>*0.659</b>	<b>†0.529</b>	<b>-0.186</b>	<b>-0.131</b>	<b>-0.309</b>	<b>0.158</b>	<b>0.028</b>	<b>0.159</b>	<b>-0.115</b>	<b>0.013</b>
<i>n</i>	13	11	21	21	20	21	21	21	25	25
<i>P</i>	0.012	0.096	0.423	0.577	0.187	0.498	0.907	0.496	0.589	0.951
<b>EX Foto B</b>	<b>†0.500</b>	<b>†0.583</b>	<b>-0.134</b>	<b>-0.039</b>	<b>-0.227</b>	<b>0.263</b>	<b>0.237</b>	<b>0.302</b>	<b>-0.120</b>	<b>0.026</b>
<i>n</i>	13	11	21	21	20	21	21	21	25	25
<i>P</i>	0.082	0.059	0.566	0.87	0.340	0.253	0.305	0.186	0.570	0.902

† P < 0.1  
\* P < 0.05  
\*\* P < 0.01  
\*\*\* P < 0.001

Die Regressionsgleichungen für die signifikanten Korrelationen lauten:

$$\log(EX_{FotoA}) = 1.298 + 0.117 * \log(\text{Abfluss}) \quad R^2 = 0.434; n = 13$$

In einem zweiten Schritt wurden deshalb die Erosionsdaten und die Niederschlagsdaten mit den Veränderungen der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode (also den Differenzwerten) korreliert. Hier ergibt sich ein schwach signifikanter Zusammenhang mit dem R-Wert, dem wöchentlich summierten R-Wert und der wöchentlich summierten Niederschlagsenergie.

Tab. 48: (E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Differenzen der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode und dem **vorherigen** Erosions- und Niederschlagsgeschehen auf der T50

E5b korr. tr	Abfluss	Abtrag	NM	R	NE	NMW	RW	NEW	TA	TN
<b>EX Foto A</b>	<b>0.351</b>	<b>0.396</b>								
<i>n</i>	11	9								
<i>P</i>	0.299	0.305								
<b>EX Foto B</b>	<b>0.022</b>	<b>0.320</b>		<b>†0.415</b>			<b>*0.486</b>	<b>†0.426</b>		
<i>n</i>	11	9		18			18	18		
<i>P</i>	0.951	0.417		0.087			0.040	0.078		

† P < 0.1  
\* P < 0.05  
\*\* P < 0.01  
\*\*\* P < 0.001

Die Regressionsgleichungen für die signifikanten Korrelationen lauten:

$$DEX_{FotoA} = -5.802 + 0.785 * RW \quad R^2 = 0.236; n = 18$$

#### Landwirtschaftspartellen

Bei den Messungen auf den Landwirtschaftspartellen ergeben sich über alle Standorte gerechnet, signifikante Zusammenhänge zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem vorherigen Abfluss- und Abtragsgeschehen, aber auch hier nicht mit der Nieder-



schlagsmenge. Bei den Einzelstandorten weist der schluffreiche Standort JB positive Korrelationen zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem Abtrag resp. der vorher stattfindenden Splasherosion auf. Die "Verflachung" resp. Einebnung der ehemals groben Bodenoberfläche scheint also klar vom vorherigen Abtrags- und Splashgeschehen beeinflusst.

Tab. 49: (E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem **vorherigen** Erosions- und Niederschlagsgeschehen auf den Landwirtschaftspartellen

E5b alle korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
<b>EX Foto A</b>	<b>*0.275</b>	<b>**0.618</b>	<b>0.070</b>	<b>-0.030</b>	<b>-0.018</b>
<i>n</i>	62	16	23	66	66
<i>P</i>	0.030	0.009	0.753	0.812	0.884
<b>EX Foto B</b>	<b>*0.270</b>	<b>**0.658</b>	<b>0.086</b>	<b>-0.053</b>	<b>-0.010</b>
<i>n</i>	62	16	23	66	66
<i>P</i>	0.033	0.004	0.701	0.675	0.937

E5b GT korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
<b>EX Foto A</b>	<b>-0.167</b>	<b>-</b>	<b>0.026</b>	<b>0.050</b>	<b>-0.111</b>
<i>n</i>	13		5	13	13
<i>P</i>	0.595		0.970	0.875	0.725
<b>EX Foto B</b>	<b>-0.202</b>	<b>-</b>	<b>0.008</b>	<b>0.014</b>	<b>-0.105</b>
<i>n</i>	13		5	13	13
<i>P</i>	0.517		0.991	0.966	0.740

E5b BM korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
<b>EX Foto A</b>	<b>0.398</b>	<b>-</b>	<b>0.322</b>	<b>-0.014</b>	<b>0.069</b>
<i>n</i>	18		8	17	17
<i>P</i>	0.102		0.456	0.957	0.795
<b>EX Foto B</b>	<b>0.319</b>	<b>-</b>	<b>0.209</b>	<b>-0.013</b>	<b>0.053</b>
<i>n</i>	18		8	17	17
<i>P</i>	0.201		0.636	0.961	0.843

E5b JB korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
<b>EX Foto A</b>	<b>†0.462</b>	<b>*0.875</b>	<b>**0.880</b>	<b>-0.075</b>	<b>0.051</b>
<i>n</i>	15	6	9	19	19
<i>P</i>	0.083	0.019	<0.001	0.764	0.839
<b>EX Foto B</b>	<b>0.396</b>	<b>**0.916</b>	<b>**0.871</b>	<b>-0.116</b>	<b>0.025</b>
<i>n</i>	15	6	9	19	19
<i>P</i>	0.146	0.007	0.001	0.642	0.920

E5b JD korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
<b>EX Foto A</b>	<b>-0.040</b>	<b>0.761</b>	<b>0.008</b>	<b>0.229</b>	<b>-0.139</b>
<i>n</i>	16	5	10	17	17
<i>P</i>	0.886	0.158	0.982	0.383	0.600
<b>EX Foto B</b>	<b>0.004</b>	<b>0.761</b>	<b>0.155</b>	<b>0.360</b>	<b>0.177</b>
<i>n</i>	16	5	10	17	17
<i>P</i>	0.989	0.158	0.680	0.158	0.503

† P < 0.1  
 \* P < 0.05  
 \*\* P < 0.01  
 \*\*\* P < 0.001

Die Regressionsgleichungen lauten:

a) Für alle vier Standorte:

$$EX_{Foto A} = 10.775 + 3.013 * \log(\text{Abfluss}) \quad R^2 = 0.076; n = 62$$

$$EX_{Foto A} = 6.797 + 2.453 * \ln(\text{Abtrag}) \quad R^2 = 0.382; n = 16$$

$$EX_{Foto B} = 10.654 + 2.816 * \log(\text{Abfluss}) \quad R^2 = 0.073; n = 62$$

$$EX_{Foto B} = 6.217 + 2.557 * \ln(\text{Abtrag}) \quad R^2 = 0.433; n = 16$$

b) für den Standort JB mit der Bodenart Ut4:

$$EX_{Foto A} = 5.851 + 0.171 * \text{Abtrag} \quad R^2 = 0.766; n = 6$$

$$EX_{Foto A} = -5.089 + 13.673 * (\text{Splash})^{1/2} \quad R^2 = 0.775; n = 9$$

$$EX_{Foto B} = 4.301 + 0.18 * \text{Abtrag} \quad R^2 = 0.838; n = 6$$

$$EX_{Foto B} = -5.26 + 13.311 * (\text{Splash})^{1/2} \quad R^2 = 0.758; n = 9$$

Bei den Korrelationen zwischen den Differenzen der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode und dem vorherigen Erosions- resp. Niederschlagsgeschehen, weist wiederum nur der Standort JB einen signifikanten Zusammenhang mit der Splasherosion auf.

Tab. 50: (E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Differenzen der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode und dem **vorherigen** Erosions- und Niederschlagsgeschehen auf den Landwirtschaftsparzellen

E5b alle korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
EX Foto A					
n					
P					
EX Foto B					
n					
P					

E5b BM korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
EX Foto A					
n					
P					
EX Foto B					
n					
P					

E5b JD korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
EX Foto A					
n					
P					
EX Foto B					
n					
P					

E5b GT korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
EX Foto A					
n					
P					
EX Foto B					
n					
P					

E5b JB korr. tr	Abfluss	Abtrag	Splash	NM	NMW
EX Foto A			**0.845		
n			8		
P			0.006		
EX Foto B			*0.779		
n			8		
P			0.020		

† P < 0.1  
 \* P < 0.05  
 \*\* P < 0.01  
 \*\*\* P < 0.001

Die Regressionsgleichungen lauten:

Für den Standort JB mit der Bodenart Ut4:

$$DEX_{FotoA} = -19.768 + 11.643 * (Splash)^{1/2} \quad R^2 = 0.714; n = 8$$

$$DEX_{FotoB} = -13.872 + 7.825 * (Splash)^{1/2} \quad R^2 = 0.607; n = 8$$

**Fazit**

- Ein positiver Zusammenhang zwischen der Fotomethode und dem Niederschlagsgeschehen ergibt sich bei der Verwendung der Differenzwerte. Das heisst, die relativen Veränderungen in der Ausprägung des Mikroreliefs sind von der Intensität des vorherigen Niederschlagsgeschehens abhängig.
- Werden die absoluten Erodierbarkeitswerte der Fotomethode verwendet, zeigt sich eine positive Korrelation mit dem vorherigen Abfluss- und Abtragsgeschehen. Das heisst, die momentane Erodierbarkeit wird von Abfluss und Abtrag des letzten Erosionsereignisses beeinflusst.

**5.4.3 Zusammenhang mit Modellerodierbarkeits-Indices**

Bei der Korrelation der verschiedenen Erodierbarkeits-Indices mit den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode ergeben sich vor allem für die Variante B signifikante Korrelationen (Tab. 45). Da die Fotomethode bereits einen signifikanten Zusammenhang mit dem Abtrag aufweist, ist die gute Korrelation mit dem, eng mit dem Abtrag verknüpften, berechneten K-Wert resp. dem Erosionswiderstand zu erwarten. Aber auch mit dem RUSLE-K-Wert und der Interrillen- resp. Rillenerodierbarkeit ist ein Zusammenhang zu erkennen. Die Datengrundlage für die Berechnungen ist schmal, trotzdem weist die Fotomethode mit den Erodierbarkeitsgrössen anerkannter Erosionsmodelle eine befriedigende Übereinstimmung auf, was zeigt, dass sie sich als Erodierbarkeitsgrösse gut eignet.

Tab. 51: (E5b) Korrelationsmatrix zwischen den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode und dem **vorher** gemessenen Abtrag, Abfluss und den berechneten Modell-Erodierbarkeiten auf der T50

E5b korr. tr	Abfluss	Abtrag	K berechnet	EW (E2D)	K (RUSLE)	Ki (WEPP)	Kr (WEPP)	
<b>EX Foto A</b>	<b>*0.659</b>	<b>†0.529</b>	<b>0.220</b>	<b>†-0.704</b>	<b>** -0.601</b>	<b>** -0.724</b>	<b>** -0.742</b>	
<i>n</i>	13	11	18	7	25	14	14	
<i>P</i>	0.012	0.096	0.387	0.080	0.001	0.002	0.002	† P < 0.1
<b>EX Foto B</b>	<b>†0.500</b>	<b>†0.583</b>	<b>0.340</b>	<b>* -0.716</b>	<b>*** -0.651</b>	<b>*** -0.782</b>	<b>*** -0.798</b>	* P < 0.05
<i>n</i>	13	11	18	7	25	14	14	** P < 0.01
<i>P</i>	0.082	0.059	0.1705	0.0045	<0.001	<0.001	<0.001	*** P < 0.001

Die Regressionsgleichungen für die signifikant korrelierten Größen lauten:

$$\log(K \text{ berechnet}) = -9.395 + 5.352 * \log(EX_{\text{Foto B}}) \quad R^2 = 0.455; n = 15$$

$$\log(E2D) = 4.174 - 3.307 * \log(EX_{\text{Foto A}}) \quad R^2 = 0.670; n = 7$$

$$\log(E2D) = 4.901 - 3.802 * \log(EX_{\text{Foto B}}) \quad R^2 = 0.774; n = 7$$

$$\log(K \text{ rusle}) = 0.129 - 0.591 * \log(EX_{\text{Foto B}}) \quad R^2 = 0.326; n = 15$$

## 5.5 Möglichkeiten und Grenzen der Fotomethode

### 5.5.1 Aussagen zur momentanen Erodierbarkeit resp. zum Abfluss- und Abtragungsgeschehen

Im Kapitel 5.4.2 resp. 5.4.3 wurden die Korrelationen zwischen den Erodierbarkeits-Indices, dem Abfluss- und Abtragungsgeschehen und der Fotomethode dargestellt. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der schrittweisen Regression dargestellt. Mit Hilfe dieser Einfachstmodellierung wurde untersucht, welche Grössen gemeinsam die momentane Erodierbarkeit, ausgedrückt als berechneter K-Wert, resp. den Abfluss und Abtrag am besten beschreiben. Da die Variante B der Fotomethode bei den Korrelationen grundsätzlich die besseren Werte lieferte, wurde die aufwändige schrittweise Regression nur mit dieser Variante durchgeführt.

Die Tabellen in diesem Kapitel sind grundsätzlich folgendermassen strukturiert:

- In einem ersten Schritt wurde untersucht, wie gut die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode zusammen mit den Bodenfaktoren Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Oberflächenrauigkeit und Wassergehalt eine interessierende Grösse voraussagen können.
- Im zweiten Schritt werden zusätzlich zu den Faktoren von Schritt a) verschiedene Niederschlagsfaktoren eingeführt.
- Im dritten Durchgang wird geprüft, wie gut die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode zusammen mit den Niederschlagsfaktoren – aber ohne die Bodenfaktoren – die interessierende Grösse beschreiben.
- Im vierten Schritt schliesslich wird getestet, wie gut sich die interessierende Grösse durch den Fotowert, die Bodenfaktoren und einfach zu erhebende Niederschlagsfaktoren beschreiben lässt.

#### Erosionstestparzelle T50

Tab. 52: Schrittweise Regression zur Modellierung der Erodierbarkeit (ausgedrückt im K berechnet) auf der Erosionstestparzelle T50

Schritte a)-d) vgl. oben.

Schritt a)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.669	4.047	0.069	EX <sub>FotoB</sub> , WG
$\log(K \text{ berechnet}) = 3.796 - 4.197 * \log(AS) - 18.361 * OR + 40.114 * SW; n = 10$					

Es zeigt sich, dass das Modell den Erodierbarkeitswert der Fotomethode nicht berücksichtigt, die Bodenfaktoren liefern alleine eine bessere Voraussage für den berechneten K-Wert als in Kombination mit dem Erodierbarkeitswert der Fotomethode.

Schritt b)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
2.996	3.0	1.000	3297.91	0.014	AS, R, RW, NE
$\log(K \text{ berechnet}) = -6.986 + 4.479 * SW - 1.141 * OR + 0.089 * WG + 1.819 * \log(NM) - 4.786 * \log(TN) + 8.905 * NEW - 0.229 * (NMW) + 3.438 * \log(EX_{FotoB}); n = 10$					

Dieses Modell liefert klar die besten Werte für die Voraussage der Erodierbarkeit. Es beinhaltet Niederschlagsfaktoren, Bodenfaktoren und die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode.

Schritt c)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.75 6	7.741	0.0041	R, NM, NE, RW
$\log(K \text{ berechnet}) = -6.487 - 0.160 * NMW - 0.179 * TN + 5.817 * NEW + 4.579 * \log(EX_{FotoB}); n = 15$					

Schritt d)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.914	8.489	0.030	AS, OR, WG
$\log(K \text{ berechnet}) = -7.649 + 17.833 * SW - 0.048 * NMW + 1.009 * NM + 4.369 * \log(EX_{FotoB}) - 3.442 * \log(TN); n = 10$					

Auch dieses Modell liefert gute Werte für die Voraussage der Erodierbarkeit. Das heisst, mit der Erhebung der Niederschlagsmenge, der Zeit seit dem letzten Niederschlag, des Erodierbarkeitswertes der Fotomethode und des Scherwiderstandes lassen sich zu einem beliebigen Zeitpunkt gute Voraussagen zur Erodierbarkeit bei einem nächsten Erosionsereignis machen.

Wird die schrittweise Regression angewendet, um direkt das Abtragsgeschehen vorherzusagen, wird die Modellqualität noch besser:

Tab. 53: Schrittweise Regression zur Modellierung des reellen Abtrags auf der Erosionstestparzelle T50

Schritte a)-d) vgl. oben.

Schritt a)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.873	9.200	0.029	AS, OR
$\log(\text{Abtrag}) = -6.655 + 6.063 * \log(EX_{FotoB}) - 0.193 * WG + 25.969 * SW; n = 8$					

Der Erodierbarkeitswert der Fotomethode liefert zusammen mit dem Scherwiderstand und dem Bodenwassergehalt eine gute Voraussage eines nächsten Abtragereignisses.

Schritt b)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
3.996	4.0	0.918	14.986	0.012	AS, OR, WG, R, NM, NE, RW, NMW, NEW
$\log(\text{Abtrag}) = -6.693 + 18.310 * SW - 1.960 * \log(TN) + 4.332 * \log(EX_{\text{FotoB}});$ $n = 8$					

Wiederum werden die Niederschlagsparameter nicht ins Modell aufgenommen, einzig die Zeit seit dem letzten Niederschlagsereignis spielt bei der Voraussage des Abtrags eine Rolle.

Schritt c)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	0.856	10.379	0.0046	R, RW, NMW, NEW
$\log(\text{Abtrag}) = -10.115 + 3.674 * \log(EX_{\text{FotoB}}) - 1.043 * \log(TN) - 5.454 * \log(NE)$ $+ 1.888 * \log(NM); n = 12$					

Schritt d)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.914	8.489	0.0297	AS, OR, WG
$\log(\text{Abtrag}) = -7.649 + 17.833 * SW - 0.048 * NMW + 1.009 * \log(NM)$ $+ 4.396 * \log(EX_{\text{FotoB}}) - 3.442 * \log(TN); n = 10$					

Auch hier liefern Niederschlagsmenge, Scherwiderstand, die Zeit seit dem letzten Niederschlag und die Erodierbarkeitswerte der Fotomethode das beste Modell zur Vorhersage des Abtragungsgeschehens.

### Landwirtschaftsparzellen

Mit den Daten der Landwirtschaftsparzellen wurden dieselben Berechnungen durchgeführt. Allerdings fehlen hier die detaillierten Aufnahmen der Niederschlagsfaktoren. Es liegen nur die Messungen der Niederschlagsmenge des vorherigen Ereignisses vor resp. die Niederschlagsmenge der Woche vor der Ablesung, weshalb der Schritt 2 wegfällt. Statt der Voraussage der Modellerodierbarkeit wurden nebst der Voraussage des Abtrags auch diejenige von Abfluss resp. Splash geprüft

### Abfluss

Tab. 54: Schrittweise Regression zur Modellierung des realen Abflusses auf den Landwirtschaftsparzellen

Schritte a)-d) vgl. oben.

Schritt a)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
3.996	4.0	0.277	5.759	0.076	EX <sub>FotoB</sub> , WG
$\log(\text{Abfluss}) = 0.636 - 0.734 * \log(AS) - 0.138 * SW; n = 33$					

Schritt c)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
3.996	4.0	0.277	5.759	0.076	EX <sub>FotoB</sub> , WG, NM, NMW
$\log(\text{Abfluss}) = 0.636 - 0.734 * \log(\text{AS}) - 0.138 * \text{SW}; n = 33$					

Schritt d)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.075	3.566	0.066	NM, NMW
$\log(\text{Abfluss}) = -0.176 + 0.022 * \text{EX}_{\text{FotoB}}; n = 46$					

Der Abfluss lässt sich am besten modellieren, wenn nur die Bodenfaktoren Aggregatstabilität und Scherwiderstand berücksichtigt werden, die Berücksichtigung der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode resp. der Niederschlagsfaktoren bringt keine Verbesserung des Modells.

### Abtrag

Tab. 55: Schrittweise Regression zur Modellierung des realen Abtrags auf den Landwirtschaftsparzellen Schritte a)-d) vgl. oben.

Schritt a):

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.496	0.5	0.058	0.613	0.452	AS, SW, WG
$\ln(\text{Abtrag}) = 2.384 + 0.034 * \text{EX}_{\text{FotoB}}; n = 12$					

Schritt b)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.237	3.108	0.108	AS, SW, WG, EX <sub>FotoB</sub> , NM
$\ln(\text{Abtrag}) = 4.550 - 0.295 * (\text{NMW})^{1/2}; n = 12$					

Schritt c)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.212	3.503	0.084	NM; NMW
$\ln(\text{Abtrag}) = 1.678 + 0.078 * \text{EX}_{\text{FotoB}}; n = 15$					

Die beste Voraussage des Abtrags bringt die Berücksichtigung der Erodierbarkeitswerte der Fotomethode. Allerdings ist auch dieses Modell mit einem sehr niedrigen R<sup>2</sup>-Wert nicht unbedingt befriedigend. Weder die anderen Bodenfaktoren noch die Niederschlagsfaktoren können das Modell wesentlich verbessern.

## Splash

Tab. 56: Schrittweise Regression zur Modellierung der Splasherosion auf den Landwirtschaftsparzellen. Schritte a)-d) vgl. oben.

### Schritt a)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
0.996	1.0	0.177	1.501	0.260	SW, AS, EX <sub>FotoB</sub>
$\ln(\text{Splash}) = 0.158 - 0.070 * WG; n = 9$					

### Schritt c)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
1.996	2.0	0.502	3.024	0.124	AS, WG, EX <sub>FotoB</sub> , NMW
$\ln(\text{Splash}) = -2.518 - 0.420 * (NM)^{1/2} + 0.314 * SW; n = 9$					

### Schritt d)

F to remove	F to enter	R <sup>2</sup>	F-Wert	p-Wert	nicht berücksichtigte Parameter
3.996	4.0	0.285	5.182	0.040	NM, NMW
$\ln(\text{Splash}) = -2.464 + 0.236 * EX_{\text{FotoB}}; n = 15$					

Auch für die Splasherosion liefert das Modell, welches nur den Fotowert berücksichtigt, die gesichertsten Vorhersagen (Schritt 3). Allerdings ist auch hier der R<sup>2</sup>-Wert nicht wirklich zufriedenstellend.

### Fazit

- Bei den Landwirtschaftsparzellen ergibt sich die beste Modellqualität für die Voraussage der Splasherosion und des Abtrags, wenn nur der Fotowert berücksichtigt wird. Beim Abfluss hingegen sind es die Bodenfaktoren Aggregatstabilität und Scherwiderstand, welche das beste Modell liefern.
- Bei der Erosionstestparzelle T50, wo grundsätzlich differenziertere Daten zur Verfügung standen, ergibt sich das beste Modell für den Abtrag aus Bodenfaktoren, einfachen Niederschlagsfaktoren und den Erodierbarkeitswerten der Fotomethode. Dasselbe gilt für die Erodierbarkeit.
- Die Berücksichtigung der Niederschlagsintensität anstelle der Niederschlagsmenge ergibt nur eine leichte Verbesserung des Modells. Es genügt daher die einfacher zu ermittelnde Niederschlagsmenge.
- Die Datengrundlage für alle Modelle ist sehr schwach, weshalb zur Sicherung des Modells weitere Untersuchungen durchzuführen wären.
- Die Brauchbarkeit der Fotomethode zur Voraussage von Erodierbarkeit, Abtrag und Splash bestätigt sich aber bei landwirtschaftlich genutzten Böden in der Tendenz.



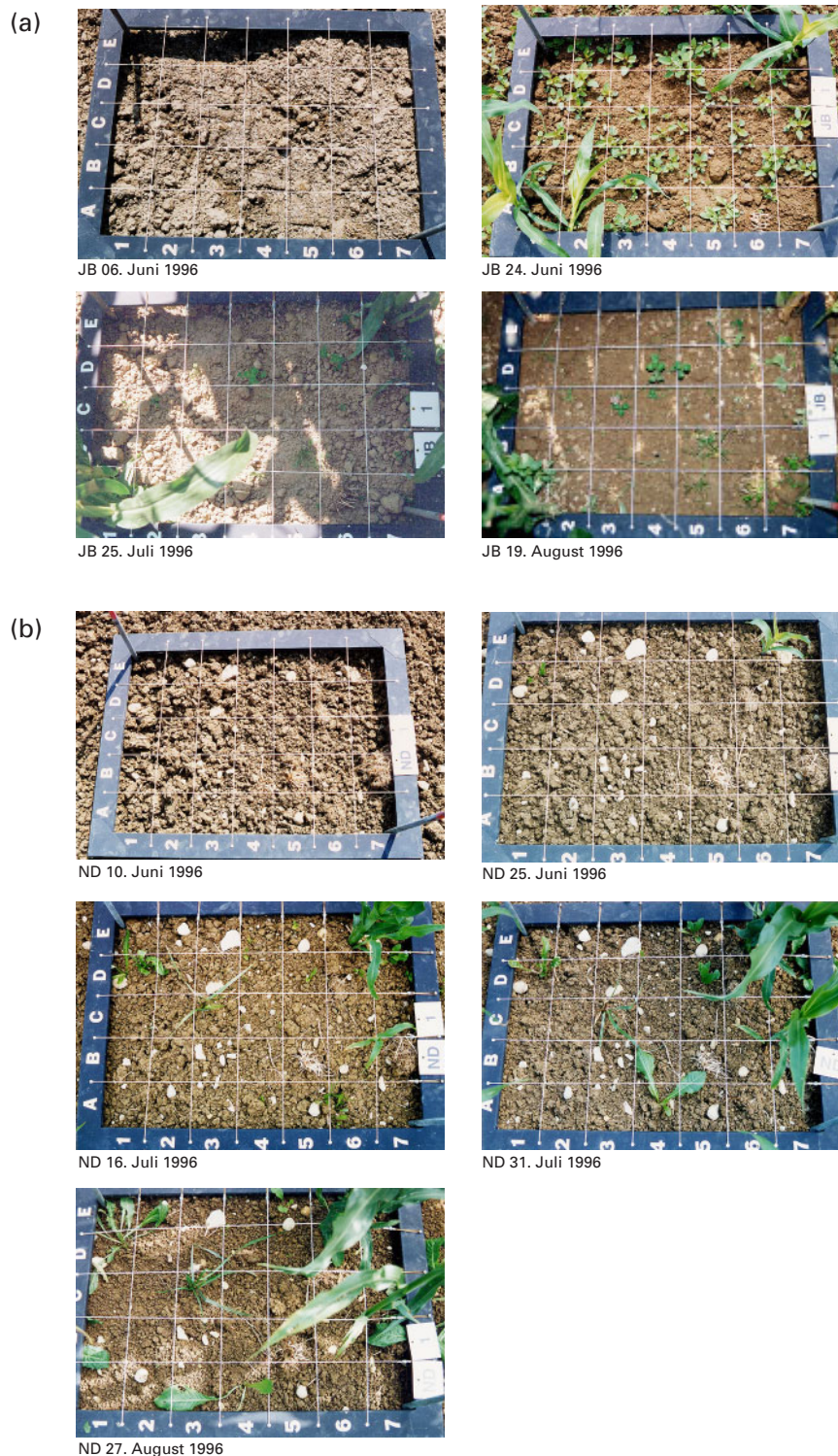
## **5.5.2 Anwendbarkeit bei verschiedenen Bodenarten und Standorten**

Bei der Bestimmung der Erodierbarkeit ziehen die verschiedenen Modelle meistens die Bodenart mit ein (Kap. 2.2.3). Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die Bodenart einen wichtigen Einfluss auf die Erodierbarkeit hat (SHARMA ET AL. 1995, ROTH 1996, RUDOLPH 1997) und zwar dermassen, dass die Erodierbarkeit umso grösser ist, je geringer der Tongehalt des jeweiligen Bodens ist.

Die Abtrags-, Abfluss- und Splashmessungen auf den Landwirtschaftsparzellen (Kap. 5.3) unterstützen diese Hypothese, der statistische Beweis liess sich jedoch nicht erbringen. Auch die mit der Perkulationsmethode gemessene Aggregatstabilität lässt keinen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlicher Bodenart zu, da die Methode selbst stark bodenartenabhängig ist.

Bei Aufnahmen mit der Fotomethode entstehen bei Böden mit unterschiedlicher Bodenart und bei ähnlich erosiven Niederschlägen verschiedene Oberflächenbilder (Abb. 41). Daraus kann jedoch noch nicht geschlossen werden, welches dieser Oberflächenbilder eine höhere oder tiefere Erodierbarkeit repräsentiert. Solche Rückschlüsse wären mit Niederschlagsimulationen zu machen. Aufgrund der Erkenntnisse aus anderen Untersuchungen wurde bei der Berechnung des Erodierbarkeitswertes der Fotomethode ein empirischer Faktor eingeführt, welcher der grundsätzlich höheren Erodierbarkeit eines Lössbodens Rechnung trägt (Kap. 5.2.1.2). Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die besser aggregierten tonreicheren Böden, welche nach der Bearbeitung ein gröberes Saatbeet hinterlassen, weniger schnell erodieren und in eine Fliessoberfläche übergehen als die schluffreicheren Böden.

Mit der Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit wird noch nichts darüber ausgesagt, ob bei einem nächsten Niederschlagsereignis tatsächlich Erosion stattfinden wird. Dies ist natürlich abhängig von der tatsächlichen Niederschlagserosivität und Standortfaktoren wie Hangneigung und Hanglage. Allerdings wird bei der Fotomethode zumindest ein weiterer bestimmender Faktor, nämlich das vorherige Erosionsgeschehen, miteinbezogen (Kap. 5.1), was einen grossen Vorteil dieser Methode ausmacht.



**Abb. 41:** Die Entwicklung des Mikroreliefs im Verlaufe verschiedener Niederschlagsereignisse bei einem schluffreichen Lössboden (a) resp. einem tonreichen Boden (b)  
 (a) zeigt die Ausbildung einer verschlammten Fließoberfläche. Typisch: Nach mehreren Austrocknungszyklen zerfallen die verschlammten Flächen sekundär wieder in Aggregate resp. nimmt die Rauigkeit aufgrund der Niederschläge wieder zu (3 -> 2b). Bei (b) besteht die Fließoberfläche aus kleinen Aggregaten und zeigt viel weniger Verschlämmungsmerkmale. Typisch: Nach Verwitterung zerfallen die ursprünglichen Bodenfragmente in sekundäre kleinere Fragmente (1a -> 2c).

## **6. Schlussfolgerungen zur Variabilität der Erodierbarkeit aus landschaftsökologischer Sicht**

Im Kapitel 1.4 wurden die detaillierten Ziele der Arbeit formuliert (Punkte 1-6). Im vorliegenden Kapitel wird nun die Zielerreichung unter spezieller Berücksichtigung landschaftsökologischer Kriterien geprüft. Das Ziel 2 wurde durch die gewählte Versuchsanordnung erreicht, welche im Kap. 2 ausführlich beschrieben ist. Durch die Durchführung der verschiedenen Experimente auf den Testparzellen und auf den Landwirtschaftsparzellen wird dem von LESER (1989) geäußerten Anspruch, dass Feldexperimente auch unter Normalbedingungen, also unter normaler Feldbearbeitung durchgeführt werden sollten, genüge getan.

In der Landschaftsökologie werden die verschiedenen Prozesse, welche in der Landschaft wirksam sind, zusammen mit ihren Reglern im Standort-Regelkreis dargestellt (Kap. 2.2). Auch für die Bodenerosion existiert ein Regelkreis (z.B. PRASUHN 1991, SCHAUB 1998). Seine Grössen (Prozesse, Regler, Speicher) wurden im Verlaufe der Zeit immer differenzierter dargestellt und kommen damit einem physikalisch begründeten Modell immer näher. Dies führt jedoch zu einem gewissen Widerspruch zu einem "Dogma" der Landschaftsökologie: Die verschiedenen Modellgrössen sollten mit Hilfe von einfach anwendbaren Methoden bestimmt werden und damit die Komplexität des realen Landschaftssystems auf ein einfach handhabbares Modellsystem reduziert werden. Im Gegensatz dazu steht der Anspruch physikalisch fundierter Berechnungen, welche das reelle System so genau wie möglich abbilden. Ein optimales Modell liegt also zwischen den beiden Extremen von "einfach, aber sehr ungenau" und "genau", aber so komplex, dass kaum mehr handhabbar". Es muss auf physikalischen Grundlagen beruhen, kann aber nicht jede einzelne reelle Grösse messen resp. rechnerisch herleiten.

In der vorliegenden Arbeit ist der Zustand der Bodenoberfläche als eine im Erosionsprozess zentrale Grösse von Interesse. Der Zustand der Bodenoberfläche ergibt sich aus der summierten Wirkung verschiedenster Regler und Prozesse und wird auch schon von BRYAN (1976) als die am besten geeignete Grösse für die Bestimmung der Erodierbarkeit angesehen. In der vorliegenden Arbeit wird der Zustand der Bodenoberfläche oder des Mikroreliefs mit der momentanen Erodierbarkeit gleichgesetzt. Um diese rasch, häufig und ohne ins System einzugreifen messen zu können, wurde die Fotomethode entwickelt. Nur auf diese Art ist es möglich, die zeitliche und räumliche Variabilität der Bodenerodierbarkeit im Feld zu untersuchen. Wie diese Modellgrösse in ein Modell der Landschaftsökologie oder auch ein anderes physikalisch begründetes Modell einfließt, wäre Gegenstand weiterer, zukünftiger Forschungsarbeiten. Zwar wurde schon mehrmals versucht, die Bodenerodierbarkeit mit Hilfe der Bestimmung verschiedener physikalischer Bodenparameter herzuleiten (z.B. RÖMKENS

1985, FRIELINGHAUS 1987), aber die Resultate blieben immer unbefriedigend. Die gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Erosionsgeschehen lässt folgern, dass die Fotomethode geeignet ist, das reelle System genügend gut abzubilden, um verlässliche prospektive Aussagen machen zu können. In der Praxis werden dadurch differenzierte Aussagen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität der Bodenerodierbarkeit möglich, was die Ausarbeitung entsprechender Anleitungen für Schutzmassnahmen ermöglicht.

Im Regelkreis der Bodenerosion kann die zeitliche Variabilität der Grössen nicht explizit dargestellt werden. Zwar impliziert der Begriff "Prozess" einen dynamischen Inhalt, wie er sich allerdings genau auf einen Regler wie den Oberflächenzustand auswirkt, wird aus dem Standort-Regelkreis nicht ersichtlich. Diese zeitliche Variabilität wird in Abb. 7 und in den verschiedenen Ausprägungen der Oberfläche (Kap. 5.1) zusammengestellt. Grundsätzlich zeigen die Untersuchungen, dass die zeitliche und räumliche Variabilität der einzelnen Erosionsparameter so gross ist, dass eine Betrachtung auf der Basis von Einzelereignissen resp. in der topischen bis subtopischen Dimension für praxisrelevante Aussagen Bedingung ist.

Das Schema unten zeigt zusammenfassend die Abhängigkeit der Erodierbarkeit von der Erosivität der Niederschläge, der Bodenfeuchtigkeit, dem vorangehenden Erosionsgeschehen und der zunehmenden Einebnung des Mikroreliefs aufgrund von Oberflächenverschlämmung und Erosion. Die Fotomethode misst die Auswirkungen des vorherigen Erosionsgeschehens, der Erosivität und der Einebnung des Mikroreliefs und eignet sich deshalb für die Beschreibung der momentanen Erodierbarkeit

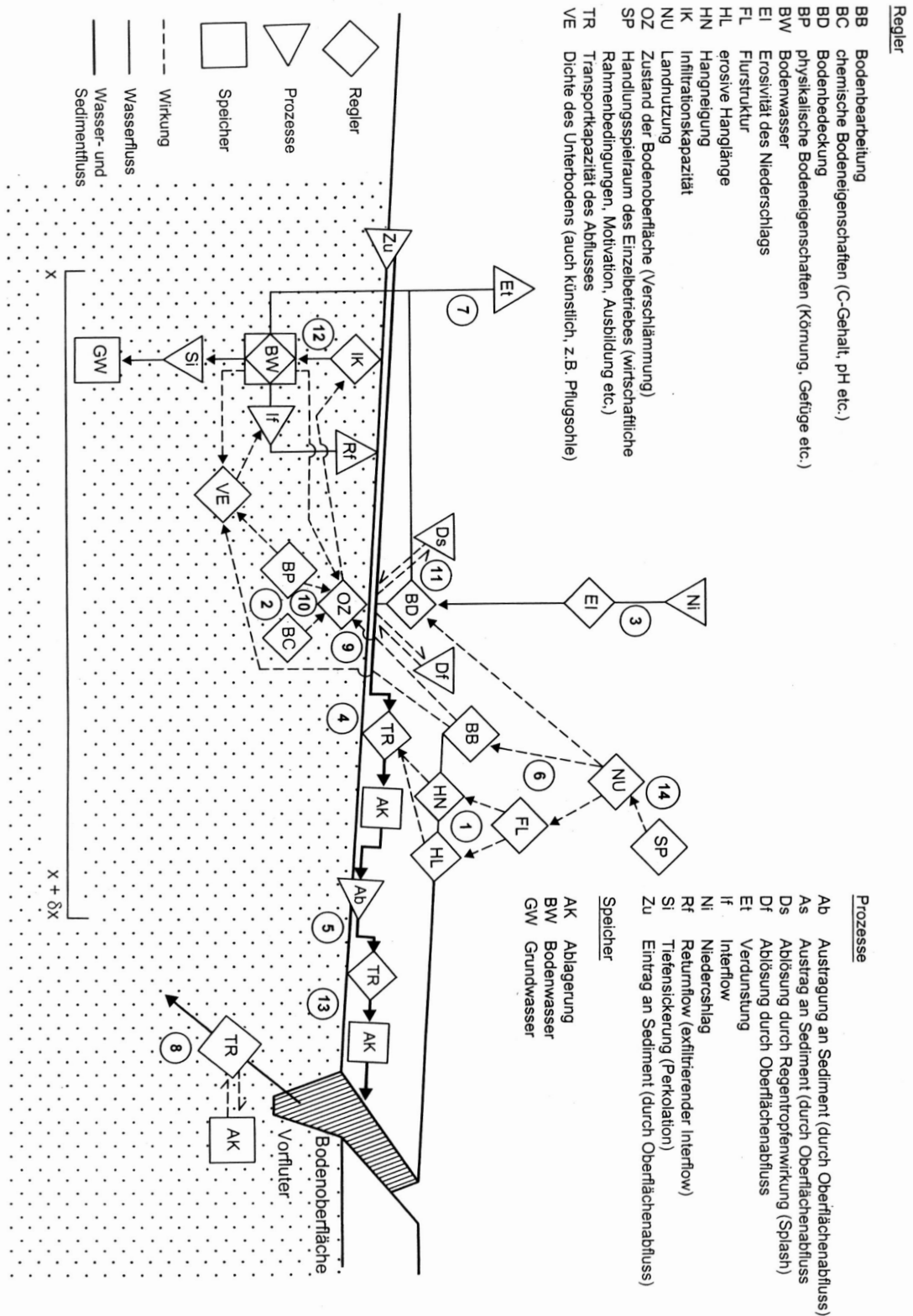


Abb. 42: Regelkreis der Bodenerosion (nach SCHAUB 1998)

Die Fotomethode misst den Regler Mikroreliefzustand (Oberflächenzustand OZ), welcher als Summengröße die Auswirkungen verschiedener Prozesse ausdrückt. In Tab. 57 wird erläutert, wie die nummerierten Regler und Prozesse in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden.

Tab. 57 Das Prinzip der Untersuchungen der Bodenerosionsdynamik in der vorliegenden Arbeit (nach SCHAUB 1998, verändert)

Verschiedene Regler und Prozesse des Bodenerosionsregelkreises wurden in der vorliegenden Arbeit untersucht, wobei die Bestimmung der Dynamik des Mikroreliefzustandes (Oberflächenzustandes OZ) im Zentrum stand. Die Zahlen beziehen sich auf die Darstellung des Regelkreises in Abb. 42. Die nicht gemessenen Grössen (n.g.) sind kursiv aufgeführt.

<b>Einzelne Arbeitsschritte</b> (analog zum Geoökolog. Arbeitsgang nach LESER 1991)	<b>Betrachtungsdimension</b> (nach NEEF 1963)
<b>einmalige Aufnahmen</b> (landschaftsökologische Vorerkundung)	
1 Standortbeschreibung 2 Bodenbestimmung inkl. Aufnahme K-Faktor	topisch subtopisch
<b>Kontinuierliche Aufnahmen</b> (Komplexe Standortanalyse)	
3 Niederschlag (Intensität und Menge) 4 Bodenabtrag von Testparzellen 5 <i>Erosionsschadenskartierung</i> 6 Aufnahme von Fruchtfolge und Bearbeitung 7 <i>Lufttemperatur und -feuchte</i> 8 <i>Gebietsaustrag (Abfluss)</i>	topisch und chorisch subtopisch und topisch <i>n.g.</i> topisch <i>n.g.</i> <i>n.g.</i>
<b>periodisch wiederholte Aufnahmen</b> (Partialkomplexanalyse)	
9 Oberflächenverschlämmung, Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Mikroreliefzustand 10 Oberbodeneigenschaften	subtopisch subtopisch
<b>zeitlich beschränkte Aufnahmen</b> (Partialkomplexanalyse)	
11 Splash 12 Bodenfeuchte 13 <i>Retention Uferstreifen</i> 14 Landwirtschaftliche Rahmenbedingungen (biologische oder konventionelle Bewirtschaftung)	subtopisch subtopisch <i>n.g.</i> topisch und chorisch

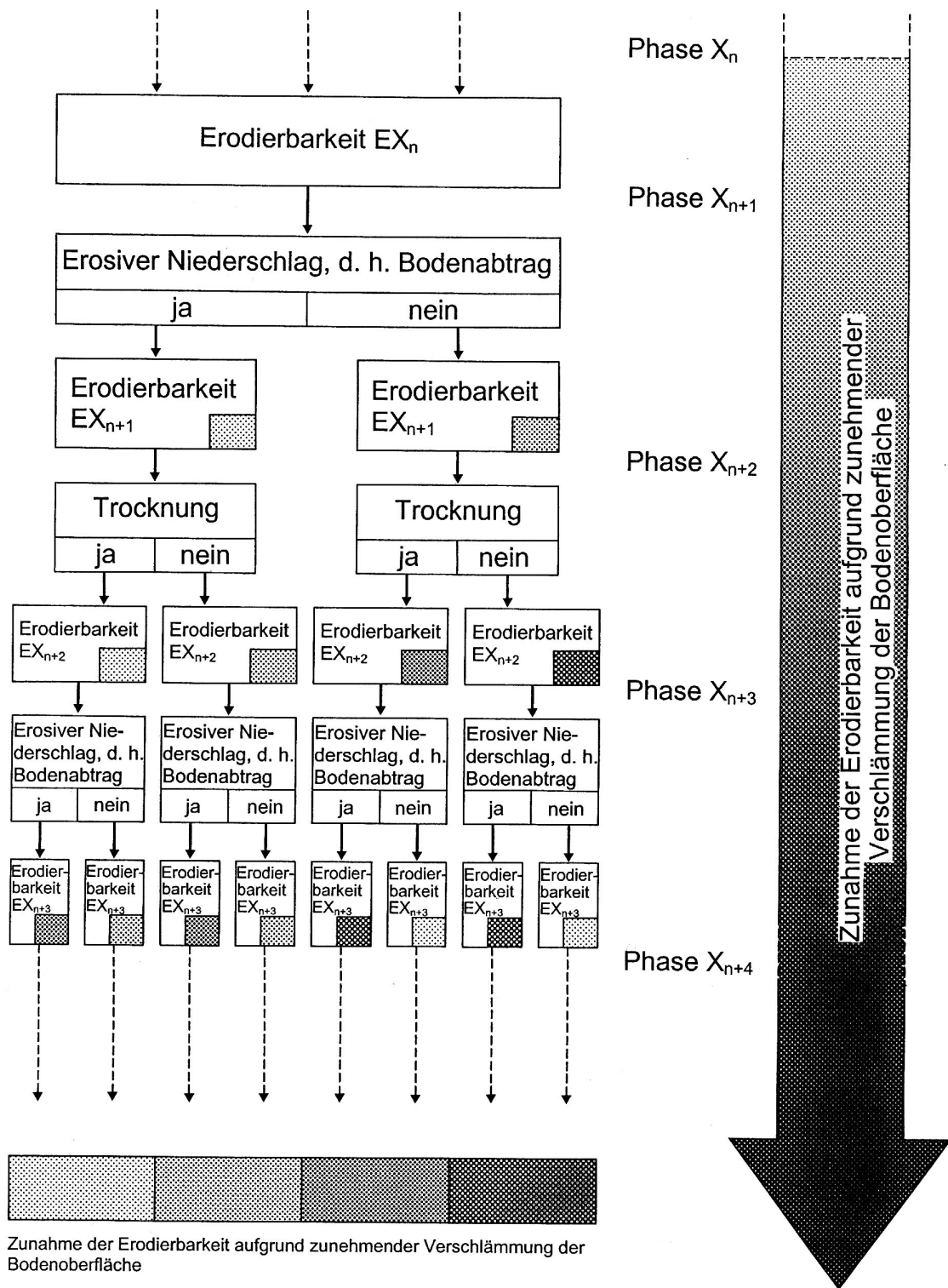


Abb. 43: Der Zusammenhang zwischen Erosivität, Erosion, Abtrocknung, Mikrorelief und Erodierbarkeit unter Einbezug des vorherigen Erosionsgeschehens

Die Erodierbarkeit ist umso grösser, je mehr instabiles Bodenmaterial vorhanden ist, je weniger der Boden nach einem Niederschlagsereignis trocken werden konnte und je eingebener das Mikrorelief ist.

## 6.1 Die zeitliche und räumliche Variabilität der Erodierbarkeit

Dieses Kapitel enthält die wichtigsten Erkenntnisse aus landschaftsökologischer Sicht zu den Zielen 3 und 4. Bei der vorliegenden Arbeit wird in der topischen bis subtopischen Dimension gearbeitet, da die Erodierbarkeit in dieser Betrachtungsdimension wirksam ist (SCHAUB 1999).

### 6.1.1 Die zeitliche Variabilität

Bei den Testparzellen machen sich zwei Einflüsse bemerkbar: die kurzfristige Variabilität (innerhalb eines Jahres) und die langfristige Variabilität (durchschnittlich über mehrere Jahre ermittelt). Langfristig gesehen nimmt die Erodierbarkeit nach Anlegen der Testparzelle stark zu, da der organische C-Gehalt drastisch absinkt, dann pendelt sie sich auf einen bestimmten Wert ein, der zum Beispiel durch den langfristig geltenden K-Faktor aus der USLE beschreibbar ist. Langfristige Aussagen in diesem Sinne waren allerdings nicht Ziel dieser Arbeit. Bei der Betrachtung der einzelnen Jahre zeigt sich in der vorliegenden Arbeit jedoch, dass der langfristig als konstant geltende K-Faktor zwischen den Jahren deutliche Schwankungen aufweist. Auch andere Autoren (wie z.B. RÖMKENS 1985 oder LINE & MEYER 1989) haben bereits diese schlechte Übereinstimmung des K-Faktors mit der im Feld gemessenen Interrillen-Erodierbarkeit festgestellt. Die besten Resultate werden erwartet, wenn auf standardisierten, langfristigen Testparzellen gezielt kurzfristige, spezielle Feldmessungen zur Erodierbarkeit gemacht werden und diese Daten anschliessend in Erosions-Modelle einfließen. Damit können fundierte Aussagen zur lang- und kurzfristigen Erodierbarkeit eines Gebietes gemacht werden. Die so in der subtopischen Ebene gewonnenen Daten können unter Einbezug eines digitalen Geländemodells und einer Bodenkarte in einer Bodenerodierbarkeitskarte auf die topische bis chorische Dimension extrapoliert werden. Als deutliche Verbesserung für **landschaftsökologische Erodierbarkeitskarten** wird jedoch aufgrund der Erkenntnisse aus dieser Arbeit folgendes vorgeschlagen:

- (i) mit Werteklassen statt mit absoluten Werten zu arbeiten
- (ii) eine Sommer- und eine Winter-Erodierbarkeitskarte zu erstellen
- (iii) mit Prozessintensitäten statt mit Erodierbarkeitswerten zu arbeiten

Kurzfristig betrachtet, schwankt die Erodierbarkeit im Verlaufe des Jahres stark, nämlich einerseits in Abhängigkeit der Jahreszeiten (also der klimatischen Faktoren) und andererseits in Abhängigkeit des Niederschlags- und Erosionsgeschehens. Über die Messjahre betrachtet, zeigt sich, dass Faktoren wie der organische C-Gehalt oder die Bodenart nur geringfügig schwanken, während sich die prozessorientierten bodenphysikalischen Faktoren wie Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit von Jahr zu Jahr ändern. Die Aggregatstabilität ist - abhängig vom klimatischen Jahresverlauf - zwischen den Jahren in ihren absoluten Werten variierend und die Amplitude der Schwankungen innerhalb eines Jahres ist sehr unterschiedlich ausgeprägt. Ihr Maximum erreicht sie jeweils im Juli. Vergleichbare Schlüsse können auch für den Scherwiderstand und die Oberflächenrauigkeit gezogen werden.



Die Messungen auf den Landwirtschaftsparzellen zeigen ausserdem, dass die Schwankungen der Erodierbarkeit, repräsentiert durch die Faktoren Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit, entsprechend dem klimatischen Jahresverlauf im Sommerhalbjahr bedeutend grösser sind als im Winterhalbjahr.

Die Kurvenverläufe von Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit, welche die Erodierbarkeit repräsentieren, korrelieren in der vorliegenden Arbeit gut mit den Erodierbarkeitswerten aus anerkannten Erosionsmodellen und mit den reellen Abtragsmessungen. Das unterstützt auch die Annahme, dass sich diese Feldgrössen für die Validierung der Fotomethode eignen.

### **6.1.2 Die räumliche Variabilität**

Auf den Testparzellen zeigen die Hangschultern, verglichen mit anderen Hangbereichen, einen höheren anorganischen C-Gehalt, welcher aufgrund der vermehrten Erosion in diesem Bereich und der damit verbundenen Freilegung von ursprünglichem, carbonatreichem Material entsteht. Gleichzeitig findet sich im oberen Hangbereich ein geringerer Tongehalt und entsprechend auch ein tieferer organischer C-Gehalt als am Hangfuss. Dies ist umso ausgeprägter, je steiler die Parzelle ist, da eine grosse Hangneigung den abwärtsgerichteten, oberflächlichen Partikeltransport unterstützt. Im Gegensatz zum höheren Tongehalt ist die Aggregatstabilität im unteren Parzellenbereich eher geringer als im oberen Bereich, und der Scherwiderstand zeigt in allen Hanglagen eine ähnliche Ausprägung. Er ist stärker von kurzfristigen Faktoren, wie der Parzellenbearbeitung und dem Bodenwassergehalt, abhängig.

In Ergänzung dazu zeigen die Landwirtschaftsparzellen, dass die Messmethoden für die Bodenfaktoren Aggregatstabilität und Scherwiderstand stark bodenartenabhängig sind, weshalb ein direkter Vergleich der Standorte nur schlecht möglich ist. Die Verschlammungsanfälligkeit und der Scherwiderstand nehmen von  $U > L > T$  ab.

Aus obigen Erkenntnissen lässt sich folgern, dass eine Erodierbarkeitskarte in chorischer Dimension zusätzlich zu bodenphysikalischen Parametern die Hanglage und Bodenart berücksichtigen muss. Ergänzend zu den Vorschlägen bei der zeitlichen Variabilität, sollte eine **landschaftsökologische Erodierbarkeitskarte** also:

- (iv) die Bodenart berücksichtigen
- (v) die Lage im Hang berücksichtigen

## 6.2 Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit durch die Messung bekannter Bodenparameter

Häufig werden aufwändige und schwierig zu standardisierende Berechnungsversuche zur Messung der Erodierbarkeit direkt im Feld angewandt. Die Resultate der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass auch einfache Feld- und Labormethoden zur Messung der Erodierbarkeit herangezogen werden können. Diese können bei regelmässiger und langfristiger Anwendung wichtige Aussagen zur Dynamik der Erodierbarkeit auf Testparzellen machen und als einfach zu ermittelnde Input-Grössen in Modelle genutzt werden. Die Brauchbarkeit der Bodenparameter Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit als Ausdruck der momentanen Erodierbarkeit, wird durch Korrelationen mit dem realen Abfluss- und Abtragsgeschehen (Kap. 3.5 und 4.2.2) und mit dem über die USLE rückgerechneten K-Wert geprüft (Kap. 3.4.3 und 3.4.4). Vor allem die Aggregatstabilität wird in verschiedensten Untersuchungen (z.B. Bryan 1976) als die einfachste und beste Grösse für die Voraussage des Bodenabtrages genannt.

Abfluss und Abtrag korrelieren nicht mit den **vorher** gemessenen Bodenfaktoren. Allein aufgrund der einzelnen Bodenfaktoren können also weder auf den Testparzellen noch auf den Landwirtschaftsparzellen prospektive Aussagen für ein potentiell nächstes Erosionsereignis gemacht werden. Erst die Kombination verschiedener Bodenfaktoren mit Niederschlagsfaktoren ergibt, zumindest auf der Testparzelle, ein befriedigendes prospektives Modell - vor allem für den Abtrag. Die **nach** einem Erosionsereignis gemessene Aggregatstabilität korreliert auf der Testparzelle mit der Abtragsmenge dieses Ereignisses. Dies unterstützt die Hypothese, dass das vergangene Erosionsgeschehen das zukünftige Erosionsgeschehen beeinflusst. Die Korrelation zwischen einem Erosionsereignis und den nachfolgend gemessenen Bodenfaktoren konnte auf den Landwirtschaftsparzellen nicht bestätigt werden.

Die **nach** einem Erosionsereignis gemessene Aggregatstabilität und der Scherwiderstand weisen gute Korrelationen mit dem über die USLE rückgerechneten K-Wert desselben Ereignisses auf. Mit den **vor** dem Ereignis gemessenen Bodenparametern lässt sich keine signifikante Korrelation nachweisen. Auch zwischen den **vor** und **nach** dem Ereignis gemessenen Bodenparametern und den anderen Erodierbarkeitsindices der Modelle lassen sich keine signifikanten Korrelationen berechnen. Dies unterstützt die Annahme, dass die Aggregatstabilität und der Scherwiderstand brauchbare Grössen zur Messung der momentanen Erodierbarkeit sind, ohne dass daraus prospektive Aussagen für ein nächstes potentiell Ereignis gemacht werden können. Solche Aussagen können nur durch ein einfaches Modell (schrittweise Regression) getroffen werden, welches die Bodenparameter in Kombination mit einfachen Niederschlagsparametern berücksichtigt. Die Resultate der Korrelationsrechnungen zeigen ausserdem, dass neuere Erosionsmodelle zwar einen Jahregang der Erodierbarkeit berechnen, aber den Einfluss der stattgefundenen Erosionsereignisse auf ein nächstes potentiell Erosionsereignis nicht genügend abbilden. Ein **dynamisches, landschaftsökologisches Modell zur Bodenerosion** sollte deshalb folgendes berücksichtigen:

- (vi) es muss eine einfach messbare Grösse der momentanen Erodierbarkeit beinhalten,  
z.B. die Aggregatstabilität
- (vii) es muss das vorherige Erosionsgeschehen berücksichtigen

### 6.3 Bestimmung der momentanen Erodierbarkeit mit der Fotomethode

In diesem Kapitel wird das Erreichen der Ziele 5 und 6 geprüft. Es interpretiert die Resultate aus dem Kapitel 5.5 und stellt sie in den landschaftsökologischen Zusammenhang.

Bereits BRYAN (1969) meinte, dass ein idealer Erodierbarkeits-Index einfach messbar, zuverlässig und überall anwendbar sein sollte. Mit der Entwicklung der einfach anzuwendenden Fotomethode ist es möglich, den Zustand der Bodenoberfläche als einen der wichtigsten Regler im Regelkreis der Bodenerosion rasch, einfach und quantitativ zu erfassen. Die vorliegende Arbeit hat damit die Basis geschaffen, landschaftsökologische Feldforschung und Methodenentwicklung mit bestehenden Erosionsmodellen zu verknüpfen. Sie wird damit dem immer wieder verlangten (z.B. LESER 1996) pragmatischen und zweckgerichteten Ansatz der landschaftsökologischen Modellierung gerecht. Wie die vorliegenden Daten in bestehende landschaftsökologische Modelle, wie beispielsweise das GIS-gestützte Bodenerosionsmodell von DRÄYER (1996) oder andere Bodenerosionsmodelle, einfließen können, ist in zukünftigen Arbeiten zu untersuchen. Auch die Übertragung auf andere Geoökotope wäre Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten.

Die Fotomethode zur Erfassung der momentanen Erodierbarkeit zeigt grundsätzlich gute Resultate im Vergleich mit anderen Erodierbarkeitsfaktoren und Erodierbarkeitsindices, was für die Brauchbarkeit der Methode spricht. Die negative Korrelation der Fotomethode mit der Aggregatstabilität, sowohl auf den Testparzellen wie auch auf einzelnen Landwirtschaftsparzellen, drückt die Einebnung des Mikroreliefs mit zunehmender Verschlammungsneigung des Bodens aus. Die positive Korrelation zwischen den Werten der Fotomethode und dem **nachfolgenden** realen Abtragsgeschehen auf allen Parzellen bestätigt die Brauchbarkeit der Methode für prospektive Aussagen aufgrund der momentanen Erodierbarkeit. Bereits SCHAUB ET. AL. (1987) stellten fest, dass die K-Werte-Klassen bestimmter Gebiete und der effektive Abtrag nicht unbedingt korrelieren. Eine zukünftige Forschungsarbeit sollte deshalb der Frage nachgehen, ob sich die Fotomethode wirklich eignet, um langfristig geltende Werte für Erodierbarkeitskarten zu ermitteln, oder ob nicht vielmehr die im Kap. 6.1.1 vorgeschlagenen Prozess-Intensitätskarten ein geeigneteres Mittel darstellen, um die Erodierbarkeit abzubilden.

Auf den Landwirtschaftsparzellen zeigt sich ausserdem eine Korrelation mit der Splasherosion. Die ebenfalls positiven Korrelationen der Resultate der Fotomethode mit dem **vorherigen** Erosionsgeschehen zeigt, dass die durch die Fotomethode gemessene, momentane Erodierbarkeit durch den Abtrag und Abfluss des vorherigen Erosionsereignisses beeinflusst wird und damit auch den Anspruch (vii) aus Kapitel 6.2 erfüllt.

Im einfachen prospektiven Modell der schrittweisen Regression ergibt das Zusammenspiel von Bodenfaktoren, der Fotomethode und einfach zu ermittelnden Niederschlagsfaktoren befriedigende Resultate. Diese Erkenntnisse gelten in erster Linie für die Testparzellen, wo eine breite Datenbasis vorliegt. In einem weiteren Schritt müssten gezielte, weitere Unter-

suchungen auf Landwirtschaftsstandorten gemacht werden, um auch hier eine repräsentative Datengrundlage für ein solches Modell zur erarbeiten.

Der Zustand der Bodenoberfläche kann, wie bereits erwähnt, als Summenparameter aufgefasst werden, dessen Ausprägung durch das Wirken verschiedener Prozesse und Regler bestimmt wird. Die Fotomethode bestimmt damit als eine einfache Screening-Methode eine der Schlüsselgrößen im Bodenerosionsprozess. Als grossen Vorteil, verglichen mit anderen Methoden, erfasst die Fotomethode die momentane Erodierbarkeit **unter Berücksichtigung des vorherigen Erosionsgeschehens**, wie es zum Beispiel von RÖMKENS (1985) explizit gefordert wird. Wie die vorliegende Arbeit zeigt, ist dies ein Faktor, der in einem dynamischen Erosionsmodell unbedingt berücksichtigt werden muss. Dadurch weist die Fotomethode grosse Vorteile gegenüber der Methode zur Erfassung des K-Faktors auf, welche der Dynamik der Erodierbarkeit in keiner Weise gerecht wird.

Zur weiteren Sicherung der Resultate der Fotomethode müssten weitere Untersuchungen auf verschiedenen Landwirtschaftsstandorten, Beregnungsversuche im Feld und gezielte Standortvergleiche durchgeführt werden. Interessant wäre auch ein Vergleich der Fotomethode mit anderen, einfach anzuwendenden Feld-Erodierbarkeits-Tests, wie sie zum Beispiel von BERGSMA (1986), MERZOUK & BLAKE (1991) oder VICKERS (1994) vorgeschlagen werden. Auch die bisher nur empirisch festgelegte Konstante für die verschiedenen Bodenarten müsste durch experimentelle Untersuchungen geprüft und angepasst werden. Interessant wäre ausserdem der Vergleich verschiedener Anbausysteme auf einem Standort mit Hilfe der Fotomethode. Damit würde eine Basis für ein einfaches, dynamisches und pragmatisches landschaftsökologisches Bodenerosionsmodell geschaffen, welches auch für die landwirtschaftliche und umweltschützerische Praxis einen wertvollen Beitrag leistet.

## 7. Zusammenfassung

Die Erodierbarkeit ist per Definition der Widerstand des Bodens sowohl gegen Ablösung als auch gegen Transport. Sie ist abhängig von Bodenfaktoren wie Bodenart, Aggregatstabilität, Scherwiderstand, Infiltrationskapazität und organischen und anorganischen Bodenbestandteilen wie Humus- und Carbonatgehalt sowie Mikroorganismen. Da die Erodierbarkeit des Bodens nebst der Bodenbedeckung im Erosionsgeschehen der einzige Faktor ist, der positiv beeinflussbar ist, spielt sie in der angewandten Bodenerosionsforschung eine wichtige Rolle. Denn es geht um die optimale Bodenbearbeitung und die Erarbeitung von praxisrelevanten Schutzmassnahmen, welche langfristig den Verlust von Boden durch Erosion vermindern oder stoppen. Gefragt sind also Bodenerosionsmodelle, welche Voraussagen zur Auswirkung verschiedener Bearbeitungsmassnahmen machen und damit den spezifischen Einsatz dieser Schutzmassnahmen und Bearbeitungssysteme ermöglichen. Abhängig vom Betrachtungsstabsstab variiert die Erodierbarkeit stark. Im langfristigen Durchschnitt gesehen stellt sie zwar eine einigermaßen konstante Grösse dar, welche durch empirische Modelle mit relativ wenig Aufwand erfasst werden kann. Detailliertere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Erodierbarkeit sowohl zwischen den Jahren, als auch während des Jahres und sogar während eines Niederschlagsereignisses stark variieren kann. Prozessorientierte Modelle können zwar Aussagen zu Einzelereignissen machen, aber der Aufwand zur Datenbeschaffung und Berechnung ist sehr hoch. Immer noch fehlt ein standardisiertes Verfahren für die Erfassung der Erodierbarkeit, welches einen Vergleich verschiedener Untersuchungsergebnisse ermöglicht.

Um die Erodierbarkeit zu bestimmen wird der Zustand der Bodenoberfläche oder des Boden-Mikroreliefs als die am besten geeignete Grösse angesehen. Sie ergibt sich aus der summierten Wirkung verschiedenster Regler und Prozesse und spielt im Erosionsprozess eine zentrale Rolle. Ganz im Sinne des landschaftsökologischen Pragmatismus ist das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit deshalb die Entwicklung einer einfachen Methode, welche aufgrund von Oberflächenmerkmalen die momentane Erodierbarkeit messen kann und dadurch eine Prognose des potentiellen Erosionsgeschehens ermöglicht. Der Entwicklung einer solchen Methode liegt die Hypothese zugrunde, dass die momentane Erodierbarkeit durch das vorherige Niederschlags- und Erosionsgeschehen verändert wird und selber die Möglichkeit eines nachfolgenden Erosionsereignisses beeinflusst.

Für die Entwicklung und Validierung dieser Erodierbarkeits-Messmethode wurden an verschiedenen Standorten in der Region Basel Untersuchungen in der topischen bis subtropischen Dimension vorgenommen. Das Erfassen von Parametern, die als Schätzgrössen für die Erodierbarkeit genannt werden, diente als Vergleichsgrösse zu der neuen Methode. Diese Parameter sind die Aggregatstabilität und der oberflächliche Scherwiderstand. Als

weitere Hilfsgrösse, wurde die Oberflächenrauigkeit bestimmt. Die Feldmessungen und die Probenahme für die Labortests fanden einerseits auf den langjährigen, schwarzbrach gehaltenen Erosionstestparzellen in den Gebieten „Hochrhein“ (T1) und „Tafeljura“ (T50) statt und andererseits auf kurzfristig ausgeschiedenen Testparzellen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Während die Erosionstestparzellen vielfältige Messungen unter standardisierten Bedingungen ermöglichen, stellen die Landwirtschaftsparzellen das realistische Szenario dar, welches die Verwendung der neuen Methode in der Praxis gewährleistet. Die Untersuchungen fanden in regelmässigen Abständen und nach intensiven Niederschlägen statt. Die Validierung der neuen Methode geschah durch die Korrelation mit den oben genannten Parametern und verschiedenen Erodierbarkeits-Indices aus gängigen Erosionsmodellen. Eine Einfachstmodellierung erfolgte mit Hilfe der schrittweisen Regression.

Als wichtigste Rahmenbedingung wurde auf den jeweiligen Testparzellen das Niederschlagsgeschehen erfasst. Auf den Erosionstestparzellen wurde die Erosivität aufgezeichnet, auf den Landwirtschaftsparzellen standen nur Daten zur Niederschlagsmenge der nächstgelegenen SMA-Stationen zur Verfügung. Während es sich beim Jahr 1995 um ein überdurchschnittlich nasses Jahr handelte, waren die Jahre 1996 und 1997 eher trocken. Ähnlich ist die Niederschlagserosivität 1995 ausserordentlich hoch und in den Jahren 1996 und 1997 unterdurchschnittlich tief. Die höchsten Erosivitäts-Werte finden sich im Sommerhalbjahr während den Monaten Juni bis August.

Entsprechend der Erosivität der Niederschläge konzentrieren sich auch die Abträge und Abflüsse auf den Erosionstestparzellen fast ausschliesslich auf das hydrologische Sommerhalbjahr ohne dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Niederschlagserosivität und dem Abtrag oder Abfluss gefunden wurde. Im langjährigen Vergleich ist die Verteilung der Abtragswerte auf der Testparzelle T50 extrem linksschief, das heisst die 16 grössten Ereignisse von insgesamt 92 liefern bereits 80% der gemessenen Abträge. Die auf der Testparzelle T50 für die Ereignisse mit Hilfe der USLE rückgerechnete Erodierbarkeit zeigt sehr grosse Schwankungen zwischen den Jahren und weicht vom K-Faktor der USLE zum Teil massiv ab.

Die speziellen Untersuchungen auf den Erosionstestparzellen zeigen deutlich die starke räumliche und zeitliche Variabilität der Bodenfaktoren. Trotz höchstem Ton- und organischem C-Gehalt ist die Aggregatstabilität im unteren Parzellenbereich am niedrigsten, was mit der Verschlammungsanfälligkeit des angeschwemmten Materials interpretiert wird. Im Verlauf der Vegetationsperiode weist die Aggregatstabilität ein Maximum im Juli auf um im August eher wieder abzunehmen. Das Niederschlags- und Erosionsgeschehen hat über die Bereitstellung und den Abtransport von losgelöstem instabilem Bodenmaterial einen wichtigen Einfluss auf die Aggregatstabilität.

Der Scherwiderstand ist in allen drei Parzellenbereichen ähnlich. Er nimmt im Verlauf der Vegetationsperiode mit Schwankungen grundsätzlich zu, sinkt aber im August dann wieder ab, was mit dem Zerfall der verschlammten obersten Bodenschicht erklärt wird. Der Scherwiderstand ist von der Bearbeitung abhängig. Bei der unbearbeiteten Parzelle ist er

zuerst grösser, als bei den bearbeiteten. Mit der Zeit stellt sich aber bei allen Parzellen ein ähnlicher Oberflächenzustand und Scherwiderstand ein. Die starke Abhängigkeit von der Bearbeitung schränkt jedoch die Brauchbarkeit des Scherwiderstandes als Erodierbarkeitsparameter ein. Die Oberflächenrauigkeit nimmt vom Bearbeitungszeitpunkt in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität kontinuierlich bis zu einem "steady state" ab. Anschliessend schwankt sie im Wechsel zwischen Einebnung (Verschlammungsschicht) und der Zerstörung dieser Verschlammungsschicht durch intensive Niederschläge.

Die Aggregatstabilität ausgedrückt als die Verschlammungsneigung ist umso kleiner, je feuchter der Boden ist und sie ist nach intensiven Niederschlägen aufgrund des Abtransportes von losgelöstem, instabilem Bodenmaterial grösser. Der Scherwiderstand ist nach intensiven Niederschlägen aufgrund der ausgebildeten Verschlammungsschicht am grössten, ein Zusammenhang mit dem Bodenwassergehalt konnte nicht nachgewiesen werden. Die Aggregatstabilität kann durch die aufsummierte Niederschlagsintensität, die Zeit seit dem letzten Abtragsereignis und den Bodenwassergehalt gut beschreiben werden.

Um die Eignung der Bodenfaktoren Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit als Erodierbarkeitswerte zu testen, wurden sie mit Erodierbarkeits-Indices aus bekannten Erosionsmodellen sowie dem tatsächlichen Abtrag und Abfluss korreliert. Die Erodierbarkeits-Indices weisen in den dynamischen Erosions-Modellen grundsätzlich einen Jahresverlauf auf, allerdings weisen die verschiedenen Erodierbarkeits-Indices bereits untereinander kaum Korrelationen auf. Die über die USLE rückgerechnete aktuelle Erodierbarkeit drückt sich in der im Anschluss gemessenen Aggregatstabilität resp. im Scherwiderstand aus. Während die Bodenfaktoren Aggregatstabilität, Scherwiderstand und Oberflächenrauigkeit kaum Voraussagen zur Erodierbarkeit für ein nächstes Ereignis machen können, ergibt ein Modell, welches Boden- und Niederschlagsparameter berücksichtigt gute Werte. Durch die Bestimmung der Bodenparameter alleine, ergibt sich kein befriedigendes Modell zur Vorhersage von Abtrag und Abfluss. Die Kombination von Bodenparameter mit Niederschlagsfaktoren ergeben hingegen ein gutes Modell für die Voraussage von Abtrag und Abfluss.

Auf den Landwirtschaftsparzellen ist die Erosion bei allen vier Standorten und bei beiden Feldfrüchten transportlimitiert. Die Transportlimitierung nimmt entsprechend von: Weizen tonig > Weizen schluffig > Mais tonig > Mais schluffig ab. Der Wirkung eines groben Mikroreliefs resp. eines höheren Tongehaltes als Reduktoren der Splasherosion scheint bei schluffreichen Lössböden durch die Ausformung einer Verschlammungsschicht aufgehoben. Schluffreiche Böden, welche oberflächlich stark verschlammten, neigen im Gegensatz zu tonreichen Böden zu erhöhtem Abflussverhalten und damit verbunden auch zu grösseren Abträgen. Durch die oberflächliche Verschlammungsschicht, wird allerdings die Splasherosion eingedämmt. Der Maisanbau wirkt durch die ausgeprägten Fahrspuren abtrags- und abflussfördernd, der Weizenanbau durch die lockere Oberfläche splasherosionsfördernd. Abfluss und Abtrag können besser durch die Niederschlagsmenge charakterisiert werden, als durch die Bodenfaktoren. Um die Splasherosion zu erklären ist der Scherwiderstand die beste Grösse.



Die Fotomethode wurde entwickelt, um die momentane Erodierbarkeit auf grund von Oberflächenmerkmalen (Mikroreliefmerkmalen) erfassen. Das Mikrorelief wird grundsätzlich von denselben Faktoren beeinflusst wie die Erodierbarkeit: von Aggregatstabilität, Bodenfeuchte und physikalischen sowie chemischen Bodeneigenschaften. Es entscheidet sich also am Zustand der Bodenoberfläche, ob ein Niederschlagsereignis Erosion auszulösen vermag oder nicht, weshalb es nahe liegend ist, den Mikroreliefzustand als Indikator für die Erodierbarkeit zu verwenden.

Die Fotomethode zur Erfassung der momentanen Erodierbarkeit zeigt grundsätzlich gute Resultate im Vergleich mit anderen Erodierbarkeitsfaktoren und Erodierbarkeitsindices, was für die Brauchbarkeit der Methode spricht. Die negative Korrelation der Fotomethode mit der Aggregatstabilität, sowohl auf der Testparzellen wie auch auf einzelnen Landwirtschafts-parzellen, drückt die Einebnung des Mikroreliefs mit zunehmender Verschlammungsneigung des Bodens aus. Die positive Korrelationen zwischen den Werten der Fotomethode und dem nachfolgenden realen Abtragsgeschehen auf allen Parzellen bestätigen die Brauchbarkeit der Methode für prospektive Aussagen aufgrund der momentanen Erodierbarkeit. Bereits SCHAUB ET. AL. (1987) stellten fest, dass die K-Werte-Klassen bestimmter Gebiete und der effektive Abtrag nicht unbedingt korrelieren. Eine zukünftige Forschungsarbeit sollte deshalb der Frage nachgehen, ob sich die Fotomethode wirklich eignet, um langfristig geltende werte für Erodierbarkeitskarten zu ermitteln. Die ebenfalls positiven Korrelationen der Resultate der Fotomethode mit dem vorherigen Erosionsgeschehen zeigt, dass die durch die Fotomethode gemessene, momentane Erodierbarkeit durch den Abtrag und Abfluss des vorherigen Erosionsereignisses beeinflusst wird.

Im einfachen prospektiven Modell der schrittweisen Regression ergibt das Zusammenspiel von Bodenfaktoren, der Fotomethode und einfach zu ermittelnden Niederschlagsfaktoren befriedigende Resultate. Der Zustand der Bodenoberfläche kann, wie bereits erwähnt, als Summenparameter aufgefasst werden, dessen Ausprägung durch das Wirken verschiedener Prozesse und Regler bestimmt wird. Die Fotomethode bestimmt damit als eine einfache Screening-Methode einen der Schlüsselgrößen im Bodenerosionsprozess. Als grossen Vorteil verglichen mit anderen Methoden erfasst die Fotomethode die momentane Erodierbarkeit unter Berücksichtigung des vorherigen Erosionsgeschehens, wie es zum Beispiel von RÖMKENS (1985) explizit gefordert wird. Wie die vorliegende Arbeit zeigt, ist dies ein Faktor, der in einem dynamischen Erosionsmodell unbedingt berücksichtigt werden muss. Dadurch weist die Fotomethode grosse Vorteile gegenüber der Methode zur Erfassung des K-Faktors auf, welche der Dynamik der Erodierbarkeit in keiner Weise gerecht wird.

Die Fotomethode erfüllt die Ansprüche der Landschaftsökologie einer einfachen, grossflächig anwendbaren Methode. Sie erfüllt aber auch die Ansprüche des Bodenschutzes nach einer ereignis- und damit massnahmenorientierten, prospektiven Methode. Sie misst die Auswirkungen des vorherigen Erosionsgeschehens, der Erosivität und der Einebnung des Mikrorelief und eignet sich gut für die Beschreibung der momentanen Erodierbarkeit.

## 8. Literaturverzeichnis

- ALBERTS, E. E.; LAFLEN, J. M. & SPOMER, R. G. (1987): Between Year Variation in Soil Erodibility Determined by Rainfall Simulation. In: Transactions of the ASAE 30/4, 982-987.
- AG BODEN (1994<sup>4</sup>): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), Hannover, 392 S.
- AG BODENKUNDE (1982<sup>3</sup>): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), Hannover, 331 S.
- ANGERS, D. A.; PESANT, A. & VIGNEUX, J. (1992): Early Cropping-Induced Changes in Soil Aggregation, Organic Matter, and Microbial Biomass. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 115-119.
- ARMSTRONG, J. L. (1990): Runoff and Soil Loss from Bare Fallow Plots at Inverell, New South Wales. In: Aust. J. Soil Res. 28, 659-675.
- AUERSWALD, K. (1993): Bodeneigenschaften und Bodenerosion. Wirkungswege bei unterschiedlichen Betrachtungsmassstäben. = Relief Boden Paläoklima 8, Berlin Stuttgart, 208 S.
- AUERSWALD, K. & HOFMANN, R. (1994): Wirkung von Standortbedingungen auf Boden-genese und Strukturstabilität inneralpiner Ackerböden. In: Die Bodenkultur - Journal für landwirtschaftliche Forschung 45, Heft 3, 199-208.
- BAJRACHARYA, R. M. & LAL, R. (1992): Seasonal Soil Loss and Erodibility Variation on a Miamian Silt Loam Soil. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1560-1565.
- BARROW, C. J. (1991): Land Degradation, Cambridge, 435S.
- BAUMGARTL, TH. & HORN, R. (1993): Die Bestimmung der Aggregatstabilität - ein Methodenvergleich. - In: Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 156, 385-391.
- BECHER, H.H. & KAINZ, M. (1983): Auswirkungen einer langjährigen Stallmistdüngung auf das Bodengefüge im Lössgebiet bei Straubing. In: Z. Acker u. Pfl.bau 152, 152-158.

- BERGSMA, E. (1986): Development of soil erodibility evaluation by simple tests. In: G. Chisci & R.P.C. Morgan (Eds.): Soil Erosion in the European Community. Impact of Changing Agriculture, Rotterdam/Boston, 213-223.
- BERGSMA, E. (1992): Features of Soil Surface Microtopography for Erosion Hazard Evaluation. In: H. Hurni & K. Tato (Eds.): Erosion, Conservation and Small-scale Farming, Marceline, 15-26.
- BOLLINE, A. (1978): Study of the Importance of Splash and Wash on Cultivated Loamy Soils of Hesbaye (Belgium). In: Earth Surface Processes 3, 71-84.
- BORK, H.-R. & SCHRÖDER, A. (1996): Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. In: H. P. Blume, P. Felix-Henningsen, W. R. Fischer, H.-G. Frede, R. Horn & K. Stahr (Hrsg.) Handbuch der Bodenkunde, Landsberg/Lech.
- BRYAN, R.B. (1969): The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. In: Geoderma 2, 5-26.
- BRYAN, R.B. (1976): Considerations on soil erodibility indices and sheetwash. In: Catena 3, 99-111.
- BRYAN, R.B.; GOVERS, G. & POESEN, J. (1989): The Concept of Soil Erodibility and some Problems of Assessment and Application. - In: Catena 16, 393 - 412.
- BUD, Bau und Umweltschutzdirektion des Kantons Basel-Landschaft (Hrsg.) (1989): Natur aktuell. Lagebericht zur Situation der Natur im Kanton Basel-Landschaft im Jahr 1988. Grundlagen für ein Natur- und Landschaftsschutzkonzept. = Quellen und Forschungen zur Geschichte und Landeskunde des Kantons Basel-Landschaft, 32, Liestal, 343 S. + 19 Karten.
- CHAN, K.Y. & MULLINGS, C.E. (1994): Slaking characteristics of some Australian and British soils. - In: Europ. J. of Soil Sci. 45: 273-283.
- CHAROLLAIS, M. & SCHAUB, D. (1999): Erosion: test d'une clé d'appréciation du risque. In: Revue suisse Agric. 31 (1), 33-38.
- CHISCI, G. & MORGAN, R. P. C. (1988): Modelling soil erosion by water: why and how. In: Agriculture - Erosion assessment and modeling, Comm. of the Eruop. Communities, Report EUR 10860 EN, 121-146.
- COOTE, D. R.; MALCOLM-McGOVERN, C. A.; WALL, G. J.; DICKINSON, W. T. & RUDRA, R.P. (1988): Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils. - In: Can. J. Soil. Sci. 68, 405-416.

- COUSEN, S.M. & FARRES, P.J. (1984): The Role of Moisture Content in the Stability of Soil Aggregates from a Temperate Silty Soil to Raindrop Impact. In: *Catena* 11, 313-320.
- DE ROO, A. P. J. (1993): Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. In: *Nederlandse Geografische Studies* 157, 122-129.
- DETLING, W. (1989): Die Genauigkeit geoökologischer Feldmethoden und die statistischen Fehler quantitativer Modelle. = *Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeogr.* 11, Basel, 140 S.
- DRÄYER, D. (1996): GIS-gestützte Bodenerosionsmodellierung im Nordwestschweizerischen Tafeljura. Erosionsschadenskartierungen und Modellergebnisse. = *Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeogr.* 22, Basel, 234 S. + Kartenband.
- DUDAL, R. (1991): An evaluation of conservation needs. - In: R. P. C. Morgan (Hrsg.) *Soil Conservation, Problems and Prospects*, Chichester, 3-12.
- EDI, Eidg. Departement des Innern (1998): Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö).
- EDI, Eidg. Departement des Innern (2001): Erläuterungen zur Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö).
- EDWARDS, W. M. & OWENS, L. B. (1991): Large storm effects on total soil loss. In: *Journal of Soil and Water Conservation* 46, 75-78.
- FAC, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (Hrsg. 1989): *Methoden für Bodenuntersuchungen*. = Schriftenreihe der FAC Liebefeld 5, Liebefeld-Bern, 267 S.
- FAVIS-MORTLOCK, D.T. (1998): Validation of field-scale soil erosion models using common datasets. In: *NATO-ASI Ser I* 55, 89-128.
- FREDE, H.-G.; LATIV, A.; MEYER, B.; ROTH, C.H.; GÄTH, S. & KÖNIG, R. (1988): Zeitliche Schwankungen der Erodibilität als Folge kurz- und langfristiger Veränderungen von Aggregatstabilität und Permeabilität. In: *Mitteilgn. dtsh. Bodenkundl. Gesellsch.* 56, 85-88.
- FISCHER, H.; HAUBER, L. & WITTMANN, O. (1971): *Geologischer Atlas der Schweiz*, 1: 25'000, Blatt 1047 Basel, Erläuterungen. Bern, 55 S.
- FLANAGAN, D. C. & NEARING, M.A. (1995): USDA - Water Erosion Prediction Project: hillslope profile and watershed model documentation. = NSERL Rep. 10, Indiana

- FRIELINGHAUS, M. & FELGENTREU, I. (1987): Strukturparameter zur Einschätzung der aktuellen Erosionsgefährdung von Ackerflächen. In: Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd. 31, 147-154.
- FRÖHLICH, J.; DRÄYER, D. & HUBER, M. (1994): GIS-Methoden in der landschafts-ökologischen Raumbewertung mit einem Beispiel zur Bestimmung der Boden-erosionsgefährdung. - In: Die Erde 125 / 1, 1-13.
- GALLUSSER, W. & DANIELLI, G. (1982): Die landwirtschaftliche Bodennutzung der Regio und ihre aktuelle Veränderung 1960-80. - In: Regio Basiliensis 23 / 1+2, 2-24.
- GERLINGER, K. (1997): Erosionsprozesse auf Lössboden: Experimente und Modellierungen. = Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) 194, Karlsruhe 235 S.
- GOLLANY, H. T.; SCHUMACHER, T. E.; EVENSON, P. D.; LINDSTROM, M. J. & LEMME, G. D. (1991): Aggregate Stability of an Eroded and Desurfaced Typic Argiustoll. In: Soil. Sci. Soc. Am. J. 55, 811-816.
- GÜRLER, B.; HAUBER, L. & SCHWANDER, M. (1987): Die Geologie der Umgebung von Basel. Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F. 160.
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart, 177 S.
- HEBEL, B. (in Vorber.): Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiet-Dimension. = Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeogr., Basel.
- HEBEL, B. & SIEGRIST, S. (1998): Plot Size Application and Validation of WEPP for Swiss Conditions. - In: A. Klik (Hrsg.): Experiences with Soil Erosion Models. Wiener Mitteilungen 151, 149-160.
- HEBEL, B.; SIEGRIST, S. & SEIBERTH, CH. (*accepted for publication*): Are Model Simulations Suitable for a Supervision of Legal Water Erosion Limitation Values? In: Soil & Tillage Research.
- HERWEG, K. (1988): Bodenerosion und Bodenkonservierung in der Toscana, Italien (Testgebiet Roccatederighi, Provinz Grosseto). = Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeogr. 9, Basel, 175 S.
- HUANG, C. & BRADFORD J.M. (1990): Depressional storage of markov-gaussian surfaces. - In: Water Resources Research 26 (9): 2235-2243.
- HUDSON, N. W. (1986): Soil Conservation, London, 324 S.

- IMESON, A. C. & KWAAD, F. J. P. M. (1990): The Response of Tilled Soils to Wetting by Rainfall and the Dynamic Character of Soil Erodibility. In: J. Boardman, I. D. L. Foster & J. A. Dearing (eds.): Soil Erosion on Agricultural Land, Chichester, 3-14.
- KINELL, P. I. A.; RAMOS, M. C. & USON, A. (1996): Method-induced variations in soil erodibility in erosion experiments with rain-impacted flow. In: Aust. J. Soil Res. 34, 715-720.
- KRAMMER, M. (1973): Zehn Jahre meteorologische Beobachtungen in Breitenhof (BL) und Löwenburg (BE). - In: Regio Basiliensis 14, 477-489.
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G. & SCHWERDTFEGGER, G. (1988): Bodenkunde. 568 S.
- LAFLEN, J. M.; ELLIOT, W. J.; SIMANTON, J. R.; HOLZHEY, C. S. & KOHL, K. D. (1991): WEPP Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. In: Journal of Soil and Water Conservation Jan-Feb, 39-44.
- LE BISSONNAIS, Y. (1990): Experimental Study and Modelling of Soil Surface Crusting Processes. In: Catena Suppl. 17, 13-28.
- LE BISSONNAIS, Y. (1996): Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. In: European Journal of Soil Science, 47, 425-437.
- LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. & JAMAGNE, M. (1989): Laboratory Experimental Study of Soil Crusting: Relation between Aggregate Breakdown Mechanisms and Crust Structure. In: Catena 16, 377-392.
- LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M.J. & BRADFORD, J.M. (1993): Assessment of soil erodibility: the relationship between soil properties, erosion processes and susceptibility to erosion. - In: S. Wichereck (ed.) Farm Land Erosion: in Temperate Plains Environment and Hills, 87-96.
- LEHMANN, R. (1994): Landschaftsdegradierung, Bodenerosion und -konservierung auf der Kykladeninsel Naxos, Griechenland. = Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeogr. 21, Basel, 223 S.
- LESER, H. (1982): Die Landschaft der Basler Region und ihre naturräumlichen Gliederungsprobleme. - In: Regio Basiliensis 23 / 1+2, 2-24.
- LESER, H. (1988): Bodenerosionsforschung - Wandel eines Projektes. - In: Regio Basiliensis 24 / 1+2, 1-8.
- LESER, H. (1989): Probleme und Tendenzen der Bodenerosionsforschung. - In: Physiogeographica, Basler Beiträge z. Physiogeogr. 13, Basel 1989, I - VII.

- LESER, H. (1991): Landschaftsökologie. UTB, Stuttgart, 647 S.
- LESER, H. (1996): Modellierung in der Landschaftsökologie und Geographische Informationssysteme (GIS) als methodisches Problem. In: Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeogr. 22, Basel 1996, I - X.
- LESER, H.; PRASUHN, V. & SCHAUB, D. (1998) Bodenerosion und Landschaftshaushalt. In: G. Richter (Hrsg.): Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Darmstadt 1998, 97-109.
- LESER, H. & SCHAUB, D. (1995): Bodenerosion - Bekämpfungsmassnahmen für Praktiker - Basel, 76 S.
- LINE, D. E. & MEYER, L. D. (1989): Evaluating Interrill and Rill Erodibilities for Soils of Different Textures. In: Transactions of the ASAE 32 (6), 1995-1999.
- LOCH, R. J. (1994): A Method for Measuring Aggregate Water Stability of Dryland Soils with Relevance to Surface Seal Development. In: Aust. J. Soil Res. 32, 687-700.
- LOCH, R. J. & ROSEWELL, C. J. (1992): Laboratory Methods for Measurement of Soil Erodibilities (K Factors) for the Universal Soil Loss Equation. - In: Australian Journal of Soil Research 30, 23-248.
- LOCH, R. J. & FOLEY, J. L. (1994): Measurement of Aggregate Breakdown under Rain: Comparison with tests of Water Stability and Relationships with Field Measurements of Infiltration. In: Aust. J. Soil Res. 32 701-720.
- LHA, Lufthygieneamt beider Basel (Hrsg.): Monatsbulletin Luftqualität und Meteorologie, verschiedene Jahrgänge.
- LUK, S.-H. & MORGAN, C. (1981): Spatial Variations of Rainwash and Runoff within Apparently Homogeneous Areas. In: Catena 8, 383-402.
- MANGOLD, P. (1997): Meteorologische und klimatologische Ursachen für das Auftreten von extremen Bodenerosionsereignissen in der Nordwestschweiz. = Diplomarbeit am Geograph. Inst. der Univ. Basel (Manusk.), 118 S.
- MARTZ, L. W. (1992): The Variation of Soil Erodibility with Slope Position in a Cultivated Canadian Prairie Landscape. In: Earth Surface Processes and Landforms, 17, 543-556.
- MATHIER, L. & ROY, G. (1993): Temporal and Spatial Variations of Runoff and Rainwash Erosion on an Agricultural Field. In: Hydrological Processes 7, 1-18.

- MELLIS, D.A.; BRUNEAU, P.M.C.; TWOBLOW, S.J. & MORGAN, R.P.C. (1996): Field assessment of crusting on a tilled sandy clay loam. In: *Soil Use and Management* 12, 72-75.
- MERZOUK, A. & BLAKE, G.R. (1991): Indices for the estimation of interrill erodibility of Moroccan soils. In: *Catena* 18, 537-550.
- MISRA, R. K. & ROSE, C. W. (1995): An Examination of the Relationship between Erodibility Parameters and Soil Strength. In: *Aust. J. Soil Res.* 33, 715-732.
- MOOR, M. (1962): Einführung in die Vegetationskunde der Umgebung Basels. Basel, 464 S.
- MORGAN, R. P. C. (1999): Bodenerosion und Bodenerhaltung. Stuttgart. 236 S.
- MORGAN, R. P. C. & RICKSON R.J. (1994): Preface. In: *Conserving Soil Resources. European Perspectives*, Cambridge 1994, 425 S.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N. & RICKSON, R. J. (1994): Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach. In: *Outlook in Agriculture* 23, 5-9.
- MORGAN, R.P.C.; QUINTON, J.N.; SMITH R.E.; GOVERS, G.; POESEN, J.W.A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D. & STYCZEN, M.E. (1998): The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 527-544.
- MOSER, H.-R. (1984): Die Niederschlagsverteilung und -struktur bei verschiedenen Wetterlagen in der Region Basel. = *Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie* 4, Basel, 269 S.
- MOSIMANN, TH. (1980): Boden, Wasser und Mikroklima in den Geopkosystemen der Löss-Sand-Mergel-Hochflächen des Bruderholzgebietes (Raum Basel). = *Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie* 3, Basel, 267 S. + Kartenband.
- MOSIMANN, TH. (1985): Übersicht über die naturräumlichen Verhältnisse der Region Basel. - In: *Materialien zur Physiogeographie* 8, 5-16.
- MOSIMANN, TH. & SEILER, W. (1982): Böden des südlichen Oberrheingrabenrandes und des Tafeljuras aus geoökologischer Sicht. - In: *Regio Basiliensis* 23 / 1+2, 46-69.
- MOSIMANN, TH.; CROLE-REES, A.; MAILLARD, A.; NEYROUD, J.-A.; THÖNI, M.; MUSY, A. & ROHR, W. (1990): Bodenerosion im schweizerischen Mittelland. Ausmass und Gegenmassnahmen. = *Bericht 51, NFP 22 "Nutzung des Bodens in der Schweiz"*, Liebefeld-Bern, 262 S.



- MOSIMANN, TH. & MITARBEITER (1993): Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft. Problemstand und Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, Hannover, 87 S.
- MOSIMANN, TH. (1994): ): Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft. Aktueller Stand, Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, Thesen zur Erhaltung der Böden, Weiteres Vorgehen, Liestal, 31 S.
- MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sedimentuntersuchung, Stuttgart, 185-193.
- MULLA, D. J.; HUYCK, L. M. & REGANOLD, J. P. (1992): Temporal Variation in Aggregate Stability on Conventional and Alternative Farms. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1620-1624.
- MWENDERA, E.J. & FEYEN, J. (1994): Effects of tillage and rainfall on soil surface roughness and properties. In: Soil Technology 7 93-103.
- NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J. & FINKNER S. C. (1989): A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. In: Transactions of the ASEA 32, 1587-1593.
- NEEF, E. (1963): Dimensionen geographischer Betrachtungen. In: Forsch. u. Fortschr. 37, 361-363.
- PIERSON, F. B. & MULLA, D. J. (1990): Aggregate Stability in the Palouse Region of Washington: Effect of Landscape Position. In Soil Sci. Soc. Am. J. 54 1407-1412.
- PIMENTAL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDERMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; McNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R. & BLAIR, R. (1995): Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. - In: Science 257, 1117-1123.
- POTRATZ, K.; HENK, U. & SKOWRONEK, A. (1991): Luftspregung, Aggregatzerfall und Verschlammung als wichtige Prozesse der Erosionsdynamik - Ergebnisse von Starkregensimulationen an Lössböden. In: Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd. 89, 21-33.
- PRASUHN, V. (1989): Aggregatstabilitätsmessung unter künstlicher Beregnung. - In: Bull. Bodenkdl. Ges. Schweiz 13, 137-142.
- PRASUHN, V. (1991): Bodenerosionsformen und -prozesse auf tonreichen Böden des Basler Tafeljuras (Raum Anwil/BL) und ihre Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt. = Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie 15, Basel, 224 S.
- PRASUHN, V. (1992): Vergleich deutscher und schweizer Regensimulatoren - Einfluss der Regeneigenschaften auf die Bodenoberflächenrauigkeit. In: Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 156, 33-37.

- RENARD, K. G. & FERREIRA, V. A. (1993): RUSLE model description and database sensitivity. - In: J. of Environmental Quality, 22 (3), 458-466.
- RÖMKENS, M.J.M. (1985): The soil erodibility factor: A perspective. In: S.A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer & A. Lo (Eds.): Soil Erosion and Conservation. Soil Cons. Soc. Am. Ankerly 1985, 445-461.
- RÖMKENS, M.J.M.; NELSON, D.W. & ROTH, C.B. (1975): Soil erosion on selected high clay subsoils. In: Journal of soil and water conservation July-August, 173-176.
- ROGLER, H. & SCHWERTMANN, U. (1981): Erosivität der Niederschläge und Isoerodetenkarte Bayerns. - In: Z. Kulturtechn. Flurber. 22, 99-112.
- ROHR, W.; MOSIMANN, TH.; BONO, R.; RÜTTIMANN, M. & PRASUHN, V. (1990): Kartieranleitung zu Aufnahme von Bodenerosionsformen und -schäden auf Ackerflächen - Legende, Erläuterungen zur Kartiertechnik, Schadensdokumentation und Fehlerabschätzung. = Materialien zur Physiogeographie 14, Basel, 56 S.
- ROHRER, J. (1985): Quantitative Bestimmung der Bodenerosion unter Berücksichtigung des Zusammenhanges Erosion-Nährstoff-Abfluss im Oberen Langete-Einzugsgebiet (Napfgebiet, südlich Huttwil). = Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeogr. 6, Basel, 242 S.
- ROLLI, S. & MEIER-ZIELINSKI, S. (1997): Modellierung der Bodenerosion in chorischer Dimension. Probleme und Perspektiven aus Sicht der Forschungsgruppe Bodenerosion Basel. - In: Mitteilungen der DBG 83, 459-462.
- ROLLI, S. & MEIER-ZIELINSKI, S. (1998): Ausscheidung für den Sedimentaustrag relevanter Flächen auf Einzugsgebietsebene (chorische Dimension). - In: BGS-Bulletin 22, Tätigkeitsberichte der Jahrestagung *Stofftransport im Boden* vom 12. und 13. März 1998 in Schlieren und Zürich, 49-52.
- ROSE, C.W.; HAIRSINE, P.B.; PROFFITT, A.P.B. & MISRA, R.K. (1990): Interpreting the Role of Soil Strength in Erosion Processes. In: Catena Supplement 17, 153-165.
- ROTH, C. (1996): 6.3.1.1 Physikalische Ursachen der Wassererosion. - In: H. P. Blume, P. Felix-Henningsen, W. R. Fischer, H.-G. Frede, R. Horn & K. Stahr (Hrsg.) Handbuch der Bodenkunde, Landsberg/Lech, 1-34.
- RÜTTIMANN, M.; SCHAUB, D.; PRASUHN, V. & RÜEGG, W. (1995): Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland - some critical considerations. - In: Catena 25, 127-139.
- SADEGHIAN, M.R. & MITCHELL, J.K. (1990): Response of surface roughness storage to rainfall on tilled soil. - In: Trans. ASAE 33 (6): 1875-1881.

- SCHAUB, D. (1987): Bodenformen und Bodenformenkarte des Möhliner Feldes. In: *Regio Basiliensis* 29 (3), 9-19.
- SCHAUB, D. (1989): Die Bodenerosion im Lössgebiet des Hochrheintals (Möhliner Feld - Schweiz) als Faktor des Landschaftshaushaltes und der Landwirtschaft. = *Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie* 13, Basel, 225 S.
- SCHAUB, D. (1991): Bodenerosion, Möglichkeiten der Erosionsverminderung in der Schweiz. - In: *Regio Basiliensis* 32 / 2. = Festschrift zum 48. Deutschen Geographentag Basel 22. - 28. September 1991, 17-26.
- SCHAUB, D. (1998): Gebietsbilanzen von Bodenerosion und der damit verbundenen Stoffumlagerungen. = Habilitationsschrift am Departement Geographie der Universität Basel, unveröffentlicht, 210 S.
- SCHAUB, D. & PRASUHN, V. (1991): Bodenerosionsmodelle. In: M. Monbaron & W. Haeberli (Hrsg.) *Modelle in der Geomorphologie - Beispiele aus der Schweiz.* = *Berichte und Forschungen d. Geogr. Inst. Univ. Fribourg* 3, 47-59
- SCHAUB, D.; VAVRUCH, ST.; DIPNER, M. & JENNE, TH. (1987): Erodibilitätskarten dreier Agrargebiete der Nordwestschweiz. In: *Regio Basiliensis* 28 (1+2), 115-122.
- SCHAUB, D.; WÜTHRICH, C. & SEIBERTH, C. (1997): How landscape features influence sediment yields (a comparison of two investigation areas in North West Switzerland). In: *Supplementi di Geografia e Dinamica Quaternaria* III, Tomo 1, 343-350.
- SCHJØNNING, P. (1994): Soil Erodibility in Relation to Soil Physical Properties. In: R. J. Rickson (ed.): *Conserving Soil Resources. An European Perspective*, Wallingford, 78-86.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P. & STAHR, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum*, Berlin - Wien, 295 S.
- SCHMIDT, J. (1991): A mathematical model to simulate rainfall erosion. In: *Catena Suppl.* 19, 101-109
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen. = *Berliner geographische Abhandlungen* 61, 147 S.
- SCHMIDT, R.-G. (1979): Probleme der Erfassung und Quantifizierung von Ausmass und Prozessen der aktuellen Bodenerosion (Abspülung) auf Ackerflächen. Methoden und ihre Anwendung in der Rheinschlinge zwischen Rheinfeldern und Wallbach (Schweiz). = *Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie* 1, Basel, 240 S.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS DER FBB (2003)

- SCHÜEPP, W. (1982): Das Klima der Basler Region als Bestandteil des menschlichen Lebensraumes. - In: *Regio Basiliensis* 23 / 1+2, 2-24.
- SCHWERTMANN, U.; VOGL, W. & KAINZ, M. (<sup>2</sup>1990): Bodenerosion durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen. Stuttgart, 62S.
- SEKERA, F. & BRUNNER, A. (1943): Beiträge zur Methodik der Greforschung. In: *Z. Pflanzenernähr., Düng. u. Bodenkd.* 29, 169-212.
- 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, 510 S. + Kartenband.
- SHARMA, P. P.; GUPTA, S. C. & RAWLS, W. J. (1991): Soil Detachment by Single Raindrops of Varying Kinetic Energy. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 301-307.
- SHARMA, P. P.; GUPTA, S. C. & FOSTER, G. R. (1995): Raindrop-Induced Soil Detachment and Sediment Transport from Interrill Areas. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 727-734.
- SIEGRIST, S. (1995): Experimentelle Untersuchungen über die Verminderung der Bodenerosion durch biologischen Landbau in einem NW-schweizerischen Lössgebiet. In: *Die Erde* 126, 93-106.
- SIEGRIST, S. (1997): Untersuchungen zur Erodierbarkeit einer langjährigen Erosionstestparzelle im Länenbachtal (CH). In: *Mitt. DBG* 83, 467-470.
- SIEGRIST, S. & FRÖHLICH, J. (1996): Stand der Bodenerosionsforschung am Geographischen Institut der Universität Basel. In: *Mitt. DBG* 79, 431-434.
- SIEGRIST, S.; SCHAUB, D.; PFIFFNER, L. & MÄDER, P. (1998): Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. - In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 69, 253-264.
- SMA, Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich (Hrsg.) (1996): Bereinigte Zeitreihen. Die Ergebnisse des Projekts KLIMA 90. = *Klimatologie der Schweiz* 1961 - 1990, Heft 2, Band 1 (von 4): Auswertungen, 134 S.
- UNTERSEHER, E. (1997): Ingenieurökologie und Landschaftsmanagement in zwei Agrarlandschaften der Region Basel. Möhliner Feld (Hochrheintal/Schweiz) und Feuerbachtal (Markgräfler Hügelland/Deutschland). = *Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie* 24, Basel 297 S.

- VAVRUCH, S. (1988): Bodenerosion und ihre Wechselbeziehungen zu Wasser, Relief, Boden und Landwirtschaft in zwei Einzugsgebieten des Basler Tafeljuras (Hemmiken, Rothenfluh). = Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie 10, Basel, 338 S.
- VICKERS, A.W. (1994): A simple field erodibility index based on some English soils. In: R. J. Rickson (ed.): Conserving Soil Resources. An European Perspective, Wallingford, 70-77.
- VSD, Volkswirtschafts- und Sanitätsdirektion des Kantons Basel-Landschaft (Hrsg.) (verschiedene Jahrgänge): Bodenkartierung Kanton Basel-Landschaft, Gemeinde Diegten, Gemeinde Münchenstein, Gemeinde Therwil, Erläuterungsbericht inkl. Bodenkarte im Massstab 1:5'000.
- WISCHMEIER, W. H. (1959): A rainfall erosion index for an universal soil loss equation. - In: Soil Sci. Soc. Am. J. 23, 246-249.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D (1965): Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. USDA Agr. handbook 282, 47 S.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978): Predicting rainfall erosion losses. - A guide to conservation planning. = US Dep. of Agricult. (Hrsg.), Agriculture Handbook No. 537, Washington, 58 S.
- YOUNG, R.A.; RÖMKENS, M.J.M. & MCCOOL, D.K. (1990): Temporal Variations in Soil Erodibility. - In: R.B. Bryan (Hrsg.): Soil erosion: experiments and models. Catena: Suppl. 17, 41-53.

## **9. Anhang**

A1: Die K-Faktoren nach SCHWERTMANN ET AL. 1990 der Erosionstestparzellen T1 und T50 während der Untersuchungszeit.

	S	U	ffS	=> M	OS	AK	DK	K-Faktor	Steine	K-Faktor m. Steingeh.
	[%]	[%]	[%]		[%]			[(t h)/(ha N)]	[%]	[(t h)/(ha N)]
<b>1995:</b>										
<b>T 1 Wiese</b>	23.4	46.1	7.66	3737.395	4	3	4	0.30	5	<b>0.27</b>
<b>T 1, P1</b>	13.1	47.6	5.44	3221.65	2.56	3	4	0.30	7	<b>0.25</b>
<b>T1, P2</b>	15.2	44.6	7.42	3112.36	3.13	3	3	0.31	7	<b>0.26</b>
<b>T1, P3</b>	12.8	48.1	5.32	3253.28	3.29	3	4	0.29	5	<b>0.26</b>
<b>T 50 Wiese</b>	2.48	46.1	8.1	2633.036	4	3	3	0.25	7	<b>0.21</b>
<b>T 50</b>	3.54	45.8	8.7	2689.03	4	3	3	0.26	9	<b>0.21</b>
<b>1996:</b>										
<b>T 1, P1</b>	11.9	49.2	4.89	3302.195	3.3	3	4	0.29	7	<b>0.24</b>
<b>T1, P2</b>	10.9	50.1	4.67	3338.23	3.85	3	3	0.31	7	<b>0.26</b>
<b>T1, P3</b>	11.7	48.28	4.85	3188.86	3.51	3	4	0.28	5	<b>0.25</b>
<b>T 50</b>	3.5	46.5	7.1	2680	4	3	4	0.22	9	<b>0.17</b>

OS ... organische Substanz, AK ... Aggregatklasse, DK ... Durchlässigkeitsklasse

$$M=(U+ffS)*(U+S)$$

$$K=2.77*10^{-6}*M^{1.14}*(12-OS)+0.043*(A.K.-2)+0.033*(4-D.K.)$$

A2: Die K-Faktoren nach SCHWERTMANN ET AL. 1990 der Landwirtschaftsparzellen während der Untersuchungszeit

	S	U	ffS	=> M	OS	AK	DK	K-Faktor	Steine	K-Faktor m. Steingeh.
	[%]	[%]	[%]		[%]			[(t h)/(ha N)]	[%]	[(t h)/(ha N)]
<b>GTW 95</b>	0.8	78.4	1.6	6336.00	2.92	2	4	0.54	0	<b>0.54</b>
<b>GTM 96</b>	8.4	58.4	2.8	4088.16	2.92	3	3	0.41	4	<b>0.37</b>
<b>GTW 96</b>	8.4	58.4	2.8	4088.16	2.92	3	3	0.41	4	<b>0.37</b>
<b>BMW 95</b>	2.1	57.6	5.1	3743.19	4	3	4	0.31	0	<b>0.30</b>
<b>BMM 96</b>	0.8	50	3	2692.4	4	3	3	0.26	0	<b>0.22</b>
<b>BMW 96</b>	1.6	61.3	3.8	4094.79	4	3	4	0.33	0	<b>0.30</b>
<b>JBW 95</b>	1.5	71	1.9	5285.25	3.27	2	4	0.42	0	<b>0.42</b>
<b>JBM 96</b>	1.4	75.4	1.5	5905.92	2.41	2	4	0.53	0	<b>0.53</b>
<b>JBW 96</b>	1.4	75.4	1.5	5905.92	2.41	2	4	0.53	0	<b>0.53</b>
<b>JDT 95</b>	6.2	36.3	6	1797.75	4	3	3	0.19	7	<b>0.18</b>
<b>NDM 96</b>	5.9	41	5.6	2185.54	4	3	3	0.22	5	<b>0.19</b>
<b>NDW 96</b>	5.9	41	5.6	2185.54	4	3	3	0.22	5	<b>0.19</b>

OS ... organische Substanz, AK ... Aggregatklasse, DK ... Durchlässigkeitsklasse

$$M=(U+ffS)*(U+S)$$

$$K=2.77*10^{-6}*M^{1.14}*(12-OS)+0.043*(AK-2)+0.033*(4-DK)$$

### A3: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftsparzelle in Therwil

Standort		GTW 95		GTM 96		GTW 96	
Zeitpunkt		27. Okt 95	30. Mär 96	3. Jun 96	30. Sept 96	4. Nov 96	28. Apr 97
Korngrös- senverteil.	>2mm (%)	0.0		11.9			
	Stot (%)	2.4		12.6			
	ffS (%)	1.6		2.8			
	Utot (%)	78.4		58.4			
	Ttot (%)	19.2		29.0			
pH	H2O	7.1	7.1	7.6	7.8	7.8	7.9
	K Cl	6.3	5.8	6.9	7.0	6.9	7.1
	Humus						
Corg (%)		1.68	1.95	1.68	1.68	1.65	1.65
	Norg (%)	0.17	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16
	C / N (%)	9.9	13.0	10.5	10.5	10.3	10.3
Canorg (%)		0.00	0.00	0.72	0.78	0.64	0.67
	Kalk (%)	0.3		5.2			
	Dol. (%)	1.0		2.0			
Nährstoffe	Ca 2+ (mg/kg)	349	197	2500	2224	1102	1728
	Mg 2+ (mg/kg)	24.98	14.93	37.62	40.33	22.27	30.03
	K + (mg/kg)	50.38	40.70	131.44	145.43	111.00	87.40
	P2O5 (mg/kg)	12.76	11.97	10.90	14.93	8.20	4.53
KAK	S-Wert (mmolc/100g)	14.49	15.20	30.54			
	T-Wert (mmolc/100g)	13.28	15.77	18.75			
	V-Wert (%)	>100	96.39	>100			

Die Analysen wurden an Mischproben aus 10 Einstichen in 0-10 cm Tiefe durchgeführt, hier wird der Mittelwert von 5 Mischproben angegeben.

#### GTW / GTM

Betrieb Fam. Gerber  
Hüttenuhof  
Therwil / BL

Landw. Nutzfläche: 62 ha

Milchwirtschafts- und Ackerbaubetrieb (Integrierte Produktion)

Fruchtfolge (10jährig): Hackfrucht - WWWeizen im Wechsel; zw. WWWeizen und Hackfrucht: Kunstwiese als Bodenbedeckung, resp. Gründüngung; Hackfrucht-reihenfolge: Soja, Kartoffeln, Raps, Mais, Zuckerrüben

#### Gebiet

Klima (langjährige Werte der SMA Station Basel-Binningen St. Margarethen<sup>1)</sup> 317 m NN (SMA 1996) resp. von Therwil<sup>2)</sup> m NN (LHA 1992):

(1961-1990)<sup>1)</sup> Jahresmittel Temperatur: 9.5 °C

(1961-1990)<sup>1)</sup> Jahressummen Niederschlag: 787.5 mm

(1961-1990)<sup>2)</sup> Jahressummen Niederschlag: 872 mm

Naturraumtyp (nach H.Leser 1982): Niedriges Hügelland

Geographische Lage: Therwil befindet sich rund 7 km südwestlich von Basel. Das UG liegt im Witterswilerfeld, im südlichen Teil des Leimentals, welches hier vom Schlibbach, Grossmattbach und Marchbach durchflossen wird. Zwischen diesen einzelnen Schwemmebenen ("Matten") liegen lössbedeckte, sanfte Höhenzüge (Witterswiler- und Lindenfeld).

Geologische Übersicht (nach Th. Mosimann & W. Seiler 1982): Lössablagerungen über Mesozoikum

Substrattypen im UG: Löss und Schwemmlöss

#### GTW 95

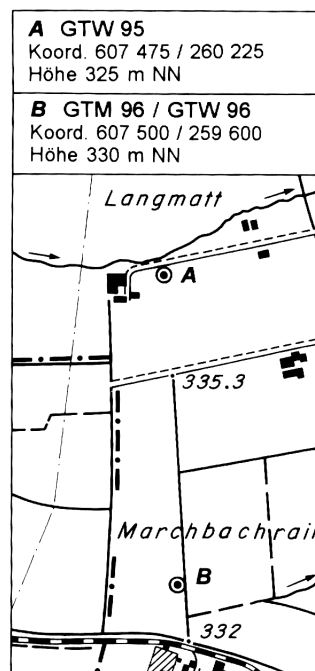
Bodenform: Braunerde-Parabraunerde auf Auenschwemmlöss, leicht gleyig und z.T. pseudogleyig, carbonatfrei, skelettfrei, tiefgründig

Wasserhaushalt: Rostflecken und leichte Marmorierung ab rund 50 cm Tiefe (Oxidationsbereich) durch Grundwasser und Staueffekt des BvBt-Horizontes; Reduktionsbereich in Pürckhauertiefe nicht erkennbar

#### GTM resp. GTW 96

Bodenform: Kolluvium aus Auenlehm, stark pseudovergleyt, carbonathaltig, schwach skeletthaltig, mässig tiefgründig

Wasserhaushalt: Stauwasserbeeinflussung ab 30 cm Tiefe, durch mit der Tiefe zunehmende Tongehalte.





#### A4: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftspartzele in Münchenstein

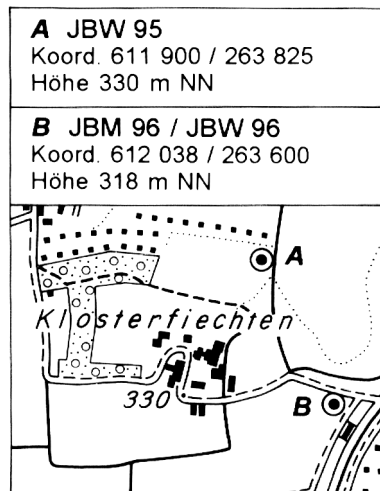
<b>BMW / BMM</b>		<b>A BMW 95</b> Koord. 614 488 / 262 450 Höhe 385 m NN					
Betrieb Fam. Banga Untere Gruth Hof Münchenstein / BL		<b>B BMM 96</b> Koord. 614 769 / 262 475 Höhe 380 m NN					
Landw. Nutzfläche: 37.58 ha		<b>C BMW 96</b> Koord. 614 550 / 262 625 Höhe 350 m NN					
Milchwirtschaftsbetrieb mit Ackerbau (Integrierte Produktion)							
Fruchtfolge (7jährig): WWeizen - WGerste - Mais - WWeizen - Wgerste / Hafer - Klee gras - Klee gras zw. WGerste und Mais: Kunstwiese als Bodenbedeckung, resp. Gründüngung							
<b>Gebiet</b>							
Klima (langjährige Werte der SMA Station Basel-Binningen St. Margarethen <sup>1)</sup> 317 m NN (SMA 1996), resp. der Station Arlesheim <sup>2)</sup> m NN (LHA 1992): (1961-1990) <sup>1)</sup> Jahresmittel Temperatur: 9.5 °C (1961-1990) <sup>1)</sup> Jahressummen Niederschlag: 787.5 mm (1961-1990) <sup>2)</sup> Jahressummen Niederschlag: 912 mm							
Naturraumtypen (nach H.Leser 1982): Niedriges Hügelland, Schotterflächen des Hochrheintals und der Seitentäler, Tafelhügel- und -bergland							
Geographische Lage: Münchenstein befindet sich rund 5 km südöstlich von Basel. Die Gemeinde ist durch die östlichen Ausläufer des Sundgauer Hügellandes, die Birsebene und die Abhänge des Tafeljuras geprägt. Das UG liegt an den Abhängen des Tafeljuras zum Birstal, welche auf den weichen Mergelschichten flach geneigt sind, auf den Kalksteinbänken jedoch sehr steil sein können.							
Geologische Übersicht (nach Th. Mosimann & W. Seiler 1982): Sundgauer Hügelland: Lössablagerungen über Mesozoikum, Birsebene: Niederterassenschotter, Abhänge des Tafeljuras: Dogger							
Substrattypen im UG: Mergel, Doggerschutt und Hanglehm							
<b>BMW 95</b>							
Bodenform: Löss Parabraunerde-Braunerde auf Mergel, carbonatfrei, skelettfrei, tiefgründig							
Wasserhaushalt: normale Durchlässigkeit, leichte Einschränkung erst durch Bt-Horizont (75-100 cm), Eisen- und Mangan-Konkretionen im IIC(v)-Horizont (> 100 cm)							
<b>BMM 96</b>							
Bodenform: Braunerde auf Hanglehm, leicht pseudogleyig, Ansätze zur Tonverlagerung, carbonatfrei, skelettfrei, tiefgründig							
Wasserhaushalt: normale Durchlässigkeit, Einschränkung erst durch Zunahme des Tongehaltes mit der Tiefe (ab 60 cm), ab diesem Bereich Eisen- und Mangan-Konkretionen sichtbar							
<b>BMW 96</b>							
Bodenform: Braunerde auf Löss/Hanglehm, leicht pseudogleyig, ganz leicht carbonathaltig, skelettfrei, tiefgründig							
Wasserhaushalt: normale Durchlässigkeit, Eisen- und Mangankonkretionen im CvBv-Horizont (> 60 cm)							
	Standort	BMW 95		BMM 96		BMW 96	
	Zeitpunkt	20. Okt 95	29. Apr 96	13. Jun 96	30. Sept 96	2. Dez 96	28. Apr 97
Korngrößenverteil.	>2mm (%)	0.0		0.0		1.4	
	Stot (%)	7.4		3.8		5.5	
	ffS (%)	5.1		3.0		3.8	
	Utot (%)	57.6		50.0		61.2	
	Ttot (%)	35.0		46.2		33.4	
pH	H2O	7.2	7.0	6.8	6.8	7.0	6.4
	K Cl	6.3	6.1	5.7	5.7	5.9	5.6
Humus	Corg (%)	2.55	2.39	3.18	3.22	2.80	2.82
	Norg (%)	0.25	0.25	0.34	0.32	0.31	0.31
	C / N (%)	10.2	9.6	9.4	10.1	9.0	9.1
	Canorg (%)	0.02	0.00	0.01	0.00	0.30	0.27
	Kalk (%)	0.8		0.9		1.36	
	Dol. (%)	0.8		0.6		0.55	
Nährstoffe	Ca 2+ (mg/kg)	587	473	277	338	357	376
	Mg 2+ (mg/kg)	19.18	18.40	11.44	23.07	15.04	17.27
	K + (mg/kg)	46.01	47.17	44.60	59.53	23.17	39.43
	P2O5 (mg/kg)	11.09	12.07	9.54	19.03	13.38	11.97
KAK	S-Wert (mmolc/100g)	25.78	23.11	30.97		24.86	
	T-Wert (mmolc/100g)	20.60	23.13	27.62		26.16	
	V-Wert (%)	>100	99.05	>100		95.03	

Die Analysen wurden an Mischproben aus 10 Einstichen in 0-10 cm Tiefe durchgeführt, hier wird der Mittelwert von 5 Mischproben angegeben.

**A5: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftsparzelle in Basel**

<b>JBW / JBM</b>									
Betrieb Fam. Jordi Klosterfiechtenhof Basel									
Landw. Nutzfläche: 28.9 ha									
Milchwirtschafts- und Ackerbaubetrieb mit biologischer (organischer) Bewirtschaftung									
Fruchtfolge (6jährig): Wweizen - Hackfrucht (Mais / Kartoffeln) - Wweizen - Wgerste - Kunstwiese - Kunstwiese; zw. Winterweizen und Hackfrucht: Kunstwiese als Bodenbedeckung, resp. Gründung									
<b>Gebiet</b>									
Klima (langjährige Werte der SMA Station Basel-Binningen St. Margarethen 317 m NN (SMA 1996): (1961-1990) Jahresmittel Temperatur: 9.5 °C (1961-1990) Jahressummen Niederschlag: 787.5 mm									
Naturraumtyp (nach H.Leser 1982): Niedriges Hügelland									
Geographische Lage: Das Bruderholz ist der südlichste Ausläufer der Stadt Basel, der sich auf den östlichen Ausläufern des Sundgauer Hügellandes erhebt. Es ist flach bis schwach geneigt.									
Geologische Übersicht (nach Th. Mosimann & W. Seiler 1982): Lössablagerung über Mesozoikum;									
Substrattypen im UG: Löss, Lösslehm und Lösskolluvien									
<b>JBW 95</b>									
Bodenform: Braunerde auf Lösskolluvium, karbonathaltig, skelettfrei, sehr tiefgründig									
Wasserhaushalt: normale Durchlässigkeit									
<b>JBM 95 resp. JBW</b>									
Bodenform: Parabraunerde auf Lösslehm, carbonatfrei, skelettfrei, sehr tiefgründig									
Wasserhaushalt: normale Durchlässigkeit, Einschränkung erst durch Zunahme des Tongehaltes im BtCv-Horizont ab 67 cm Tiefe, dort Mangan- und Eisenkonkretionen sichtbar.									
		<b>Standort</b>		<b>JBW 95</b>		<b>JBM 96</b>		<b>JBW 96</b>	
		<b>Zeitpunkt</b>		3. Nov 95   29. Apr 96		6. Jun 96   30. Sept 96		21. Nov 96   28. Apr 97	
Korngrößenverteil.	>2mm (%)	0.3		0.0					
	Stot (%)	3.6		3.0					
	ffS (%)	1.9		1.5					
	Utot (%)	71.0		75.4					
	Ttot (%)	25.4		21.8					
pH	H2O	7.9	7.7	6.9	7.0	6.9	6.8		
	K Cl	6.8	6.8	5.8	5.9	5.8	5.9		
Humus	Corg (%)	1.93	1.72	1.46	1.43	1.36	1.51		
	Norg (%)	0.16	0.15	0.13	0.12	0.13	0.13		
	C / N (%)	12.1	11.5	11.2	11.9	10.5	11.6		
	Canorg (%)	0.30	0.24	0.01	0.00	0.00	0.00		
Kalk	Kalk (%)	0.9		0.3					
	Dol. (%)	2.5		0.9					
Nährstoffe	Ca 2+ (mg/kg)	1069	1374	250	182	151	244		
	Mg 2+ (mg/kg)	55.86	61.77	26.42	23.07	16.68	24.63		
	K + (mg/kg)	34.09	35.30	92.00	59.53	37.45	45.93		
	P2O5 (mg/kg)	6.38	9.70	21.64	19.03	17.09	12.87		
KAK	S-Wert (mmolc/100g)	21.53	22.35	19.87					
	T-Wert (mmolc/100g)	16.59	19.12	14.02					
	V-Wert (%)	>100	>100	>100					

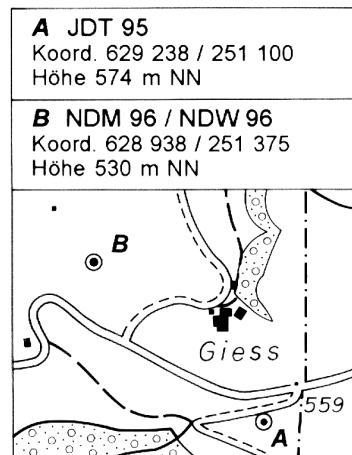
Die Analysen wurden an Mischproben aus 10 Einstichen in 0-10 cm Tiefe durchgeführt, hier wird der Mittelwert von 5 Mischproben angegeben.



## A6: Gebietsbeschreibung, physikalische und chemische Kennwerte der Landwirtschaftsparzelle in Diegten

<b>JDT</b>							
Betrieb Fam. Joss Erlihof Diegten / BL Landw. Nutzfläche: 17.85 ha Milchwirtschaftsbetrieb mit Ackerbau und Obstbau (Integrierte Produktion) Fruchtfolge (5jährig): Kunstwiese - Kunstwiese - WWeizen - WTriticale - WGerste; zw. WWeizen und Triticale: Kunstwiese als Gründüngung							
<b>NDM / NDW</b>							
Betrieb Fam. Nyffeler Brentenhof Diegten / BL Landw. Nutzfläche: 24 ha Milchwirtschaftsbetrieb mit Obst- und wenig Ackerbau (Integrierte Produktion) Fruchtfolge (7jährig): Mais - Wweizen - Wgerste - Mais - Wgerste - Kunstwiese - Kunstwiese; zw. Wgerste und Mais Kunstwiese als Bodenbedeckung, resp. Grün- düngung							
<b>Gebiet</b>							
Klima (langjährige Werte der Stationen Breitenhof <sup>1)</sup> 558 m NN (M. Kramer 1974) und Eptingen <sup>2)</sup> m NN (LHA 1992) (1961-1970) <sup>1)</sup> Jahresmittel Temperatur: 8.3 °C (1961-1970) <sup>1)</sup> Jahresmittel Niederschlag: 1083 mm (1961-1990) <sup>2)</sup> Jahressummen Niederschlag: 1'149 mm Naturraumtyp (nach H.Leser 1982): Tafelhügel- und -bergland Geographische Lage: Diegten befindet sich im "Oberbaselbiet" rund 25 km südöstlich von Basel und 6 km südlich von Sissach im Diegtertal, welches vom Diegter Bach durchflossen wird. Das UG liegt an den Abhängen des Tafeljuras zum Diegtertal. Geologische Übersicht (nach Th. Mosimann & W. Seiler 1982): Dogger und Malm Substrattypen im UG: Hanglehme und Hangschutt aus Dogger und Malm, tertiäre Mergel							
<b>JDT 95</b>							
Bodenform: Kalkbraunerde aus Hanglehm (Dogger), leicht carbonathaltig, leicht skeletthaltig (< 10%), tiefgründig Wasserhaushalt: normale Durchlässigkeit							
<b>NDM 96 resp. NDW 96</b>							
Bodenform: Kalkbraunerde auf Hanglehm (Dogger), Karbonathaltig, leicht skeletthaltig (< 10%), mässig tiefgründig (CBv > 52 cm) Wasserhaushalt: normale Durchlässigkeit							
	Standort Zeitpunkt	JDW 95 20. Okt 95   8. Mai 96		NDM 96 10. Jun 96   2. Okt 96		NDW 96 18. Nov 96   28. Apr 97	
Korngrös- senverteil.	>2mm (%)	5.5		11.9			
	Stot (%)	12.6		12.3			
	ffS (%)	6.0		5.6			
	Utot (%)	36.3		41			
	Ttot (%)	51.1		46.7			
pH	H2O	7.5	7.3	7.5	7.6	7.5	7.6
	K Cl	6.7	6.8	6.7	6.9	6.6	7.0
Humus	Corg (%)	3.94	3.79	3.52	3.70	3.85	3.99
	Norg (%)	0.40	0.34	0.37	0.36	0.37	0.39
	C / N (%)	9.9	11.1	9.5	10.3	10.4	10.2
	Canorg (%)	0.38	0.38	1.19	1.09	1.14	1.09
	Kalk (%)	4.5		10.2			
	Dol. (%)	1.0		0.6			
Nährstoffe	Ca 2+ (mg/kg)	1766	1322	1423	1971	1084	1767
	Mg 2+ (mg/kg)	35.61	29.53	26.74	36.93	25.33	36.53
	K + (mg/kg)	76.22	71.00	21.30	30.33	38.67	30.60
	P2O5 (mg/kg)	19.03	16.03	5.60	14.90	12.90	8.77
KAK	S-Wert (mmolc/100g)	39.93	36.59	46.81			
	T-Wert (mmolc/100g)	30.53	33.13	29.8			
	V-Wert (%)	>100	>100	>100			

Die Analysen wurden an Mischproben aus 10 Einstichen in 0-10 cm Tiefe durchgeführt, hier wird der Mittelwert von 5 Mischproben angegeben.



A7: Detaillierte Kennwerte der physikalischen und chemischen Bodenmessungen auf der Erosionstestparzelle T50 von 1995 bis 1997.

T50		1995:						
		14.6.	5.7.	21.7.	26.7.	16.8.	30.8.	4.10.
<b>Perkolationsstabilität</b> [g / 10 min]	oben *	37.4	126.4	192.0	238.8	45.2	84.1	109.5
	mitte *	102.4	67.5	293.1	211.4	141.2	112.0	104.2
	unten *	76.7	42.3	71.4	209.9	80.2	45.0	62.0
	Mittel	72.2	78.7	185.5	220.0	88.8	80.4	91.9
	SD	32.7	43.2	111.0	16.2	48.6	33.6	26.0
	VK	45.4	54.8	59.8	7.4	54.7	41.9	28.3
<b>Scherwiderstand</b> [kg / m <sup>2</sup> ]*10 <sup>-2</sup>	oben *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	mitte *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	unten *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Mittel	-	-	-	-	-	-	-
	SD	-	-	-	-	-	-	-
	VK	-	-	-	-	-	-	-
<b>Rauhigkeitsindex</b>	links	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	rechts	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	mitte	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Mittel	-	-	-	-	-	-	-
	SD	-	-	-	-	-	-	-
	VK	-	-	-	-	-	-	-
<b>Wassergehalt</b> [%]	oben	24.6	23.0	21.0	20.0	22.1	25.0	24.6
	mitte	26.3	24.4	19.0	20.3	23.9	26.2	25.6
	unten	26.1	22.2	19.9	24.5	23.7	25.2	25.7
	Mittel	25.7	23.2	20.0	21.6	23.2	25.5	25.3
	SD	0.9	1.1	1.0	2.5	1.0	0.7	0.6
	VK	3.5	4.8	5.1	11.7	4.4	2.6	2.4
<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	oben	7.8	7.8	7.6	7.8	7.9	7.8	7.8
	mitte	7.6	7.8	7.7	7.9	7.7	8.0	7.8
	unten	7.7	7.7	7.6	7.8	7.7	7.7	7.7
	Mittel	7.7	7.8	7.6	7.9	7.8	7.8	7.7
	SD	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
	VK	1.8	0.4	0.8	0.5	1.3	1.9	0.3
<b>pH (KCl)</b>	oben	6.9	6.9	6.9	6.8	6.9	6.9	6.9
	mitte	6.8	6.8	6.9	6.8	6.8	6.8	6.9
	unten	6.9	6.9	6.9	6.9	6.8	6.7	6.8
	Mittel	6.9	6.9	6.9	6.8	6.9	6.8	6.9
	SD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
	VK	0.6	0.4	0.1	0.2	0.5	1.1	0.3
<b>EX</b>	Foto Var. A	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Foto Var. B	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

\* Mittelwerte aus vier Wiederholungsmessungen

## A7: Fortsetzung

T50		1996:												
		4.6.	19.6.	25.6.	3.7.	10.7.	16.7.	23.7.	24.7.	31.7.	4.8.	14.8.	27.8.	9.10.
Perkolationsstabilität [g / 10 min]	oben *	83.4	94.9	93.0	100.1	50.3	n.a.	129.3	n.a.	87.7	83.4	48.9	42.3	35.3
	mitte *	75.4	135.0	123.9	77.4	55.8	n.a.	137.5	n.a.	103.3	100.2	43.8	56.0	37.5
	unten *	52.9	105.2	97.6	59.8	45.4	n.a.	95.3	n.a.	60.5	116.1	44.9	32.2	40.3
	Mittel	70.5	111.7	104.8	79.1	50.5	-	120.7	-	83.8	99.9	45.9	43.5	37.7
	SD	15.8	20.8	16.6	20.2	5.2	-	22.4	-	21.6	16.4	2.7	11.9	2.5
	VK	22.4	18.6	15.9	25.6	10.3	-	18.5	-	25.8	16.4	5.9	27.4	6.6
Scherwiderstand [kg / m <sup>2</sup> ]*10 <sup>-2</sup>	oben *	n.a.	n.a.	9.138	10.345	7.759	10.172	10.172	9.138	8.966	9.655	8.103	8.793	8.793
	mitte *	n.a.	n.a.	9.828	8.966	7.586	10.172	9.655	7.759	10.000	10.345	7.586	7.414	8.966
	unten *	n.a.	n.a.	11.494	9.379	8.621	9.310	9.828	9.483	11.069	9.655	8.276	8.793	8.793
	Mittel	-	-	10.153	9.563	7.989	9.885	9.885	8.793	10.011	9.885	7.989	8.333	8.851
	SD	-	-	1.211	0.708	0.554	0.498	0.263	0.912	1.052	0.398	0.359	0.796	0.100
	VK	-	-	11.932	7.401	6.938	5.035	2.664	10.375	10.506	4.028	4.493	9.556	1.125
Rauhigkeitsindex	links	0.14	0.20	0.15	0.15	n.a.	0.12	n.a.	n.a.	0.08	0.06	n.a.	0.08	0.09
	rechts	0.23	0.25	0.20	0.18	n.a.	0.14	n.a.	n.a.	0.10	0.11	n.a.	0.11	0.08
	mitte	0.24	0.20	0.18	0.17	n.a.	0.15	n.a.	n.a.	0.11	0.11	n.a.	0.09	0.07
	Mittel	0.20	0.22	0.18	0.17	-	0.14	-	-	0.10	0.09	-	0.09	0.08
	SD	0.06	0.03	0.03	0.01	-	0.01	-	-	0.02	0.03	-	0.02	0.01
	VK	28.88	13.06	15.66	8.51	-	9.68	-	15.56	32.68	-	20.06	11.20	
Wassergehalt [%]	oben	25.6	16.0	20.0	23.4	26.5	n.a.	14.2	n.a.	18.0	24.2	26.4	25.6	25.0
	mitte	26.0	16.4	20.6	25.3	27.2	n.a.	11.0	n.a.	20.3	25.4	25.9	25.0	24.9
	unten	25.9	13.1	20.4	24.0	26.4	n.a.	13.7	n.a.	18.0	24.4	25.4	25.5	25.7
	Mittel	25.9	15.2	20.3	24.2	26.7	-	13.0	-	18.8	24.7	25.9	25.4	25.2
	SD	0.2	1.8	0.3	1.0	0.4	-	1.7	-	1.3	0.6	0.5	0.3	0.5
	VK	0.7	12.1	1.6	4.1	1.6	-	13.0	-	7.1	2.5	1.9	1.1	1.8
pH (H2O)	oben	7.8	8.0	7.9	7.6	7.6	n.a.	7.7	n.a.	7.8	8.0	7.9	7.9	7.9
	mitte	7.7	7.9	7.7	7.6	7.7	n.a.	7.7	n.a.	7.7	8.0	7.9	7.8	7.9
	unten	7.7	7.8	7.7	7.6	7.6	n.a.	7.7	n.a.	7.7	8.0	7.9	7.8	7.9
	Mittel	7.7	7.9	7.8	7.6	7.6	-	7.7	-	7.8	8.0	7.9	7.8	7.9
	SD	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	VK	0.5	1.0	1.5	0.3	0.3	-	0.2	-	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5
pH (KCl)	oben	6.7	7.0	7.0	6.9	6.8	n.a.	6.8	n.a.	6.8	6.9	6.8	6.9	7.0
	mitte	6.7	6.9	6.7	6.8	6.8	n.a.	6.8	n.a.	6.8	6.9	6.8	6.9	7.0
	unten	6.7	6.8	6.7	6.8	6.8	n.a.	6.8	n.a.	6.8	6.9	6.7	6.9	7.0
	Mittel	6.7	6.9	6.8	6.8	6.8	-	6.8	-	6.8	6.9	6.8	6.9	7.0
	SD	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	VK	0.1	1.9	2.6	0.7	0.1	-	0.3	-	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3
EX	Foto Var. A	11.00	11.00	15.40	15.40	18.55	19.80	15.40	16.04	11.00	11.00	28.58	38.35	33.59
	Foto Var. B	11.00	12.60	15.40	16.54	18.55	18.20	15.40	14.21	11.00	17.39	32.13	36.62	33.59

\* Mittelwerte aus vier Wiederholungsmessungen

T50		1997:													
		12.5.	27.5.	2.6.	9.6.	16.6.	23.6.	30.6.	10.7.	21.7.	30.7.	5.8.	20.8.	3.9.	27.9.
Perkolationsstabilität [g / 10 min]	oben *	69.3	56.7	n.a.	26.2	44.4	59.1	n.a.	73.5	52.4	n.a.	44.5	68.2	46.0	n.a.
	mitte *	46.9	51.4	n.a.	30.6	78.2	60.6	n.a.	65.0	47.2	n.a.	56.3	69.4	41.3	n.a.
	unten *	41.8	53.8	n.a.	32.7	57.4	45.5	n.a.	62.7	53.8	n.a.	46.1	82.7	39.7	n.a.
	Mittel	52.7	54.0	-	29.8	60.0	55.1	-	67.1	51.1	-	48.9	73.4	42.3	-
	SD	14.6	2.6	-	3.3	17.1	8.3	-	5.7	3.5	-	6.4	8.1	3.3	-
	VK [%]	27.8	4.9	-	11.1	28.4	15.1	-	8.4	6.8	-	13.1	11.0	7.8	-
Scherwiderstand [kg / m <sup>2</sup> ]*10 <sup>-2</sup>	oben *	5.17	n.a.	4.83	6.03	7.24	7.41	n.a.	8.45	9.48	n.a.	2.76	3.97	5.17	n.a.
	mitte *	4.48	n.a.	5.00	6.03	7.41	7.41	n.a.	8.45	8.10	n.a.	3.31	3.62	5.17	n.a.
	unten *	4.31	n.a.	4.31	6.55	7.07	7.76	n.a.	7.76	8.28	n.a.	4.66	3.97	5.17	n.a.
	Mittel	4.66	-	4.71	6.21	7.24	7.53	-	8.22	8.62	-	3.57	3.85	5.17	-
	SD	0.46	-	0.36	0.30	0.17	0.20	-	0.40	0.75	-	0.98	0.20	0.00	-
	VK [%]	9.80	-	7.62	4.81	2.38	2.64	-	4.84	8.72	-	27.29	5.17	0.00	-
Rauhigkeitsindex	links	-	n.a.	n.a.	0.21	0.17	0.13	0.11	0.10	0.10	0.12	0.10	0.09	0.09	n.a.
	rechts	-	n.a.	n.a.	0.19	0.14	0.14	0.11	0.08	0.08	0.06	0.09	0.12	0.12	n.a.
	mitte	-	n.a.	n.a.	0.30	0.19	0.15	0.15	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.06	n.a.
	Mittel	-	-	-	0.23	0.17	0.14	0.12	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	-
	SD	-	-	-	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	-
	VK [%]	-	-	-	24.50	16.49	7.16	17.86	18.07	13.58	32.95	7.58	16.24	33.20	-
Wassergehalt [%]	oben	23.0	21.5	17.3	24.9	17.1	25.4	n.a.	15.4	24.5	n.a.	18.8	19.0	26.0	n.a.
	mitte	23.6	22.9	18.0	24.9	15.8	25.1	n.a.	14.4	25.2	n.a.	17.1	17.0	26.2	n.a.
	unten	23.3	23.5	15.1	25.3	17.5	25.6	n.a.	14.8	24.3	n.a.	27.8	19.9	26.0	n.a.
	Mittel	23.3	22.6	16.8	25.0	16.8	25.4	-	14.9	24.7	-	21.2	18.6	26.1	-
	SD	0.3	1.0	1.5	0.2	0.9	0.2	-	0.5	0.5	-	5.8	1.5	0.1	-
	VK [%]	1.4	4.5	9.0	0.9	5.4	0.9	-	3.3	2.0	-	27.2	7.9	0.5	-
pH (H2O)	oben	7.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	8.1
	mitte	7.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.9
	unten	7.7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.9
	Mittel	7.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.9
	SD	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
	VK [%]	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3	
pH (KCl)	oben	6.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.1
	mitte	6.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.1
	unten	6.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.1
	Mittel	6.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.1
	SD	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
	VK [%]	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	
EX	Foto Var. A	11.00	n.a.	n.a.	11.00	14.15	15.40	14.15	12.41	22.95	22.95	22.95	11.00	14.76	-
	Foto Var. B	11.00	n.a.	n.a.	12.14	14.15	15.40	14.15	16.24	22.95	22.95	18.60	12.37	14.76	-

\* Mittelwerte aus vier Wiederholungsmessungen

A8: Detaillierte Kennwerte der physikalischen und chemischen Bodenmessungen auf der Erosionstestparzelle T1 von 1995 bis 1996.

T1		1995:										1996:													
		9.5.	30.5.	20.6.	4.7.	11.7.	21.7.	25.7.	8.8.	15.8.	31.8.	3.10.	4.6.	18.6.	25.6.	3.7.	9.7.	16.7.	23.7.	30.7.	4.8.	27.8.	1.10.		
Perkolations- stabilität [g / 10 min]	P1 oben *	n.a.	45.79	36.4	47.35	93.49	95.88	80.00	n.a.	53.87	50.96	60.32	47.42	65.85	68.81	n.a.	50.18	n.a.	87.46	124.31	69.39	39.96	53.09	63.09	
	P1 unten *	n.a.	n.a.	59.48	41.61	66.17	84.84	57.24	n.a.	42.00	28.77	51.90	35.04	51.21	44.23	n.a.	33.77	n.a.	n.a.	n.a.	60.23	28.18	47.14		
	Mittel	-	45.79	47.94	44.48	79.83	90.36	68.62	-	47.84	39.87	56.11	41.23	58.53	56.52	-	41.97	-	87.46	124.31	64.81	34.07	50.11		
	SD	-	-	16.32	4.059	19.32	7.806	16.09	-	8.252	15.69	5.954	8.75	10.35	17.38	-	11.60	-	-	-	6.48	8.33	4.21		
	VK	-	-	34.04	9.125	24.2	8.639	23.45	-	17.25	39.36	10.61	21.23	17.68	30.75	-	27.65	-	-	-	10.00	24.45	8.39		
	P2 oben *	n.a.	69.53	110.00	113.23	201.67	280.76	71.23	n.a.	123.16	141.85	134.36	114.88	182.69	123.87	n.a.	110.78	n.a.	208.79	322.33	215.81	64.01	123.13		
	P2 unten *	n.a.	-	105.05	90.98	157.13	235.89	128.23	n.a.	62.62	49.92	94.45	73.51	139.55	99.49	n.a.	60.19	n.a.	n.a.	n.a.	203.69	55.33	83.14		
	Mittel	-	69.53	107.53	102.11	179.40	258.33	99.73	-	92.89	95.89	114.41	94.19	161.12	111.68	-	85.49	-	208.79	322.33	209.75	59.67	103.14		
	SD	-	-	3.50	15.73	31.49	31.73	40.31	-	42.81	65.00	28.22	29.25	30.50	17.24	-	35.77	-	-	-	8.57	6.14	28.28		
	VK	-	-	3.26	15.41	17.56	12.29	40.41	-	48.08	67.79	24.67	31.06	18.93	15.44	-	41.85	-	-	-	4.09	10.29	27.42		
	P3 oben *	n.a.	43.55	63.58	67.15	101.90	96.75	84.47	n.a.	66.86	73.52	65.65	56.21	101.74	61.82	n.a.	62.27	n.a.	101.50	160.89	87.05	46.53	78.17		
	P3 unten *	n.a.	-	58.60	51.12	98.55	95.62	51.53	n.a.	57.14	48.37	62.91	51.65	64.12	48.85	n.a.	47.63	n.a.	n.a.	n.a.	68.53	37.03	63.71		
Mittel	-	43.55	61.09	59.13	100.23	96.18	68.00	-	62.00	60.94	64.28	53.93	82.93	55.34	-	54.95	-	101.50	160.89	77.79	41.78	70.94			
SD	-	-	3.52	11.33	2.37	0.80	23.29	-	6.87	17.78	1.94	3.23	26.60	9.17	-	10.36	-	-	-	13.09	6.72	10.22			
VK	-	-	5.77	19.17	2.36	0.83	34.26	-	11.09	29.18	3.02	5.99	32.08	16.58	-	18.85	-	-	-	16.83	16.07	14.41			
Scher- widerstand [kg / m <sup>2</sup> * 10 <sup>2</sup> ]	P1 oben *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7.59	5.52	7.82	7.76	8.62	8.10	9.66	7.59	7.07		
	P1 unten *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	10.57	9.66	8.51	11.21	12.07	9.83	11.38	8.28	7.59	
	Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.07	9.61	8.76	11.21	12.07	9.83	11.38	8.28	7.59	
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
	VK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.11	2.93	0.49	2.44	2.44	1.22	1.22	0.49	0.37	
	P2 oben *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	9.66	8.97	10.11	8.45	9.79	8.45	10.86	7.41	7.92	
	P2 unten *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	12.41	8.97	9.66	9.31	10.69	10.52	11.03	6.21	8.28	
	Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.03	8.97	9.89	8.88	9.74	8.88	10.95	6.81	7.76	
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.95	0.00	0.33	0.61	1.34	2.32	0.12	0.85	0.73	
	VK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.68	0.00	3.29	6.87	13.77	26.09	1.11	12.53	9.43	
	P3 oben *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	8.05	4.60	6.90	7.76	9.66	7.76	10.00	7.24	6.38	
	P3 unten *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	9.43	5.29	8.28	8.28	12.41	11.55	12.76	7.59	8.45	
Mittel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.74	4.94	7.59	8.02	11.03	9.66	11.38	7.41	7.41		
SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.98	0.49	0.98	0.37	1.95	2.68	1.95	0.24	1.46		
VK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.16	9.87	12.86	4.56	17.68	27.78	17.14	3.29	19.73		
Rauigkeits- index	P1 links *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.18	n.a.	0.16	n.a.	0.15	0.09	0.19	0.18	0.23		
	P1 mitte *	0.06	0.08	0.08	0.02	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	n.a.	n.a.	0.12	n.a.	0.13	n.a.	0.14	0.08	0.14	0.14	0.16		
	P1 rechts *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.13	n.a.	-	n.a.	0.14	0.08	0.14	0.20	0.18		
	Mittel	-	0.06	0.08	0.08	0.02	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-	-	0.14	-	0.15	-	0.14	0.08	0.15	0.17	0.19	
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	0.02	-	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	
	VK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.14	-	15.87	-	4.57	8.62	20.23	16.27	19.92	
	P2 links *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.13	n.a.	0.18	n.a.	0.16	0.13	0.20	0.20	0.19		
	P2 mitte *	0.03	0.10	0.09	0.04	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.05	0.04	n.a.	n.a.	0.10	n.a.	0.10	n.a.	0.12	0.11	0.14	0.14	0.21		
	P2 rechts *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.11	n.a.	0.11	n.a.	0.16	0.00	0.16	0.17	0.19		
	Mittel	-	0.03	0.10	0.09	0.04	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07	0.05	0.04	-	-	0.12	-	0.13	-	0.15	0.08	0.17	0.17	0.20	
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	0.04	-	0.02	0.07	0.03	0.03	0.01	
	VK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.29	-	32.38	-	16.88	87.42	18.55	20.11	6.32	
P3 links *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.20	n.a.	0.16	n.a.	0.12	0.17	0.15	0.16	0.15			
P3 mitte *	0.09	0.15	0.10	0.04	0.06	0.06	0.03	0.07	0.02	0.02	0.02	n.a.	n.a.	0.18	n.a.	0.14	n.a.	0.20	0.22	0.22	0.14	0.20			
P3 rechts *	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.18	n.a.	0.18	n.a.	0.18	0.21	0.15	0.16	0.20			
Mittel	-	0.09	0.15	0.10	0.04	0.06	0.06	0.03	0.07	0.02	0.02	0.02	-	-	0.19	-	0.16	-	0.17	0.20	0.17	0.15	0.18		
SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.02	-	0.04	0.03	0.04	0.01	0.03		
VK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.80	-	12.87	-	22.98	13.58	23.42	6.59	15.47		
Wasser- gehalt [%]	P1 oben *	n.a.	n.a.	17.917	18.104	13.753	15.451	n.a.	n.a.	19.551	18.58	19.751	21.50	12.47	17.73	n.a.	22.63	16.78	9.44	11.40	20.25	20.41	15.26		
	P1 unten *	n.a.	n.a.	19.071	17.711	12.905	12.155	n.a.	n.a.	19.32	19.243	18.77	20.90	11.36	17.79	n.a.	23.77	15.08	-	-	18.52	19.76	14.78		
	Mittel	-	-	18.49	17.91	13.28	13.90	-	-	19.43	16.91	19.26	21.20	11.92	17.76	-	23.20	15.93	9.44	11.40	19.39	20.09	15.02		
	SD	-	-	0.82	0.28	0.67	2.33	-	-	0.16	0.47	0.69	0.42	0.78	0.04	-	0.81	1.20	-	-	1.22	0.46	0.34		
	VK	-	-	4.41	1.55	5.05	16.88	-	-	8.5	2.48	3.60	2.00	6.59	0.24	-	3.47	7.55	-	-	6.31	2.29	2.26		
	P2 oben *	n.a.	n.a.	19.01	19.111	17.478	13.689	n.a.	n.a.	20.224	21.686	20.609	23.25	15.64	21.04	n.a.	23.86	17.52	11.85	13.66	22.03	21.83	20.86		
	P2 unten *	n.a.	n.a.	18.987	18.105	12.284	12.621	n.a.	n.a.	19.577	20.688	19.084	21.22	13.82	18.64	n.a.	21.82	17.72	-	-	20.98	21.61	16.15		
	Mittel	-	-	19.00	18.61	14.88	13.15	-	-	19.90	21.19	1													

## A9: Bearbeitung auf den Landwirtschaftspartellen während der Untersuchungsperiode

### GT

#### Standort 1 Winterweizen (VF: Mais)

30.8.-6.10.95 Häckseln-Pflügen-Kreiselegge&Säen  
 27.10.1995 FK-Einbau  
 2.11.1995 Splashgeräteeinbau  
 30.3.1996 FK- und Splashgeräte-Abbau

#### Standort 2 Mais (VF: Klee gras)

20.5.1996 Pflug-Egge-Saat  
 3.6.1996 FK- und Splashgeräte-Einbau  
 24.6.1996 Düngen, Spritzen Fahrspur  
 11.7.1996 Hacken  
 26.8.1996 Splashabbau  
 30.9.1996 Feldkastenausbau

#### Standort 2 Winterweizen (VF: Mais)

15.-16.10.96 Häcksler-Grubber-Kreiselegge-Sämaschine  
 4.11.1996 Feldkasteneinbau  
 28.4.1997 Düngen (Fahrspur)  
 5.5.1997 Feldkastenausbau

### JB

#### Standort 1 Winterweizen (VF: Mais)

13.-27.10.95 Häcksler (1R)-Gülle-Pflug-2xFräsen (Kreiselegge)-Saat  
 3.11.1995 FK-Einbau  
 9.11.1995 Splashgeräte-Einbau  
 31.1.1996 Mist  
 4.4.1996 Striegeln  
 29.4.1996 FK- und Splashgeräte abgebaut

#### Standort 2 Mais (VF: Winterweizen, Klee gras)

30.-31.5.96 Pflug-Kreiselegge-Saat-Gülle-Walzen  
 6.6.1996 FK- und Splashgeräte-Einbau  
 4.7.1996 Hacken und Häufeln (Hackfräse)  
 26.8.1996 Splashabbau  
 30.9.1996 Feldkastenabbau

#### Standort 2 Winterweizen (VF: Mais)

4.10.-4.11.96 Ernte (Häcksler)-Pflug-2xKreiselegge-Säen  
 21.11.1996 Feldkasteneinbau  
 27.1.1997 Mist  
 30.3.2000 Striegeln, Jauche  
 5.5.1997 Feldkastenausbau

### JD/ND

#### Standort 1 Triticale (Vorfrucht Rüpse und Winterweizen)

12.-15.10.95 Pflügen-Fräsen (Rototiller)-Säen  
 20.10.1995 FK-Einbau  
 1.11.1995 Splashgeräte-Einbau  
 1.4.1996 Düngen mit Güllenschlauch  
 16.4.1996 Herbizid  
 4.5.1996 Düngergabe  
 8.5.1996 FK- und Splashgeräteabbau

#### Standort 2 Mais (VF: über 5-jährige Naturwiese)

5.-8.6.96 Pflug-Fräse (Zinggenrotor mit Schaufel)-Saat-Walze  
 10.6.1996 FK- und Splashgeräte-Einbau  
 14.8.1996 Hacken und Dünger  
 25.8.1996 Düngergabe  
 27.8.1996 Splashabbau  
 2.10.1996 Feldkastenabbau

#### Standort 2 Winterweizen (VF: Mais)

Schneiden-Häckseln-Grubbern-Fräsen (Zinggenrotor)-Säer  
 18.11.1996 Feldkasteneinbau  
 28.4.1997 Düngergabe  
 12.5.1997 Feldkastenausbau

### BM

#### Standort 1 Winterweizen (VF: Mais)

6.-18.10.95 Vollernter (4R) Grubber-Pflug-Kreiselegge-Saat  
 20.10.1995 Feldkasteneinbau  
 2.11.1995 Splashgeräteeinbau  
 12.3.1996 Düngergabe  
 21.3.1996 Striegeln  
 19.4.1996 Düngergabe  
 29.4.1996 FK- und Splashgeräteabbau

#### Standort 2 Mais (VF: Kunstwiese)

8.-10.6.96 Pflug-Egge-Saat (mit Bandspritzung)  
 13.6.1996 FK- und Splashgeräte-Einbau  
 24.6.1996 Trichogramma (von Hand)  
 8.8.1996 Hacken, Spritzen  
 12.8.1996 Hacken  
 26.8.1996 Splashabbau  
 30.9.1996 Feldkastenausbau

#### Standort 3 Winterweizen (VF: Mais mit Direktsaat)

10.10.-23.11. Ernte (Häckseln 4R)-Pflügen-Eggen (Kreisel)-Säen  
 2.12.1996 Feldkasteneinbau  
 2.4.1996 Düngergabe  
 28.4.1996 Düngergabe  
 5.5.1997 Feldkastenausbau





**A10.2: Detaillierte Kennwerte der physikalischen und chemischen Bodenmessungen auf den Landwirtschaftsparzelle Münchenstein**

BM	Standort 1 WW 1996 / 96					Standort 2 Mais 1996										Standort 3 WW 1996 / 97					
	1995:		1996:			1996:		1996:		1996:		1996:		1996:		1996:		1997:		1997:	
<b>Perkolationsstabilität</b>	Mittel*	326,76	216,10	295,74	279,36	527,84	278,57	220,75	n.a.	440,27	590,96	331,94	165,25	n.a.	93,47	153,01	772,98	631,33	494,26	732,51	401,80
	SD	55,21	36,60	12,71	9,82	42,62	46,19	17,26	-	-	-	26,36	-	-	16,78	10,97	122,39	20,69	16,21	30,50	64,67
	[g / 10 min]	VK [%]	16,90	16,94	4,30	3,51	8,08	16,58	7,82	-	-	7,94	-	-	10,97	15,83	15,83	3,28	3,28	4,16	16,09
<b>Scherwiderstand</b>	Mittel*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	8,74	7,78	5,17	7,26	0,03	0,53	0,33	0,49	0,74	0,29	9,16	n.a.	6,21	7,03	8,33
	SD	-	-	-	-	-	0,33	0,82	0,24	0,03	0,53	0,33	0,49	0,74	0,29	7,76	0,42	-	0,72	0,22	0,77
	[kg / m <sup>2</sup> ·10 <sup>-2</sup> ]	VK [%]	-	-	-	-	3,72	10,54	4,71	0,45	5,65	3,21	5,89	9,43	3,83	100,00	4,56	-	11,66	3,14	9,19
<b>Wasser-gehalt</b>	Mittel**	21,09	25,51	23,20	17,74	12,25	25,53	26,44	n.a.	13,87	11,93	23,16	27,09	n.a.	28,48	25,85	33,52	31,10	30,13	29,38	26,34
	SD	1,26	0,31	0,60	0,32	3,03	0,10	0,45	-	-	-	0,54	-	-	1,12	1,18	1,18	1,97	0,32	0,17	0,09
	[%]	VK [%]	5,97	1,22	2,59	1,80	24,73	0,39	1,70	-	-	2,33	-	-	4,33	3,52	6,33	6,33	1,06	0,58	0,34
<b>pH (H2O)</b>	Mittel**	7,17	7,21	7,33	7,01	6,85	6,91	6,81	n.a.	6,88	6,67	6,82	6,80	n.a.	6,66	6,76	7,04	n.a.	n.a.	n.a.	6,41
	SD	0,16	0,05	0,03	0,10	0,15	0,21	0,09	-	-	-	0,05	-	-	0,07	0,17	-	-	-	-	0,19
	[pH]	VK [%]	2,23	0,69	0,41	1,43	2,19	3,04	1,32	-	-	0,73	-	-	1,04	2,41	-	-	-	-	2,96
<b>pH (KCl)</b>	Mittel**	6,32	6,18	6,09	6,10	5,74	5,90	5,88	n.a.	5,80	5,58	5,67	5,69	n.a.	5,77	5,74	5,93	n.a.	n.a.	n.a.	5,58
	SD	0,22	0,09	0,09	0,10	0,09	0,13	0,07	-	-	-	0,10	-	-	0,03	0,24	-	-	-	-	0,21
	[pH]	VK [%]	3,48	1,46	1,48	1,64	1,57	2,20	1,19	-	-	1,76	-	-	0,52	4,05	-	-	-	-	3,76
<b>EX ***</b>	Foto Var. A	0,00	5,87	14,83	0,00	0,00	10,00	9,50	9,00	9,00	9,00	7,50	n.a.	6,79	9,50	n.a.	3,15	11,00	11,00	11,00	n.a.
	Foto Var. B	2,14	5,87	13,76	0,00	4,00	10,00	9,50	9,00	9,00	9,00	7,50	n.a.	7,87	9,50	n.a.	6,00	11,00	11,00	11,00	n.a.
	[h/ha]	GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,026	0,000	0,182	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
<b>Abtrag ***</b>	[t/ha]	GE	0,10	0,50	0,10	0,10	0,10	0,80	0,00	0,00	0,05	1,15	0,90	0,05	0,55	0,00	0,20	0,20	0,40	0,25	0,25
<b>Splash ***</b>	[l/ha]	GE	1,61	3,88	0,64	0,64	0,19	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,38	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

\* Mittelwert aus 5 resp. 3 Standort-Mittelwerten (aus 4 Messwiederholungen)

\*\* Mittelwert aus 5 Standorten (ohne Messwiederholungen)

Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient beziehen sich auf die Standorte und nicht auf die Messwiederholungen!

\*\*\* In dieser Tabelle ist nur ein Teil der Messresultate ist aufgeführt. Für die Grafiken und statistischen Berechnungen wurden alle Daten berücksichtigt.

n.a. = nicht analysiert

GE = Geräteeinbau

**A10.3: Detaillierte Kennwerte der physikalischen und chemischen Bodenmessungen auf den Landwirtschaftsparzelle Basel**

JB	Standort 1 WW 1995 / 96				Standort 2 Mais 1996												Standort 2 WW 1996 / 97						
	1995:	23.11.	9.3.	29.4.	6.6.	24.6.	1.7.	11.7.	15.7.	22.7.	25.7.	5.8.	12.8.	19.8.	26.8.	30.9.	21.11.	9.12.	27.1.	1997:	28.2.	28.4.	
<b>Partikulationsstabilität</b>	Mittel*	218.67	247.51	272.15	458.22	814.90	552.17	729.17	692.41	n.a.	1097.78	1207.31	709.04	670.66	n.a.	104.22	181.17	676.75	294.16	570.90	567.25	496.87	175.38
	SD	63.80	12.25	21.00	14.18	32.51	52.90	43.49	25.94	-	-	-	164.83	-	-	21.43	45.73	236.52	132.37	152.12	120.54	175.38	35.30
[g / 10 ml]	VK [%]	32.88	12.19	11.75	8.09	32.51	52.90	43.49	25.94	-	-	-	23.25	-	-	20.56	25.24	34.95	45.00	26.64	21.25	35.30	13.05
<b>Schwermetallestand "Fläche"</b>	Mittel*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	8.81	10.04	14.02	12.87	11.21	16.78	14.41	10.86	10.52	11.44	9.83	10.86	12.18	n.a.	15.11	13.05	2.26
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	1.56	0.95	0.61	1.56	0.43	0.20	0.85	0.26	0.51	0.33	-	1.67	2.26	17.31
[kg / m <sup>2</sup> * 10 <sup>-2</sup> ]	VK [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	11.16	7.38	5.40	11.44	10.86	4.00	1.89	7.43	2.68	4.67	2.67	-	11.03	17.31
<b>Schwermetallestand "Walm"</b>	Mittel*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	6.36	8.85	9.02	11.55	9.08	7.01	6.61	6.32	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	1.56	0.95	0.61	1.92	1.56	0.43	0.20	0.85	0.26	-	-	-	-	-
[kg / m <sup>2</sup> * 10 <sup>-2</sup> ]	VK [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	11.16	7.38	5.40	11.44	10.86	4.00	1.89	7.43	2.68	-	-	-	-	-
<b>Wasser-gehalt</b>	Mittel**	22.68	22.18	20.85	15.56	18.36	21.01	16.68	23.44	16.11	5.44	8.30	20.23	21.52	19.90	22.39	n.a.	24.73	23.79	26.06	23.26	23.11	1.03
	SD	1.15	1.22	0.53	6.43	2.53	0.92	1.11	0.37	-	-	1.62	17.23	5.76	2.84	12.87	4.17	0.59	1.00	0.56	0.34	1.03	4.46
[%]	VK	7.89	7.70	7.82	7.68	6.91	6.67	6.78	6.88	n.a.	6.76	6.67	6.84	6.89	n.a.	6.79	7.04	6.85	n.a.	n.a.	n.a.	6.80	4.46
<b>pH (H2O)</b>	Mittel**	7.89	7.70	7.82	7.68	6.91	6.67	6.78	6.88	n.a.	6.76	6.67	6.84	6.89	n.a.	6.79	7.04	6.85	n.a.	n.a.	n.a.	6.80	4.46
	SD	0.04	0.10	0.09	0.14	0.07	0.12	0.09	0.04	-	-	0.06	-	-	-	0.05	0.05	0.11	-	-	-	0.09	0.09
	VK [%]	0.51	1.30	1.15	1.82	1.01	1.80	1.33	0.58	-	-	0.88	-	-	-	0.74	0.71	1.61	-	-	-	1.32	1.32
<b>pH (KCl)</b>	Mittel**	6.77	6.71	6.67	6.78	5.79	5.98	5.94	5.81	n.a.	5.67	5.72	5.71	5.67	n.a.	5.77	5.91	5.81	n.a.	n.a.	n.a.	5.91	5.91
	SD	0.07	0.06	0.06	0.13	0.16	0.16	0.17	0.06	-	-	-	0.09	-	-	0.12	0.01	0.07	-	-	-	0.35	0.35
	VK [%]	1.03	0.89	0.90	1.92	2.76	2.68	2.86	1.03	-	-	-	1.58	-	-	2.08	0.17	1.20	-	-	-	5.92	5.92
<b>EX ***</b>	Foto Var. A	0.00	11.53	18.73	0.00	10.76	15.59	18.56	18.04	20.07	20.07	20.07	20.07	20.07	20.07	20.07	33.80	n.a.	28.60	28.60	n.a.	28.60	0.00
	Foto Var. B	3.55	11.53	18.73	0.00	12.02	15.59	18.56	18.04	20.07	20.07	24.30	32.20	n.a.	28.60	28.60	n.a.	20.44	24.15	12.06	12.06	8.35	0.00
	GE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.630	0.037	0.000	0.792	0.000	0.000	0.000	0.361	0.000	0.002	0.002
<b>Abtrag ***</b>	[µm]	1.50	12.50	0.10	0.10	0.80	0.80	0.30	1.70	0.00	0.00	0.05	9.00	0.25	0.00	5.75	0.00	0.00	0.00	15.00	1.00	0.35	0.35
<b>Abluss ***</b>	[l/ha]	0.52	1.80	0.27	0.27	0.85	0.85	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	3.52	0.58	0.00	1.95	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
<b>Splash ***</b>	[l/ha]	0.52	1.80	0.27	0.27	0.85	0.85	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	3.52	0.58	0.00	1.95	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

\*\* Mittelwert aus 5 Standorten (ohne Messwiderholungen)  
 \*\*\* In dieser Tabelle ist nur ein Teil der Messresultate ist aufgeführt. Für die Grafiken und statistischen Berechnungen wurden alle Daten berücksichtigt.  
 n.a. = nicht analysiert  
 GE = Geräteeinbau



**A11: Detaillierte Kennwerte der Erodierbarkeitsmessungen mit der Fotomethode auf allen Messstandorten**

T50		T1			Landwirtschaft									
		P1	P2	P3	GT		BM		JB		JD-ND			
					27. Okt 95	1.68	20. Okt 95	2.14	3. Nov 95	3.55	20. Okt 95	0.00		
					23. Nov 95	5.46	23. Nov 95	5.87	23. Nov 95	11.53	12. Nov 95	4.41		
							7. Dez 95	7.51	7. Dez 95	11.51	23. Nov 95	14.88		
					4. Jan 96	5.46	4. Jan 96	10.96	4. Jan 96	14.48				
					31. Jan 96	5.46	31. Jan 96	13.04	31. Jan 96	16.94	10. Jan 96	25.80		
							9. Mär 96	13.76	9. Mär 96	18.73	13. Mär 96	27.42		
							30. Mär 96	7.56	30. Mär 96	12.06	20. Mär 96	15.14		
							29. Apr 96	0.00	29. Apr 96	0.00	8. Mai 96	0.00		
4. Jun 96	11.00	4. Jun 96	11.00	26.09	3. Jun 96	0.00			6. Jun 96	12.02				
10. Jun 96	11.00	12. Jun 96	13.51	25.45			13. Jun 96	4.00			10. Jun 96	0.00		
19. Jun 96	12.60	18. Jun 96	17.62	25.45	17. Jun 96	0.00			17. Jun 96	14.85	19. Jun 96	2.97		
25. Jun 96	15.40	25. Jun 96	26.19	26.09	24. Jun 96	1.60	24. Jun 96	10.00	24. Jun 96	15.59	25. Jun 96	8.46		
3. Jul 96	16.54	3. Jul 96	28.60	27.96	1. Jul 96	6.00	1. Jul 96	10.00	1. Jul 96	18.56	3. Jul 96	10.00		
10. Jul 96	18.55	9. Jul 96	29.85	27.96	11. Jul 96	8.80	11. Jul 96	9.50	11. Jul 96	18.04	10. Jul 96	9.50		
16. Jul 96	18.20	16. Jul 96	31.75	29.85	15. Jul 96	7.70	15. Jul 96	9.00	16. Jul 96	20.07	16. Jul 96	9.50		
23. Jul 96	15.40	23. Jul 96	31.75	29.85	22. Jul 96	7.70	22. Jul 96	9.00	22. Jul 96	20.07	23. Jul 96	9.00		
24. Jul 96	14.21				25. Jul 96	7.70	25. Jul 96	9.00	25. Jul 96	24.30	31. Jul 96	9.00		
31. Jul 96	11.00	30. Jul 96	31.75	29.85										
4. Aug 96	17.39	4. Aug 96	29.85	28.60	5. Aug 96	6.60	5. Aug 96	7.50	5. Aug 96	32.20	4. Aug 96	9.00		
14. Aug 96	32.13						19. Aug 96	7.87	19. Aug 96	28.60	27. Aug 96	9.00		
27. Aug 96	36.62	27. Aug 96	28.49	24.94			26. Aug 96	9.50	26. Aug 96	28.60				
9. Okt 96	33.59	1. Okt 96	26.09	18.55										
					4. Nov 96	7.54								
					11. Nov 96	8.80								
					25. Nov 96	10.45			21. Nov 96	21.58	18. Nov 96	10.00		
					2. Dez 96	9.90	2. Dez 96	6.00	2. Dez 96	24.15	5. Dez 96	10.00		
					9. Dez 96	9.90	16. Dez 96	11.00	9. Dez 96	20.43	16. Dez 96	10.00		
					27. Jan 97	9.35	27. Jan 97	11.00	27. Jan 97	12.06	3. Feb 97	10.00		
					17. Feb 97	8.80	17. Feb 97	11.00	17. Feb 97	12.06				
							28. Feb 97	11.00	28. Feb 97	8.35	28. Feb 97	10.00		
							2. Apr 97	9.35	2. Apr 97	0.00	2. Apr 97	9.00		
									28. Apr 97	0.00	28. Apr 97	7.00		
12. Mai 97	11.00													
9. Jun 97	12.14													
16. Jun 97	14.15													
23. Jun 97	15.40													
30. Jun 97	14.15													
11. Jul 97	16.24													
21. Jul 97	22.95													
30. Jul 97	22.95													
5. Aug 97	18.60													
20. Aug 97	12.37													
3. Sept 97	14.76													

A12: Hilfstabelle mit den Prozentwerten für die Beobachtungen bei der Fotomethode

Anzahl Feld mit einem Merkmal	Vegetation															
	0 %	5 %	10 %	15 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %	
1	2.9	2.7	2.6	2.4	1.0	2.3	2.1	2.0	1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	1.0	
2	5.7	5.4	5.1	4.9	2.0	4.6	4.3	4.0	3.7	3.4	3.1	2.9	2.6	2.3	2.0	
3	8.6	8.1	7.7	7.3	3.0	6.9	6.4	6.0	5.6	5.1	4.7	4.3	3.9	3.4	3.0	
4	11.4	10.9	10.3	9.7	4.0	9.1	8.6	8.0	7.4	6.9	6.3	5.7	5.1	4.6	4.0	
5	14.3	13.6	12.9	12.1	5.0	11.4	10.7	10.0	9.3	8.6	7.9	7.1	6.4	5.7	5.0	
6	17.1	16.3	15.4	14.6	6.0	13.7	12.9	12.0	11.1	10.3	9.4	8.6	7.7	6.9	6.0	
7	20.0	19.0	18.0	17.0	7.0	16.0	15.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	
8	22.9	21.7	20.6	19.4	8.0	18.3	17.1	16.0	14.9	13.7	12.6	11.4	10.3	9.1	8.0	
9	25.7	24.4	23.1	21.9	9.0	20.6	19.3	18.0	16.7	15.4	14.1	12.9	11.6	10.3	9.0	
10	28.6	27.1	25.7	24.3	10.0	22.9	21.4	20.0	18.6	17.1	15.7	14.3	12.9	11.4	10.0	
11	31.4	29.9	28.3	26.7	11.0	25.1	23.6	22.0	20.4	18.9	17.3	15.7	14.1	12.6	11.0	
12	34.3	32.6	30.9	29.1	12.0	27.4	25.7	24.0	22.3	20.6	18.9	17.1	15.4	13.7	12.0	
13	37.1	35.3	33.4	31.6	13.0	29.7	27.9	26.0	24.1	22.3	20.4	18.6	16.7	14.9	13.0	
14	40.0	38.0	36.0	34.0	14.0	32.0	30.0	28.0	26.0	24.0	22.0	20.0	18.0	16.0	14.0	
15	42.9	40.7	38.6	36.4	15.0	34.3	32.1	30.0	27.9	25.7	23.6	21.4	19.3	17.1	15.0	
16	45.7	43.4	41.1	38.9	16.0	36.6	34.3	32.0	29.7	27.4	25.1	22.9	20.6	18.3	16.0	
17	48.6	46.1	43.7	41.3	17.0	38.9	36.4	34.0	31.6	29.1	26.7	24.3	21.9	19.4	17.0	
18	51.4	48.9	46.3	43.7	18.0	41.1	38.6	36.0	33.4	30.9	28.3	25.7	23.1	20.6	18.0	
19	54.3	51.6	48.9	46.1	19.0	43.4	40.7	38.0	35.3	32.6	29.9	27.1	24.4	21.7	19.0	
20	57.1	54.3	51.4	48.6	20.0	45.7	42.9	40.0	37.1	34.3	31.4	28.6	25.7	22.9	20.0	
21	60.0	57.0	54.0	51.0	21.0	48.0	45.0	42.0	39.0	36.0	33.0	30.0	27.0	24.0	21.0	
22	62.9	59.7	56.6	53.4	22.0	50.3	47.1	44.0	40.9	37.7	34.6	31.4	28.3	25.1	22.0	
23	65.7	62.4	59.1	55.9	23.0	52.6	49.3	46.0	42.7	39.4	36.1	32.9	29.6	26.3	23.0	
24	68.6	65.1	61.7	58.3	24.0	54.9	51.4	48.0	44.6	41.1	37.7	34.3	30.9	27.4	24.0	
25	71.4	67.9	64.3	60.7	25.0	57.1	53.6	50.0	46.4	42.9	39.3	35.7	32.1	28.6	25.0	
26	74.3	70.6	66.9	63.1	26.0	59.4	55.7	52.0	48.3	44.6	40.9	37.1	33.4	29.7	26.0	
27	77.1	73.3	69.4	65.6	27.0	61.7	57.9	54.0	50.1	46.3	42.4	38.6	34.7	30.9	27.0	
28	80.0	76.0	72.0	68.0	28.0	64.0	60.0	56.0	52.0	48.0	44.0	40.0	36.0	32.0	28.0	
29	82.9	78.7	74.6	70.4	29.0	66.3	62.1	58.0	53.9	49.7	45.6	41.4	37.3	33.1	29.0	
30	85.7	81.4	77.1	72.9	30.0	68.6	64.3	60.0	55.7	51.4	47.1	42.9	38.6	34.3	30.0	
31	88.6	84.1	79.7	75.3	31.0	70.9	66.4	62.0	57.6	53.1	48.7	44.3	39.9	35.4	31.0	
32	91.4	86.9	82.3	77.7	32.0	73.1	68.6	64.0	59.4	54.9	50.3	45.7	41.1	36.6	32.0	
33	94.3	89.6	84.9	80.1	33.0	75.4	70.7	66.0	61.3	56.6	51.9	47.1	42.4	37.7	33.0	
34	97.1	92.3	87.4	82.6	34.0	77.7	72.9	68.0	63.1	58.3	53.4	48.6	43.7	38.9	34.0	
35	100.0	95.0	90.0	85.0	35.0	80.0	75.0	70.0	65.0	60.0	55.0	50.0	45.0	40.0	35.0	