

Prozessorientierte Simulation des Transportes von erodiertem Material von Landflächen und in Gerinnen

vom Fachbereich für Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Carolo- Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor - Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte
Dissertation

von
M.Sc. Lan Pham Thi Huong
aus Namha, Vietnam

Eingereicht am:	10.12.2001
Mündliche Prüfung am:	14.02.2002
Berichterstatter:	Prof. Dr. -Ing. U. Maniak
Berichterstatter:	Prof. Dr. -Ing. W. Mertens



Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einführung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehen.....	3
2. Literaturlauswertung	4
2.1 Oberflächenabfluß	4
2.1.1 Infiltration	4
2.1.2 Abflußkonzentration des Oberflächenabflusses.....	5
2.1.3 Hydraulische Berechnung der Wassertiefe.....	6
2.2 Erfassung der Bodenerosion.....	8
2.2.1 Empirischer Ansatz	8
2.2.2 Physikalischer Ansatz	13
2.2.2.1 Sedimentkontinuitätsgleichung.....	13
2.2.2.1.1 Sedimentkontinuitätsgleichung für Flächen	13
2.2.2.1.2 Sedimentkontinuitätsgleichung für Gerinne.....	16
2.2.2.2 Erosionsprozeß auf der Landfläche.....	17
2.2.2.2.1 Bestimmung der Interrillenerosion E_i	17
2.2.2.2.2 Bestimmung der Rillenerosion E_r	23
2.2.2.3 Erosionsprozeß im Gerinne.....	28
2.2.2.3.1 Abtrag aus den Gerinne.....	28
2.2.2.3.2 Ablagerung im Gerinne.....	31
2.2.2.3.3 Transportkapazität der Gerinneströmung TK.....	32
2.2.2.3.3.1 Bewegungsbeginn	33
2.2.2.3.3.2 Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit v_s ..	36
2.2.2.3.3.3 Bestimmung der Transportkapazität TK....	38
2.3 Messungen der Bodenerosion	41
2.3.1 Messung der Interrillenerosion.....	41
2.3.2 Messung der Rillenerosion.....	42
2.3.3 Messung der transportierte Feststoffe (Geschiebe- und	42
Schwebstoffmessungen).....	42
2.4 Stellungnahme zur Literaturlauswertung.....	46
3. Entwicklung eines prozeßorientierten Erosionsmodells	48
3.1 Darstellung des Modellkonzepts.....	48
3.2 Simulation des Oberflächenabflusses mit einem N-A Modell	54
3.2.1 Abflußbildung	54
3.2.2 Abflußkonzentration	56
3.3 Berechnung des Bodenabtrages bzw. Flächenerosion in einem	60
Teileinzugsgebiet	60
3.3.1 Bestimmung der Interrillenerosion	60
3.3.1.1 Erosionsrate infolge Regentropfenaufpralls.....	60
3.3.1.2 Deposition im Interrillenenbereich	64
3.3.2 Bestimmung der Rillenerosion	66
3.3.3 Transportkapazität der Rillenströmung	69
3.3.4 Gewinnung der Modellparameter der Interrillenerosion aus.....	69
Beobachtungen.....	69
3.4 Berechnung des Feststoffeintrages in dem Gerinne bzw. Hauptvorfluter	70
3.4.1 Bestimmung des Gerinneabtrages bzw. Geschiebetransport an der	70
Sohle	70

3.4.2 Gewinnung der Modellparameter zur Gerinneerosion aus.....	71
Beobachtungen.....	
3.5 Abgrenzung zwischen Landflächen- und Gerinneerosion bzw. Ablaufdiagramm ..	79
des prozessorientierten Erosionsmodells	86
3.6 Modellparameter	86
3.7 Überblick über die Datenerfordernisse und die Ausgabe des Modells	88
3.8 GIS in prozeßorientiertem Erosionsmodell	
	89
4. Modellanwendung	89
4.1 Kurzbeschreibung des Einzugsgebiets	91
4.2 Datengrundlage	91
4.2.1 Allgemeines	97
4.2.2 Ausgewählte Ereignisse	97
4.3 Bestimmung der Modellparameter des Bodenerosionsmodells	
4.3.1 Kritischer Schubspannung zu Beginn und am Ende der.....	97
Gerinneerosion für jeden Flußabschnitt im Hauptgerinne.....	98
4.3.2 Ermittlung des Bodenfaktors der Gerinneerosion	98
4.3.3 Wassertiefe im Gewässerabschnitt.....	99
4.3.4 Koeffizient für hydraulische Bodenerodierbarkeit	100
4.4 Simulation	100
4.4.1 Kalibrierung des Modells	112
4.4.2 Bewertung der Ergebnisse für Ganglinien	114
4.4.3 Analyse der erhaltenen Erosionskenngrößen	127
4.4.4 Ursachen der Hysteresis in der Feststoff-Abfluß-Beziehung.....	131
4.4.5 Einschätzung des Erosionsrisikos im Einzugsgebiet des Lamson	134
5. Sensitivitätsanalyse	138
6. Vergleich des Modells bzw. der Methode der Verfasserin mit anderen Methoden	140
7. Maßnahmen zum Erosionsschutz im Einzugsgebiet des Lamson	146
8. Zusammenfassung und Ausblick	148
Literatur	163
Anlagen.....	

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1	Nomogramm zur Bestimmung des K- Faktors (nach Schwertmann et al., 1987).....	10
Abb. 2.2	Nomogramm zur Ermittlung des LS- Faktors (nach Schwertmann et al., 1987).....	11
Abb. 2.3	Flußdiagramm zur Darstellung der Wechselwirkung zwischen Ablagerung und Sedimenttransport nach Foster et al. (1972).....	16
Abb. 2.4	Definitionsskizze zur Bestimmung der Gerineablagerung.....	31
Abb. 2.5	Systemskizze zur Ableitung der Schubspannung.....	33
Abb. 2.6	Bewegungsbeginn nach Shields (1936)	34
Abb. 2.7	Vergleichende Darstellung der kritischen Schubspannungen als Funktion des maßgebenden Korndurchmessers (Haber, 1982).....	35
Abb. 2.8	Methoden zur Messung der Tropfenerosion im Gelände nach (a) Bollinne (1975) und (b) Morgan (1981) (in Morgan, 1999).....	42
Abb. 2.9	US-D 49 Sampler für Integrationsmessungen (Bechteler et al., 1993).....	43
Abb. 2.10	Helley, Smith Fänger (DVWK, 1992).....	44
Abb. 3.1	Abfluß- und Erosionsprozesse in einer Teilfläche	49
Abb. 3.2	Schematische Darstellung des Modellkonzepts	51
Abb. 3.3	Die einwirkende Kraft auf einen Tropfen (Larry et al. 1988).....	60
Abb. 3.4	Gegenüberstellung der mittleren Tropfenfallgeschwindigkeit der Verfasserin und anderer Autoren.....	63
Abb. 3.5	Umlagerungsprozesse im Interrillenbereich nach verschiedenen Modellvorstellungen für den stationären Fall: (1) Hairsine et al. (1991); (2) modifizierter Ansatz der Verfasserin; Erosionsraten infolge Tropfenaufralls (E_{it}), Eintrag aus Depositionsschicht (E_{iD}), Deposition im Interrillenbereich (D_i).....	64
Abb. 3.6	Gegenüberstellung der potentielle Rillenerosion in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität.....	68
Abb. 3.7	Beziehung zwischen Schwebstofftransport und Abfluß des Lamson (Pegel Lamson, $A_{E0} = 33,1 \text{ km}^2$) (Regenzeit).....	72

Abb. 3.8	Beziehung zwischen Schwebstofftransport und Abfluß des Lamson (Pegel Lamson, $A_{E0} = 33,1 \text{ km}^2$) (Restliches Jahr).....	72
Abb. 3.9	Beziehung zwischen Wassertiefe und Abfluß des Lamson (Pegel Lamson, $A_{E0} = 33,1 \text{ km}^2$) (Regenzeit).....	73
Abb. 3.10	Änderung des Korndurchmessers d_{50} während einer Hochwasserwelle; Verlauf $Q_{sa}=f(Q)$ und $Q_{sa} = f(\tau)$ (Ereignis 4).....	74
Abb. 3.11	Änderung des Korndurchmessers d_{max} während einer Hochwasserwelle; Verlauf $Q_{sa}=f(Q)$ und $Q_{sa} = f(\tau)$ (Ereignis 4).....	74
Abb. 3.12	Festlegung des Erosionsbeginns im Gerinne anhand der Beziehung zwischen Wassertiefe und Schwebstofftransport	76
Abb. 3.13	Darstellung des gemessenen Feststofftransportes am Auslaß des Einzugsgebietes Lamson anhand der Feststofftransportgleichung (Gl. 3.55).	78
Abb. 3.14	Darstellung der Sohlengefälle bzw. kritischen Schubspannung für jeden Hauptabschnitt i im Einzugsgebiet Lamson.....	81
Abb. 3.15	Beziehung zwischen Wassertiefe und Abflußmenge, Einzugsgebietsgröße und Gefälle.....	83
Abb. 3.16	Ablaufdiagramm für die Modellierung der Erosion.....	85
Abb. 4.1	Lage des Einzugsgebietes Lamson in Vietnam.....	89
Abb. 4.2	Die erosionswirksame Hangneigung im Lamson	91
Abb. 4.3	Topographie im Einzugsgebiet des Lamson.....	92
Abb. 4.4	Bodenarten im Einzugsgebiet des Lamson.....	93
Abb. 4.5	Landnutzung im Einzugsgebiet des Lamson.....	94
Abb. 4.6	Aufteilung des Einzugsgebietes des Lamson in Teilflächen.....	96
Abb. 4.7	Beziehung zwischen der Feststofflieferung am Auslauf des betrachteten Flußabschnittes und der Bodenerosion im Einzugsgebiet bis zum betrachteten Abschnitt.....	102
Abb. 4.8	Beziehung zwischen dem Wasserstand und der Größe $Q_{SL} / (Q_{SL} + Q_{SG})$	103
Abb. 4.9	Abflußganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Ereignis Nr. 1, Pegel Lamson.....	104
Abb. 4.10	Abflußganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Ereignis Nr. 2, Pegel Lamson.....	105
Abb. 4.11	Abflußganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Ereignis Nr. 3, Pegel Lamson.....	105
Abb. 4.12	Abflußganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Ereignis Nr. 4, Pegel Lamson.....	105
Abb. 4.13	Abflußganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Ereignis Nr. 5, Pegel Lamson.....	106
Abb. 4.14	Feststofftransportganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Pegel Lamson (Ereignis Nr.1).....	107

Abb. 4.15	Feststofftransportganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Pegel Lamson (Ereignis Nr.2).....	108
Abb. 4.16	Feststofftransportganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Pegel Lamson (Ereignis Nr.3).....	109
Abb. 4.17	Feststofftransportganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Pegel Lamson (Ereignis Nr.4).....	110
Abb. 4.18	Feststofftransportganglinien für das Einzugsgebiet des Lamson, Pegel Lamson (Ereignis Nr.5).....	111
Abb. 4.19	Einfluß von Hanggefälle und Niederschlagsintensität auf die Interrillenerosion	117
Abb. 4.20	Regression zwischen Interrillenerosion und $i^*I_0^{2/3}$	118
Abb. 4.21	Einfluß von Hanggefälle und Niederschlagsintensität auf die Rillenerosion.....	119
Abb. 4.22	Regression zwischen Rillenerosion und $i^*I_0^{1,67}$	119
Abb. 4.23	Beziehung zwischen dem Geschiebetransport und der Größe $J^{1/2}(Q-Q_c)$	121
Abb. 4.24	Beziehung zwischen dem Koeffizienten a und dem maßgebenden Korndurchmesser des Schwebstoffes.....	121
Abb. 4.25	Schwebstoffausträge im Einzugsgebiet des Lamson für das Ereignis 1.....	122
Abb. 4.26	Schwebstoffausträge im Einzugsgebiet des Lamson für das Ereignis 2.....	123
Abb. 4.27	Schwebstoffausträge im Einzugsgebiet des Lamson für das Ereignis 3.....	124
Abb. 4.28	Schwebstoffausträge im Einzugsgebiet des Lamson für das Ereignis 4.....	125
Abb. 4.29	Schwebstoffausträge im Einzugsgebiet des Lamson für das Ereignis 5.....	126
Abb. 4.30	Hysteresis des Feststofftransportes für Niederschlagsereignis 1 am Pegel Lamson (die zeitlich aufeinanderfolgenden Meßpunkte sind in Pfeilrichtung verbunden).....	128
Abb. 4.31	Hysteresis des Feststofftransportes für Niederschlagsereignis 2 am Pegel Lamson (die zeitlich aufeinanderfolgenden Meßpunkte sind in Pfeilrichtung verbunden).....	129
Abb. 4.32	Hysteresis des Feststofftransportes für Niederschlagsereignis 3 am Pegel Lamson (die zeitlich aufeinanderfolgenden Meßpunkte sind in Pfeilrichtung verbunden).....	129
Abb. 4.33	Hysteresis des Feststofftransportes für Niederschlagsereignis 4 am Pegel Lamson (die zeitlich aufeinanderfolgenden Meßpunkte sind in Pfeilrichtung verbunden).....	130
Abb. 4.34	Hysteresis des Feststofftransportes für Niederschlagsereignis 5 am Pegel Lamson (die zeitlich aufeinanderfolgenden Meßpunkte sind in Pfeilrichtung verbunden).....	130
Abb. 4.35	Erosionskartierung im Einzugsgebiet des Lamson.....	133
Abb. 5.1	Darstellung der Änderung des Feststofftransportes des Ereignisses vom 20.08.1981 als Funktion der Änderungen der Modellparameter.....	135
Abb. 5.2	Änderung des Feststofftransportes bei Variation einiger Modellparameter.	136

Abb. 6.1 Vergleich der Gang- und Summenlinien für das Ereignis 4 nach der Methode der Verfasserin und dem Ansatz von Noman (2001)..... 139

Abb. 7.1 Maßnahmen zum Schutz der Bodenerosion im Einzugsgebiet des Lamson.. 142

Abb. 7.2 Abflusszenario für das Einzugsgebiet des Lamson, Pegel Lamson (Ereignis 4)..... 145

Abb. 7.3 Feststofftransportzenario für das Einzugsgebiet des Lamson, Pegel Lamson (Ereignis 4)..... 145

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1.1 Effektive Schutzmaßnahmen auf den Bodenabtrag (Thai Phien et al., 1993, verändert)..... 2

Tab. 2.1 Aggregatklassen..... 10

Tab. 2.2 Durchlässigkeitsklassen..... 10

Tab. 2.3 Gleichungen für die Berechnung kritischer Schubspannungen (Haber, 1982)..... 35

Tab. 2.4 Erfahrungswerte kritischer Schubspannungen τ_c und Geschwindigkeiten v_c für den Beginn des Sedimenttransports (DIN 19661; in Maniak, 1988)..... 36

Tab. 3.1 Rauheitsbeiwert k_m nach Manning (aus Maniak, 1993)..... 59

Tab. 3.2 Widerstandsbeiwert der Kugeltropfen mit Durchmesser d_f . (Temperatur = 20°C, Luftdruck $P_0 = 1013$ mbar) (Larry et al., 1988)..... 61

Tab. 3.3 Benötigte Eingangsdaten des Erosionsmodells..... 87

Tab. 4.1 Hydrologische Größen im Einzugsgebiet des Lamson..... 89

Tab. 4.2 Übersicht der untersuchten Ereignisse..... 97

Tab. 4.3 kritische Schubspannung zu Beginn und am Ende der Gerinneerosion für 10 Gewässerquerschnitte des Lamson 97

Tab. 4.3a Bodenfaktor und hydraulische Kenngrößen für die Gerinneerosion für 10 Gewässerquerschnitte des Lamson 98

Tab. 4.4 Bodenkohäsion bei Sättigung BKS [Kpa] nach Morgan et al., (1994)..... 99

Tab. 4.5 Kalibrierungsergebnisse..... 100

Tab. 4.6 Güte- und Fehlermaßparameter..... 113

Tab. 4.7 Erosionskenngrößen im Einzugsgebiet des Lamson..... 115

Tab. 4.8 Klassifizierte Bodenerosionsgefährdungen im Einzugsgebiet des Lamson für die 5 Niederschlagsereignisse..... 131

Tab. 6.1 Vergleich von Güte- und Abweichungsmaße für das Ereignis 4 nach der Methode der Verfasserin und dem Ansatz von Noman (2001)..... 139