

Inhalt

1	Einleitung und Begriffliches	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Abgrenzungsfragen	2
1.2.1	<i>Bodenerosion</i>	2
1.2.2	<i>Oberflächenabfluss – oberflächlicher Gebietsabfluss (Gerinneabfluss)</i>	2
1.2.3	<i>Schwebstoffaustrag – oberflächlicher Stoffaustrag</i>	3
1.3	Begriffliches	3
1.3.1	<i>Allgemein</i>	3
1.3.2	<i>System und Modell</i>	3
1.3.3	<i>Modelltypen</i>	4
1.3.4	<i>Verifikation / Validierung / Evaluierung von Modellen</i>	5
1.3.5	<i>Modellgleichungen / Simulationsmodelle</i>	6
1.3.6	<i>Prozessgrößen</i>	6
1.3.7	<i>On-Site / Off-Site</i>	7
2	Grundlegendes und aktueller Stand der Forschung	8
2.1	Bodenerosion durch Wasser	8
2.1.1	<i>Problemstellung</i>	8
2.1.2	<i>Forschungsmethoden</i>	10
2.1.3	<i>Rückblick auf Arbeiten am Geographischen Institut der Universität Basel</i>	14
2.2	Entwicklung von Erosionsmodellen	17
2.2.1	<i>Empirische Modellgleichungen</i>	17
2.2.2	<i>Physikalische Simulationsmodelle</i>	18
2.2.3	<i>Zusammenfassender Überblick über Modellansätze und -arten</i>	20
2.2.4	<i>Verifikation / Validierung von Erosionsmodellen</i>	21
2.3	Aktuelle landschaftsökologische Aspekte	25
2.3.1	<i>Politische Umsetzung von Boden- und Gewässerschutz</i>	25
2.3.2	<i>Aktueller Klärungsbedarf in der Schweizerischen Erosionsforschung</i>	29
3	Aufgabenstellung	31
3.1	Überblick	31
3.2	Messung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag	31
3.2.1	<i>Erosionsparzellen</i>	31
3.2.2	<i>Pegelmessungen in Kleineinzugsgebieten</i>	32
3.2.3	<i>Erosionsschadenskartierung</i>	32
3.3	Modellierung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag	32
3.3.1	<i>Einzelhang-Dimension</i>	32
3.3.2	<i>Einzugsgebiet-Dimension</i>	33
3.4	Modelle als Instrumente zur Kontrolle von Erosionsrichtwerten	34

3.4.1	<i>Validierung der Modelle im Hinblick auf einen Einsatz zur Richtwertkontrolle</i>	34
3.4.2	<i>Evaluierung von Modellen im Hinblick auf Anwendbarkeit und Leistungsumfang</i>	34
4	Material und Methodik	35
4.1	Erosionsparzellen	35
4.1.1	<i>Beschreibung der Messparzellen</i>	35
4.1.2	<i>Messung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag</i>	36
4.1.3	<i>Begleitende bodenphysikalische Messungen</i>	37
4.1.4	<i>Begleitende meteorologische Messungen</i>	38
4.2	Einzugsgebiete	38
4.2.1	<i>Beschreibung und Gegenüberstellung der Einzugsgebiete</i>	38
4.2.2	<i>Messung von oberflächlichem Gebietsabfluss und Feststoffaustrag</i>	55
4.2.3	<i>Begleitende bodenphysikalische und meteorologische Messungen</i>	58
4.2.4	<i>Beschreibung der Erosionsschadenskartierung</i>	58
4.3	Berechnung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag in Einzelhang-Dimension	59
4.3.1	<i>Kurzbeschreibung der verwendeten Modelle</i>	59
4.3.2	<i>Eingangsdaten</i>	64
4.3.3	<i>Kalibrierung und Modellapplikation</i>	68
4.4	Berechnung von Gebietsabfluss und Sedimentausttrag in Einzugsgebiet-Dimension	69
4.4.1	<i>Kurzbeschreibung der verwendeten Modelle</i>	69
4.4.2	<i>Eingangsdaten</i>	77
4.4.3	<i>Kalibrierung und Modellapplikation</i>	82
4.5	Verifikation der Modellergebnisse	83
4.5.1	<i>Quantitativer Vergleich von Mess- und Rechenwerten</i>	83
4.5.2	<i>Qualitativer Vergleich der Modellergebnisse mit Schadenskartierungen</i>	85
4.6	Validierung und Evaluierung von Modellen	85
4.6.1	<i>Modellvalidierung durch Bewertung der Modellergebnisse</i>	85
4.6.2	<i>Modellevaluierung</i>	86
5	Ergebnisse	89
5.1	Allgemeine Anmerkungen	89
5.2	Oberflächenabfluss und Bodenerosion von Erosionsmessparzellen	89
5.2.1	<i>Mess- und Simulationsergebnisse in Einzelhang-Dimension</i>	89
5.2.2	<i>Verifikation der Einzelhang-Modelle</i>	95
5.2.3	<i>Validierung der Einzelhang-Modelle</i>	99
5.3	Wasser- und Feststoffaustrag von Einzugsgebieten	100
5.3.1	<i>Langfristige Mess- und Simulationsergebnisse in Einzugsgebiet-Dimension</i>	100
5.3.2	<i>Quantitative Verifikation der Einzugsgebiet-Modelle bei langfristiger Berechnung</i>	105

5.3.3	<i>Qualitative Verifikation anhand der Erosionsschadenskartierung</i>	106
5.3.4	<i>Zeitlich aufgelöste Mess- und Simulationsergebnisse in Einzugsgebiet-Dimension</i>	107
5.3.5	<i>Quantitative Verifikation der Einzugsgebiet-Modelle bei zeitlich aufgelöster Berechnung</i>	111
5.3.6	<i>Validierung der Einzugsgebiet-Modelle</i>	117
5.4	<i>Evaluierung der applizierten Modelle</i>	118
6	Diskussion	120
6.1	Kritische Betrachtungen zu Methoden und Ergebnissen	120
6.1.1	<i>Allgemeine Erkenntnisse</i>	120
6.1.2	<i>Einzelhang-Dimension</i>	123
6.1.3	<i>Einzugsgebiet-Dimension</i>	128
6.2	Bedeutung der Ergebnisse aus Sicht der Landschaftsökologie	138
6.2.1	<i>Aus der Arbeit gewonnene neue Erkenntnisse</i>	138
6.2.2	<i>Prozessorientierte Forschung und konkrete Quantifizierung</i>	139
6.2.3	<i>Integrierter Boden- und Gewässerschutz</i>	139
6.2.4	<i>Künftige Modellentwicklung</i>	140
7	Schlussfolgerungen	141
7.1	Entwicklungsbedarf im Bereich Erosionsmodelle	141
7.1.1	<i>Modelle in Einzelhang-Dimension</i>	141
7.1.2	<i>Modelle in Einzugsgebiet-Dimension</i>	142
7.2	Durchführung von Modellverifikationen und -validierungen	145
7.2.1	<i>Eignung statistischer Parameter</i>	145
7.2.2	<i>Parametrisierung</i>	146
7.2.3	<i>Kalibrierung</i>	146
7.3	Eignung von Erosionsmodellen zur Kontrolle von Erosionsrisikowerten	148
7.3.1	<i>Zu erwartende Güte der Modellergebnisse</i>	148
7.3.2	<i>Maßstabsfrage</i>	151
7.3.3	<i>Regionalisierung empirischer Modelle</i>	152
7.3.4	<i>Integrierte Behandlung von On-Site- und Off-Site-Auswirkungen der Erosionsprozesse</i>	152
8	Summary / Zusammenfassung	155
9	Danksagung	167
10	Schriftumsverzeichnis	168
Anhang		

Anhang A:

Verteilung der Landnutzung im Einzugsgebiet Nünzeberg (PR) für die Jahre 1998 und 1999 (Aufnahmezeitpunkt: Frühsommer)

A-1

Verteilung der Landnutzung im Einzugsgebiet Länenbachtal (P50) für die Jahre 1997 bis 1999 (Aufnahmezeitpunkt: Frühsommer)	A-2
Anhang B:	
Räumliche Verteilung des K-Faktors in den Einzugsgebieten Nünzeberg (PR) und Länenbachtal (P50)	B-1
Räumliche Verteilung des LS-Faktors in den Einzugsgebieten Nünzeberg (PR) und Länenbachtal (P50)	B-2
Räumliche Verteilung des C-Faktors in den Einzugsgebieten Nünzeberg (PR) und Länenbachtal (P50)	B-2
Anhang C:	
Erosive Niederschlagsereignisse des Untersuchungszeitraumes 1995-1999 für die Erosionsparzelle T1 (Saline Riburg)	C-1
Erosive Niederschlagsereignisse des Untersuchungszeitraumes 1995-1999 für die Erosionsparzelle T50 (Im Lör)	C-2
Vergleich der Rechenergebnisse in Einzelhang-Dimension mit Messwerten für den Untersuchungszeitraum 1995-1999 auf jährlicher Basis	C-3
Ereignisweiser Vergleich von Rechenergebnisse der Modelle WEPP und EROSION 2D in Einzelhang-Dimension mit Messwerten für den Untersuchungszeitraum 1995-1999	C-4
Anhang D:	
Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von NS-Tagessummen am Standort der Erosionsparzellen Saline Riburg (NS-Station N1) bzw. Im Lör (NS-Station N50)	D-1
Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von max. 30-Minuten-Intensitäten I_{30} am Standort der Erosionsparzellen Saline Riburg (NS-Station N1) bzw. Im Lör (NS-Station N55)	D-2
Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von R-Faktoren am Standort der Erosionsparzellen Saline Riburg (NS-Station N1) bzw. Im Lör (NS-Station N55)	D-3
Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von Ereignis-Abflusshöhen auf den Erosionsparzellen Saline Riburg (T1) bzw. Im Lör (T50)	D-4
Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von Bodenabträgen auf den Erosionsparzellen Saline Riburg (T1) bzw. Im Lör (T50)	D-5
Anhang E:	
Ausgewählte Hochwasser-Ereignisse des Einzugsgebietes Nünzeberg (Messpegel PR) für die Modellrechnungen im Untersuchungszeitraum 1998-1999	E-1
Ausgewählte Hochwasser-Ereignisse des Einzugsgebietes Länenbachtal (Messpegel P50) für die Modellrechnungen im Untersuchungszeitraum 1997-1999	E-2
Vergleich der langfristigen Rechenergebnisse für Jahressummen in Einzugsgebiet-Dimension mit Messwerten	E-3
Vergleich der zeitlich aufgelösten Rechenergebnisse für ausgewählte Einzelereignisse in Einzugsgebiet-Dimension mit Messwerten	E-4

Anhang F:

Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von HW-Scheitelabflüssen an den Messpegeln der Einzugsgebiete Nünzeberg (PR) bzw. Länenbachtal (P50)	F-1
Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von HW-Direktabflüssen an den Messpegeln der Einzugsgebiete Nünzeberg (PR) bzw. Länenbachtal (P50)	F-2
Empirische und Gumbel-verteilte Auftrittswahrscheinlichkeit von Schwebstoffausträgen an den Messpegeln der Einzugsgebiete Nünzeberg (PR) bzw. Länenbachtal (P50)	F-3

Anhang G:

Räumlich aufgelöste Modellergebnisse für das Einzugsgebiet Nünzeberg (PR) 1998	G-1
Räumlich aufgelöste Modellergebnisse für das Einzugsgebiet Nünzeberg (PR) 1999	G-2
Räumlich aufgelöste Modellergebnisse für das Einzugsgebiet Länenbachtal (P50) 1997	G-3
Räumlich aufgelöste Modellergebnisse für das Einzugsgebiet Länenbachtal (P50) 1998	G-4
Räumlich aufgelöste Modellergebnisse für das Einzugsgebiet Länenbachtal (P50) 1999	G-5

Anhang H:

Zusammenfassung der Erosionsschadenskartierung im Einzugsgebiet Nünzeberg (PR) für 1998 bis 1999	H-1
Zusammenfassung der Erosionsschadenskartierung im Einzugsgebiet Länenbachtal (P50) für 1997 bis 1999	H-2

Anhang I:

Streudiagramme der linearen Regression zwischen charakteristischen Parameter von erosiven Niederschlagsereignissen (NS-Höhe, NS-Dauer, R-Faktor) und gemessenen Oberflächenabflüssen und Bodenabträgen von den Erosionsparzellen Saline Riburg (T1) und Im Lör (T50)	I-1
Streudiagramme der linearen Regression zwischen charakteristischen Parameter von ausgewählten erosiven Niederschlagsereignissen (NS-Höhe, NS-Dauer, R-Faktor) und gemessenen Direktabflüssen und Schwebstoffausträgen von den Einzugsgebieten Nünzeberg (Messpegel PR) und Länenbachtal (Messpegel P50)	I-2

Anhang J:

Auflistung und Bewertung von Modelleigenschaften für die Evaluierung der untersuchten Erosionsmodelle	J-1
Auflistung von Modelleigenheiten zur Beschreibung des Leistungsumfanges der entsprechenden Komponenten von den untersuchten Erosionsmodellen	J-2
Auflistung und Bewertung der Anwendbarkeit für die Evaluierung der untersuchten Erosionsmodelle	J-3

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Untersuchungsmethoden von Bodenerosion und involvierten Prozessen und Prozessgrößen klassifiziert nach Verfahren, Niederschlags- bzw. Abflussart, räumlichem und zeitlichem Maßstab und angestrebten Ergebnissen (Quelle: Huang 1999, modifiziert)	12
Tab. 2-2:	Klassifikationskriterien für Erosionsmodelle anhand von Art und Eigenschaften	21
Tab. 2-3:	Richtwerte für höchstzulässige Bodenerosionsraten durch Wasser auf Ackerflächen gemäß Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo; Schweizerischer Bundesrat 1998)	27
Tab. 4-1:	Charakterisierung der Erosionsparzellen T1 und T50 durch geometrische, topographische und pedologische Parameter (Datenquelle für Jahresniederschläge 1961-1990: SMA div. Jg.a)	36
Tab. 4-2:	Charakteristische Parameter der Einzugsgebiete PR und P50 sowie der zugehörigen Einzugsgebiete Nünzeberg und Länenbachtal (Datenquelle für Jahresniederschläge 1961-1990: SMA div. Jg.a)	40
Tab. 4-3:	Eigenschaften von In-Situ-Proben des Oberbodens der vorherrschenden Bodenformen im Einzugsgebietes Nünzeberg (Datenquelle: Schaub 1989, ergänzt)	45
Tab. 4-4:	Anteile der unterschiedlichen Landnutzungsarten an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes Nünzeberg (PR) in den Jahren 1998 und 1999 (Aufnahmezeitpunkt: Frühsommer)	47
Tab. 4-5:	Eigenschaften von In-Situ-Proben des Oberbodens der vorherrschenden Bodenformen im Einzugsgebietes Länenbachtal (Datenquelle: Vavruch 1988, ergänzt)	52
Tab. 4-6:	Anteile der einzelnen Landnutzungsarten an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes Länenbachtal (P50) für die Jahre 1997 bis 1999 (Aufnahmezeitpunkt: Frühsommer)	54
Tab. 4-7:	Schlüssel für die objektive Bewertung der Güte von Berechnungsergebnissen im Zuge der Modellvalidierung	86
Tab. 5-1:	NS-, Oberflächenabfluss- und Bodenabtrags-Daten der langjährigen Messreihe auf den Erosionsparzellen Saline Riburg (T1) und Im Lör (T50) im Überblick	90
Tab. 5-2:	Vergleich der berechneten langjährigen Durchschnittstraten für Bodenverlust nach Mosimann & Rüttimann (1995) mit Messwerten von den Parzellen T1 und T50	92
Tab. 5-3:	Parameter der analytischen Statistik zur Verifikation des berechneten Bodenabtrages in Einzelhang-Dimension auf jährlicher Basis	96
Tab. 5-4:	Parameter der analytischen Statistik zur Verifikation der Modellergebnisse in Einzelhang-Dimension auf Basis von Einzelereignissen	97
Tab. 5-5:	Jahressummen des gemessenen Niederschlages und R-Faktors und des davon hervorgerufenen Gerinneabflusses, Schweb- und	

	Nährstoffaustrages von den Einzugsgebieten Nünzeberg (Pegel PR) und Länenbachtal (Pegel P50)	101
Tab. 5-6:	Gemessene Nährstoffausträge von den Einzugsgebieten Nünzeberg (Pegel PR) und Länenbachtal (Pegel P50)	102
Tab. 5-7:	Parameter der analytischen Statistik zur Verifikation des berechneten Bodenabtrages in Einzugsgebiet-Dimension bei langfristiger Berechnung (Jahressummen als Grundlage)	106
Tab. 5-8:	Parameter der analytischen Statistik zur Verifikation des berechneten Bodenabtrages in Einzugsgebiet-Dimension bei zeitlich aufgelöster Berechnung (Jahressummen ausgewählter Einzelereignisse als Grundlage)	112
Tab. 5-9:	Parameter der analytischen Statistik zur Verifikation des berechneten Bodenabtrages in Einzugsgebiet-Dimension bei zeitlich aufgelöster Berechnung (Einzelwerte ausgewählter Einzelereignisse als Grundlage)	114

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Geoökologisches Messkonzept in der raumbezogenen Erosionsforschung und dessen methodische Verfahrensebenen nach Leser et al. 1998	15
Abb. 2-2:	Regelkreis zur qualitativen Beschreibung des geoökologischen Prozessgefüges der Bodenerosion nach Leser et al. 1998	16
Abb. 3-1:	Schematischer Überblick über die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit	31
Abb. 4-1:	Erosionsparzelle Im Lör im Oberbaselbieter Länenbachtal (T50)	35
Abb. 4-2:	Übersichtskarte der Nordwest- und Zentral-Schweiz mit der Lage der Untersuchungsgebiete Möhliner Feld und Tafeljura des Basler Geographischen Instituts	39
Abb. 4-3:	Topographische Lage des Einzugsgebiets Nünzeberg (Messpegel PR) und der Erosionsparzelle Saline Riburg (T1) sowie der zugehörigen Messstationen (Digitale Kartengrundlage: AGIS div. Jg.)	41
Abb. 4-4:	Das Einzugsgebiet Nünzeberg (Messpegel PR)	42
Abb. 4-5:	Der am vorflutenden Abflusskanal des Einzugsgebietes Nünzeberg errichteten Messpegel PR baugleiche Messstation des Geographischen Instituts der Universität Basel	43
Abb. 4-6:	Verteilung der vorherrschenden Bodenformen und Wegenetz im Einzugsgebiet Nünzeberg (PR), Isohypsen	45
Abb. 4-7:	Struktur der Landnutzung im Einzugsgebiet Nünzeberg (PR) im Überblick (Stand Sommer 1999) und Lage von Sammlerleitungen (schwarze Linie)	46
Abb. 4-8:	Topographische Lage des Einzugsgebietes Länenbachtal (Messpegel P50) und der Erosionsparzelle Im Lör (T50) sowie zugehöriger Messstationen (digitale Kartengrundlage: AGIS div. Jg.)	48
Abb. 4-9:	Das Einzugsgebiet Länenbachtal (Messpegel P50) von der Flur Hofacher aus im Herbst 1996	49
Abb. 4-10:	Messpegel P50 am Ausgang des Einzugsgebietes Länenbachtal	50
Abb. 4-11:	Verteilung der vorherrschenden Bodenformen und Wegenetz im Einzugsgebiet Länenbachtal (P50)	52
Abb. 4-12:	Struktur der Landnutzung des Einzugsgebietes Länenbachtal (P50) im Überblick (Stand Sommer 1999)	53
Abb. 4-13:	Schematische Darstellung des Drainage- und Sammlerleitungs-Systems im Länenbachtal (Quelle: Ammon-Hagjiu 2001, modifiziert)	55
Abb. 4-14:	Lineare Eingabestruktur zur Wiedergabe der topographischen, pedologischen und landnutzungsspezifischen Eigenheiten des Einzugsgebiets Nünzeberg (PR) für die Simulation mit WEPP	81
Abb. 5-1:	Gemessener und berechneter Oberflächenabfluss von der Erosionsparzelle Saline Riburg (T1)	93
Abb. 5-2:	Gemessener und berechneter Bodenabtrag von der Erosionsparzelle Saline Riburg (T1)	93

Abb. 5-3:	Gemessener und berechneter Oberflächenabfluss von der Erosionsparzelle Im Lör (T50)	94
Abb. 5-4:	Gemessener und berechneter Bodenabtrag von der Erosionsparzelle Im Lör (T50)	94
Abb. 5-5:	Streudiagramme der linearen Regressionen zwischen berechnetem und gemessenem Oberflächenabfluss und Bodenabtrag von Einzelereignissen auf den Erosionsparzellen T1 und T50 (beide zusammengefasst)	98
Abb. 5-6:	Gemessener und langfristig berechneter Direktabfluss vom Einzugsgebiet Nünzeberg (Messpegel PR)	103
Abb. 5-7:	Gemessener und langfristig berechneter Schwebstoffaustrag vom Einzugsgebiet Nünzeberg (Messpegel PR)	103
Abb. 5-8:	Gemessener und langfristig berechneter Schwebstoffaustrag vom Einzugsgebiet Länenbachtal (P50)	104
Abb. 5-9:	Jahressummen von Messungen und zeitlich aufgelösten Berechnungen des Direktabflusses vom Einzugsgebiet Nünzeberg (Messpegel PR) für ausgewählte Einzelereignisse	109
Abb. 5-10:	Jahressummen von Messungen und zeitlich aufgelösten Berechnungen des Schwebstoffaustrages vom Einzugsgebiet Nünzeberg (Messpegel PR) für ausgewählte Einzelereignisse	109
Abb. 5-11:	Jahressummen von Messungen und zeitlich aufgelösten Berechnungen des Direktabflusses vom Einzugsgebiet Länenbachtal (Messpegel P50) für ausgewählte Einzelereignisse	110
Abb. 5-12:	Jahressummen von Messungen und zeitlich aufgelösten Berechnungen des Schwebstoffaustrages vom Einzugsgebiet Länenbachtal (Messpegel P50) für ausgewählte Einzelereignisse	110
Abb. 5-13:	Streudiagramme der linearen Regression zwischen berechnetem und gemessenem Direktabfluss von Einzelereignissen aus den Einzugsgebieten PR und P50 (zusammengefasst)	115
Abb. 5-14:	Streudiagramme der linearen Regression zwischen berechnetem und gemessenem Schwebstoffaustrag von Einzelereignissen aus den Einzugsgebieten PR und P50 (zusammengefasst)	116
Abb. 5-15:	Überblick über Detail- und Gesamtergebnisse der Modellbewertung im Zuge der Evaluierung	118
Abb. 6-1:	Vergleich einer photographischen Aufnahme (Mai 2000) eines beinahe alljährlich auftretenden Erosionsschadens mit der räumlich aufgelösten Berechnung von Jahres-Bodenabtragungswerten durch die Modelle USLE2D/SDR, WaTEM und EROSION 3D für 1999.	134
Abb. 7-1:	Kombinierter Ansatz aus Raster- und Vektor-Techniken für eine GIS-gestützte Modellierung des Erosionsgeschehens in Einzugsgebieten auf empirischer Basis (Quelle: Leser 2000, modifiziert)	143

Verzeichnis der Gleichungen

Gl. 4-1: Gleichung für den Reliefindex R_f (Wilhelm 1993)	40
Gl. 4-2: SDR-Gleichung (Auerswald & Schmidt 1986)	71
Gl. 4-3: MUSLE-Gleichung (Williams & Berndt 1977)	72
Gl. 4-4: relativer Standardfehler S_{xy}	84
Gl. 6-1: modifizierte SDR-Gleichung (Auerswald 1989)	137
