



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Bautechnik und
Naturgefahren

Vergleich von Simulationsmodellen zur Reichweitenabschätzung alpiner Murgänge

am Beispiel südtiroler Ereignisse

DIPLOMARBEIT

Mathias HOCHSCHWARZER
Diplomstudium KTW

Wien, im September 2009

Betreuer
Ao. Univ. Prof. DI Dr. nat. techn. **Johannes HÜBL**
DI Christian SCHEIDL

Inhaltsverzeichnis

Symbole	VII
Zusammenfassung	X
Abstract	XI
Danksagung	XII
1 Einleitung	1
2 Allgemeines	3
2.1 Gravitative Massenbewegungen	3
2.1.1 Klassifizierung gerinnebasierender Prozesse	6
2.2 Murgang	10
2.2.1 Definition	10
2.2.2 Mobilisierung und Transport	12
2.2.2.1 Entstehung und Auslösung von Murgängen	12
2.2.2.2 Anrisszone	14
2.2.2.3 Transitzone	15
2.2.3 Ablagerung	17
2.2.4 Reichweite L	18
2.2.5 Auslauflänge L_A	19
2.3 Gefahrenzonenplanung und die Rolle der Murganggefahr in der Gefahrenkartierung am Beispiel Südtirol	20

3	Methoden zur Bestimmung der Reichweite	25
3.1	Einführung	25
3.1.1	Modelle und Modellbildung	25
3.1.2	Modelltypen	26
3.1.2.1	Deterministische Modelle	26
3.1.2.2	Stochastische Modelle	28
3.1.2.3	Hybride Modelle (stochastisch-deterministisch)	28
3.1.3	Simulation	29
3.1.4	Ansätze zur Bestimmung der Reichweite von Murgängen	29
3.2	Empirische Modelle	32
3.2.1	Volumsbasierende Ansätze	32
3.2.1.1	Pauschalgefälle nach COROMINAS (1996)	32
3.2.1.2	Empirische Zusammenhänge nach RICKENMANN (1999)	33
3.2.2	TopRun DF	34
3.2.3	Modelle auf Grundlage topografischer Parameter	37
3.2.3.1	ACS-Modell nach Prochaska	37
3.3	Dynamische Modelle mit analytischer Lösung	39
3.3.1	Bestimmung der Auslauflänge nach TAKAHASHI (1991)	39
3.3.2	TopFlow DF	40
3.4	Dynamische Modelle mit numerischer Lösung	41
3.4.1	RAMMS	41
3.4.1.1	Das Voellmy-Salm-Modell	42
3.4.1.2	Anwendung für Murgänge und die Reibungsparameter μ und ξ	44
3.4.2	FLATModel	45
4	Daten und Modellanwendung	47
4.1	Verwendete Ereignisse und Datengrundlagen	47
4.2	Datenaufbereitung	50
4.2.1	Murgangsvolumen V	50

4.2.2	Ablagerungsfläche A	50
4.2.3	Reichweite L	50
4.2.4	Höhendifferenz H und Pauschalgefälle S	51
4.2.5	Kegelhals - Beginn der Ablagerung	51
4.2.6	Neigung der Transportstrecke (θ_T) und des Kegels (θ_K)	51
4.2.7	Einzugsgebiet	52
4.2.8	Maximaler Abfluss Q_{max} und Fließgeschwindigkeit v	54
4.2.9	Gerinnebreite b und Fließhöhe h	54
4.3	Simulationsparameter und Durchführung der Simulationen	56
4.3.1	Eindimensionale Modelle	56
4.3.1.1	Pauschalgefälle nach COROMINAS (1996)	56
4.3.1.2	Empirische Beziehungen nach RICKENMANN (1999)	56
4.3.1.3	ACS-Modell nach PROCHASKA et al. (2008)	56
4.3.1.4	Berechnung der Auslauflänge nach Takahashi	57
4.3.2	Zweidimensionale Modelle	57
4.3.2.1	TopRun DF	58
4.3.2.2	TopFlow DF	58
4.3.2.3	RAMMS	61
4.3.2.4	FLATModel	66
4.4	Evaluierung der Ergebnisse	67
5	Ergebnisse und Vergleich	70
5.1	Eindimensionale Modelle	70
5.1.1	Resultate der einzelnen Modelle	70
5.1.1.1	Reichweite nach COROMINAS (1996)	72
5.1.1.2	Reichweite nach RICKENMANN (1999)	73
5.1.1.3	Auslauflänge nach TAKAHASHI (1991)	73
5.1.1.4	ACS-Modell nach PROCHASKA et al. (2008)	75
5.1.2	Vergleich der Modelle	75

5.2	Zweidimensionale Modelle	86
5.2.1	Resultate der einzelnen Modelle	86
5.2.1.1	TopRun DF	86
5.2.1.2	TopFlow DF	87
5.2.1.3	RAMMS	88
5.2.1.4	FLATModel	89
5.2.2	simulierte Ereignisse	89
5.2.3	Vergleich der Evaluierungsfaktoren	102
6	Diskussion	103
6.1	Eindimensionale Modelle	103
6.2	Zweidimensionale Modelle	108
7	Schlussfolgerungen	113
8	Anhang	115
	Literatur	I

Abbildungsverzeichnis

2.1	Hauptmechanismen von Massenbewegungen	4
2.2	Zusammenhang der mittleren Kegelneigung und der Melton-Zahl	8
2.3	Zusammenhang zwischen Pauschalgefälle und Einzugsgebiet	9
2.4	Dreiphasendiagramm aus RICKENMANN (2006b).	12
2.5	Murgangauslösung nach ZIMMERMANN et al. (1997)	13
2.6	typische Auslösemechanismen	14
2.7	Murschub nach Pierson (1986)	16
2.8	Darstellung der Reichweite L und der Auslauflänge L_A	19
2.9	Kombinationsmatrix der Gefahrenstufen nach BUWAL (1998)	22
3.1	Reichweite L in Relation zum Energiepotenzial aus RICKENMANN (1999) .	33
3.2	Monte Carlo-Simulation in Kombination mit D8-Algorithmus	35
3.3	Modellierung potenzieller Fließwege in TopRun DF	36
3.4	Darstellung des ACS-Modells	38
3.5	Ablagerungsprozess der Murgangfront nach TAKAHASHI (1991)	39
3.6	Block-Modell nach Voellmy	43
4.1	Lage der Ereignisse in Südtirol und geografische Übersicht	48
4.2	Typisches Längsprofil mit Darstellung prozessrelevanter Punkte	52
4.3	Kegelausbildung und Darstellung ereignisbezogener Daten	53
4.4	Rasterdateien einer TopRun Simulation	59
4.5	Rasterdateien einer TopFlow Simulation	60
4.6	Einfluss der Größe und Anrisshöhe der Anrisszone in RAMMS	62

4.7	Einfluss des Reibungskoeffizienten ξ	64
4.8	Einfluss des Reibungskoeffizienten μ	65
4.9	Empirisch ermittelter Hydrograph (schematisch)	66
4.10	Evaluierung zweidimensionaler Modelle: Bestimmung von Teilflächen	67
5.1	eindimensionale Modelle: Diagramm COROMINAS (1996) - Reichweite	76
5.2	eindimensionale Modelle: Diagramm COROMINAS (1996) - Auslauflänge	77
5.3	eindimensionale Modelle: Diagramm RICKENMANN (1999) - Reichweite	78
5.4	eindimensionale Modelle: Diagramm RICKENMANN (1999) - Auslauflänge	79
5.5	eindimensionale Modelle: Diagramm TAKAHASHI (1991) - $S_f = 1, 10 \tan \theta_K$	80
5.6	Darstellung des Verhältnisfaktors S_f zu $\tan \theta_K$	81
5.7	eindimensionale Modelle: Diagramm TAKAHASHI (1991) - $S_f = 1, 29 \tan \theta_K$	82
5.8	eindimensionale Modelle: Diagramm TAKAHASHI (1991) - $S_f = 1, 15 \tan \theta_K$	83
5.9	eindimensionale Modelle: Diagramm ACS-Modell	84
5.10	Vergleich der Regressionsgeraden eindimensionaler Modelle	85
5.11	Vergleich zweidim. Modelle, Arundakopfbach	94
5.12	Vergleich zweidim. Modelle, Draunbergerbach	95
5.13	Vergleich zweidim. Modelle, Fanatjochbach	96
5.14	Vergleich zweidim. Modelle, Klammbach	97
5.15	Vergleich zweidim. Modelle, Koglbach	98
5.16	Vergleich zweidim. Modelle, Loterbach	99
5.17	Vergleich zweidim. Modelle, Seefeldbach	100
5.18	Vergleich zweidim. Modelle, Weissenbacher Kahlbach	101
6.1	Zusammenhang k_B , $S_{f,r}$ und $\tan \theta_K$	105
6.2	eindimensionale Modelle: Diagramm TAKAHASHI (1991) - $S_f = f(k_B, \theta_K)$	107
6.3	Vergleich der maximalen Fließhöhen und der Endablagerung einer RAMMS-Simulation	109
6.4	Zusammenhang von μ und θ_A	111

Tabellenverzeichnis

2.1	Klassifizierung und Charakterisierung von Massenbewegungen	5
2.2	Unterscheidungskriterien für Wildbachprozesse	7
2.3	Tabelle der Grenzwerte und der Intensitätsstufen für „Wassergefahren“ . . .	23
3.1	Überblick über Methoden zur Bestimmung der Reichweite	30
3.2	Überblick der in dieser Arbeit verwendeten Modelle	31
4.1	Ausgewählte Ereignisse	49
5.1	Übersicht der Ereignisse und Darstellung wichtiger Parameter	71
5.2	Ergebnisse der TopRun DF Simulationen	87
5.3	Ergebnisse der TopFlow DF Simulationen	88
5.4	Ergebnisse der RAMMS Simulationen	89
5.5	Ergebnisse der FLATModel Simulationen	90
5.6	Vergleich der Modelle anhand der Evaluierungsfaktoren Ω	102
6.1	Vergleich der Kegelneigung mit Simulationsparametern	110
8.1	Empirisch ermittelte Spitzenabflüsse und maximale Fließgeschwindigkeit .	116
8.2	ACS-Modell: β , α_{ACS} und α_{dok}	117
8.3	TopRun DF - Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren	118
8.4	TopFlow DF - Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren	119
8.5	RAMMS - Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren	120
8.6	FLATModel - Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren	121

Symbole

V	Ereignisvolumen [m^3]
A	planimetrische Fläche der Ablagerung [m^2]
L	Reichweite (horizontale Länge) [m]
L_A	Auslauflänge (schräge Länge) [m]
$L_{A,h}$	horizontale Auslauflänge [m]
S	Pauschalgefälle [-]
H	Fallhöhe [m]
A_{EZG}	Einzugsgebietsgröße [km^2]
h	maximale Fließhöhe am Kegelhals, senkrecht zur Bodenoberfläche [m]
h_A	Höhe der Ablagerung [m]
b	Gerinnebreite am Kegelhals [m]
R	hydraulischer Radius [m]
g	Gravitationskonstante [m/s^2]
t	Zeit [s]
S_f	Reibungswinkel des Takahashi-Ansatzes [-]
$S_{f,r}$	aus dokumentierter Auslauflänge rückgerechneter Reibungswinkel [-]
k_B	Mobilitätsfaktor, Verhältniszahl aus Ereignisvolumen und Ablagerungsfläche [-]
k_A	Verhältniszahl aus Ereignisvolumen und Profilfläche der Ablagerung [-]
C	Chezy-Zahl [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]
f	Reibungskoeffizient nach SCHEIDEGGER (1973) = S
k	Konsistenz
n	Fluid-Index

ρ	Dichte [kg/m ³]
θ	Hangneigung [°]
θ_K	mittlere Kegelneigung [°]
θ_T	mittlere Neigung der Transportstrecke [°]
θ_A	mittlere Neigung der dokumentierten Ablagerung [°]
μ	trockener Reibungskoeffizient des Voellmy-Ansatzes [-]
ξ	Faktor der turbulenten Reibung [m/s ²]
α_{ACS}	Auslaufwinkel des ACS-Modells
β_{ACS}	Kegehalswinkel des ACS-Modells
λ	Fließdruckparameter
τ_b	basale Schubspannung
τ_0	Fließgrenze
μ_m	Viskosität
dv/dy	Scherrate
α, β, γ	Vergleichsfaktoren von modellierten und dokumentierten Flächen
ϵ, ϕ	Vergleichsfaktoren von modellierten und dokumentierten Volumina
Ω_V	Evaluierungsfaktor
Ω_A	Evaluierungsfaktor der Flächen

Zusammenfassung

Die zerstörerische Tätigkeit von Wildbachprozessen in alpinen Regionen bedroht Menschen und deren Einrichtungen. Die Modellierung betroffener Flächen und Objekte stellt einen wichtigen Schritt in der Bewertung dieser Naturgefahren dar. Modelle zur Bestimmung der Reichweite, der Auslauflänge und des Ablagerungsverhaltens von Murgängen liefern Grundlagen zur Erstellung von Gefahrenzonenplänen und zur Planung anderer Schutzmaßnahmen.

Das Ziel der Arbeit ist es, die neu entwickelten zweidimensionalen Simulationsprogramme TopRun DF und TopFlow DF anzuwenden und mit den auf dem Voellmy-Ansatz basierenden Programmen RAMMS und FLATModel, mit denen schon erfolgreich Murgänge simuliert werden konnten, zu vergleichen. TopRun DF beruht auf dem empirischen Zusammenhang von Ereignisvolumen und abgelagerter Fläche und einem stochastischen Modellierungsverfahren, der Monte Carlo Simulation. TopFlow DF hat zudem den dynamischen Ansatz von TAKAHASHI (1991) zur Berechnung der eindimensionalen Auslauflänge integriert. Acht ausgewählte dokumentierte Ereignisse werden simuliert und die „best-fit“-Simulationen miteinander verglichen.

Zudem werden auf den zur Verfügung stehenden Datensatz von 38 südtiroler Ereignissen eindimensionale Modelle angewandt. Es werden zwei empirische, volumsbezogene Ansätze zur Berechnung der Reichweite verwendet, ein für Murgänge neu entwickeltes Modell zur Bestimmung der Auslauflänge, das rein auf topografischen Zusammenhängen beruht und der etablierte Takahashi-Ansatz zur Berechnung der Auslauflänge. Die Resultate werden verglichen, analysiert und es können gewisse Zusammenhänge bei der Betrachtung bestimmter Parameter geschlossen werden.

Abstract

Needs to predict the total travel length and especially the runout of debris flows emerge through requirements of modern natural hazard mapping and planning of other protective measures. The destructive impact caused by torrential processes in alpine regions endangers human lives and facilities, therefore the delineation of endangered areas and impacts of debris-flow events is important to support natural hazard assessment.

The aim of this scientific paper is to apply the new developed two-dimensional prediction models TopRun DF and TopFlow DF and compare them with the more established programs RAMMS and FLATModel, which are based on the Voellmy-approach. TopRun DF rests on an empirical relation between debris-flow volume and the planimetric area of the deposits and on a stochastic algorithm, the Monte Carlo simulation. TopFlow DF has additionally involved the approach of TAKAHASHI (1991) to predict the one-dimensional runout of debris flows. Eight well-chosen events are simulated and the best-fit results are compared with each other.

Furthermore one-dimensional approaches are applied to the whole data base of 38 South-Tyrolean events. Two empirical prediction models based on the event volume to predict the total travel length, a new attempt to evaluate the runout which depends purely on geometric relationships and the well-known approach of TAKAHASHI (1991) to calculate the runout on the fan. The results are compared, analysed and some new relations of certain parameters can be gained.

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Christian Scheidl für die Ermöglichung dieser Arbeit, für die großartige Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Johannes Hübl und dem gesamten Team des Instituts für alpine Naturgefahren danke ich für die angenehme und konstruktive Atmosphäre am Institut. Bei Brian McArdell, Dieter Rickenmann und Christoph Graf bedanke ich mich für die Unterstützung während meines Aufenthalts am WSL in Birmensdorf.

Schließlich danke ich meiner Frau Oriana und meinen Kindern für den geduligen und aufmunternten Beistand während des Entstehens dieser Arbeit.

1 Einleitung

Murgänge zählen neben Lawinen, Hochwässern, Rutschungen, Felsstürzen und Steinschlag zu den wichtigsten alpinen Naturgefahren. Muren sind zwar nicht sehr häufig und die Gefährdungsbereiche sehr lokal, jedoch besitzen sie ein sehr hohes Schadenspotenzial.

In Österreich belegen Murgänge nach Hochwasser, Lawine, Sturm und Erdbeben den fünften Platz im „Ranking“ der Naturgefahren (RUDOLF-MIKLAU, 2009) und werden mit einem hohen Personen- und Schadensrisiko und einem mittleren Katastrophenpotenzial bewertet. Der Gefährdungsbereich für den Menschen und dessen Lebensraum durch dieses Phänomen liegt meist im Auslaufbereich bzw. Ablagerungsbereich von Wildbächen, dem Murkegel.

In den alpinen Regionen sind Murkegel oft besiedelt, um den oft wiederkehrenden Hochwässern des Hauptgewässers zu entgehen. Dabei kann anscheinend eine historische Risikoakzeptanz gegenüber Murganggefahr herrschen. Beispielsweise die Ortschaft Inzing westlich von Innsbruck, Österreich, wurde seit 1807 in ca. 40-jährigen Intervallen von den Murgängen des Enterbaches übermurt (HÜBL et al., 2007; PISCH, 2002).

Durch die zunehmende Be- und Versiedelung sowie infrastrukturelle Maßnahmen werden mehr und mehr potenzielle Gefahrengebiete erschlossen, bzw. umgekehrt, durch veränderte äußere Einflüsse (z.B. Klima) werden ehemals „sichere“ Zonen zu Einflussbereichen von Murgängen. Dies führte in den letzten Jahrzehnten dazu, dass Gebietskörperschaften begannen, für solche und andere mögliche Naturgefahren, die menschliche Siedlungsräume bedrohen, Gefahrenkarten und eine Gefahrenzonenplanung zu erstellen, die in die Raumplanung einfließen. Um Gefährdungsbereiche zu erkennen und eventuelle Schutzmaßnahmen treffen zu können, ist es nötig, die Prozesse zu beobachten, zu erforschen und zu verstehen, um Aussagen treffen zu können.

Murgänge sind sehr komplexe Phänomene, die in verschiedenartiger Weise und in Kombination mit anderen Prozessen auftreten können. Es gibt, wie im Anschluss zu sehen ist, eine Vielzahl an Ansätzen, Murgänge bzw. Aspekte davon, zu modellieren. Die Spanne reicht von sehr stilisierten Modellen, die eine eindimensionale Reichweite berechnen, bis zu komplexen Simulationsprogrammen, die in zweidimensionaler Betrachtung Aufschluss

über zahlreiche Parameter wie Fließhöhen oder Geschwindigkeiten geben.

Es geht in dieser Arbeit um die Betrachtung der von einem Murereignis betroffenen Ablagerungsbereich eines Mureinzugsgebietes. Der Schwerpunkt liegt im Vergleich der benutzten zweidimensionalen Modelle. Vor allem geht es darum, die zwei neuen, auf empirisch-stochastischen (bzw. bei TopFlow DF die Einbindung des konzeptuellen Takahashi-Ansatzes) Grundsätzen basierenden Simulationsmodelle mit zwei Modellen, die auf dem „etablierteren“ Voellmy-Ansatz beruhen, zu vergleichen. Quasi parallel dazu wurden auch vier eindimensionale Ansätze auf den Ereignisdatensatz angewandt und untereinander verglichen. Zum Teil können Resultate der eindimensionalen Modelle auch mit denen der zweidimensionalen verglichen, bzw. neue Erkenntnisse gewonnen werden. Aus einem Datensatz von rund 45 Ereignissen wurden 38 Ereignisse für die Modellierung mit den vier eindimensionalen Modellen verwendet. Die Anwendung der zweidimensionalen Simulationsmodelle erfolgte auf acht ausgewählte Ereignisse dieser 38.

2 Allgemeines

Ein *Murgang* ist als eine Form der *gravitativen Massenbewegung* anzusehen. Solche Massenbewegungen sind *geomorphologische Prozesse*, bei denen Lockermaterialien, aber auch Fels durch den Einfluss der Gravitation bewegt werden. Die Bewegung kann in Form von Kriechen, Gleiten, Fließen, Kippen oder Fallen auftreten und in ihrem zeitlichen Verlauf sehr unterschiedlich sein. Der Einfluss und Anteil an Wasser kann dabei sehr variabel sein.

Murgänge werden den fließenden Prozessen zugeordnet.

2.1 Gravitative Massenbewegungen

Es bestehen mehrere Möglichkeiten, Massenbewegungen zu unterteilen. Eine etablierte Klassifikation stammt von VARNES (1978). In Tabelle 2.1 ist eine auf diesem Ansatz basierende Unterteilung von Massenbewegungen abgebildet. Es wird nach dem primären Mechanismus des Prozesses unterschieden. Eine graphische Darstellung dieser Mechanismen ist in Abbildung 2.1 ersichtlich. Nach ALLEN (1997) sind für jeden Prozesstyp Eigenschaften wie Art des sich bewegenden Materials, Wassergehalt, Geschwindigkeit des Prozesses sowie Aussagen über die Art der Verformung und Bewegungscharakteristiken aufgelistet. (Tabelle 2.1)

Eine spezifischere Klassifizierung für Massenbewegungen des fließenden Typs bieten HUNGR et al. (2001). Hier werden die Prozesse in Abhängigkeit von Fließverhalten, Material und dessen Eigenschaften, Wassergehalt sowie der Geschwindigkeit des Prozesses unterteilt.

HUNGR et al. (2001) beschreiben den Murgang (engl. *debris¹ flow*) im Gegensatz zur Hangmure (engl. *debris avalanche²*) als in seinem Talweg wiederkehrenden Prozess, bestehend aus wassergesättigtem grobkörnigem Sediment mit hoher Geschwindigkeit.

¹engl. *debris* - Schutt, Geröll

²heute wird der Begriff *hillslope debris-flow* verwendet

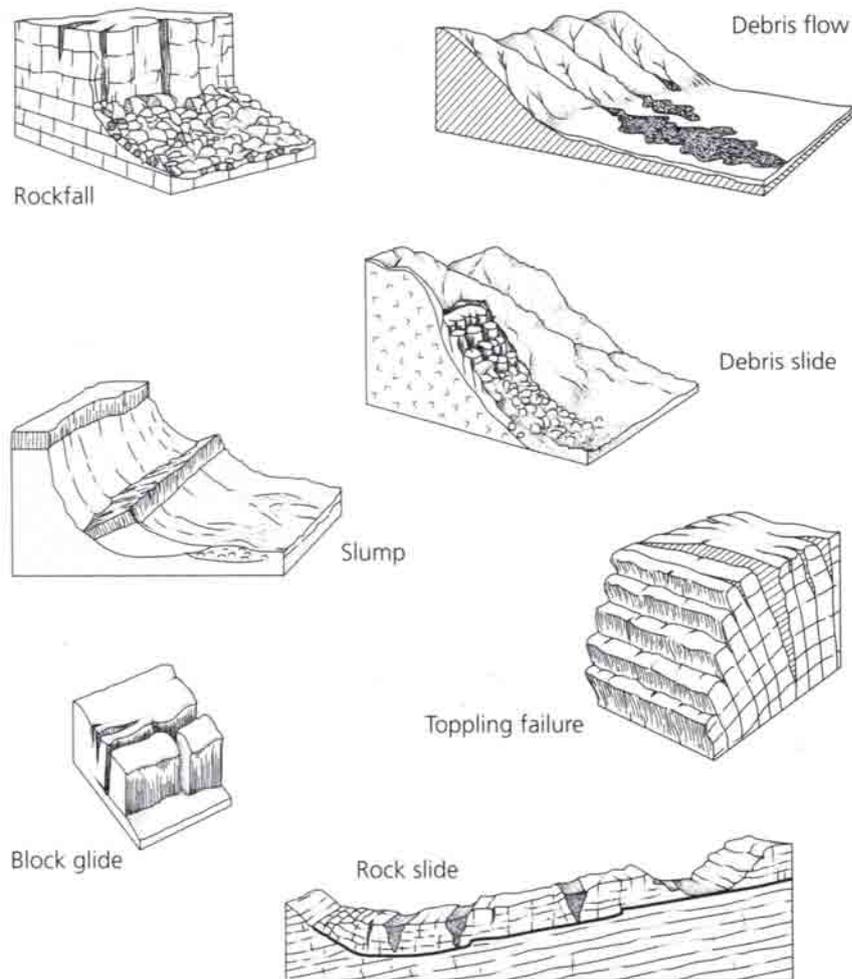


Abb. 2.1: Hauptmechanismen von Massenbewegungen in ALLEN (1997).

Murgänge bewegen sich meist in definierten Gerinnen und bilden in der Auslaufzone typische Ablagerungskegel (engl. *deposition fans*).

Diese genannten Klassifizierungsmethoden sind sehr allgemein angelegt und daher auch international anwendbar. Die Grenzen der einzelnen Prozesse sind aber nur qualitativ erläutert und daher nicht objektiv bestimmbar.

Insbesondere im alpinen Raum erscheint es sinnvoll, Murgänge als einen *gerinnebasierenden Prozess* zu betrachten. Nachfolgend sind diese Prozesstypen und deren mögliche Unterscheidungen dargestellt.

Primary mechanism	Mass movement type	Materials in motion	Moisture content	Type of strain and nature of movement	Rate of movement	
Lateral component predominant	Creep	Rock creep and continuous creep	Especially readily deformable rocks, such as shales and clays and soil	Low	Slow plastic deformation of rock, or soil producing a variety of forms including cambing, valley bulging and outcrop bedding curvature	Very slow to extremely slow
		Solifluction	Soil	High	Widespread flow of saturated soil over low to moderate-angle slopes	Very slow to extremely slow
	Flow	Gelifluction	Soil	High	Widespread flow of seasonally saturated soil over permanently frozen subsoil	Very slow to extremely slow
		Mudflow	>80% clay-sized	Extremely high	Confined elongated flow	Slow
		Slow earthflow	>80% sand sized	Low	Confined elongated flow	Slow
		Debris flow	Mixture of fine and coarse debris (20-80% of particles coarser than sand-sized)	High	Flow usually focused into pre-existing drainage lines	Very rapid
		Debris (rock) avalanche (sturzstrom)	Rock debris, in some cases with ice and snow	Low	Catastrophic low-friction movement of up to several kilometres, usually precipitated by a major rockfall and capable of overriding significant topographic features	Extremely rapid
		Snow avalanche	Snow and ice, in some cases with rock debris	Low	Catastrophic low-friction movement precipitated by fall or slide	Extremely rapid
	Slide	Rock slide	Unfractured rock mass	Low	Shallow slide approximately parallel to ground surface of coherent rock mass along single fracture	Very slow to extremely rapid
		Rock block slide	Fractured rock	Low	Slide approximately parallel to ground surface of fractured rock	Moderate
Debris/earth slide		Rock debris or soil	Low to moderate	Shallow slide of deformed masses of soil	Very slow to rapid	
Debris/earth block slide		Rock debris or soil	Low to moderate	Shallow slide of deformed masses of soil	Slow	
Rotational	Rock slump	Rock	Low	Rotational movement along concave failure plane	Extremely slow to moderate	
	Debris/earth slump	Rock debris or soil	Moderate	Rotational movement along concave failure plane	Slow	
Heave	Soil creep	Soil	Low	Widespread incremental downslope movement of soil or rock particles	Extremely slow	
	Talus creep	Rock debris	Low			
Vertical component predominant	Fall	Rockfall	Detached rock joint blocks	Low	Fall of individual blocks from vertical faces	Extremely rapid
		Debris/earth fall (topple)	Detached cohesive units of soil	Low	Topping of cohesive units of soil from near-vertical faces such as riverbanks	Very rapid
	Subsidence	Cavity collapse	Rock or soil	Low	Collapse of rock or soil into underground cavities such as limestone caves or lava tubes	Very rapid
		Settlement	Soil	Low	Lowering of surface due to ground compaction usually resulting from withdrawal of ground water	Slow

Tab. 2.1: Klassifizierung und Charakterisierung von Massenbewegungen in ALLEN (1997). HUNGR et al. (2001) verstehen unter dem Begriff *debris avalanche* Hangmuren, hier wird dieser Begriff für Bergstürze und ähnliche Prozesse verwendet.

2.1.1 Klassifizierung gerinnebasierender Prozesse

In der ONR-24800 (2009) wird nach der Verlagerungsart zwischen fluviatilen (Hochwasser) und murartigen (Mure) Prozessen unterschieden. Fluviatile Prozesse lassen sich weiter in Hochwasser mit geringem Feststoffanteil und fluviatilen Feststofftransport unterteilen, murartige Prozesse werden in murartigen Feststofftransport und Murgang unterteilt. (Tabelle 2.2)

Eine Klassifizierung erfolgt aufgrund der dargestellten Parameter vor Ort. Durch die zeitliche Verzögerung zwischen Eintritt und Dokumentation des Ereignisses kommt es aber immer wieder zu Schwierigkeiten in der Klassifikation der aufgetretenen Prozessarten vor Ort (SCHEIDL und RICKENMANN, 2008). Daher gibt es Bestrebungen, allgemein anwendbare Methoden zur Unterscheidung dieser Prozesse zu finden.

SCHEIDL und RICKENMANN (2008) unterscheiden bei gerinnebasierenden Prozessen in Wildbächen zwischen:

- fluviatilen Feststofftransport (*fluviatil*)
- murartigem Feststofftransport (*murartig*)
- *Murgang*

Um diese Prozesstypen unabhängig und objektiv unterscheiden zu können, kommen folgende Methoden zum Einsatz.

Zusammenhang der Meltonzahl und der mittleren Kegelneigung¹

BARDOU (2002) präsentierte eine grobe Abgrenzung zwischen Muren und murartigen bzw. fluviatilen Feststoffereignissen indem er die sog. Melton-Zahl (MELTON, 1965) dem durchschnittlichen Neigungsgefälle am Kegel gegenüberstellt. Die Melton-Zahl beschreibt den spezifischen Höhenunterschied des Einzugsgebietes bezogen auf die Einzugsgebietsfläche.

Abbildung 2.2 zeigt den Zusammenhang zwischen der Melton-Zahl sowie der mittleren Neigung am Ablagerungskegel für die im Rahmen der Studie von SCHEIDL und RICKENMANN (2008) erhobenen Daten. Nach Bardou (2002) zeigt die Zone A den Bereich der fluviatilen Feststoffprozesse und Zone C (oberer Bereich) den Bereich für Muren an. Dazwischen liegt der Übergangsbereich, Zone B.

¹Die Bestimmung der Kegelneigung ist in Abschnitt 4.2.6 beschrieben.

Verlagerungstyp	Hochwasser		Mure	
Verlagerungsart	fluvial		murartig	
Terminus (dt.)	Hochwasser	Fluvialer Feststofftransport	Murartiger Feststofftransport	Murgang
Terminus (engl.)	Flood	Bedload transport	Debris flood (hyperconcentrated flow, immature debris flow)	Debris flow
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	schwach Feststofftransport	stark	Murgang
Fließverhalten	Newtonisch	Newtonisch	annähernd Newtonisch	Nicht-Newtonisch
Vol. Feststoffkonzentration (ca. Bereich)	Promillebereich	0-20 %	20-40 %	>40%
Größtkorn	mm-cm	-dm	-m	-m
Dichte (ca. Bereich)	1000 kg/m ³	<1300 kg/m ³	1300-1700 kg/m ³	>1700 kg/m ³
Reinwasserabflussbestimmung möglich	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein
Pegelschlüssel erstellbar	Ja	Ja	Nein	Nein
$Q_{\text{gesamt}}/Q_{\text{Hochwasser}}$	1	1	1-2	2-10 (50)
Viskosität (ungefähr)	0.001-0.01 Pas	0.01-0.2 Pas	0.2-2 Pas	>2 Pas
Scherfestigkeit	Keine	Keine	Keine	Vorhanden
Maßgeblich wirkende Kräfte	Turbulenz, Schleppspannung	Turbulenz, Schleppspannung	Auftrieb, Turbulenz, Schleppspannung, dispersiver Druck	Auftrieb, dispersiver Druck, viskose und friktionale Kräfte
Verteilung der Feststoffe im Querschnitt	Feststoffe sohlennah (rollend, hüpfend, springend) und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe sohlennah (rollend, hüpfend, springend) und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe verteilt im Querschnitt
Ablagerungsform (stumme Zeugen)	Bankige Feinstoffrückstände	Sortierte Fächer und Lappen	Bänke und Lappen, zumeist korngestützt, Grobgeschiebe bis in Höhe Wasserspiegel abgelagert	Murköpfe, Murfirste (Levéés) und zungenförmige Lappen, korn- oder matrixgestützt, zumeist scharfe Begrenzung der Ablagerungen, U-förmiges Abflussprofil
Sortierung der abgelagerten Feststoffe	Vorhanden	Vorhanden	Eher nicht vorhanden	Nicht vorhanden
Entmischung der Ablagerungen	ja	ja	ja/nein	nein
Schaden durch	Wasser und Schweb	Wasser, Schweb und Geschiebe	Feststoffe und Wasser	Feststoffe (und Wasser)

Tab. 2.2: Unterscheidungskriterien für Wildbachprozesse in ONR-24800 (2009).

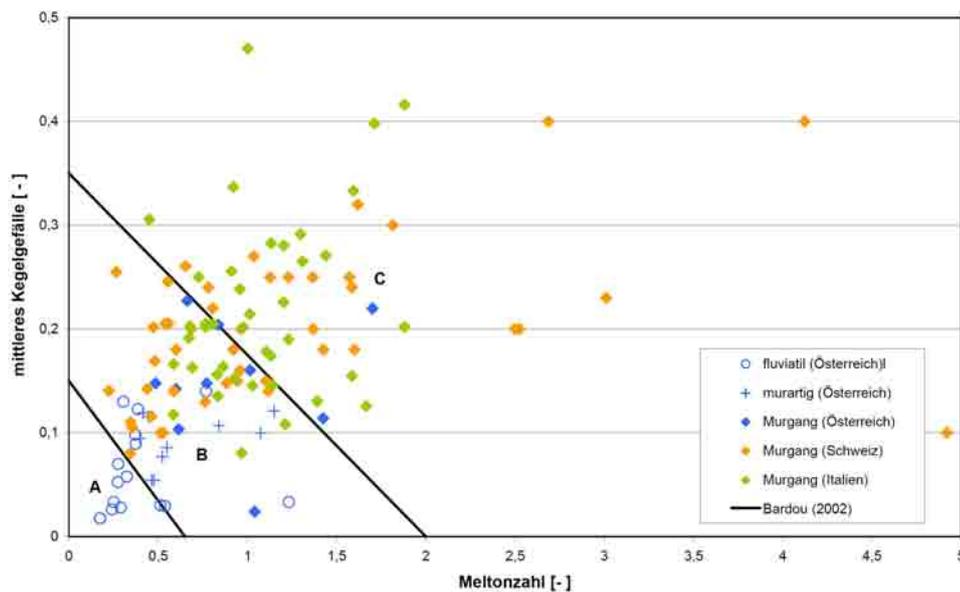


Abb. 2.2: Zusammenhang der mittleren Kegelneigung (average fan slope) und der Melton-Zahl für den Datensatz in SCHEIDL und RICKENMANN (2008). Dargestellt sind auch die Bereiche nach BARDOU (2002): Bereich A, in dem fluviatiler Feststofftransport vorherrscht, Bereich C mit vorwiegend Murgängen und Zone B als Übergangsbereich.

Zusammenhang des Gerinnegefälles und der Einzugsgebietgröße A_{EZG}

MARCHI und D'AGOSTINO (2004) analysierten Muren in den italienischen Alpen und stellten fest, dass fast alle Ereignisse Einzugsgebiete kleiner 20 km^2 und ein Längsgefälle des Gerinnes von über $5,7^\circ$ (10 %) aufwiesen.

RICKENMANN et al. (2008) unterteilten die beobachteten Fließgewässer der Hochwasserereignisse 2005 in der Schweiz aufgrund der Einzugsgebietsgröße und des Längsgefälles des Gerinnes. Sie unterschieden Wildbäche mit einer maximalen Einzugsgebietsgröße von 25 km^2 bei einem Längsgefälle größer $2,9 - 5,7^\circ$ (5-10 %) von den flacheren Gebirgsflüssen. Murgänge traten nur in Einzugsgebieten mit Flächen kleiner 25 km^2 auf. In Abbildung 2.3 ist die Einzugsgebietsgröße gegen das Pauschalgefälle für den Datensatz in SCHEIDL und RICKENMANN (2008) aufgetragen und der von ZIMMERMANN et al. (1997) postulierte empirische Ansatz zur Bestimmung des minimalen Pauschalgefälles¹ S in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße A_{EZG} dargestellt (Gleichung 2.1).

$$S = 0,2 A_{EZG}^{-0,2} \quad (2.1)$$

¹ $S = H/L$, siehe Abschnitt 3.2.1.1

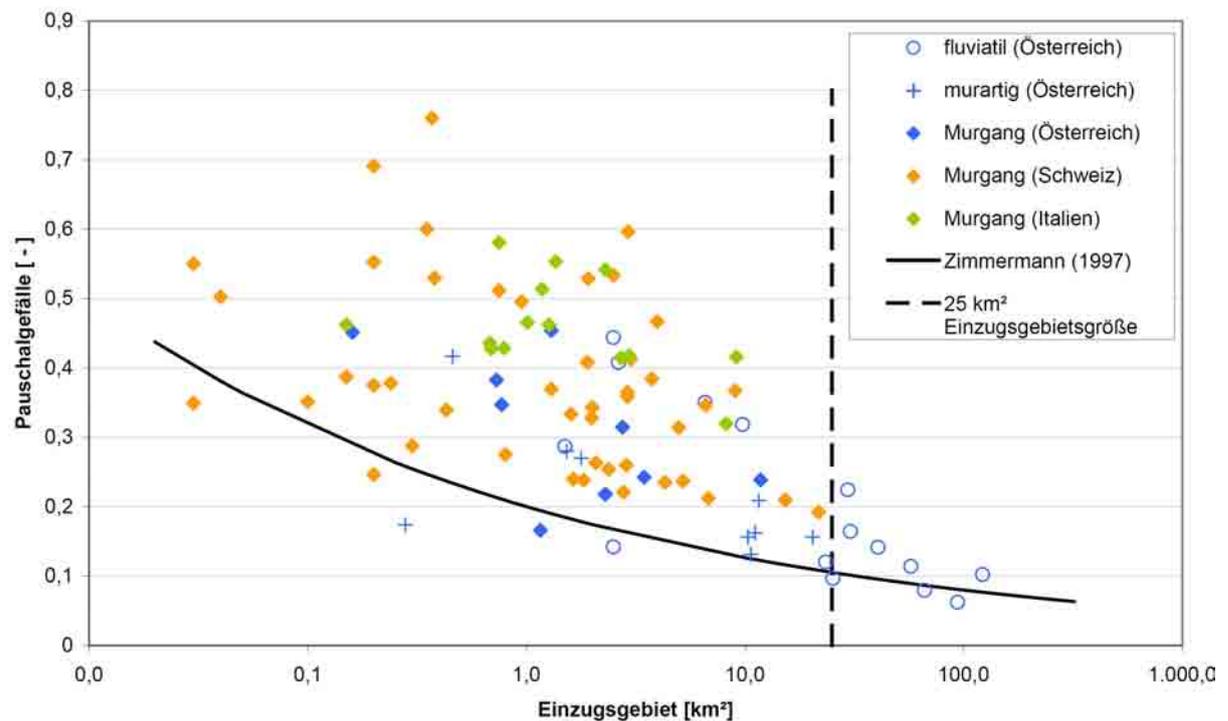


Abb. 2.3: Zusammenhang zwischen Pauschalgefälle und Einzugsgebiet für den Datensatz in SCHEIDL und RICKENMANN (2008); dargestellt sind der Schwellenwert von 25 km^2 Einzugsgebietsgröße und der empirische Ansatz zur Bestimmung des minimalen Pauschalgefälles nach ZIMMERMANN et al. (1997).

Eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung der Prozesse ist die Messung des Feststoffgehalts. Zur Abgrenzung fluviatilen Geschiebetransports vom granularen Murgang existieren in der Literatur verschiedene Grenzwerte für Feststoffkonzentrationen. Nach RICKENMANN und ZIMMERMANN (1993) liegen diese bei 30 % bis 60 %, nach IVERSON (2005) zwischen 30 % und 70 %, bezogen aufs Volumen. Nach Untersuchungsergebnissen der Murgangereignisse von 1987 in der Schweiz (VAW, 1992) muss aber auch der Anteil an Feinmaterial kleiner 1 mm besonders berücksichtigt werden, da dieser großen Einfluss auf die Zähigkeitseigenschaften des Prozesses besitzt.

Die Beprobung und Messung der Feststoffanteile sollte unmittelbar nach dem Ereignis festgestellt werden, die Ergebnisse sind nur Stichproben und müssen vorsichtig interpretiert werden. Meist liegen jedoch für dokumentierte Ereignisse keine Daten zu Feststoffkonzentrationen vor und es muss, wie auch für die Daten in dieser Arbeit, auf andere Klassifizierungskriterien zurückgegriffen werden.

2.2 Murgang

„Kaum eine andere Naturgewalt vernichtet in unseren Hochgebirgen so viele volkswirtschaftliche Werte, als die verheerende Tätigkeit der Wildbäche, welche in dem Abgange von Schuttströmen - MUREN - ihren katastrophalen Höhepunkt erreicht.“

STINY (1910)

Murgänge sind zusammen mit Hochwässern, Schneelawinen und Felsstürzen die wichtigsten Naturprozesse, die in alpinen Gebieten den Lebensraum des Menschen bedrohen. Geröllmassen bis zu mehreren 100.000 m³ und einzelne Felsblöcke in der Grösse von Einfamilienhäusern können dabei verfrachtet werden. Meist sind solche Situationen zwar die Ausnahme, trotzdem tragen Murgänge einen bedeutenden Beitrag zur Formung der Landschaft bei. Obwohl schon seit vielen Jahrzehnten Aufzeichnungen von Murgangkatastrophen mit Todesopfern und Gebäudeschäden vorhanden sind, ist das Phänomen beispielsweise in der Schweiz erst nach den Unwettern von 1987 Gegenstand von systematischen Untersuchungen geworden. Als wichtigste Zone wird der hochalpine Raum, das Periglazial, erachtet, allerdings sind eine große Zahl von Murgängen auch aus den randalpinen Regionen bekannt, wo teilweise ein sehr großes Schadenspotenzial besteht (ZIMMERMANN et al., 1997).

Wie bereits erwähnt betrachten wir hier den Murgang als gerinnebasierenden Prozess. Die wesentlichen Faktoren die zu dieser Art der Umlagerung führen, bestehen aus einer kritischen Kombination von ausreichend erodierbarem Sediment, Zufuhr von Wasser und hohem Gefällsgradienten.

Zur Auslösung muss der Niederschlag in seinem Einzugsgebiet bestimmte Schwellenwerte übersteigen, so müssen beispielsweise in den Schweizer Alpen mindestens 40 mm Niederschlag fallen und es ist eine minimale, von der Dauer abhängige Niederschlagsintensität erforderlich (ZIMMERMANN et al., 1997).

2.2.1 Definition

Muren zählen zu den Massenverlagerungsprozessen, die mit hoher Geschwindigkeit große Volumina an Feststoffen transportieren können. Als Murgang wird eine zeitlich zusammenhängende Abfolge von Murschüben bezeichnet. Ein *Murschub* stellt eine hochkonzentrierte Suspension aus Wasser, Fein- und Grobkorn und Wildholz dar, der in *Front*, *Körper* und *Schwanz* gegliedert werden kann. Die Murfront besteht

vorwiegend aus groben Blöcken mit geringem Feinanteil. Der Murkörper selbst stellt ein Gemisch aus allen Kornfraktionen dar. Durch die hohe Viskosität kann im Murkörper eine laminare Strömung entstehen. Der Murschwanz zeigt einen Phasenübergang in einen turbulenten Strömungszustand. Die Abflussgeschwindigkeit wird von der Art und Konzentration der Feststoffe (vor allem an der Murfront) und vom bewegten Volumen (des Murkörpers) beeinflusst. Die Ablagerungen von Murschüben weisen keine Entmischung der Kornfraktionen auf, obwohl sich der Murkopf langsamer als der Murkörper bewegt (HÜBL, 2001).

„Debris flows occur when masses of poorly sorted sediment, agitated and saturated with water, surge down slopes in response to gravitational attraction.“

IVERSON (1997)

Treibende Kraft ist also die Gravitation. Dies erkannte schon STINY (1910) und nannte des weiteren das Wasser als „bewegende Kraft“ der Murgänge. IVERSON (1997) geht von einer Energiekaskade aus, in der der Prozess von anfänglicher Bewegung bis zur Ablagerung verschiedene Energiemetamorphosen durchläuft.

Wie in Abschnitt 2.1.1 bereits erörtert, ist der Übergang vom granularen Murgang zu anderen Prozesstypen ein fließender. In Abbildung 2.4 sind die wichtigsten Prozesstypen zur gravitationsinduzierten Massenverlagerung in Abhängigkeit von Partikelgröße und Wassergehalt grafisch dargestellt.

Besteht der Feststoffanteil überwiegend aus groben Komponenten, wie das bei alpinen Murgängen meist der Fall ist, spricht man von *granularen Murgängen* (engl. *granular debris-flows*). Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit granularen Muren. Erhöht sich der Feinanteil, so spricht man von *viskosem Murgang* (*Schlammstrom*, engl. *mud flow*) bzw. bei noch höherem Feinanteil von *hyperkonzentriertem Abfluss*. Bei vulkanischem Ausgangsmaterial ist von *Lahars* die Rede.

TAKAHASHI (1991) unterscheidet in steinige Murgänge (engl. *stony debris-flows*), „unausgereifte“ Murgänge (engl. *immature debris-flows*) und turbulente Schlammströme (engl. *turbulent mud-flows*).

Die große Variation der Verhältnisse von fester und fluider Phase ist für granulare Murgänge charakteristisch (TOGNACCA, 1999). Nach WEBER (2004) ist die Kornverteilung der Feststoffe weit gefächert, wobei die gröberen Fraktionen überwiegen und der Anteil der feinsten Fraktionen innerhalb von ein paar Prozent liegt.

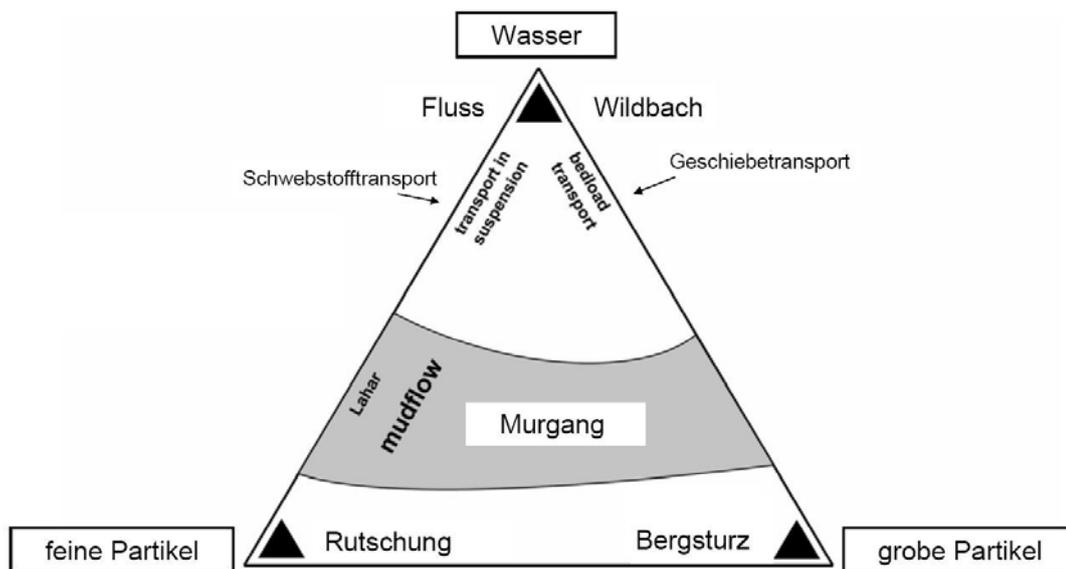


Abb. 2.4: Dreiphasendiagramm aus RICKENMANN (2006b).

Neben den anorganischen Bestandteilen von Grob- und Feinmaterial sowie Wasser können Murgänge auch organisches Material mit sich führen. Dabei kann es sich um Baumstämme oder ähnliches handeln, die im Gerinne lagen oder vom Gerinnerand mitgerissen wurden (HUNGR, 2005).

2.2.2 Mobilisierung und Transport

2.2.2.1 Entstehung und Auslösung von Murgängen

Die Entstehungszonen von Murgängen befinden sich meist in hochgelegenen, schwer zugänglichen und auch schwer einsehbaren Gebieten. Nicht zuletzt aus diesem Grund sind Dokumentationen über die auslösenden Faktoren selten und müssen meist im Nachhinein erörtert und oft geschätzt werden. Ob, wann und wie ein Ereignis zustandekommt bzw. zu erwarten ist, ist ein Zusammenspiel vieler Faktoren. ZIMMERMANN et al. (1997) formulierten drei Aspekte der Murganganalyse:

Räumliche Aspekte beinhalten Fragen der Murfähigkeit von Einzugsgebieten, den zu erwartenden Magnituden und den von Murgängen gefährdeten Flächen.

Zeitliche Aspekte beschäftigen sich mit für die Murgangauslösung verantwortlichen hydrometeorologischen Verhältnissen und mit der Häufigkeit bzw. Wiederkehrdauer solcher Ereignisse.

Funktionale Aspekte beinhalten die rheologischen und hydraulischen Eigenschaften des Murganges und sind somit wichtig für das Herleiten von Aussagen bezüglich Reichweite, betroffene Flächen und auftretende Geschwindigkeiten.

ZIMMERMANN et al. (1997) verwenden für den räumlichen und zeitlichen Aspekt das Konzept der *Disposition* als theoretische Grundlage. Unter Disposition versteht man eine Bereitschaft oder Anfälligkeit eines Gebietes zur Bildung und Auslösung von Prozessen. Sie beschreibt den Systemzustand über die Zeit. Die Disposition von Murgängen ist von geologischen und hydrologischen Eigenschaften sowie von der Topographie abhängig.

Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, gehen ZIMMERMANN et al. (1997) von einer Grunddisposition und einer variablen Disposition aus. Erstere ist konstant (langfristige Variabilität ist allerdings möglich) und bestimmt das räumliche Auftreten und die Magnitude von Ereignissen. Die variable Disposition beeinflusst primär das zeitliche Auftreten, aber auch die Magnitude von Murgängen.

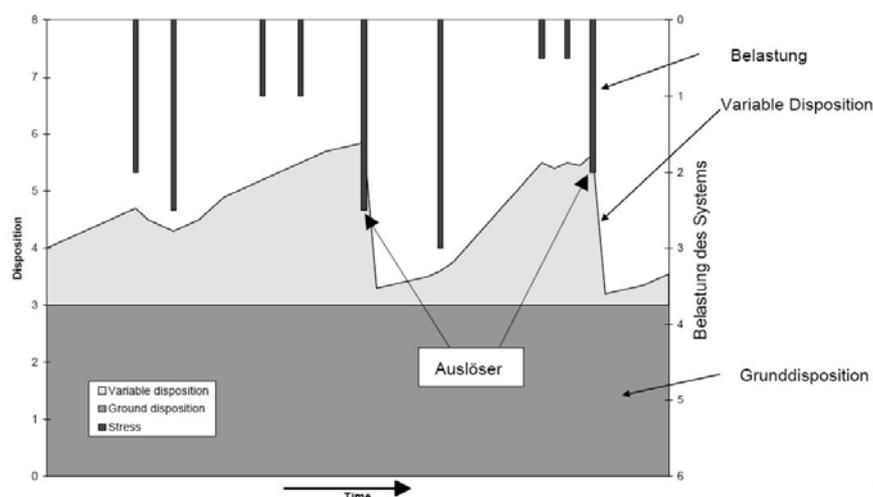


Abb. 2.5: Murgangauslösung: Grunddisposition, variable Disposition und Auslöseereignis nach ZIMMERMANN et al. (1997).

Das auslösende Ereignis in Abbildung 2.5 ist episodisch und stellt die Systembelastung von aussen dar, die zur Auslösung des Ereignisses führt.

Die Entstehung von Murgängen lässt sich nach dem Entstehungsort oder nach dem Entstehungsmechanismus klassifizieren. TAKAHASHI (1991) unterscheidet zwischen:

- Hanganrisszonen
- und Gerinneanrisszonen.

TOGNACCA (1999) beschreibt eine Klassifikation nach den physikalischen Mechanismen, die einen Murgang auslösen. Er differenziert zwischen:

- Entstehung infolge bodenmechanischer Instabilität
- und Entstehung infolge progressiver Erosion.

2.2.2.2 Anrisszone

Meist beginnt ein Murgang mit einem Böschungsbruch im oberen Einzugsgebiet eines Gerinnes oder an einem Seitenhang. In der Folge kann sich eine solche flachgründige Rutschung zu einem Murgang entwickeln. Es ist aber auch möglich, dass das Gerinnebett selbst instabil wird und unter hohem Abfluss spontan einen Murgang auslöst (HUNGR, 2005). Ein weiterer typischer Auslösemechanismus, wenn auch weniger häufig, tritt durch kurzzeitige Verklausung an einer Einengung im Gerinne auf. Diese Verklausung entwickelt sich durch plötzliche Mobilisierung („Dammbruch“) zu einem Murgang (RICKENMANN, 2006b). In Abbildung 2.6 sind diese Auslösemechanismen grafisch dargestellt.

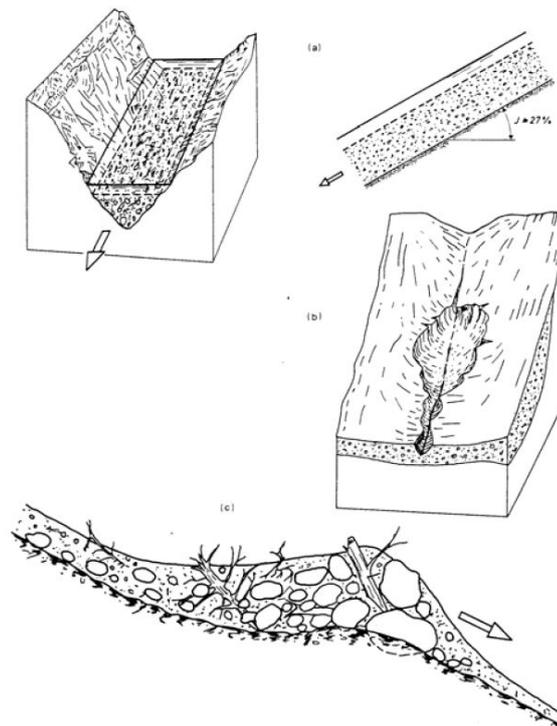


Abb. 2.6: typische Auslösemechanismen: (a) Mobilisierung von Material im Bachbett („Sohlverflüssigung“), (b) Hangrutschung, (c) kurzzeitiger Aufstau - plötzliche Mobilisierung; in RICKENMANN (2006b).

Eine ausführliche Darstellung weiterer Auslöse- bzw. Entstehungsmechanismen findet sich in TOGNACCA (1999).

Üblicherweise spielt sich die Startzone von Murgängen in steilen Gebieten mit Neigungen von 20° bis 45° ab. Auf flacheren Neigungen reicht die potenzielle Energie nicht aus, um ein bodenmechanisches Versagen in granularem Sediment auszulösen. Andererseits ist auf Hängen über 45° kaum, oder kein erodierbarer Boden vorhanden (HUNGR, 2005).

Das mobilisierbare Lockermaterial ist meist Hangschutt, Geschiebeablagerung oder Moränenmaterial.

2.2.2.3 Transitzone

Als Transitzone versteht man räumlich gesehen den Bereich unterhalb der Anrisszone bis zum Beginn der Ablagerung. Meist verläuft diese Zone im Gerinne. Sollte kein ausgeprägtes Gerinne existieren, so schaffen sich Murgänge beispielsweise in Schutthalden ihr eigenes Gerinne (COSTA und FLEISHER P. J., 1984).

Der Name ließe darauf schließen, diese Zone würde nur passiert, vielmehr finden aber Umlagerungsprozesse statt. Es wird erodiert, das heißt, es wird weiter Material aus dem Bachbett oder aus den Seitenhängen aufgenommen, welches zur Vergrößerung des Murgangvolumens beiträgt, andererseits kann aber, natürlich in weit geringerem Umfang, auch Material akkumuliert werden.

Anders als bei Hochwasserereignissen wird die Gerinnegeometrie viel gravierender verändert. Es sind sehr starke Eintiefungen möglich, wie die Untersuchungen der Schweizer Murgangereignisse von 1987 im Schlussbericht des EIDGENÖSSISCHES VERKEHRS- UND ENERGIEWIRTSCHAFTSDEPARTMENT (1991) zu lesen ist.

Ablagerung in der Transitzone findet vor allem seitlich statt und wird als *Levèebildung* bezeichnet. Diese seitlichen Levées weisen keine Sortierung nach Korngröße auf und können nach GAMMA (2000) aufgrund der kohäsiven, zementierenden Wirkung der Murgang suspension steiler gelagert sein als der innere Reibungswinkel des Lockermaterials, aus dem sie aufgebaut sind.

Murgänge bewegen sich in ausgeprägten Wellen, sogenannten *Murschüben* talwärts. Ein Ereignis kann aus einem Schub oder auch hunderten von aufeinanderfolgenden Schüben bestehen (HUNGR, 2005). Zwischen diesen Schüben findet eher fluviatiler Abfluss statt. Die Ursachen für die Entstehung dieser Schübe können variieren. Ungleichmäßiger Abfluss

infolge longitudinaler Verteilung des Murgangmaterials ist ein Grund (HUNGR, 2005), dies zeigen auch die Versuche im Testkanal für künstliche Murgänge des USGS¹ (IVERSON, 1997).

Wie in Abbildung 2.7 zu sehen, zeigen solche Schübe einen charakteristischen *Murkopf* aus Blöcken und grobem Material, relativ frei von verbindender Matrix aus Wasser und Feinmaterial. IVERSON (1997) nennt einerseits kinetische Siebung, andererseits die Aufnahme grober Blöcke in der Transitzone als Grund für die Ausbildung eines Murkopfes. Nach Angaben von COSTA und FLEISHER P. J. (1984) können in Abhängigkeit von der Fließtiefe des Murgangs tonnenschwerer Blöcke über weite Strecke transportiert werden. Dahinter folgt der sich verjüngende *Murkörper* in Form einer Suspension aus feinerem Material und Wasser.

Der *Murschwanz* wird von turbulent fließendem, mit viel Sediment angereichertem Wasser, ähnlich einem fluviatilen Ereignis mit intensivem Geschiebetransport, gebildet (HUNGR, 2005).

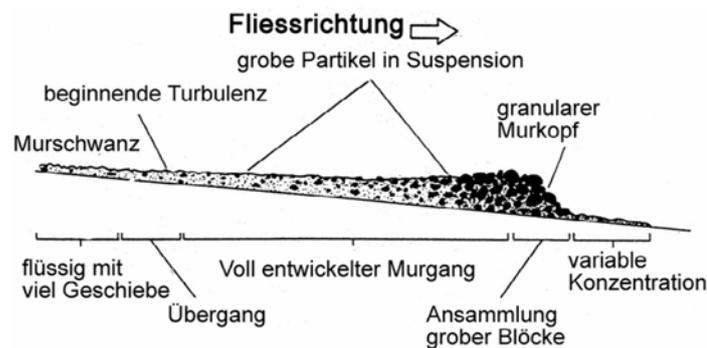


Abb. 2.7: Murschub nach Pierson (1986), modifiziert, in RICKENMANN (2006b).

Weitere Ursachen des schubartigen Charakters granularer Murgänge können nach HUNGR (2005) räumlich unterschiedliche Anrisszonen sein, die zu verschiedenen Zeitpunkten Schübe verursachen. Auch kurzzeitige Verklausungen an Engstellen im Gerinne und darauffolgender Remobilisierung führen zu diesem Phänomen.

Die Zeitintervalle der Schübe können Sekunden bis zu Stunden betragen.

IVERSON (1997) beschreibt den Abfluss als instationär und ungleichförmig. Spitzengeschwindigkeiten können 10 m/s übersteigen, sodass Massenträgheitskräfte wirksam werden. RICKENMANN (2002) gibt für alpine Murgänge maximale

¹United States Geological Survey, dt. Geologischer Dienst der Vereinigten Staaten

Geschwindigkeiten bis zu 15 m/s und Spitzenabflüsse von 100 bis 1000 m³/s an; COSTA und FLEISHER P. J. (1984) sprechen von Geschwindigkeiten zwischen 0,5 und 20 m/s.

Alle beteiligten physikalischen Prozesse, die das Fließverhalten von Murgängen bestimmen, sind bis dato nicht geklärt. Einen Einblick in die komplexe Physik von Murgängen bieten IVERSON (1997) und COSTA und FLEISHER P. J. (1984). Physikalisch gesehen spielen die Interaktionen zwischen Feststoff und Fluid, die Reibung und Kollisionen der Körner eine zentrale Rolle. Ein Murgang erzeugt unausgeglichene Wasserdrücke und Fluktuationen der Partikel innerhalb der granularen Strömung.

RICKENMANN (1996) gibt als charakteristische Eigenschaften von Murgängen unter anderem eine breite Kornverteilung, die über die Abflusstiefe mehr oder weniger gleich verteilt ist, an. Das Fließverhalten ist stark von der Materialzusammensetzung und dem Wassergehalt abhängig (WEBER, 2004) und machen es so unmöglich, ein einheitliches physikalisches Fließgesetz zu formulieren. Diese Eigenschaften können innerhalb eines Murganges und eines Einzugesgebietes variieren. Nach RICKENMANN (1996) kommen Dichten des Wasser-Feststoffgemisches von 1.600 bis 2.200 kg/m³ vor. COSTA und FLEISHER P. J. (1984) vergleichen das Fließverhalten mit dem nassen Betons. RICKENMANN (1996) vergleicht das Fließ- und Ablagerungsverhalten von Murgängen mit dem von Nassschneelawinen.

Da die Wasser-Feststoff-Suspension eine Nicht-Newton'sche Flüssigkeit darstellt, fällt das Verformungs- und Fließverhalten ins Wissensgebiet der *Rheologie*. Die einfacheren Modellansätze betrachten weiters den Murgang als homogenes Fluid (Ein-Phasen Modelle) und gehen je nach Anwendung von laminaren oder turbulenten Newton'schen Fließen, von einer Bingham'schen Flüssigkeit, vom Herschel-Bulkley-Fließgesetz (siehe Seite 45) oder von alternativen Modellen, welche die Kornscherung beschreiben (BAGNOLD, 1954; TAKAHASHI, 1991; IVERSON, 1997; IVERSON und DENLINGER, 2001; O'BRIEN et al., 1993) aus. Empirische Modelle wie jene von Chèzy oder Strickler aus der Gerinnehydraulik, die auch von Newton'scher Flüssigkeit ausgehen, finden ebenfalls Anwendung. Weiters finden sich in der Literatur Kombinationen und Erweiterungen dieser Ansätze.

2.2.3 Ablagerung

Die Ablagerung beginnt mit einer Abnahme des Gefällsgradienten und der dadurch reduzierten Fließgeschwindigkeiten. Auch eine starke Erhöhung der Gerinnebreite (am Schwemmkegel geht eine Erhöhung der Breite meist mit dem Verflachen des

Geländes einher) oder Wasserverlust sind Gründe für beginnende Akkumulation. Weiters können Verklausungen oder Hindernisse wie Brücken, Durchlässe, Murbrecher oder Retentionsbecken zur Ablagerung eines Murganges bzw. von Teilen davon führen. Die Widerstandskräfte im Inneren der Murgangmasse und jene zum Untergrund hin übersteigen die gravitationsbedingten treibenden Kräfte – die Grenzschubspannung wird unterschritten und es kommt zum Stillstand der Massen. Üblicherweise findet die Ablagerung auf definierten Schwemmkegeln statt, die von vorhergehenden rezenten Ereignissen gebildet wurden (siehe auch Abb. 4.3 und Abb. 4.2).

Während man früher davon ausging, dass solche Schwemmkegel ausschließlich von fluviatilen Ereignissen geprägt werden, wurde bald der bedeutende Einfluss von Murgängen auf diese geomorphologisch jungen Erscheinungen erkannt. Schwemmkegel werden meist von verschiedenen Ablagerungsprozessen gebildet, es gibt welche, die fast ausschließlich durch Murgangaktivitäten entstanden, während andere mehr alluviale Bildung aufweisen und durch Murgangablagerung nur überprägt werden (COSTA und FLEISHER P. J., 1984).

Murkegel zeigen eine ganz charakteristische Ausprägung, die sie von anderen Ablagerungsprozessen unterscheidet. Sie sind in der Regel deutlich steiler als fluviatile Kegele von ähnlicher Größe. Bei den Auswertungen der Ereignisse 1987 in der Schweiz schwankte das Kegelegefälle zu Beginn der Ablagerung zwischen 9° und 27° , die flachsten Ablagerungsbereiche hatten Gefälle von 3° bis 11° (HAEBERLI et al., 1991).

Murgangablagerung ist unsortiert oder invers geschichtet. Zudem weist das abgelagerte Material zur Umgebung eine scharfe Begrenzung auf. Dies weist auf die nicht-Newton'schen Eigenschaften der Feststoff-Wasser-Matrix hin und zeigt, dass diese eine Scherfestigkeit besitzt (COSTA und FLEISHER P. J., 1984).

Bei der longitudinalen Betrachtung eines Murganges kann man den Prozess als Ganzes, von der Anrisszone bis zur Ablagerung betrachten, oder man interessiert sich nur für den Ablagerungsbereich am Kegel. Bei Ersterem spricht man von der *Reichweite* (engl. *total travel length*) eines Murganges, bei Zweitgenanntem von der *Auslauflänge* (engl. *runout*) (RICKENMANN, 1999).

2.2.4 Reichweite L

Die Reichweite L eines Murganges bezeichnet die horizontale Distanz vom obersten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung. Dabei wird nicht die direkte

Verbindung dieser beiden Punkte verstanden, sondern die Länge des Fließweges, also im Regelfall des Gerinnes. Trägt man das Längsprofil des Fließweges auf, kann man die Reichweite horizontal ablesen (Abbildung 2.8 und 4.2).

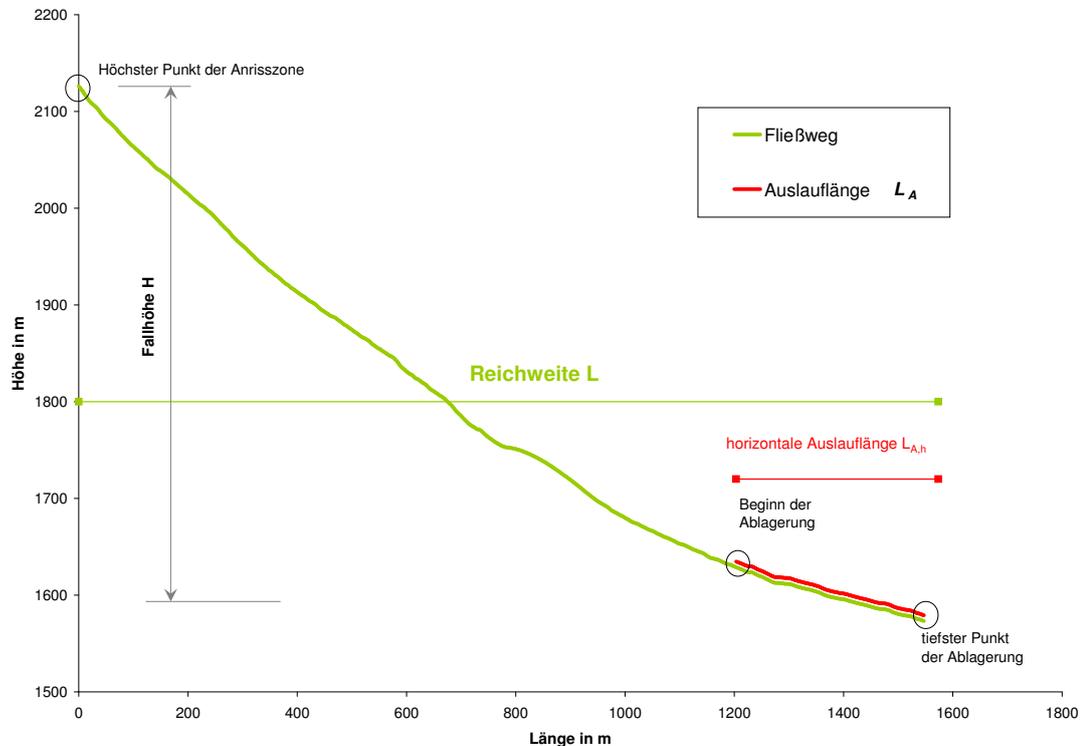


Abb. 2.8: Darstellung der Reichweite L und der Auslauflänge L_A am Beispiel des Berglerbaches.

2.2.5 Auslauflänge L_A

Als Auslauflänge L_A eines Murganges bezeichnet man die Länge der Ablagerung. Wie in Abbildung 2.8 zu sehen, misst man diese Länge ebenfalls als horizontale Distanz vom Beginn der Ablagerung dem Fließweg folgend bis zum tiefsten und entferntesten Punkt der Ablagerung.

2.3 Gefahrenzonenplanung und die Rolle der Murganggefahr in der Gefahrenkartierung am Beispiel Südtirol

Ziel einer Gefahrenzonenplanung (GZP) ist eine flächendeckende Erfassung und Kennzeichnung von Gefahrenzonen, um der Flächenwidmung und anderen raumplanerischen Instrumenten eine Grundlage zu bieten. Die Qualität und damit nachhaltige Schutzfunktion der Gefahrenkartierung hängt von einer umfassenden Beurteilung der Gefahrenpotenziale mit entsprechenden Methoden und Planungswerkzeugen ab.

Die Gefahrenzonenplanung stellt einen passiven Schutz menschlicher Einrichtungen vor Naturgefahren wie Überschwemmung, Lawinen oder Massenbewegungen dar.

Je nach Nation bzw. Land oder Region kann die GZP unterschiedlich organisiert und ausgeprägt sein. Da die in dieser Arbeit verwendeten Ereignisse in Südtirol liegen, wird im folgenden die Gefahrenzonenplanung und der Stellenwert von Murganggefahren darin anhand der Südtiroler Gesetzeslage beschrieben.

Die Richtlinie der AUTONOME PROVINZ BOZEN SÜDTIROL - ABTEILUNG RAUMORDNUNG (1997) beruht auf dem *Landesraumordnungsgesetz* von 1997 und der *Durchführungsverordnung betreffend der Gefahrenzonenpläne*. Es wird die Erstellung der Gefahrenzonenpläne (GZP) und die Klassifizierung des spezifischen Risikos (KSR) beschrieben und somit ein sogenannter Risikoplan (RZP) erstellt.

Die dafür betrachteten, in Südtirol relevanten, Naturgefahren werden folgendermaßen definiert:

- **Massenbewegung:** Sturz, Rutschung, Einbruch Hangmure
- **Wassergefahren:** Überschwemmung, Übersarung, **Vermurung**, Erosion
- **Lawinen:** Fließlawine, Staublawine, Gleitschnee

Diese sind einzeln zu untersuchen und die jeweiligen Gefahrenstufen zu definieren.

Die Erstellung des Risikoplanes erfolgt in drei Arbeitsphasen:

- Phase I: Erkennung, Bestimmung und Dokumentation der Flächen, welche einem hydrogeologischen Risiko ausgesetzt sind

- Phase II: Abgrenzung und Beurteilung der Gefahrenstufen
- Phase III: Bewertung des spezifischen Risikos und Maßnahmenplanung.

Phase I und II führt zum GZP und beruht auf der sogenannten „Schweizer Methode“ (veröffentlicht vom BUWAL¹, 1998/1999). Nach den Südtiroler Gesetzgebungszuständigkeiten haben die Gemeinden Phase I und II auszuarbeiten. In Phase III ist zusätzlich eine Risikozonenkarte zu erarbeiten.

Dabei muss der Zustand der bestehenden Schutzbauten beurteilt und ihre Schutzwirkung berücksichtigt werden. Sie verringern die Intensität und damit die Gefahr eines Ereignisses in Bezug auf die betroffenen Objekte. Änderungen des Verbauungszustandes haben Auswirkungen, daher muss ein GZP periodisch aktualisiert werden.

Die Planung von Schutzbauten und Festlegung von Prioritäten sind aber nicht Inhalt des Gefahrenzonenplans. (GIUS, 2005)

Phase I - Gefahrenerkennung und Dokumentation

Um in angemessener Zeit und mit abschätzbarem Aufwand für das gesamte Land Gefahrenzonenpläne zu erhalten, wird das jeweilige Planungsgebiet in Abhängigkeit von den bestehenden und geplanten Siedlungen und Nutzungen in 3 Kategorien von Bearbeitungstiefe eingeteilt. Dies sind einerseits Flächen mit starker Urbanisierung (Kategorie 3), die detailliert untersucht werden, andererseits natürliche, unbebaute Gebiete mit lediglich geringer infrastruktureller Nutzung (Kategorie 1), die nicht zwingend untersucht werden müssen.

Die Datenerhebung erfolgt durch:

1. historische und bibliographische Recherchen
2. Erkennung und Bestimmung der unterschiedlichen Phänomene (Luftbilder...)
3. Analyse thematischer Karten
4. Kartierung im Gelände.

Endprodukte dieser Phase sind eine Karte mit den unterschiedlichen Bearbeitungstiefen im Maßstab 1 : 25.000 und eine Karte der Phänomene, M 1 : 5.000 bzw. M 1 : 10.000.

¹Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Phase II - Gefahrenbeurteilung

Die Abschätzung der jeweiligen Gefahr eines Phänomens erfolgt mithilfe der Kombinationsmatrix (Abbildung 2.9) nach Festlegung der Intensität und der Eintrittswahrscheinlichkeit.

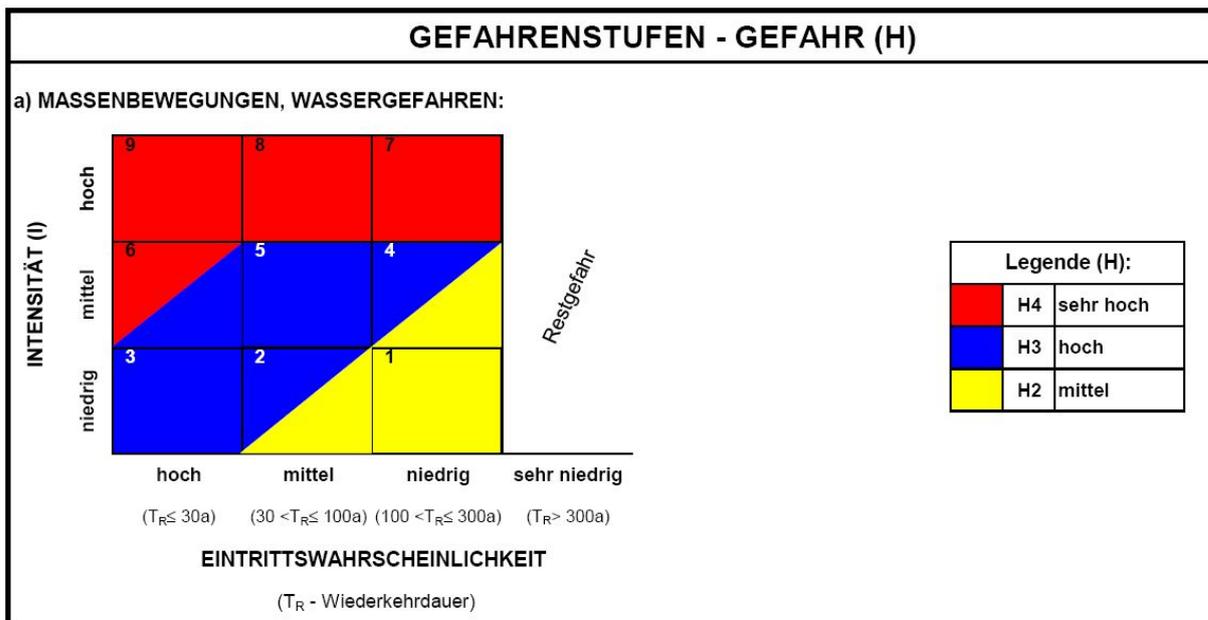


Abb. 2.9: Kombinationsmatrix der Gefahrenstufen, modifiziert nach BUWAL (1998), für Massenbewegungen und Wassergefahren; aus der Richtlinie der AUTONOME PROVINZ BOZEN SÜDTIROL - ABTEILUNG RAUMORDNUNG (1997)

Daraus ergeben sich 4 Stufen der Gefahr:

H 4 (rot) - Verbotsbereich

Sehr hohe Gefahr für Menschen, Gebäude und Infrastruktur; Personen sind sowohl innerhalb als auch außerhalb von Gebäuden gefährdet; mit plötzlicher Zerstörung von Gebäuden ist zu rechnen.

H 3 (blau) - Gebotsbereich

Hohe Gefahr; mit funktionellen Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen ist zu rechnen; Personen sind innerhalb von Gebäuden nicht gefährdet.

H 2 (gelb) - Hinweisbereich

Mittlere Gefahr; mit geringen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur ist zu rechnen; Personen sind auch im Freien nicht gefährdet.

H 1 - Restgefahr

Dieses Konzept beinhaltet eine Beurteilung der Gefahr durch Naturereignisse für eine maximale Wiederkehrdauer von **300 Jahren**. Sehr seltene Ereignisse oder Prozesse mit sehr hoher Intensität fallen in diese Kategorie. Sie werden nicht auf der Gefahrenzonenkarte dargestellt, aber im Begleitbericht des GZP beschrieben.

Untersuchte Gebiete, die zum Zeitpunkt der Untersuchung keine Gefahr (H4-H2) aufweisen, werden grau ausgewiesen.

Das Produkt dieser Phase ist der Gefahrenzonenplan, bestehend aus Gefahrenzonenkarte (M 1:10.000 bzw. 1:5.000) samt Legende und ein ausführlicher Bericht, in dem Erläuterungen, verwendete Methoden, Grundlagen, u.a. beschrieben sind.

Die Gefahr durch den Prozess Murgang wird bei dieser Betrachtung als Vermurung bezeichnet und zu den „Wassergefahren“ gezählt. In Tabelle 2.3 sind Grenzwerte in Abhängigkeit der Intensitätsstufe für die Wassergefahren dargestellt.

Tab. 2.3: Tabelle der Grenzwerte und der Intensitätsstufen für „Wassergefahren“, modifiziert nach BUWAL, 1998; aus der Richtlinie der AUTONOME PROVINZ BOZEN SÜDTIROL - ABTEILUNG RAUMORDNUNG (1997)

<i>Prozess</i>	<i>Grenzwerte</i>	<i>niedrige Intensität</i>	<i>mittlere Intensität</i>	<i>hohe Intensität</i>
<i>Überschwemmung, Übersarung</i>	Überschw. <1,5% Übersar. 1,5-15% <30% Feststoffe <40 km/h	$h < 0,5 \text{ m}$ oder $v \times h < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$	$h = 0,5\text{--}2 \text{ m}$ oder $v \times h = 0,5\text{--}2 \text{ m}^2/\text{s}$	$h > 2 \text{ m}$ oder $v \times h > 2 \text{ m}^2/\text{s}$
<i>Vermurung</i>	>15% Neigung 30-70% Feststoffe 40 - >60 km/h	nicht bekannt	$M \leq 1 \text{ m}$ oder $v \leq 1 \text{ m/s}$	$M > 1 \text{ m}$ oder $v > 1 \text{ m/s}$
<i>Erosion s.l.</i>	immer präsent	$d < 0,5 \text{ m}$	$d = 0,5\text{--}2 \text{ m}$	$d > 2 \text{ m}$

h=Wasserhöhe; **v**=Geschwindigkeit; **M**=Ablagerungsmächtigkeit; **d**=mittlere Erosionstiefe bzw. Ufererosion, orthogonal zu Hang/Böschung/Sohle/GOK gemessen; **v x h**=Strömungsdruck

Für die Analyse von Murgängen ist die Nutzung mathematischer Modelle nicht zwingend vorgeschrieben, da diese nach dem heutigen Stand der Wissenschaft mit Unsicherheiten behaftet sind. Neben den anerkannten empirischen Formeln aus der wissenschaftlichen Literatur können mathematische Modelle verwendet werden, deren Zuverlässigkeit und Grenzen erläutert werden müssen.

Phase III - Risikobewertung und Maßnahmenplanung

Gefährdete Objekte (Siedlungen, Gewerbegebiete, Infrastrukturen...) werden ermittelt und in Kategorien der Schadensanfälligkeit von V4 (sehr hoch) bis V1 (niedrig) eingestuft.

Das Risiko entsteht aus Interaktion der Gefahrenstufe aus dem GZP und der Schadensanfälligkeit. Dabei entsteht die Kombinationsmatrix von Gefahrenstufe und Schadensanfälligkeit, aus der das **spezifische Restrisiko** abgelesen werden kann.

Die in dieser Phase entstehende Risikokarte soll eine Hilfe für Gemeinden und Landesämter u. a. in der Festlegung von Prioritäten bei der Planung von Schutzmaßnahmen sein.

3 Methoden zur Bestimmung der Reichweite

Bei der Beobachtung naturwissenschaftlicher Phänomene gibt es grundsätzlich verschiedene Betrachtungsweisen. Will man Gesetzmäßigkeiten oder Zusammenhänge erkennen um etwa Aussagen über zukünftige Phänomene zu treffen, bildet man je nach gewählter Methodik ein Modell.

Diese Methoden können sehr unterschiedlich sein. Durch Sammlung von Ereignisdaten lassen sich beispielsweise empirische Zusammenhänge erkennen oder es kann auf physikalischem Weg versucht werden, ein Phänomen nachzubilden.

In den folgenden Abschnitten wird zuerst eine allgemeine Einführung zum Thema Modell, Modellbildung und zu verschiedenen Modelltypen gegeben. Anschließend wird ein Überblick über Modelle zur Bestimmung der Reichweite bzw. der Ausläufänge von Murgängen gegeben.

In den weiteren Abschnitten werden die in dieser Arbeit verwendeten Modelle vorgestellt.

3.1 Einführung

3.1.1 Modelle und Modellbildung

Streng genommen drückt ein Modell eine Interpretation eines empirischen Phänomens aus, und zwar auf eine Weise, die den Zugang zu diesem Phänomen erleichtert. Interpretationen kommen durch z.B. Idealisierung, Vereinfachung oder Analogisieren zustande (BAILER-JONES, 2002).

Modelle ermöglichen die Anwendung von Theorien auf die Wirklichkeit. Sie haben im Bezug auf die Wirklichkeit, die sie beschreiben sollen, folgende Eigenschaften (BAILER-JONES, 2002):

- **Ungenauigkeit:** Modelle beruhen auf Annäherungen und Vereinfachungen
- **Inkonsistenz:** manchmal stehen Modelle im Widerspruch zu anerkannten Prinzipien, zu bekannten Tatsachen oder zu anderen Modellen.
- **Aspekthaftigkeit:** Die meisten Modelle konzentrieren sich lediglich auf Aspekte eines Phänomens und geben damit keine vollständige Beschreibung desselben.

Warum sich Modelle trotz dieser Eigenschaften auf die Wirklichkeit beziehen erklären, folgende Charakteristika (BAILER-JONES, 2002):

- **Funktion:** Ob ein Modell jeweils eine gute Repräsentation eines Phänomens ist, muss in Abhängigkeit davon beurteilt werden, welche Funktion das Modell erfüllen soll.
- **Selektion:** Ein Modell bezieht sich selektiv auf Aspekte eines Phänomens, wobei gewisse Aspekte bewußt ausgenommen werden. Ein Modell ist selten in der Lage, ein Phänomen in seiner Ganzheit zu modellieren.
- **Übereinstimmung mit den Daten:** Ein Modell repräsentiert ein Phänomen nicht im absoluten Sinne, sondern immer mit Bezug auf die zum entsprechenden Zeitpunkt verfügbaren Informationen oder Daten.

Die Anwendung eines bestimmten Modells auf ein Phänomen liegt beim Modellbenutzer. Dieser entscheidet die Brauchbarkeit und ordnet das Modell jenem Aspekt eines Phänomens zu, für den dieses formuliert worden ist. **Modellbildung** beschreibt diesen Vorgang des Abbildens von Teilstücken der Realität bzw. eines Phänomens um diese zu diagnostizieren und auch prognostizieren zu können.

3.1.2 Modelltypen

Man unterscheidet deterministische und stochastische Ansätze. Eine Kopplung dieser ist der hybride Modelltyp. In den Naturwissenschaften kommen meist deterministische Ansätze zum Einsatz.

3.1.2.1 Deterministische Modelle

Deterministische Modelle gehen davon aus, dass Ereignisse nach feststehenden Gesetzen ablaufen und sie durch diese vollständig bestimmt sind. Sind alle Gesetze und Parameter eines Systems bekannt, ist dieses berechenbar und Ereignisse prinzipiell vorherbestimmbar. Dieser Modelltyp ist unabhängig von Wahrscheinlichkeit und Zufall.

Empirische Modelle (Black - Box Modelle)

Unter Empirie (griechisch: Erfahrung, Erfahrungswissen) versteht man allgemein die im Feld oder auch im Labor durchgeführte Sammlung von Informationen. Die Ergebnisse solcher Beobachtungen stellen empirische Daten dar.

Empirische Modelle beschreiben Vorgänge durch mathematische Beziehungen gewisser Größen bzw. Parameter eines Phänomens und enthalten keine physikalisch begründeten Transferfunktionen um den System-Input in den Output überzuführen. Es wird ein aus den Beobachtungen abgeleiteter Zusammenhang zwischen Input und Output hergestellt (NACHTNEBEL, 2003). Man spricht hier auch von *pragmatischer* Modellbildung. Das Modell gibt keinen Aufschluss über dem Prozess zugrundeliegende Mechanismen und Strukturen.

Die Grundlage zur Erstellung solcher Ansätze sind Daten, mit denen das mathematische Modell kalibriert wird. Dadurch ist dieser Modelltyp in der Anwendung auf den Umfang dieser Daten beschränkt und eine Extrapolation nur bedingt möglich. Das bedeutet, sie sind oft räumlich beschränkt oder gelten nur für bestimmte Ereignisgrößen. Je größer und je einheitlicher der verwendete Datensatz, desto genauer beschreiben Black - Box Modelle die Wirklichkeit.

Das Modell entsteht durch quantitative Beschreibung einer Input - Output - Analyse oder durch statistische Auswertung wie z.B. einer Regressionsanalyse (SCHALDACH, 2009).

Physikalisch basierte Modelle (White - Box Modelle)

Bei diesem Modelltyp sind alle Gesetze und Parameter des Prozesses bekannt und können durch ein mathematisches Modell dargestellt werden. Dadurch basieren White-Box Modelle meist auf komplexen physikalischen Gesetzen. Man bezeichnet diese Art der Modellbildung auch als *strukturell*, da sie sich auf die Struktur eines Systems bezieht. Die mathematische Umsetzung der meist vereinfachten physikalischen Ansätze ist kompliziert und erfordert enormen Aufwand an Daten und Rechenzeit. Die Lösung der mathematischen Probleme kann je nach Ansatz **analytisch**, d.h. mit bekannten Funktionen, oder **numerisch**, durch z.B. Finite-Differenzen-Methode, gewonnen werden.

Bei der räumlichen Diskretisierung der Modellstruktur wird zwischen *gegliederten Modellen* und *Blockmodellen* unterschieden. Gegliederte Modelle versuchen die räumliche Heterogenität der Gebietscharakteristika sowie die räumliche Variabilität

der Eingangsdaten zu erfassen, während Blockmodelle dies nicht berücksichtigen (NACHTNEBEL, 2003).

Konzeptuelle Modelle (Grey - Box Modelle)

Konzeptuelle Modelle stützen sich einerseits auf physikalische Gesetze in vereinfachter Näherung, andererseits enthalten sie ein gewisses Maß an Empirie. Sie besetzen also eine Zwischenstellung zwischen den oben beschriebenen Black-Box und White-Box Modellen.

Variablen und Parameter stellen in diesen Modellen Mittelwerte oder Pauschalbeträge für z.B. ganze Einzugsgebiete dar, daher wird dieser Modelltyp auch als *Lumped Model* bezeichnet. Die Beschreibung der Prozesse erfolgt durch semi-empirische Formeln mit physikalischem Hintergrund. Die Modellparameter können daher nicht nur aus beobachteten Daten ermittelt werden, sondern werden im Zuge der Modellkalibrierung gewonnen (NACHTNEBEL, 2003).

3.1.2.2 Stochastische Modelle

Bei stochastischen Modellen ist die Eingangsfunktion eine Zufallsfunktion oder die Parameter sind Zufallsvariablen. Zur Grundannahme solcher Modelle gehört, dass keine kausale Beziehung zwischen den verschiedenen Elementen des betrachteten Prozesses besteht. Von der Art der Prozessbeschreibung sind stochastische Modelle mit empirischen Black-Box Modellen vergleichbar.

3.1.2.3 Hybride Modelle (stochastisch-deterministisch)

Dieser Modelltyp stellt eine Kopplung deterministischer Modellansätze mit stochastischen Modellen dar. Unsicherheiten durch z.B. fehlende Input-Daten in deterministischen Modellen können durch Zufallsvariablen aus der Stochastik simuliert werden.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Modelltypen ist der Eingang der zeitlichen Betrachtung eines Systems (SCHALDACH, 2009):

statische Modelle liefern für jeden Eingangswert einen genau definierten Wert der Systemvariablen. Alle Größen sind **zeitunabhängig**.

dynamische Modelle beschreiben die zeitliche Dynamik eines Systems. Ein- und Ausgangsgrößen sind daher **zeitabhängig**.

Des weiteren können unterschiedliche Modelle Prozesse **ein-, zwei** oder **dreidimensional** betrachten.

3.1.3 Simulation

Als Simulation bezeichnet man eine Vorgehensweise zur Analyse von Prozessen, die für eine theoretische oder analytische Behandlung zu komplex sind. Dies ist bei dynamischen Modellen der Fall. Es werden Experimente an einem Modell durchgeführt, um Erkenntnisse über das reale Phänomen zu erhalten, um das Modell zu testen oder zu kalibrieren.

3.1.4 Ansätze zur Bestimmung der Reichweite von Murgängen

Es existieren, gemessen an der doch recht geringen Häufigkeit von Murgangereignissen, eine Vielzahl an Ansätzen zu deren Nachbildung und Vorhersage. Durch das hohe Schadenspotenzial dieser wenigen, aber zerstörerischen Ereignisse ergibt sich ein Bedarf, bedrohte Zonen zu erkennen und auszuweisen. Durch die Komplexität des Prozesses lassen sich sehr unterschiedliche Herangehensweisen zur Erlangung eines Modells finden.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick etablierter Methoden zur Bestimmung der Reichweite.

Der erste Block der Ansätze bezieht sich auf die Bestimmung der Reichweite L , während sich die unteren Methoden auf die Berechnung der Auslauflänge L_A beziehen. Zudem liefern einige Methoden auch Informationen über die Ausbreitung und somit über das Ablagerungsverhalten in zwei Dimensionen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Ereignisse mit einfacheren eindimensionalen Modellen berechnet, einige Ereignisse werden auch mit komplexeren zweidimensionalen Modellen simuliert. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Modelle. Diese werden in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels allgemein vorgestellt. Es sind Modelle der in Tabelle 3.1 erwähnten Methoden oder Weiterentwicklungen dieser.

Grundsätzlich wird bei allen hier betrachteten Modellen angenommen, dass es **keine Umlagerungen** innerhalb der Anriss- und Transitzone gibt. Das gesamte Ereignisvolumen wird in der Anrisszone erodiert (bzw. auch in der Transitzone) und lagert sich in der Ablagerungszone wieder ab.

Tab. 3.1: Überblick über Methoden zur Bestimmung der Reichweite nach RICKENMANN (2005).

Ansatz	Kurzbeschreibung	Referenz
Reichweite		
Reichweite L und Ereignisgröße V	Pauschalgefälle	Corominas (1996)
	Volumen und Fallhöhe	Rickenmann (1999)
$\tan\beta$ als Funktion der Einzugsgebietsgröße		Zimmermann et al. (1997)
Volumsbilanzierender Ansatz	keine Aufnahme von zusätzl. Material, Volumsänderung Funktion des Gefälles und der Gerinnegeometrie	Cannon (1993)
	Aufnahme von Material berücksichtigt	Fannin and Wise (2001)
Blockmodelle (dynamisch)	Voellmy-Ansatz	Zimmermann et al. (1997)
	Iverson-Ansatz	Lancaster et al. (2003)
begrenzende Kriterien	kritische Neigung und Einmündungswinkel von Zubringern	Benda and Cundy (1990)
Auslauflänge		
kritische Neigung und Ablagerung am Kegel	versch. empirische Methoden	VanDine (1996); Bathurst et al. (1997)
Volumsbilanzierender Ansatz	Ablagerungsfläche und Fließprofilfläche	Iverson et al. (1998); Berti und Simoni (2007)
Analytischer Ansatz	Blockmodell	Körner (1980); Perla et al. (1980); u.a.
	Modell mit konstantem Durchfluss	Takahashi (1991); Hungr et al. (1984)
Gesamtlänge oder auch nur Ablagerungslänge		
Kontinuums-Modelle	verschiedene Zustandsgleichungen	Iverson (1997); McDougall and Hungr (2003); O'Brien et al.(1993)

Tab. 3.2: Überblick der in dieser Arbeit verwendeten Modelle und deren allgemeine Klassifizierung.
¹ von Scheidl, C. und Rickenmann, D., noch nicht publiziert.
² Eidgenössisches Forschungsinstitut für **W**ald, **S**chnee und **L**andschaft, siehe Abschnitt 3.4.1.

Modell	räumliche Betrachtung	zeitliche Betrachtung	Modelltyp	Lösungsverfahren
Pauschalgefälle nach Corominas (1996)	1 - D	statisch	empirisch	analytisch
empirische Beziehungen nach Rickenmann (1999)				
ACS - Modell nach Prochaska et al. (2008)		dynamisch	konzeptuell	
Auslauflänge nach Takahashi (1991)				
TopRun DF (Scheidl und Rickenmann, 2009)	2 - D	statisch	empirisch-stochastisch	numerisch
TopFlow DF ¹		dynamisch	konzeptuell-stochastisch	
RAMMS (WSL) ²			konzeptuell	
FlatModel (Medina et al. (2008))				

3.2 Empirische Modelle

3.2.1 Volumsbasierende Ansätze

3.2.1.1 Pauschalgefälle nach COROMINAS (1996)

HEIM (1932) prägte den Begriff der *Fahrböschung*. Er erforschte Massenbewegungen aller Art, Hauptaugenmerk legte er auf Berg- und Felsstürze, für die er die Fahrböschung als bestes vergleichendes Maß postulierte. Als Fahrböschung, equivalent mit dem Begriff *Pauschalgefälle*, bezeichnet HEIM (1932) den Fallwinkel vom obersten Punkt des Anrissgebietes bis zum tiefsten und entferntesten Endpunkt der Ablagerung.

Nach SCHEIDEGGER (1973) stellt das Pauschalgefälle S den Reibungskoeffizienten f dar ($f = S = H/L$). Dies gilt für kleinere Berg- und Felsstürze (bis zu einigen zehntausend Kubikmeter) auf Schutthalden. Es ist allgemein bekannt, dass mit zunehmendem Volumen der sich bewegenden Masse die Mobilität und damit die Reichweite zunimmt. SCHEIDEGGER (1973) publizierte eine aus 33 Ereignissen gewonnene empirische Gleichung (3.1) zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten f aus dem Volumen V . Er stellt das Volumen in Korrelation zum Reibungskoeffizienten. Kennt man die Fallhöhe H , so kann man daraus die Reichweite berechnen.

$$\log f = -0,157 \log V + 0,642 \quad (3.1)$$

COROMINAS (1996) bekräftigt die Annahme, es reduziere sich das Pauschalgefälle mit zunehmendem Volumen. Dies gilt für Massenbewegungen wie Fels- und Bergstürze, Rutschungen, Murgänge und Bodenfließen. Das Pauschalgefälle ist ein geeigneter Indikator zur Bestimmung der relativen Mobilität dieser Bewegungen, unabhängig von der Fallhöhe.

Anhand von 71 Ereignissen publiziert COROMINAS (1996) für Murgänge folgende empirische Gleichung zur Bestimmung des Pauschalgefälles H/L in Abhängigkeit vom Ereignisvolumen V :

$$\log(H/L) = -0,105 \log V - 0,012 \quad (3.2)$$

Das Bestimmtheitsmaß R^2 für diese Gleichung liegt bei 0,76. Es gehen Ereignisse aller Art ein, d.h. es sind auch Murgangereignisse mit anthropogen veränderter Topographie inkludiert.

3.2.1.2 Empirische Zusammenhänge nach RICKENMANN (1999)

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass Pauschalgefälle hängen, wie oben erwähnt, von der Größe des Ereignisvolumens ab, präsentiert RICKENMANN (1999) ein Modell zur Bestimmung der Reichweite L (*total travel distance*).

$$L = 1,9 V^{0,16} H^{0,83} \quad (3.3)$$

V bezeichnet wieder das Ereignisvolumen und H die Fallhöhe vom höchsten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung. Das Produkt dieser kann auch als Energiepotenzial angesehen werden.

In Abbildung 3.1 ist die gewonnene Regressionsgerade graphisch dargestellt. Abgebildet sind hier auch vergleichende Ereignisse von Felsstürzen und Lahars. Zur Kalibrierung von Gleichung 3.3 wurden nur Murgänge herangezogen. Diese sind rund 150, zum Großteil schweizer Ereignisse und somit für eher granulare Murgänge des alpinen Typs gültig.

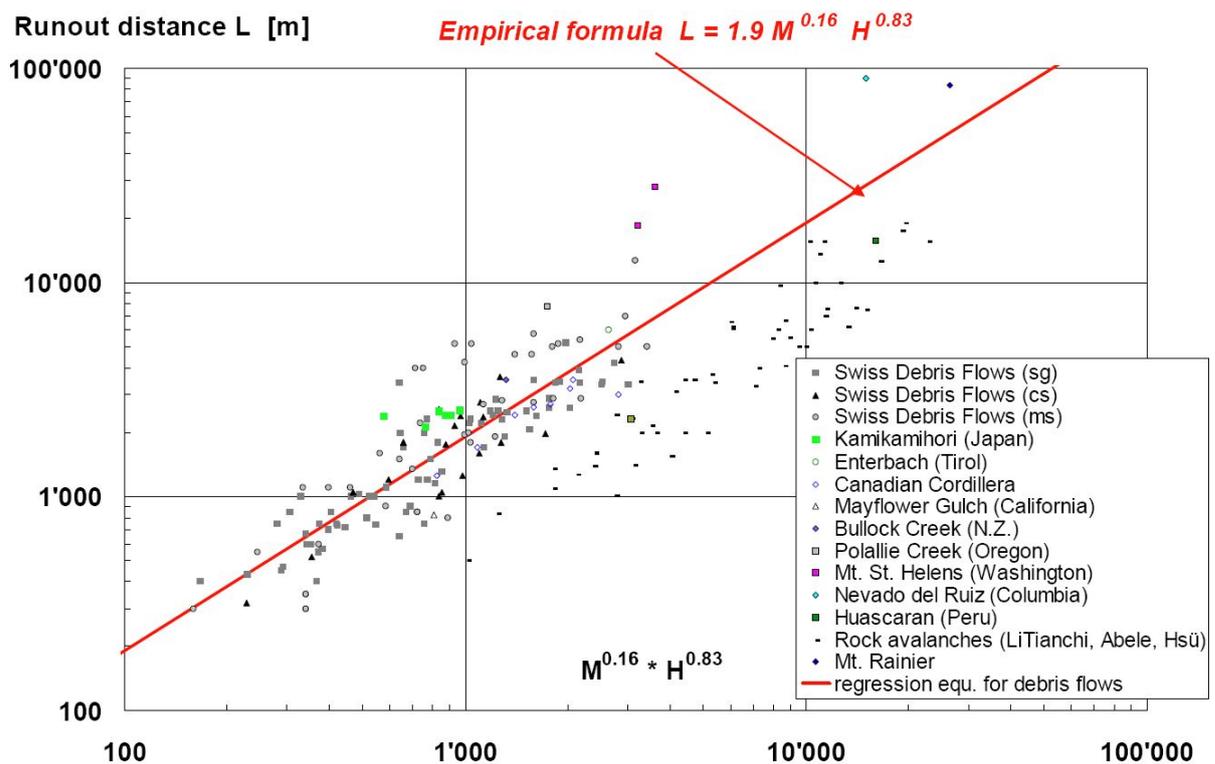


Abb. 3.1: Reichweite L von Massenbewegungen in Relation zum Energiepotenzial, dem Produkt von Ereignisvolumen V (hier M) und Höhendifferenz H von Massenbewegungen. Dargestellt ist auch die Regressionsgerade für Murgänge (Gleichung 3.3); aus RICKENMANN (1999).

Für die Vorhersage der Reichweite L eines Murganges ist auch H nicht von vornherein

bekannt. Für die Anwendung von Gleichung 3.3 wird das Längsprofil des zu erwartenden Fließweges betrachtet und eine Relation zwischen H und L definiert.

RICKENMANN (1999) stellte auch einen empirischen Zusammenhang zwischen der Auslauflänge L_A und der Ereignisgröße V dar. Er nahm an, dass die Ablagerung am Kegehals beginnt und sich das Material größtenteils außerhalb des Gerinnes ablagert. Für die auch zur Kalibrierung von Gleichung 3.3 verwendeten Ereignisse ergab sich folgende Beziehung:

$$L_A = 1,5 V^{1/3} \quad (3.4)$$

Aufgrund der großen Streuung empfiehlt RICKENMANN (1999) für eine Berechnung der Auslauflänge andere Methoden zu verwenden, deshalb wird auch in dieser Arbeit nicht näher auf Gleichung 3.4 eingegangen.

3.2.2 TopRun DF

IVERSON et al. (1998) stellte für Lahars einen semi-empirischen Zusammenhang zwischen der planimetrischen Fläche der Ablagerungen A , der Fläche eines Querprofils A_{profil} und dem abgelagerten Volumen V her. Dabei werden die Gleichungen

$$A_{profil} = k_A V^{2/3} \quad (3.5)$$

$$A = k_B V^{2/3} \quad (3.6)$$

abgeleitet, worin k_A und k_B empirisch ermittelte Koeffizienten sind. IVERSON et al. (1998) implementierten die Gleichungen 3.5 und 3.6 in ein GIS-basiertes Modell, genannt *LAHARZ*, womit überschwemmungsgefährdete Flächen für Lahars zweidimensional simuliert werden können.

LAHARZ wurde von GRISWOLD und IVERSON (2007) für Murgänge in Nordamerika getestet und adaptiert. BERTI und SIMONI A. (2007) modifizierten das Modell für Murgänge in Norditalien und entwickelten das Programm *DFlowZ*. Auch andere Autoren fanden ähnliche empirische Zusammenhänge zwischen planimetrischer Ablagerungsfläche und Ereignisvolumen. Diese Studien zeigen, dass es für Prozesstypen wie Felsstürze, Murgänge und Lahars sinnvoll erscheint, den Exponenten in Gleichung 3.5 und 3.6 bei $2/3$ anzugeben.

Im Gegensatz zu LAHARZ und der Adaption dieses Modells von BERTI und SIMONI A. (2007) wird für *TopRun DF* nur Gleichung 3.6 betrachtet. Während Lahars lange Ausläuflängen und Ablagerungen in definierten Gerinnen mit relativ geringer lateraler Ausbreitung aufweisen, in denen die Betrachtung von Querprofilen sinnvoll erscheint, besitzen Murgänge aufgrund des höheren Anteils an grobkörnigem Material kürzere Ausläuflängen, dafür aber größere laterale Ausbreitung auf dem Kegel. Die Ablagerung erfolgt in der Regel zum Großteil außerhalb des definierten Gerinnes. In *TopRun DF* wird deshalb als zweite Randbedingung die Topografie des Ablagerungsbereiches herangezogen. RICKENMANN (2006a) zeigen den maßgeblichen Einfluss der Kegeltopografie auf das Simulationsergebnis von Ablagerungen granularer Murgänge.

Basierend auf einem digitalen Geländemodell kalkuliert *TopRun DF* zuerst die potenziellen Ablagerungspfade eines Murgangereignisses, wobei als Startpunkt der Beginn der dokumentierten Ablagerungen bzw. im Vorhersagefall der anzunehmende Punkt des Ablagerungsbeginnes (Kegelhals) gewählt wird. Mithilfe eines D8-Algorithmus wird ein „individueller Pfad“ (*individual-path*) berechnet, dem größten Gefällsgradienten des Geländemodells folgend. Um nun eine potenzielle Ausbreitung der potenziellen Pfade zu erzielen, werden multiple individuelle Pfade simuliert, indem der D8-Algorithmus mit einer statistischen Zufallswahrscheinlichkeit kombiniert wird. Dies wird durch eine *Monte Carlo*-Simulation bewerkstelligt. In Abbildung 3.2 wird diese grafisch dargestellt.

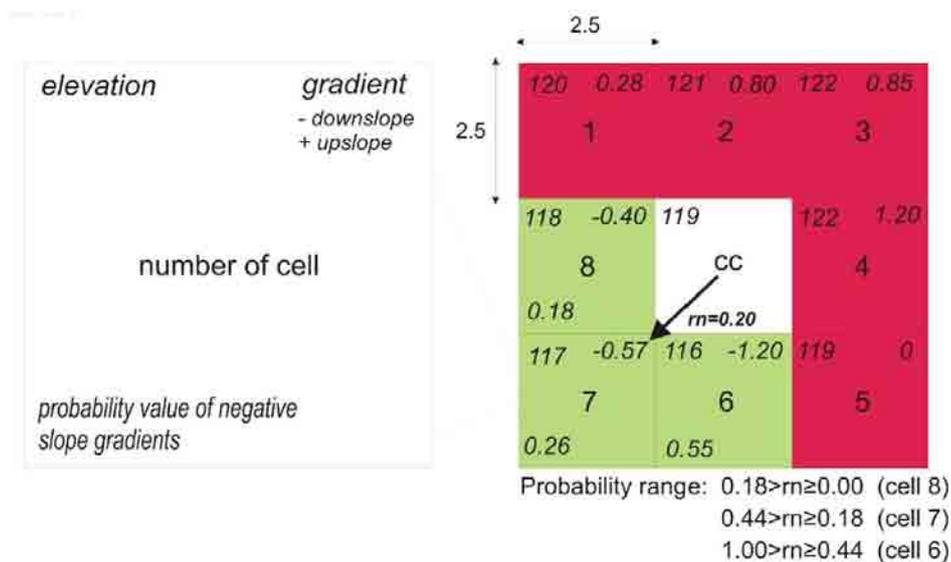


Abb. 3.2: Monte Carlo-Simulation in Kombination mit D8-Algorithmus; in diesem Beispiel ist die Zufallsnummer (rn) 0,2, was bedeutet, dass Zelle 7 als Ausflusszelle gewählt wird; cc steht für central cell; aus SCHEIDL und RICKENMANN (2009a).

Es werden Wahrscheinlichkeiten für die acht Ausflussmöglichkeiten jeder Zelle modelliert, wobei Zellen mit positivem Gefällsgradienten ausgeschieden werden. Je nach Zufallswahrscheinlichkeit wird die nächste Zelle ausgewählt. Abbruchkriterium eines individuellen Pfades sind Gegengefälle und der Perimeter des Höhenmodelles. Mehrere solcher individueller Pfade führen zur Erhöhung der Ablagerungsfläche (Abbildung 3.3), welche nach jedem berechneten Pfad mit der empirisch ermittelten Fläche verglichen wird.

Eine Steuerung der Ausbreitung der Ablagerung erfolgt über die Anzahl der sogenannten „Monte Carlo Iteration number“ (MCI), die die laterale Ausbreitung der individuellen Pfade steuert. Niedrige MCI Nummern führen zu geringerer seitlicher Ausdehnung der Ablagerung und zu größeren Ausläuflängen. Für mit TopRun DF simulierte Schweizer Ereignisse schlägt SCHEIDL und RICKENMANN (2009a) einen Wert von 50 „Monte-Carlo-Steps“ (MCS) als Richtwert vor. Das bedeutet, es wird nach 50 MCS die berechnete Fläche mit der empirisch ermittelten bzw. dokumentierten Fläche verglichen. Ist diese erreicht, ist der erste Simulationsschritt beendet, ansonsten werden weitere individuelle Pfade simuliert und nach jeweils 50 MCS die Flächen verglichen.

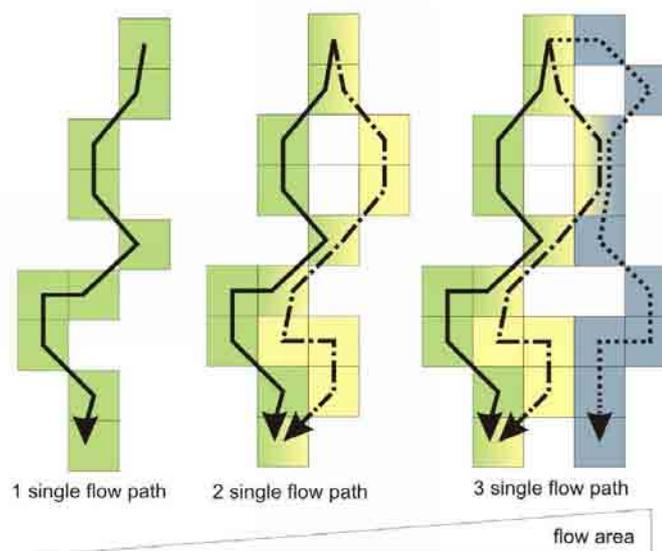


Abb. 3.3: Modellierung potenzieller Fließwege mit multiplen „Single-Flow-Pathways“; in SCHEIDL und RICKENMANN (2009a).

Für stark kanalisierte Gerinne, in denen keine Ausuferung der potenziellen Fließwege aufgrund der Höhendifferenz möglich ist, besteht die Möglichkeit, eine „Überhöhung“ („*elevation-step*“) der jeweils betrachteten Zelle (die Zelle *cc*, siehe Abbildung 3.2) vorzunehmen und so die potenziellen Ausflussmöglichkeiten je Zelle zu erhöhen.

Erreicht die Fläche der potenziellen Fließwege die empirisch ermittelte Fläche,

ist der erste Simulationsschritt fertig und als Ergebnis liegt ein Raster mit einer Überflutungswahrscheinlichkeit je Zelle vor.

In einem zweiten Schritt werden diese Wahrscheinlichkeiten mit der empirisch ermittelten Fläche B aus Gleichung 3.6 und dem Ereignisvolumen V kombiniert. Am Startpunkt beginnend, wird das Volumen in Proportion zur Überflutungswahrscheinlichkeit aufgeteilt, bis die gewünschte Fläche B erreicht wird. Das Ergebnis ist ein Raster der simulierten Ablagerungsfläche. Jede Zelle zeigt die simulierte Ablagerungshöhe.

TopRun DF verwendet ESRI-ARC-Objects und wurde für LiDAR generierte Höhenmodelle mit einer Zellgröße von 2,5 m entwickelt.

Als wichtigste Eingangsparameter des Programms ist ein digitales Geländemodell des Ablagerungsbereiches und das Ereignisvolumen erforderlich, des weiteren müssen der Startpunkt und der k_B -Wert definiert werden.

Der k_B -Wert kann als Mobilitätsfaktor betrachtet werden und beinhaltet nach SCHEIDL und RICKENMANN (2009a) Informationen über das Fließverhalten während der Ablagerungsphase. Granulare Murgänge weisen niedrigere k_B -Werte auf, während fluide Prozesse wie Lahars größere Werte zeigen. Zur Simulation mit TopRun DF für Vorhersagezwecke kann der k_B -Wert nach SCHEIDL und RICKENMANN (2009a) über die Neigung der Transitstrecke θ_T und der Kegelneigung θ_K mithilfe folgender empirischer Formel berechnet werden:

$$k_{B,pred} = 5,07 \theta_K^{-0,10} \theta_T^{-1,68} \quad (3.7)$$

3.2.3 Modelle auf Grundlage topografischer Parameter

3.2.3.1 ACS - Modell nach Prochaska

PROCHASKA et al. (2008) präsentierten ein Modell zur eindimensionalen Bestimmung der Auslauflänge von Murgängen unabhängig vom Ereignisvolumen und von physikalischen Parametern. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Modellen gehen in diesen Ansatz keine unsicheren Eingangsparameter ein und die Reichweite von Murgängen kann aufgrund topografischer Zusammenhänge durch empirisch ermittelte Gleichungen modelliert werden. Es gehen damit aber auch keine Informationen über die Ereignisgröße (Volumen) ein.

Ähnliche Ansätze wurden bereits von BAKKEHØI et al. (1983) in den 80er Jahren für

Lawinen entwickelt und auch für Murgänge weiterentwickelt (BATHURST et al., 1997).

Das von PROCHASKA et al. (2008) entwickelte ACS-Modell (*average channel slope*) bestimmt den Auslaufwinkel α_{ACS} anhand des Kegelhalswinkels bzw. des Winkels zum Beginn der Ablagerung β_{ACS} (Abbildung 3.4). Der Referenzpunkt, auf den sich die Winkel α_{ACS} und β_{ACS} beziehen, wird auf halber Höhe zwischen dem Anfangspunkt der Ablagerung und einem theoretischen, leicht reproduzierbaren Punkt des Gerinneursprungs. Dieser obere Punkt ergibt sich als Verlängerung des Gerinnes und Verschneidung mit der Begrenzung des Einzugsgebietes. Darstellung 3.4 zeigt das Längsprofil des Gerinneverlaufs.

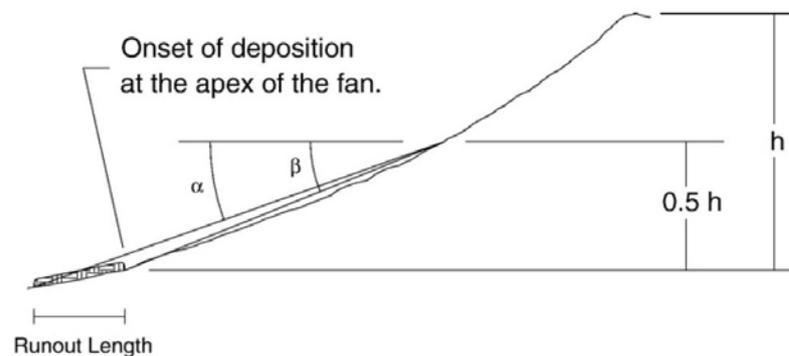


Abb. 3.4: Darstellung des ACS-Modells in PROCHASKA et al. (2008).

Dieser Referenzpunkt hat keinen physikalischen Hintergrund und wurde empirisch ermittelt. Das Modell wurde in Nordamerika entwickelt und zur Kalibrierung wurden zum Teil Ereignisse aus durch Brände verursachten Murgängen verwendet.

Ziel dieses Ansatzes ist es, auf schnellem und einfachem Weg eine grobe Abschätzung über die Auslauflänge zu geben. Die Ermittlung des Referenzpunktes und des Winkels β_{ACS} kann aus topografischen Karten im Maßstab 1:25.000 oder 1:50.000 erfolgen.

Anhand von 23 Ereignissen ermittelten PROCHASKA et al. (2008) den empirischen Zusammenhang:

$$\alpha_{ACS} = 0,88 \beta_{ACS} \quad (3.8)$$

Das Bestimmtheitsmaß für diese Regression liegt bei 0,96. Die Autoren geben eine untere Begrenzung für α_{ACS} von $0,80\beta_{ACS}$ und als obere Begrenzung $\alpha_{ACS} = \beta_{ACS}$, was keine Auslauflänge bedeutet.

Für die Vorhersage der Auslauflänge kann diese grafisch aus dem berechneten Winkel

α_{ACS} konstruiert werden.

3.3 Dynamische Modelle mit analytischer Lösung

3.3.1 Bestimmung der Auslauflänge nach TAKAHASHI (1991)

TAKAHASHI (1991) und HUNGR et al. (1984) beschreiben einen analytischen Ansatz zur Bestimmung der Auslauflänge L_A von Murgängen.

Ähnlich dem Ansatz von VOELLMY (1955) (siehe Absatz 3.4.1.1) wird die Energieerhaltung betrachtet. Mit beginnender Ablagerung des Prozesses folgt eine sukzessive Verzögerung des Frontbereiches, was zu einer bestimmten Auslauflänge führt. Die Energieerhaltungsgleichung wird für eine gleichförmig fließende Murfront, die aus einem steilen Gerinne mit der konstanten Neigung θ_T kommend auf einer flachen Ebene mit der Neigung θ_K fließt, gelöst (Abbildung 3.5).

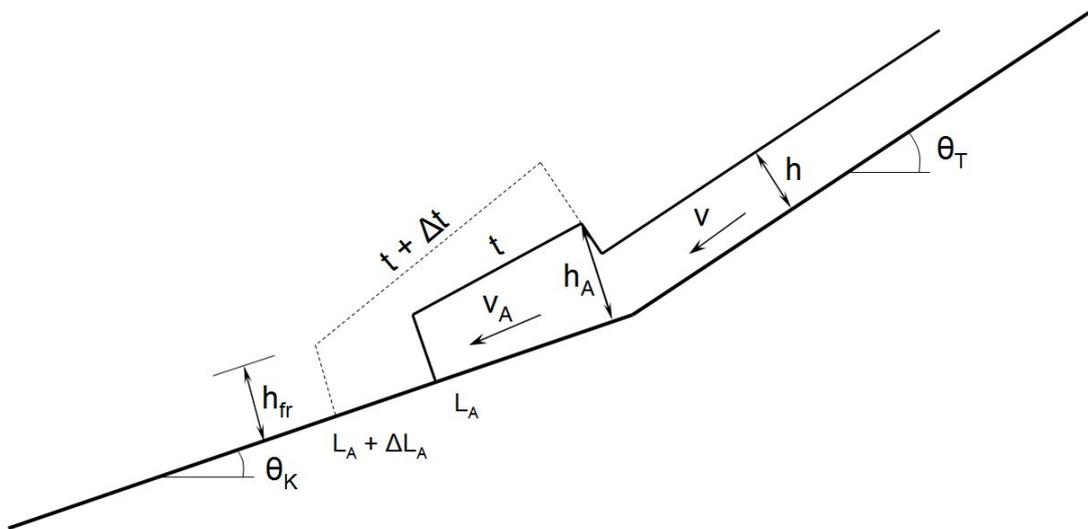


Abb. 3.5: Ablagerungsprozess der Murgangfront nach TAKAHASHI (1991); θ_K entspricht der mittleren Kegelneigung, θ_T der mittleren Neigung der Transportstrecke; v und v_A sind die jeweiligen Geschwindigkeiten, h und h_A die Fließhöhen.

Benutzt man den konstanten Reibungskoeffizienten S_f kommt man auf folgende analytisch lösbare Gleichung für die Auslauflänge:

$$L_A = \frac{U^2}{G} \quad (3.9)$$

worin

$$U = v \cos(\theta_T - \theta_K) \left[1 + \frac{g h \cos \theta_T}{2 v^2} \right] \quad (3.10)$$

$$G = g (S_f \cos \theta_K - \sin \theta_K) \quad (3.11)$$

bedeuten. θ_T ist die Neigung des steilen Gerinnes (die mittlere Neigung der Transitstrecke), v die dort auftretende Geschwindigkeit und h die zugehörige Fließhöhe. Demgemäß ist θ_K die Neigung der flachen Auslaufebene (die mittlere Kegelneigung).

Ist nun die Geschwindigkeit v und die Fließhöhe h bekannt und ein Wert für den Reibungskoeffizienten S_f verfügbar, kann man die Auslauflänge L_A berechnen.

HUNGR et al. (1984) schlagen für S_f einen festen Wert von „ $\tan 10^\circ$ “ vor. OKUDA und SUWA (1984) und RICKENMANN (2005) berechnen den Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Kegelneigung mit $S_f = 1,12 \tan \theta_K$ bzw. $S_f = 1,08 \tan \theta_K$.

3.3.2 TopFlow DF

Die Theorie von Takahashi zur Bestimmung der Auslauflänge beschreibt die Ablagerung eines einzelnen Pfades bei Spitzenabfluss. Beobachtungen zeigen, dass sich aufeinanderfolgende Ablagerungspfade kegelförmig nebeneinander akkumulieren (HUNGR et al., 1984). SCHEIDL und RICKENMANN (2009b) entwickelten, basierend auf diesen Überlegungen, ein zweidimensionales Modell zur Simulation des Ablagerungsverhaltens von Murgängen. Es wird dabei der analytische Ansatz von Takahashi mit der empirisch-stochastisch ermittelten potenziellen Übermurgungsfläche kombiniert.

Ähnlich dem TopRun DF werden in einem ersten Schritt auf Grundlage der Topografie des Murkegels und mithilfe einer Monte Carlo Simulation multiple individuelle Pfade ermittelt. Dies geschieht so lange, bis ein gewünschter Simulationsperimeter erreicht ist. Der Perimeter wird bei bekanntem Volumen aus Gleichung 3.7 mit einem Mobilitätsfaktor von $2 k_B$ berechnet. Dies entspricht dem Schwankungsbereich der Unsicherheit des prognostizierten k_B -Wertes.

Für diesen ersten Schritt sind als Eingangsdaten das Ereignisvolumen V und der Mobilitätskoeffizient k_B erforderlich, optional ist noch eine Änderung der MCS Nummer möglich (Der Standardwert liegt bei 50).

Im zweiten Schritt wird für jeden einzelnen individuellen Pfad eine Auslauflänge nach dem Takahashi-Konzept berechnet. Dabei hat jeder Pfad eine konstante Breite (Zellgröße) und einen konstanten Durchfluss. Den Durchfluss je Pfad erhält man, indem der maximale Durchfluss, der sich am Kegelhals ergibt, auf die Anzahl der individuellen Pfade in Abhängigkeit deren Länge und Wahrscheinlichkeit aufgeteilt wird. Die Geschwindigkeit ergibt sich nach TAKAHASHI (1991) wie in Gleichung 3.12 dargestellt.

$$v_{t+1} = \Delta t \left(\frac{V}{t} - G - \frac{v_t}{t} \right) + v_t \quad (3.12)$$

Dabei sind V und G die in Gleichung 3.10 und 3.11 berechneten Variablen.

Es wird beginnend am Kegelhals bzw. am Beginn der zu erwartenden Ablagerung die Auslauflänge für jeden Pfad simuliert. Sinkt die errechnete Geschwindigkeit auf Null, ist die maximale Auslauflänge für diesen Pfad erreicht. Die Auslauflänge berechnet sich mit

$$L_{A,total} = L_{A,t} + v_t \Delta t \quad (3.13)$$

wobei $L_{A,t}$ die Auslauflänge zum Zeitpunkt t und $L_{A,total}$ die Auslauflänge zum Zeitpunkt $t + 1$ ist.

Dieser zweite Schritt ist abhängig vom Durchfluss, der Fließhöhe und Gerinnebreite am Kegelhals, vom Reibungswinkel S_f und der Neigung der Transportstrecke. Für den Reibungswinkel wird ein Startwert, z.B. das 1,1-fache der mittleren Kegelneigung, angenommen. Wird im zweiten Schritt aufgrund der eingegebenen Parameter die dokumentierte Ablagerungsfläche nicht erreicht, so wird automatisch der Reibungswinkel iterativ geändert, sodass diese erreicht wird.

TopFlow DF ist in VB.net programmiert. Die Ausgabedaten sind ASCII-Raster.

3.4 Dynamische Modelle mit numerischer Lösung

3.4.1 RAMMS

RAMMS (Rapid Mass Movements) ist eine sich in Entwicklung befindende Software des Eidgenössischen Forschungsinstitutes für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und soll Prozesse schneller Massenbewegungen modellieren. Zurzeit steht die β -Version des Modules *Avalanche* zur Verfügung, mit dem die Simulationen in dieser Arbeit durchgeführt wurden. Gearbeitet wird an dem Modul für Felsstürze (*Rock Fall*) und dem Modul *Debris Flow*. Zusätzlich beinhaltet das Software-Paket noch die Module *Protect*

für Schutzmaßnahmen und das Modul *Visualisation*.

RAMMS::Avalanche basiert auf einem zweidimensionalen Fließlawinenmodell (AVAL-2D), welches am SLF¹ seit mehreren Jahren praktisch eingesetzt wird. Dieses wiederum entstand aus den Gleichungen von Voellmy und Salm (siehe Seite 42). Das Modell löst die Gleichungen der Massen- und Impulserhaltung durch das Verfahren der finiten Elemente für ein Dreiecksgitter. Das Gitter wird aus einem DGM² generiert. Dieses Modul liefert Ergebnisse für die Fließhöhe, die Geschwindigkeit und den Druck an einem beliebigen Punkt (KNOBEL, 2006).

RAMMS::Rockfall berechnet alle notwendigen Flugbahninformationen von Felsstürzen (Geschwindigkeitsverlauf, Auslaufdistanz, Flugbahnen) und ermittelt dabei die typischen Steinbewegungen (Gleiten, Rollen, Springen)

RAMMS::Debris Flow basiert auf den Erkenntnissen von IVERSON und DENLINGER (2001), die ein Modell zur Murgangsimulation als Fluid-Feststoff-Mischung entwickelten. Die Bewegung der festen Phase wird durch granulares Fließen getrennt von der flüssigen Phase, die als Newton'sches Fluid dargestellt wird, modelliert. Die Kopplung der Phasen erfolgt über den Porenraumanteil und den Impulsaustausch. Das Modell berechnet Fließhöhen, Geschwindigkeiten, Dichten und Drücke der einzelnen Phasen eines Murganges.

RAMMS::Protect ermöglicht es, natürliche und künstliche Schutzmaßnahmen in die Simulation miteinzubeziehen. Vor allem geht es darum, den Einfluss von Vegetation zu berücksichtigen.

RAMMS::Visualization stellt das Bindeglied der einzelnen Module dar und sorgt für eine einheitliche und benutzerfreundliche Oberfläche.

3.4.1.1 Das Voellmy-Salm-Modell

Voellmy entwickelte in den 1950er Jahren Gleichungen zur Berechnung der Auslaufdistanz von Lawineneignissen. 1980 erweiterte Salm dieses Modell. Im alpinen Raum ist das sogenannte *VS-Modell* das verbreitetste lawinendynamische Modell. Aufgrund der bereits erwähnten Ähnlichkeiten von Lawinen und Murgängen, kann dieses Modell auch für Murgänge eingesetzt werden (SCHEUNER, 2007; HOSE, 2007).

¹Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung

²Digitales Geländemodell

Die Gleichungen von VOELLMY (1955)

Die sich bewegende Masse wird als Block angesehen, auf den die Kräfte angreifen. Aus diesem Grund wird dieses Modell auch als Block- bzw. Massenpunkt-Modell angesehen. Wie in Abbildung 3.6 zu sehen, bewegt sich der Block mit der Höhe h und einer Geschwindigkeit v auf einer mit dem Winkel θ geneigten Ebene. Die Breite und die Länge des betrachteten Blocks spielen für den Fließprozess keine Rolle, d.h. das Volumen, welches pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt fließt, ist konstant.

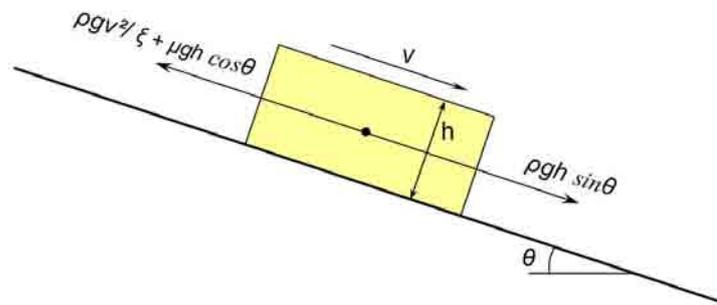


Abb. 3.6: Block-Modell nach Voellmy, aus TIEFENBACHER (2003)

Die beschleunigende Hangabtriebskraft F_A (Gleichung 3.14) wirkt hangparallel gegen die Gewichtskomponente senkrecht zur Bodenoberfläche F_C (basale Coulomb'sche Reibung, Gleichung 3.15) und die geschwindigkeitsabhängige turbulente Reibung F_T (Gleichung 3.16).

$$F_A = \rho g h \sin \theta \quad (3.14)$$

$$F_C = -\mu \rho g h \cos \theta \quad (3.15)$$

$$F_T = -\frac{\rho g v^2}{\xi} \quad (3.16)$$

ρ ist die Dichte des Materials, g die Gravitationskonstante, h die Fließhöhe senkrecht zur Bodenoberfläche, θ die Hangneigung, μ der trockene Reibungskoeffizient, ξ der turbulente Reibungskoeffizient und v die Fließgeschwindigkeit.

Daraus lässt sich eine Endgeschwindigkeit v_e (Gleichung 3.17) ableiten, aus der die Auslauflänge L_A (Gleichung 3.18) bei Betrachtung der mittleren Ablagerungshöhe \bar{h}_A und der Auslaufneigung mit dem Winkel θ berechnet wird.

$$v_e = \sqrt{\xi h (\sin \theta_K - \mu \cos \theta_K)} \quad (3.17)$$

$$L_A = \frac{v_e^2}{2 g (\mu \cos \theta_K - \sin \theta_K) + v_e^2 g / \xi \bar{h}_A} \quad (3.18)$$

Die Endgeschwindigkeit ist also nur von der Fließhöhe, der Neigung und den Reibungsparametern μ und ξ abhängig.

Die Erweiterung von SALM et al. (1990) und Einbindung in RAMMS

Durch Hinzufügen weiterer Einflussparameter erfolgt eine Verfeinerung der Voellmy-Gleichungen. Breite und Neigung des Anrissgebietes finden Eingang, ebenso wird der Fließdruckparameter λ (aus der Erddrucktheorie stammend) eingeführt, der die Menge entzogener Energie bei Dehnung bzw. Stauchung der bewegten Massen quantifiziert.

Die Integration des VS-Modells in RAMMS erfolgt über Gleichungen der Massen- und Impulserhaltung unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen. Mit Ausnahme des Fließdruckparameters λ verkörpern diese Ansätze inhaltlich die Flachwassergleichungen (SCHEUNER, 2007; HOSE, 2007).

3.4.1.2 Anwendung für Murgänge und die Reibungsparameter μ und ξ

Das VS-Modell stellt nach mündlicher Mitteilung von McArdell mehr eine technische Berechnungsformel, denn eine physikalische Beschreibung des Prozesses dar. Die Reibungsparameter sind daher besser als sogenannte Anpassungsparameter zu bezeichnen (SCHEUNER, 2007) und würden mit aus Proben gemessenen physikalischen Parametern kaum übereinstimmen. Dies rührt unter anderem aus den Vereinfachungen der Voellmy-Gleichungen als auch aus dem Umstand, dass die Parameter in Wirklichkeit keine konstanten Werte darstellen, sondern je nach Zusammensetzung und Topografie auch während eines Ereignisses variieren.

Dass mit dem eigentlich für Lawinen entwickelten Modul RAMMS::Avalanche auch Murgänge realistisch simuliert werden können, zeigen Erfahrungen und Arbeiten einiger Autoren (KNOBEL, 2006; SCHEUNER, 2007; HOSE, 2007).

Das Fließverhalten der simulierten Murgänge wird in RAMMS in erster Linie durch die Reibungsparameter μ und ξ bestimmt. Der Reibungskoeffizient μ hängt von Materialeigenschaften (Dichte, Wassergehalt, Temperatur) und vom Druck senkrecht zur

Bodenoberfläche ab. Je höher der Wassergehalt, d.h. je fluider der Murgang, desto kleiner ist dieser Parameter. μ bestimmt maßgeblich das Auslaufverhalten und die Auslauflänge von Murgängen. Der Faktor der turbulenten Reibung ξ beschreibt den Verlust an kinetischer Energie durch Interaktionen und Reibung innerhalb der bewegten Masse und zum Untergrund hin. Dieser Parameter variiert sehr stark, da er maßgeblich von Topografie und Oberflächenbeschaffenheit abhängig ist. ξ hat einen starken Einfluss auf die Geschwindigkeit und die Abflusshöhe.

3.4.2 FLATModel

FLATModel ist ein 2-dimensionales numerisches Simulationsprogramm womit das Verhalten von Murgängen nachgebildet werden kann. Über modifizierte *Flachwassergleichungen* sind mehrere Fließgesetze integriert. Dabei nützt es das Finite-Volumen-Verfahren auf der Grundlage des *Godunov-Verfahrens* (MEDINA et al., 2008).

Die Grundgleichung von FLATModel stellt eine vereinfachte Massen- und Impulserhaltungsgleichung dar. Die topografischen Informationen basieren auf digitalen Geländemodellen.

Es stehen neben anderen Fließgesetzen drei wesentliche rheologische Ansätze zur Verfügung:

Bingham - Fluid: (BINGHAM, 1922) Dies stellt den einfachsten Ansatz für ein nicht-newton'sches (viskoplastisches) Material dar. Es ist in der Form

$$\tau_b = \tau_0 + \mu_m \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (3.19)$$

in FLATModel integriert, worin τ_b die basale Schubspannung, τ_0 die Fließgrenze, μ_m die Viskosität und $\frac{dv}{dy}$ die Scherrate darstellt.

Herschel - Bulkley Gleichung: (COUSSOT, 1994) Diese Gleichung reflektiert typische Eigenschaften vieler Murgänge. Im oberen Bereich der fließenden Suspension ist eine scheinbar ungescherte Zone über einem mehr oder weniger stark gescherten Bereich. Die Implementierung in das Programm erfolgt über die Gleichung

$$\tau_b = \tau_0 + k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (3.20)$$

k und n stellen die Parameter dar, wobei k die Konsistenz bezeichnet und n den Fluid-Index darstellt.

Voellmy Ansatz: wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben. In FLATModel geht er in der Form

$$\tau_b = g\rho(h \cos \theta \tan \mu + (v/C_z)^2) \quad (3.21)$$

ein. μ entspricht dem in RAMMS verwendeten Reibungskoeffizienten, während hier anstelle von ξ der Chezy-Koeffizient C verwendet wird. Es besteht der Zusammenhang: $C = \mu^2$

MEDINA et al. (2008) finden im Zuge der Modellverifizierung für den Voellmy - Ansatz die brauchbarsten Resultate.

Das mangelnde Abbruchkriterium des Voellmy-Modells an der Murfront aufgrund des Reibungskoeffizienten μ führt zu sehr flachen, unnatürlichen Frontneigungen der Ablagerung. In FLATModel besteht die Möglichkeit, ab einer gewissen Geschwindigkeit den anfänglichen Parameter μ durch den statischen Reibungswinkel ϕ zu ersetzen.

Weiters können mit FLATModel auch erosive Erscheinungen in der Transitzone (*Entrainment*) modelliert werden und es können auch sogenannte „*Stop-and-go*“ *Mechanisms* simuliert werden.

4 Daten und Modellanwendung

4.1 Verwendete Ereignisse und Datengrundlagen

Die für diese Arbeit verwendeten Ereignisse beziehen sich auf granulare Murgänge in Südtirol, Italien. Die Ereignisdaten stammen aus der digitalen Ereignisdokumentation (ED30) der Abteilung 30 - Wasserschutzbauten (Opere Idrauliche) der autonomen Provinz Bozen, Südtirol. Die Dokumentation beinhaltet referenzierte Orthofotos, die digitale Darstellung der Ablagerungsflächen und zum Teil der Anrisszonen, das Ereignisvolumen und -datum und Informationen über den vorherrschenden Prozess in der Transit- und Anrissstrecke (Erosion, Ablagerung).

Die Daten wurden bereits für die Arbeiten von SCHEIDL und RICKENMANN (2008) und SCHEIDL und RICKENMANN (2009a) erhoben und nach den in Abschnitt 2.1.1, erläuterten Methoden klassifiziert. Die als granularer Murgang klassifizierten Ereignisse der Südtirol-Daten bilden die Grundlage dieser Arbeit.

Es gehen 38 dieser Ereignisse in diese Arbeit ein, wobei die eindimensionalen Modelle für alle gewählten Ereignisse, die zweidimensionalen für 8 ausgewählte Murgänge präsentiert werden. In Tabelle 4.1 sind die dokumentierten Daten der gewählten Ereignisse zu sehen und in Abbildung 4.1 ist deren geografische Lage dargestellt.

Weitere Informationen über Materialparameter, Geschwindigkeiten, maximale Abflüsse oder volumetrische Verteilungen der Ablagerungen existieren nicht.

Die erforderlichen digitalen Geländemodelle (DGM) für die zweidimensionalen Simulationen wurden auch von der Abteilung für Wasserschutzbauten der Südtiroler Landesregierung zur Verfügung gestellt. Die DGM wurden aus LiDAR¹-Daten generiert und haben eine Auflösung von 2,5 m.

Die Geländemodelle dienen nicht nur als Grundlage der zweidimensionalen

¹*light detection and ranging*; eine dem Radar (radiowave detection and ranging) verwandte Methode zur Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung, sowie Fernerkundung atmosphärischer Parameter. Statt Funkwellen wie beim Radar werden jedoch Laserstrahlen verwendet.

Simulationsprogramme, es können mithilfe einer GIS-Software wichtige Grundlagen zur Erfassung von Parametern generiert werden.

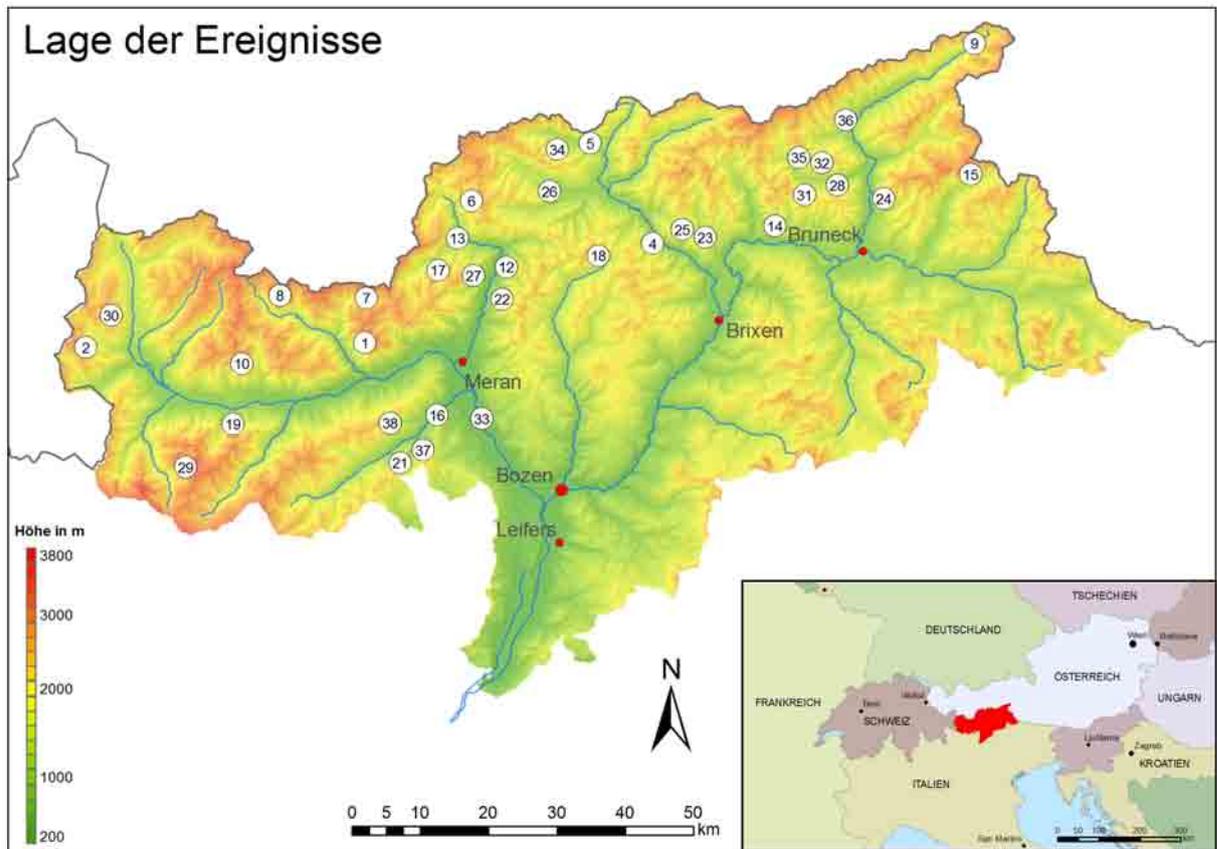


Abb. 4.1: Lage der Ereignisse in Südtirol und geografische Übersicht.

Tab. 4.1: Ausgewählte Ereignisse.

Nr.	Bachname	Datum	Gemeinde	Volumen	Ablagerungs- fläche
				[m ³]	[m ³]
1	Alt-Rateiserbach	06.08.2004	Schnals	1.000	1.050
2	Arundakopfbach 1	23.06.2002	Taufers im Münstertal	15.000	35.505
3	Arundakopfbach 2	27.07.2003	Taufers im Münstertal	1.500	5.740
4	Berglerbach	11.07.2005	Franzensfeste	16.600	7.500
5	Bichlbach	16.11.2002	Brenner	2.500	2.615
6	Draunbergerbach	27.07.2003	Moos im Passeier	2.000	2.940
7	Fanatjoch	16.07.2003	Schnals	5.000	10.512
8	Fineljochferner	12.06.2002	Schnals	3.000	11.560
9	Fuchsbach	11.07.2005	Prettau	3.600	1.818
10	Gadriabach_1	08.08.2003	Schlanders	6.200	6.409
11	Grabenhof Bach	16.11.2002	St. Pankraz	1.680	2.100
12	Grafeisbach	26.07.2005	St. Leonhard in Passeier	11.000	2.350
13	Imstalmbach	27.07.2003	Moos in Passeier	2.500	2.445
14	Kasbach	12.07.2002	Vintl	10.000	12.350
15	Klammbach	18.07.2005	Rasen - Antholz	30.000	29.000
16	Koflerhofbach	16.11.2002	St. Pankraz	2.500	759
17	Koglbach	27.07.2003	Moos in Passeier	15.000	23.160
18	Kranzerbach	26.07.2005	Sarnatal	2.800	1.500
19	Laaserbach	29.08.2003	Laas	20.000	11.000
20	Loterbach 1	16.11.2002	Ulten	2.000	3.510
21	Loterbach 2	16.11.2002	Ulten	2.000	2.557
22	Mainlechnerbach 2	05.06.2003	St. Leonhard in Passeier	3.000	3.794
23	Marbach	29.08.2003	Franzensfeste	3.000	2.210
24	Neuhausbach	23.06.2002	Gais	18.000	38.280
25	NN1	02.07.2003	Franzensfeste	6.000	4.882
26	NN3	18.07.2005	Ratschings	2.000	3.130
27	Prantlbach-Brandwaldbach	26.07.2005	St. Leonhard in Passeier	5.000	6.395
28	Putzerbach	06.06.2003	Mühlwald	15.000	6.900
29	Rosimbach	24.08.2003	Stilfs	15.000	10.540
30	Schlinigeralmbach	17.05.2001	Mals	3.000	8.995
31	Seefeldbach 1	13.06.2002	Mühlwald	70.000	62.266
32	Seefeldbach 2	13.06.2002	Mühlwald	30.000	37.614
33	Sreinmetzbach	16.11.2002	Tisens	1.200	2.161
34	Tribulaunbach 2	10.08.1999	Brenner	1.500	2.975
35	Waldfriedenbach	13.06.2002	Mühlwald	11.000	5.550
36	Weissenbacher-Kahlbach	13.06.2002	Ahrntal	11.000	21.900
37	Zuwasserbach 1	16.11.2002	St. Pankraz	1.500	990
38	Zuwasserbach 2	16.11.2002	St. Pankraz	2.500	2.021

4.2 Datenaufbereitung

4.2.1 Murgangvolumen V

Das Murgangvolumen V wurde im Zuge der Ereignisdokumentation ermittelt und aus dieser übernommen.

Grundsätzlich kann das Murgangvolumen durch die bloße Ermittlung des abgelagerten Materials, durch Bilanzierung des erodierten und abgelagerten Materials oder durch eine geomorphologische Ansprache des erodierten Materials abgeleitet und errechnet bzw. geschätzt werden. Zudem zeigen SCHEIDL und RICKENMANN (2009a) eine weitere Möglichkeit der Volumensbestimmung mittels LIDAR-Daten.

Für die Vorhersage von Ereignisvolumen existieren in der Literatur empirische Gleichungen auf der Grundlage morphometrischer Charakteristiken des Einzugsgebietes. Diese überschätzen aber meist die tatsächliche Magnitude, daher ist eine geomorphologische Ansprache zur Erfassung des erodierbaren Sediments unter Berücksichtigung der lithologischen und meteorologischen Umstände ratsamer. (RICKENMANN, 1999)

Das Volumen ist ein wesentlicher Parameter für die Gefahrenanalyse eines Murganges, da das Bemessungsereignis (zumindest in Südtirol und der Schweiz, siehe Abschnitt 2.3) über das Volumen definiert ist.

4.2.2 Ablagerungsfläche A

Die dokumentierten Ablagerungsflächen gehen aus den Geodaten der Ereignisdokumentation hervor. Informationen über die volumetrische Verteilung und über maximale Ablagerungshöhen sind nicht vorhanden. Die **Ablagerungslänge** L_A läßt sich mithilfe der Orthofotos und der digitalen Geländemodelle ermitteln, indem man dem Gerinne vom Beginn der Ablagerung bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung folgt. Bei einigen Ereignissen sind auch die Flächen der Anrisszonen angegeben.

4.2.3 Reichweite L

Auch die Reichweite wird aus dem GIS ermittelt. Es sind für die meisten Ereignisse Daten für den Murgangverlauf sowie den vorherrschenden Prozess (Erosion, Deposition, reiner Transit) im Einzugsgebiet vorhanden. Somit kann die Länge der Anriss- und Transitstrecke ermittelt werden. Die Reichweite L ist die Länge entlang des Gerinnes

vom höchsten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung, also die Summe aus Anriss-, Transit- und Ablagerungslänge.

4.2.4 Höhendifferenz H und Pauschalgefälle S

Mithilfe der GIS-Daten der Ereignisdokumentation und der digitalen Geländemodelle lassen sich sämtliche wichtige Höhen, wie höchster Punkt der Anrisszone, Höhe Kegelhals, Beginn der Ablagerung, tiefster Punkt der Ablagerung sowie weitere prozess- und modellrelevante Höhen ermitteln. Die Fallhöhe H ergibt sich aus der Differenz des höchsten Punktes der Anrisszone und dem tiefsten Punkt der Ablagerung. Das Pauschalgefälle S ist das Verhältnis von H zur horizontalen Prozesslänge L_h . (siehe auch Abschnitt 3.2.1.1)

4.2.5 Kegelhals - Beginn der Ablagerung

Als *Kegelhals* wird der oberste Punkt des rezenten Mur- bzw. Schwemmkegels bezeichnet. Gekennzeichnet ist der Kegelhals durch eine Gefällsänderung und im Normalfall durch eine Aufweitung des ausgeprägten Gerinnes. Üblicherweise beginnt sich hier das Murgangmaterial abzulagern.

In Abbildung 4.3 ist am Beispiel des Arundakopfbaches der Kegelhals (2) dargestellt. Am Luftbild und an den Höhenschichtlinien ist deutlich die Abflachung unterhalb des Kegelhalses zu erkennen, ebenso ist am Kegel die schwache Ausbildung des Gerinnes zu sehen. Abbildung 4.2 zeigt das Längsprofil desselben Ereignisses vom 26.06.2002 am Arundakopfbach. Der Übergang von der steilen Transitstrecke zur Ablagerungsstrecke weist keinen Gefällsknick auf, sondern einen kontinuierlichen Übergang von hohem zu kleinerem Gefällegradienten.

Die Festlegung des Ablagerungsbeginnes ist durch die Ereignisdokumentation der Ablagerungsflächen gegeben. Der Kegelhals wird mithilfe der digitalen Höhenmodelle und der sich hieraus erstellbaren Höhenschichtlinien und Schattendarstellungen sowie aus den Luftbildern abgeleitet.

4.2.6 Neigung der Transportstrecke (θ_T) und des Kegels (θ_K)

Die Neigung der Transportstrecke und des Kegels werden vereinfachend und in Analogie zum Pauschalgefälle als Gerade vom obersten Punkt des Anrisses bis zum Kegelhals bzw. vom Kegelhals zum Kegelfuß betrachtet (Abb. 4.2). Bei dieser Anschauung ergibt sich ein Gefälleknick beim Kegelhals.

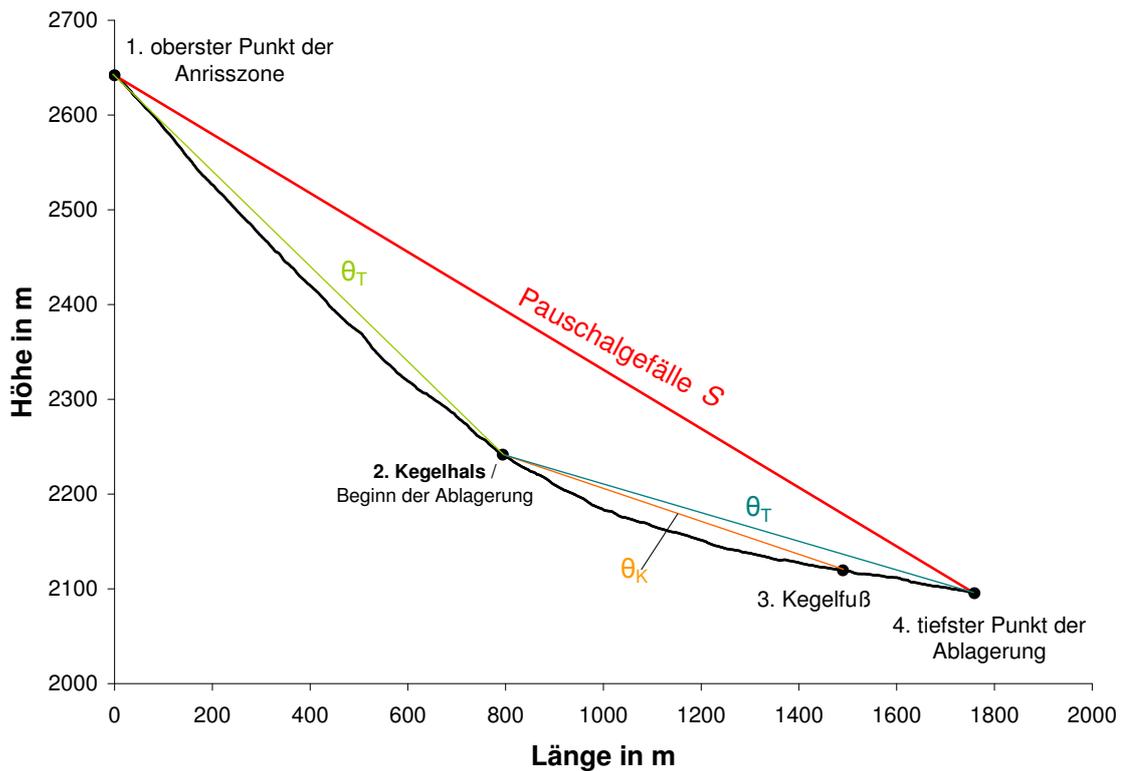
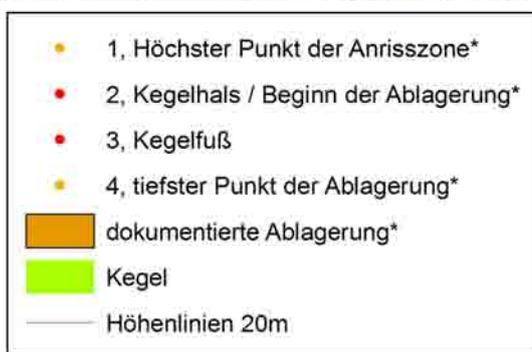
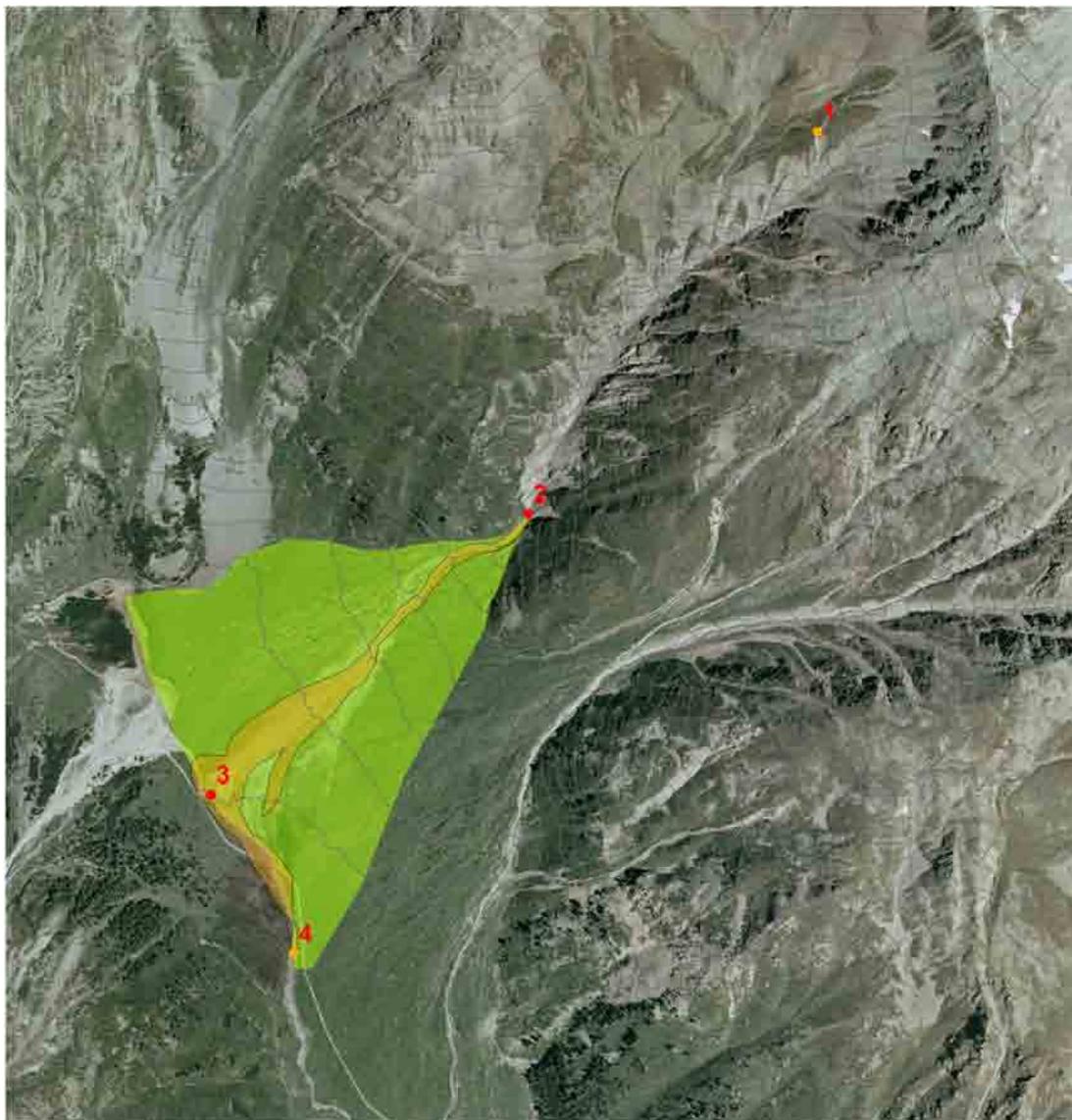


Abb. 4.2: Typisches Längsprofil mit Darstellung prozessrelevanter Punkte am Beispiel des Arundkopfbaches.

Beginnt die Ablagerung des Murgangmaterials erst unterhalb des Kegelhalses, so ist als Transitstrecke und dessen Gefälle der Ablagerungsbeginn als unterer Punkt zu betrachten. Infolgedessen wird als oberer Punkt des hier als **Gefälle der Ablagerung** (θ_A) bezeichneten Neigung der oberste Punkt der Ablagerung als oberer und der tiefste Punkt der Ablagerung als unterer Punkt betrachtet.

4.2.7 Einzugsgebiet

Es wird hier das *Murgangeinzugsgebiet* betrachtet. Dieses erstreckt sich im Gegensatz zum Einzugsgebiet des Gewässers nicht bis zum Vorfluter, sondern nur bis zum Kegelhals. Es wird angenommen, dass unterhalb des Kegelhalses nicht mehr erodiert, sondern nur mehr abgelagert wird.



0 50 100 200 300 400 m

**Ausbildung des Kegels
und Darstellung
ereignisbezogener Daten
am Beispiel Arundakopfbach**

* Daten beziehen sich auf das Ereignis vom 26.06.2002

Abb. 4.3: Kegelausbildung und Darstellung ereignisbezogener Daten am Beispiel des Arundakopfbaches.

4.2.8 Maximaler Abfluss Q_{max} und Fließgeschwindigkeit v

Aus den Ereignisdokumentationen der betrachteten Ereignisse gehen keine Informationen über Spitzenabflüsse oder maximale Fließgeschwindigkeiten hervor.

RICKENMANN (1999) stellt anhand von 145 internationalen Ereignissen einen empirischen Zusammenhang zwischen Ereignisvolumen V und Spitzenabfluss Q_{max} des Wasser-Feststoff-Gemisches her:

$$Q_{max} = 0,1 V^{0,833} \quad (4.1)$$

Vergleichend wird auch der empirische Zusammenhang von MIZUYAMA et al. (1992) dargestellt:

$$Q_{Mizuyama} = 0,135 V^{0,78} \quad (4.2)$$

RICKENMANN (1999) ermittelt zur Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit eine empirische Gleichung, in der die Neigung der Transitstrecke θ_T und der Spitzenabfluß Q eingehen (Gleichung 4.3).

$$v = 2,1 Q_{max}^{0,33} \tan \theta_T^{0,33} \quad (4.3)$$

Zur Kalibrierung der Gleichung wird anhand internationaler Ereignisse die berechnete der dokumentierten Geschwindigkeit gegenübergestellt. Zur Berechnung der Maximalgeschwindigkeit wird der in Gleichung 4.1 empirisch ermittelte Spitzenabfluß Q_{max} eingesetzt.

Es wird angenommen, dass sich diese empirisch ermittelten Werte Q_{max} und v am Kegelhals ergeben. Die gewonnenen Werte der einzelnen Ereignisse sind in Tabelle 8.1 im Anhang dargestellt.

4.2.9 Gerinnebreite b und Fließhöhe h

Da keine Informationen zu Gerinnebreiten und maximalen Fließhöhen der einzelnen Ereignisse vorliegen, werden diese aufgrund der vorliegenden Daten ermittelt. Gerinnebreiten werden am Kegelhals mithilfe der Luftbilder und der digitalen Geländemodelle gemessen. Die zugehörige maximale Fließhöhe h wird aus den empirisch ermittelten Größen für den Spitzenabfluss Q_{max} und v und der Gerinnebreite b ermittelt.

Dabei wird vereinfachend ein Rechteckprofil angenommen.

$$h = \frac{Q_{max}}{v b} \quad (4.4)$$

4.3 Simulationsparameter und Durchführung der Simulationen

4.3.1 Eindimensionale Modelle

Die Berechnung der eindimensionalen Modelle ist eigentlich nicht als Simulation zu bezeichnen. Die Reichweite bzw. Auslauflänge kann direkt durch Einsetzen der Parameter in Gleichungen ermittelt werden.

4.3.1.1 Pauschalgefälle nach COROMINAS (1996)

Aus dem dokumentierten Ereignisvolumen V kann durch Einsetzen in Formel 3.2 das Pauschalgefälle S mit H/L_h berechnet werden. Da die Fallhöhe H bekannt ist, kann die horizontale Reichweite L_h nach Corominas bestimmt werden.

Für den Vorhersagefall muss die Fallhöhe H geschätzt werden. Es wird der anzunehmende tiefste Punkt der Ablagerung als unterer Punkt gewählt, dies ist im Regelfall dort, wo das Gerinne den Kegelfuss passiert. Der obere Punkt ist der oberste mögliche Anrisspunkt des angenommenen erodierbaren Feststoffherdes im Einzugsgebiet.

4.3.1.2 Empirische Beziehungen nach RICKENMANN (1999)

Auch zur Bestimmung der Reichweite L nach Rickenmann werden die Parameter V und H herangezogen und in Formel 3.3 eingesetzt. Im Gegensatz zu Corominas wird hier die (schräge) Reichweite, also der wirkliche Fließweg eines Murganges bestimmt.

Im Falle einer Prognose kann die Höhendifferenz H wie oben beschrieben angenommen werden.

4.3.1.3 ACS - Modell nach PROCHASKA et al. (2008)

Der obere Punkt H_{ACSmax} dieses Modells kann mithilfe der vorliegenden Daten aus dem *Arc-GIS* gewonnen werden. Dadurch kann der Punkt H_{ACS} , der auf halber Höhe zwischen dem oberen Punkt und dem Beginn der Ablagerung H_{Amax} liegt, bestimmt werden. Misst man nun noch die horizontale Gerinnelänge von H_{ACS} zu H_{Amax} , so kann man den Winkel β_{ACS} berechnen und mit Gleichung 3.8 den Winkel α_{ACS} bestimmen. Die Auslauflänge L erhält man, indem man eine Gerade mit dem Winkel α_{ACS} vom Punkt H_{ACS} aus mit dem Längsprofil des Gerinnes schneidet. Dies geschieht graphisch mithilfe einer CAD-Software.

Für Vorhersagezwecke kann die Ermittlung der Auslauflänge nach dem ACS-Modell mithilfe einer topografischen Karte im Maßstab 1:25.000 erfolgen. Für die Ausführung des

Modells sind keine Informationen über Anrisszonen oder mögliche Volumen erforderlich.

4.3.1.4 Berechnung der Auslauflänge nach Takahashi

Die für Gleichung 3.9 bis 3.11 erforderlichen Parameter Fließgeschwindigkeit v , Fließhöhe h und die Neigungen der Transitstrecke θ_T und des Kegels θ_K werden, wie in Abschnitt 4.2.8 beschrieben, erhoben. Die gewählten Neigungen charakterisieren am besten den von dieser Theorie angenommenen Geländeknick.

Der Reibungskoeffizient S_f wird als Mittelwert der in der Literatur angegebenen Werte über die mittlere Kegelneigung mit $1,10 \tan \theta_K$ berechnet.

4.3.2 Zweidimensionale Modelle

Bei der Anwendung der Simulationsmodelle wird angenommen, dass das dokumentierte Ereignisvolumen von einer Anrissfläche erodiert wird, dieses die Transportzone ohne Umlagerungsprozesse passiert und sich in der dokumentierten Ablagerungsfläche akkumuliert. Weiters wird die Schubcharakteristik von Murgängen vernachlässigt. In den Modellen wäre eine Nachbildung von Schüben (wenn auch umständlich) zwar möglich, es sind aber einerseits keine Informationen über Anzahl oder Größe der Schübe für die verwendeten Ereignisse bekannt, andererseits würden dadurch noch mehr Variations- und Beeinflussungsmöglichkeiten entstehen. Für die hier betrachteten eher kleinen bis mittleren Ereignisgrößen scheint diese Betrachtung als gerechtfertigt (nur ein Ereignis hat ein Volumen von über 30.000 m^3).

Die größte Problematik bei der Modellierung der dokumentierten Ereignisse entsteht durch die Topografie. Einerseits unterscheidet sich die Topografie vor dem Ereignis und die Topografie zur Zeit der Aufnahme der digitalen Höhenmodelle erheblich, andererseits wird, trotz der hohen Auflösung von $2,5 \text{ m}$, die reale Topografie im DGM nicht immer richtig abgebildet. Zum Beispiel Gerinne, die in der Natur ein Rechteckprofil aufweisen, werden im digitalen Geländemodell oft als leichtes Trapezprofil wiedergegeben, das heißt, es verkleinert sich die Querschnittsfläche. Das größere Problem stellt aber die geänderte Topografie zum Zeitpunkt der Befliegung dar. Sämtliche Einzugsgebiete wurden nach den betrachteten Ereignissen aufgenommen. Es geht in dieser Arbeit um den Vergleich der einzelnen Modelle, daher wurde auf eine Manipulation der vorhandenen digitalen Geländemodelle verzichtet und für alle Modelle das selbe DGM verwendet.

4.3.2.1 TopRun DF

Der Mobilitätskoeffizient k_B läßt sich durch Umformung von Gleichung 3.6 aus dem Ereignisvolumen V und der Fläche der dokumentierten Ablagerung A berechnen. Der Startpunkt wird dort gewählt, wo die dokumentierte Ablagerung beginnt, also am höchsten Punkt der Ablagerungsfläche. In manchen Fällen wird mit diesem Startpunkt kein plausibles Ergebnis erzeugt. In solchen Ereignissen muss der Startpunkt lateral oder auch geringfügig longitudinal verschoben werden. Dies kann an der Qualität der dokumentierten Daten liegen oder an der geänderten Topografie des DGM gegenüber der Topografie zum Zeitpunkt des Ereignisses. Mithilfe der Luftbilder und des digitalen Geländemodelles wird eine Koordinate in Gerinnemitte gewählt.

Für die Monte Carlo-Steps (MCS) wird der empfohlene Wert von 50 angenommen. Ergibt sich eine zu geringe bzw. zu große Ausbreitung oder eine zu lange bzw. zu kurze Auslauflänge kann dieser Wert geändert werden. Für die erste Simulation eines Ereignisses wird keine Überhöhung des Geländemodelles (*elevation step*) vorgenommen, es wird also von keinem stark kanalisierten Gerinne am Kegel ausgegangen. Erreicht jedoch die simulierte Fläche nicht die Größe der dokumentierten Fläche, da die potenziellen Fließwege nicht aus dem Gerinne ausufern können, wird eine Überhöhung gewählt. Diese wird möglichst klein gehalten, die dokumentierte Ablagerungsfläche muss jedoch erreicht werden.

Als Ergebnis einer Simulation erhält man zwei Rasterdateien. Eine davon enthält die Informationen des ersten Schrittes der Simulation, in der die potenziellen Fließwege mit der Überflutungswahrscheinlichkeit je Zelle berechnet werden. Die zweite Datei enthält das endgültige Ergebnis über die simulierte Ablagerungsfläche und die Ablagerungshöhe je Zelle. In Abbildung 4.4 sind die beiden Raster anhand eines Beispielen abgebildet.

4.3.2.2 TopFlow DF

In einem Input-File werden folgende Parameter festgelegt:

- Startpunkt (X und Y Wert)
- Ereignisvolumen V
- Durchfluss Q
- Mobilitätskoeffizient k_B

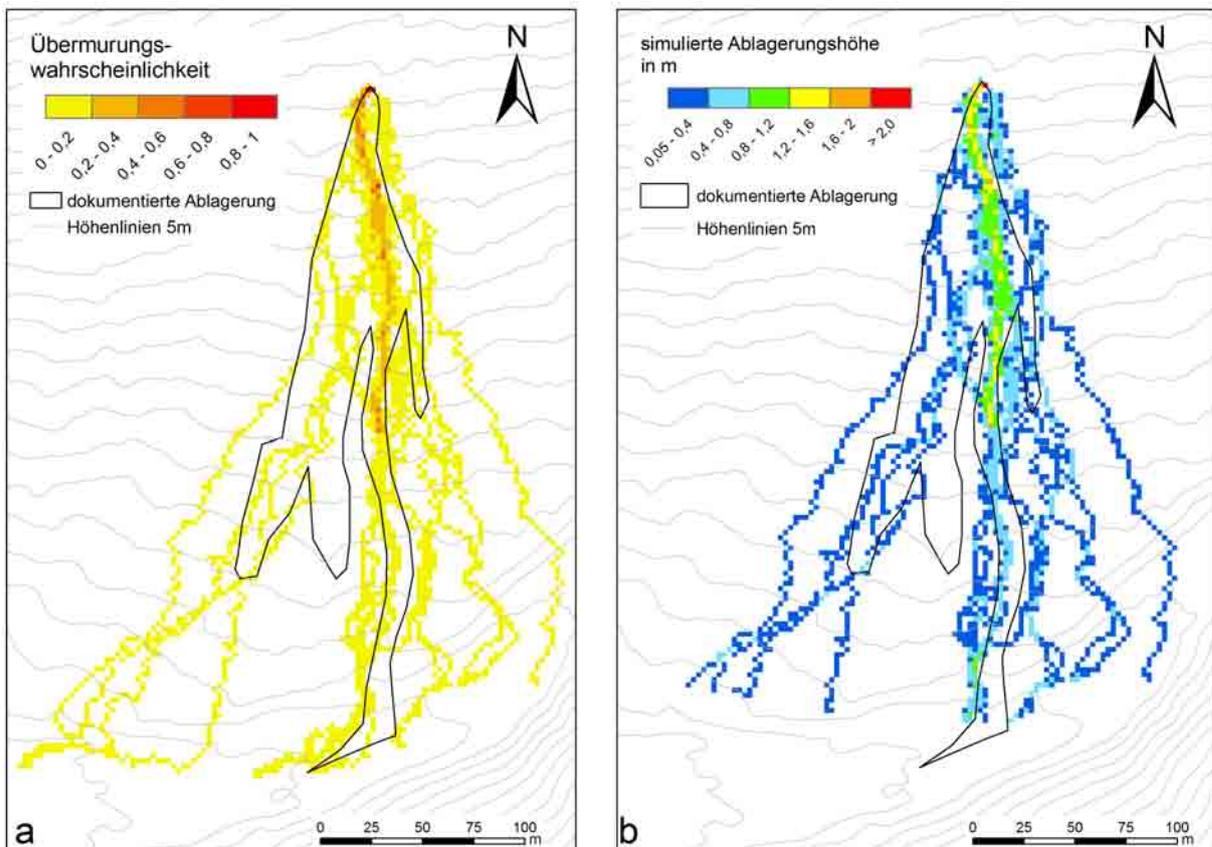


Abb. 4.4: Die beiden Rasterdateien einer TopRun Simulation anhand des Beispielerignisses Fanatjoch; a ... Raster mit potenziellen Fließwegen und Überschneidungswahrscheinlichkeiten, b ... simulierte Ablagerungsfläche und Ablagerungshöhen.

- Neigung der Transportstrecke θ_T
- Startwert für den Reibungswinkel S_f
- Fließhöhe h
- Fließbreite b
- Überhöhung (*Elevation-Step*) falls kanalisiertes Gerinne

Diese Parameter liegen als Textfile zusammen mit dem DGM im ASCII-Format in einem Ordner. Der Durchfluss Q und die Fließhöhe h werden, wie in Abschnitt 4.2.8 beschrieben, empirisch erhoben. Der Mobilitätskoeffizient k_B wird wie beim zuvor vorgestellten Programm TopRun DF bestimmt. Es besteht bei TopFlow DF die Möglichkeit, die Überhöhung (*Elevation-Step*) des Geländemodells nur im gewünschten Bereich, also im Gerinne, anzusetzen. Hierfür wird mithilfe des Orthofotos und/oder des Geländemodells

der gewünschte Bereich ausgewählt und diese Information ebenfalls in Form eines ASCII-Files in den Ordner gespeichert. Für den Reibungswinkel S_f wird als Startwert wie auch bei der eindimensionalen Berechnung der Auslauflänge nach Takahashi das 1,1 fache der Kegelneigung eingesetzt. Am Ende der Simulation ist die Ablagerungsfläche und der ermittelte Reibungskoeffizient abzulesen. Das Ergebnis des ersten Simulationsschritts ist in Abbildung 4.5 (a) zu sehen. Es werden, wie bei TopRun DF, die potenziellen Fließwege ermittelt. Jedoch wird hier die doppelte Ablagerungsfläche des dokumentierten Ereignisses modelliert (siehe Abschnitt 3.3.2). In Abbildung 4.5 (b) ist anhand eines Beispiels das Resultat des zweiten Schrittes zu sehen. Hier sind die modellierte Ablagerungsfläche und die auftretenden maximalen Geschwindigkeiten dargestellt. Die Berechnung der Ablagerungshöhen bzw. der Fließhöhen ist bis dato noch unzureichend gelöst. Das Programm befindet sich aber noch in Entwicklung.

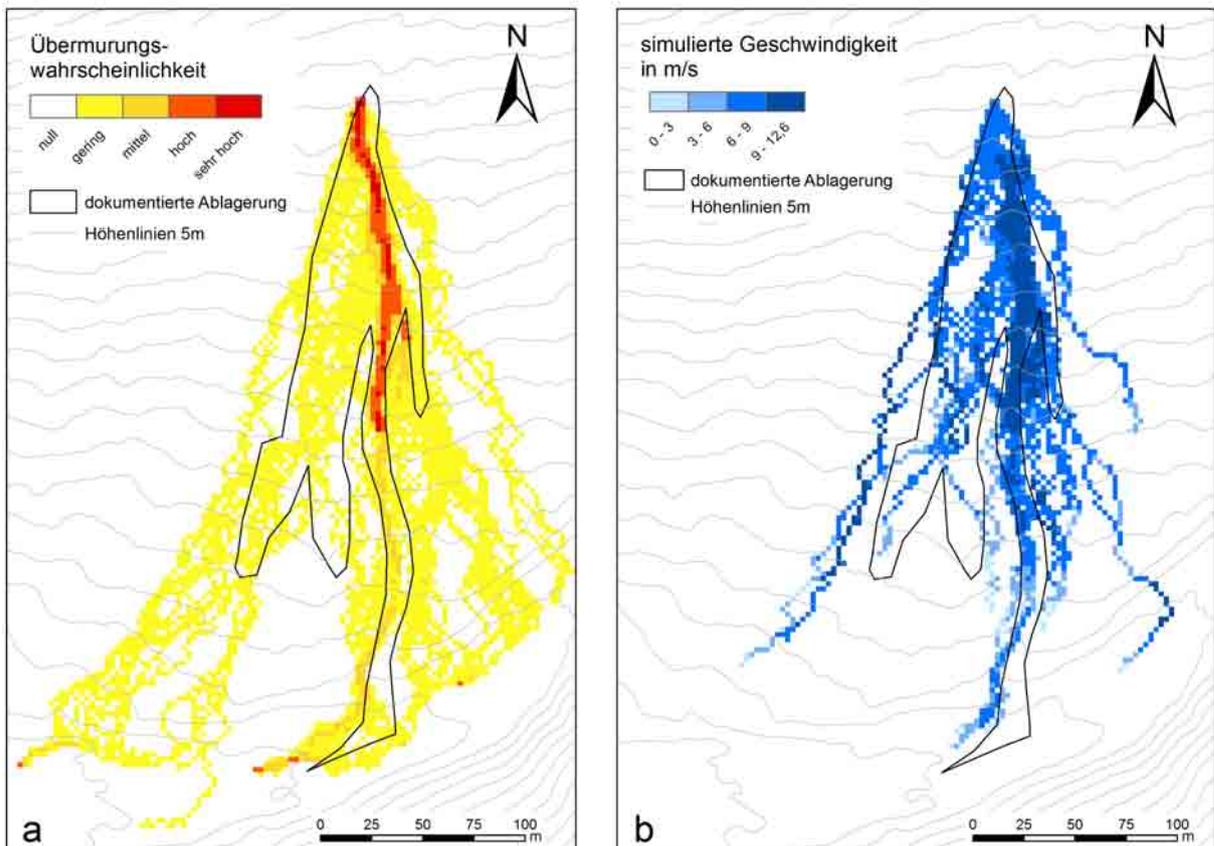


Abb. 4.5: Die beiden Rasterdateien einer TopRun Simulation anhand des Beispiereignisses Fanatjoch; a ... Raster mit potenziellen Fließwegen und Übermurgungswahrscheinlichkeiten, b ... simulierte Ablagerungsfläche und Fließgeschwindigkeiten.

4.3.2.3 RAMMS

Als Grundlage des numerischen Simulationmodells wird das **TOPOGRAFISCHE MODELL** eingelesen. Wie auch bei den anderen 2-dimensionalen Modellen wird es mit der maximalen Auflösung von 2,5 m und in Form einer ASCII-Datei verwendet. Um im Zuge der Sensitivitätsanalyse die Simulationszeiten zu verkürzen, besteht die Möglichkeit, die Auflösung des digitalen Geländemodells zu verkleinern.

Da RAMMS den gesamten Fließweg vom Anriss bis zum Stillstand modelliert, muss ein **ANRISSGEBIET** (engl. *release area*) definiert werden, von dem aus der Prozess beginnt. Über die Größe des Anrissgebietes und die mittlere Mächtigkeit wird das Anfangsvolumen des Murganges bestimmt. Es besteht auch die Möglichkeit, das Anrissvolumen mittels eines Shapefiles einzulesen. Weiters können auch mehrere Anrissgebiete definiert werden. Prinzipiell wird bei den Simulationen ein Anrissgebiet im dokumentierten Beginn des Prozesses definiert. Die Fläche wird so gewählt, dass sich bei einer mittleren Höhe von etwa 1 - 2 m das dokumentierte Ereignisvolumen ergibt. Um die Massen möglichst in einem Schub zu initialisieren, wird die Fläche länglich entlang des Gerinnes gewählt. Führt eine Simulation mit einem angenommenen Anrissgebiet nicht zu dem gewünschten Ergebnis, da sich zum Beispiel der Fluss schon früher verzweigt, kann das Anrissgebiet auch weiter unterhalb in der Transportstrecke angenommen werden.

Durch die Lage und Größe des Anrissgebietes und weitere Parameter (vor allem den Reibungsbeiwert ξ) wird der Hydrograph am Kegelhals beeinflusst. Die Größe und Form des Anrissgebietes hat bei genügend langem Abstand vom Ablagerungsbereich nur einen geringen Einfluss auf den Hydrographen am Kegelhals und somit auf das Ablagerungsverhalten. In Abbildung 4.6 sind am Beispiel des Ereignisses am Arundakopfbach drei Simulationen mit verschiedenen großen Anrissgebieten dargestellt. Die anderen Parameter wurden konstant gehalten und der Abstand der Massenschwerpunkte der einzelnen Anrissgebiete vom Kegelhals war in etwa gleich. Es ist zu sehen, dass sich mit Änderung der Größe der Anrisszone weder die Geschwindigkeit, noch die Fließhöhe wesentlich in ihrem zeitlichen Verlauf und ihrem Spitzenwert ändern.

Der **AKTIVE UND PASSIVE FLIESSDRUCKBEIWER** λ hat nach NAEF et al. (2006) nur geringen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit und Abflusstiefe und wird in den Simulationen Bezug nehmend auf die mündliche Überlieferung von Brian McArdell (März 2009) konstant bei 2,5 gehalten.

Die **DICHTE** ρ kann bei Murgängen stark variieren und liegt etwa zwischen 1.800 und 2.300 kg/m³. Basierend auf mündlicher Überlieferung von McArdell (März 2009) wird für alle durchgeführten Simulationen die Dichte konstant mit 2.000 kg/m³ angenommen.

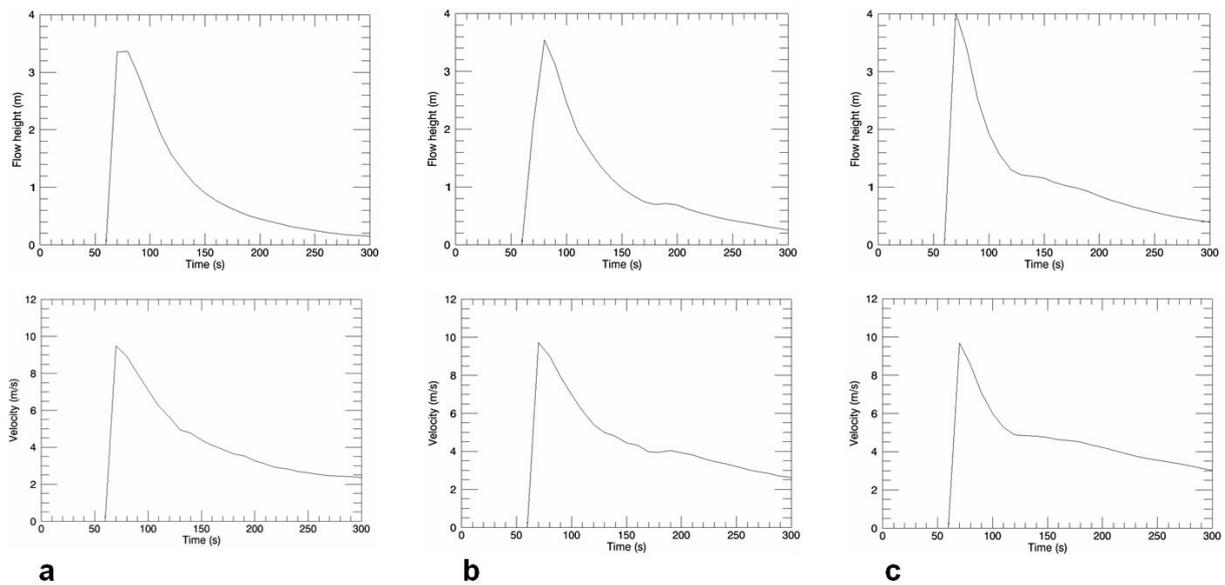


Abb. 4.6: Einfluss der Größe und Anrisshöhe der Anrisszone auf den Hydrographen der Fließhöhe (oben) und der Fließgeschwindigkeit (unten) am Kegelhals anhand von drei verschiedenen Größen der Anrisszone (a...Fläche = 45.000 m², mittlere Höhe = 0,33 m; b...Fläche = 21.500 m², mittlere Höhe = 0,7 m; c...Fläche = 6.500 m², mittlere Höhe = 2,3 m) am Ereignisbeispiel Arundakopfbach.

VEGETATION UND EROSIONSERSCHEINUNGEN könnten in RAMMS zwar berücksichtigt werden, aufgrund der geringen Datenlage und der zusätzlichen Unsicherheitsfaktoren werden solche Phänomene in den Simulationen jedoch nicht berücksichtigt.

Die wesentlichen Parameter, die im Zuge mehrerer Simulationen eines Ereignisses verändert werden und schließlich zu einer **best-fit Simulation** führen sind die Reibungsparameter ξ und μ , aber auch die Laufzeit t . Es werden Startwerte für diese Parameter festgelegt und eine erste Simulation durchgeführt. In dieser wird der Hydrograph am Kegehals betrachtet (Abbildung 4.7) und durch Änderung des Faktors der turbulenten Reibung ξ versucht, die simulierte Maximalgeschwindigkeit und die zugehörige Fließhöhe den empirisch ermittelten Werten anzugleichen, die anderen Parameter werden dabei konstant gehalten. Dann wird die simulierte Ablagerung betrachtet und der Reibungskoeffizient μ so verändert, dass sich Ablagerungslänge und Ausbreitung bestmöglich an die dokumentierte Ablagerungsfläche anpassen. Bei starker Änderung des μ -Wertes muss der ξ -Wert gegebenenfalls wieder angepasst werden. Das Abbruchkriterium einer Simulation ist nicht einheitlich zu definieren. Die Steuerung wird über die **SIMULATIONSZEIT** t durchgeführt. Dabei werden die Frontgeschwindigkeiten

der einzelnen Zeitschritte einer Simulation betrachtet und ein Zeitpunkt gewählt, bei dem angenommen werden kann, dass sich die Massen realistischerweise nicht mehr weiter fortbewegen würden. Diese mit McArdell, B., Rickenmann, D. und Scheidl, C. abgesprochene Grenze wird bei der sich im Frontbereich simulierten Geschwindigkeiten mit $< 0,5 \text{ m/s}$ angenommen. Als Startwert der Laufzeit einer Simulation wird das doppelte der sich durch die empirisch ermittelte Geschwindigkeit und Reichweite des jeweiligen Murganges ergebenden Zeit angesetzt.

In der Literatur finden sich eine Vielzahl an Hinweisen für Reibungsparameterbereiche für die Simulation von Murgängen mit dem Voellmy-Ansatz (siehe in HOSE, 2007). Die Wertebereiche sind sehr unterschiedlich, für den **FAKTOR DER TURBULENTEN REIBUNG** ξ finden sich Werte zwischen 120 und 500 m/s^2 , für den Reibungskoeffizienten μ ist ein Wertebereich zwischen 0,01 und 0,5 zu finden.

Mit dem für den Faktor der turbulenten Reibung ξ angegebenen Wertebereich lassen sich realistische Simulationen durchführen, der Startwert für ξ basiert auf der Chezy-Zahl C ($C = \sqrt{\xi}$).

Der Einfluss der Änderung des ξ -Wertes auf den Hydrographen am Kegelhals ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Bei Erhöhung der turbulenten Reibung verändert sich die Geschwindigkeit sehr stark und dadurch auch der Durchfluss. Es ist aber auch zu sehen, dass der Einfluss auf die Ablagerung in Anbetracht der großen Änderung der Geschwindigkeit sehr gering ist.

Für den **REIBUNGSKOEFFIZIENTEN** μ wird als erster Startwert das 1,1 fache des mittleren Kegelgefälles θ_K gewählt, in Anlehnung an die Erkenntnisse von CHEN und LEE (2003), die einen Zusammenhang zwischen θ_K und μ erkannten. Der Einfluss der Änderung des μ -Wertes auf die Ablagerung ist am Beispiel des Arundakopfbaches in Abbildung 4.8 dargestellt. Dabei wurden alle anderen Parameter konstant gehalten.

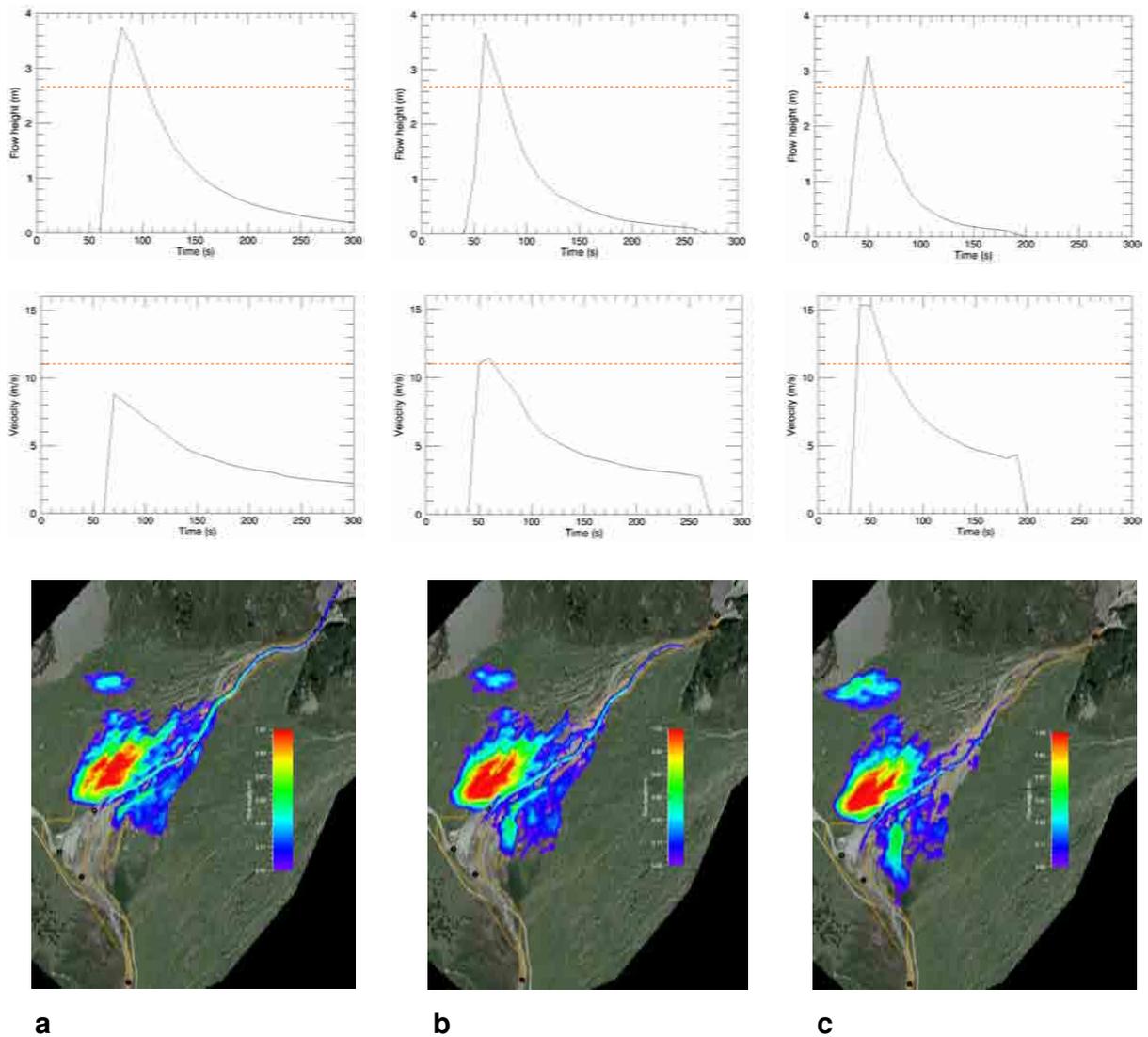


Abb. 4.7: Einfluss des Reibungskoeffizienten ξ auf den Hydrographen der Fließhöhe (oben) und der Fließgeschwindigkeit (mitte) am Kegelhalss und auf die simulierte Ablagerung (unten, dargestellt sind die Ablagerungshöhen) am Ereignisbeispiel Arundakopfbach; a... $\xi = 150$, b... $\xi = 300$, c... $\xi = 600$. Die rot strichlierte Linie stellt die empirisch ermittelte Fließhöhe h bzw. die Fließgeschwindigkeit v dar.

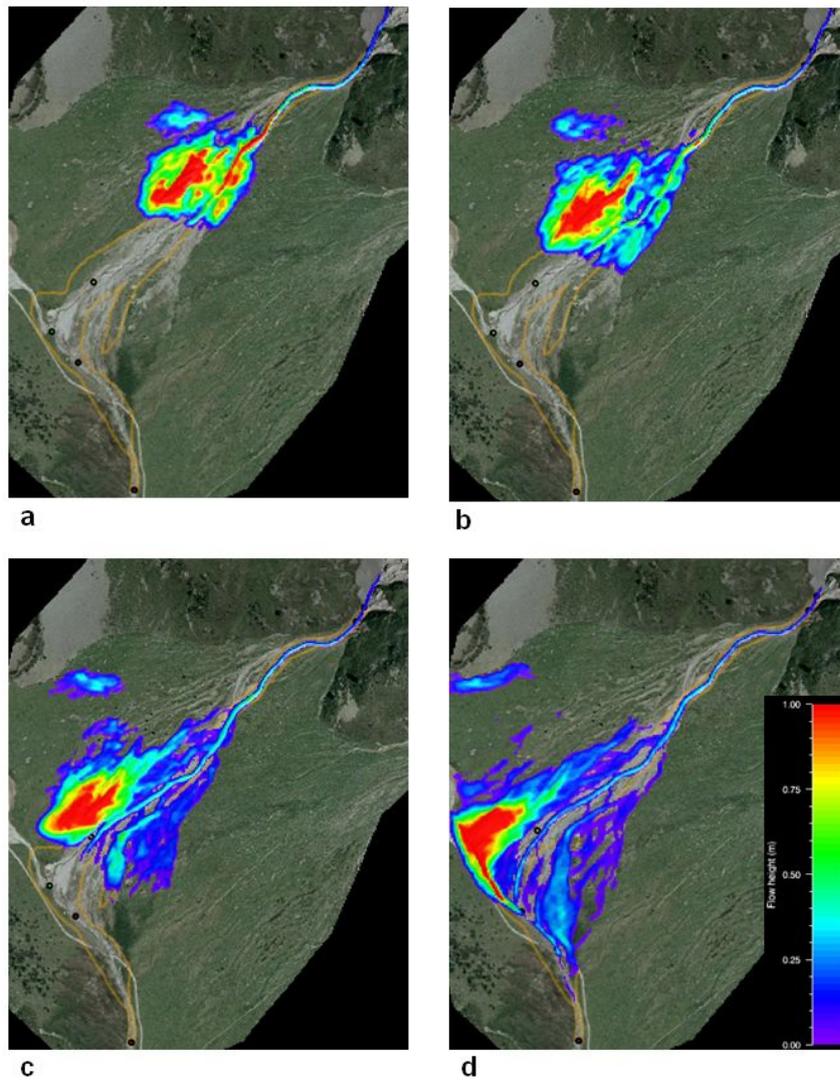


Abb. 4.8: Einfluss des Reibungskoeffizienten μ auf die simulierte Ablagerung am Ereignisbeispiel Arundakopfbach, a: $\mu = 0,20$, b: $\mu = 0,15$, c: $\mu = 0,10$, d: $\mu = 0,05$.

4.3.2.4 FLATModel

Da der für diese Simulationen verwendete Einsatz von FLATModel auch auf dem Voellmy-Modell basiert, sind grundsätzliche Parameter und Programmcharakteristika dem zuvor vorgestellten RAMMS sehr ähnlich bzw. gleich. Der Hauptunterschied liegt darin, dass in FLATModel die Möglichkeit besteht, einen Hydrographen als Eingabeparameter zu definieren. Dies ermöglicht es, die Simulation am Kegelhals bzw. am Beginn der Ablagerung zu starten. Die Vorteile dabei sind kürzere Simulationszeiten, sowie weniger oft durchzuführende Simulationen, um eine „best-fit“-Simulation zu erhalten, da es nicht mehr nötig ist, durch Änderung des Reibungskoeffizienten ξ die gewünschte Fließhöhe und -geschwindigkeit am Kegelhals zu erhalten. Weiters wird zur Simulation nur das DGM des Ablagerungsbereiches und nicht wie bei RAMMS das des gesamten Einzugsgebietes benötigt. Der Hydrograph wird wie in Abbildung 4.9 schematisch dargestellt, aus dem nach Gleichung 4.1 empirisch ermittelten Durchfluss Q_{max} und dem Ereignisvolumen V gebildet. Der Nachteil dabei liegt in der groben Vereinfachung des Hydrographen, dessen gleichförmige symmetrische Verteilung eine grobe Abstraktion des realen bzw. auch des mit RAMMS erzeugten Hydrographen (vgl. Abbildung 4.7) ist.

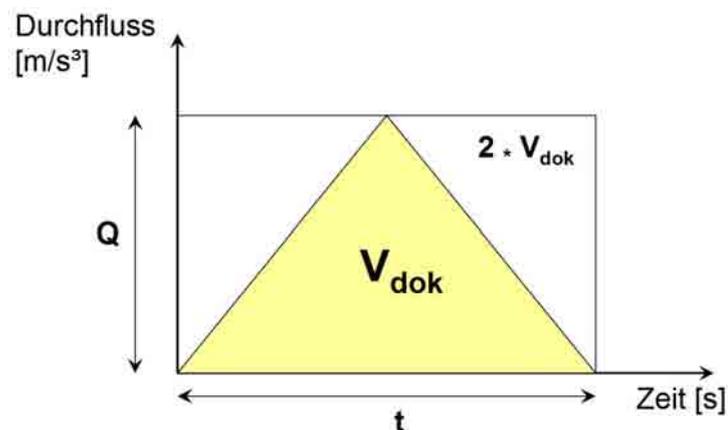


Abb. 4.9: Empirisch ermittelter Hydrograph am Kegelhals (schematisch) als Eingangsparameter für die Simulation in FLATModel.

Die Startwerte der Parameter C , μ und t werden wie zuvor in RAMMS festgelegt, wobei die Chezy-Zahl C der Wurzel des Faktors der turbulenten Reibung ($\sqrt{\xi}$) entspricht. Als Abbruchkriterium wird wie bei RAMMS die Geschwindigkeit der Murgangsbahn betrachtet und bei Erreichen von Geschwindigkeiten von unter 0,5 m/s ein Stehenbleiben des Murganges angenommen.

4.4 Evaluierung der Ergebnisse

Die modellierten Ergebnisse der eindimensionalen Modelle werden den tatsächlichen, dokumentierten Werten gegenübergestellt und grafisch dargestellt. Darauf bezogene Korrelationen zeigen die Qualität der modellierten Resultate. Der Vergleich der einzelnen Modelle untereinander erfolgt, indem die Diagramme 5.2 bis 5.10 miteinander verglichen werden.

Zur Evaluierung der Ergebnisse der zweidimensionalen Modelle werden quantitative Vergleichswerte aus modellierter Ablagerungsfläche und -volumen in Bezug auf die dokumentierten Daten berechnet. Diese Werte können für die einzelnen Ereignisse und jeweiligen Modelle dargestellt und direkt bewertet werden. Es ist jedoch auch eine qualitative Beurteilung (durch Betrachtung der Ergebnisse in den Abbildungen 5.11 bis 5.18) der gewonnenen Simulationsresultate wichtig, da dies eine bessere Interpretation der Ergebnisse ermöglicht.

Die quantitative Evaluierung folgt einem von CARRANZA und CASTRO (2006) vorgeschlagenen Konzept. Durch Übereinanderlegen von dokumentierter Fläche A_{dok} und modellierter Fläche A_{mod} können die Teilflächen A_X , A_Y und A_Z berechnet werden, welche schematisch in Abbildung 4.10 dargestellt sind.

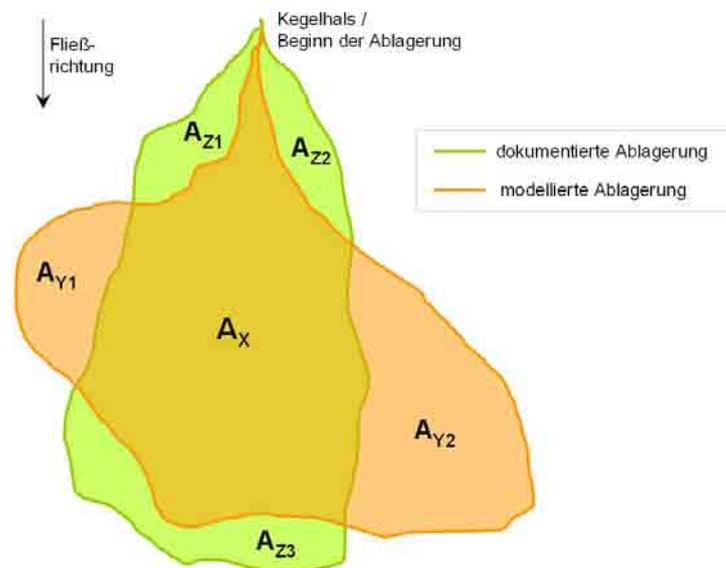


Abb. 4.10: Evaluierung zweidimensionaler Modelle: Bestimmung von Teilflächen zur Bestimmung des Evaluierungsfaktors Ω .

Die dokumentierte bzw. die modellierte Gesamtfläche ergeben sich dabei mit:

$$A_{dok} = \sum_{i=1}^{n_{A_X}} A_{X,i} + \sum_{j=1}^{n_{A_Z}} A_{Z,j} \quad (4.5)$$

$$A_{mod} = \sum_{i=1}^{n_{A_X}} A_{X,i} + \sum_{k=1}^{n_{A_Y}} A_{Y,k} \quad (4.6)$$

Aus diesen Flächen lassen sich die Verhältniszahlen α (positive Übereinstimmung der modellierten und der dokumentierten Flächen), β (modellierte Flächen, die außerhalb der dokumentierten Flächen liegen) und γ (dokumentierte Flächen, die nicht modelliert werden) ableiten (Gleichungen 4.7 bis 4.9).

$$\alpha = \frac{A_X}{A_{dok}} \quad (4.7)$$

$$\beta = \frac{A_Y}{A_{dok}} \quad (4.8)$$

$$\gamma = \frac{A_Z}{A_{dok}} \quad (4.9)$$

Zusätzlich können bei Betrachtung der volumetrischen Verteilung der modellierten Ablagerungen die Volumina $V_{A,X}$ und $V_{A,Y}$ definiert werden, woraus sich die Verhältnisse ϵ (für modellierte Volumina, die innerhalb der dokumentierten Fläche liegen) und ϕ (für modellierte Volumina, die außerhalb der dokumentierten Fläche liegen) ergeben (Gleichungen 4.10 und 4.11).

$$\epsilon = \frac{V_{AX}}{V_{dok}} \quad (4.10)$$

$$\phi = \frac{V_{AY}}{V_{dok}} \quad (4.11)$$

Aus diesen Verhältnissfaktoren lässt sich nun ein **Evaluierungsfaktor** Ω_V berechnen, der die Deckungsgenauigkeit der modellierten mit den dokumentierten Flächen und Volumina präsentiert:

$$\Omega_V = \alpha - \beta - \gamma - \epsilon \quad (4.12)$$

Der Wertebereich für Ω_V liegt zwischen -2 und 2, für den Fall, dass die modellierte

Fläche gleich der dokumentierten Fläche ist. Bei den numerischen Modellen RAMMS und FLATModel wird meist eine größere Fläche modelliert, der untere Wertebereich ist dann abhängig vom Verhältnis A_{mod} zu A_{dok} und wird kleiner als -2. Die Wertebereiche für sämtliche Simulationsergebnisse sind im Anhang in den Tabellen 8.3ff. angegeben. Eine optimale Simulation eines dokumentierten Ereignisses hat demnach einen Ω_V -Wert von 2. Stimmt die simulierte Fläche überhaupt nicht mit der dokumentierten zusammen, ergibt sich ein Wert von -2 oder kleiner.

Beim Simulationsmodell TopFlow DF ist keine Information über Ablagerungshöhen und damit über die volumetrische Verteilung der Ablagerung verfügbar. Um auch Vergleichswerte für dieses Programm zu erhalten, wird der Evaluierungsfaktor Ω_A eingeführt:

$$\Omega_A = \alpha - \beta - \gamma + 0,5 \quad (4.13)$$

Der Faktor 0,5 wird addiert, um einen sinnvollen Wertebereich zwischen -1,5 und 1,5 zu erhalten. Aus oben erläuterten Gründen kann der untere Grenzwert kleiner als -1,5 werden.

5 Ergebnisse und Vergleich

5.1 Eindimensionale Modelle

Die Modellierung der Auslauflängen bzw. Reichweiten erfolgte bei allen 38 Ereignissen. Wichtige Parameter wie das Ereignisvolumen V , die Reichweite L , Auslauflänge L_A , Pauschalgefälle S und Kegelneigung θ_K sind in Tabelle 5.1 abgebildet.

In Tabelle 8.1 sind die empirisch ermittelten Werte für die maximale Fließgeschwindigkeit v und den maximalen Durchfluss Q dargestellt. Zu sehen ist auch das jeweilige Ereignisvolumen und die mittlere Neigung der Transitstrecke.

5.1.1 Resultate der einzelnen Modelle

Es werden im folgenden die Resultate der Berechnung der Reichweiten bzw. der Auslauflängen grafisch dargestellt. Die modellierten Ergebnisse werden in Bezug zu den dokumentierten Werten gesetzt, wobei auf der Abszisse die dokumentierten, auf der Ordinate die modellierten Größen zu sehen sind.

Die Ereignisse wurden in die zwei Gruppen *unbeeinflusst* und *gestört* eingeteilt. Für die unbeeinflussten modellierten Ergebnisse wurde jeweils eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt.

Die ersten beiden Modelle nach COROMINAS (1996) und RICKENMANN (1999) sind Ansätze zur Bestimmung der Reichweite, während das ACS-Modell nach PROCHASKA et al. (2008) und das Modell nach TAKAHASHI (1991) die Auslauflänge berechnen. Um die Modelle vergleichen zu können, wird aus den modellierten Reichweiten der ersten beiden Ansätze eine theoretische Auslauflänge berechnet.

Nr	Bachname	Volumen	Reichweite	Auslauf- länge	Fallhöhe	Pauschal- gefälle	gestört
		V [m ³]	L [m]	L _A [m]	H [m]	S [°]	
1	Alt-Rateiserbach	1.000	2.217	55	1.533	35	x
2	Arundakopfbach 1	15.000	1.759	981	547	17	
3	Arundakopfbach 2	1.500	700	142	117	9	
4	Berglerbach	16.600	1.547	349	553	20	
5	Bichlbach	2.500	536	109	110	12	
6	Draunbergerbach	2.000	1.905	119	1.000	28	
7	Fanatjoch	5.000	964	339	382	22	
8	Fineljochferner	3.000	1.841	352	979	28	
9	Fuchsbach	3.600	852	63	353	23	x
10	Gadriabach 1	6.200	2.960	203	915	17	x
11	Grabenhof Bach	1.680	672	119	181	15	
12	Grafeisbach	11.000	2.008	108	616	17	
13	Imstalmbach	2.500	2.778	140	1.171	23	x
14	Kasbach	10.000	3.260	186	964	16	
15	Klambach	30.000	3.057	391	1.084	20	
16	Koflerhofbach	2.500	540	56	265	26	
17	Koglbach	15.000	1.971	712	602	17	
18	Kranzerbach	2.800	1.021	61	511	27	x
19	Laaserbach	20.000	2.485	389	988	22	
20	Loterbach 1	2.000	720	168	307	23	
21	Loterbach 2	2.000	544	141	276	27	
22	Mainlechnerbach 2	3.000	809	158	365	24	x
23	Marbach	3.000	926	113	488	28	
24	Neuhausbach	18.000	2.388	581	1.025	23	
25	NN1	6.000	1.528	137	862	29	
26	NN3	2.000	1.127	102	713	32	
27	Prantlbach-Brandwaldbach	5.000	2.277	159	758	18	
28	Putzerbach	15.000	1.615	104	634	21	
29	Rosimbach	15.000	1.933	384	418	12	
30	Schlinigeralmbach	3.000	761	202	435	30	
31	Seefeldbach 1	70.000	2.181	491	1.128	27	
32	Seefeldbach 2	30.000	1.472	474	685	25	
33	Sreinmetzbach	1.200	261	82	92	19	
34	Tribulaunbach 2	1.500	1.454	97	745	27	
35	Waldfriedenbach	11.000	1.082	169	378	19	
36	Weissenbacher-Kahlbach	11.000	1.131	419	431	21	
37	Zuwasserbach 1	1.500	1.087	45	471	23	
38	Zuwasserbach 2	2.500	1.180	54	496	23	

Tab. 5.1: Übersicht der Ereignisse und Darstellung wichtiger Parameter.

5.1.1.1 Reichweite nach COROMINAS (1996)

Die modellierten Ergebnisse werden in Abbildung 5.1 den dokumentierten Reichweiten gegenübergestellt. Im unteren Bereich, bis zu einer Reichweite von etwa 1.000 m entsprechen die modellierten Längen in etwa den dokumentierten, ein Großteil der Werte liegt innerhalb des Vertrauensbereiches von 80 %. Bei Ereignissen mittlerer Reichweiten von etwa 1.500 bis 2.000 m ist eine größere Streuung zu beobachten, dennoch ist eine Korrelation zwischen modellierten und dokumentierten Größen erkennbar. Bei größeren Reichweiten ab etwa 2.000 m horizontaler Reichweite liefert das Modell deutlich schlechtere Ergebnisse.

Um nun, wie bereits erwähnt, aus der modellierten horizontalen Reichweite L die (schräge) Auslauflänge L_A zu erhalten und so das Modell mit den anderen vergleichbar zu machen, wird vorerst die horizontale Auslauflänge $L_{A,h}$ berechnet. Dabei wird als Referenzpunkt der Beginn der dokumentierten Ablagerung betrachtet. Die mithilfe der Dokumentation und den Geodaten erhaltene tatsächliche horizontale Länge der Transitstrecke L_T (also die Länge von Beginn des Anrisses bis zum Beginn der Ablagerung) wird von der modellierten Reichweite L abgezogen.

$$L_{A,h} = L - L_T \quad (5.1)$$

Somit ergibt sich eine „theoretische“ modellierte (horizontale) Auslauflänge.

Um von der horizontalen Auslauflänge auf die (schräge) Auslauflänge zu kommen, wird diese mit der mittleren Kegelneigung θ_K umgerechnet:

$$L_A \cong \frac{L_{A,h}}{\cos \theta_K} \quad (5.2)$$

Es ist dadurch möglich, dass sich negative modellierte Auslauflängen ergeben. Das ist der Fall, wenn die modellierte Reichweite den tatsächlichen Beginn der Ablagerung nicht erreicht und somit die Prozesslänge deutlich unterschätzt.

Ereignisse, bei denen eine negative Auslauflänge modelliert wird, werden aus dem Datensatz ausgeschieden, da sonst kein Vergleich der Modelle möglich ist. Außerdem ist in solchen Fällen dieses Modell zur Bestimmung der Auslauflänge nicht geeignet. Bei acht der 38 Ereignisse erreicht die modellierte Reichweite nicht den Beginn der dokumentierten Ablagerung.

In Abbildung 5.2 sind die so erhaltenen Auslauflängen nach COROMINAS (1996)

den dokumentierten Werten gegenübergestellt. Es zeigt sich ein deutlich geringerer Zusammenhang zwischen modelliertem und dokumentierten Werten. Die modellierten Werte können im besten Fall eine grobe Abschätzung der wahren beobachteten Länge sein. Es ist zu sagen, dass vor allem mittlere Auslauflängen von 200 bis 600 m eher überschätzt werden.

5.1.1.2 Reichweite nach RICKENMANN (1999)

Mit dem Modell nach RICKENMANN (1999) wird die Reichweite L von Murgängen modelliert. Abbildung 5.3 zeigt die berechneten Reichweiten L_{mod} in Bezug zu den dokumentierten Reichweiten L_{dok} . Es zeigt sich ein sehr ähnliches Bild als bei dem Modell nach COROMINAS (1996). Auch hier zeigt sich eine recht gute Prognose für kleine und mittlere Reichweiten bis 2.000 m, darüber ist eine größere Streuung zu verzeichnen.

Um diese Resultate mit den anderen Modellergebnissen vergleichen zu können, wird auch hier, wie beim Modell nach COROMINAS (1996), eine theoretische Auslauflänge errechnet (siehe Gleichungen 5.1 und 5.2).

Ebenso werden Ereignisse mit negativ modellierten Auslauflängen aus der Betrachtung ausgeschieden. Es ergibt sich eine viel größere Streuung als bei der Betrachtung der Reichweiten. Bei kurzen Auslauflängen bis 200 m werden viele Ereignisse deutlich unterschätzt. Der Beginn der dokumentierten Ablagerung wird von 14 modellierten Ereignissen nicht erreicht, davon haben 12 Ereignisse eine dokumentierte Auslauflänge von unter 200 m. Die Ereignisse mit einer realen Auslauflänge um die 400 m können recht gut simuliert werden, wohingegen sich größere Auslauflängen wieder schlechter simulieren lassen.

5.1.1.3 Auslauflänge nach TAKAHASHI (1991)

Mit dem Modell von TAKAHASHI (1991) kann direkt die Auslauflänge am Kegel berechnet werden. Wie in Abschnitt 4.3.1.4 geschildert, kommen zur Berechnung die empirisch ermittelten und in Tabelle 8.1 dargestellten **Fließgeschwindigkeiten** und **Fließhöhen** zum Einsatz. Auch die mittlere **Neigung** des Kegels und der Transportstrecke werden, wie oben geschildert, eingesetzt. Der **Reibungskoeffizient** S_f wird vorerst nach RICKENMANN (2005) mit $1,1 \tan \theta_K$ berechnet.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.5 präsentiert. Die Auslauflängen werden zum Großteil überschätzt, nur vier der insgesamt 38 Ereignissimulationen zeigen eine kürzere Auslaufstrecke.

Die Regressionsgerade zeigt auch die systematische Überschätzung der modellierten Längen. Grund dafür ist der Reibungskoeffizient S_f , der zu klein angenommen wurde. Die untersuchten Ereignisse verhalten sich granularer, d.h. sie besitzen höhere Reibungswinkel.

Um den Reibungskoeffizienten näher zu untersuchen, wurde dieser durch Umformen von Gleichung 3.9 mithilfe der dokumentierten Auslauflängen für alle Ereignisse zurückgerechnet. Es ergaben sich für die 31 unbeeinflussten Murgänge Werte zwischen 0,12 und 0,56 ($7-29^\circ$) mit einem Mittelwert von 0,25, also ein Reibungswinkel von 14° . Vergleicht man die rückgerechneten Werte für S_f mit den mittleren Kegelneigungen ergeben sich für $S_{f,r}/\tan\theta_K$ Faktoren zwischen 1,07 und 1,7 mit einem Mittelwert von 1,29. In Abbildung 5.6 sind diese Faktoren in Abhängigkeit der jeweiligen Kegelneigung für die 31 unbeeinflussten Ereignisse dargestellt.

Da die erste Modellierung mit dem verwendeten Verhältnisfaktor von 1,10 zu systematisch zu großen Auslauflängen führt, wurde eine weitere Modellierung in der $S_f = 1,29 \tan\theta_K$, also dem Mittelwert der Verhältnisfaktoren aus den rückgerechneten Reibungskoeffizienten, angenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Für kurze Auslauflängen bis 200 m zeigt sich eine recht gute Modellierung im Vergleich zu den anderen Modellen und der ersten Berechnung mit dem Takahashi-Modell. Mittlere und große Auslauflängen werden aber unterschätzt. Die Regressionsgerade zeigt eine starke systematische Abweichung.

In einem weiteren Ansatz (Abbildung 5.8) wurde mit einem angenommenen Verhältnisfaktor von 1,15 ein besseres Ergebnis für die modellierten Auslauflängen erzielt. Die Regressionsgleichung passt hier um einiges besser, mittlere Auslauflängen von 300 bis 600 m werden besser simuliert, aber die kurzen Auslauflängen werden hier wieder überschätzt.

Die Berechnung des Reibungskoeffizienten S_f basiert hier immer auf dem mittleren Kegelgefälle θ_K . Bei einigen Ereignissen erstreckt sich die dokumentierte Ablagerung auch über den Kegelbereich hinaus, was bedeutet, dass der mittlere Winkel der Ablagerungslänge θ_A kleiner sein kann. Zum Beispiel beim Ereignis Draunbergerbach beginnt die dokumentierte Ablagerung erst im Kegelfußbereich und verläuft auf den flachen Alluvionen des Vorfluters (siehe Abbildung 5.12). Dieses Phänomen wird hier nicht näher berücksichtigt, da auch für den Vorhersagefall mit der mittleren Kegelneigung gerechnet werden muss.

5.1.1.4 ACS - Modell nach PROCHASKA et al. (2008)

Das ACS-Modell nach Prochaska modelliert eine Auslauflänge mithilfe einer empirischen Winkelbeziehung auf Grundlage rein topografischer Zusammenhänge. Es geht kein Volumen in die Betrachtung mit ein. In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse der von PROCHASKA et al. (2008) vorgeschlagenen Gleichung 3.8 dargestellt. Es zeigt sich ein zu erwartendes Bild: Ereignisse kleiner Intensität und damit die Auslauflänge werden überschätzt, während solche mit größerer Auslauflänge unterschätzt werden. Murgänge mit einer Auslauflänge um die 400 m können zum Großteil recht gut simuliert werden. Es ist zu erwähnen, dass das in Nordamerika entwickelte Modell auf alle betrachteten Ereignisse anwendbar ist. In Tabelle 8.2 ist der gemessene Winkel β , der modellierte Winkel α und der gemessene, tatsächliche Winkel α_{dok} dargestellt.

5.1.2 Vergleich der Modelle

Die betrachteten vier Modelle werden hier grafisch, also nur qualitativ miteinander verglichen. In Abbildung 5.10 sind die Regressionsgeraden der vorher präsentierten Diagramme dargestellt. Auf eingehendere statistische Methoden wurde hier verzichtet. Es ist zu beachten, dass hier nur eine Auslauflänge von bis zu 600 m betrachtet wird, da sich im Bereich von ca. 50 bis 600 m der größte Teil der dokumentierten Auslauflängen des Datensatzes abspielt.

Kleine Auslauflängen bis 200 m, die sich bei Ereignisgrößen von 1.000 bis etwa 5.000 m³ ergeben, werden von allen Modellen überschätzt. Beim Ansatz nach COROMINAS (1996) und RICKENMANN (1999) sind die modellierten Auslauflängen in diesem Bereich zu beachten, die den dokumentierten Beginn der Ablagerung nicht erreichen und in diese Darstellung nicht miteinfließen. Der Ansatz nach RICKENMANN (1999) ist für Auslauflängen um 400 m und darüber (also bei Volumina von 5.000 bis 10.000 m³ und darüber) geringfügig besser geeignet als dieser von COROMINAS (1996). Das Modell nach TAKAHASHI (1991) reagiert sehr sensibel auf eine geringfügige Änderung des Reibungskoeffizienten S_f . Es zeigt sich, dass mit einem so angesetzten Reibungswinkel bei kleinen Ereignissen höhere, bei größeren Ereignissen kleinere Reibungswinkel anzusetzen sind. Das ACS-Modell zeigt wie gesagt bei Auslauflängen um die 400 m die besten Ergebnisse. Es können also Ereignisse mit Größen von ca. 5.000 bis 15.000 m³ einigermaßen gut simuliert werden, wobei die deutlich größere Streuung dieser Resultate zu berücksichtigen ist.

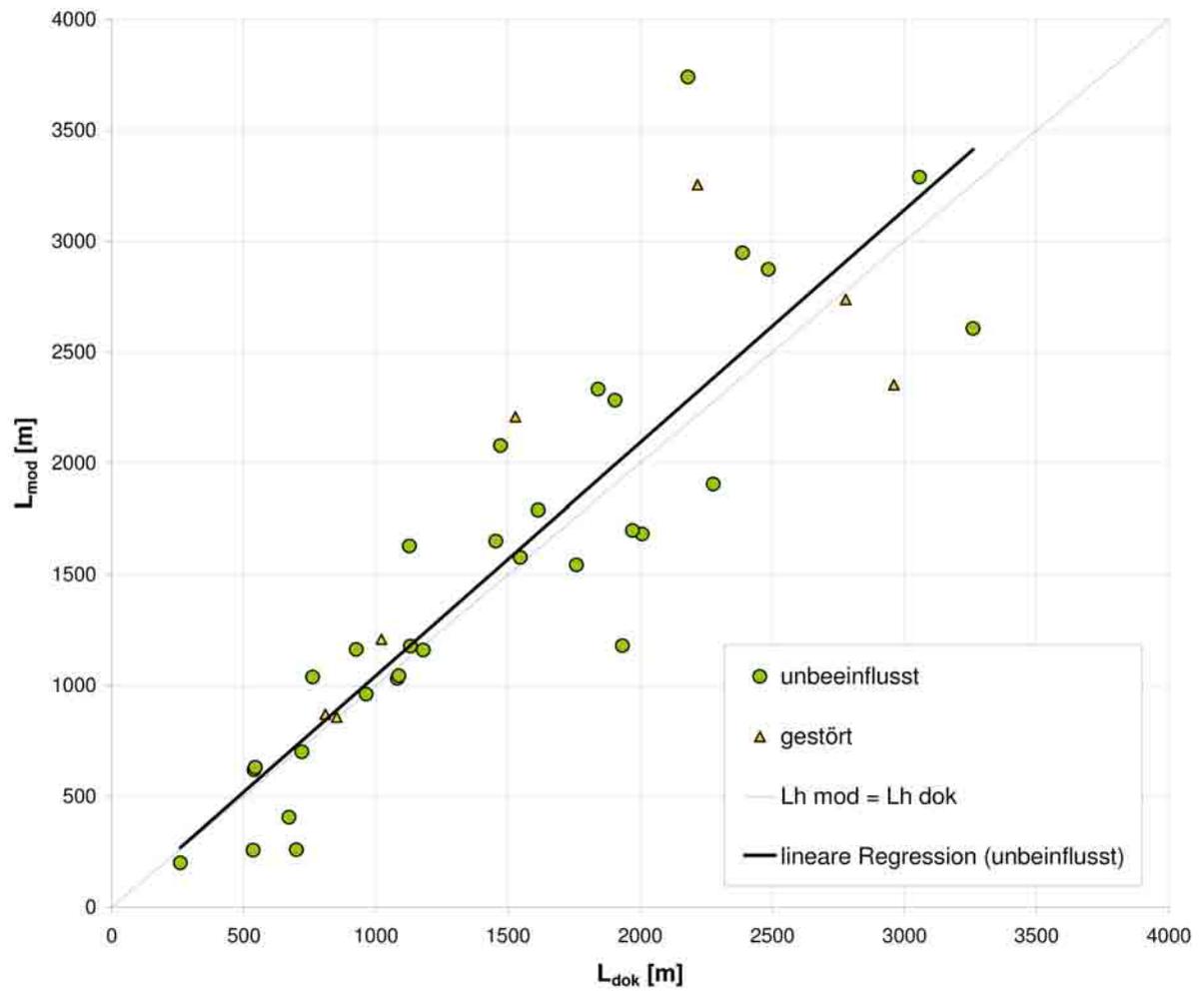


Abb. 5.1: Darstellung der modellierten Reichweite L_{mod} nach COROMINAS (1996) zur dokumentierten Reichweite L_{dok} .

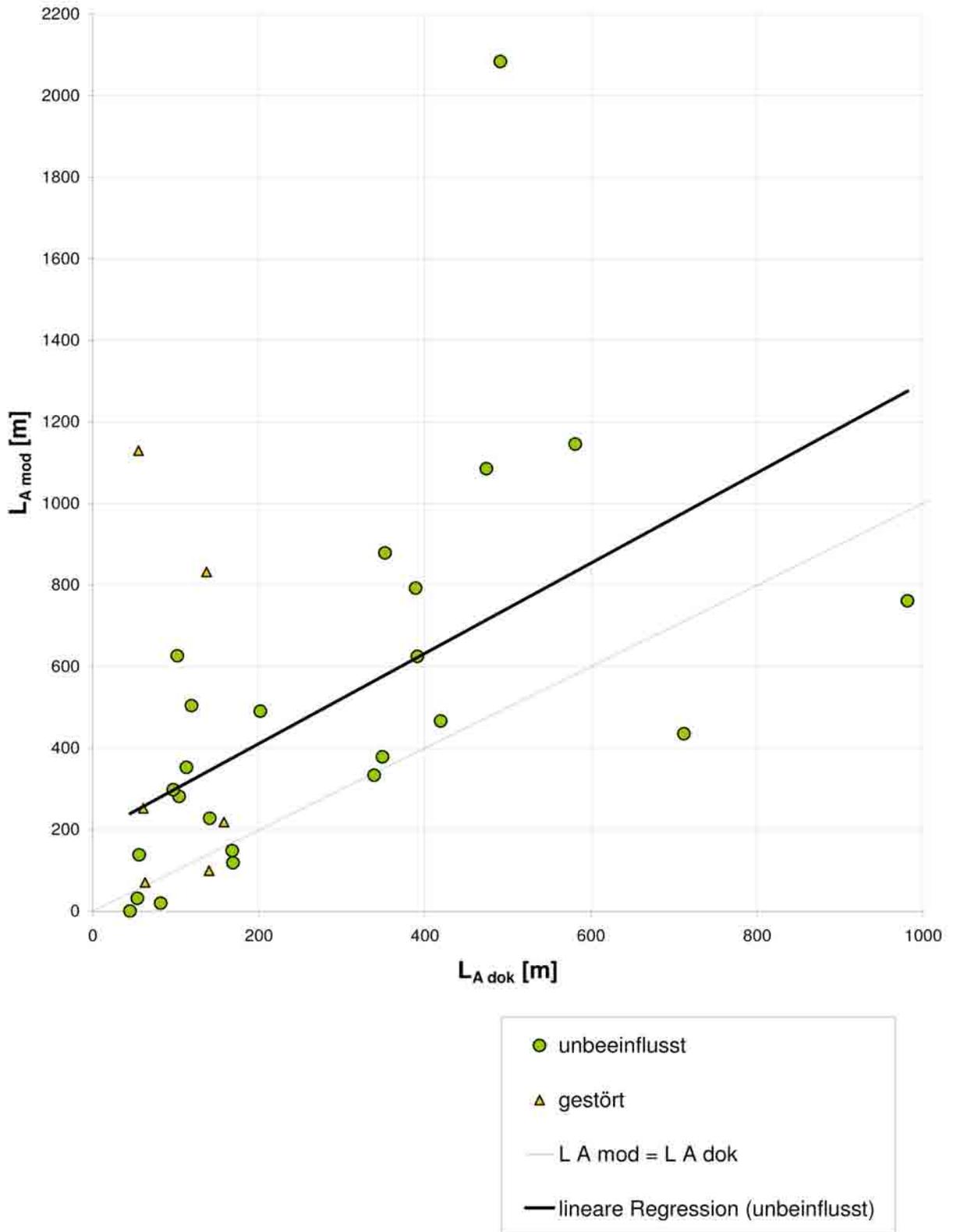


Abb. 5.2: Darstellung der abgeleiteten modellierten Ausläufänge $L_{A, mod}$ nach COROMINAS (1996) zur dokumentierten Ausläufänge $L_{A, dok}$.

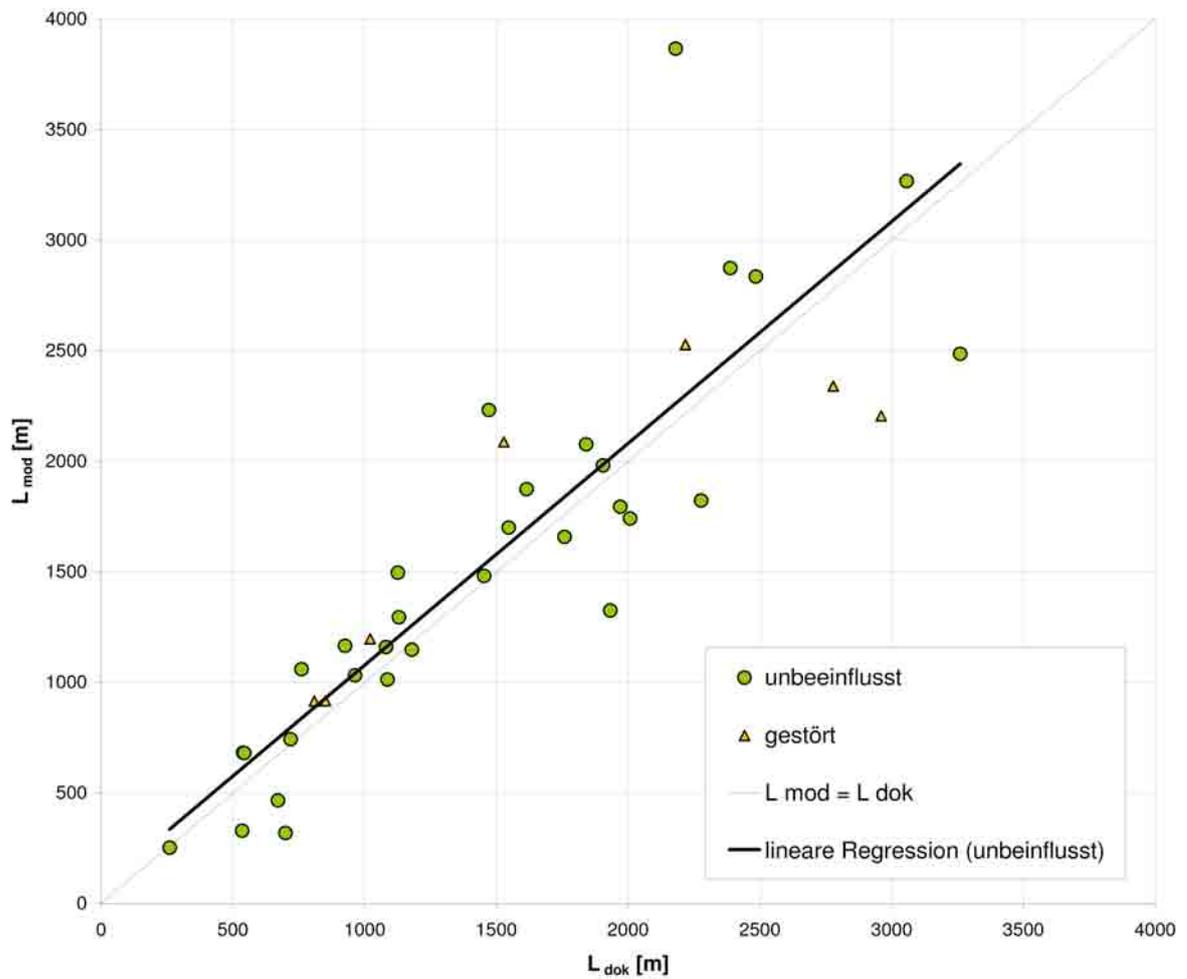


Abb. 5.3: Darstellung der modellierten Reichweite L_{mod} nach RICKENMANN (1999) zur dokumentierten Reichweite L_{dok} .

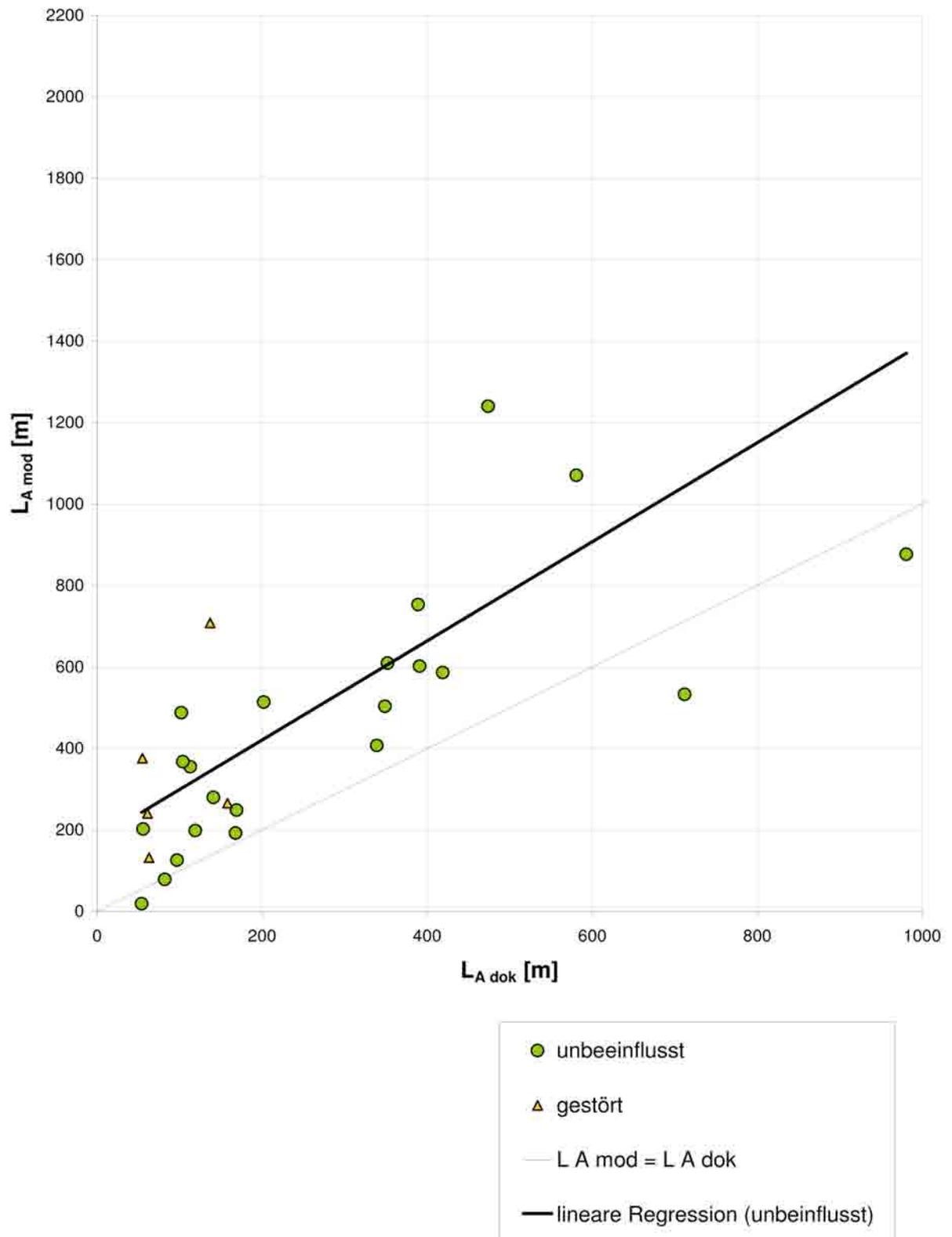


Abb. 5.4: Darstellung der abgeleiteten modellierten Auslaufänge $L_{A, mod}$ nach RICKENMANN (1999) zur dokumentierten Auslaufänge $L_{A, dok}$.

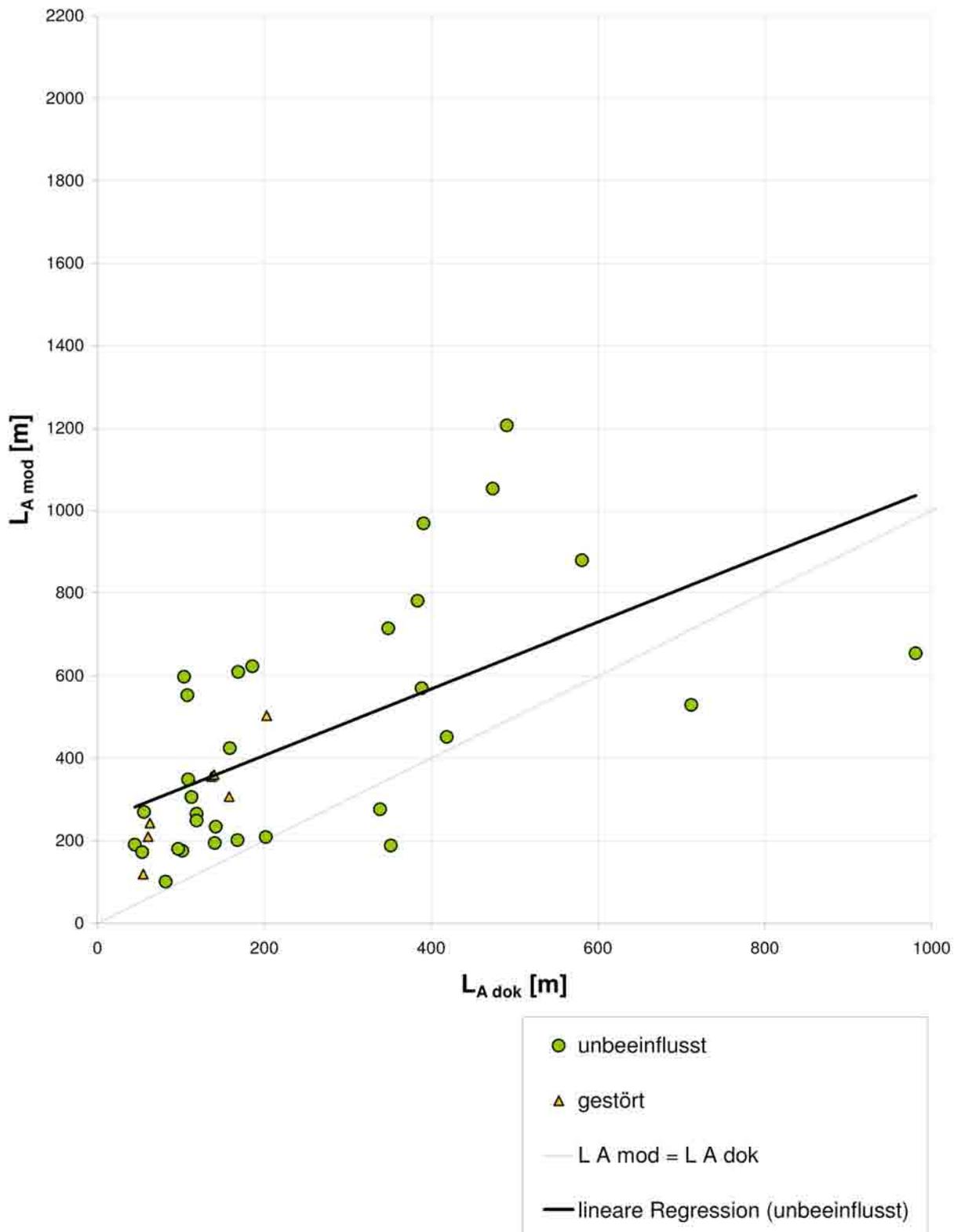


Abb. 5.5: Darstellung der modellierten Ausläufänge $L_{A,mod}$ nach **TAKAHASHI (1991)** zur dokumentierten Ausläufänge $L_{A,dok}$, Reibungskoeffizient $S_f = 1,10 \tan \theta_K$.

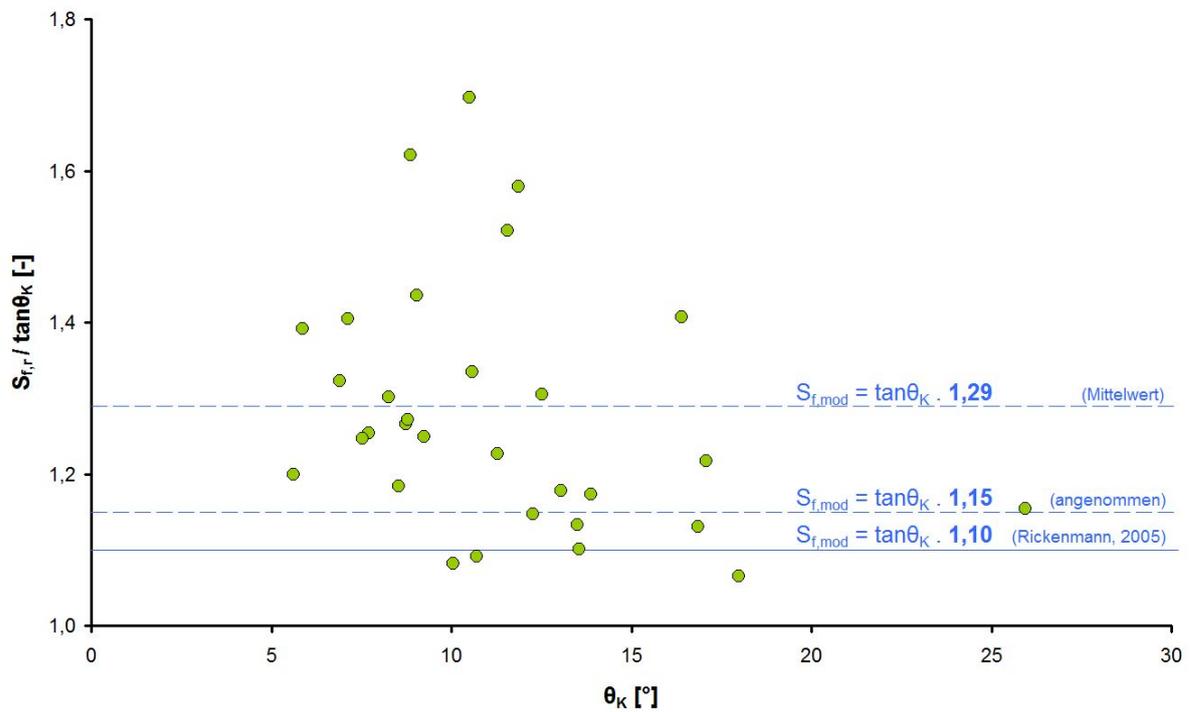


Abb. 5.6: Darstellung des Verhältnisfaktors von rückgerechnetem Reibungswinkel S_f zur jeweiligen Kegelneigung $\tan\theta_K$ in Abhängigkeit der Kegelneigung; in blau dargestellt sind die für die Modellierung verwendeten Faktoren.

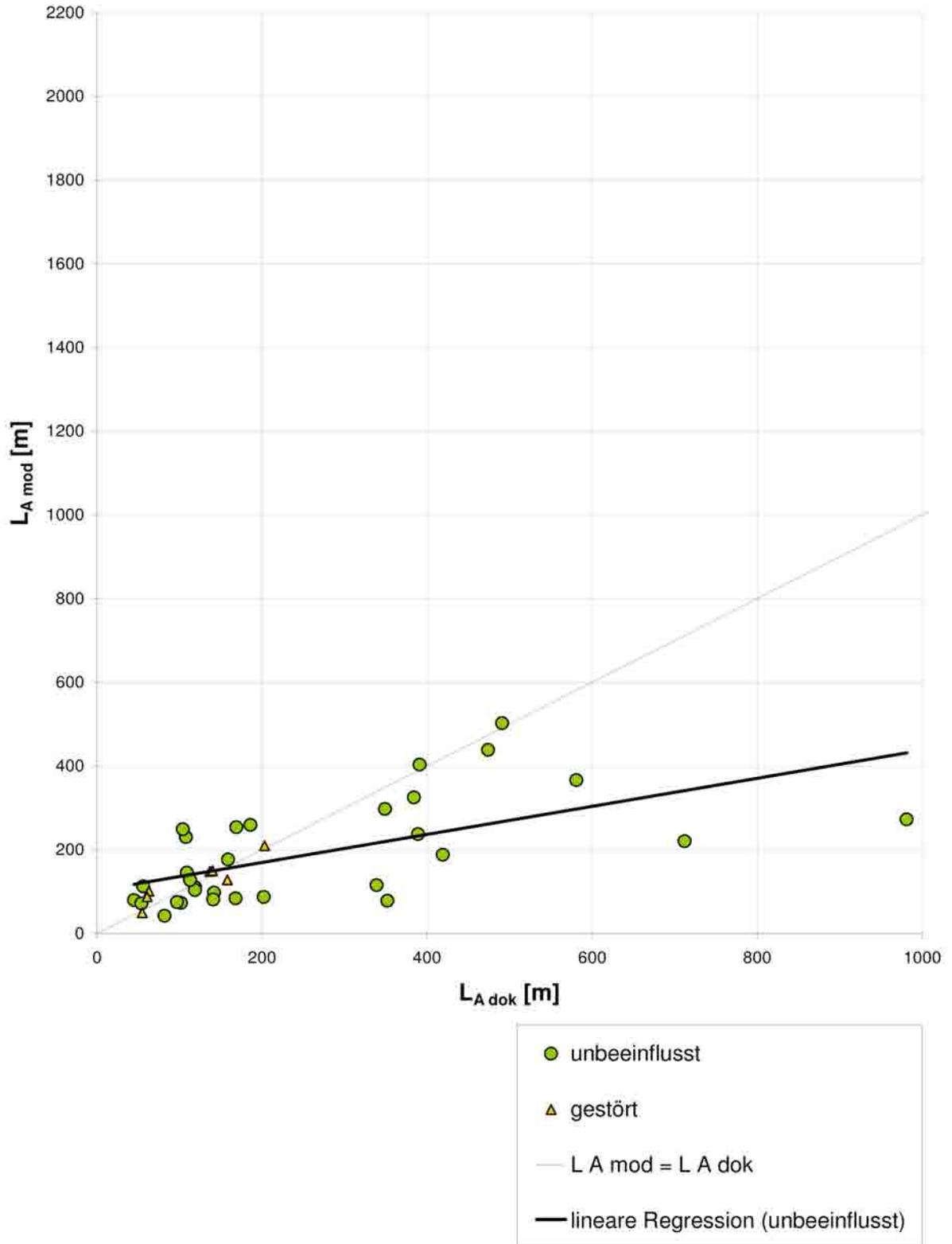


Abb. 5.7: Darstellung der modellierten Auslauflänge $L_{A, mod}$ nach **TAKAHASHI (1991)** zur dokumentierten Auslauflänge $L_{A, dok}$, Reibungskoeffizient $S_f = 1,29 \tan \theta_K$.

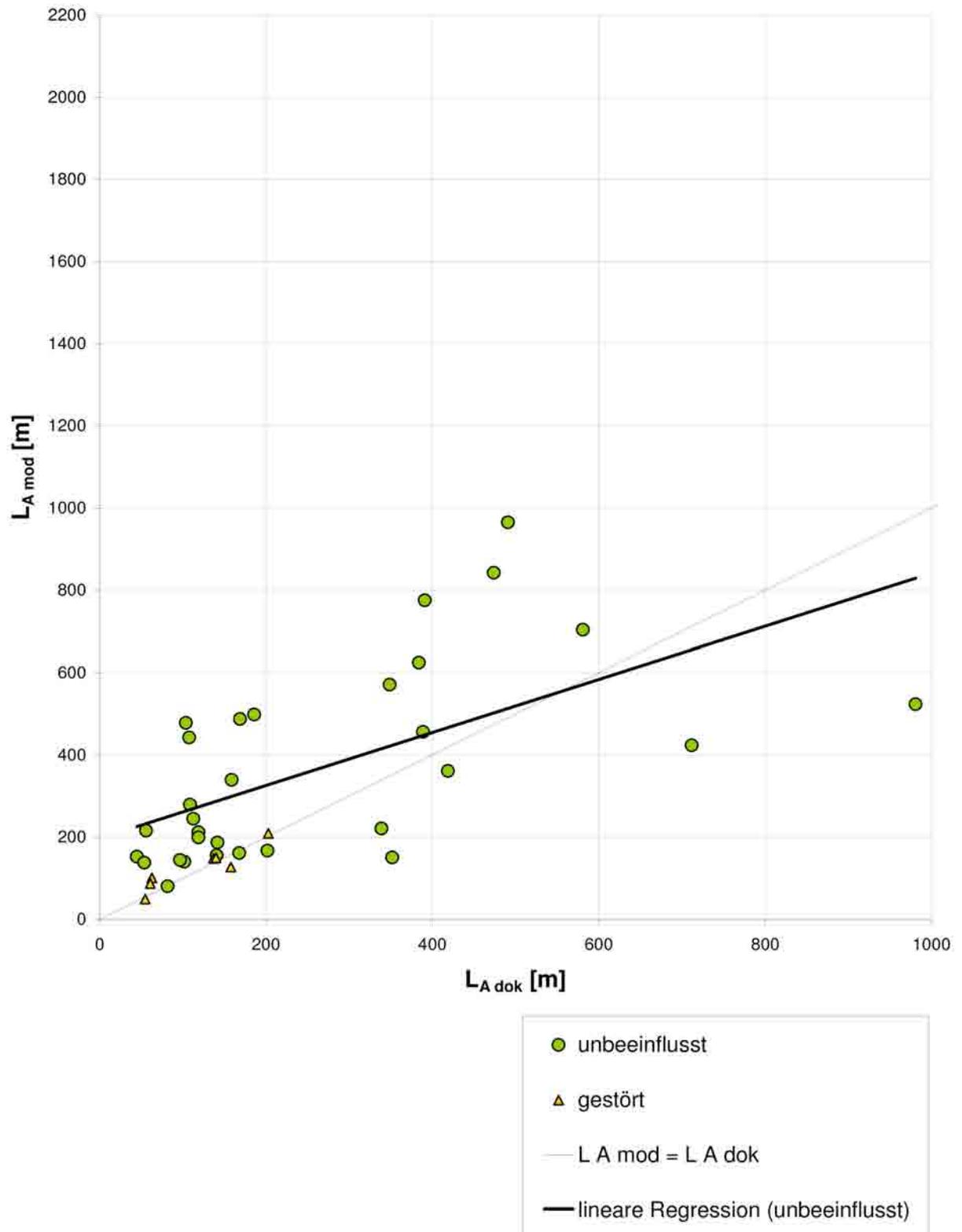


Abb. 5.8: Darstellung der modellierten Auslauflänge $L_{A,mod}$ nach TAKAHASHI (1991) zur dokumentierten Auslauflänge $L_{A,dok}$, Reibungskoeffizient $S_f = 1,15 \tan \theta_K$.

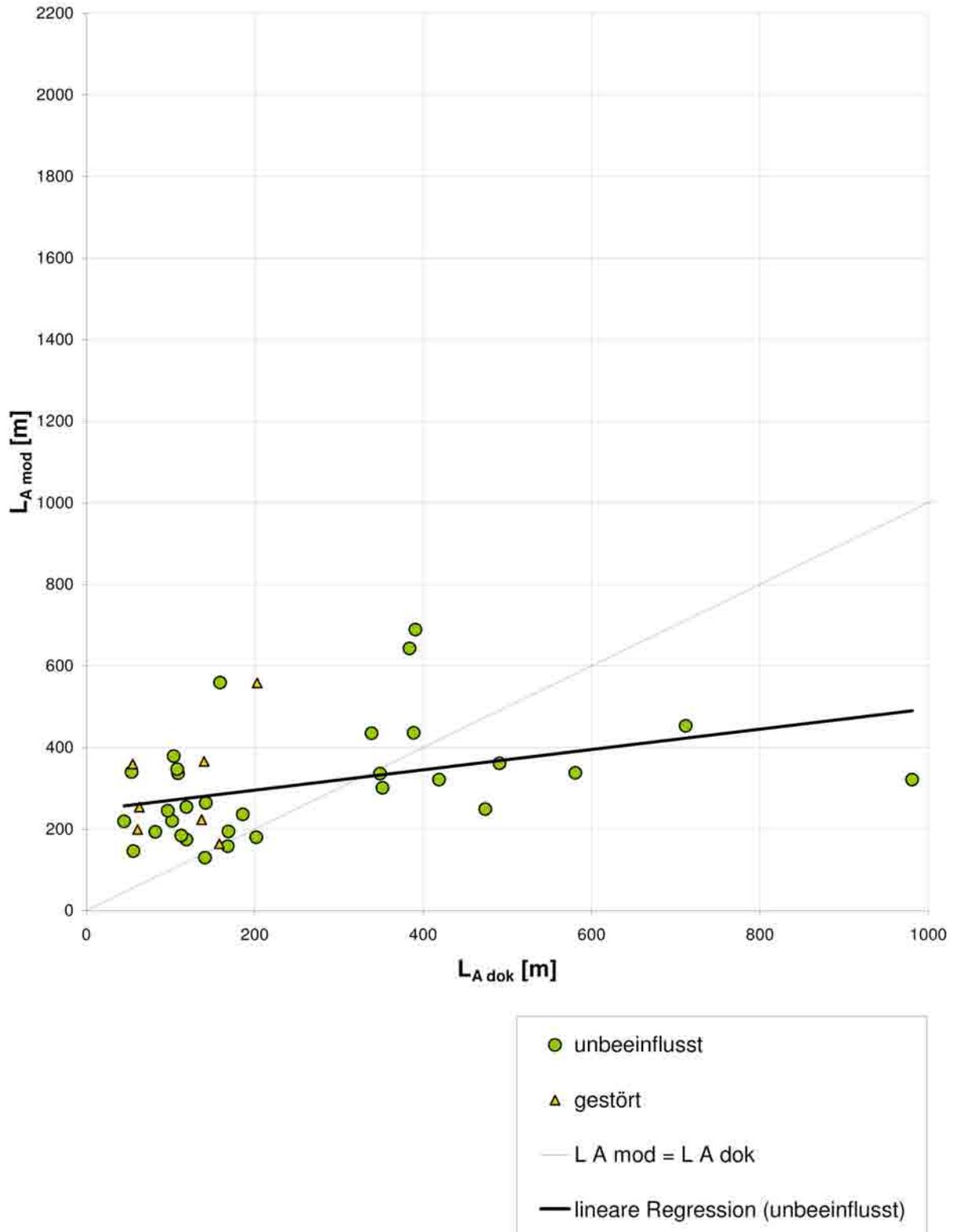


Abb. 5.9: Darstellung der modellierten Ausläufänge $L_{A,mod}$ nach dem ACS-Modell zur dokumentierten Ausläufänge $L_{A,dok}$.

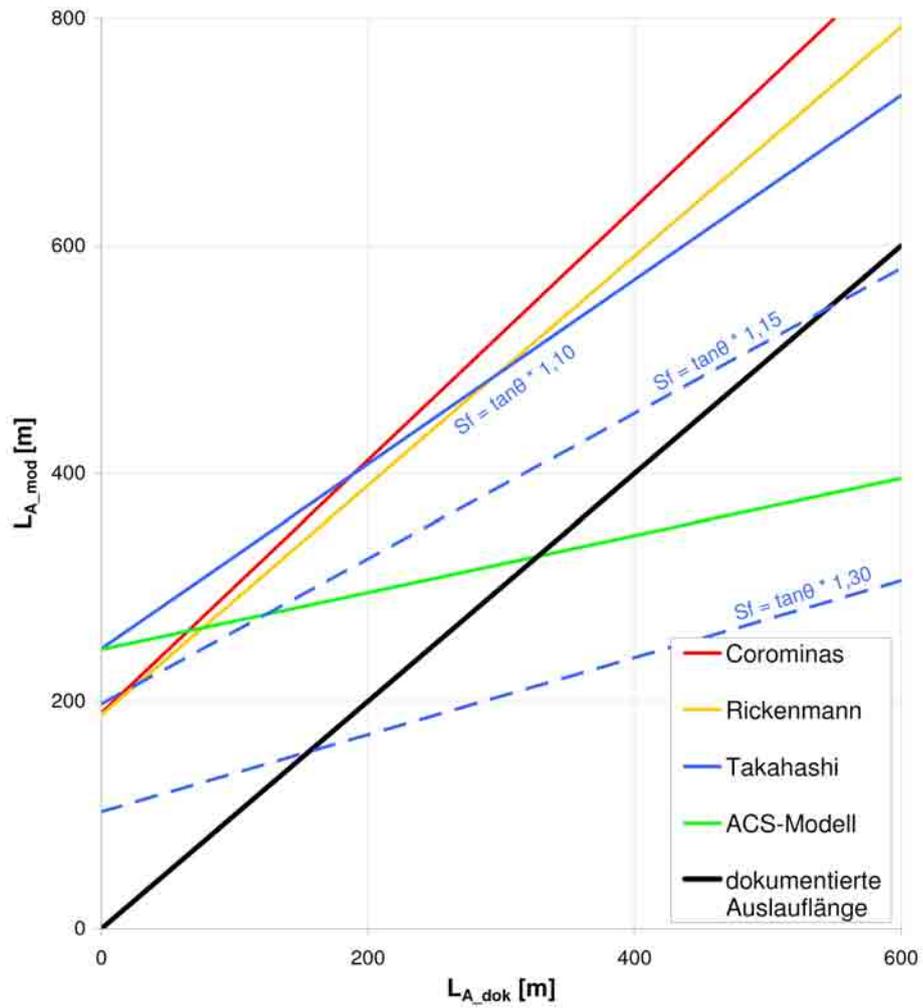


Abb. 5.10: Vergleich der Regressionsgeraden der modellierten eindimensionalen Modelle; Darstellung der modellierten Auslauflängen $L_{A,mod}$ zur dokumentierten Auslauflänge $L_{A,dok}$.

5.2 Zweidimensionale Modelle

In diesem Abschnitt werden zuerst die wichtigsten Parameter der „best-fit“-Simulationen und die daraus gewonnenen Evaluierungsfaktoren Ω (siehe Abschnitt 4.4) für die einzelnen Modelle präsentiert und kurz beschrieben. Im Anschluss werden die Ergebnisse grafisch dargestellt und die Resultate anhand der simulierten Ereignisse erläutert. Der Vergleich der Modelle erfolgt quantitativ durch die genannten Evaluierungsfaktoren und qualitativ durch die grafischen Darstellungen und Programmeigenschaften wie Benutzerfreundlichkeit, Anwendbarkeit u.a..

5.2.1 Resultate der einzelnen Modelle

5.2.1.1 TopRun DF

Die gewählten Parameter der „best-fit“-Simulation und die Evaluierungsfaktoren der dokumentierten Ablagerungsfläche bzw. Volumen mit den modellierten Flächen ist in Tabelle 5.2 zu sehen, die grafische Darstellung erfolgt in den Abbildungen 5.11 bis 5.18. Die ausführliche Darstellung aller Parameter und Vergleichswerte findet sich in Tabelle 8.3 im Anhang.

Als Ergebnis liegt die übermurate Fläche und die Ablagerungshöhe je Zelle vor. Der Berechnungsgang des Modells, das heißt die Modellierung der einzelnen Fließwege ist meist gut in den Ergebnissen erkennbar. Die Ablagerungen sind beim Startpunkt bzw. kurz darunter am höchsten und zeigen generell im Gerinne die größten Werte.

Als Startpunkt der Simulation konnten für sieben Ereignisse mit der Wahl des dokumentierten Beginns der Ablagerung plausible Ergebnisse erzielt werden. In einem Fall musste der Startpunkt quer zur Fließrichtung zur Gerinnemitte hin verschoben werden, ansonsten hätte die modellierte Ablagerung in eine andere Richtung stattgefunden. Das Simulationsprogramm reagiert auf die Wahl des Startpunkts sehr sensibel.

Die von SCHEIDL und RICKENMANN (2009a) vorgeschlagene Anzahl an Monte-Carlo-Steps (mcs) mit 50 festzulegen führt zu guten Resultaten.

Die Erfordernis, mehrere Simulationen durchzuführen, ergab sich dadurch, dass die dokumentierte Fläche nicht sofort erreicht wurde. Dies ist bei stärker kanalisierten Gerinnen der Fall, in denen die potenziellen Fließwege aufgrund der großen Höhendifferenz nicht ausufernd sind. In solchen Fällen muss eine Überhöhung erfolgen. Iterativ erfolgt in 10 cm-Schritten eine Erhöhung, bis die simulierte Fläche die Größe der dokumentierten Ablagerungsfläche erreicht. Hier ist zu erwähnen, dass dieses Simulationsmodell durch seinen stochastischen Charakter nie (bzw. mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit) zwei

gleiche Ergebnisse für die selben Anfangsbedingungen liefert.

Die Simulationszeit variiert sehr stark. Sie kann von einigen Sekunden bis zu mehreren Stunden betragen. Lange Simulationszeiten ergeben sich dann, wenn eine starke Kanalisierung des Gerinnes vorliegt und keine Ausuferung möglich ist. Meist wird dann die erforderliche Fläche nicht erreicht.

Der allgemeine Verlauf der simulierten Ablagerung und dessen volumetrische Verteilung ist vom Benutzer kaum bis gar nicht beeinflussbar. Auch die maximale Auslauflänge ist nur indirekt über die Wahl der Monte-Carlo-Steps steuerbar.

Tab. 5.2: Ergebnisse der TopRun DF Simulationen.

Nr	Bachname	Ablagerungs- fläche	Volumen	Evaluierungsfaktor		Modellparameter		
		V_{dok} [m ²]		A_{dok} [m ³]	Ω_V [-]	Ω_A [-]	k_B [-]	mcs [-]
2	Arundakopfbach 1	35.505	15.000	0,2	-0,1	58	50	0
6	Draunbergerbach	2.940	2.000	-0,5	-0,4	19	50	0,3
7	Fanatjoch	10.512	5.000	-0,2	-0,2	36	50	0
15	Klammbach	29.000	30.000	1,0	0,7	30	50	0,6
17	Koglbach	23.160	15.000	0,6	0,3	38	50	0,6
20	Loterbach 1	3.510	2.000	-0,3	-0,5	22	50	0,1
31	Seefeldbach 1	62.266	70.000	0,7	0,4	37	50	0,2
36	Weissenbacher-Kahlbach	21.900	11.000	-1,5	-1,2	44	50	0,25

5.2.1.2 TopFlow DF

TopFlow DF liefert als Ergebnis die modellierte Ablagerungsfläche und die maximalen Fließgeschwindigkeiten in jeder Zelle. Die Simulation der Ablagerungshöhen ist derzeit, wie gesagt, noch nicht umgesetzt, deshalb wird in den Abbildungen 5.11 ff. die Differenzierung der Ablagerungshöhen nur qualitativ, durch verschiedene Farbschattierungen (dunkel - tiefe Ablagerung, hell - seichte Ablagerung) wiedergegeben. Demgemäß kann auch nur ein Vergleichswert Ω_A berechnet werden. In Tabelle 5.3 ist dieser Vergleichswert, der Mobilitätsfaktor k_B , der Reibungskoeffizient S_f und die gewählte Überhöhung des Gerinnes dargestellt. Die weiteren Eingangsparameter sind Tabelle 8.4 im Anhang zu entnehmen.

Die modellierte Ablagerung zeigt ähnliche Charakteristiken wie die TopRunDF-Ergebnisse. Die simulierten potenziellen Fließwege sind auch hier gut zu erkennen.

Die Überhöhung im Gerinnebereich ist hier deutlich höher anzusetzen als bei TopRunDF, es sind Höhen bis zu zwei Meter, während bei TopRunDF die maximale Überhöhung bei 0,6 liegt. Allerdings wird hier die Überhöhung nur im Gerinne angesetzt.

Der in Tabelle 5.3 dargestellte Reibungskoeffizient S_f ist der von TopFlowDF simulierte Wert, als Startwert wurde jeweils $1,1\theta_K$ gewählt. Durch programmbedingte Diskretisierung kann es sein, dass modellierte S_f -Werte kleiner als das mittlere Kegelgefälle θ_K bzw. als die Neigung der dokumentierten Ablagerung θ_A sind (vgl. Tabelle 6.1).

Tab. 5.3: Ergebnisse der TopFlowDF Simulationen.

Nr	Bachname	Ablagerungs-	Volumen	Evaluierungsfaktor		Modellparameter		
		fläche		Ω_V	Ω_A	k_B	S_f	Überhöhung
		V_{dok}	A_{dok}	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]
		[m ²]	[m ³]					
2	Arundakopfbach 1	15.000	35.505	-	-0,3	58	0,19	0,8
6	Draunbergerbach	2.000	2.940	-	-1,0	19	0,08	0,6
7	Fanatjoch	5.000	10.512	-	0,1	36	0,25	0,6
15	Klambach	30.000	29.000	-	0,4	30	0,12	2
17	Koglbach	15.000	23.160	-	0,3	38	0,16	1,3
20	Loterbach 1	2.000	3.510	-	-0,7	22	0,28	0,3
31	Seefeldbach 1	70.000	62.266	-	0,2	37	0,26	2
36	Weissenbacher-Kahlbach	11.000	21.900	-	-0,8	44	0,14	0,8

5.2.1.3 RAMMS

Die Ergebnisse einer RAMMS-Simulation sind sehr umfangreich. Es können neben Fließhöhe h und Fließgeschwindigkeit v auch der Fließdruck und der Fließimpuls für jede Zelle und für jeden Zeitschritt dargestellt werden. Zusätzlich kann für jeden Punkt ein Hydrograph erstellt bzw. die Maximalwerte von v und h abgefragt werden. Um die „best-fit“-Simulation eines Ereignisses zu erreichen sind meist viele Simulationen durchzuführen und die Parameter systematisch mittels Sensitivitätsanalyse anzupassen. Sämtliche Simulationsschritte werden hier nicht weiter wiedergegeben, es werden nur die „best-fit“-Ergebnisse und deren Parameter dargestellt (Abbildungen 5.11 ff. und Tabelle 5.4).

Für den Faktor der turbulenten Reibung ξ ergeben sich Werte zwischen 100 und 400, für den Reibungsbeiwert μ variieren die Werte zwischen 0,08 und 0,22. In Tabelle 6.1 sind

Tab. 5.4: Ergebnisse der RAMMS Simulationen.

Nr	Bachname	Ablagerungs-	Volumen	Evaluierungsfaktor		Modellparameter		
		fläche		Ω_V	Ω_A	ξ	μ	t
		V_{dok}	A_{dok}	[-]	[-]	[m/s ²]	[-]	[s]
		[m ²]	[m ³]					
2	Arundakopfbach 1	15.000	35.505	-0,4	-0,3	300	0,08	300
6	Draunbergerbach	2.000	2.940	-1,6	-1,2	200	0,08	300
7	Fanatjoch	5.000	10.512	-2,1	-1,7	100	0,15	300
15	Klammbach	30.000	29.000	1,1	0,8	400	0,13	300
17	Koglbach	15.000	23.160	0,3	0,1	400	0,17	400
20	Loterbach 1	2.000	3.510	0,3	0,3	400	0,22	260
31	Seefeldbach 1	70.000	62.266	0,2	0,0	350	0,18	260
36	Weissenbacher-Kahlbach	11.000	21.900	-2,0	-1,6	400	0,17	280

die μ -Werte den mittleren Neigungen des Kegels bzw. der dokumentierten Ablagerung gegenübergestellt. Die Evaluierungsfaktoren Ω zeigen auch hier, dass die dokumentierten Ereignisse schwer nachzubilden sind.

5.2.1.4 FLATModel

Erwartungsgemäß sind die Ergebnisse der FLATModel-Simulationen den RAMMS-Resultaten sehr ähnlich. Die Hauptunterschiede ergeben sich durch den Einsatz des Hydrographen, wodurch der Startpunkt der Simulation frei gewählt werden kann. Der geschwindigkeitsabhängige Chezy-Koeffizient C spielt bei FLATModel durch den Umstand, dass nur die Auslauflänge simuliert wird, eine untergeordnete Rolle. Der wesentliche Parameter μ unterscheidet sich von den gewählten Best-Fit Werten der RAMMS-Simulationen nur geringfügig (Tabelle 6.1), wohingegen die Laufzeiten viel länger gewählt werden mußten als bei RAMMS. Die Evaluierungsfaktoren weisen ähnliche Werte als die von RAMMS auf (außer das Ereignis am Fanatjochbach).

5.2.2 simulierte Ereignisse

Im folgenden werden die Darstellungen 5.11 bis 5.18 erläutert und diskutiert.

Tab. 5.5: Ergebnisse der FLATModel Simulationen.

Nr	Bachname	Ablagerungs-	Volumen	Evaluierungsfaktor		Modellparameter		
		fläche		Ω_V	Ω_A	C	μ	t
		V_{dok}	A_{dok}	[-]	[-]	[$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]	[-]	[s]
		[m^2]	[m^3]					
2	Arundakopfbach 1	15.000	35.505	-0,4	-0,2	14	0,09	600
6	Draunbergerbach	2.000	2.940	-1,6	-1,4	12	0,12	600
7	Fanatjoch	5.000	10.512	-0,9	-0,6	10	0,2	300
15	Klammbach	30.000	29.000	0,9	0,6	14	0,14	300
17	Koglbach	15.000	23.160	-0,4	-0,3	16	0,12	500
20	Loterbach 1	2.000	3.510	-0,2	-0,2	15	0,22	320
31	Seefeldbach 1	70.000	62.266	0,4	0,3	16	0,18	480
36	Weissenbacher-Kahlbach	11.000	21.900	-1,7	-1,3	15	0,185	900

Arundakopfbach

Mit einem für granulare Murgänge hohen Mobilitätskoeffizienten k_B von 58, einem μ -Wert von 0,08 und einem rückgerechneten $S_{f,r}$ -Wert, der nur geringfügig höher als die Kegelneigung ist, zeigen diese Parameter, dass es sich bei diesem Ereignis um einen vergleichsweise mobilen Murgang handelt. TopRun DF und TopFlow DF zeigen auf den ersten Blick einen sehr ähnlichen Verlauf, bei TopRun ist jedoch das Gerinne bis zum Vorfluter aufgefüllt, was mit Sicherheit auf die unterschiedliche Überhöhung (keine Überhöhung bei TopRun, 0,8m bei TopFlow) zurückzuführen ist. RAMMS und FLATModel zeigen ebenfalls sehr große Ähnlichkeit in der Form der Ablagerung und auch in der volumetrischen Verteilung wieder. Dies spiegelt sich auch in den fast identen Evaluierungsfaktoren wieder.

Der Unterschied der Modelle TopRun und TopFlow mit RAMMS und FLATModel ist in diesem Beispiel charakteristisch: Während bei Ersteren die Ablagerung und insbesondere die Verteilung der größeren Ablagerungshöhen eine longitudinale (das heißt längs der Fließrichtung des Murganges) Verteilung aufweisen, zeigen Zweitere eher eine quer zur Fließrichtung ausgerichtete Verteilung der Massen. Generell ist der Großteil der simulierten Ablagerung bei den numerischen Modellen im unteren Auslaufbereich, bei TopRun und TopFlow sind große Ablagerungshöhen eher im oberen Bereich und immer entlang des Gerinnes oder in Tiefenlinien.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei den numerischen Modellen Flächen überflossen werden, auf denen sich in der engültigen Positionierung

der Feststoffmassen keine Ablagerung einstellt, während bei den Modellen TopRun und TopFlow auf allen „überflossenen“ Zellen eine Ablagerung stattfindet (vgl. Abbildung 6.3). Die Simulationen mit RAMMS und FLATModel zeigen zudem eine größere laterale Ausdehnung fast über den gesamten Kegelbereich. Dieses Ereignis kann mit TopRun bzw. TopFlow besser simuliert werden, was auch die Evaluierungsfaktoren zeigen.

Draunbergerbach

Dieses Ereignis ist ein untypisches Beispiel, da der Beginn der dokumentierten Ablagerung am Kegelfuss liegt und die Ablagerung auf den Alluvionen des Vorfluters stattfindet. Es ist anzunehmen, dass sich am Kegel Ablagerungen infolge des Ereignisses ergaben, die in der Dokumentation vernachlässigt wurden (wie die Simulation mit RAMMS und FLATModel zeigt). Die dokumentierte Ablagerung ist wahrscheinlich infolge einer leichten Verklausung des Gerinnes entstanden und kann auch aus diesem Grund sehr schwer nachsimuliert werden. Der Startpunkt von TopRun und TopFlow wurde, wie bei allen Ereignissen, am Beginn der dokumentierten Ablagerung gewählt, trotzdem ist die Nachbildung, wahrscheinlich aufgrund der genannten Verklausung, nicht zufriedenstellend. Im Vorhersagefall, bei dem der Startpunkt auch bei den Modellen TopRun und TopFlow am Kegelhals liegen würde, ergäbe sich für ein Ereignis dieser Größenordnung eine Ablagerung, die ausschließlich am Kegel liegt, dieser hier eingetretene Fall würde mit Sicherheit nicht simuliert werden. Die niederen Evaluierungsfaktoren bei allen Modellen sprechen für sich.

Fanatjochbach

Auch bei diesem Beispiel entspricht der dokumentierte Beginn der Ablagerung nicht dem Kegelhals. Hier zeigen die Modelle, deren Simulation an eben diesem dokumentierten oberen Ablagerungspunkt starten, einen deutlichen Vorteil gegenüber RAMMS, dessen Simulation schon früher ausufert und eine Ablagerung im östlichen Kegelbereich zeigt. Die Gefährdung der zwei Gebäude könnte mit RAMMS bei diesem Ereignisvolumen nicht gezeigt werden. Andererseits weist die RAMMS-Simulation darauf hin, dass durch die im DGM verkörperte geänderte Topografie auch ein anderer als der dokumentierte Murgangverlauf vorstellbar ist. Die sehr ähnlichen Ergebnisse der TopRun und TopFlow Simulation zeigen sowohl grafisch als auch quantitativ eine bessere Übereinstimmung mit der dokumentierten Ablagerungsfläche gegenüber der des FLATModel-Resultates.

Der Reibungsparameter ξ zeigt mit 100 (bzw. einem C -Wert von 100) einen auffällig niederen Wert. μ ist mit 0,15 bzw. 0,20 geringfügig kleiner als die mittlere Kegelneigung

und der mit TopFlow simulierte S_f -Wert ist geringfügig größer als $\tan \theta_K$.

Klammbach

Die vorhin erwähnten Charakteristika der numerischen Modelle und der Modelle TopRun und TopFlow sind hier wieder deutlich zu erkennen. Dieses Ereignis kann von allen Modellen gut simuliert werden, dies zeigen auch die Evaluierungsfaktoren. Die zwei mit TopFlow simulierten Pfade, die sich nach Süden erstrecken, sind als „Ausreißer“ zu interpretieren und sollten nicht näher beachtet werden, es sei denn, sie zeigen sich auch in anderen Simulationen.

Koglbach

Der Ablagerungsverlauf kann mit allen Simulationsmodellen ähnlich gut nachgebildet werden. Bei Betrachtung der volumetrischen Verteilung der simulierten Ablagerungen ist hier wieder ein deutlicher Unterschied zwischen TopRun/TopFlow und RAMMS/FLATModel festzustellen. Während bei Ersteren die beiden Gerinne vor allem im oberen Ablagerungsbereich aufgefüllt werden und sich im unteren Bereich nur mehr eine seichtere Ablagerung ergibt, fließt bei Zweiteren der Großteil der Massen bis zum Vorfluter und zeigt dort Ablagerungshöhen bis über 2 m, was durch Rückstau zu einer Überschwemmung der Siedlung führen kann. Der mittlere Kegelbereich ist bei einem Ereignisvolumen dieser Größenordnung anscheinend nicht gefährdet, dies zeigen alle vier Modelle.

Loterbach

Mit diesem relativ kleinen Ereignis soll gezeigt werden, dass es mit TopRun DF nicht möglich ist, Ablagerungen infolge geschwindigkeitsabhängiger Trägheitskräfte abzubilden. Die TopRun-Simulation zeigt deutlich eine rein dem Gefällsgradienten folgende Ablagerung auf die linke Gerinneseite, während vor allem mit RAMMS auch die tatsächliche Ablagerung auf die rechte Seite modelliert werden kann.

Seefeldbach

Es handelt sich hier mit 70.000 m³ mit Abstand um das größte Ereignis des Datensatzes. Bei diesem Volumen kann diskutiert werden, ob es sinnvoll ist, die gesamte Masse in einem Murschub zu simulieren.

Der östliche untere Auslaufbereich kann hier mit TopFlow und TopRun besser simuliert werden. Durch die starke Abflachung in diesem Bereich kommen die mit auf dem

Voellmy-Ansatz basierenden Modelle sehr schnell zum Stillstand bzw. erreichen sie hier sehr geringe Geschwindigkeiten. Es müssten für den unteren Auslaufbereich geringere μ -Werte gewählt werden. Der Unterschied zwischen TopRun und TopFlow liegt hier in dem bei TopFlow höher gewählten Startpunkt, wodurch das westliche Gerinne dotiert wird und so auch eine Ablagerung im westlichen Bereich modelliert werden kann.

Weissenbacher Kahlbach

Bei diesem Beispiel ist anzunehmen, dass sich die Topografie des DGM gegenüber der Topografie vor dem Ereignis vor allem im oberen Kegelbereich verändert hat, wodurch das dokumentierte Ereignis kaum simuliert werden kann. Interessant sind die unterschiedlichen Ergebnisse der einzelnen Modelle. Bei TopRun und TopFlow erfolgt die Ablagerung im östlichen Kegelbereich entlang des Gerinnes, wobei von TopFlow zwei kleinere Ausuferungen in den westlichen Bereich simuliert werden. Bei den Modellen mit numerischer Lösung, vor allem bei FLATModel, ist die Ausuferung des am Kegelhals nach Osten abzweigenden Gerinnes stärker, wodurch der gesamte Kegelbereich durch zungenähnliche Ablagerungen übersät ist. Es ist hier schwierig zu sagen, welches Modell das beste Simulationsresultat erbringt.

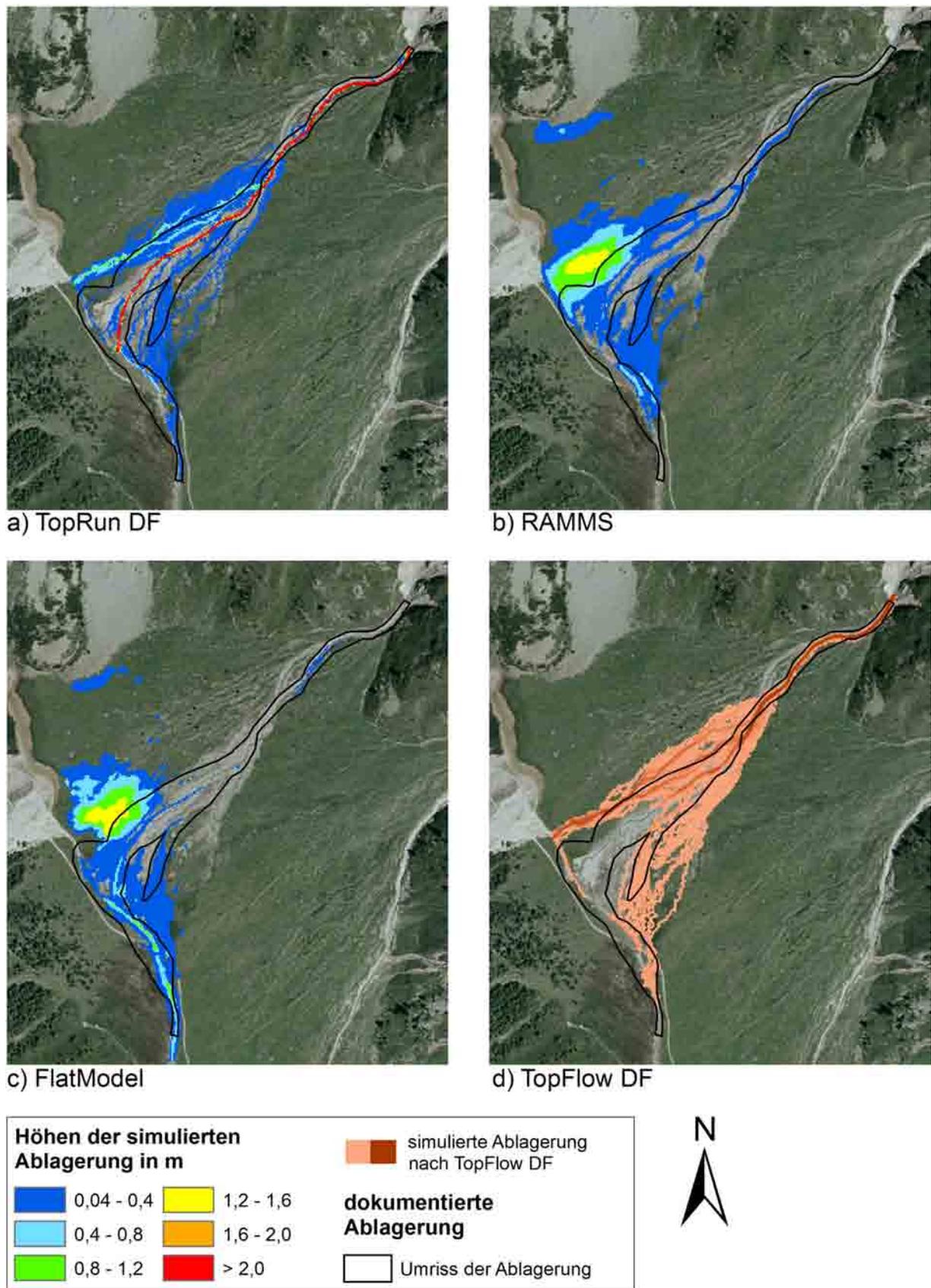


Abb. 5.11: Arundakopfbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

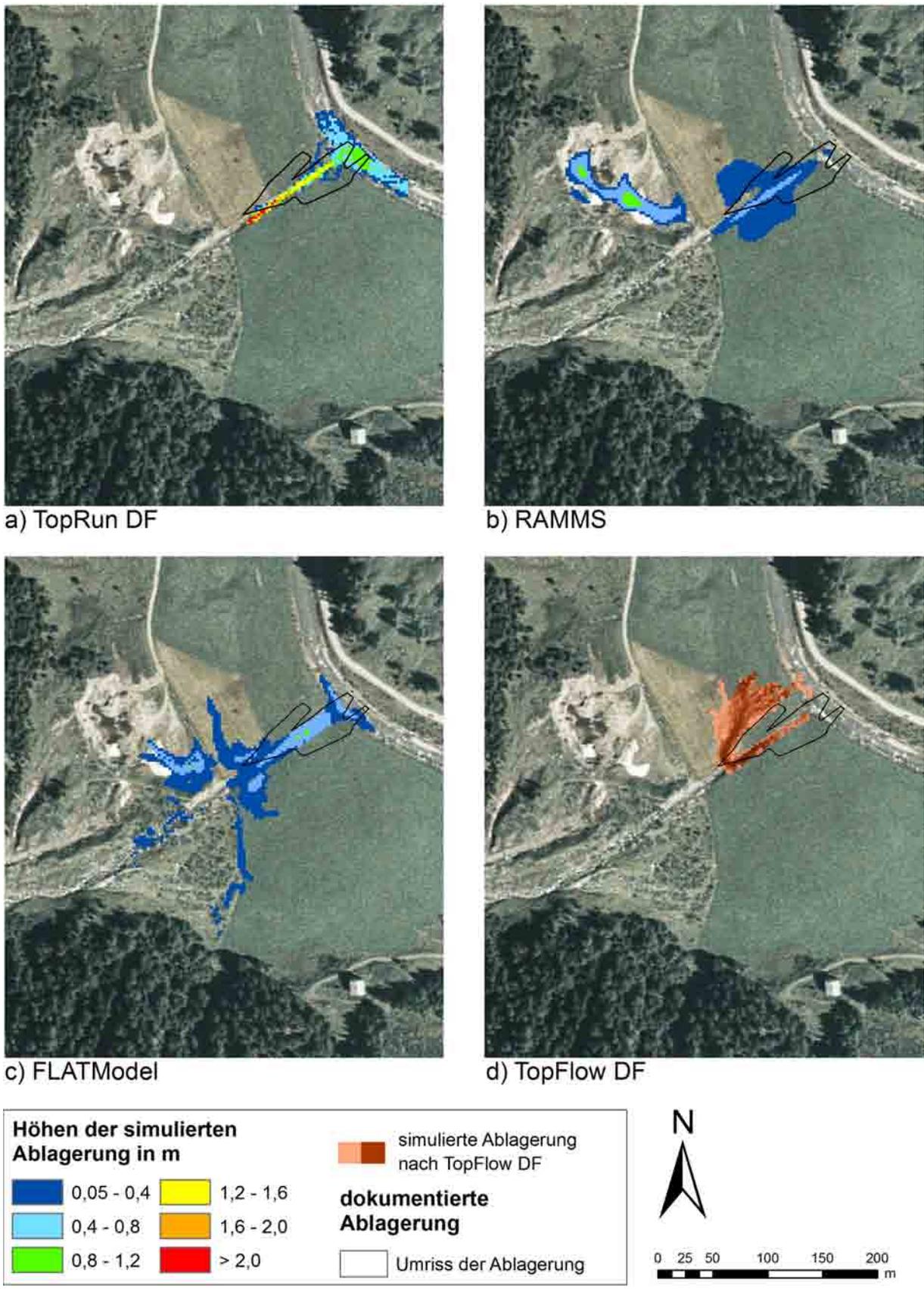


Abb. 5.12: Draunbergerbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

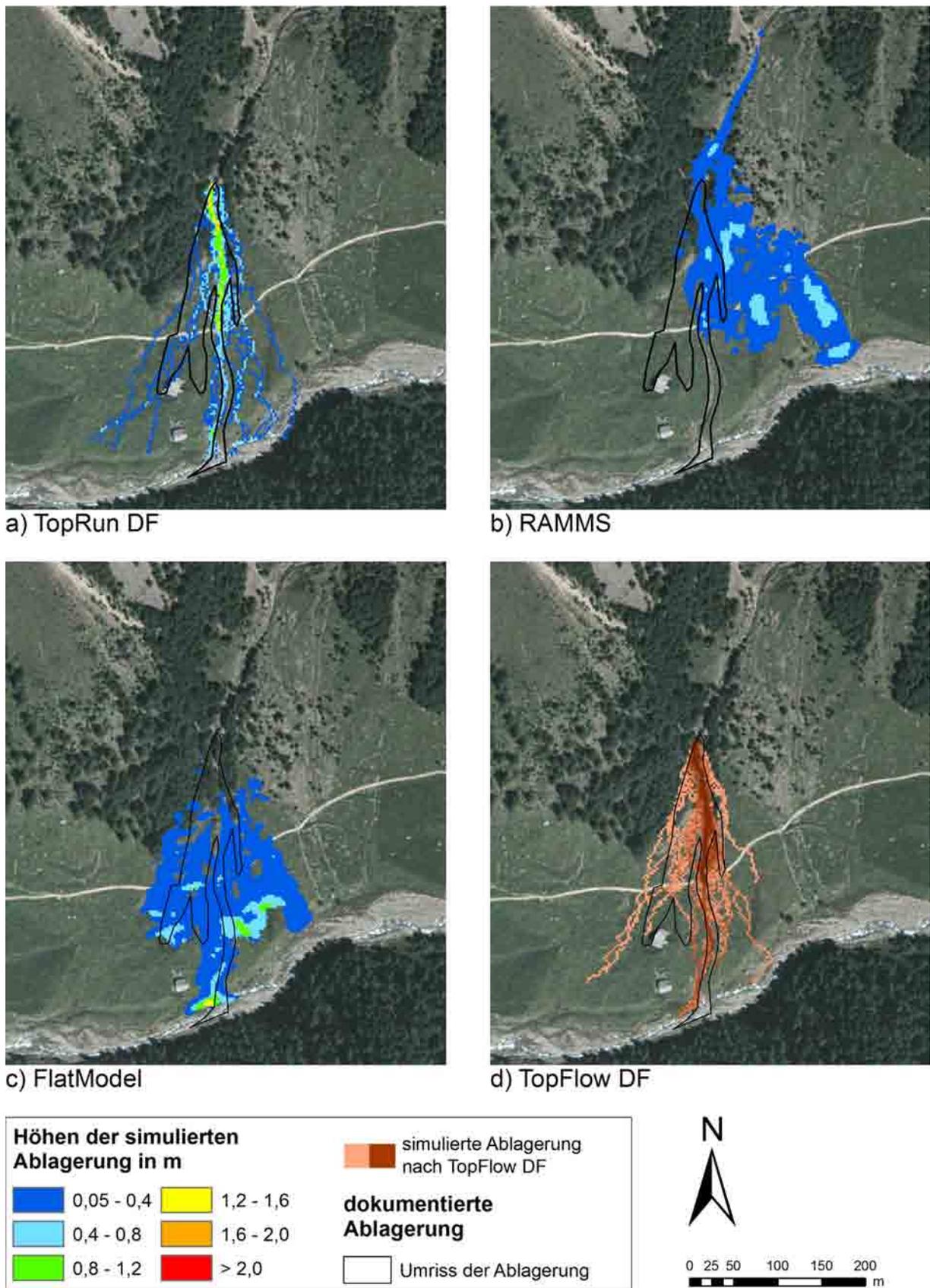


Abb. 5.13: Fanatjochbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

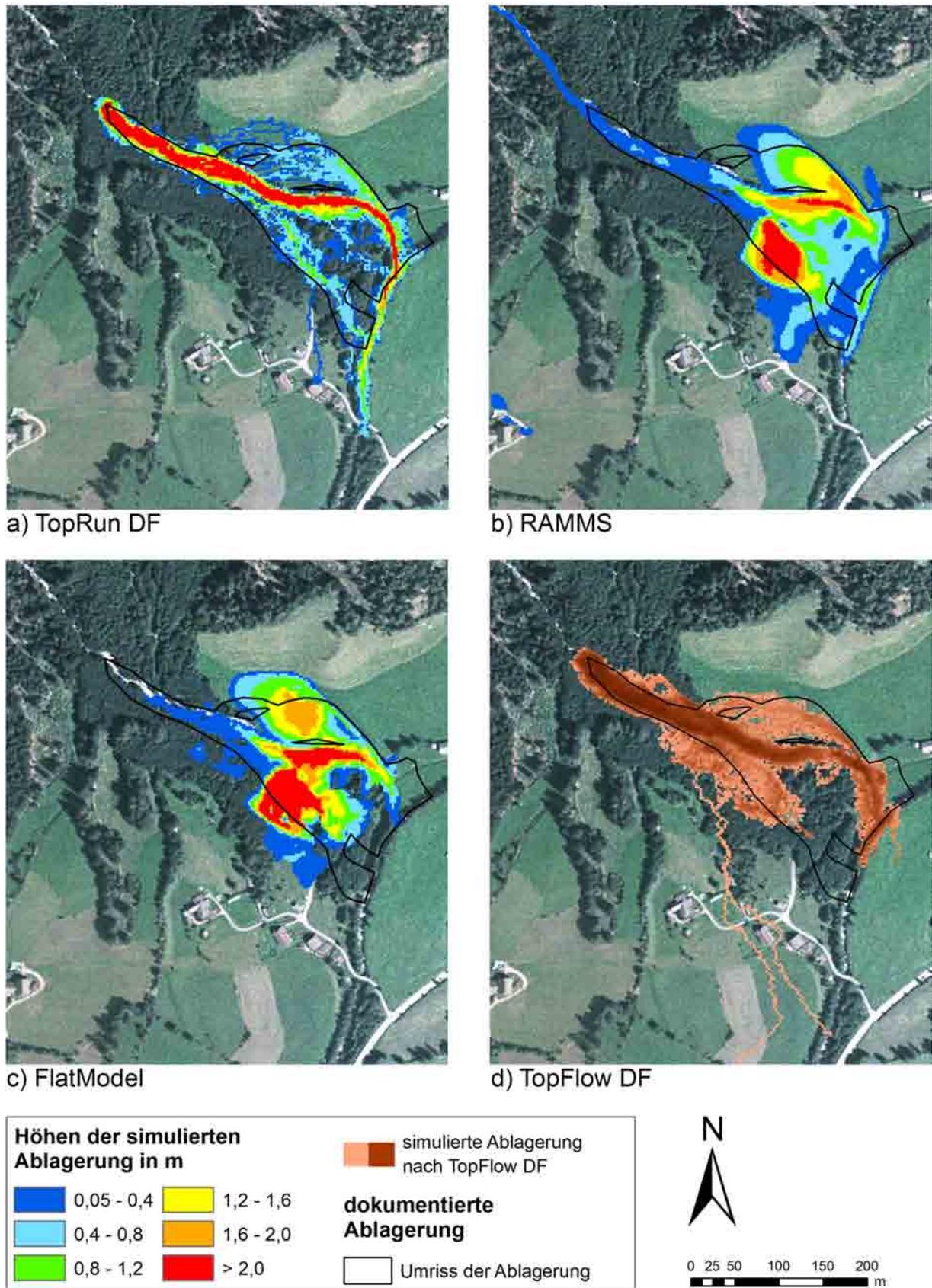


Abb. 5.14: Klammbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

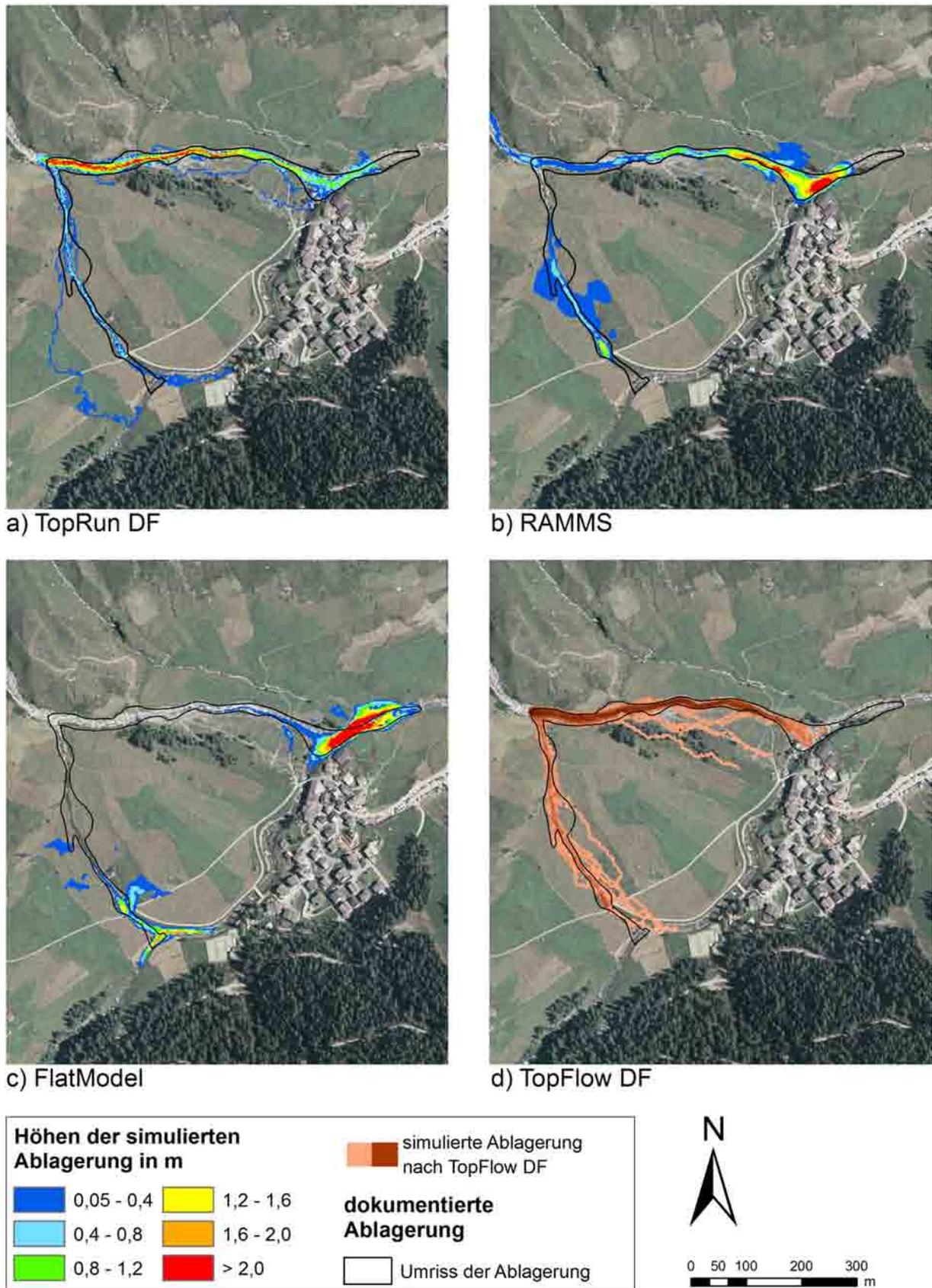


Abb. 5.15: Koglbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

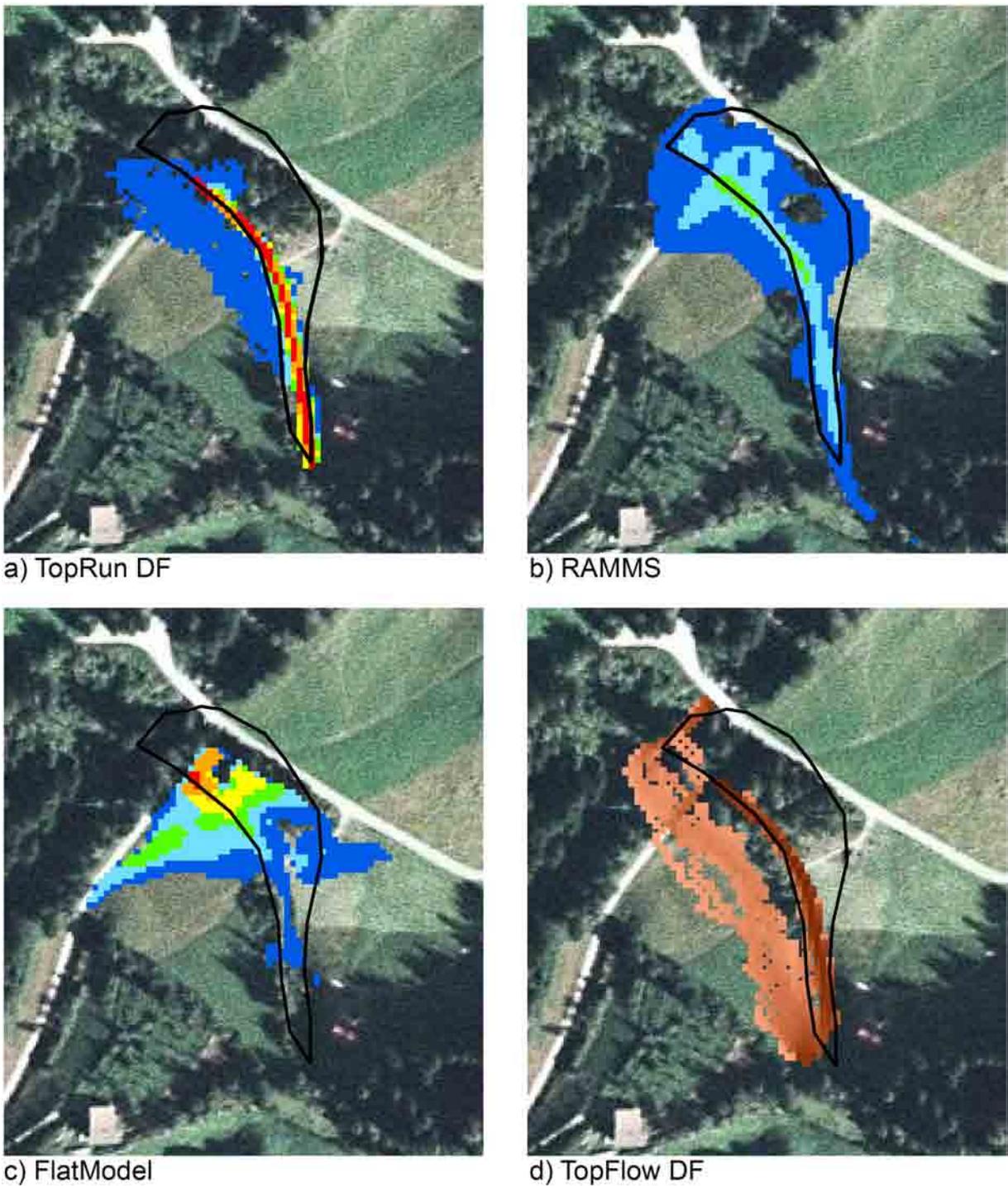


Abb. 5.16: Loterbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

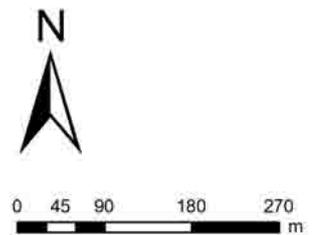
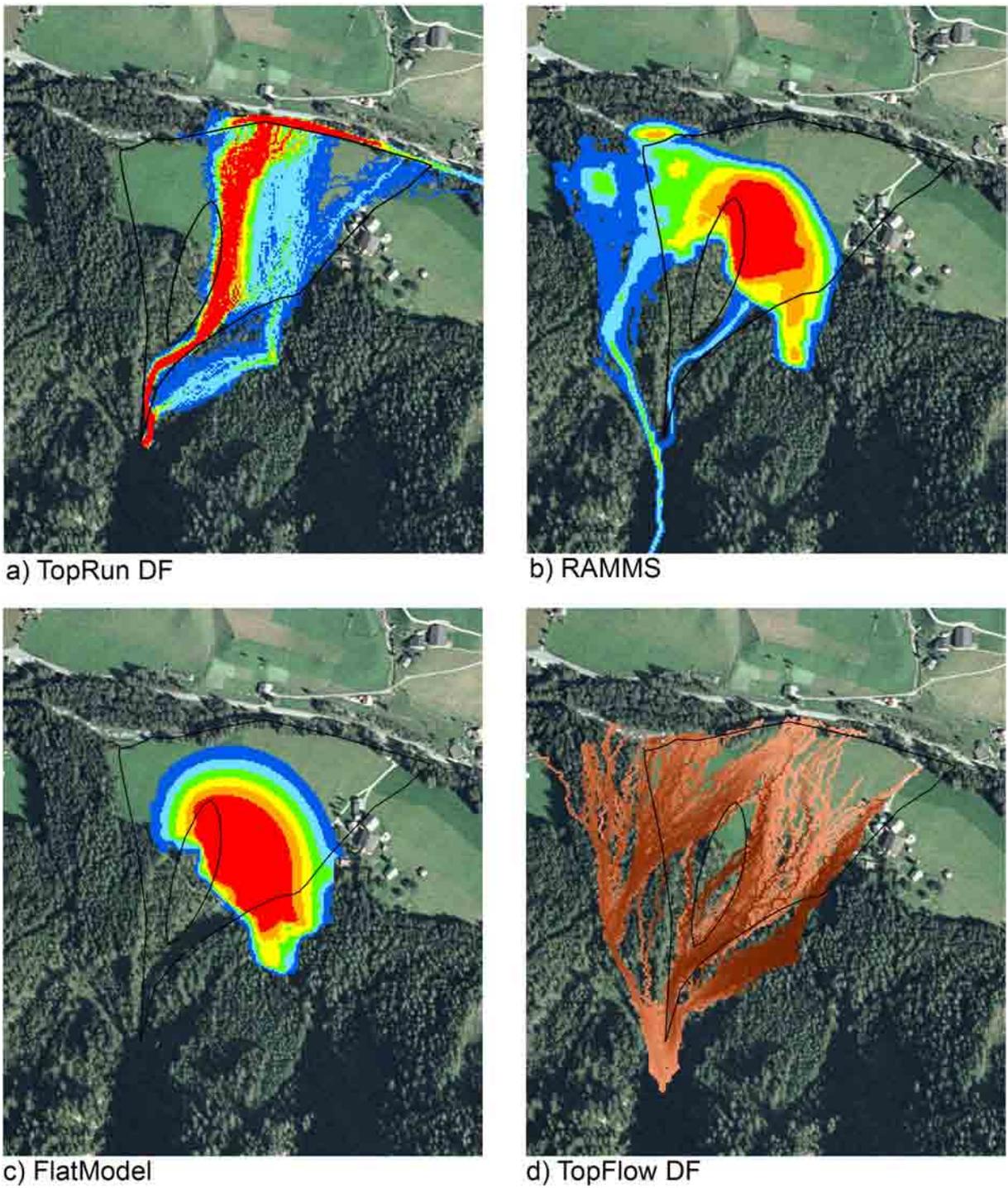


Abb. 5.17: Seefeldbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

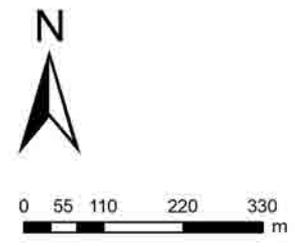
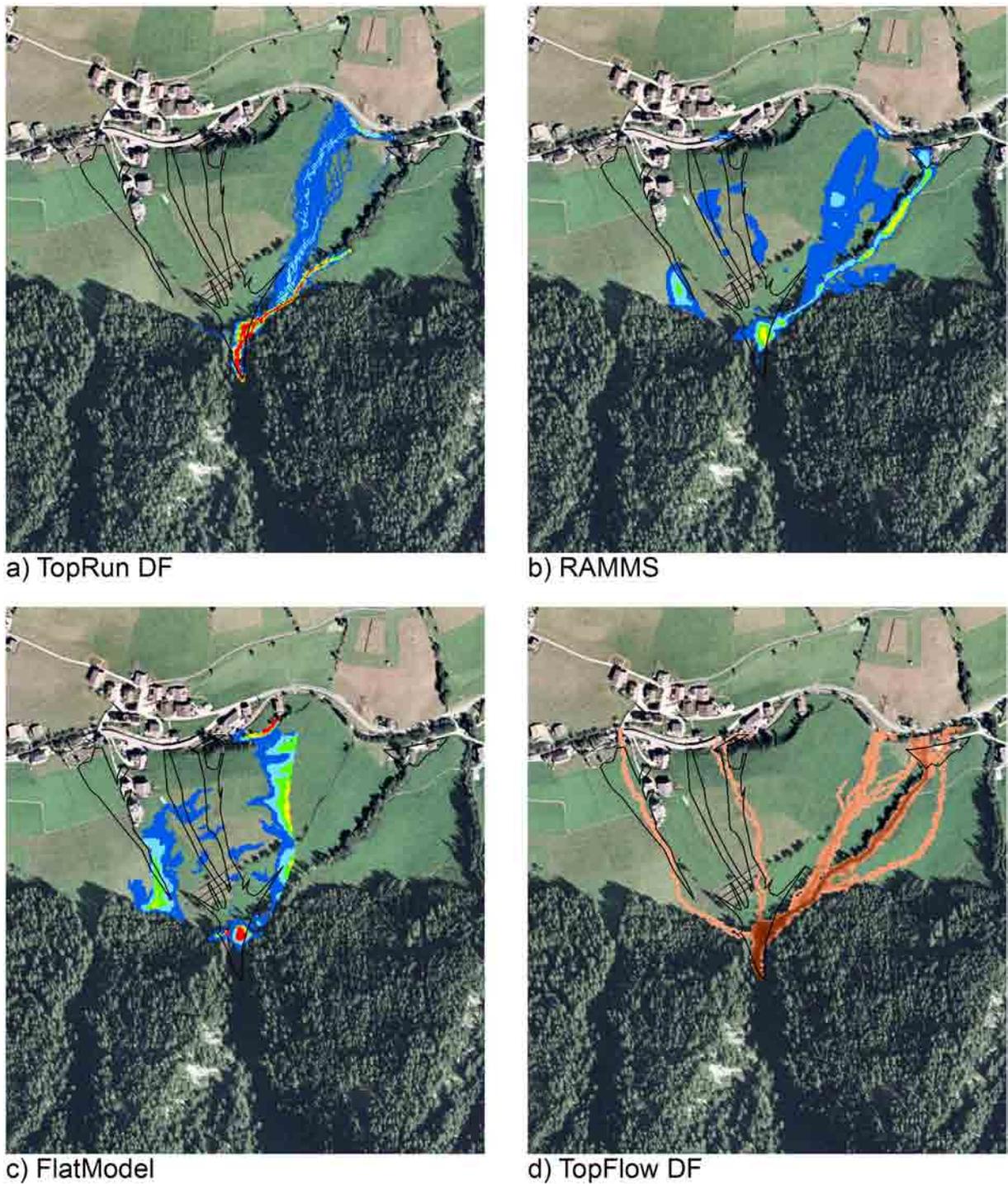


Abb. 5.18: Weissenbacher Kahlbach, Vergleich der Best-Fit Simulationen a) TopRunDF, b) RAMMS, c) FLATModel, d) TopFlowDF.

5.2.3 Vergleich der Evaluierungsfaktoren

Tab. 5.6: Vergleich der Modelle anhand der Evaluierungsfaktoren Ω_V (Beurteilung der simulierten Flächen und Volumina im Vergleich zu den dokumentierten Flächen) und Ω_A (Beurteilung der Flächen) für die einzelnen Ereignisse.

		Arundakopfbach	Draunbergerbach	Fanatjoch	Klammbach	Koglbach	Loterbach	Seefeldbach	Weissenbacher-Kahlbach	Mittelwert	Standardabweichung
Ω_V	TopRun DF	0,2	-0,5	-0,2	1,0	0,6	-0,3	0,7	-1,5	0,0	0,80
	RAMMS	-0,4	-1,6	-2,1	1,1	0,3	0,3	0,2	-2,0	-0,5	1,19
	FLATModel	-0,4	-1,6	-0,9	0,9	-0,4	-0,2	0,4	-1,7	-0,5	0,91
	TopFlow DF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ω_A	TopRun DF	-0,1	-0,4	-0,2	0,7	0,3	-0,5	0,4	-1,2	-0,1	0,62
	RAMMS	-0,3	-1,2	-1,7	0,8	0,1	0,3	0,0	-1,6	-0,4	0,94
	FLATModel	-0,2	-1,4	-0,6	0,6	-0,3	-0,2	0,3	-1,3	-0,4	0,71
	TopFlow DF	-0,3	-1,0	0,1	0,4	0,3	-0,7	0,2	-0,8	-0,2	0,56

Die ermittelten Evaluierungswerte in Tabelle 5.6 zeigen die Schwierigkeit, die dokumentierten Verhältnisse nachzubilden. Der bestmögliche Ω_V -Wert liegt bei 2,0 bzw. 1,5 für Ω_A , der Minimalwert bei -2,0 bzw. -1,5 oder darunter. Wertebereiche für die einzelnen Resultate finden sich im Anhang in den Tabellen 8.3 bis 8.6.

Beim Klammbach können mit Ω_V -Werten um 1,0 die besten Simulationen der dokumentierten Verhältnisse erzielt werden, beim Weissenbacher Kahlbach die schlechtesten.

Der Vergleich der Modelle zeigt, dass Ereignisse mit allen Modellen etwa gleich gut/schlecht modelliert werden können. Generell liefern die Simulationsergebnisse von TopRun und TopFlow bessere Evaluierungsfaktoren, als der Vergleich der Mittelwerte erkennen lässt.

6 Diskussion

Da die eindimensionalen und zweidimensionalen Modelle und deren Ergebnisse grundsätzlich eine andere Aussage haben, werden auch hier die beiden Modellgruppen getrennt diskutiert. Dennoch können einige Vergleiche und Erkenntnisse gezogen werden, betrachtet man vor allem gewisse Modellparameter. Das Augenmerk wird im folgenden auf den Einsatz der Modelle für den Vorhersagezweck gelegt, da die Prognose eines Ereignisses auch das Hauptziel eines Modells darstellt und hier, im Falle eines Murganges, wichtige Angaben für die Gefahrenzonenplanung und die Dimensionierung von Schutzmaßnahmen liefert.

6.1 Eindimensionale Modelle

Es werden hier Modelle verglichen, die einerseits zur Bestimmung der Reichweite, andererseits zur Berechnung der Auslauflänge konzipiert sind. Erstere wurden wie beschrieben auf eine reine Auslauflänge reduziert, um die vier Modelle direkt vergleichbar zu machen und auch praxisrelevante Aussagen treffen zu können.

Die beiden sehr ähnlichen Ansätze von COROMINAS (1996) und RICKENMANN (1999) zeigen auch ähnliche Ergebnisse. Zur Bestimmung der Reichweite sind beide Modelle geeignet, wobei COROMINAS (1996) eher auf der sicheren Seite liegt, die Reichweiten also eher überschätzt. Bei der Betrachtung der Auslauflängen nach RICKENMANN (1999) werden kleine Ereignisse zum Teil drastisch unterschätzt, modellierte Reichweiten, die positive Auslauflängen erzeugen, überschätzen die Auslauflänge aber systematisch. Zur Bestimmung der Reichweite sind mit diesen Modellen relativ gute Ergebnisse erzielbar, eine Ableitung der Auslauflänge aus diesen Modellen führt aber zu unzureichenden Resultaten.

Mit dem Ansatz von TAKAHASHI (1991) sind im Vergleich die besten Modellierungen erzielbar. Der Vorteil liegt darin, dass nur die Auslaufstrecke am Kegel betrachtet wird, unabhängig der Anrisszone und der Transportstrecke. Es muss allerdings die Geschwindigkeit v , die Neigungen θ_T und θ_K , sowie die maximale Fließhöhe h am

Kegelhals bekannt sein. Die Fließgeschwindigkeit wird, wie in dieser Arbeit, aus dem zu erwartenden Ereignisvolumen über empirische Formeln ermittelt. Vor allem bei größeren Ereignissen nimmt der Einfluss des Zählers in Gleichung 3.9 zu, während bei kleineren Ereignissen eher der Nenner, also der Reibungswinkel, maßgeblich ist.

Der größte unbekannt Parameter in diesem Modell ist der Reibungskoeffizient S_f . Verwendet man dafür in der Literatur angegebene Werte, so werden vor allem für kleiner und mittlere Ereignisgrößen die modellierten Auslauflängen für den betrachteten Datensatz zu lang. Das heißt der Reibungswinkel ist zu klein. Allerdings ist im Vergleich zu den anderen eindimensionalen Modellen dieses dadurch auch beeinfluss- und steuerbar. Es wurde in dieser Arbeit versucht, mithilfe der rückgerechneten Reibungswinkel, diesen Parameter an die hier betrachteten Daten anzupassen, das heißt den Reibungswinkel zu erhöhen. Dies führt aber immer nur für ein gewisses Spektrum von Auslauflänge bzw. Ereignisvolumen zu einer Verbesserung (Abbildung 5.10).

Der im folgenden beschriebene Ansatz, den man näher untersuchen sollte, ist eine empirische Berechnung eines ereignis- bzw. einzugsgebietsspezifischen Reibungskoeffizienten S_f mithilfe des Mobilitätskoeffizienten k_B gezeigt. In Abbildung 6.1 sind die Verhältniszahlen von rückgerechnetem Reibungswinkel $S_{f,r}$ zu mittlerer Kegelneigung $\tan \theta_K$ für jedes Ereignis in Abhängigkeit des dokumentierten Mobilitätsfaktors k_B aufgetragen. Es zeigt sich eine recht deutliche Korrelation: Ereignisse mit niedrigerem Mobilitätsfaktor, also granularere Murgänge, haben tendenziell höhere Verhältniszahlen als solche mit höherem (viskosere Prozesse). Die für die Daten durchgeführte exponentielle Regressionsanalyse ergab ein Bestimmtheitsmaß von 0,61. Der Reibungskoeffizient lässt sich durch die gewonnene Gleichung folgendermaßen ausdrücken:

$$S_f = 1,88 k_B^{-0,131} \tan \theta_K \quad (6.1)$$

Modelliert man nun die Auslauflänge nach TAKAHASHI (1991) mit den so berechneten Reibungswinkel ergeben sich die in Abbildung 6.2 dargestellten Werte. Es ist eine deutlich bessere Modellierung erreichbar. Es können sowohl kleine als auch große Ereignisse gut bestimmt werden. Die lineare Regression ergibt einen deutlich besseren Korrelationskoeffizienten als in den oben präsentierten Ausführungen.

Das ACS-Modell nach Prochaska liefert im Vergleich die schlechtesten Ergebnisse. Die wenigen erforderlichen Inputparameter und die leichte und schnelle Anwendbarkeit machen es aber dennoch interessant, vor allem für zu erwartende Ereignisvolumina

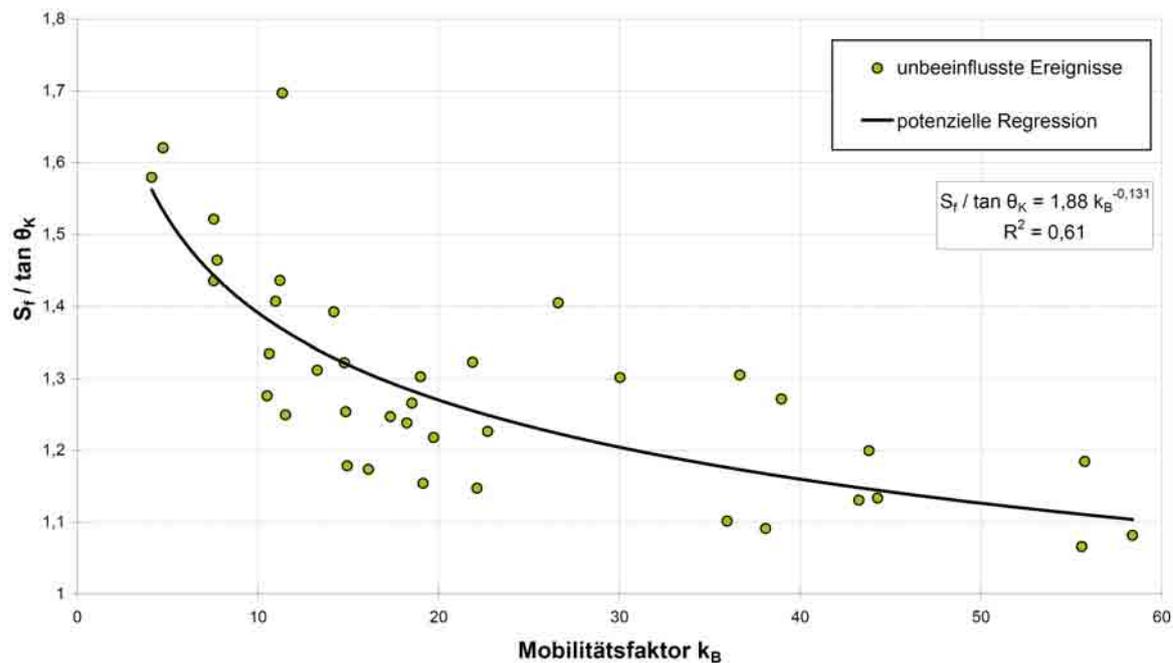


Abb. 6.1: Zusammenhang des Mobilitätskoeffizienten k_B und dem Verhältnisfaktor vom rückgerechneten Reibungskoeffizienten S_f und der mittleren Kegelneigung $\tan \theta_K$ für die 31 unbeeinflussten Ereignisse des Datensatzes, dargestellt ist auch die Regressionsgerade samt Gleichung und Bestimmtheitsmaß.

von rund 5.000 bis 15.000 m³. Kleinere Ereignisse werden überschätzt, während große Murgänge dramatisch unterschätzt werden. Der Nachteil des Modells liegt darin, dass keine Ereignisgröße einfließt. Für eine erste grobe Abschätzung, ob sich potenzielle Gefährdungsbereiche in zu schützenden Zonen befinden ist es durchaus brauchbar, diffizile Aussagen können damit aber sicher nicht getroffen werden. Vor allem bei größeren zu erwartenden Volumina sollte das Modell nicht eingesetzt werden. Die empirische Gleichung 3.8 ist sicher nicht allgemein gültig und sollte regional (z.B. für granulare Murgänge in alpinen Zonen) kalibriert werden. Ob mit einem verbesserten und eventuell erweiterten Ansatz bessere Ergebnisse erzielt werden können, müsste weiter untersucht werden.

Mit eindimensionalen Modellen ist keine Aussage über die räumliche Verteilung der Ablagerungen im Auslaufbereich zu treffen. Es wird zwar angenommen, dass sich die (maximale) Auslauflänge bzw. Reichweite entlang des Gerinnes ergibt, dennoch muss damit gerechnet werden, dass sich diese vom Kegelhals aus in jede (Fall-)Richtung ergeben kann.

Um Aussagen über das genaue Ablagerungsverhalten wie nicht gefährdete

Bereiche innerhalb des Umfanges der modellierten eindimensionalen Ausläufänge oder Informationen über Ablagerungsmächtigkeiten und Fließgeschwindigkeiten zu erhalten, müssen zweidimensionale Simulationsmodelle verwendet werden.

Generell sollten bei der eindimensionalen Bestimmung der Reichweite bzw. der Ausläufänge mehrere (oder zumindest zwei) Ansätze berechnet werden und deren Ergebnisse verglichen werden. So könnte zum Beispiel bei der Erstellung von Gefahrenzonenplänen zuerst das ACS-Modell zum Einsatz kommen, mit dem Murgänge mit Gefährdungspotenzial festgestellt werden. Auf die so ausgewählten Wildbäche kann ein Ereignisvolumen und eine Anrisszone angenommen und die Reichweite nach z.B. RICKENMANN (1999) berechnet werden. Vergleichend dazu kann die Ausläufänge nach TAKAHASHI (1991) bestimmt werden.

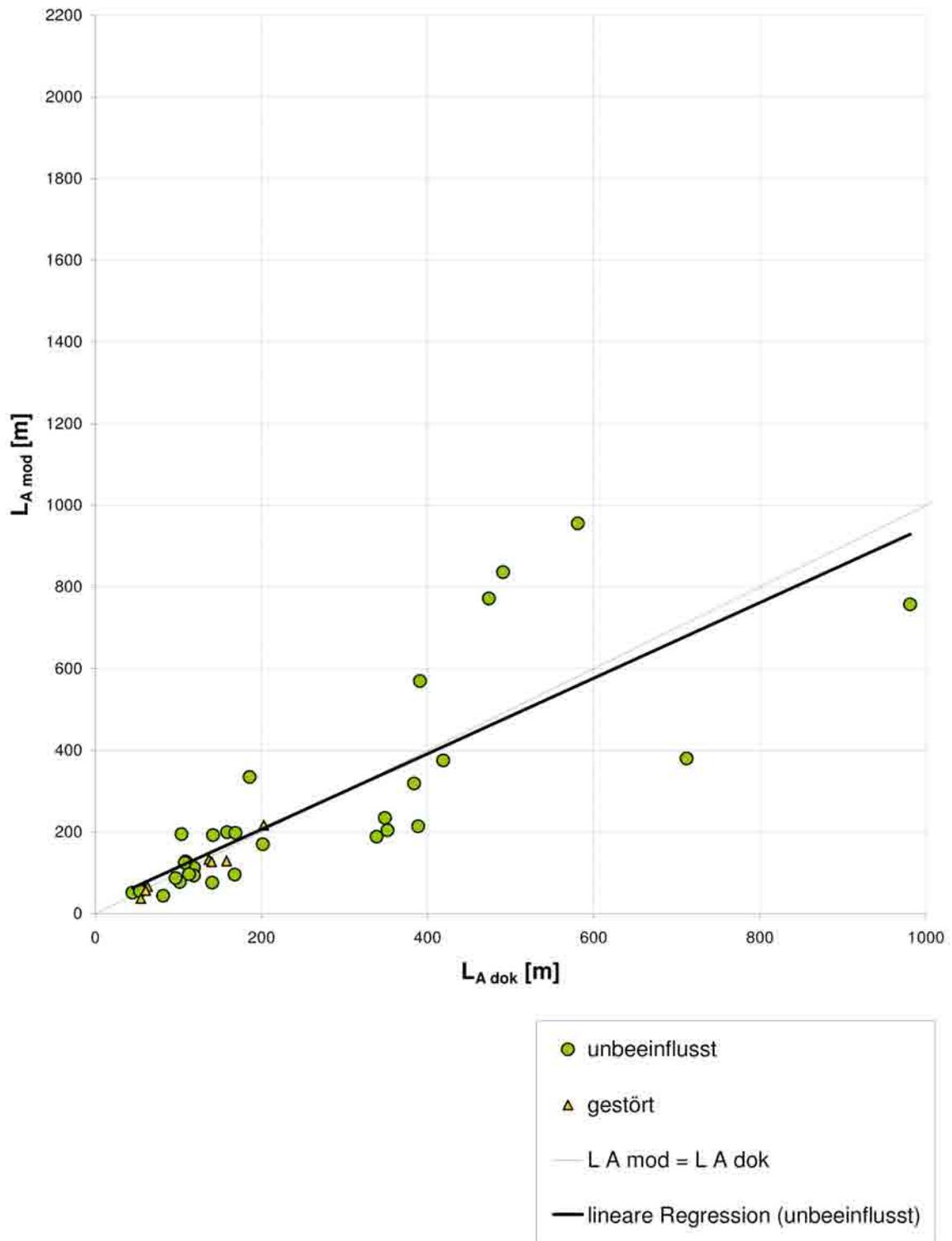


Abb. 6.2: Darstellung der modellierten Auslauflänge $L_{A,mod}$ nach **TAKAHASHI (1991)** zur dokumentierten Auslauflänge $L_{A,dok}$, Reibungskoeffizient in Abhängigkeit des jeweiligen Mobilitätskoeffizienten, ermittelt mit der empirischen Gleichung:
 $S_f = (-0,0068k_B + 1,4475) \tan \theta_K$.

6.2 Zweidimensionale Modelle

Eine genaue Nachbildung der betrachteten dokumentierten Ereignisse gestaltet sich mit allen vier Modellen schwierig. Dies hat mehrere Gründe:

1. Der Einfluss der Topografie ist sehr groß. Wie bereits erwähnt, wurden die digitalen Geländemodelle nach den Ereignissen erstellt, zum Teil lagen einige Jahre dazwischen. Schwemmkegel sind ständigen morphologischen Veränderungen unterworfen und so ist es unmöglich, ein Ereignis 1:1 nachzubilden.
2. Das digitale Geländemodell stellt selbst in der hohen Auflösung von 2,5 m keine exakte Nachbildung der realen Topografie dar.
3. Die dokumentierten Daten, vor allem die Ereignisvolumina, basieren auf Schätzungen und können unter Umständen erheblich von den wirklichen Werten abweichen.
4. Sehr viele maßgebliche Parameter wie Feststoffkonzentrationen, Kornverteilungen, Bodenrauhigkeiten, Schubcharakteristika und viele mehr werden stark vereinfacht oder gar nicht berücksichtigt.

Die Best-Fit Simulation orientiert sich bei allen Modellen am Erreichen der Auslauflänge und der flächigen Verteilung auf der Grundlage der dokumentierten Ablagerungsfläche. Da keine Informationen über die volumetrische Verteilung der dokumentierten Daten vorliegen, kann dieser Aspekt nicht näher beurteilt und im Vergleich der Modelle kann nur berücksichtigt werden, ob simulierte Volumsanteile innerhalb oder außerhalb der dokumentierten Fläche liegen. In Anbetracht der sehr verschiedenen Simulationsergebnisse in Bezug auf die Volumsverteilung wären hier derartige Dokumentationen wichtig, um die Modelle noch besser zu beurteilen.

TopRun DF und TopFlow DF zeigen meist ein sehr ähnliches Bild der simulierten Ablagerung. Obwohl bei TopFlow DF die Ablagerungshöhen (noch) nicht modellierbar sind, zeigt sich bei beiden Modellen, dass die großen Höhen im oberen Gerinnebereich und generell im Gerinne oder anderen Tiefenlinien liegen. Die Verteilung der Ablagerung ist längsgestreckt, wobei die Ablagerungshöhe von oben nach unten tendenziell eher abnimmt. RAMMS/FLATModel zeigen hingegen einen eher quer zur Fließrichtung verteilten Ablagerungsbereich mit einer Konzentration der Ablagerungen im unteren Bereich. Ein deutlicher Unterschied der zwei Modellgruppen liegt auch in der „Bewegungsform“ der Übermuerung des Kegels. Während bei RAMMS/FLATModel große Flächen des Kegels

überflossen werden, auf denen sich letztendlich keine Ablagerung einstellt, findet bei TopRun/TopFlow auf allen von oben „beflossenen“ Zellen eine Ablagerung statt. In Abbildung 6.3 sind für eine RAMMS-Simulation des Arundakopfbaches die maximal erreichten Fließhöhen (links) und die Ablagerungshöhen (rechts) dargestellt.

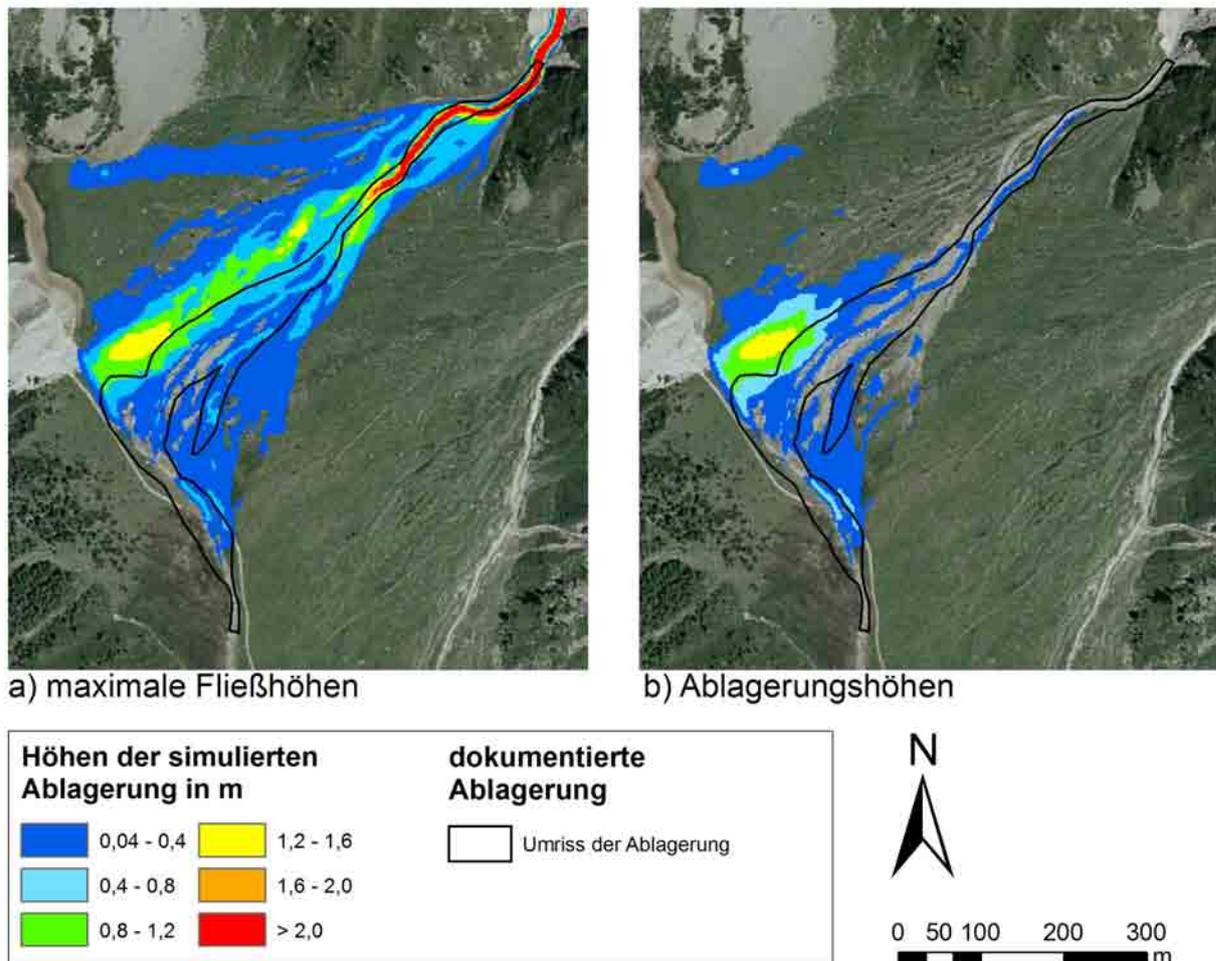


Abb. 6.3: Vergleich der maximalen Fließhöhen und der Endablagerung einer RAMMS-Simulation.

Die erforderlichen Parameter für die Simulationsprogramme sind, was Anzahl und Art betrifft, sehr unterschiedlich. TopRun DF benötigt eindeutig die wenigsten Parameter. Dabei ist der Hauptparameter, der Mobilitätsfaktor k_B , physikalisch begründet. Die anderen Parameter, MCS (Monte Carlo Steps) und Überhöhung sowie die Wahl des Startpunktes sind eher Erfahrungswerte bzw. durch die Simulation mehrerer Varianten zu optimieren. Die für die TopFlow DF nötigen physikalischen Parameter Fließgeschwindigkeit und Fließhöhe werden hier empirisch ermittelt, da keine Informationen über die wirklichen Werte vorliegen. Mögliche Fehleinschätzungen durch

diese Annahmen sind zu berücksichtigen. Auch die RAMMS und FLATModel-Parameter (der Faktor der turbulenten Reibung ξ bei RAMMS und der Hydrograph bei FLATModel) wurden auf diese empirisch berechneten Werte optimiert. Ein interessanter Aspekt von TopFlow ist, dass der Reibungsfaktor S_f kein erforderlicher Eingangsparameter ist, sondern aus der Simulation resultiert. Lediglich ein Startwert muss eingegeben werden.

Die Reibungsparameter, vor allem der trockene Reibungskoeffizient μ , sind bei den auf dem Voellmy-Ansatz basierenden Programmen RAMMS und FLATModel erst nach längerer iterativer Änderung optimal. Mit den in der Literatur empfohlenen Werten und mit dem gewählten Startwert in Abhängigkeit der Kegelneigung können nur unzureichende Resultate erzielt werden. Die Aussage von Rickenmann (mündliche Mitteilung, März 2009), der Reibungswinkel μ kann auch kleiner werden als das Kegelgefälle, bestätigt sich in den simulierten Ereignissen. In Tabelle 6.1 sind sämtliche Reibungskoeffizienten der Best-Fit Simulationen dem mittleren Kegelgefälle bzw. dem mittleren Gefälle der dokumentierten Ablagerung gegenübergestellt.

Tab. 6.1: Vergleich der mittleren Kegelneigung θ , der mit RAMMS und FLATModel simulierten Best-fit Parameter des Reibungskoeffizienten μ , des rückgerechneten Reibungskoeffizienten S_f und des mit TopFlow DF simulierten Wertes von S_f .

Nr	Bachname	Neigung d. Kegelneigung dokumentierten Ablagerung		Reibungskoeffizient μ		Reibungskoeffizient S_f	
		$\tan \theta_K$ [-]	$\tan \theta_A$ [-]	μ_{RAMMS} [-]	$\mu_{FLATModel}$ [-]	$S_{f,r}$ [-]	$S_{f,TopFlow}$ [-]
2	Arundakopfbach 1	0,18	0,15	0,08	0,09	0,19	0,19
6	Draunbergerbach	0,15	0,07	0,08	0,12	0,19	0,08
7	Fanatjoch	0,24	0,24	0,15	0,2	0,27	0,25
15	Klammbach	0,15	0,15	0,13	0,14	0,19	0,12
17	Koglbach	0,19	0,16	0,17	0,12	0,21	0,16
20	Loterbach 1	0,22	0,22	0,22	0,22	0,25	0,28
31	Seefeldbach 1	0,22	0,22	0,18	0,18	0,29	0,26
36	Weissenbacher-Kahlbach	0,24	0,24	0,17	0,185	0,27	0,14

In Abbildung 6.4 sind die Reibungsparameter μ in Abhängigkeit der Neigung der dokumentierten Ablagerung dargestellt. Die durchgeführte lineare Regression lässt einen Zusammenhang erkennen (Korrelationskoeffizient 0,54 bzw. 0,60). Es ist zu sehen, dass bei sehr flachen Neigungen der Ablagerungsstrecke (ca. unter 7°) die μ -Werte diese Neigung überschreiten, bei größeren Neigungen diesen Wert aber eher unterschreiten.

Für gute Prognoseergebnisse mit Modellen, die auf dem Voellmy-Ansatz basieren, ist die Wahl des Reibungsparameters μ sehr entscheidend.

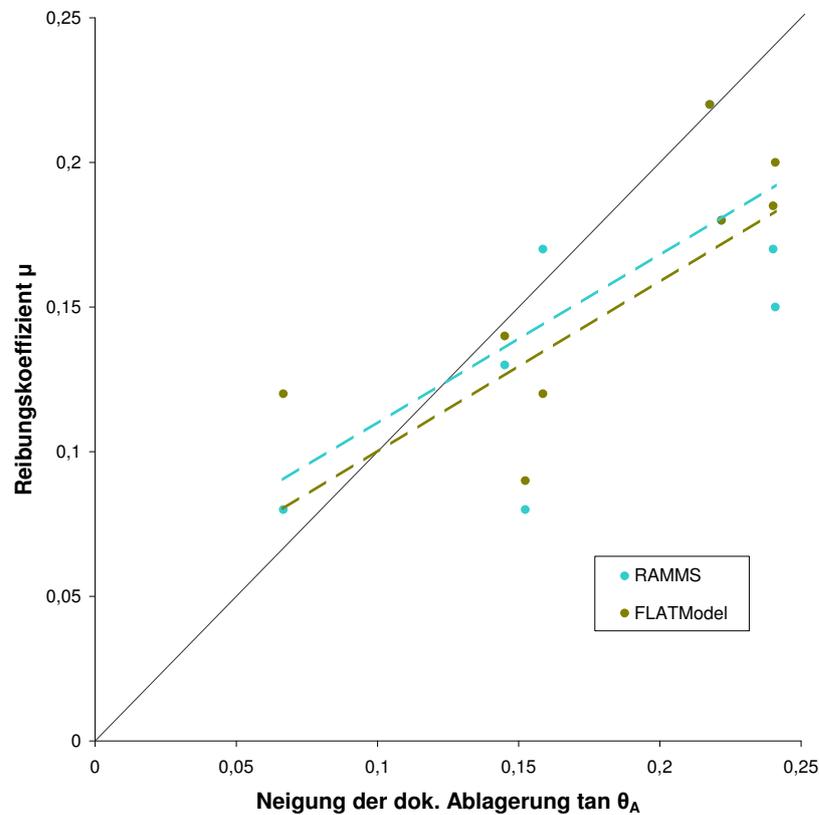


Abb. 6.4: Zusammenhang des Reibungskoeffizienten μ und der Neigung der dokumentierten Ablagerung θ_A .

Betrachtet man die Evaluierungsfaktoren, so zeigen sowohl Ω_A als auch Ω_V bei den auf empirisch-stochastischen Ansätzen beruhenden Modellen TopRun und TopFlow größtenteils bessere Werte, was beachtlich ist. TopFlow hat gegenüber TopRun den großen Vorteil, dass auch Geschwindigkeiten simuliert werden können. Die Gefahrenzonenplanung in der Schweiz und in Südtirol fordert Werte der Mächtigkeiten und Geschwindigkeiten, um Zonen auszuweisen.

Die Simulationsprogramme weisen, auch was die Benützung betrifft, sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. RAMMS hat eine sehr ausgereifte, an typischen Windowsprogrammen orientierte Oberfläche. Es sind viele GIS-Elemente in das umfangreiche Programm integriert und so können auch die Ergebnisse in RAMMS betrachtet und Informationen abgefragt werden. TopRun hat eine sehr einfache Eingabemaske und die Programme FLATModel und TopFlow arbeiten ohne

Windows-Oberfläche. Bei diesen Programmen müssen die Ergebnisse mit anderer GIS-Software betrachtet werden. Solche Eigenschaften werden hier nicht bewertet, zudem es sich je nach Benutzer um subjektive Werte handelt.

Die Anwendbarkeit auf Ereignisse mit bestimmten dokumentierten Parametern und die Arbeitszeit, bis zufriedenstellende Resultate vorliegen, sollte hier eher bewertet werden. Mit den neu entwickelten Programmen TopRun und TopFlow ist nach einigen wenigen Simulationen eine Best-Fit Simulation gefunden, während bei RAMMS und FLATModel durch relativ langwierige, iterative Änderung der Reibungsparameter die optimale Nachbildung gefunden wird. Zudem ist das Abbruchkriterium beim Voellmy-Ansatz ein heikler Punkt, der noch unzureichend gelöst ist und Unsicherheit in der Simulation mit sich bringt.

7 Schlussfolgerungen

Die Resultate der untersuchten eindimensionalen Modelle bringen für den betrachteten Ereignisbereich wertvolle Erkenntnisse. Die empirischen Ansätze in den Modellen von RICKENMANN (1999), COROMINAS (1996) und PROCHASKA et al. (2008) sind sehr von den für die Kalibrierung verwendeten Daten abhängig. Die Ergebnisse zeigen wahrscheinliche Tendenzen beim Einsatz dieser Modelle im südtiroler Raum. Jedoch sind diese Modelle vor allem für Vorhersagen vorsichtig anzuwenden, es sind verschiedene Modellansätze zu wählen und mögliche Varianten der Parameter zu modellieren.

Der Ansatz zur Bestimmung der Auslauflänge nach TAKAHASHI (1991) zeigt sich stark von der Wahl des Reibungskoeffizienten S_f abhängig. Der vorgestellte empirische Zusammenhang dieses Reibungskoeffizienten, der Kegelneigung und des Mobilitätskoeffizienten k_B stellt einen Versuch dar, den Reibungswinkel besser bestimmen zu können, diese Theorie sollte aber jedenfalls weiter erörtert werden. Jedenfalls wurde gezeigt, dass mit einem verbesserten S_f -Wert deutlich bessere Resultate erzielt werden können.

Die Analyse der zweidimensionalen Simulationen beweist, dass auch auf empirischen und stochastischen Ansätzen basierende Modelle im Vergleich zu numerischen „physikalisch“ basierten Programmen sehr gute Ergebnisse liefern können. Der Mobilitätsfaktor k_B stellt ein gutes, generelles Werkzeug zur Beschreibung von Murgängen und verwandten Prozesstypen dar. Die Erforschung dieses Parameters sollte forciert werden, um diesen Wert für den Vorhersagefall vielleicht nicht nur über Neigungsverhältnisse des Einzugsgebietes, sondern auch über andere Faktoren wie z.B. geologische Verhältnisse, Kornverteilungen oder Oberflächenrauigkeiten genauer bestimmen zu können.

Für den Einsatz zweidimensionaler Modelle in der Vorhersage wird es immer sinnvoll und notwendig sein, mehrere Varianten durchzuspielen und dafür unterschiedliche Modelle anzusetzen. Die Wahl des Ereignisvolumens und das topografische Modell haben sehr großen Einfluss auf die simulierten Ablagerungen.

Diese Arbeit soll auch verdeutlichen, dass eine genaue physikalisch-basierte

Modellierung schon aufgrund mangelnder Inputparameter unmöglich ist und dass auch zweidimensionale Modelle mit empirischen und stochastischen Ansätzen gute und konkurrenzfähige Möglichkeiten zur Simulation des Ablagerungsverhaltens granularer Murgänge darstellen können.

8 Anhang

Nr.	Ereignis	Ereignis-	Neigung der	Kegel-	Spitzenabfluss	Fließ-	max.
		volumen	Transit-	neigung	nach	geschwindigkeit	Fließhöhe
		V	θ_T	θ_K	Q	v	h
		[m ³]	[°]	[°]	[m ³ /s]	[m/s]	[m]
1	Alt-Rateiserbach	1.000	35	15	32	5,8	0,9
2	Arundakopfbach_1	15.000	27	10	302	11,0	2,7
3	Arundakopfbach_2	1.500	10	6	44	4,2	0,9
4	Berglerbach	16.600	22	9	329	10,6	3,1
5	Bichlbach	2.500	13	6	68	5,2	1,4
6	Draunbergerbach	2.000	29	9	56	6,5	1,2
7	Fanatjoch	5.000	25	14	121	8,0	1,7
8	Fineljochferner	3.000	31	18	79	7,5	1,7
9	Fuchsbach	3.600	24	14	92	7,1	2,2
10	Gadriabach_1	6.200	18	7	145	7,5	1,8
11	Grabenhof Bach	1.680	17	8	49	5,1	1,4
12	Grafeisbach	11.000	18	9	233	8,7	2,7
13	Instalmbach	2.500	24	8	68	6,4	2,1
14	Kasbach	10.000	17	7	215	8,4	2,3
15	Klammbach	30.000	21	8	538	12,2	2,4
16	Koflerhofbach	2.500	28	12	68	6,9	2,5
17	Koglbach	15.000	21	11	302	10,1	1,9
18	Kranzerbach	2.800	27	13	75	7,0	1,1
19	Laaserbach	20.000	24	13	384	11,4	2,8
20	Loterbach_1	2.000	26	12	56	6,3	1,5
21	Loterbach_2	2.000	31	14	56	6,7	1,7
22	Mainlechnerbach_2	3.000	28	10	79	7,2	1,8
23	Marbach	3.000	30	11	79	7,4	2,1
24	Neuhausbach	18.000	28	9	352	11,7	3,7
25	NN1	6.000	31	12	141	9,1	1,7
26	NN3	2.000	34	17	56	6,9	2,0
27	Prantlbach-Brandwaldbach	5.000	19	7	121	7,2	1,1
28	Putzerbach	15.000	22	10	302	10,3	2,9
29	Rosimbach	15.000	13	8	302	8,6	4,4
30	Schlinigeralmbach	3.000	34	17	79	7,8	2,0
31	Seefeldbach_1	70.000	31	13	1090	17,8	2,8
32	Seefeldbach_2	30.000	31	9	538	14,2	2,4
33	Sreinmetzbach	1.200	16	26	37	4,6	2,7
34	Tribulaunbach_2	1.500	28	11	44	6,0	1,1
35	Waldfriedenbach	11.000	22	9	233	9,4	3,1
36	Weissenbacher-Kahlbach	11.000	25	14	233	9,8	3,4
37	Zuwasserbach_1	1.500	24	12	44	5,6	1,6
38	Zuwasserbach_2	2.500	23	16	68	6,4	1,8

Tab. 8.1: Empirisch ermittelte Spitzenabflüsse und maximale Fließgeschwindigkeit sowie zugehörige Fließhöhe am Kegelhals; abgebildet sind auch die Neigung der Transportstrecke und die Kegelneigung.

Nr	Bachname	β	α_{ACS}	α_{dok}
1	Alt-Rateiserbach	34,0	29,9	33,3
2	Arundakopfbach_1	24,2	21,3	14,7
3	Arundakopfbach_2	17,0	15,0	15,7
4	Berglerbach	22,1	19,4	19,3
5	Bichlbach	18,0	15,9	17,2
6	Draunbergerbach	27,1	23,9	25,4
7	Fanatjoch	24,0	21,1	21,9
8	Fineljochferner	25,9	22,8	22,3
9	Fuchsbach	23,4	20,5	22,2
10	Gadriabach_1	16,7	14,7	16,0
11	Grabenhof Bach	17,9	15,7	16,4
12	Grafeisbach	14,7	13,0	14,3
13	Imstalmbach	22,8	20,0	21,5
14	Kasbach	22,6	19,9	20,4
15	Klambach	20,2	17,8	18,7
16	Koflerhofbach	25,9	22,8	24,5
17	Koglbach	22,8	20,1	18,9
18	Kranzerbach	26,0	22,9	25,3
19	Laaserbach	21,9	19,3	19,6
20	Loterbach_1	25,0	22,0	21,2
21	Loterbach_2	30,7	27,0	25,0
22	Mainlechnerbach_2	29,7	26,1	26,2
23	Marbach	30,0	26,4	28,0
24	Neuhausbach	25,3	22,2	19,9
25	NN1	27,7	24,4	25,9
26	NN3	29,5	25,9	28,1
27	Prantlbach-Brandwaldbach	20,6	18,1	20,0
28	Putzerbach	21,3	18,8	20,8
29	Rosimbach	15,5	13,7	14,5
30	Schlinigeralmbach	30,9	27,2	26,6
31	Seefeldbach_1	32,5	28,6	26,6
32	Seefeldbach_2	29,2	25,7	21,8
33	Sreinmetzbach	24,2	21,3	24,4
34	Tribulaunbach_2	27,7	24,3	26,2
35	Waldfriedenbach	21,9	19,3	19,8
36	Weissenbacher-Kahlbach	24,2	21,3	20,6
37	Zuwasserbach_1	23,4	20,6	22,9
38	Zuwasserbach_2	22,5	19,8	22,2

Tab. 8.2: ACS-Modell: dokumentierter Winkel β , modellierter Winkel α_{ACS} und der gemessene, dokumentierte Winkel α_{dok} .

Bachname	Arundakopf- bach 1	Draumberger- bach	Fanatjoch- bach	Klammbach	Koglbach	Loterbach 1	Seefeldbach 1	Weissenbacher- Kahlbach
Nr	2	6	7	15	17	20	31	36
V_{dok}	15.000	2.000	5.000	30.000	15.000	2.000	70.000	11.000
A_{dok}	35.505	2.940	10.512	29.000	23.160	3.510	62.266	21.900
kb	58	19	36	30	38	22	37	44
mcs	50	50	50	50	50	50	50	50
confined	0	0,3	0	0,6	0,6	0,1	0,2	0,25
A_{mod}	34.844	3.013	10.525	28.963	23.106	3.488	59.513	21.763
V_{mod}	14.816	1.998	4.999	29.998	14.995	1.997	66.289	11.000
$h_{A,\text{max}}$	3,7	2,9	2,1	6,7	3,8	2,9	10,6	5,1
$h_{A,\text{min}}$	0,04	0,23	0,33	0,33	0,24	0,04	0,1	0,11
$h_{A,\text{mittel}}$	0,4	0,7	0,5	1,0	0,6	0,6	1,1	0,5
A_X	16.700	1.088	4.469	21.219	14.025	1.125	39.506	1.831
A_Y	18.144	1.925	6.056	7.744	9.081	2.363	20.006	19.931
A_Z	18.805	1.853	6.043	7.781	9.135	2.385	22.760	20.069
$V_{A,X}$	11.119	921	2.618	24.919	12.048	1.374	50.434	2.870
$V_{A,Y}$	3.697	1.076	2.382	5.079	2.947	624	15.854	8.130
α	0,47	0,37	0,43	0,73	0,61	0,32	0,63	0,08
β	0,51	0,65	0,58	0,27	0,39	0,67	0,32	0,91
γ	0,53	0,63	0,57	0,27	0,39	0,68	0,37	0,92
ε	0,74	0,46	0,52	0,83	0,80	0,69	0,72	0,26
Φ	0,25	0,54	0,48	0,17	0,20	0,31	0,23	0,74
$A_{\text{mod}}/A_{\text{dok}}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Ω_V	0,2	-0,5	-0,2	1,0	0,6	-0,3	0,7	-1,5
Wertebereich Ω_V	$-2,0 \leq \Omega_V \leq 2,0$							
Ω_A	-0,1	-0,4	-0,2	0,7	0,3	-0,5	0,4	-1,2
Wertebereich Ω_A	$-1,5 \leq \Omega_A \leq 1,5$							

Tab. 8.3: TopRun DF - Best-Fit Simulationen: Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren samt Wertebereiche.

Bachname	Arundakopf- bach 1	Draunberger- bach	Fanatjoch- bach	Klammbach	Koglbach	Loterbach 1	Seefeldbach 1	Weissenbacher- Kahlbach
Nr	2	6	7	15	17	20	31	36
V_{dok}	15000	2000	5000	30000	15000	2000	70000	11000
A_{dok}	35505	2940	10512	29000	23160	3510	62266	21900
k_B	58	18,5	36	30	38	22	37	44
S_r	0,19	0,08	0,25	0,12	0,16	0,28	0,26	0,14
confined	0,8	0,6	0,6	2,0	1,3	0,3	2,0	0,8
A_{mod}	35281	2938	10531	28969	23113	1906	62850	21769
V_{mod}	1288	524	1516	23532	8383	474	915	4142
$h_{A,max}$	-	-	-	-	-	-	-	-
$h_{A,min}$	-	-	-	-	-	-	-	-
$h_{A,initial}$	-	-	-	-	-	-	-	-
A_X	14194	481	5588	18631	13906	356	35063	4831
A_Y	21088	2456	4944	10338	9206	1550	27788	16938
A_Z	21311	2459	4925	10369	9254	3154	27204	17069
$V_{A,X}$	-	-	-	-	-	-	-	-
$V_{A,Y}$	-	-	-	-	-	-	-	-
α	0,40	0,16	0,53	0,64	0,60	0,10	0,56	0,22
β	0,59	0,84	0,47	0,36	0,40	0,44	0,45	0,77
γ	0,60	0,84	0,47	0,36	0,40	0,90	0,44	0,78
ε	-	-	-	-	-	-	-	-
Φ	-	-	-	-	-	-	-	-
A_{mod}/A_{dok}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0
Ω_V	-	-	-	-	-	-	-	-
Ω_A	-0,3	-1,0	0,1	0,4	0,3	-0,7	0,2	-0,8
Wertebereich Ω_A	$-1,5 \leq \Omega_A \leq 1,5$							

Tab. 8.4: TopFlow DF - Best-Fit Simulationen: Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren samt Wertebereiche.

Bachname	Arundakopf- bach 1	Draumberger- bach	Fanatjoch- bach	Klammbach	Koglbach	Loterbach 1	Seefeldbach 1	Weissenbacher- Kahlbach
Nr	2	6	7	15	17	20	31	36
V_{dok}	15.000	2.000	5.000	30.000	15.000	2.000	70.000	11.000
A_{dok}	35.505	2.940	10.512	29.000	23.160	3.510	62.266	21.900
ξ	300	200	100	400	400	400	350	400
μ	0,08	0,08	0,15	0,13	0,17	0,22	0,18	0,17
t	300	300	300	300	400	260	260	280
A_{mod}	44.506	6.556	23.163	37.675	26.838	5.794	70.913	36.631
V_{mod}	14.555	1.800	4.937	27.817	14.148	1.703	70.462	10.277
$h_{A,\text{max}}$	2	1	1	3	2	1	4	2
$h_{A,\text{min}}$	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
$h_{A,\text{mittel}}$	0,3	0,3	0,2	0,7	0,5	0,3	1,0	0,3
A_X	17.750	1.494	3.519	25.438	13.463	2.850	34.288	4.225
A_Y	26.756	5.063	19.644	12.238	13.375	2.944	36.625	32.406
A_Z	17.755	1.446	6.993	3.563	9.698	660	27.979	17.675
$V_{A,X}$	4.942	309	723	22.510	10.231	989	48.846	1.548
$V_{A,Y}$	9.613	1.491	4.214	5.307	3.917	714	21.617	8.729
α	0	1	0	1	1	1	1	0
β	0,75	1,72	1,87	0,42	0,58	0,84	0,59	1,48
γ	0,50	0,49	0,67	0,12	0,42	0,19	0,45	0,81
ε	0,33	0,15	0,14	0,75	0,68	0,49	0,70	0,14
Φ	0,64	0,75	0,84	0,18	0,26	0,36	0,31	0,79
$A_{\text{mod}}/A_{\text{dok}}$	1,3	2,2	2,2	1,3	1,2	1,7	1,1	1,7
Ω_Y	-0,4	-1,6	-2,1	1,1	0,3	0,3	0,2	-2,0
Wertebereich Ω_Y	$-2,3 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-3,2 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-3,2 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,3 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,2 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,7 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,1 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,7 \leq \Omega_Y \leq 2,0$
Ω_A	-0,3	-1,2	-1,7	0,8	0,1	0,3	0,0	-1,6
Wertebereich Ω_A	$-1,8 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-2,7 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-2,7 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,8 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,7 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-2,2 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,6 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-2,2 \leq \Omega_A \leq 1,5$

Tab. 8.5: RAMMS - Best-Fit Simulationen: Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren samt Wertebereiche.

Bachname	Arundakopfbach 1	Draumbergebach	Fanatjochbach	Klammbach	Koglbach	Loterbach 1	Seefeldbach 1	Weissenbacher-Kahlbach
Nr	2	6	7	15	17	20	31	36
$V_{\text{dök}}$	15.000	2.000	5.000	30.000	15.000	2.000	70.000	11.000
$A_{\text{dök}}$	35.505	2.940	10.512	29.000	23.160	3.510	62.266	21.900
C	14	12	10	14	16	15	16	15
μ	0,09	0,12	0,20	0,14	0,12	0,22	0,18	0,19
t	600	600	300	300	500	320	480	900
A_{mod}	37.788	7.275	22.238	29.619	18.069	3.994	43.019	28.038
V_{mod}	13.462	1.751	4.423	31.225	13.531	2.193	64.364	12.341
$h_{A,\text{max}}$	2	1	1	5	4	2	4	3
$h_{A,\text{min}}$	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
$h_{A,\text{mittel}}$	0,4	0,2	0,2	1,1	0,7	0,5	1,5	0,4
A_X	15.656	1.513	6.950	20.600	7.344	1.681	30.600	3.231
A_Y	22.131	5.763	15.288	9.019	10.725	2.313	12.419	24.806
A_Z	19.849	1.428	3.562	8.400	15.816	1.829	31.666	18.669
$V_{A,X}$	4.849	670	1.289	24.709	7.142	1.046	46.046	1.807
$V_{A,Y}$	8.613	1.081	3.134	6.516	6.390	1.147	18.319	10.533
α	0	1	1	1	0	0	0	0
β	0,62	1,96	1,45	0,31	0,46	0,66	0,20	1,13
γ	0,56	0,49	0,34	0,29	0,68	0,52	0,51	0,85
ε	0,32	0,34	0,26	0,82	0,48	0,52	0,66	0,16
Φ	0,57	0,54	0,63	0,22	0,43	0,57	0,26	0,96
$A_{\text{mod}}/A_{\text{dök}}$	1,1	2,5	2,1	1,0	0,8	1,1	0,7	1,3
Ω_Y	-0,4	-1,6	-0,9	0,9	-0,4	-0,2	0,4	-1,7
Wertebereich Ω_Y	$-2,1 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-3,5 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-3,1 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,0 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-1,8 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,1 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-1,7 \leq \Omega_Y \leq 2,0$	$-2,3 \leq \Omega_Y \leq 2,0$
Ω_A	-0,2	-1,4	-0,6	0,6	-0,3	-0,2	0,3	-1,3
Wertebereich Ω_A	$-1,6 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-3,0 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-2,6 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,5 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,3 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,6 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,2 \leq \Omega_A \leq 1,5$	$-1,8 \leq \Omega_A \leq 1,5$

Tab. 8.6: FLATModel - Best-Fit Simulationen: Parameter, Vergleichszahlen, Evaluierungsfaktoren samt Wertebereiche.

Literaturverzeichnis

- ALLEN, P. A. (1997): *Earth Surface Processes*. Oxford: Blackwell Science Ltd
- AUTONOME PROVINZ BOZEN SÜDTIROL - ABTEILUNG RAUMORDNUNG (HRSG.) (1997): *Richtlinien zur Erstellung der Gefahrenzonenpläne (GZP) und zur Klassifizierung des spezifischen Risikos (KSR)*.
- BAGNOLD, R. A. (1954): Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc. R. Soc. London*, 225, 49–63
- BAILER-JONES, D. (2002): *Naturwissenschaftliche Modelle: Von Epistemologie zu Ontologie*: in A. Beckermann und C. Nimitz, *Argument und Analyse - Sektionsvorträge*. Paderborn
- BAKKEHØI, S., DOMAAS, U. UND LIED, K. (1983): Calculation of snow avalanche runout distance. *Annals of Glaciology*, 4, 24–29
- BARDOU, E. (2002): *Methodologie de diagnostic et prevision des laves torentielles sur un bassin versant alpin*: These no. 2479. Dissertation, Ecole Polytechnique Federale Lausanne
- BATHURST, J. C., BURTON, A. UND WARD, T. J. (1997): Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (5), 410–419
- BENDA, L. E. UND CUNDY, T. W. (1990): Predicting deposition of debris flows in mountain channels. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 409–417
- BERTI, M. UND SIMONI A. (2007): Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. *Geomorphology*, 90, 144–161
- BINGHAM, E. C. (1922): *Fluidity and plasticity*. New York: McGraw Hill
- CANNON, S. H. (1993): An empirical model for the volume-change behaviour of debris flows: in: Shen, H.W.; Su, S.T. and Wen, F., *Hydraulic Engineering '93. American Society of Civil Engineers*, 2, 1768–1773
- CARRANZA, E. J. M. UND CASTRO, O. T. (2006): Predicting lahar-inundation zones: Case study in West Mount Pinatubo, Philippines. *Natural Hazards*, 37, 331–372

- CHEN, C. L. UND LEE, C. F. (2003): A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes. *Geomorphology*, 51 (4), 269–288
- COROMINAS, J. (1996): The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (2), 260–271
- COSTA, J. E. UND FLEISHER P. J. (1984): Developments and Applications of Geomorphology. Berlin: Springer-Verlag
- COUSSOT, P. (1994): Steady, laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 32 (4), 535–559
- EIDGENÖSSISCHES VERKEHRS- UND ENERGIEWIRTSCHAFTSDEPARTMENT (HRSG.) (1991): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987: Ergebnisse der Untersuchungen.
- FANNIN, R. J. UND WISE, M. P. (2001): An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 982–994
- GAMMA, P. (2000): Dfwalk - Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Dissertation, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern
- GIUS, S. (2005): Gefahrenzonenplanung in Südtirol. *Wildbach- und Lawinenverbau 2005*
- GRISWOLD, J. P. UND IVERSON, R. M. (2007): Mobility Statistics and Automated Hazard Mapping for Debris Flows and Rock Avalanches. *Scientific Investigations Report 2007 - 5276*
- HAEBERLI, W., RICKENMANN, D. UND ZIMMERMANN, M. (1991): Murgänge. In EIDGENÖSSISCHES VERKEHRS- UND ENERGIEWIRTSCHAFTSDEPARTMENT (HRSG.): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987: Ergebnisse der Untersuchungen.
- HEIM, A. (1932): Bergsturz und Menschenleben. Zürich: Fretz & Wasmuth Verlag AG
- HOSE, A. (2007): Einfluss der Topographie auf die Murgangsimulation im Ablagerungsbereich und Implikationen auf die Gefahrenbeurteilung: Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Geographie
- HÜBL, H. (2001): Simulation von Murgängen – Probleme und Lösungsansätze: Georisiken - Seminar und Workshop 2001: 47-54. Wien
- HÜBL, H., HEISS, K. UND BRABEC, S. (2007): Grundlagen zur Risikoanalyse am Enterbach und Pfonerbach, Tirol: IAN Report 104 Band 2 (unveröffentlicht). Institut für alpine Naturgefahren, BOKU Wien
- HUNGR, O. (2005): Classification and terminology. In JAKOB, M. UND HUNGR, O. (HRSG.): Debris-flow hazards and related phenomena. Berlin [u.a.]: Springer, 9–23
- HUNGR, O., EVANS, S. G., BOVIS, M. J. UND HUTCHINSON, J. N. (2001): A Review

- of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7 (3), 221–238
- HUNGR, O., MORGAN, C. UND KELLERHALS, R. (1984): Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21, 663–677
- IVERSON, R. M. (1997): The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics*, 35 (3), 245–296
- IVERSON, R. M. (2005): Debris-flow mechanics. In JAKOB, M. UND HUNGR, O. (HRSG.): Debris-flow hazards and related phenomena. Berlin [u.a.]: Springer, 105–134
- IVERSON, R. M. UND DENLINGER, R. P. (2001): Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106, 537–552
- IVERSON, R. M., SCHILLING, S. P. UND VALLANCE, J. W. (1998): Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America*, 110 (8), 972–984
- KNOBEL, R. (2006): Modellierung von Murgängen und Eislawinen mit Hilfe des RAMMS-Modells und systematischen Testens von Satellitenbildern: Diplomarbeit. Geographisches Institut der Universität Zürich
- KÖRNER, H. J. (1980): Modelle zur Berechnung der Bergsturz- und Lawinenberechnung: Tagungspublikation, Bad Ischl, Austria. *INTERPRAEVENT*, 2, 15–55
- LANCASTER, S. T., HAYES, S. K. UND GRANT, G. E. (2003): Effects of wood on debris flow runout in small mountain watersheds. *Water Resources Research* 39 (6), 1168
- MARCHI, L. UND D’AGOSTINO, V. (2004): Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 207–220
- MCDUGALL, S. D. UND HUNGR, O. (2003): Objectives for the development of an integrated three-dimensional continuum model for the analysis of landslide runout. In RICKENMANN, D. UND CHENG-IUNG C. (HRSG.): Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Volume 1. Rotterdam: Millpress
- MEDINA, V., HÜRLIMANN, M. UND BATEMAN, A. (2008): Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5, 127–142
- MELTON, M. A. (1965): The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits on southern Arizona. *Journal of Geology*, 73, 1–38
- MIZUYAMA, T., KOBASHI, S. UND OU, G. (1992): Prediction of debris flow peak discharge: Tagungspublikation. *INTERPRAEVENT*, 4, 99–108

- NACHTNEBEL, H. P. (2003): Hydrologie: Vorlesungsunterlagen, BOKU Wien, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Wien
- NAEF, D., RICKENMANN, D., RUTSCHMANN, P. UND MCARDELL, B. W. (2006): Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 155–165
- O'BRIEN, J. S., JULIEN, P. Y. UND FULLERTON, W. T. (1993): Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119 (2), 244–261
- OKUDA, S. UND SUWA, H. (1984): Some relationships between debris flow motion and microtopography for the Kamikamihori fan, North Japan Alps: In: T.P. Burt and D.E. Walling (eds), *Catchment Experiments in Fluvial Geomorphology*. GeoBooks, Norwich, UK.
- ONR-24800 (2009): ON-Komitee 256 - Schutz vor Naturgefahren. Wien
- PERLA, R., CHENG, T. T. UND MCCLUNG, D. M. (1980): A two parameter model of snow avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26 (94), 197–208
- PISCH, E. (2002): Dorfbuch Inzing. No address in \langle URL: <http://www.pisch.at/Ernst/wissen/Dorfbuch> \rangle
- PROCHASKA, A. B., SANTI, P. M., HIGGINS, J. D. UND CANNON, S. H. (2008): Debris-flow runout predictions based on the average channel slope (ACS). *Engineering Geology*, 98 (1-2), 29–40
- RICKENMANN, D. (1996): Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung. In ODDSON, B. (HRSG.): *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse*. Basel: Birkhäuser
- RICKENMANN, D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 19, 47–77
- RICKENMANN, D. (2002): Über Murgänge in den Alpen. *Wasser & Boden*, 54 (4), 23–26
- RICKENMANN, D. (2005): Runout prediction methods. In JAKOB, M. UND HUNGR, O. (HRSG.): *Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin [u.a.]: Springer, 305–324
- RICKENMANN, D. (2006a): Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences*, 10 (2), 241–264
- RICKENMANN, D. (2006b): Naturgefahren: Vorlesungsunterlagen SS 2006, BOKU Wien, Institut für alpine Naturgefahren. Wien
- RICKENMANN, D., HUNZINGER, L. UND KOSCHNI, A. (2008): Hochwasser und

- Sedimenttransport während des Unwetters vom August 2005 in der Schweiz: Conference Proceedings. *INTERPRAEVENT*, 8, 465–476
- RICKENMANN, D. UND ZIMMERMANN, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8, 175–189
- RUDOLF-MIKLAU, F. (2009): Naturgefahren-Management in Österreich. Wien: LexisNexis
- SALM, B., BURKARD, A. UND GUBLER, H. U. (1990): Berechnung von Fließlawinen: Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen - Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung 47. Davos
- SCHALDACH, R. (2009): Modellbildung und Simulation: Vorlesungsunterlagen. Universität Kassel [URL: www.usf.uni-kassel.de/ftp/lehre/schaldach/v1_modellbildung_simulation/MoSim3.pdf](http://www.usf.uni-kassel.de/ftp/lehre/schaldach/v1_modellbildung_simulation/MoSim3.pdf)
- SCHUIDEGGER, A. (1973): On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock mechanics*, 5, 231–236
- SCHUIDL, C. UND RICKENMANN, D. (2008): Ablagerungsverhalten und Reichweiten alpiner Murgänge: Despotional characteristics and runout of alpine debris flows: Conference Proceedings. *INTERPRAEVENT*, 1, 477–488
- SCHUIDL, C. UND RICKENMANN, D. (2009a): Empirical runout prediction of alpine debris-flow events, unveröffentlicht. *Earth Surface Processes and Landforms*
- SCHUIDL, C. UND RICKENMANN, D. (2009b): TopFlow DF, noch nicht publiziert.
- SCHUENER, T. (2007): Modellierung von Murgangereignissen mit RAMMS und Vergleich durch GIS-basiertes Fließmodell: Diplomarbeit. Geographisches Institut der Universität Zürich
- STINY, J. (1910): Die Muren: Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen. Innsbruck: Wagner
- TAKAHASHI, T. (1991): Debris flow. Rotterdam: Balkema
- TIEFENBACHER, F. (2003): Vom konstitutiven Verhalten fließenden Schnees. Dissertation, ETH, Zürich
- TOGNACCA, C. (1999): Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Dissertation, ETH, Zürich
- VANDINE D.F. (1996): Debris Flow Control Structures for Forest Engineering: Ministry of Forest Research Program. *Government of the Province of British Columbia, Vancouver* 22 (working paper)
- VARNES, D. J. (1978): Slope movement types and processes: in Schuster, R. L. und

- Krizek, R.J.: Landslides, Analysis and Control, Special Report 176: Transportation Research Board, 11-33. Washington DC: National Academy of Sciences
- VAW (1992): Murgänge 1987, Dokumentation und Analyse: Bericht Nr. 97.6 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie: unveröffentlichter Bericht. Zürich
- VOELLMY, A. (1955): Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung* 1973
- WEBER, D. (2004): Untersuchungen zum Fließ- und Erosionsverhalten granularer Murgänge. Dissertation, ETH, Birmensdorf
- ZIMMERMANN, M., MANI, P. UND GAMMA, P. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz: Schlussbericht NFP 31. Zürich: vdf Hochschulverlag AG