

Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen

Autor(en): **Rickenmann, Daniel / Scheidl, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **102 (2010)**

Heft 1

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-941638>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen

Dieter Rickenmann und Christian Scheidl

1. Einleitung

Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts werden in den meisten Alpenländern Naturgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten berücksichtigt. Zur Darstellung und Information haben sich Karten mit Angaben zu Art und Grad der Bedrohung alpiner Gefahrenprozesse durchgesetzt. In der Schweiz und auch in anderen Ländern sind für die Abgrenzung der Gefahrenbereiche von Murgängen im Wesentlichen die folgenden drei Parameter massgebend: betroffene Fläche, Intensität des Prozesses (z.B. Fliessgeschwindigkeit, Ablagerungshöhe) und Auftretenshäufigkeit.

Für die Bestimmung des raum-

relevanten Bereiches müssen z.B. in der Schweiz für Murgänge die Intensitäten und maximale Reichweite sowie die seitliche Ausbreitung abgeschätzt werden (BWW/BRP/BUWAL, 1997). Dies kann mit der Anwendung von Simulationsmodellen für Murgänge erfolgen. Solche Simulationsmodelle sind in erster Linie deterministischer Natur, deren Ziel es ist, alle Parameter und Gesetze des Systems Murgang zu erkennen und dadurch Ereignisse nachzubilden und im Idealfall das Ablagerungsverhalten zu prognostizieren. Die meisten Simulationsmodelle zur Bestimmung der Reichweite oder Vorhersage des Ablagerungsverhaltens von Murgängen beru-

hen entweder auf empirisch-statistischen Ansätzen oder sind physikalisch basiert (Rickenmann, 1999; Rickenmann et al., 2006; Hürlimann et al., 2008). In *Tabelle 1* sind die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Ansätze zur Gefahrenabgrenzung von Murgängen dargestellt.

Aufgrund der Vor- und Nachteile der beiden Ansätze werden, neben einer geomorphologischen Interpretation von Spuren im Gelände und auf Luftbildern, oft beide in der Praxis kombiniert. In Anbetracht der relativ geringen Häufigkeit an Murgangereignissen – verglichen beispielsweise mit Lawinereignissen – existiert eine Vielzahl an Ansätzen zur Beschreibung und Vorhersage. In diesem Beitrag werden sowohl empirische Modelle als auch ein einfacher physikalisch-analytischer Ansatz zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen vorgestellt. *Tabelle 2* gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Modelle.

2. Datengrundlage und Klassifizierung

Für diese Untersuchung wurden Daten von Murgangereignissen in Österreich, der Schweiz und in Italien (Südtirol) verwendet. Dabei handelt es sich um historische Ereignisse, die auf Informationen in vorhandenen Dokumenten basieren. Dabei sind im besten Fall umfangreiche Ereignisdokumentationen mit zusätzlichem räumlichem Informationsmaterial, wie digitale Geländemodelle (DGM), Luftbilder, Fotos oder Situationskarten vorhanden. Von anderen Ereignissen sind manchmal nur die wichtigsten Kenngrößen bekannt. Von jedem Ereignis wurden topographische und morphometrische Parameter erhoben, im Minimum das Ablagerungsvolumen, die Fläche der Ablagerung, die Kegel- und Gerinneneigung sowie Kenngrößen des Einzugsgebietes. Ablagerungsflächen wurden aus Luftbildern oder, falls nicht vor-

| Empirisch/statistische Ansätze | Physikalisch basierte Ansätze |
|--|---|
| Quantitative Kriterien zur Gefahrenabgrenzung sind nur teilweise darstellbar (z.B. lineare Reichweite, Fliessgeschwindigkeit, Abflusstiefe). | Quantitative Kriterien zur Gefahrenabgrenzung sind darstellbar. |
| Für eine Anwendung sind oft wenige und leicht zu erhebende Eingangsparameter notwendig. | Für eine Anwendung müssen oft mehrere und z.T. schwierig zu bestimmende Eingangsparameter bekannt sein. |
| Die Darstellung von Szenarien ist eingeschränkt möglich. | Die Darstellung von Szenarien ist uneingeschränkt möglich. |
| Ansätze sind nur für ähnliche naturräumliche Bedingungen gültig, wie sie den Daten zur Herleitung des Ansatzes zu Grunde liegen. | Ansätze sind im Prinzip überall gültig. |
| Die Eingangsparameter sind leicht zu erheben. | Die Eingangsparameter sind meistens nicht bekannt oder schwierig zu bestimmen. |
| Ansätze besitzen eine einfache Modellstruktur. | Ansätze besitzen eine komplexe Modellstruktur. |
| Einfache Anwendungen erleichtern die Interpretation der Ergebnisse. | Die Interpretation der Ergebnisse muss oft durch Experten erfolgen. |
| Zur Herleitung müssen möglichst viele Daten vorhanden sein. | Ansätze basieren z.B. auf Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung. |

Tabelle 1. Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze zur Abschätzung von Murgang-Ablagerungen.

| | Empirisch/statistische Modelle | Physikalische Modelle |
|----------------------|---|--|
| 1-dimensional | Bestimmung der Reichweite aufgrund morphometrischer Grössen. <i>Corominas (1996)</i> <i>Rickenmann (1999)</i> | Bestimmung der Auslauflänge aufgrund eines Modelles mit konstantem Abfluss. <i>Takahashi und Yoshida (1979)</i> <i>Hungr et al. (1984)</i> <i>Takahashi (1991)</i> |
| 2-dimensional | Bestimmung der Ablagerungsfläche mittels des Volumen-Flächen Modelles „TopRunDF“ <i>Scheidl und Rickenmann (2009)</i> | |

Tabelle 2. Übersicht über die in dieser Studie vorgestellten Modelle.

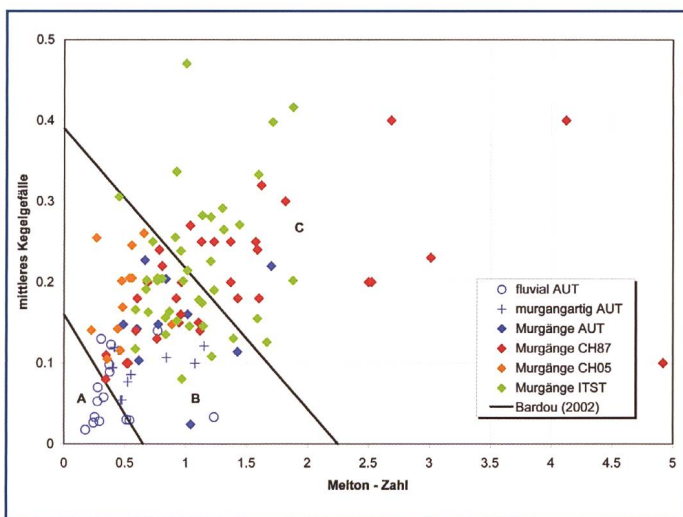


Bild 1. Kegelneigung vs. Melton-Zahl (Gl. 1) mit Grenzlinien nach Bardou (2002). Zone A zeigt den Bereich des fluvialen Feststofftransportes, Zone C den Bereich für Murgänge und Zone B den Übergangsbereich für murgangartige Ereignisse.

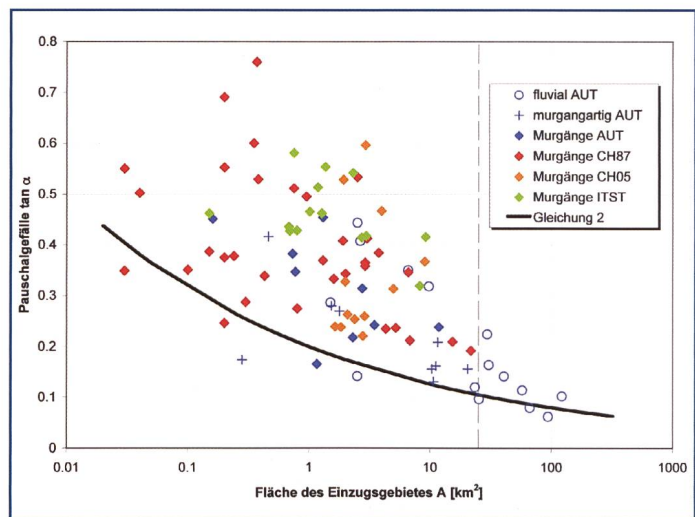


Bild 2. Pauschalgefälle vs. Einzugsgebietsgrösse mit der Grenzlinie nach Zimmermann et al. (1997), Gl. (2). Die gestrichelte Linie bezieht sich auf eine kritische Grösse des Einzugsgebietes von 25 km².

handen, aus Situationskarten abgeleitet. Die Volumen der Ablagerungen wurden den vorhandenen Ereignisdokumentationen entnommen. Für einige Schweizer Ereignisse der Unwetter 2005 wurde die Methode der lasergestützten Fernerkundung (LiDAR-Analyse) zur Bestimmung des abgelagerten Volumens verwendet (Scheidl et al., 2008). Insgesamt besteht die Datenbank der erhobenen Ereignisse aus 106 Murgängen, 10 murgangartigen Ereignissen sowie 10 Ereignissen mit fluvialen Feststofftransport. Die Unterscheidung der Prozessstypen basiert in erster Linie auf den Ereignisdokumentationen bzw. den üblichen Unterscheidungskriterien für Wildbachprozesse (Costa, 1988; Hübl et al., 2002; ONR-24800, 2009).

Die Datensätze der Murgangereignisse dieser Studie wurden nach den zugrundeliegenden Ereignisdokumentationen gruppiert:

- Murgänge AUT: Ereignisse aus Österreich, basierend auf der Dokumentation von Schraml (2008).
- Murgänge CH87: Ereignisse aus der Schweiz, basierend auf der Ereignisdokumentation des Hochwasserereignisses 1987 (VAW, 1987).
- Murgänge CH05: Ereignisse aus der Schweiz, basierend auf der Ereignisdokumentation des Hochwasserereignisses 2005 (Bezzola & Hegg, 2007, Rickenmann et al., 2008).
- Murgänge ITST: Ereignisse aus Südtirol, basierend auf der Ereignisdokumentation (ED30) der Abteilung 30, –Schutzwasserbauten der Provinz Bozen (Hochschwarzer, 2009).
- Die Daten der murgangartigen sowie fluvialen Feststoffereignisse (murgang-

artig AUT; fluvial AUT) stammen alle aus der Dokumentation von Schraml (2008).

Für eine Überprüfung der Prozessklassifikation wurde eine von Bardou (2002) vorgestellte Methode angewandt. Dabei sind die Reliefenergie des Einzugsgebietes und die Neigung des Schwemmkegels Indizien für die vorherrschende Prozessart (Bild 1). Die Reliefenergie eines Einzugsgebietes lässt sich mit der dimensionslosen Melton-Zahl beschreiben (Melton, 1965):

$$M_E = \frac{Elev_{max} - Elev_{min}}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Eingangsgrossen sind die Höhendifferenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Punkt im Einzugsgebiet ($Elev_{max}$ bzw. $Elev_{min}$) sowie die Fläche des Einzugsgebietes (A), wobei als untere Begrenzung des Einzugsgebietes der Beginn der Ablagerung angenommen wird (Kegelhals). In Bild 1 zeigt die Zone A den Bereich des fluvialen Feststofftransportes und Zone C den Bereich für Murgänge an; dazwischen liegt der Übergangsbereich für murgangartige Ereignisse, Zone B.

Weitere Methoden zur Klassifizierung von Prozessstypen basieren auf der Einzugsgebietsgrösse und mittleren Gerinneneigung. Marchi und D'Agostini (2004) analysierten 127 Murgangereignisse in den italienischen Alpen, von denen 125 Ereignisse Einzugsgebiete kleiner als 20 km² und mittlere Gerinneneigungen grösser als 10% aufweisen. Für die Dokumentation der Hochwasserereignisse 2005 in der Schweiz unterschieden Rickenmann et al. (2008) Wildbäche und flachere Ge-

birgsflüsse mit einem Grenzwert für die Einzugsgebietsgrösse von 25 km² und für die mittlere Gerinneneigung von ca. 5–10%. Murgangereignisse traten nur in Einzugsgebieten kleiner als 25 km² auf. Bild 2 zeigt das Pauschalgefälle und die Fläche des Einzugsgebietes für unsere Daten. Es ist deutlich, dass ab einem Einzugsgebiet grösser 25 km² keine Murgangereignisse vertreten sind. Im Weiteren ist erkennbar, dass die Daten mit dem empirisch basierten Ansatz zur Bestimmung des minimalen Pauschalgefälles ($\tan \alpha_{min}$) nach Zimmermann et al. (1997) gut übereinstimmen:

$$\tan \alpha_{min} = 0.2 A^{-0.2} \quad (2)$$

Die Mehrzahl der als fluvialer Sedimenttransport eingestuft Ereignisse unserer Daten bestätigen die oben angeführten Klassifizierungsansätze. Sie befinden sich in Zone A (Bild 1) und weisen Einzugsgebiete grösser 25 km² auf (Bild 2). In dieser Studie wurden für die Anwendung der vorgestellten Simulationsmodelle nur Murgänge und murgangartige Ereignisse miteinbezogen.

3. Modelle zur Bestimmung der Ablagerung von Murgängen

Die Modelle in Tabelle 2 basieren entweder auf beobachteten Murgangereignissen (empirische Ansätze) oder beziehen sich auf allgemein gültige physikalische Beschreibungen des Prozesses (physikalische Ansätze). Das Ausmass der Ablagerung wird entweder eindimensional über die Reichweite bzw. die Auslauflänge oder zweidimensional anhand der Ablagerungsfläche bestimmt. Die Reichweite L_R eines Murganges bezeichnet hier die

horizontale Distanz vom höchsten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung, im Situationsplan entlang des Fließweges gemessen. Als Auslauflänge L_A eines Murganges wird hier die horizontale Länge der Ablagerung auf dem Kegel bezeichnet. Es ist die Länge vom Prozessbeginn bis zum tiefstgelegenen (entferntesten) Punkt der Ablagerung.

3.1 Ansätze für die Reichweite

Beobachtungen von Bergstürzen und Murgangereignissen zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen der Grösse des abgelagerten Volumens und der Reichweite eines Ereignisses besteht. Man stellte fest, dass die Mobilität eines Ereignisses mit ihrem Volumen zunimmt, d.h., dass der Widerstand der bewegten Masse (die Reibung) mit zunehmenden Volumen abnimmt. Nach Heim (1932) ist dieser pauschale Widerstand als dimensionsloser Reibungswinkel – dem Pauschalgefälle – darstellbar.

$$\tan \alpha = \frac{H}{L_R} \quad (3)$$

In Gl. (3) bezeichnet H die gesamte Höhendifferenz (vertikal) und L_R die Reichweite (horizontal) vom höchsten Punkt der Anrisszone bis zum tiefsten Punkt der Ablagerung. Corominas (1996) fand anhand von 71 Murgangereignissen einen Zusammenhang zwischen $\tan \alpha$ und dem Murgangvolumen V , welcher sich wie folgt darstellen lässt:

$$L_{R, \text{Corominas}} = 1.03 V^{0.105} H \quad (4)$$

Basierend auf mehr als 150 Murgangereignissen vor allem aus der Schweiz entwickelte Rickenmann (1999) eine ähnliche Beziehung zur Berechnung der Reichweite:

$$L_{R, \text{Rickenmann}} = 1.9 V^{0.16} H^{0.83} \quad (5)$$

Bild 3 zeigt einen Vergleich zwischen beobachteten Reichweiten und berechneten Reichweiten nach Gl. (5) für Murgänge sowie murgangartige Ereignisse dieser Studie.

Bis zu einer Reichweite von 4000 m treten für Murgänge keine systematischen Abweichungen auf, hingegen unterschätzt der Ansatz nach Gl. (5) die murgangartigen Feststofftransporte systematisch. Betrachtet man nur Murgänge, beträgt der Mittelwert des Verhältnisses von $L_{R, \text{Rickenmann}}$ zu $L_{R, \text{beobachtet}}$ 1.00, mit einem Variationskoeffizienten von 0.31 (entspricht hier

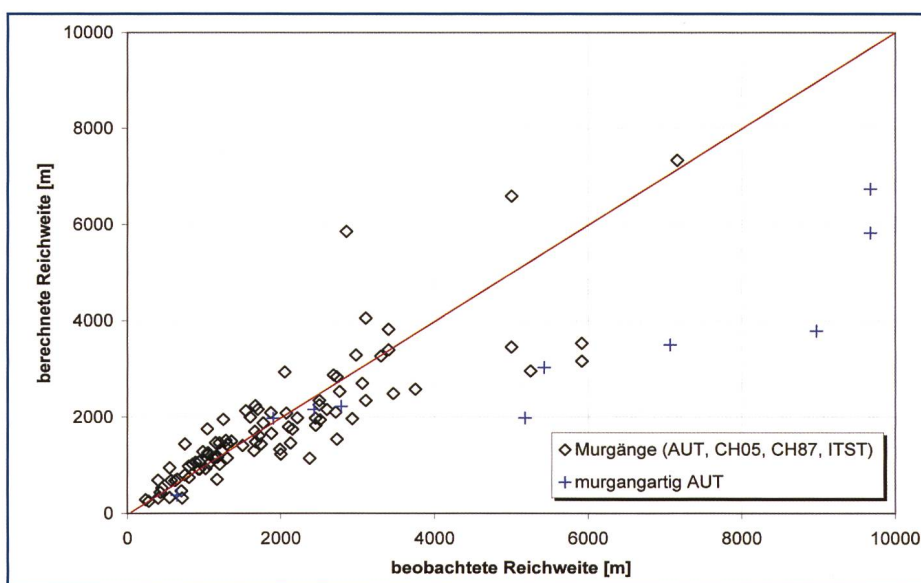


Bild 3. Vergleich der berechneten horizontalen Reichweiten nach Gl. (5) mit den beobachteten Reichweiten der Murgangereignisse bzw. murgangartigen Ereignisse; die rote Linie entspricht der 1:1-Beziehung zwischen berechneter und beobachteter Reichweite.

| Datensatz bzw. Studie | Prozesstyp | Region | Anzahl der Ereignisse | k_B |
|----------------------------------|---|---------------------------------|-----------------------|-------|
| Crosta et al. (2003) | Granulare Murgänge | Alpen, Norditalien | 91 | 6.2 |
| Murgänge ITST | Granulare Murgänge | Alpen, Südtirol | 44 | 17.3 |
| Griswold (2004) | Murgänge | Weltweit | 44 | 19.9 |
| Murgänge CH87 | Granulare Murgänge | Alpen, Schweiz | 34 | 28.1 |
| Yu et al. (2006) | Murgänge | Xueshan, Taiwan | 6 | 28.8 |
| Murgänge CH05 | Murgänge | Alpen, Schweiz | 8 | 32 |
| Berti and Simoni (2007) | Murgänge | Alpen, Norditalien | 24 | 33 |
| Murgänge AUT | Murgänge | Alpen, Österreich | 27 | 44.7 |
| Capra et al. (2002) | Erdrutschungen und Murgänge | Transmexikanischer Vulkangürtel | 6 | 55 |
| murgangartig AUT + fluvialer AUT | Murgangartiger und fluvialer Feststofftransport | Alpen, Österreich | 27 | 56 |
| Waythomas et al. (2000) | Vulkanische Erdströme | Alaska | 10 | 91.8 |
| Iverson et al. (1998) | Lahars | USA, Kolumbien, Philippinen | 27 | 200 |

Tabelle 3. Vergleich der charakteristischen Mobilitätskoeffizienten k_B (Scheidt & Rickenmann, 2009).

der Standardabweichung). Zu beachten ist, dass 34 (der hier insgesamt 94 verwendeten) Murgangereignisse auch für die Entwicklung von Gl. (5) verwendet wurden. Unter Verwendung von Gl. (4) beträgt der Mittelwert des Verhältnisses $L_{R, \text{Corominas}}/L_{R, \text{beobachtet}}$ 0.96 mit einem Variationskoeffizienten von 0.31, ebenfalls nur für die Murgangereignisse betrachtet. Die Prognosequalität der zwei Gleichungen ist somit ähnlich, und die Unsicherheit der Schätzung beträgt bei beiden Gleichungen ungefähr +/- 30% der beobachteten Reichweite. Ist man vor allem an der Auslauflänge auf dem Kegel interessiert, kann die Unsicherheit also beträchtlich sein.

3.2 Ablagerungsfläche und Mobilitätskoeffizient

Daten von beobachteten Ablagerungsflächen und deren mittleren Ablagerungshöhen führen zu einer einfachen geome-

trischen Ähnlichkeitsbeziehung. Nimmt man das Verhältnis von mittlerer beobachteter Ablagerungshöhe \bar{h} zur Wurzel der Ablagerungsfläche B als konstant an, kann man die zu erwartende Ablagerungsfläche B bei bekanntem Ablagerungsvolumen V bestimmen (Iverson et al., 1998):

$$B = k_B V^{2/3} \quad (6)$$

Der Wert k_B in Gl. (6) ist dimensionslos und daher für Untergruppen von Murgängen mit unterschiedlicher Mobilität einfach vergleichbar. Wird k_B für eine Anzahl beobachteter Ereignisse mit ähnlichen Materialeigenschaften bestimmt, d.h. für eine Untergruppe von Murgängen mit vergleichbarer Mobilität, so kann anhand einer Regression für eine Potenzfunktion gemäss Gl. (6) ein charakteristischer k_B Wert bestimmt werden. Diese Werte sind in Tabelle 3 für verschiedene Untergruppen von Murgän-

gen oder murgangähnlichen Ereignissen, basierend auf den eigenen Daten sowie auf Daten anderer Studien, zusammengestellt (Scheidl & Rickenmann, 2009).

Die k_B -Werte in *Tabelle 3* liegen zwischen 6 und 200, je nach Prozesstyp beginnend bei granularen (grobkörnigen) Murgängen (kleine k_B -Werte) bis Lahars (grosse k_B Werte). Crosta et al. (2003) vermuten, dass granulare Murgänge weniger Wasser enthalten als Lahars und daher relativ kürzere und mächtigere Ablagerungen bilden, was kleinere k_B -Werte impliziert. Eine Bestätigung dieser Annahme liefern die Daten für murgangartigen bzw. fluvialen Feststofftransport. Der k_B -Wert dieser Datengruppe liegt zwischen den k_B -Werten der Murgänge und jenen von vulkanischen Erdströmen und Lahars. Dies erscheint sinnvoll, denn murgangartige bzw. fluviale Feststofftransport-Ereignisse haben typischerweise einen höheren Wassergehalt als Murgänge und transportieren andererseits grössere Sedimentkörner als Lahars.

Wird k_B aus dem beobachteten Volumen sowie der Ablagerungsfläche für das Einzelereignis abgeleitet, wird er hier als beobachteter Mobilitätskoeffizient k_B' bezeichnet:

$$k_B' = B_{\text{beobachtet}} V_{\text{beobachtet}}^{-2/3} \quad (7)$$

Für eine Prognose der Ablagerungsfläche ist es hilfreich, wenn der Mobilitätskoeffizient unabhängig von einer (teilweise subjektiven) a priori Zuordnung eines Wildbaches oder Ereignisses zu einer bestimmten Untergruppe von Murgangstypen bestimmt werden kann. Scheidl & Rickenmann (2009) fanden einen Zusammenhang zwischen den beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B' und der Gerinneneigung S_G bzw. Kegelneigung S_K . Der prognostizierte Mobilitätskoeffizient $k_{B\text{prog}}$ berücksichtigt zusätzlich noch eine Korrektur zur Verringerung einer systematischen Abweichung in Abhängigkeit der Mobilität und lässt sich wie folgt berechnen (Scheidl & Rickenmann, 2009):

$$k_{B\text{prog}} = 5.07 S_K^{-0.10} S_G^{-1.68} \quad (8)$$

Die normierten, prognostizierten Mobilitätskoeffizienten $k_{B\text{prog}}^*$ werden definiert als:

$$k_{B\text{prog}}^* = k_{B\text{prog}} \left(\frac{k_B'}{k_{B\text{prog}}} \right) \quad (9)$$

In *Bild 4* ist $k_{B\text{prog}}^*/k_B'$ in Abhängigkeit der beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B'

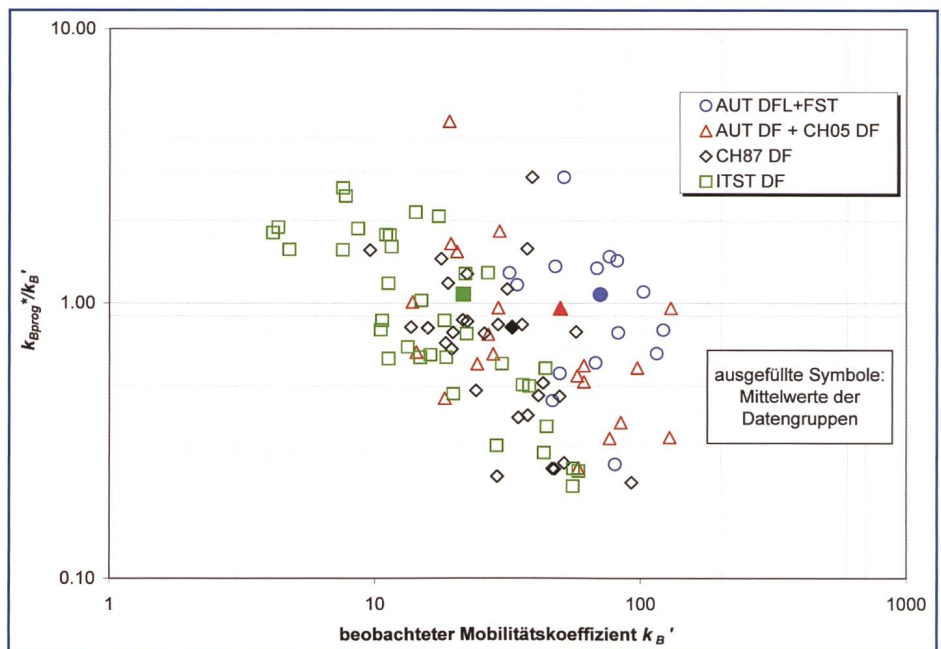


Bild 4. Normierte, prognostizierte Mobilitätskoeffizienten sind als $k_{B\text{prog}}^*/k_B'$ in Abhängigkeit der beobachteten k_B' -Werte dargestellt. Es zeigt sich ein leichter Trend zur systematischen Unterschätzung der Ablagerungsfläche für Murgangereignisse mit grösserer Mobilität. Die ausgefüllten Symbole zeigen die Mittelwerte von $k_{B\text{prog}}^*/k_B'$ und k_B' der jeweiligen Datengruppen.

| Datengruppen | Anzahl | $\left(\frac{k_{B\text{prog}}}{k_B'} \right)$ | Stabw. | $\left(\frac{k_{B\text{prog}}^*}{k_B'} \right)$ | Stabw.* |
|------------------|--------|--|--------|--|---------|
| AUT DFL + FST | 15 | 1.37 | 0.81 | 1.08 | 0.64 |
| AUT DF + CH05 DF | 20 | 1.22 | 1.23 | 0.96 | 1.28 |
| CH87 DF | 29 | 1.05 | 0.71 | 0.82 | 0.56 |
| ITST DF | 36 | 1.38 | 0.88 | 1.08 | 0.69 |

Tabelle 4. Vergleich der Mittelwerte der Verhältnisse $k_{B\text{prog}}/k_B'$ und $k_{B\text{prog}}^*/k_B'$ für alle Datengruppen. Stabw. bezeichnet die Standardabweichung der Verhältniswerte der Spalte davor.

dargestellt. Das Verhältnis $k_{B\text{prog}}^*/k_B'$ hat eine Standardabweichung von ± 0.71 um den Mittelwert von 1.0. Da k_B linear in der Gl. (6) auftritt, beträgt die Unsicherheit der Schätzung ungefähr $\pm 70\%$ der beobachteten Ablagerungsfläche.

Tabelle 4 vergleicht die Mittelwerte der Verhältnisse $k_{B\text{prog}}$ (Gl. 8) zu k_B' mit den Mittelwerten der Verhältnisse $k_{B\text{prog}}^*$ (Gl. 9) zu k_B' für alle Datengruppen. *Tabelle 4* und *Bild 4* zeigen, dass im Durchschnitt die mit Gl. (9) prognostizierten Mobilitätskoeffizienten für alle Murgänge ausser den Südtiroler Ereignissen unterschätzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Gl. (8) nicht nur auf Murgangereignissen, sondern auch auf fluvialen und murartigen Ereignissen beruht. Aus *Tabelle 4* ist weiter ersichtlich, dass im Durchschnitt die mit Gl. (8) prognostizierten Mobilitätskoeffizienten überschätzt werden. Für die Bestimmung der Ablagerungsflächen in der Praxis wird deshalb die Verwendung von $k_{B\text{prog}}$ nach Gl. (8) empfohlen.

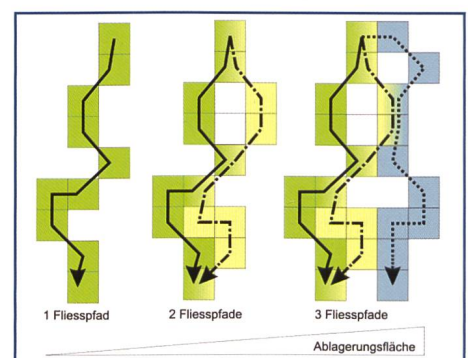


Bild 5. Modellierung der potenziellen Ablagerungsfläche aufgrund multipler Fließspfade (nach Scheidl & Rickenmann, 2009).

3.3 Das Simulationsmodell TopRunDF

TopRunDF ist ein Programm zur Simulation der Ablagerungsfläche und Ablagerungshöhe für Murgänge (Scheidl & Rickenmann, 2009). Eingangsparameter sind das Volumen, ein Mobilitätskoeffizient (Gl. 8), der Startpunkt der Ablagerung sowie ein digitales Geländemodell des Ablagerungsbe-

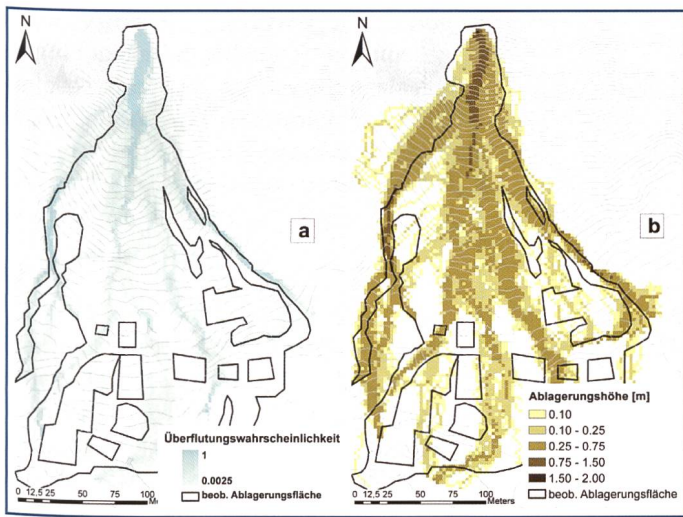


Bild 6. TopRunDF-Simulation für den Glattbach: a) Simulierte Überflutungswahrscheinlichkeiten; b) Simulierte Ablagerungshöhe. Beide Simulationen wurden mit k_B' , d.h. mit der effektiv beobachteten Ablagerungsfläche durchgeführt.

reiches (Murkegel). Das Programm benützt die Flächen-Volumen-Beziehung (Gl. 6 und Gl. 8) und einen D8-Algorithmus zur Bestimmung der Fließspfade kombiniert mit einer Monte-Carlo-Technik, welcher eine potenzielle Ausbreitung der Ablagerung in Abhängigkeit der Kegeltopographie simuliert (Hürlimann et al., 2008). Durch wiederkehrende Simulationen von Fließspaden

kommt es zu einer seitlichen Ausbreitung der simulierten Ablagerungsfläche (Bild 5). Die Modellierung der Fließspfade folgt dabei nicht immer dem steilsten Gefälle, sondern beruht auf einem Zufallsprinzip (Monte-Carlo-Technik).

Sobald die simulierte Ablagerungsfläche die berechnete Fläche aus Gl. (6) überschreitet, wird die Schleife der Simulation der Fließspfade beendet. Für jede Zelle der endgültigen simulierten Ablage-

ungsfläche wird anschliessend dessen Überflutungswahrscheinlichkeit bestimmt. Das vorgegebene Volumen wird dann gemäss der Überflutungswahrscheinlichkeit jeder Zelle in entsprechende Ablagerungsmächtigkeiten aufgeteilt. Als Beispiel zeigt Bild 6 für den Glattbach die Überflutungswahrscheinlichkeiten und die simulierten Ablagerungshöhen für jede Zelle der simulierten Ablagerungsfläche.

Bild 7 zeigt insgesamt 14 mit TopRunDF simulierte Murgangereignisse aus der Schweiz unter Verwendung der effektiv beobachteten Ablagerungsfläche

| Ereignis | Datensatz | $V_{dok.}$ | k_B' | $k_{B\,prog}$ |
|-----------------|-----------|------------|--------|---------------|
| Rotlauhbach | CH05 | 399'000 | 14 | 12 |
| Glattbach | CH105 | 8'762 | 76 | 32 |
| Schwendibach | CH05 | 11'000 | 58 | 19 |
| Blauseeligraben | CH87 | 2'000 | 35 | 17 |
| Gonerli | CH87 | 5'000 | 32 | 45 |
| Piz Caral | CH87 | 3'000 | 29 | 9 |
| Richleren | CH87 | 9'000 | 92 | 26 |
| Heugandtal | CH87 | 7'000 | 48 | 15 |
| Brichboden | CH87 | 4'000 | 52 | 17 |
| Saasbach | CH87 | 180'000 | 19 | 28 |
| ValMera 1 | CH87 | 2'000 | 29 | 32 |
| Gerental 3B | CH87 | 33'000 | 19 | 17 |
| Ri Di Gallinoso | CH87 | 4'000 | 57 | 59 |
| Ri Di Sozz | CH87 | 3'000 | 38 | 19 |

Tabelle 5. Übersicht der simulierten Murgangereignisse (nach Scheidl & Rickenmann, 2009).

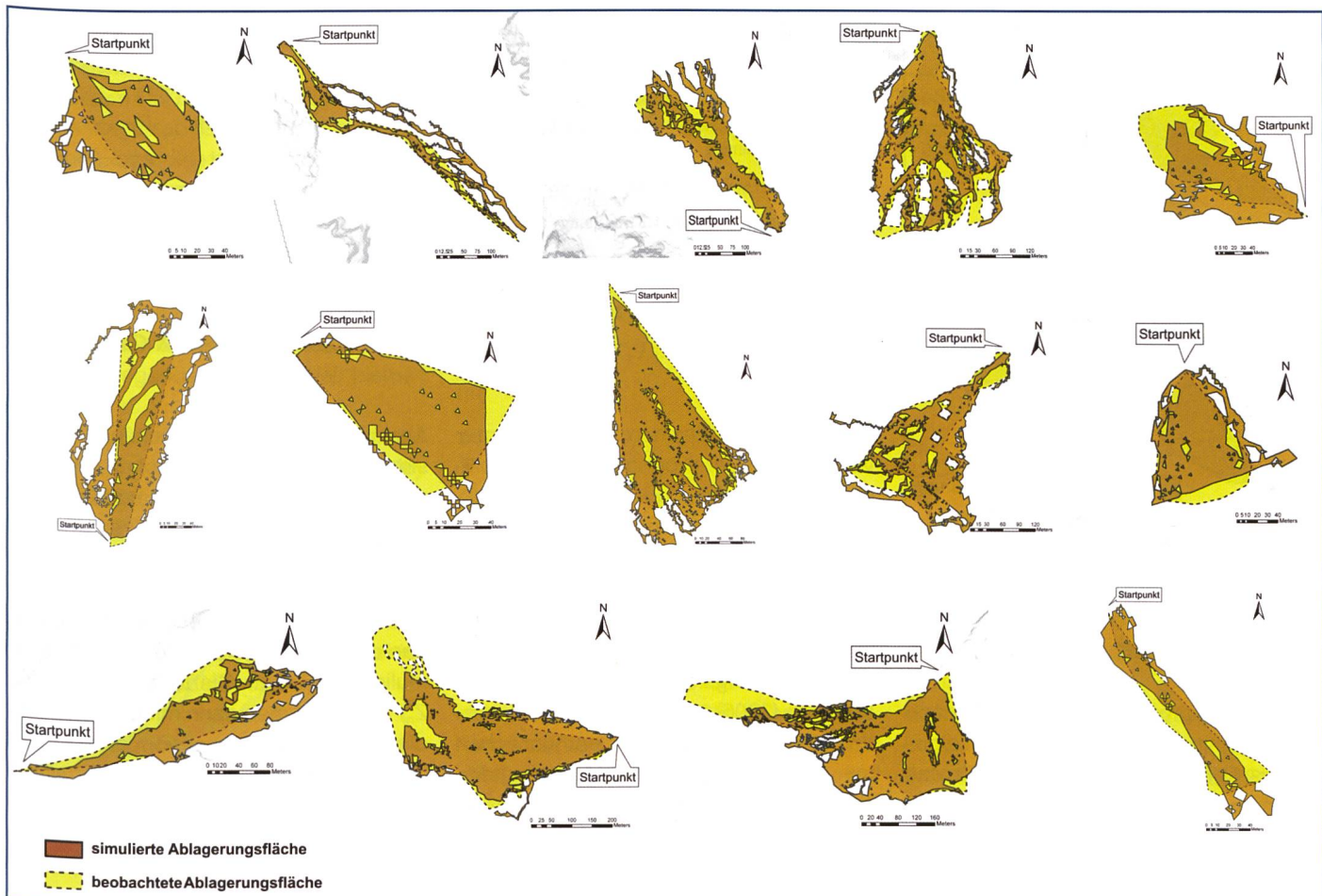


Bild 7. TopRunDF-Simulation für 14 Murgangereignisse aus der Schweiz unter Verwendung der effektiv beobachteten Ablagerungsfläche (d.h. mit k_B' nach Gl. 7).

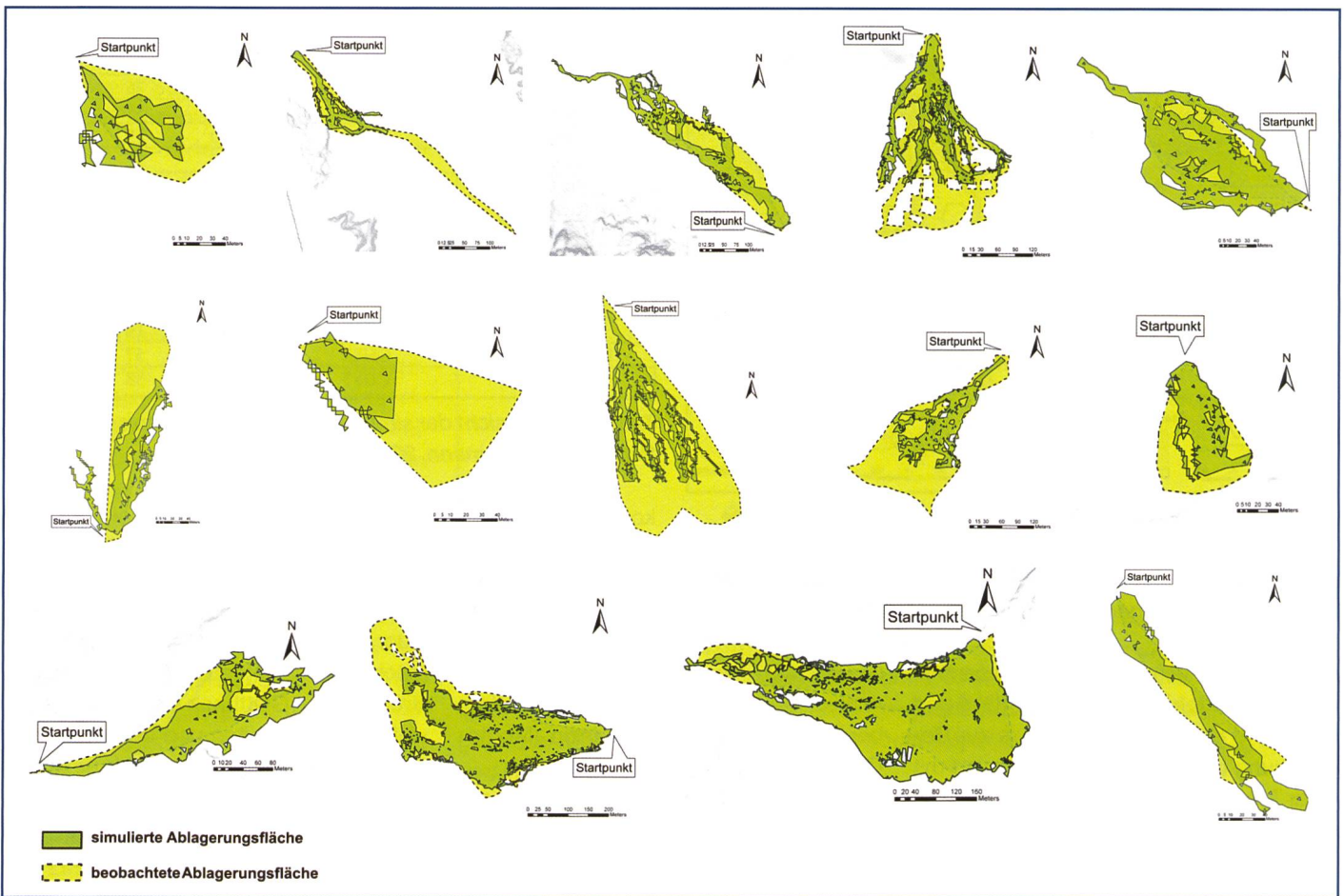


Bild 8. TopRunDF-Simulation für 14 Murgangereignisse aus der Schweiz unter Verwendung von k_{Bprog} nach Gl. (8).

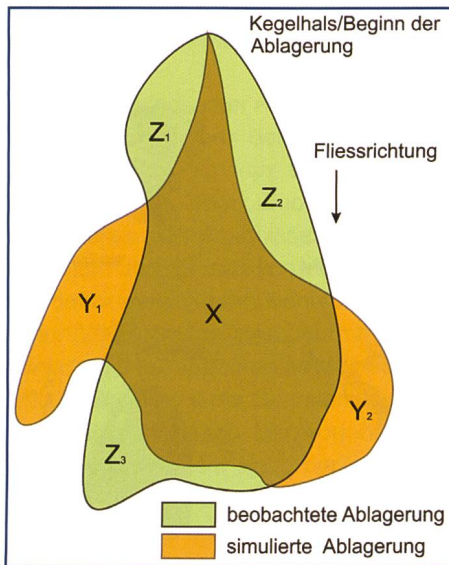


Bild 9. Bewertung der Vorhersage von Ablagerungsflächen: Bestimmung von Teilflächen nach einer Methode von Carranza & Castro (2006).

als Eingangsgrösse (entspricht k_B' nach Gl. 7), womit die Qualität des Fließalgorithmus überprüft werden kann. Für das Ereignis Rotlaibach ist anzumerken, dass beim verwendeten Geländemodell die Höhendaten im unteren Bereich des Kegels nicht repräsentativ sind; dadurch ist die simulierte Ablagerungsfläche kleiner als die beobachtete. In Bild 8 sind Si-

| | Simulierte Ablagerungsflächen | | Nicht-Simulierte Ablagerungsflächen | |
|-------------------------------------|---|---|--|--|
| | Fläche | Volumen | Fläche | Volumen |
| Beobachtete Fläche mit Ablagerungen | positive Überdeckung (X) $\alpha = \frac{B_X}{B_{beobachtet}}$ | positive Überdeckung (X) $\varepsilon = \frac{V_X}{V_{beobachtet}}$ | keine Überdeckung (Z) $\gamma = \frac{B_Z}{B_{beobachtet}}$ | Keine Überdeckung (Z) $\phi = \frac{V_Z}{V_{beobachtet}} = 1 - \varepsilon$ |
| Fläche ohne Ablagerungen | negative Überdeckung (Y) $\beta = \frac{B_Y}{B_{beobachtet}}$ | negative Überdeckung (Y) $\phi = \frac{V_Y}{V_{beobachtet}} = 1 - \varepsilon$ | - | - |

Tabelle 6. Matrix zur Beurteilung der Simulationsergebnisse mit, B_λ bzw. $V_\lambda = \sum_{i=1}^{n_i} \lambda_i$, $\lambda[X, Y, Z]$, nach einer Methode von Carranza & Castro (2006).

mulationen der gleichen Ereignisse unter Verwendung der prognostizierten Mobilitätskoeffizienten k_{Bprog} (Gl. 8) dargestellt. Eine Übersicht der simulierten Murgangereignisse und deren Eingangsparameter zeigt Tabelle 5.

Für einen Vergleich der simulierten mit den beobachteten Ablagerungen wurde eine Bewertungsmethode nach Carranza & Castro (2006) angewendet. Dabei werden die simulierten Ablagerungsflächen mit den beobachteten Ablagerungsflächen ($B_{beobachtet}$) und mit den beobachteten Volumina ($V_{beobachtet}$) verglichen (Bild 9). Simulierte Bereiche die sich mit Flächen beobachteter Ablagerungen überschneiden, werden als Teilflächen X_n mit einer positiven Überdeckung bezeichnet ($n =$

Anzahl der Teilflächen). Liegen hingegen simulierte Flächen in Bereichen ohne beobachtete Ablagerungen, so werden diese als Teilflächen Y_n mit negativer Überdeckung benannt. Keine Überdeckung bezeichnen Teilflächen Z_n . Diese Bereiche weisen beobachtete Ablagerungen auf, überdecken sich jedoch nicht mit den simulierten Flächen. Die Teilflächen (X_n, Y_n, Z_n) vergleicht man dann mit $B_{beobachtet}$ und die zu den Teilflächen gehörigen Volumina vergleicht man mit $V_{beobachtet}$. Tabelle 6 zeigt eine Matrix zur Beurteilung der Simulationsergebnisse. Die Werte $\alpha, \beta, \varepsilon, \phi$ und γ bezeichnen die prozentuellen Anteile der positiven, negativen oder fehlenden Überdeckung der jeweiligen summierten Teilflächen (B_X, B_Y, B_Z) bzw. Teilvolumina

(V_x, V_y, V_z) mit $B_{beobachtet}$ bzw. $V_{beobachtet}$. Aus den in *Tabelle 6* angeführten prozentuellen Anteilen lässt sich ein Bewertungsfaktor Ω berechnen, der die Deckungsgenauigkeit der simulierten Ergebnisse mit den beobachteten Flächen und beobachteten Volumina kombiniert:

$$\Omega = \alpha - \beta - \gamma + \varepsilon \quad (10)$$

Die bestmögliche Simulation entspricht einem Bewertungsfaktor von $\Omega = 2$, wenn die simulierten Bereiche exakt mit den beobachteten Bereichen übereinstimmen. Im Gegensatz dazu wird $\Omega = -2$, wenn keine Überdeckung zwischen simulierten und beobachteten Bereichen besteht. Für die Simulationsresultate mit TopRunDF unter Verwendung der beobachteten Ablagerungsfläche (d.h. mit den Mobilitätskoeffizienten k_B' gerechnet; *Bild 7*) sind in *Tabelle 7* die Bewertungsfaktoren aufgeführt. *Tabelle 8* zeigt die Bewertungsfaktoren für die Simulationsresultate mit TopRunDF unter Verwendung des prognostizierten Mobilitätskoeffizienten k_{Bprog} (*Bild 8*).

Bei einem stark eingetieften Gerinne auf dem Kegel besteht die Möglichkeit, dass es zu keiner lateralen Ausbreitung der simulierten Ablagerungsfläche kommt und dass die angenommene Ablagerungsfläche (Gl. 6) nie erreicht wird. In solch einem Fall bricht das Programm die Berechnungen ab. Um dieses Problem zu umgehen, kann eine temporäre, künstliche Geländeerhöhung für das gesamte Geländemodell definiert werden. Diese Geländeerhöhung betrifft immer nur die jeweilige Ausgangszelle und erhöht temporär das Gefälle dieser Zelle. Sowohl die an sie angrenzenden Nachbarzellen als auch das zugrunde liegende Höhenmodell bleiben unbeeinträchtigt.

TopRunDF ist in VB 6.0[®] als freie Software, unter der «New BSD (Berkeley Software Distribution) Lizenz» entwickelt. Es ist für LiDAR Daten mit einer Auflösung von 2.5 m optimiert.

Das Programm, der Source-Code sowie eine Benutzungsanleitung kann unter: www.debris-flow.at nach Registrierung heruntergeladen werden.

3.4 Bestimmung der Auslauflänge nach Takahashi

Hungr et al. (1984) und Takahashi (1991) beschreiben ein einfaches eindimensionales, physikalisches Modell zur Bestimmung der Auslauflänge L_A von Murgängen (Takahashi & Yoshida, 1979). Basierend auf der Impuls- und Massenerhaltung be-

| Ereignis | α | β | γ | ε | ϕ | Ω | \bar{h}_{obs} [m] |
|--------------------|----------|---------|----------|---------------|--------|----------|---------------------|
| Piz Caral | 0.79 | 0.08 | 0.21 | 0.94 | 0.06 | 1.44 | 0.5 |
| Richleren | 0.79 | 0.17 | 0.21 | 0.90 | 0.10 | 1.31 | 0.2 |
| Rotlauibach | 0.81 | 0.15 | 0.19 | 0.88 | 0.12 | 1.35 | 5.3 |
| Ri Di Gallinoso | 0.68 | 0.07 | 0.32 | 0.89 | 0.11 | 1.18 | 0.3 |
| Ri Di Sozz | 0.77 | 0.25 | 0.23 | 0.86 | 0.14 | 1.15 | 0.4 |
| Blauseeliggraben | 0.71 | 0.24 | 0.29 | 0.88 | 0.12 | 1.06 | 0.4 |
| Schwendibach | 0.68 | 0.32 | 0.32 | 0.80 | 0.20 | 0.84 | 0.4 |
| Saasbach | 0.66 | 0.29 | 0.34 | 0.74 | 0.26 | 0.77 | 3.0 |
| Glattbach | 0.68 | 0.32 | 0.32 | 0.73 | 0.27 | 0.77 | 0.3 |
| Heugandtal | 0.62 | 0.28 | 0.38 | 0.74 | 0.26 | 0.70 | 0.4 |
| ValMeral | 0.64 | 0.33 | 0.36 | 0.70 | 0.30 | 0.65 | 0.4 |
| Gerental 3B | 0.64 | 0.35 | 0.36 | 0.69 | 0.31 | 0.62 | 1.7 |
| Gonerli | 0.61 | 0.46 | 0.39 | 0.79 | 0.21 | 0.55 | 0.5 |
| Brichboden | 0.59 | 0.41 | 0.41 | 0.75 | 0.25 | 0.52 | 0.3 |
| Mittelwert | 0.69 | 0.27 | 0.31 | 0.81 | 0.19 | 0.92 | 1.1 |
| Standardabweichung | 0.07 | 0.12 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.32 | 1.5 |

Tabelle 7. Prozentuelle Überdeckung nach Tabelle 5 für alle simulierten Ereignisse unter Verwendung k_B' (Bild 7). Der Bewertungsfaktor Ω liegt im Bereich [-2, 2].

| Ereignis | α | β | γ | ε | ϕ | Ω | \bar{h}_{pred} [m] |
|--------------------|----------|---------|----------|---------------|--------|----------|----------------------|
| Rotlauibach | 0.73 | 0.12 | 0.27 | 0.92 | 0.08 | 1.26 | 4.70 |
| Ri Di Sozz | 0.46 | 0.03 | 0.54 | 0.92 | 0.08 | 0.81 | 0.80 |
| Brichboden | 0.30 | 0.01 | 0.70 | 0.98 | 0.02 | 0.57 | 1.00 |
| Richleren | 0.28 | 0.00 | 0.72 | 0.99 | 0.01 | 0.55 | 0.80 |
| Blauseeliggraben | 0.35 | 0.09 | 0.65 | 0.91 | 0.09 | 0.52 | 0.70 |
| Schwendibach | 0.25 | 0.08 | 0.75 | 0.84 | 0.16 | 0.26 | 1.10 |
| Piz Caral | 0.25 | 0.03 | 0.75 | 0.94 | 0.06 | 0.41 | 1.60 |
| Glattbach | 0.33 | 0.10 | 0.67 | 0.79 | 0.21 | 0.35 | 1.60 |
| Heugandtal | 0.33 | 0.18 | 0.67 | 0.76 | 0.24 | 0.24 | 1.20 |
| Gerental 3B | 0.50 | 0.33 | 0.50 | 0.64 | 0.36 | 0.31 | 1.60 |
| Ri di Gallinoso | 0.57 | 0.38 | 0.43 | 0.90 | 0.10 | 0.66 | 0.30 |
| Saasbach | 0.82 | 0.48 | 0.18 | 0.73 | 0.27 | 0.89 | 1.90 |
| ValMeral | 0.65 | 0.46 | 0.35 | 0.64 | 0.36 | 0.48 | 0.40 |
| Gonerli | 0.75 | 0.67 | 0.25 | 0.72 | 0.28 | 0.55 | 0.40 |
| Mittelwert | 0.47 | 0.21 | 0.53 | 0.83 | 0.17 | 0.56 | 1.29 |
| Standardabweichung | 0.21 | 0.21 | 0.20 | 0.12 | 0.12 | 0.28 | 1.10 |

Tabelle 8. Prozentuelle Überdeckung nach Tabelle 5 für alle simulierten Ereignisse (Bild 8) unter Verwendung k_{Bprog} . Der Bewertungsfaktor Ω liegt im Bereich [-2, 2].

rechnen sie für eine als konstant angenommene Abflussbreite die Auslauflänge L_A wie folgt:

$$L_A = \frac{V^2}{G}$$

mit

$$V = v \cos(\theta_G - \theta_K) \left[1 + \frac{gh \cos \theta_G}{2v^2} \right]$$

$$G = g(S_R \cos \theta_K - \sin \theta_K) \quad (11a/11b/11c)$$

Gl. (11b) beschreibt die «treibende» Komponente des Murgange basierend auf der Fliessgeschwindigkeit v und Fliesshöhe h am Kegelhalss sowie der Gerinne- θ_G bzw. Kegelneigung θ_K . Die «bremsende» Komponente (der Fliesswiderstand) wird mit Gl. (11c) beschrieben. Der wichtigste Parameter ist hier das dimensionslose Reibungsgefälle S_R (Rickenmann, 2005). Die Gleichungen liefern nur ein plausibles Resultat (d.h. eine positive Auslauflänge), wenn das Reibungsgefälle S_R grösser ist als die Kegelneigung θ_K :

$$S_R = \alpha \sin \theta_K \quad \text{mit } \alpha > 1 \quad (12)$$

Sind die Auslauflänge L_A und die Parameter in Gl. (11b) und (11c) bekannt, kann durch Umformung von Gl. (11a) ein «beobachtetes» (passendes) Reibungsgefälle S_R' berechnet werden.

$$S_R' = \frac{V^2}{L_A g \cos \theta_K} + \tan \theta_K \quad (13)$$

Nach Gl. (13) müssen zur Bestimmung von S_R' , neben der beobachteten Auslauflänge L_A , auch die Fliessgeschwindigkeit v und die Fliesshöhe h am Kegelhalss bekannt sein. Für die untersuchten Ereignisse sind keine diesbezüglichen Beobachtungen vorhanden, daher wurde ausgehend vom beobachteten Volumen der maximale Abfluss Q_{max} am Kegelhalss sowie die Fliessgeschwindigkeit v nach Rickenmann (1999) abgeschätzt:

$$Q_{max} = 0.1 V^{5/6}$$

$$v = 2.1 Q_{max}^{1/3} \tan \theta_G^{1/3} \quad (14/15)$$

Mittels Kontinuitätsgleichung und unter Annahme eines Rechteckgerinnes wurde die Fliesshöhe h wie folgt bestimmt:

$$h = \frac{Q_{\max}}{vb} \quad (16)$$

Die Gerinnebreiten b am Kegelhals wurden mittels der Luftbilder und der digitalen Geländemodelle gemessen. Die Murgangereignisse aus Österreich wurden hier nicht berücksichtigt, da für die vorhandenen Geländemodelle mit einer Auflösung von $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ keine vergleichbaren Gerinnebreiten (wie für die Schweizer und Südtiroler Ereignisse) gemessen werden konnten.

Der Zusammenhang zwischen dem «beobachteten» (aus den Beobachtungen rückgerechneten) Reibungsgefälle S_R' (Gl. 13) sowie dem Kegelgefälle ($\sin \theta_K$) ist in *Bild 10* dargestellt. Es ergibt sich ein relativ hoher Korrelationskoeffizient zwischen dem Reibungsgefälle und dem Kegelgefälle für die Murgänge in der Schweiz und Südtirol, welcher aber zum Teil auf dem Effekt einer scheinbaren Korrelation beruht, da S_R nicht kleiner sein kann als $\sin \theta_K$. Mit der linearen Regressionsgleichung lässt sich ein prognostiziertes Reibungsgefälle $S_{R\text{prog}}$ wie folgt berechnen:

$$S_{R\text{prog}} = 1.29 \sin \theta_K \quad (17)$$

Ähnlich wie der beobachtete Mobilitätskoeffizient k_B' , kann S_R' , als Mass für die Mobilität der beobachteten Ereignisse gesehen werden. Der Zusammenhang zwischen ($S_R'/\sin \theta_K$) und k_B' für die Murgänge in der Schweiz und Südtirol ist in *Bild 11* dargestellt.

Aus der Regressionslinie in *Bild 11* lässt sich eine weitere empirische Gleichung für die Prognose des Reibungs-

gefälles $S_{R\text{prog}[2]}$ in Abhängigkeit des beobachteten Mobilitätskoeffizienten und des Kegelgefälles ableiten:

$$S_{R\text{prog}[2]} = 1.95 k_B'^{-0.13} \sin \theta_K \quad (18)$$

Da Gl. (18) auf den beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B' beruht, müssen ereignisbezogene Informationen (Volumen und Ablagerungsfläche) bekannt sein. Im Gegensatz dazu verwendet Gl. (17) nur eine morphometrische Grösse des Einzugsgebietes, nämlich die Neigung des Kegels. *Bild 12* zeigt einen Vergleich zwischen berechneten und beobachteten Auslauflängen, wobei die berechneten Auslauflängen sowohl mit $S_{R\text{prog}}$ (Gl. 17) als auch mit $S_{R\text{prog}[2]}$ (Gl. 18) bestimmt wurden.

4. Diskussion

Die Simulationen der Reichweiten nach Corominas (1998) und Rickenmann (1999) zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit den beobachteten Reichweiten der Daten dieser Studie. Da diese empirischen Modelle auf Pauschalgefälle-ähnlichen Ansätzen basieren, müssen der Startpunkt und das Längenprofil des Fliessweges bekannt sein. Die dafür notwendige, exakte Bestimmung des Anbruchgebietes ist für «murgangfähige» Einzugsgebiete nicht immer möglich. In der Praxis stösst das Modell an Grenzen, wenn sich Murgänge aufgrund einer «Verflüssigung» der Sohle oder aufgrund einer Kombination räumlich unterschiedlicher Rutschungsbereiche entwickeln. Vorsicht ist auch geboten bei teilweise konvexen Abschnitten im Längenprofil. Für Ereignisse mit eindeutigen Anbruchkriterium liefern beide Modelle akzeptable Ergebnisse für die Reichweite, hingegen kann die Unsicherheit bezüglich der Auslauflänge auf dem Kegel beträchtlich sein.

Wie bei der Methode zur Bestimmung der Reichweite aufgrund des Pauschalgefälles handelt es sich beim einfachen physikalischen Ansatz zur Bestimmung der Auslauflänge nach Takahashi & Yoshida (1979) um ein eindimensionales Modell. Bei der Anwendung dieses Modells spielt das Reibungsgefälle S_R eine wesentliche Rolle und kann anhand bekannter Ereignisse rückgerechnet oder mit empirischen Gleichungen abgeschätzt werden. Das Reibungsgefälle S_R charakterisiert, ähnlich wie der Mobilitätskoeffizient k_B , den Fliesswiderstand während der Ablagerungsphase eines Ereignisses. Tendenziell führen granulare Murgänge mit grösseren Partikeln und möglicherweise kleineren Wassergehalten zu steileren Wildbachkegeln, was ein möglicher Grund für die Korrelation von S_R mit dem Kegelgefälle ist (Rickenmann, 2005). Für 14 Murgänge im Kamikamihori-Tal in Japan mit Messungen zu h und v ergab die Rückrechnung $S_R = 1.12 \tan \theta_K$ (Rickenmann, 2005). Möglicherweise hängen die vergleichsweise grösseren Reibungsgefälle S_R für die Daten in *Bild 10* damit zusammen, dass die Fliessparameter aufgrund der ganzen Murenfracht abgeschätzt werden mussten (Gl. 14–16) und tendenziell grösser sind als für einzelne Murgangschübe. Die inverse Korrelation zwischen den «beobachteten» Reibungsgefällen und den «beobachteten» Mobilitätskoeffizienten ist plausibel im Hinblick auf die physikalische Interpretation der beiden Parameter. Die entsprechende empirische Beziehung setzt Informationen über Ereignisvolumen und Ablagerungsfläche voraus. Für Ereignisse mit kanalisierter Ablagerung entlang eines Gerinnes, wo z.B. ein tiefes Gerinne am Kegel ein seitliches Ausbrechen der Murgangmassen verhindert, ist der Ansatz für die Abschätzung der Auslauflänge nach

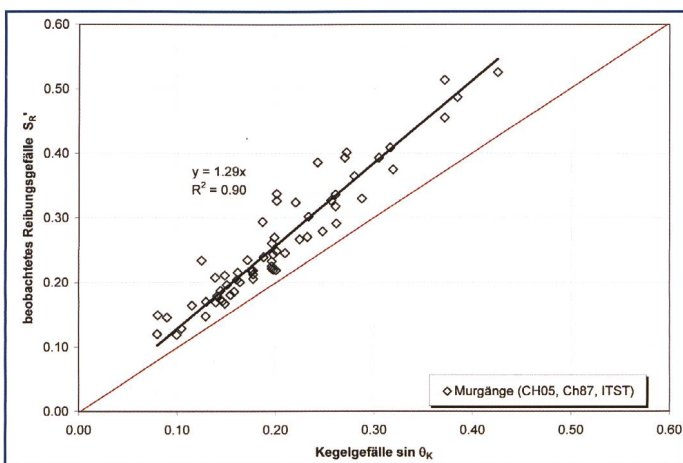


Bild 10. Zusammenhang zwischen dem beobachteten Reibungsgefälle (S_R') und dem Kegelgefälle ($\sin \theta_K$).

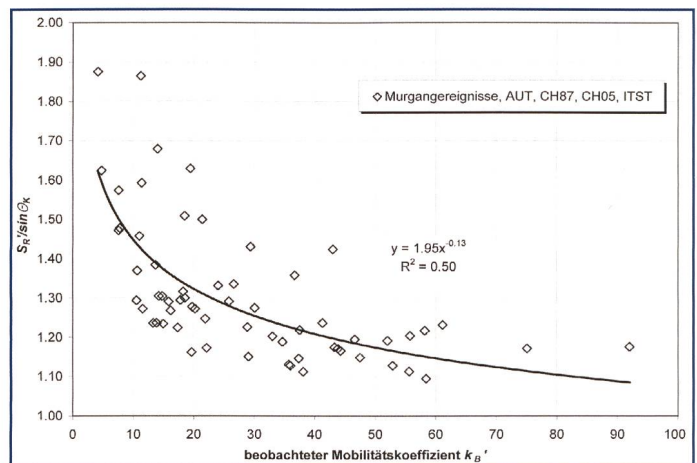


Bild 11. Zusammenhang zwischen dem Verhältnis beobachtetes Reibungsgefälle zu Kegelgefälle ($S_R'/\sin \theta_K$) und dem beobachteten Mobilitätskoeffizienten k_B' .

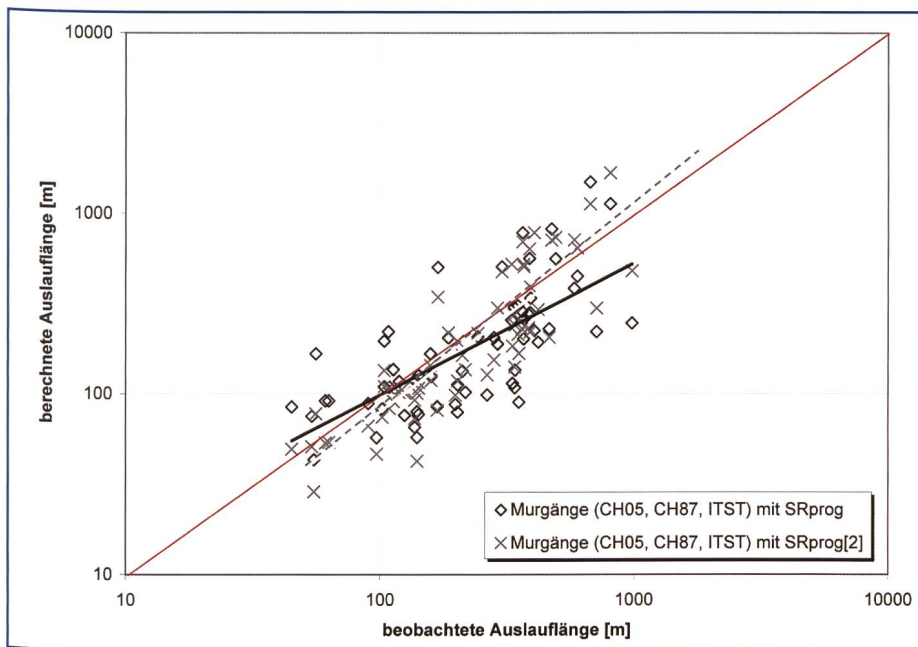


Bild 12. Vergleich der berechneten Auslauflängen (Gl. 11a-c) bei Anwendung von S_{Rprog} Gl. (17) (schwarze Trendlinie für eine Regression mit Potenzfunktion) bzw. $S_{Rprog[2]}$ nach Gl. (18) (strichlierte hellgraue Trendlinie für eine Regression mit Potenzfunktion) mit den beobachteten Auslauflängen. Die rote Linie entspricht der 1:1-Beziehung zwischen berechneter und beobachteter Auslauflänge.

Takahashi grundsätzlich geeignet. Beim zweidimensionalen Modell TopRunDF wird die Lage der Ablagerungsfläche hauptsächlich von der Topographie des Murkegels gesteuert. Dabei kann die Wahl des Startpunktes einen bedeutenden Einfluss auf die Simulation des Ablagerungsverhaltens haben. Für die Nachrechnung von Ereignissen ist es deshalb wichtig, Geländemodelle zu verwenden, die eine Abbildung der topographischen Situation vorher zeigen. Die seitliche Ausbreitung der Simulation wird über die so genannte Monte-Carlo-Iterationszahl (MCI-Zahl), die Anzahl der zufallsbasierten Fliesspfade, gesteuert. Die MCI-Zahl beeinflusst direkt die Grösse des Ausbreitungswinkels der simulierten Ablagerung, unabhängig von der Kegeltopographie, und kann daher als ein Parameter zur Kontrolle der seitlichen Ausbreitung betrachtet werden. Die Simulationsergebnisse reagieren unterschiedlich sensibel auf die gewählte MCI-Zahl. Wird die MCI-Zahl relativ klein gewählt (z.B. MCI = 5), ist eine Abnahme der positiven Überdeckung (α) und eine Zunahme der negativen (β) bzw. keiner Überdeckung (γ) festzustellen (Tabelle 6). Ist die gewählte MCI-Zahl sehr gross (z.B. MCI = 500), wird die negative Überdeckung (β) verringert, die prozentuelle Fläche ohne Überdeckung (γ) wird jedoch grösser als die Flächen positiver Überdeckung (α). Die Kalibrierung mit 14 simulierten Schweizer Murgangereignissen ergab eine optimierte MCI-Zahl von 50. Die endgültige Abgren-

zung der Ablagerungsfläche erfolgt über eine Flächen-Volumen-Beziehung. Der Vorteil von TopRunDF liegt in der Benutzung von geomorphometrisch leicht zu erhebenden Eingangsparametern. Ein weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich der Verbesserung des Ausbreitungsmechanismus (MCI-Zahl) sowie einer detaillierteren künstlichen Geländeerhöhung.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag sind Modelle zur Abschätzung der Reichweite oder des Ablagerungsverhaltens von Murgängen beschrieben, welche vorwiegend auf empirisch-statistischen Ansätzen beruhen. Bei den eindimensionalen Ansätzen handelt es sich einerseits um die Reichweitenmodelle von Corominas (1996) und Rickenmann (1999) und andererseits um das konstante Abflussmodell zur Bestimmung der Auslauflänge nach Takahashi & Yoshida (1979). Zur Simulation von Ablagerungsflächen wird das zweidimensionale Modell TopRunDF vorgestellt. Grundlage für dieses Modell sind die Topographie des Kegels, die aufgrund der Murenfracht und morphometrischer Parameter abgeschätzte Grösse der Ablagerungsfläche sowie eine zufallsbasierte Verteilung der potenziellen Fliesspfade. Alle hier diskutierten Modelle erfordern einfach bestimm- bare geomorphometrische Eingangsgrössen. Die Modelle wurden auf Murgangereignisse in der Schweiz, in Österreich und

in Südtirol angewendet. Im Hinblick auf die für Murgänge bzw. Übermurungen empfohlenen Kriterien für die Kartierung der Gefahrenbereiche kann mit den hier vorgestellten Modellen die maximale lineare oder flächige Ausbreitung bestimmt werden. Intensitäten wie Fliessgeschwindigkeit und Ablagerungshöhe sind mit den vorgestellten Modellen nicht oder nur bedingt darstellbar. Unsere Daten bestätigen eine empirische Beziehung zwischen der Ablagerungsfläche und dem Ereignisvolumen. Der daraus abgeleitete Mobilitätskoeffizient reflektiert die unterschiedliche Mobilität und Fliesseigenschaften während der Ablagerungsphase von Murgängen. Der prognostizierte Mobilitätskoeffizient, basierend auf der Kegel- und Gerinneneigung, ist mit einer Ungenauigkeit von etwa einem Faktor 2 verbunden. Die mit TopRunDF simulierten Schweizer Ereignisse zeigen plausible Ergebnisse. Mit dem Modell TopRunDF wird eine räumliche Verteilung der Ablagerungshöhen simuliert. Diese Verteilung beruht auf den nach einem Zufallsprinzip und der Topographie bestimmten Überflutungswahrscheinlichkeiten und sollte mit detaillierten Feldstudien beobachteter Ablagerungshöhen überprüft werden.

Das Simulationsmodell TopRunDF könnte zum Beispiel zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten, d.h. zur Bestimmung von Flächen mit möglichen Murgangablagerungen auf Wildbachkegeln, verwendet werden, wobei der Mobilitätskoeffizient nach Gl. (8) mit einem Faktor 2 multipliziert werden könnte. Im Weiteren können die mit TopRunDF bestimmten potenziellen Murgangablagerungsflächen mit Resultaten von numerischen Simulationsprogrammen wie z.B. FLO-2D oder RAMMS verglichen werden. Da bezüglich der Wahl geeigneter Fliess- oder Material-Parameter bei solchen prozessorientierten, physikalisch basierten Modellen eine gewisse Unsicherheit besteht (Rickenmann et al., 2006), ergäbe ein Vergleich verschiedener Ansätze einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit bzw. Unsicherheit der Simulationsergebnisse.

6. Verdankung

Die Daten zu den Murgangereignissen in Südtirol wurden von der Abteilung 30 – Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen zur Verfügung gestellt. Mathias Hochschwarzer sei für die Aufbereitung dieser Daten und die Reichweitenanalyse gedankt. Für die Bereitstellung und Zusammenstellung von Daten zu österreichischen Wildbacherereignissen bedanken wir uns

beim Forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinerverbauung sowie bei Christian Schraml. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterstützte die Analyse der Hochwasser 2005 in der Schweiz. Das LiDAR DTM verschiedener Murkegel in der Schweiz (verwendet für die Simulationen mit TopRunDF) wurde vom Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) zur Verfügung gestellt (DTM-AV DOM-AV ©2008 swisstopo, DV033492.2). Markus Zimmermann erstellte die Kartierungen der Schweizer Murgangereignisse 1987. Marcel Hürlimann stellte seine Version des zufallsbasierten «Fließweg-Algorithmus» zur Verfügung, welcher die Grundlage des Simulationsmodells TopRunDF bildet.

Literatur

- Bardou, E.* (2002): Methodologie de diagnostic et prévision des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse no. 2479, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- BWW/BRP/BUWAL (1997): Empfehlungen: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Herausgeber: Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), EDMZ Nr. 804.201d, Bern, 32p.
- Berti, M., Simoni A.* (2007): Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. *Geomorphology* 90, 144–161.
- Bezzola, G.R., Hegg C.* (Ed.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 0707, 215 S.
- Capra, L., Macias, J.L., Scott, K.M., Abrams, M., Gardunomonroy, V.H.* (2002): Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113, 81–110.
- Carranza, E.J.M., Castro, O.T.* (2006): Predicting lahar-inundation zones: Case study in West 32 Mount Pinatubo, Philippines. *Natural Hazards* 37, 331–372.
- Corominas, J.* (1996): The angle of reach as mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33, 260–271.
- Costa, J.E.* (1988): Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. In: Baker VR, Kochel R.C., Patton P.C. (eds) *Flood geomorphology*, Wiley, New York, pp. 113–122.
- Crosta, G.B., Cucchiario, S., Frattini, P.* (2003): Validation of semi empirical relationships for the definition of debris-flow behaviour in granular materials. Proc. 3rd International Conference on Debris Flows Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Millpress, Rotterdam, 2003, pp. 821–831.
- Griswold, J.P.* (2004): Mobility statistics and hazard mapping for non volcanic debris flows and rock avalanches. Masters thesis, Portland State University, USA.
- Heim, A.* (1932): *Bergsturz und Menschenleben*. Zürich: Fretz & Wasmuth Verlag AG.
- Hochschwarzer, M.* (2009): Vergleich von Simulationsmodellen zur Reichweitenabschätzung alpiner Murgänge am Beispiel Südtiroler Ereignisse. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- Hübl J., Kienholz H., Loipersberger A.* (2002): DOMODIS – Documentation of Mountain Disasters, State of Discussion in the European Mountain Areas. International Research Society Interpraevent, Klagenfurt, Austria (<http://wasser.ktn.gv.at/interpraevent>).
- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V. & Bateman, A.* (2008): Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology* 102, 152–163.
- Hungr, O., Morgan, G., Kellerhals, R.* (1984): Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21, 663–677.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W.* (1998): Objective delineation of lahar inundation hazard zones. *GSA Bulletin* 110, 972–984.
- Marchi, L., D'Agostino, V.* (2004): Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian alps. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 207–220.
- Melton, M.A.* (1965): The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits on southern Arizona. *Journal of Geology* 73, 1–38.
- Takahashi, T., Yoshida, H.* (1979): Study on the deposition of debris flows, Part 1 – Deposition due to abrupt change of bed slope. *Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan*, 22 B-2.
- Takahashi, T.* (1991): Debris flows. IAHR Monograph Series. Rotterdam: Balkena.
- Rickenmann, D.* (1999): Empirical Relationships for Debris Flows, *Natural Hazards* 19, 47–77.
- Rickenmann, D.* (2005): Runout prediction methods. In: Jakob, M., Hungr, O. (eds.), *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*, Springer, Chichester, pp. 305–324.
- Rickenmann, D., Laigle, D., McArde, B.W., Hübl J.* (2006): Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences* 10, 241–264.
- Rickenmann, D., Koschni, A., Chiari, M., Scheidl, C., Canuto, N.* (2008): Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen und Gebirgsflüssen. In: Bezzola G.R., Hegg C. (eds), *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen*. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen Nr. 2508; 152–162.
- Scheidl, C., Rickenmann, D. & Chiari, M.* (2008): The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8, 1113–1127.
- Scheidl, C., Rickenmann, D.* (2009): Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms* (in press).
- Schraml, C.* (2007): Ablagerung von Feststoffen auf Wildbachkegeln. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- ONR-24800 (2009): ON-Komitee 256 – Schutz vor Naturgefahren. Wien.
- VAW (1992): Murgänge 1987, Dokumentation und Analyse. Bericht Nr.: 97.6 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. (unveröffentlicht).
- Waythomas, C.F., Miller, T.P., Beget, J.E.* (2000): Record of Late Holocene debris avalanches and lahars at Iliamna Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 104, 97–130.
- Yu, F., Chen, C., Chen, T., Hung, F., Lin, S.* (2006): A GIS Process for delimitating areas potentially endangered by debris flows. *Natural Hazards* 37, 169–189.
- Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker G.* (1997): Murgangefahr und Klimaänderung – ein GIS basierter Ansatz. Schlussbericht NFP31, vdf-ETH Zürich.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Dieter Rickenmann
Eidgenössische Forschungsanstalt WSL,
Gebirgshydrologie und Wildbäche,
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
Tel. +41 44 739 24 29
rickenmann@wsl.ch, www.wsl.ch

Dr. Christian Scheidl, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur
Peter Jordan-Strasse 82, A-1190 Wien
Tel: +43 1 47654 4378
christian.scheidl@boku.ac.at
<http://www.boku.ac.at/ian>