

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 110 (1992)
Heft: 13

Artikel: Lawinen-Dynamik: eine Übersicht
Autor: Hutter, Kolumban
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77883>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Lawinen-Dynamik

Eine Übersicht

Die Erfassung der zwei- bzw. dreidimensionalen Bewegung von Lawinen ist zurzeit immer noch wenig befriedigend möglich, jedoch wegen der Katastrierung von Gefahrenzonen und der Abschätzung der wirksamen Kräfte verbessert erwünscht. In den vergangenen Jahren hat uns intensive Forschung der Beantwortung dieser Fragen für die beiden Grenzfälle Fliess- und Staublavin wesentlich näher gebracht. Fliesslawinen werden im Laborexperiment als Granulatströmungen, Staublavin als turbulente Suspensionsströmungen in Wasser simuliert. Für beide Lawinentypen stehen theoretisch Modelle zur Verfügung; ihre Überprüfung am Laborexperiment steht für Fliesslawinen vor dem Abschluss, erfordert für Staublavin jedoch noch relativ intensives numerisches Studium.

Lawinen gehören zu jenen Naturphänomenen, denen die Alpenbewohner während des Winters und im Frühling

VON KOLUMBAN HUTTER,
DARMSTADT UND
ZÜRICH

wiederholt ausgesetzt sind. Forschung zur Verhinderung von Lawinen und das Studium ihrer Dynamik sind daher wichtige Aufgaben der meisten Bergnationen. In den letzten Jahren hat diese Verantwortlichkeit infolge des immer noch wachsenden Winteralpentourismus und der auf die allgemeine Luftverschmutzung zurückgehenden Schwächung des Waldes noch zugenommen. Dass diese Verpflichtung nach wie vor besteht, belegen die folgenden Zahlen: In den 48 Wintern von 1940/41 bis 1987/88 hat es in der Schweiz 7191 Lawineneignisse mit Zerstörungen gegeben, mit 960 Verletzten und 1269 Toten sowie Aufwendungen von Versicherungen für entstandenen elementaren Sachschaden zwischen 300 und 400 Mio. Franken.

Die Jahresmittelwerte über die 48 Jahre betragen 20 Verletzte und 26 Tote sowie eine Rückerstattung der Versicherungen für Elementarschäden in der Höhe von sechs bis acht Mio. Franken. Interessant an dieser Statistik ist die Tatsache, dass die Zahl der Toten jene der Verletzten stets übersteigt, was eine statistische Theorie mit ungewöhnlicher Verteilfunktion verlangen würde. Des weiteren haben in den letzten 50 Jahren die Schadenfälle, Verletzten oder Toten nicht wesentlich abgenommen trotz der jährlich durch Gemeinden, Kantone und den Bund aufgewendeten rund 50 Mio. Franken für Lawinenverbauungen.

Historisches

Es gibt eine grosse Zahl von historischen Berichten und Dokumenten über Lawineneignisse. Wahrscheinlich der älteste davon geht auf den griechischen Geographen Strabon (63–23 BC) zurück; ein anderes frühes Dokument stammt vom römischen Geschichtsschreiber Titus Livius (59 BC–14 AD) in seiner Schilderung der Hannibalschen Alpenüberquerung im Jahre 218 BC. Das Wort Lavina ist jedoch wahrscheinlich erstmals in der Enzyklopädie des im 6. Jahrhundert in Spanien lebenden Bischofs Isidor von Sevilla (570–636 AD) erschienen. Es lässt sich auf das lateinische Labes zurückführen, was Stolpern oder Fallen bedeutet.

Interessant sind auch die frühen Kunstwerke oder auch profanen Darstellungen von Lawinenniedergängen, da sie uns darüber Auskunft geben, wie die Menschen im Mittelalter sich den Niedergang einer Lawine vorstellten. Das älteste dem Verfasser dieses Beitrages bekannte Dokument datiert auf das Jahr 1517 zurück und erschien im «Theuerdank», dem Liebes- und Abenteuer-Epos des Kaisers Maximilian, mit dem in Bild 1 wiedergegebenen Holzschnitt.

Die Annahme, dass Lawinen übergrosse Schneebälle seien, hat sich bis ins 18. und 19. Jahrhundert fortgesetzt. Die Hartnäckigkeit dieses Glaubens ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass im Mittelalter und der frühen Neuzeit die Berggegenden von Intellektuellen weder bewohnt noch besucht wurden – mit einer Ausnahme, dem Schweizer Gelehrten Johann Jakob Scheuchzer (1652–1733). Ernsthafte wissenschaftliche Forschung ist nicht betrieben worden, bevor der Wintersport popularisiert wurde, und das ist weit in die-

sem Jahrhundert, als in der Schweiz im Jahre 1936 das Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung im Weissfluhjoch, Davos, gegründet wurde, das heute zu den führenden Zentren der grundlagenbezogenen und angewandten Schneeforschung gehört.

Phänomenologisches

Schnee- und Eislawinen, aber auch Bergstürze, Sturzströme und pyroklastische und andere Ströme mit granularer Struktur wie etwa subaquatische Turbiditätsströme können etwas vereinfachend in zwei Klassen aufgeteilt werden. Es sind dies erstens die sogenannten Fliesslawinen, von denen Bild 2 zwei Deponien sowie zwei künstlich ausgelöste Lawinen unmittelbar nach dem Abbruch und in voller Bewegung zeigt. Fliesslawinen können auch aus Eis, das von Gletschern abbricht, entstehen. Die abbrechenden Eisschollen werden dabei beim Aufprall am Boden in kleine Eiskörner fraktioniert (Bild 3a und b), so dass die sich entwickelnden Lawinen grosse Ähnlichkeiten mit Schneelawinen aufweisen.

Schneedeponien von Fliesslawinen sind in Bild 3c und d festgehalten; im Bild 3c erkennt man eine Anhäufung von Eiskörnern, wie sie für Eislawinen und Schneelawinen, welche sich aus einer relativ trockenen Schneedecke mit vergleichsweise schwachen intergranularen Bindungskräften entwickeln, typisch ist. Lawinendeponien von feuchtem Schnee haben eher die in Bild 3d dargestellte Erscheinungsform; es entwickeln sich hier etwa faustgrosse, harte, ziemlich eisige Schneebälle. In beiden Fällen wird eine granulare



Bild 1. Holzschnitt aus «Theuerdank» (1517), dem Abenteuer-epos Kaiser Maximilians



Bild 2.

a, b. Deponien von Runsenlawinen aus relativ nassem Schnee
 c. Beginn der Bewegung einer Lawine unmittelbar nach dem Abbruch. Die Abbruchstelle ist sehr deutlich zu erkennen
 d. Fließlawine «Marianne» mit wenig Staublawinenanteil in voller Fahrt

(Photos: a, b, d Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung)

Struktur des Schneekörpers nahegelegt, welche man auch während der Bewegung als existent vermutet und auffallende Ähnlichkeit mit der Bewegung von Sand und Gestein entlang einer geneigten Fläche aufweist.

Lawinen, die sich aus vergleichsweise trockenem, nicht konsolidiertem, nicht metamorphiertem Neuschnee bilden können, bleiben gelegentlich nicht sehr lange als Fließlawinen erhalten. Entweder wegen sich bildender Scher (Kelvin-Helmholtz)-Instabilitäten oder wegen Geländeunebenheiten (Buckel) können sie sich plötzlich in eine Staublawine entwickeln (Bild 4, welches eine Staubschnee- (a) und eine Staubeislawine (b) zeigt).

Diese Lawinen sind als physikalisches Phänomen den Schwerkrafts- und Tur-

biditätsströmen oder den Dispersionsströmungen eines schweren Gases verwandt und werden oft auch theoretisch als solche behandelt. Solche Lawinen sind phänomenologisch jedoch Zweiphasenströmungen, vielleicht in Form einer turbulenten Grenzschichtapproximation, in welcher die Eintragung von Luft in die Lawine von oben und das Entrainment und die Sedimentation von Schnee am Boden wichtige dynamische Mechanismen bilden. Dieser Luft- und Schnee-Eintrag in die Lawine bringt mit sich, dass letztere im Laufe der Zeit an Masse zunimmt, was die Lawine beträchtlich beschleunigt und via die verstärkte Turbulenz zu weiterem Schnee-Eintrag führt, sofern die Schneedecke dies ermöglicht. Bei uneingeschränkter Verfügbarkeit von Schnee sorgt die Dissipation der turbu-

lenten Bewegung sowie das durch das Einbringen des Schnees erhöhte Gravitationspotential (der Schnee wird dadurch ja gehoben) für eine Begrenzung dieses positiven Feedbacks. Staublawinen treten weit seltener auf als Fließlawinen; sie sind im allgemeinen jedoch gigantische Ereignisse mit zerstörerischen Auswirkungen, die man natürlich bei künstlichen Auslösungen von Lawinen vermeiden möchte, aber nicht immer kann.

Typische charakteristische Geschwindigkeiten und Fließhöhen von Staublawinen sind bedeutend grösser als für Fließlawinen, Schneedichten sind jedoch um einen Faktor 50 bis 100 geringer (Tabelle 1). Fließlawinen werden durch die Topographie der Lawinen-

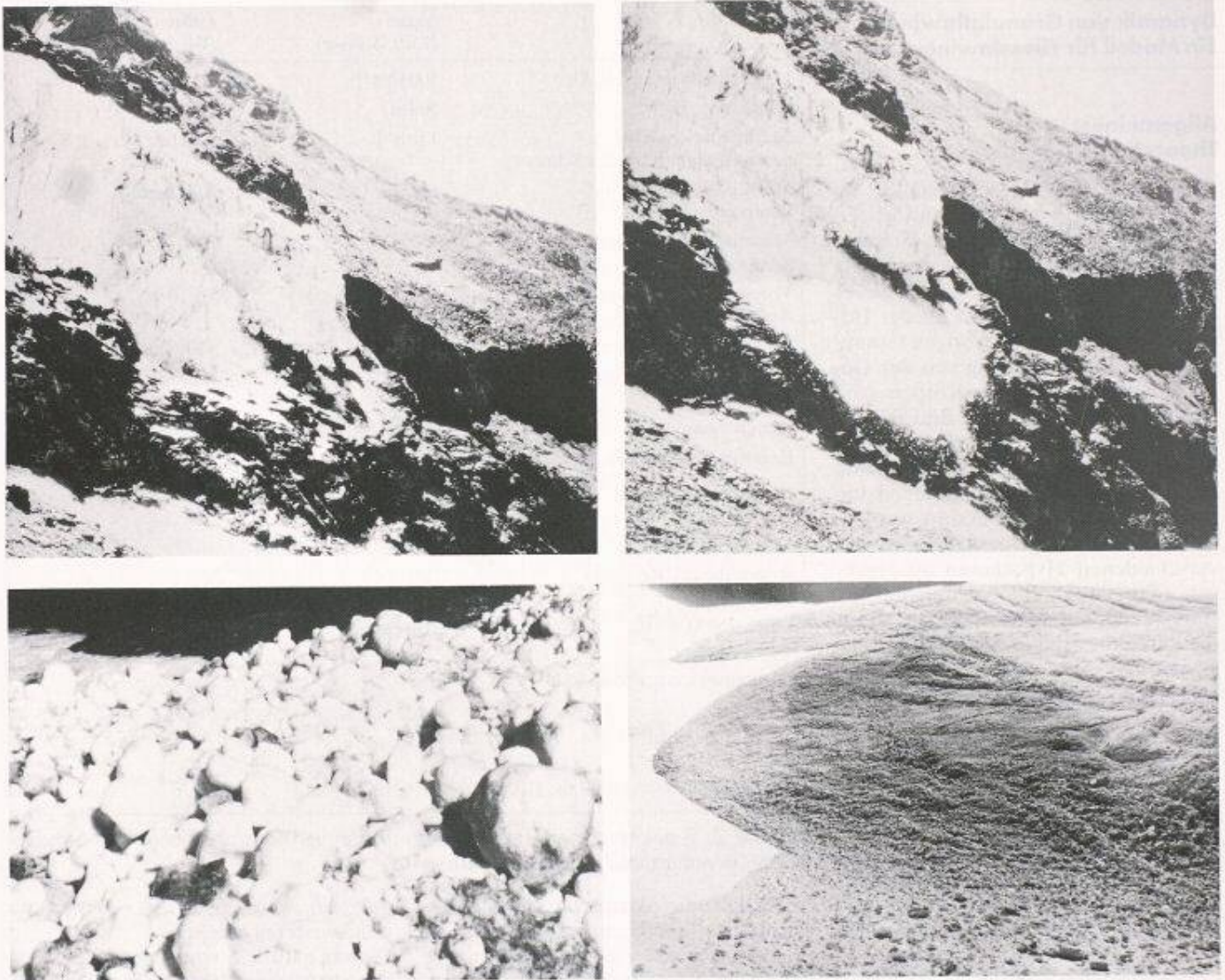


Bild 3.
 a, b. Abbruch einer Eismasse vom Festgletscher, Schweiz, die beim Aufprall fraktioniert wird
 c. Deponie einer nassen und d. einer trockenen Schneelawine
 (Photos: a, b, J. Alean, c, d, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung)

bahn und damit auch durch die Bodenreibung stark beeinflusst, ganz im Gegensatz zu Staublawinen, bei denen die Bodenreibung nur in der Auslaufzone eine wesentliche Rolle spielt.

Mit Mitteln der Dimensionsanalyse und Modelltheorie kann man zeigen, dass die Ähnlichkeitsgesetze der Modellbildung Invarianz zweier typischer dimensionsloser Parameter, nämlich der dichtemessenden Froudezahl und des Verhältnisses einer typischen Längs- und Sedimentationsgeschwindigkeit der Schneepartikel, verlangen, wenn die Bewegung einer Naturlawine im Modell einschliesslich des praktisch wichtigen Prozesses der Schneesedimentation in der Auslaufzone dynamisch richtig wiedergegeben werden soll.

Skaleneffekte treten dabei auf durch die Nichterfüllung aller anderen dimensionslosen Parameter. In Staublawinen

sind ihre Einflüsse von der Turbulenz überdeckt. Die Abhängigkeit von der Reynoldszahl ist bei voller Turbulenz unbedeutend, und Kompressibilitätsinflüsse, die sich in allfälligen Überschallstössen in Naturlawinen auswirken können und bei einer Machzahl $M = 1$ auftreten, sind wegen der ausserordentlich grossen Dämpfung des Schalls

in Suspensionen unerheblich; also braucht auch keine Machzahl-Ähnlichkeit erfüllt zu werden. In Bergstürzen, also typischen, den Fließlawinen verwandten Granulatlawinen, werden Skaleneffekte erst für Massen im Bereich $10^6 - 10^{11} \text{ m}^3$ wirksam, können jedoch durch keine zurzeit bekannte Theorie erklärt werden.

	<i>Fließlawine</i>	<i>Staublawine</i>
<i>Typische Geschwindigkeit</i>	30–60 [ms ⁻¹]	50–100 [ms ⁻¹]
<i>Fliesshöhe</i>	< 2–5 [m]	50–100 [m]
<i>Dichte</i>	100–300 [kgm ⁻³]	5 [kgm ⁻³]
<i>Effekt der Topographie</i>	Lawine oft in Runsen und Tälern kanalisiert	von Topographie weitgehend unbeeinflusst, Lawine folgt dem steilsten Gefälle
<i>Bodenreibung</i>	beeinflusst die Bewegung entscheidend	ist unwichtig mit Ausnahme der Auslaufzone

Tabelle 1. Charakteristisches Verhalten von Fließ- und Staublawinen

Dynamik von Granulatlawinen/ Ein Modell für Fließlawinen

Allgemeines: Theoretische Grundlagen

Messungen des Pauschalgefälles an prähistorischen und gegenwärtigen Bergstürzen, Sturzströmen, Schnee- und Eislawinen auf der Erde, dem Mars und dem Mond legen nahe, dass dieses Pauschalgefälle kleiner ist als der Böschungswinkel des zugehörigen Granulats und zudem abhängig von der Gesamtmasse des bewegten Körpers (wie wir bereits erwähnt haben, Bild 5). Legt man dem granularen Material ein kohäsionsfreies plastisches Fließgesetz vom Mohr-Coulomb-Typ zugrunde, so kann dieses Verhalten nicht erklärt werden. Frühere Erklärungsversuche sind von verschiedenen Hypothesen ausgegangen (Tabelle 3); Beobachtungen von Bergstürzen auf dem Mond und Mars, die durch die Apollo- und Viking-Missionen der Nasa ermöglicht worden sind, haben viele dieser Möglichkeiten jedoch ausgeschlossen.

Die Mond- und die Marsatmosphären sind zu dünn, als dass sich ein Luftkisseneffekt oder ein Wasserdampfdruck mit dem nötigen Ausmass überhaupt bilden könnte. Seismische Aktivität ist zeitlich selten mit Lawinen- oder Bergsturzereignissen korreliert. Zu den Hypothesen, welche die ungewöhnlich grossen Auslaufdistanzen der bewegten Granulatmassen erklären könnten, zählen das unter der Reibungswärme sich bildende Schmelzen des bewegten

	Natur (Luft, Schnee)	Labor (Wasser, Plastik)
Längsgeschwindigkeit, U	100 [ms ⁻¹]	0.1 [ms ⁻¹]
Fließhöhe, H	50 [m]	0.1 [m]
Sedimentations-(Fall-)geschwindigkeit, W des Schnees	1 [ms ⁻¹]	10 ³ [ms ⁻¹]
Massendichte der Fluidkomponente, $\hat{\rho}_1$	1 [kgm ⁻³]	103 [kgm ⁻³]
Massendichte der Fluidkomponente, $\hat{\rho}_2$	917 [kgm ⁻³]	1250 [kgm ⁻³]
Volumetrische Konzentration der Partikelphase, $c_{(2)}$	5 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻³
Schallgeschwindigkeit, c	~300 [ms ⁻¹]	~100 [ms ⁻¹]
Kinematische Viskosität der Fluidphase, ν	1.7x10 ⁻⁵ [m ² s ⁻¹]	10 [m ² s ⁻¹]
Hangneigungen, α	25 - 50 [°]	0 - 90 [°]
Relative Dichtedifferenz $\frac{\Delta\rho}{\rho} = c_{(2)} \frac{(\hat{\rho}_2 - \hat{\rho}_1)}{\hat{\rho}_1}$	~4	~2x10 ³
Reynoldszahl, $Re = \frac{UH}{\nu}$	10 ⁶	10 ⁴
Machzahl $M = \frac{U}{C}$	~0.3 [ms ⁻¹]	~10 ⁻³ [ms ⁻¹]
Dichtemessende Froudezahl $Fr = \frac{U^2}{gH \frac{\Delta\rho}{\rho}}$	~5	~5
Geschwindigkeitsverhältnis, U/W	10 ²	10 ²

Tabelle 2. Typische dimensionsbehaftete und dimensionslose Zahlen für Staublawinen in natura und im Laborexperiment

Materials, die akustische und die mechanische Fluidisierung durch Partikelkollisionen, wobei die letzte Hypothese heute die akzeptierteste ist. Bei Schneelawinen sollte der Schmelzmechanismus jedoch nicht vollständig ausser acht

gelassen werden. Er ist energetisch ohne weiteres möglich.

Es war natürlich von besonderem wissenschaftlichem Interesse, zu sehen, welche Resultate man erhält, wenn man die Bewegung eines Bergsturzes oder



Bild 4.

a. Staublawine, welche sich aus Schnee gebildet hat, und
b. Staublawine, welche sich aus abbrechendem Gletschereis gebildet hat

(Photo: a, aus Flaig «Lawinen», Brockhaus, Leipzig, 1935)

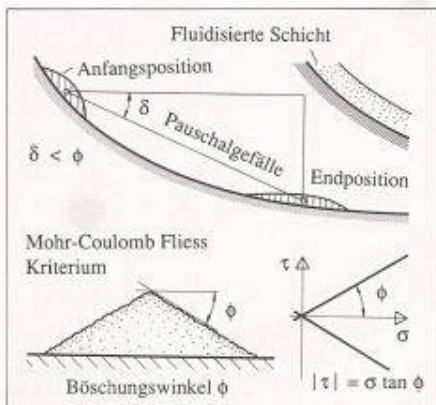


Bild 5. Zur Definition des Pauschalgefälles (oben), des Böschungswinkels, Φ (unten links) und der Coulombschen Fließbedingung eines kohäsionslosen Materials (unten rechts). σ bezeichnet den Normaldruck, τ die Schubspannung

einer Fließlawine auf der Grundlage eines granularen Fluids zu erfassen versucht. Prof. Savage von der McGill University und der Verfasser, in Zusammenarbeit mit seinen Studenten, haben den Versuch unternommen, ein einfaches Modell dieser geophysikalischen Strömungen zu konstruieren, indem sie die zwei- und dreidimensionalen Bewegungen von endlichen Massen eines granularen Materials entlang ebener und gekrümmter schiefer Flächen untersuchten [1-4]. Das Material (Bild 6a) wird als ein inkompressibles kohäsionsloses Kontinuum aufgefasst, das einem Mohr-Coulombschen Fließkriterium genügt. Die Geometrien des bewegten Materials werden als lang und dünn vorausgesetzt und die Geschwindigkeitsprofile in der Hauptströmungsrichtung als nahezu uniform angenommen; zudem wird davon ausgegangen,

- Fluidisierung durch von der Basis her eingebrachte Luft. (Die im Schnee eingelagerte Luft ist zu gering.)
- Luftkisseneffekt:
- Apollo 14, 17 Landungen auf dem Mond haben grosse Laufdistanzen von Bergstürzen auf dem Mond nachgewiesen. Eine Atmosphäre fehlt jedoch.
- Viking-Mission zum Mars hat Marslawinen mit grossen Laufdistanzen nachgewiesen; die Atmosphäre ist jedoch zu dünn.
- Fluidisierung durch Wasserdampfdruck infolge Reibungswärme. Die Apollo- und Viking-Missionen widerlegen auch diese Hypothese, weil zu wenig H₂O in den Atmosphären vorhanden ist.
- Hohe seismische Aktivität: Diese kann zwar Lawineneignisse auslösen, was aber nicht die Regel ist.

- Schmelzen des bewegten Materials: Die dünne Schicht geschmolzenen Materials (Schnee, Eis, Gestein) wirkt als Schmiermittel und verringert die Bodenreibung. Energetisch und thermodynamisch ist dies für Schnee und Eis leicht möglich, für Bergstürze, sofern die Gesteinsmassen gross genug sind.
- Akustische Fluidisierung: Wegen der Fluktuationen der Partikel ist die mittlere Reibungsenergie $\langle \tau u \rangle$ am Boden aus Schubspannung τ und Gleitgeschwindigkeit u geringer als die Leistung der gemittelten Schubspannung $\langle \tau \rangle$ an der gemittelten Geschwindigkeit $\langle u \rangle$: $\langle \tau u \rangle \leq \langle \tau \rangle \langle u \rangle$.
- Mechanische Fluidisierung erzeugt durch Partikelkollisionen:
 - Die Partikelstösse erzeugen dispersive innere Spannungen (Druck, der durch die Fluktuationsenergie gegeben ist \rightarrow kinetische Gastheorie).
 - Durch die Fluktuationen wird das Granulat u.U. invers fraktioniert. Der erhöhte Feinanteil des Granulats am Boden sorgt für bessere Schmierung.

Tabelle 3. Physikalisch unrealistische (links) und realistische (rechts) Hypothesen, mit denen man die grossen Laufdistanzen von Fließlawinen und Bergstürzen zu erklären versuchte

dass die Krümmung des Bodens moderat sei und die Bodenreibung einem weiteren Mohr-Coulombschen Reibungsgesetz gehorcht mit einem gegenüber der inneren Reibung kleineren Reibungswinkel.

Durch Integration der lokalen Massen- und Impulsbilanzgleichungen über die Lawinendicke erhält man die dickengemittelten Gleichungen für die Lawinenhöhe und die dickengemittelte Geschwindigkeitskomponente tangential zum Bett als Funktionen von Ort und Zeit. Für ebene, eindimensionale Bewegung entlang eines gekrümmten Bet-

tes sind die Gleichungen in Bild 6b festgehalten [2]. In der Impulsleichung (dem Newtonschen Gesetz) sind die einzelnen Terme auf der rechten Seite folgenden Ursachen zuzuweisen: Das erste Glied stellt die antreibende Schwerkraftskomponente in Strömungsrichtung dar; der zweite Term ist die Bodenreibung, welche wegen des Mohrschen Gleitreibungsgesetzes dem Bodendruck (Überlagerungsdruck plus Zentrifugalkraft) proportional gesetzt ist. Das letzte Glied stellt die Variation des integrierten Längsdruckes dar. κ ist die Krümmung und $\kappa_{akt/pass}$ der aktive und passive Erddruckkoeffizient, der den

Masse von granularem Material

Massenbilanz: $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u})}{\partial x} = 0$ $\bar{u} = \int_0^h u \, dy$

Impulssatz: $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}^2)}{\partial x} = \sin \zeta$ (Komponente der Schwerkraft in Richtung der Bahn)

- $\tan \delta \operatorname{sgn}(\bar{u}) (\cos \zeta + \lambda \kappa \bar{u}^2)$ (Basale Reibung)

- $\epsilon \kappa_{akt/pass} \cos \zeta \frac{\partial h}{\partial x}$ (Dispersion)

$\kappa_{akt/pass} = 2 \frac{1 \pm \sqrt{1 - (1 + \tan^2 \delta) \cos^2 \phi}}{\cos^2 \phi} - 1, \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \leq 0$

- Inkompressibilität
- Kohäsionsloses, plastisches Fließverhalten nach Mohr-Coulomb mit konstantem Winkel der inneren Reibung, ϕ
- Trockenes Betreibungsgesetz nach Mohr-Coulomb mit Betreibungswinkel δ
- Kleines Aspektverhältnis, kleine Krümmungen

$\frac{H}{L} = \epsilon \ll 1,$
 $\frac{L}{R} = \lambda = O(\epsilon^{1/2})$

- Praktisch uniformes Profil der Längsgeschwindigkeit

Bild 6. a. Vereinfachende Annahmen für das Modell eines granularen Fluids (Savage-Hutter) b. Entdimensionierte Bewegungsgleichungen für das ebene Fließen einer granularen Masse (gemäss Savage-Hutter)

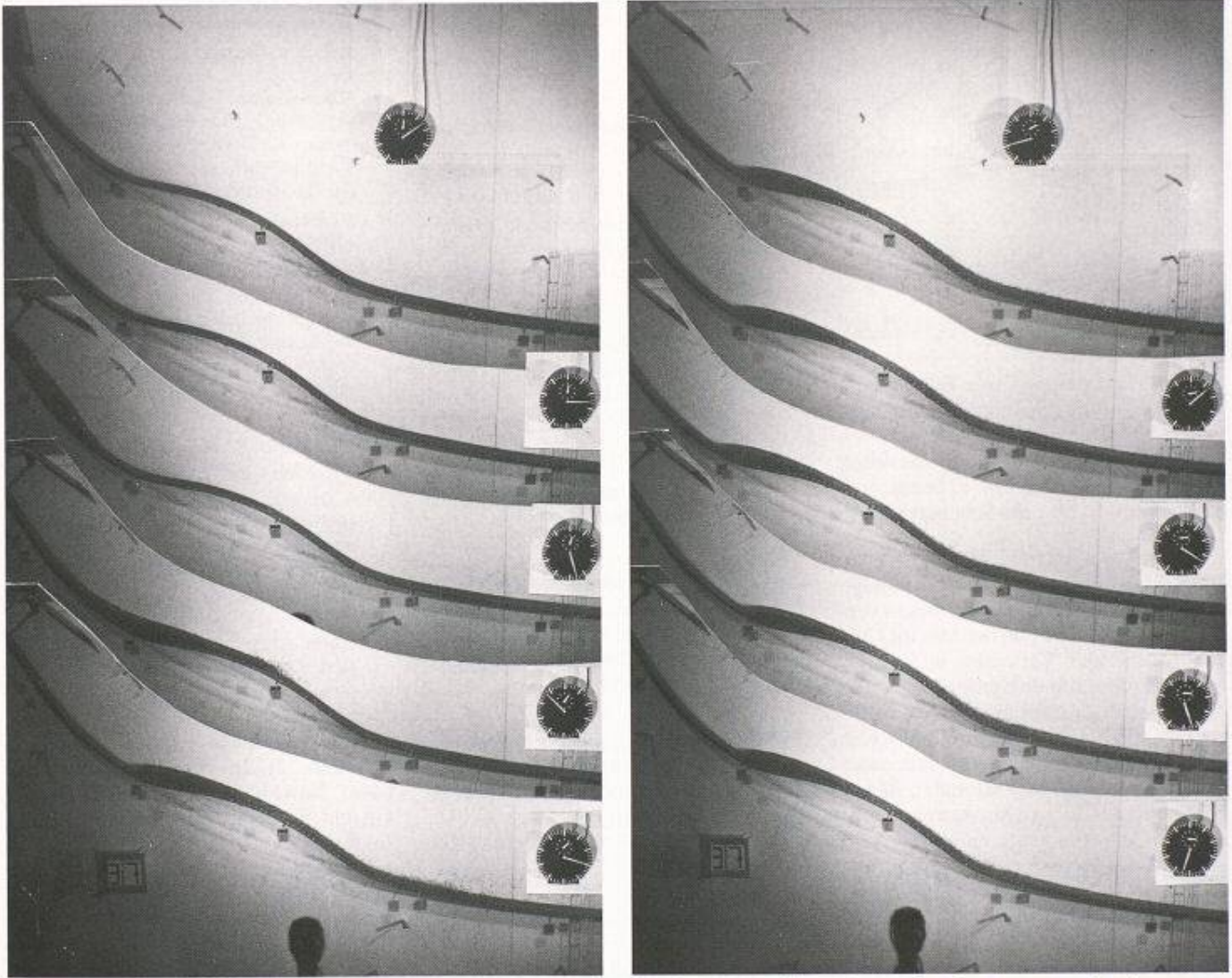


Bild 7. Serie von Schnappschüssen einer Granulatlawine vom Start bis zum Stillstand in einer Schussrinne mit konkav sowie konvex gekrümmten Segmenten des Bodens mit zugehöriger Zeitangabe (1 s = 1 Umdrehung des Zeigers)

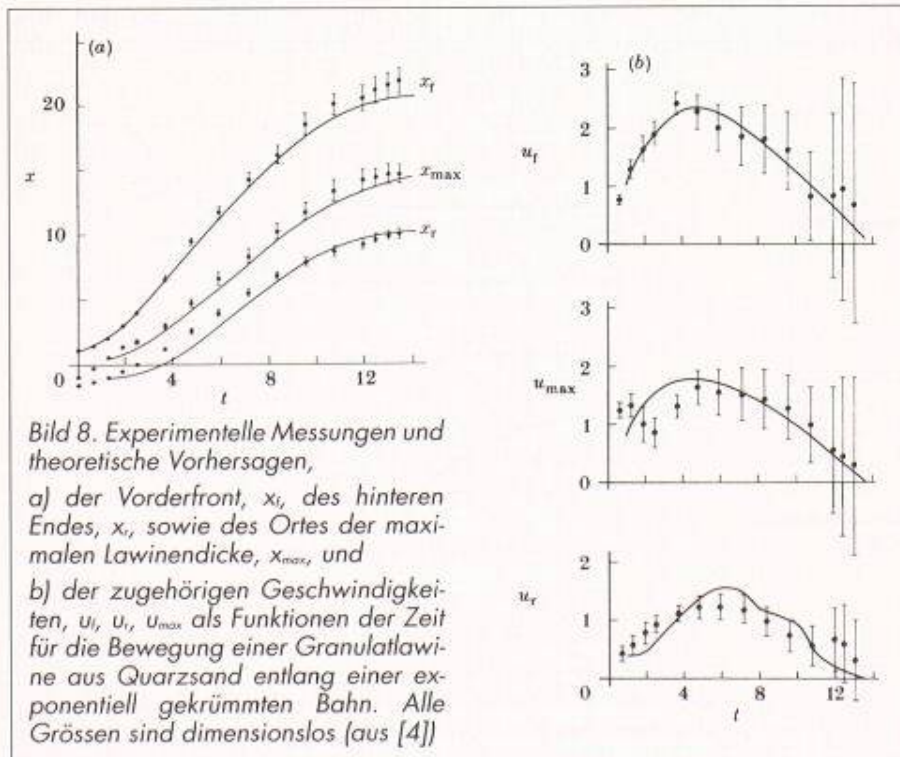


Bild 8. Experimentelle Messungen und theoretische Vorhersagen, a) der Vorderfront, x_i , des hinteren Endes, x , sowie des Ortes der maximalen Lawinendicke, x_{max} , und b) der zugehörigen Geschwindigkeiten, u_t , u_r , u_{max} als Funktionen der Zeit für die Bewegung einer Granulatlawine aus Quarzsand entlang einer exponentiell gekrümmten Bahn. Alle Größen sind dimensionslos [aus [4]]

Normaldruck in Längsrichtung mit dem Überlagerungsdruck verknüpft, wobei die aktiven bzw. passiven Anteile zum Tragen kommen, wenn die Lawine sich in Längsrichtung entweder verlängert bzw. verkürzt. Diese Gleichungen sind skaleninvariant und können keine Skaleneffekte – und daher insbesondere keine Abhängigkeit der Auslaufdistancen von der Gesamtmasse der Lawine – beschreiben.

Es war recht schwierig, eine genaue, verlässliche numerische Integrationsmethode für diese Gleichungen zu finden. Die Methode besteht in einer sich mit der Lawine mitbewegten finiten Differenzapproximation, wobei zur numerischen Stabilisierung zusätzliche Diffusion eingebaut werden muss [1, 2, 4].

Laborexperimente und Vergleich

Laborversuche sind mit Schussrinnen unterschiedlichster Form durchgeführt worden: Geradlinige Kanäle, evtl. mit einem eingebauten Krümmer, oder exponentiell gekrümmte Schussrinnen [4]

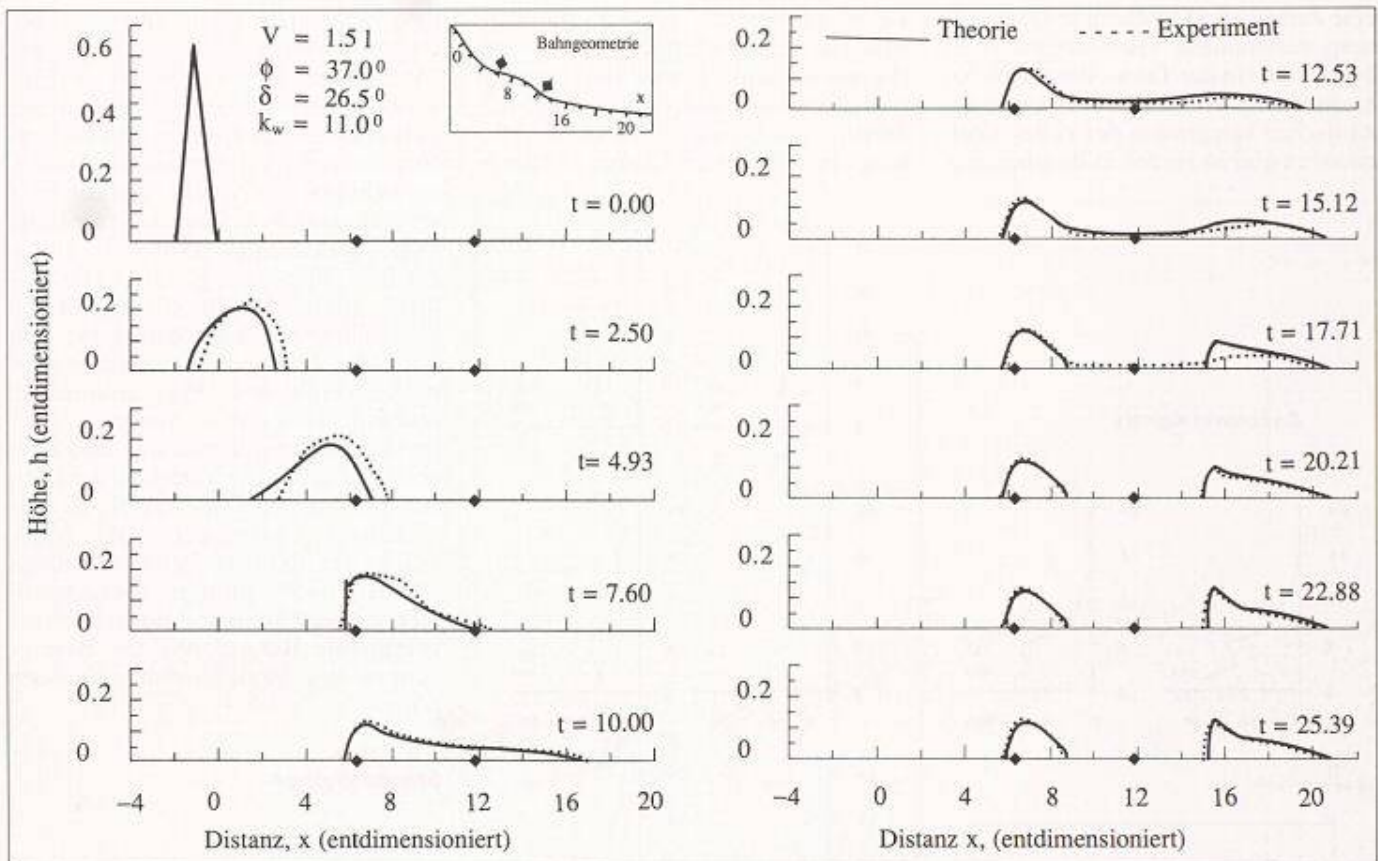


Bild 9: «Schnappschüsse» der Höhenverteilung einer Granulatlawine von 1,5 l Quarzsand vom Bewegungsbeginn ($t=0$) bis zum Stillstand ($t=25,39$) für die Bewegung entlang einer konkav-konvex gekrümmten Bahn. Die Symbole \diamond markieren den Übergang von konkaver zu konvexer Krümmung und umgekehrt; theoretische Resultate sind ausgezogen, experimentelle Resultate punktiert

oder Schussrinnen mit einem Buckel, um die Aufteilung einer einzigen endlichen Masse von granularem Material während der Bewegung in zwei getrennte Massen zu erwirken; verschiedene Materialien sind verwendet worden. Glaskügelchen von 3 bzw. 5 mm mittlerem Durchmesser, Quarz- und Marmorsand von 3 bzw. 5 mm mittlerem Durchmesser, und die Schussrinne ist mit unterschiedlichen Bodenmaterialien beschichtet worden, um den Bettreibungswinkel entsprechend zu variieren. Geschwindigkeitsphotographie ist eingesetzt worden, um der Bewegung der sich verformenden Granulatmasse mit ihrem vorderen und hinteren Ende wie auch dem Orte der grössten Lawinendicke in Abhängigkeit der Zeit folgen zu können (Bild 7). Aus aufeinander folgenden Photographien konnte ebenfalls auf die Geschwindigkeit geschlossen werden. Schliesslich wurden unabhängig davon auch der Bettreibungswinkel und der Winkel der inneren Reibung gemessen. Diese Information sowie die anfängliche geometrische Form des granularen Materials sind dann verwendet worden, um die sich entwickelnde Lawine entlang ihrer Bahn zu berechnen.

Für die Schussrinne mit Knick sind nur das vordere und hintere Ende zeitlich

verfolgt worden. Dabei zeigten die Rechnungen, dass diese Grössen relativ empfindlich auf die unterschiedlichen Werte des Bettreibungswinkels reagieren, aber unempfindlich sind gegenüber kleineren Variationen des inneren Reibungswinkels. Die Reproduzierbarkeit der experimentellen Befunde ist gut. Für das exponentiell gekrümmte Bett ist die Übereinstimmung von Versuch und Rechnung noch besser. Bild 8a zeigt für einen solchen Fall das hintere und vordere Ende der Lawine sowie den Ort der maximalen Lawinendicke und Bild 8b die entsprechenden Geschwindigkeiten als Funktionen der Zeit. Die berechneten Kurven geben die zeitlichen Verläufe der aus den Messungen bestimmten Positionen und Geschwindigkeiten befriedigend genau wieder. Ähnliche Resultate sind ebenfalls für viele Konfigurationen, bei welchen die Granulatmasse, die Art des granularen Materials und die Bettbeschaffenheit variiert wurden, erhalten worden.

Lawinenpraktiker haben behauptet, dass dieses Modell möglicherweise schlechte Übereinstimmung zwischen rechnerischen und experimentellen Resultaten liefern könnte, wenn die bewegten granularen Massen sich während der Bewegung in zwei getrennte Massen aufspalten. Aus diesem

Grunde sind die Versuche und Rechnungen für eine Schussrinne mit Buckel durchgeführt worden. Diesbezügliche Resultate werden in Bild 9 zusammengefasst. Sie belegen und unterstützen die Verlässlichkeit des theoretischen Modells wenigstens soweit es Strömungen in Schussrinnen betrifft. Nicht nur die Positionen des vorderen und hinteren Lawinenendes werden richtig vorausgesagt, sondern die Entwicklung der gesamten Lawinengeometrie vom Start bis in die Auslaufzone und die Deponie.

Weitere Zielsetzungen

Zurzeit werden seitlich uneingeschränkte Strömungen von granularen Massen untersucht, sowohl theoretisch-rechnerisch als auch experimentell. Die theoretischen Entwicklungen sind dabei recht routinemässig: Die Annahme der flachen Geometrie wird in die Massen- und Impulsbilanzen eingearbeitet, und die resultierenden Gleichungen werden über die Lawinendicke integriert. Dabei ist ein der Bett-Topographie angepasstes krummliniges Koordinatensystem zu verwenden. Die Gleichungen sind dann räumlich zweidimensional und recht schwierig zu integrieren. Für eine in Richtung des steilsten Gefälles der Lawinenbahn dominante Bewegung kann gegebenenfalls

eine zusätzliche Mittelung in Querrichtung vereinfachte Gleichungen ergeben; dies ist in der Tat so, der zweifellos nächste Schritt besteht jedoch in der numerischen Integration der vollen Gleichungen und ist zurzeit in Bearbeitung.

Laborexperimente sind für granulare Materialien durchgeführt worden, welche aus der Ruhe heraus aus einer Kugelkalotte losgelassen werden und sich entlang einer geneigten Ebene oder entlang einer geneigten Ebene, welche in

eine horizontale Ebene übergeht, bewegen. Schnellbildsterophotographie wird benutzt in der Absicht, die Entwicklung der Gesamtgeometrie mit der Zeit verfolgen zu können. Um die Synchronisation zweier Schnellbildkameras zu vermeiden, ist ein Objektiv konstruiert worden, welches die Aufnahme zweier gleichzeitiger Bilder auf einem einzigen Filmnegativ gestattet. Das Problem, aus diesen Photographien die Höhenlinienentwicklung der Lawine im Laufe der Zeit zu konstruieren, ist jetzt noch ein Problem der Photogrammetrie und prinzipiell lösbar. Andererseits deuten Rechnungen darauf hin, dass eine zusätzliche seitliche Mittelung der Gleichungen auf Resultate für die zu entwickelnde Lawinengeometrie führt, welche nur für ebene, geneigte Bahnen mit den Beobachtungen übereinstimmende Resultate liefert, nicht aber für gekrümmte Bahnen. Weitere Bestätigungen des Modells sind also noch nötig.

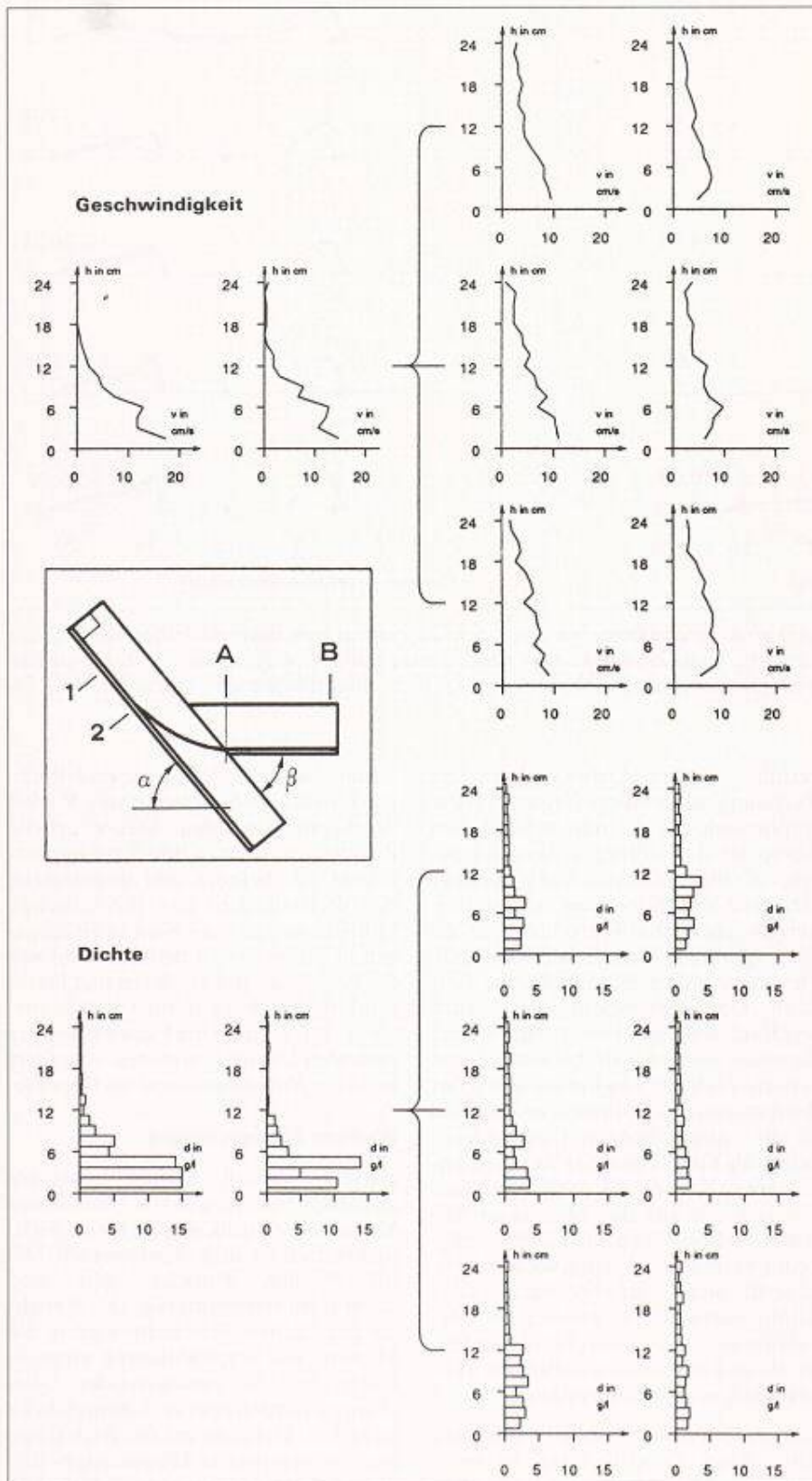


Bild 10. Geschwindigkeits- (oben) und Dichteprofile (unten) im Lawinenkörper einer Suspensionsströmung von Plastikpartikeln in einer in ruhendes Wasser eingetauchten Schussrinne. Links sind die Profile der Querschnitte 1 und 2, rechts jene von A und B dargestellt. α bezeichnet den Neigungswinkel (hier 35°), β den Knickwinkel (hier 3 Fälle, von oben nach unten, 30° , 45° , 55°), (aus [6])

Staublawinen

Konzeptionelles

Es gibt im wesentlichen zwei Konzepte, nach welchen Staublawinen behandelt werden [3]. Nach dem ersten benutzt man ein einfaches Mischungskonzept, in welchem zwei Massenbilanzen für den Schnee und die Luft sowie eine Impulsbilanz für die Mischung als Ganzes verwendet werden (Tabelle 4a). Oft wird dies auch als Einkomponentenkonzept bezeichnet, mit welchem turbulente Dichte-, Schwerkraft-, Turbiditäts- und Schwergasströmungen behandelt werden. Es werden turbulente Grenzschichtströmungen aus stationären Quellen entlang geneigter Ebenen studiert. In Experimenten werden Salzlösungen, seltener Partikelsuspensionen verwendet, und Photographie ist praktisch das einzige Mittel, mit dem die Beobachtungen quantifiziert werden. Lange sowie kurze Lawinen, sogenannte «Thermals» oder Wolken, werden ebenfalls studiert. Die theoretischen Konzepte gründen auf der Anwendung der integrierten Bilanzaussagen der Masse und des Impulses (für lange Schwerkraftströmungen in Form der Grenzschichtapproximation), die Studien sind jedoch beschränkt auf das Regime der Autosuspension, und Schnee-Entrainment sowie Sedimentation werden vernachlässigt.

Damit sind unter den einschränkenden Bedingungen Aussagen für stationäre bzw. asymptotische ($t \rightarrow \infty$) Zustände explizit beschreibbar, aber die praktisch wichtige Auslaufzone ist auf diese Weise nicht behandelbar und konzeptionell sogar ausgeschlossen, wenn Salz-

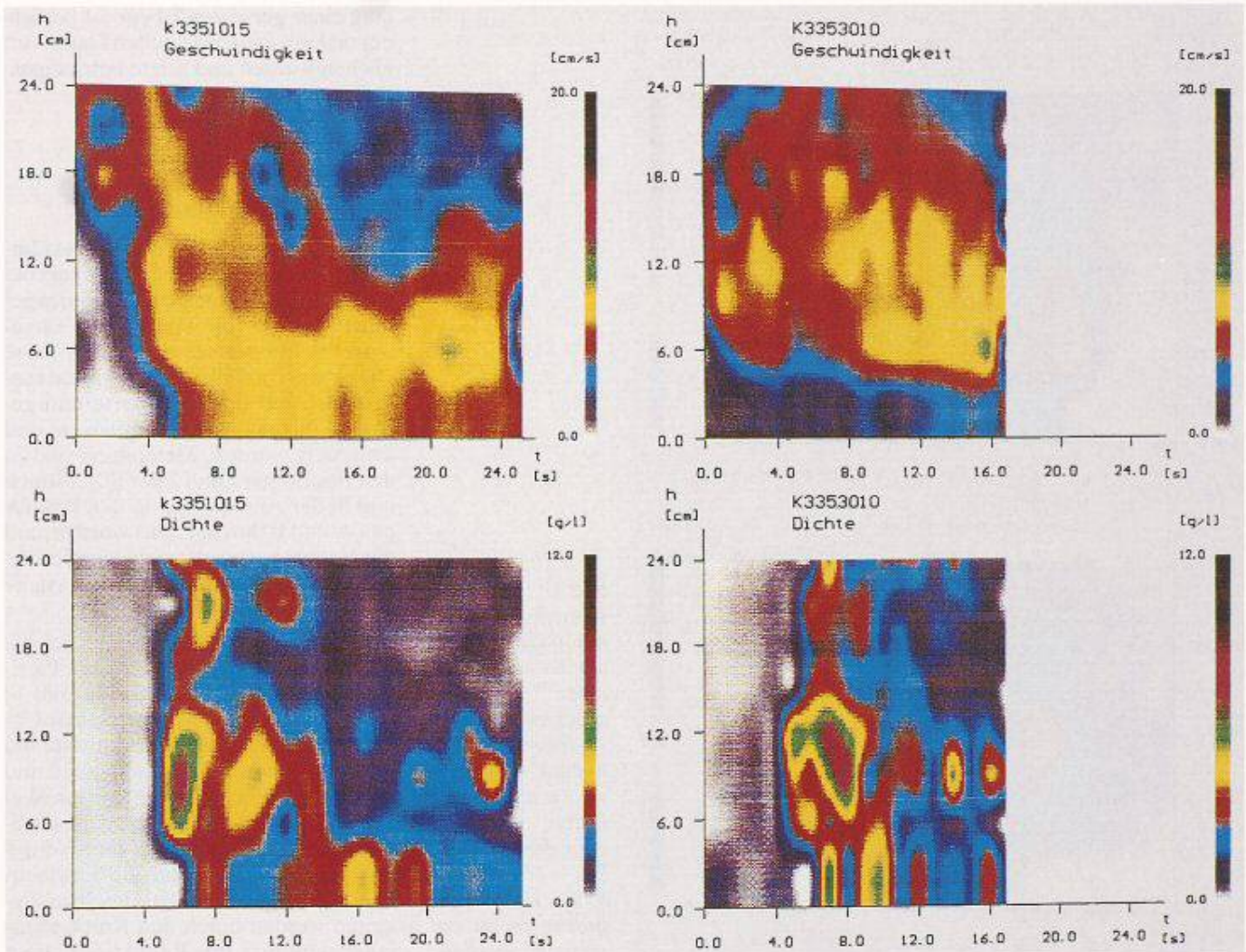


Bild 11. Geschwindigkeits- (oben) und Dichtequerschnitte (unten), sogenannte Zeitschnitte an fester Position während der Lawinenkopf die Messposition passiert, bei einer Rinnenneigung von 35° und einem Knickwinkel von 55° in Position A (links) und B (rechts, siehe Weiserfigur Bild 10). Die Farbkodierung kann dem Balken rechts entnommen werden

<ul style="list-style-type: none"> • Gleichungen: Zwei integrierte Massenbilanzen für Luft und Schnee sowie eine Impulsbilanz für die Mischung • Schliessbedingungen: Entrainment von Luft entlang der freien Oberfläche; die Experimente legen die Entrainment-Koeffizienten fest. <ul style="list-style-type: none"> - Entrainment oder Ablagerung von Schnee am Boden (beides meist vernachlässigt) - Bilanzaussage für die mittlere turbulente kinetische Energie der Mischung (k-Modell, turbulente Schliessbedingung erster Ordnung) • Fliesszustände: Lange und kurze Schwerkraftströme werden behandelt meist im Regime der Autosuspension ohne Schnee-Sedimentation • Experimentelle Methoden: (Salzlösungen in Wasser, oder Suspensionen) <ul style="list-style-type: none"> - Photographie, Bestimmung der Frontgeschwindigkeit, - Entrainment oder Absetzung des Schnees am Boden vernachlässigt • Resultate: Nur für die gesamte Lawine typische, gemittelte Grössen (Dichte, Geschwindigkeit, Ausdehnung) erhältlich, jedoch keine lokalen Werte. 	
---	--

Tabelle 4a. Staublawinen als einfache Mischungen

<ul style="list-style-type: none"> • Gleichungen: Je zwei integrierte Massen- und Impulsbilanzen für die Luft und den Schnee in Suspension • Schliessbedingungen: <ul style="list-style-type: none"> - Entrainment von Luft entlang der freien Oberfläche - Entrainment und Setzung des Schnees am Boden - Bilanzaussagen für die mittlere turbulente, kinetische Energie sowie die turbulente Dissipation der Luftkomponente (k-ε Modell, turbulente schliessbedingung 2. Ordnung). Keine Turbulenzaussagen für die Partikelphase (keine partikulären Reynoldsspannungen) - Ansatz für Wechselwirkungskraft zwischen Fluid- und Partikelphase • Fliesszustände: Bis jetzt werden nur lange Schwerkraftströme behandelt • Experimentelle Methoden: (Plastikpartikel in Wasser) <ul style="list-style-type: none"> - Ultraschallmessmethode zur Bestimmung von lokalen Geschwindigkeiten (Dopplermethode) und Partikelkonzentrationen (Abschwächung des reflektierten gegenüber dem Sendesignal) - Absetzung der Partikelphase wird gemessen, Schnee-Entrainment vernachlässigt • Resultate: Lokale Geschwindigkeiten, Drücke, Dichten in der gesamten Lawine bestimmbar 	
---	--

Tabelle 4b. Staublawinen als Zweiphasen-Strömungen

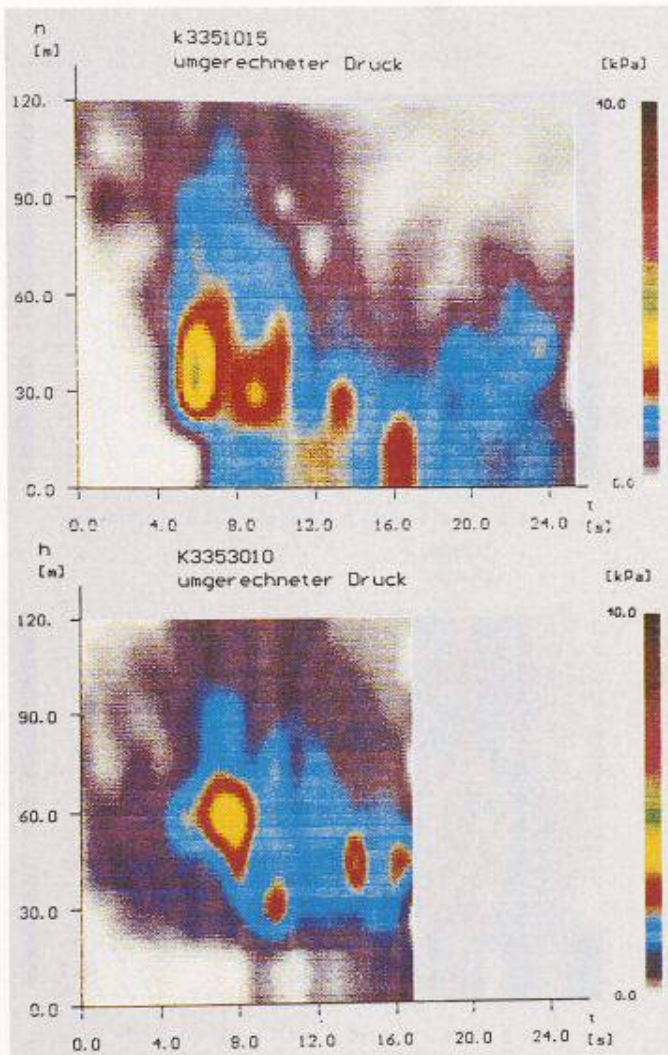


Bild 12. Zeitschnitte des auf natürliche Dimensionen umgerechneten Staudruckes in Position A (oben) und B (unten). Die dazu verwendeten Daten entstammen dem Bild 11. Die Farbkodierung kann dem Balken rechts entnommen werden

lösungen zur Erzeugung von Schwerkraftströmungen verwendet werden. Von dieser simplistischen Beschreibung weichen nur Parker et al. [3] ab, welche lange und kurze Lawinen mit Hilfe der globalen Formulierung von Schwerkraftströmen beschreiben, wobei neben Schnee-Entrainment und Sedimentation auch eine Bilanz der turbulenten kinetischen Energie die Prozesse steuert. Als integrierte Modelle lassen diese Theorien allerdings nur die Bestimmung einer mittleren Dichte und einer mittleren Geschwindigkeit zu.

Das an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich experimentell realisierte Verständnis ist auf eine direkte Anwendung in der Praxis ausgerichtet [3, 5, 6]; Lawindynamiker interessieren sich vor allem für die Mengen und die Verteilung der Schneedeponien in der Auslaufzone und die lokalen dynamischen Drücke. Daher ist ein Zweiphasenkonzept einer Partikelsuspension in einem Fluid notwendig (Tabelle 4b), welches die lokalen Druck- und Geschwindigkeitsfelder bestimmen lässt. Es werden Plastikpartikel in ruhendem Wasser verwendet und eine Ultraschall-Messmethode entwickelt, welche über die

Dopplerverschiebung die Partikelgeschwindigkeit und über die Abschwächung des reflektierten Signals die Partikelkonzentration bestimmen lässt. Lawinenkopf und -körper lassen sich gleichermaßen behandeln, da punktwise gemessen wird. Turbulente Mittelwerte der Geschwindigkeiten und Dichten werden als siebenfache Ensemblemittelungen aus identisch durchgeführten Messungen erhalten.

Theoretisch gründen die Gleichungen auf der lokalen Form der turbulenten Massen- und Impulsbilanzen für jede Komponente unter gleichzeitiger Postulierung von Schliessbedingungen für die Reynoldsspannungen, das Luft- und Schnee-Entrainment und die Schneesedimentation und ein Postulat für die Wechselwirkungskraft zwischen Partikel und Fluid. Für die Fluidphase wird eine Schliessbedingung zweiter Ordnung ($k-\epsilon$ -Modell) verwendet, während die Reynoldsspannungen für die Partikelphase zu Null gesetzt werden. Die Wechselwirkungskraft zwischen Schnee und Luft ist proportional zu den Dichten der beiden Komponenten und zum Quadrat der Differenzgeschwindigkeit beider Phasen gesetzt. Einfache stationäre Grenzschichtströmung ent-

lang einer geeigneten Ebene ist berechnet und mit experimentellen Daten verglichen worden und zeigte befriedigende Übereinstimmung [5].

Laborexperimente von turbulenten Suspensionsströmungen

Experimente sind in einem 5x4x2m-Tank, der eine Schussrinne mit gegebenenfalls einem Knick enthält, durchgeführt worden [6]. Von einem eingetauchten Transducer sind kleine Pulse von akustischen Wellen in das Fluid ausgesendet und das reflektierte und gestreute Signal wiederempfangen und analysiert worden. Messungen sind in den Positionen 1 und 2 der Schussrinne und in der Auslaufzone in den Positionen A und B durchgeführt worden, und der Neigungswinkel α sowie der Knickwinkel β sind variiert worden (siehe Weiserfigur in Bild 10).

In allen Experimenten erwiesen sich die Knicke als die Orte mit grosser Partikelsedimentation. Dies wird in Bild 10 bestätigt, welches die gemessenen Geschwindigkeits- und Dichteprofile im Laborkörper in den Positionen 1, 2 und A, B für drei verschiedene Knickwinkel aufzeigt. Nach dem Knick sind die Dichten wesentlich verringert, ihre Verteilung ist unformer, und die Lawinenhöhen sind grösser. Die Geschwindigkeiten werden durch den Knick ebenfalls beeinflusst. Ihre Reduktion beträgt 40–60%, sie sind nach dem Knick etwas unformer, und die Lawinenhöhe ist ebenfalls grösser. Das entspricht einer Umverteilung von Geschwindigkeit und Masse und muss entsprechend auch zu einer Umverteilung des dynamischen Druckes führen.

Das Bild 11 zeigt die Geschwindigkeits- (oben) und Dichteverteilungen (unten) in Farbkodierung für eine Lawine in Position A (links) und Position B (rechts) aufgetragen gegen die Zeit, wenn die Lawine über die Messposition hinwegläuft. Die Ordinate gibt die Höhe über Grund von 0 bis 24 cm, die Abszisse die Zeit in Sekunden. Ein Farbkodierungsbalken interpretiert die entsprechenden Grössen, für die Geschwindigkeiten das Intervall 0–20 cm/s, für die Dichte 0–12g/l (entsprechend $0-10^2$ in Volumenkonzentration).

Ein Vergleich der Geschwindigkeits- und Dichtedarstellungen deutet auf einen bemerkenswerten Unterschied dessen, was man als Dauer und sinn-gemäss als räumliche Dimension der verschiedenen Zonen auffassen kann. In den Geschwindigkeitsdarstellungen sind die Strukturen (d.h. die Flächen gleicher Farbe) gross und Farbübergänge relativ breit. Lawinenkopf und Lawinenkörper können anhand der un-

Literatur

- [1] *Savage, S. B., and Hutter, K.*: The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.* 199, 177-215 (1989)
- [2] *Savage, S. B., and Hutter, K.*: The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis. *Acta Mechanica* 86, 201-223 (1991)
- [3] *Hutter, K.*: Avalanche Dynamics - A Review. *J. Fluid Mech.* (submitted)
- [4] *Hutter, K., and Koch, Th.*: Motion of a granular avalanche in an exponentially curved chute: experiments and theoretical predictions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A334, 93-138 (1991)
- [5] *Scheiwiller, T., Hutter, K., and Hermann, F.*: Dynamics of powder snow avalanches. *Annales Geophysicae*, 5B (6), 569-588 (1987)
- [6] *Hermann, F.*: Experimente zur Dynamik von Staublawinen in der Auslaufzone. Mitteilung Nr. 107 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich (1990)

terschiedlichen Vertikalausdehnung in grösseren Geschwindigkeiten und Dichten in den Regionen oberhalb 12 cm identifiziert werden. Im Unterschied zu den Geschwindigkeitsdarstellungen zeigen die Dichtedarstellungen mehrere Maxima, die als scharfe Peaks heraustreten. Vergleicht man die Geschwindigkeiten im Bild links und Bild rechts, so erkennt man, dass die grössten Reduktionen in der bodennahen

Zone auftreten mit einem 4fachen Geschwindigkeitsabbau. Ob dies auf die Bodenreibung oder einen «Skischanzeneffekt» zurückzuführen ist, ist gegenwärtig Gegenstand weiterer Untersuchungen. Im Gegensatz zur Geschwindigkeit wird die Dichte zwischen den Positionen A und B bedeutend abgebaut, wobei dies mehr an Stellen der Dichtemaxima und weniger dazwischen geschieht. Dieses Verhalten ist in vielen weiteren Messungen ebenfalls bestätigt worden.

Man erkennt auf Bild 11 im übrigen im Geschwindigkeits- bzw. Dichtegraphen eine unterschiedliche Position der Lawinenfront. Die sichtbare Vorderkante stimmt mit der Dichtefront der Lawine überein. Alle Geschwindigkeitsdaten, die registriert worden sind, bevor diese Dichtefront die Messposition erreicht, müssen von Vorlaufbewegungen des Wassers herrühren, welche durch Verunreinigungen sichtbar werden. Dieser Bereich wird in der Auslaufzone kontinuierlich grösser. Auf der andern Seite handelt es sich hierbei um ein reelles Phänomen, als das Auftreten von starken Winden vor der Ankunft der sichtbaren Lawinenfront den Förstern und Berglern ein bekanntes Phänomen darstellt.

Eine für den Praktiker informative Variable ist die spezifische kinetische Energie oder der äquivalente Staudruck, welche für das vorangehende Experiment im Bild 12 dargestellt ist, jetzt jedoch mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze transformiert auf Naturdimensionen

Verdankung

Die Bilder 10, 11 und 12 sind in verdankenswerter Weise von meinem früheren Mitarbeiter Dr. F. Hermann zur Verfügung gestellt worden.

übertragen. Gemäss den gegenwärtigen Vorschriften entspricht ein Druck von 1,5 kPa gefährlichen Verhältnissen, wohingegen ein Druck von 0,5 kPa als harmlos betrachtet wird. Drücke, die dazwischen liegen, sind potentiell gefährlich. Im Querschnitt A (oben) muss die gesamte Lawine als gefährlich betrachtet werden, im Querschnitt B (unten) sind die untersten 30 m jedoch harmlos. Punkte in der bodennahen Grenzschicht erfahren einen wesentlich kleineren dynamischen Druck als Punkte, die etwas höher liegen. Dieses Verhalten ist ebenfalls in vielen andern Laborexperimenten bestätigt worden.

Der nächste Schritt muss jetzt darin bestehen, dies auch rechnerisch zu bestätigen und so die Kenntnisse des in den Experimenten nachgewiesenen und bis anhin unbekanntes Verhaltens zu erweitern, um die Schlussfolgerungen vertrauenswürdiger und die Verordnungen genauer zu machen.

Adresse des Verfassers: Prof. *Kolumban Hutter*, Ph.D, Institut für Mechanik, Technische Hochschule Darmstadt, Hochschulstrasse 1, W-6100 Darmstadt; z.Z. Geographisches Institut der ETH Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich

Niederflurfahrzeuge – ein Beitrag zum attraktiven Nahverkehr

Neue Fahrwerkskonstruktionen gestatten seit wenigen Jahren den Bau von Niederflur-Schienenfahrzeugen mit Einstiegshöhen von nur etwa 30 cm. Sehr verschiedenartige Entwürfe wurden zum Teil bereits realisiert. Einer Komforterrhöhung, Erleichterungen für Behinderte sowie möglichen Fahrzeitverkürzungen stehen konstruktive Erschwernisse gegenüber.

Der Linienverkehr mit Tram und Bus hat in der Schweiz einen grossen Stellenwert, der aufgrund verkehrspoliti-

VON ULRICH WEIDMANN,
ZÜRICH

scher Zielvorgaben noch gesteigert werden soll. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an Komfort, Zuverläss-

sigkeit und Wirtschaftlichkeit. Einen Schwachpunkt bilden dabei die Fahrzeugeinstiege. Allein auf dem Netz der Zürcher Verkehrsbetriebe erfolgen pro Tag rund zwei Millionen Fahrgastwechselfvorgänge. Jeder dieser Vorgänge stellt eine Komfortverminderung dar und verlängert die Beförderungszeiten. Für den Betreiber eines Nahverkehrsystems bedeutet die Aufenthaltszeit an den Haltestellen nicht nur eine Senkung

der Umlaufgeschwindigkeit des Rollmaterials und damit ein Absinken der Produktivität, sondern wegen mangelhafter Kalkulierbarkeit auch eine ständige Quelle von Fahrplanabweichungen. Für Behinderte schliesslich kann der Einstieg ein unüberwindliches Hindernis darstellen.

Fahrzeugaufbau**Überblick**

Dass durch Tiefeinstiege zumindest der Komfort verbessert werden kann, ist unbestritten. Entsprechend existieren bereits seit vielen Jahrzehnten vereinzelte Fahrzeugentwicklungen mit tiefegelegten Einstiegen, beruhend auf zwei- oder vierachsigen Fahrzeugtypen [1]. Zu nennen sind beispielsweise die Anhängewagen von Amsterdam und Berlin aus den Jahren 1922 und 1928 [2]. Durchsetzen konnten sie sich aber aus verschiedenen Gründen vor allem kon-