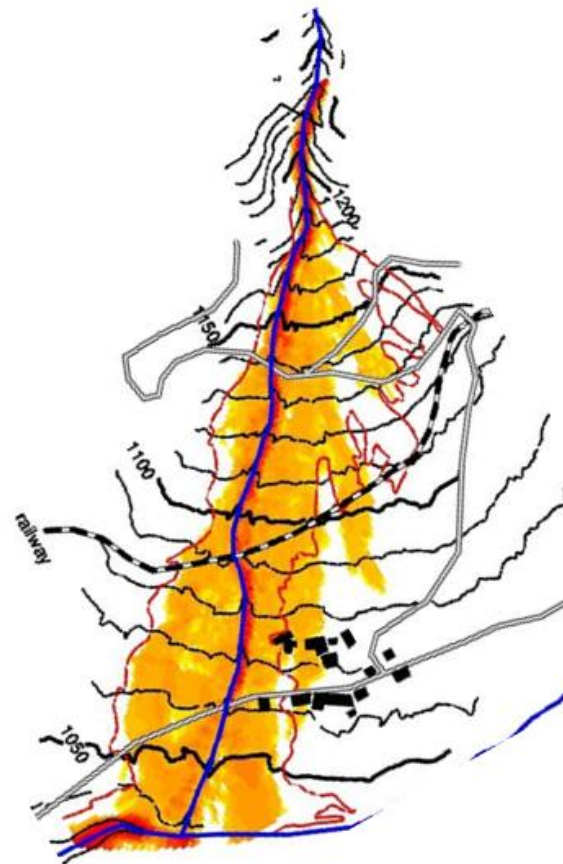


# Einige offene Fragen bei der Modellierung und Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen

**Dieter Rickenmann**  
Eidgenössische  
Forschungsanstalt für  
Wald, Schnee und  
Landschaft WSL,  
CH-8903 Birmensdorf



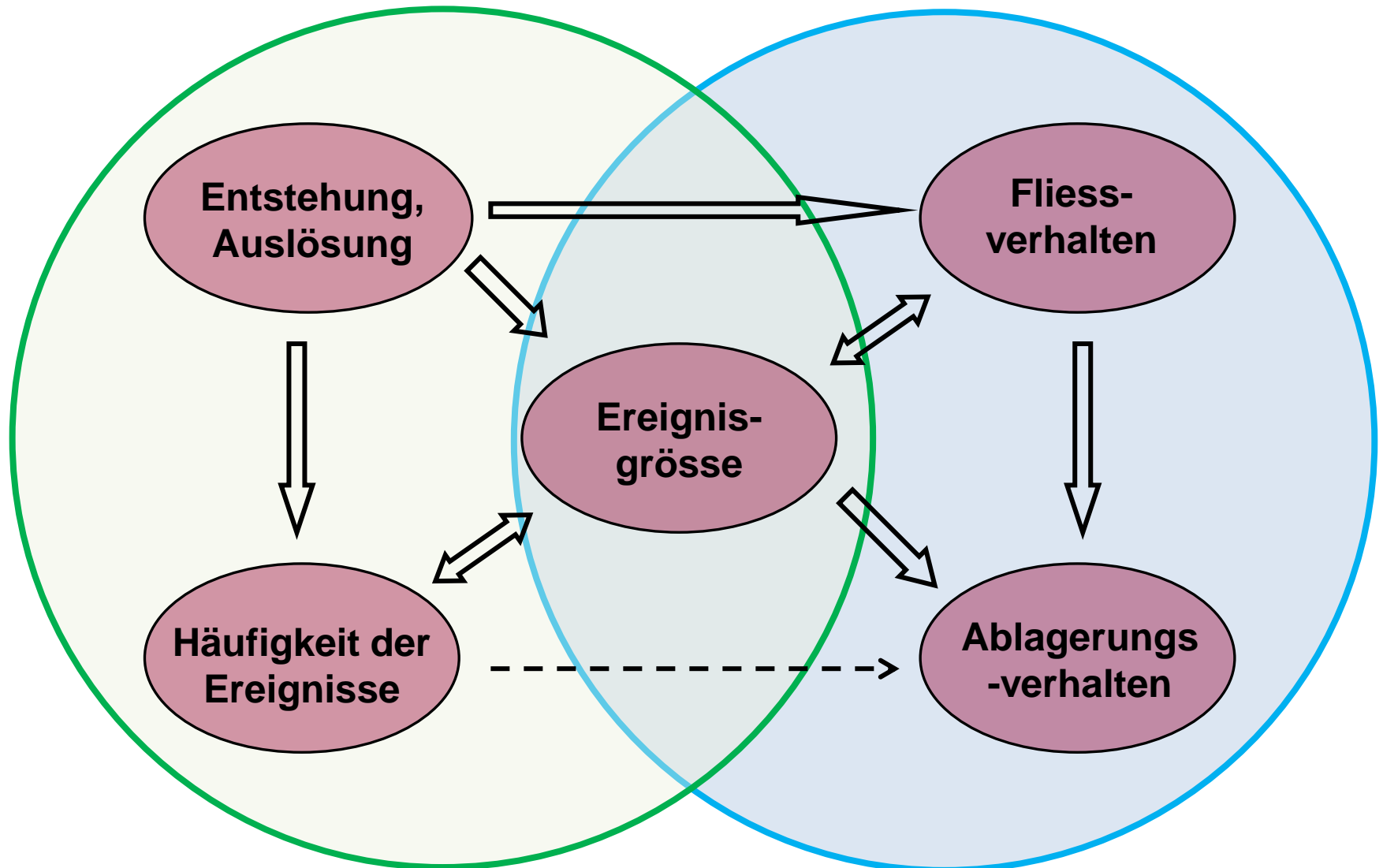
## **1) Einleitung**

2) Einige offene Fragen zur  
Gefahrenbeurteilung

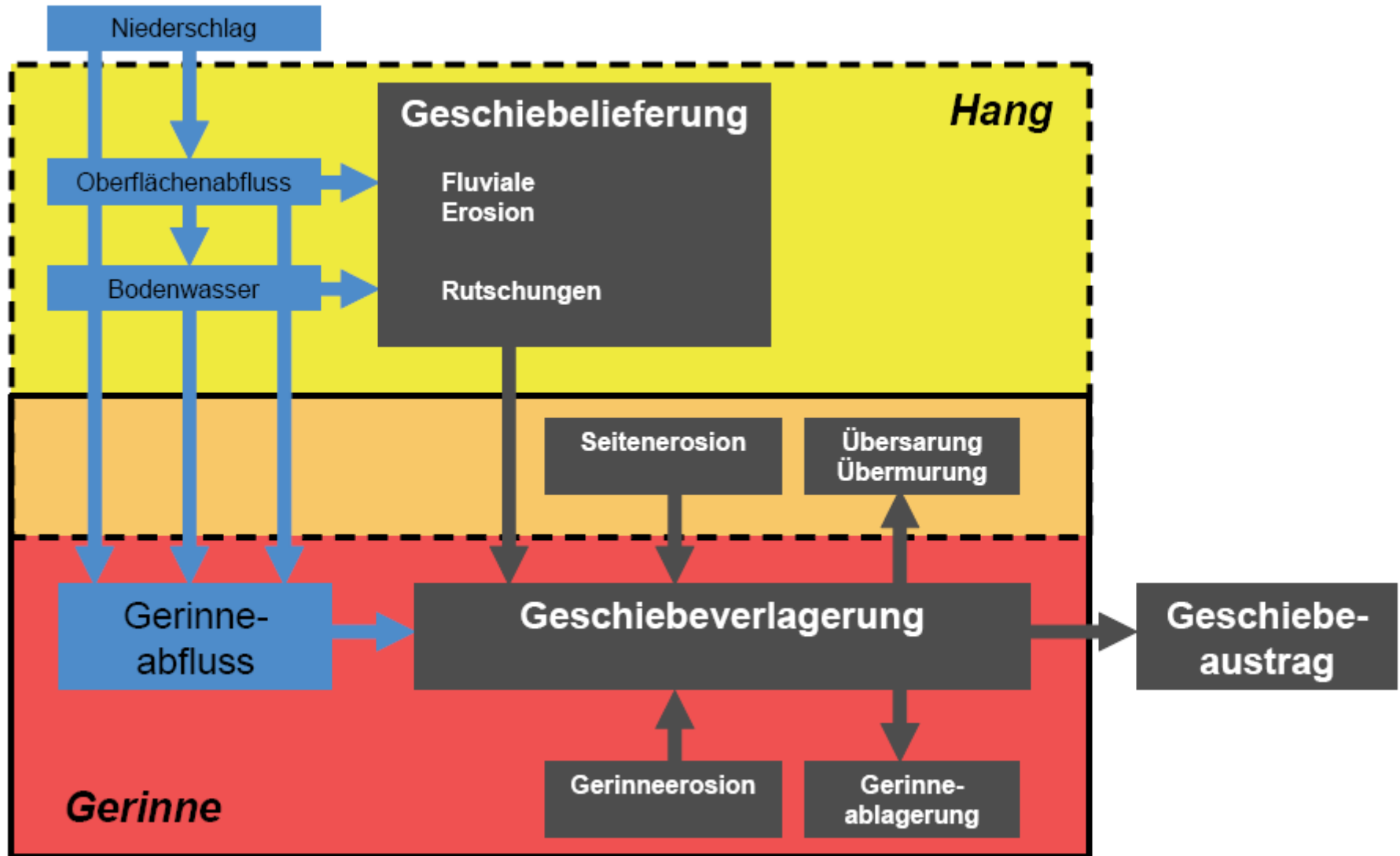
3) Gerinneprozesse und Fließverhalten  
auf dem Wildbach-Kegel

4) Schlussbemerkungen

# Debris-flow hazard assessment: important elements



# Sediment delivery in torrent catchments



Vereinfachtes Prozesssystem für Sedimentlieferung aus den Hängen, dem Uferbereich und dem Gerinne.

(Gertsch, 2009,  
aus Liener, 2000)

1) Einleitung

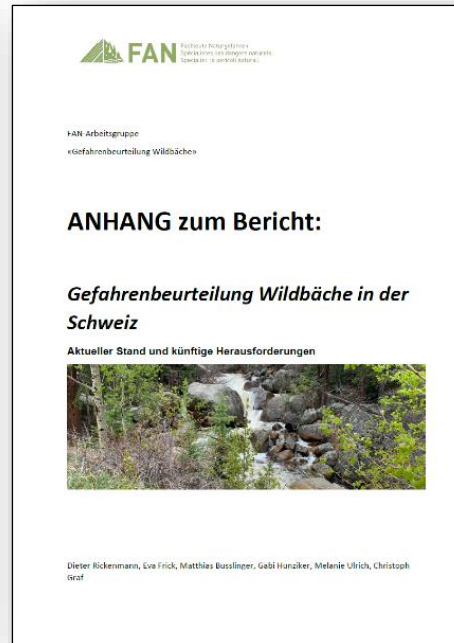
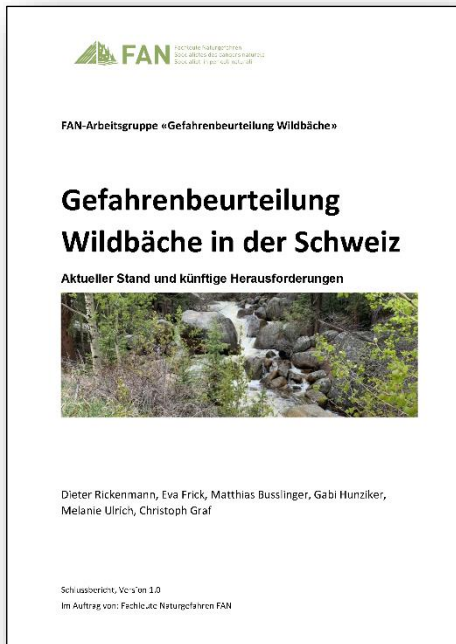
**2) Einige offene Fragen zur  
Gefahrenbeurteilung**

3) Gerinneprozesse und Fließverhalten  
auf dem Wildbach-Kegel

4) Schlussbemerkungen

# FAN-Arbeitsgruppe

## «Gefahrenbeurteilung Wildbäche»: Aktueller Stand und künftige Herausforderungen



In Zusammenarbeit mit den Kollegen der Arbeitsgruppe wurden wichtige Defizite bei der Gefahrenbeurteilung von Wildbach-Ereignissen zusammengestellt.

# Einige offene Fragen zur Beurteilung der Magnitude-Frequenz-Beziehung

Elemente (Themen)	Stand der Forschung	Wichtige Defizite im Hinblick auf Fortschritte bzw. rasche Umsetzung für die Praxis
<b>A. Wildbachfrachten, Ereignishäufigkeit, Prozess-Typisierung</b>		
Magnitude und Frequenz von Ereignissen (M-F-Beziehung)	M-F-Beziehung ist zentral für die Szenarienbildung und steuert u.a. den Umfang der Analyse/num. Modellierung. Empirische Formeln zur Abschätzung von Murgang Geschiebefracht (in FAN Skript) sind relativ grob und wurden in den 1980er und 1990er Jahren erstellt. SEDEX und Gertsch (Dissertationen Univ. Bern) sind neuer, erfordern aber Fachwissen.	(1) Aktualisierung der Datenbank mit neuen Ereignissen und Erarbeiten aktuallisierter Formeln. (2) Anwendung von neuen Technologien zum besseren und häufigeren flächenhaften Monitoring von Sedimentspeicherung und -verlagerung in Wildbacheinzugsgebieten. Dazu gehören eine systematische Erfassung und Zusammenstellung von charakteristischen Wildbacheinzugsgebietskenngrößen inkl. Angaben zu Untergrund und Aufbau, lokalem Niederschlag, Bodenbedeckung, Vegetation und Landnutzung.
Typisierung von Wildbacheinzugsgebieten im Hinblick auf Magnitude Frequenz Beziehung	Nur sehr wenige Studien vorhanden (z.B. Altschutt- und Jungschuttwildbäche), typische Muster von Magnitude und Frequenz wurden für die Schweiz von Zimmermann et al. (1997) hergeleitet.	Systematische Zusammenstellungen von Wildbacheinzugsgebieten mit Ereignis- und Einzugsgebiets-Charakteristiken nötig. Link zu Forschungsbedarf bei "M-F-Beziehung".
Murfähigkeit, dominanter Prozesstyp	Einfache Unterscheidung Murgang/ murgangartig/ fluvialer Transport aufgrund von Kegel- und Einzugsgebiets-Parametern	Prozesswechsel können während eines Wildbacheignisses auftreten. Zuordnung zu Prozesstyp aufgrund von Ablagerungen nicht immer eindeutig.
Prozessübergänge und Prozessketten	Einige Simulationsmodelle können Prozesswechsel berücksichtigen, bedingen aber ereignisbasierte Parameter-Einstellungen.	Modelle sind nötig mit einer solideren physikalischen Grundlage für die Simulation des Übergangs zwischen verschiedenen Prozesstypen.

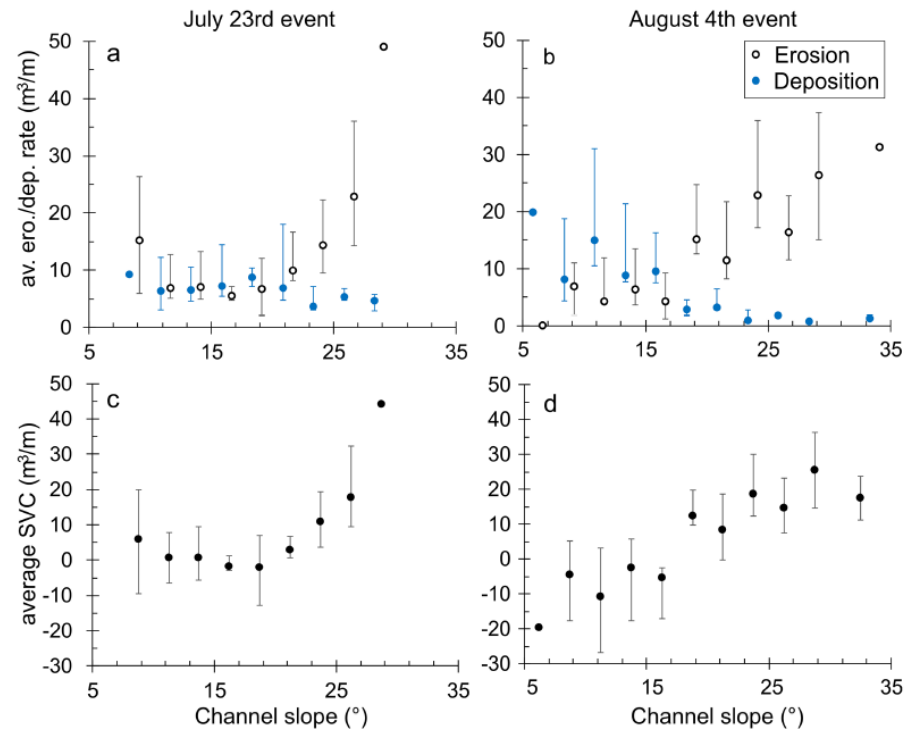
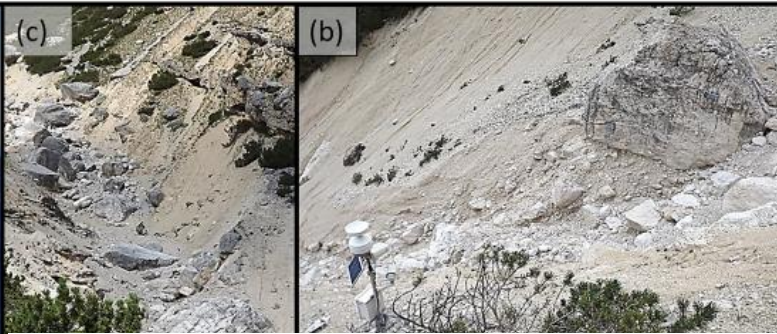
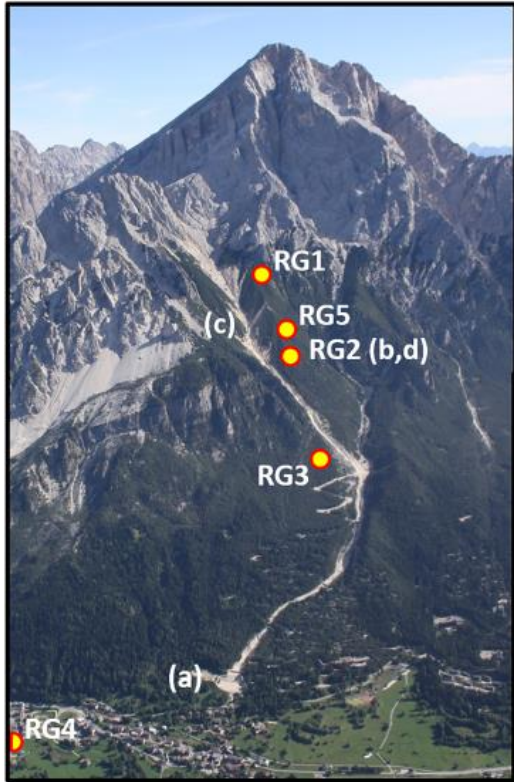
# Einige offene Fragen zur Beurteilung des fluvialen Geschiebetransportes

Elemente (Themen)	Stand der Forschung	Wichtige Defizite im Hinblick auf Fortschritte bzw. rasche Umsetzung für die Praxis
<b>B. Fluvialer Geschiebetransport</b>		
Fliesswiderstand und Fliessgeschwindigkeit	Neuere hydraulische Ansätze zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit sind vorhanden. Trotzdem besteht grosse Variabilität des Fliesswiderstandes für gegebenen Abfluss.	Fliesswiderstand ist primär durch relative Abflusstiefe und Gefälle dominiert. Weitere Einflussfaktoren der Variabilität müssen untersucht werden (Bachbettmorphologie wie zB Holz im Gerinne, Stufen-Becken, etc).
Korngrössen und Kornzusammensetzung	Zur Bestimmung der Korngrössenverteilung existieren Photosieving Programme. Anwendung in Wildbachgerinnen mit vielen grossen Blöcken und organischem Material im Gerinnebett noch wenig überprüft.	Anwendungsgrenzen und Unsicherheiten dieser Programme, sowie Vergleich mit anderen Methoden (Linienzahlanalyse, Wolman sampling) sind wenig bekannt für Wildbach Gerinne.
Berechnung des Geschiebetransportes und der Geschiebefrachten	Neuere Ansätze zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit (mit reduzierter Sohlenschubspannung) sind vorhanden.	Einfluss der Geschiebeverfügbarkeit auf Transportniveau ist noch wenig quantifiziert.
Simulationsmodelle für Geschiebetransport	Wenige 1d Modelle vorhanden zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit (mit reduzierter Sohlenschubspannung), aber keine 2d Modelle.	Modelle wenig getestet in Wildbächen. Fast keine 2d Simulationen gemacht zur Ablagerung bzw. Erosion auf dem Kegel ausserhalb des Gerinnes.
Ablagerung und Erosion ausserhalb des Gerinnes auf Kegel	Limitierte Beobachtungen v.a. aus Laboruntersuchungen mit natürlichen Kegelsituationen.	Mehr quantitative Beobachtungen auf natürlichen Wildbachkegeln sind nötig, in Kombination mit weiteren Laborversuchen.
Geschiebetransport in Gebirgsflüssen (steilere Abschnitte)	1d Modelle vorhanden zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit (Sred, tau-eff), aber kaum 2d Modelle.	Modelle in einigen Gebirgsflüssen in CH getestet. Weitere systematische Nachrechnungen sollten gemacht werden und mit Daten bzw. Abschätzungen aus Geschiebehaushaltstudien verglichen werden.

# Einige offene Fragen zur Beurteilung der Murgänge

Elemente (Themen)	Stand der Forschung	Wichtige Defizite im Hinblick auf Fortschritte bzw. rasche Umsetzung für die Praxis
<b>C. Murgang</b>		
Murgangauslösung	Murgangentstehung im Gerinne ist noch wenig untersucht. Es fehlen v.a. Beobachtungen aus der Natur.	Es fehlen v.a. Beobachtungen aus der Natur, insbesondere auch automatisches Monitoring (wie z.B. in Chalk cliffs, USA).
Erosionsleistung von Murgängen	Neuere Technologien erlauben detailliertes Monitoring von Sohlenveränderungen entlang von Gerinnen. Erosionsansätze sind z.T. in Modellen implementiert, aber noch wenig getestet.	Regelmässige Bestimmung von Gerinneveränderungen bei Ereignissen. Erosions-Ansätze in Modelle mit verschiedenen Rheologien implementieren.
Fliessverhalten von Murgängen: Maximalabfluss, Fliessgeschwindigkeit, Reichweite und der	Empirische Ansätze vorhanden, z.B. Maximalabfluss als Funktion der Murgangfracht, mit Klassierung granular-schlammstromartig.	Mehr Naturbeobachtungen sind nötig, insbesondere auch mit Angaben zu Materialeigenschaften (Korngrössen, Wassergehalt), dies gilt für alle Aspekte des Fliessverhaltens.
Modelle zur Simulation des Fliessverhaltens von Murgängen	Verschiedene Rheologien sind in 2d Modellen implementiert und in der Praxis im Einsatz. Verschiedene rheologische Ansätze können gewählt werden zur Beschreibung des Fliessverhaltens.	Eine Zuordnung der rheologischen Ansätze zu Murgangtypen in der Natur ist schwierig. Modell-Parameter müssen durch frühere (gut dokumentierte) Ereignisse rückgerechnet ("kalibriert") werden. Aber: (1) Gute, umfassende Dokumentationen zu früheren Ereignissen fehlen sehr oft. (2) Systematische Vergleiche zur Auswirkung der Parameter- bzw. Modellwahl fehlen. (3) Unsicherheiten werden fast nie ausgewiesen/quantifiziert. (4) Viele Modelle sind (bestenfalls) nur in Forschungsversion vorhanden, aber nicht für Praxiseinsatz geeignet.
Murgangartiger Transport (Übergang fluvialer Transport zu Murgang)	Noch sehr wenige Untersuchungen und quantitative Beobachtungen zum murgangartigen Transport vorhanden. Ausnahme: vereinfachte Laborversuche, qualitative Beobachtungen in der	Die Abhängigkeit eines spezifischen Prozesstypes von den Faktoren Feststoffkonzentration, Kornverteilung und Fliessenergie ist noch kaum bekannt und quantifiziert.

# Abschätzung von Erosionsquerschnitten (channel debris yield rates)



**Figure 12.** Relationship between channel slope and bin-averaged values of (a, b) erosion/deposition rates and (c, d) specific volume change (SVC) for the investigated debris flow events. Bins have a size of 2.5° and error bars represent the 25th and 75th percentiles. [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](https://onlinelibrary.wiley.com)]

(Simoni et al., 2020)

1) Einleitung

2) Einige offene Fragen zur  
Gefahrenbeurteilung

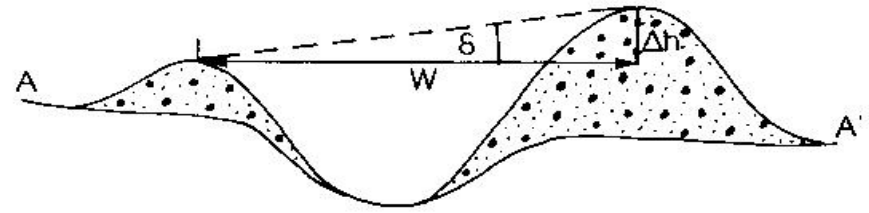
**3) Gerinneprozesse und Fließverhalten  
auf dem Wildbach-Kegel**

4) Schlussbemerkungen

# Superelevation (Kurvenüberhöhung)

$$V = (r_c g \cos \beta \tan \delta / k)^{0.5}$$

- V mean velocity of the flow
- $r_c$  radius of curvature of the bend
- $g$  acceleration due to gravity
- $\beta$  channel slope
- $\Delta h$  elevation difference at the bend
- $W$  width ( $\tan \delta = \Delta h / W$ )
- k** correction coefficient

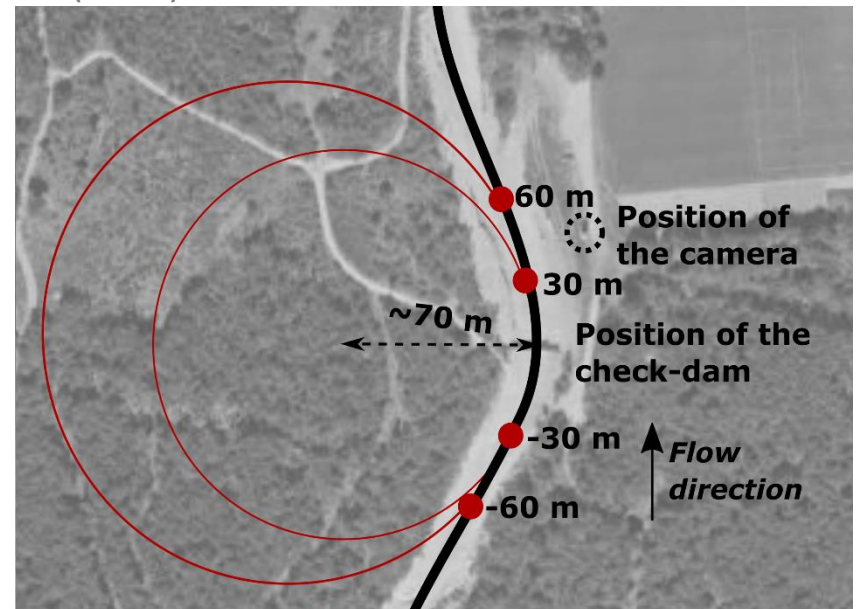


In many debris-flow studies  $k = 1$  is assumed (e.g. Costa, 1984), although debris flows are typically non-Newtonian flows. Hungr et al. (1984), Bulmer et al. (2002) and Prochaska et al. (2008) suggest to use  $k = 2$  to 10.



Superelevation experiments, Scheidl et al. (2014).

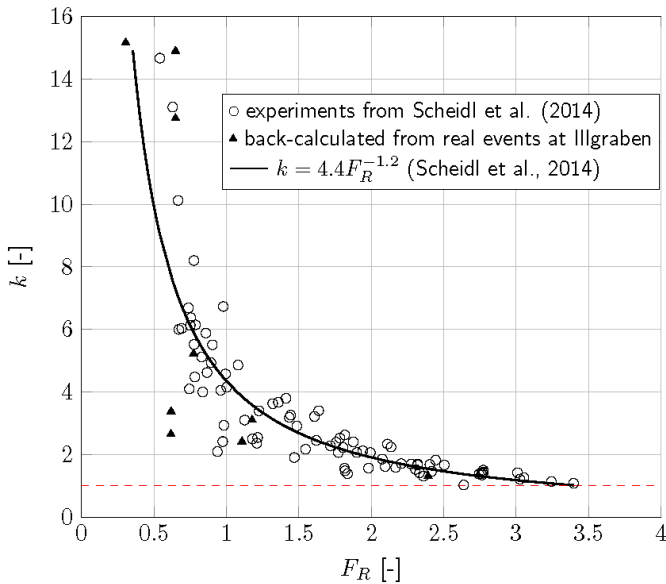
Determination of the relevant curve radius  $R_c$ , based on a method proposed by Prochaska et al. (2008).



# Superelevation, impact force and run-up height

## Superelevation (Kurvenüberhöhung)

$$k = \frac{R_c g \Delta h}{B v^2}$$

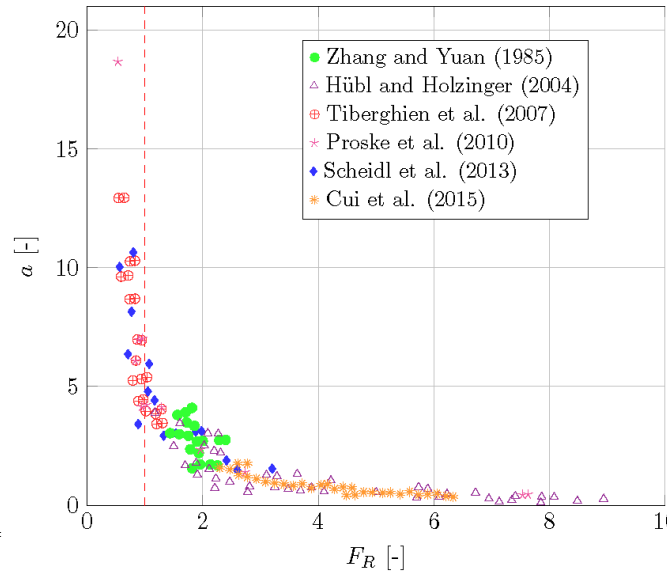


Froude number  $F_R = \frac{v}{(g h)^{0.5}}$

(Scheidl et al., DFHM 2019)

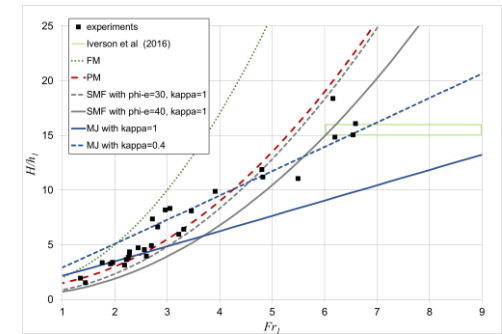
## Impact force (Aufprallkraft)

$$a = \frac{p}{\rho v^2}$$

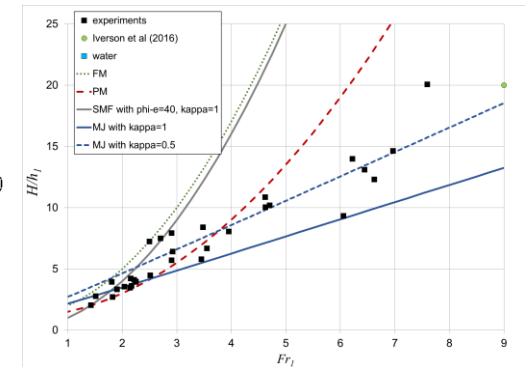


## Run-up height (Auflaufhöhe)

### Run-up at inclined wall ( $\theta = 30^\circ$ )



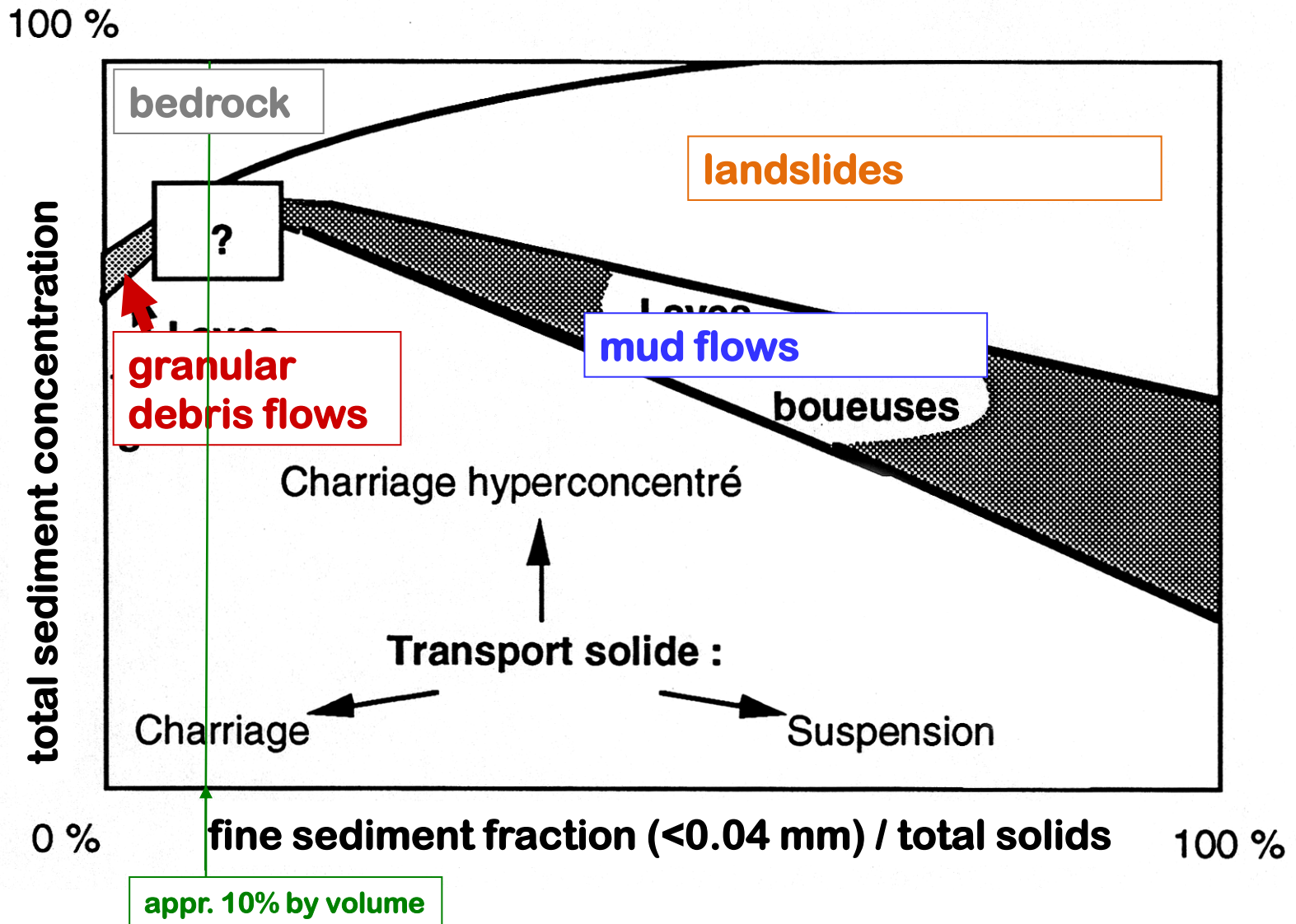
### Run-up at vertical wall ( $\theta = 90^\circ$ )



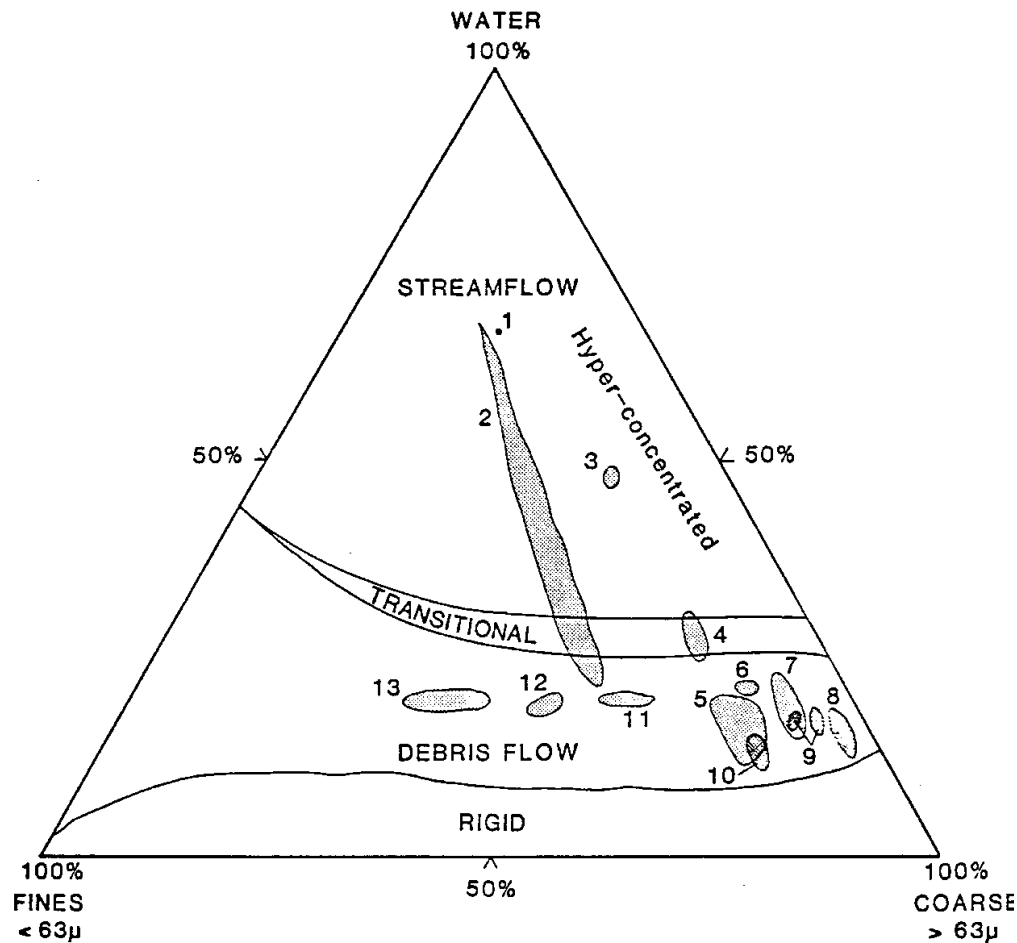
Froude number  $F_R$

(Rickenmann et al., DFHM 2019)

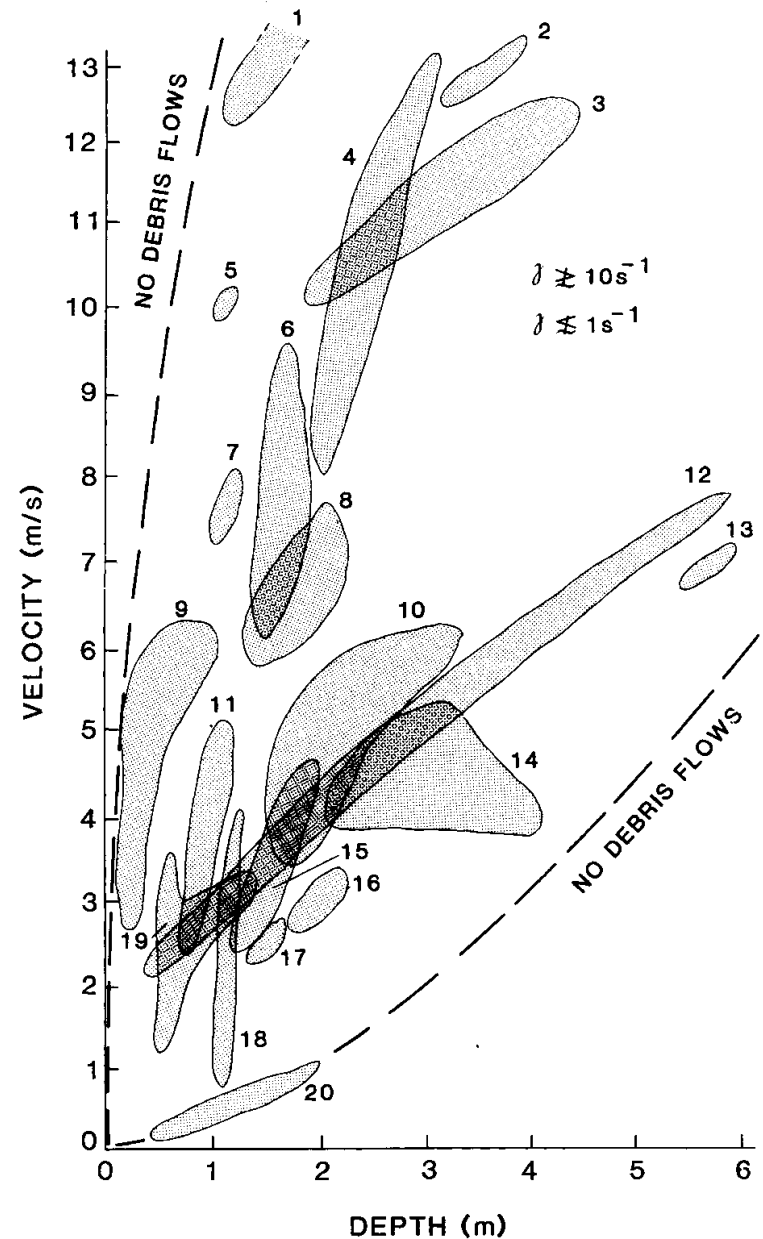
# Murgänge: Klassifizierung von Coussot (1993, 1996)



# Drei-Phasen Diagramm für Material-Zusammensetzung von Murgängen (Phillips, 1988)



(Phillips & Davies, 1991)



# 1-Phasen Modelle für Murgänge (und un tiefe Hangrutschungen)

Die untenstehenden Gleichungen beschreiben die Widerstandskomponente („Reibung“) des Feststoff-Wasser-Gemischs; sie werden normalerweise in einem numerischen Simulationsmodell auf der Grundlage der Flachwassergleichungen implementiert.

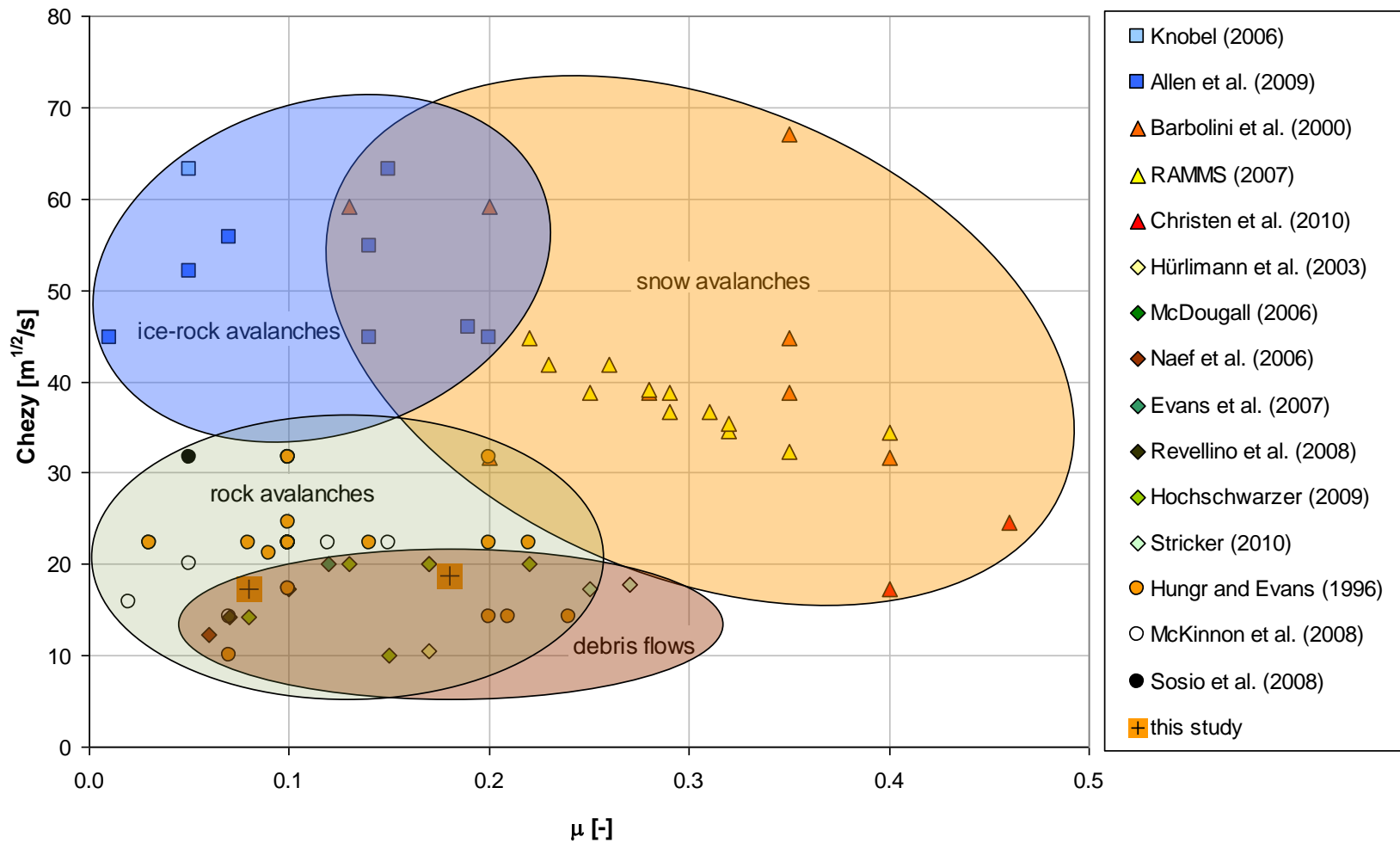
basic - single phase models										
phase regime	rigid block	rigid block	laminar flow macro- viscous regime			turbulent flow turbulent flow regime			turbulent collisional grain-inertial regime	
shear regime	Mohr-Coulomb shearing		viscoplastic fluid shearing			newtonian fluid shearing		newtonian fluid shearing		
basic model acronym	Sliding Block Model	Yield Model	Simplified Bingham Model	Full Bingham Model	Herschel-Bulkley Model	Newtonian Model	Chezy Model	Manning-Strickler Model	Turbulent Model	Grain Shearing Model
Friction Slope:	$S_f = \cos\theta \tan\phi$	Friction Slope: $S_f = \frac{\tau_y}{\rho g h}$	Friction Slope: $S_f = \frac{\tau_0}{\rho g h}$	Friction Slope: $S_f = \frac{\tau_0}{\rho g h}$	Friction Slope: $S_f = \frac{\tau_0}{\rho g h}$	Friction Slope: $S_f = \frac{K \eta q}{8 h^3 \rho g}$	Friction Slope: $S_f = \frac{q \sqrt{q^3}}{k^2 C^3 h^4}$	Friction Slope: $S_f = \frac{n^2 q \sqrt{q^3}}{h^3 k^{4/3}}$	Friction Slope: $S_f = \sin\theta$	Friction Slope: $S_f = \frac{(\rho_s - \rho_{wa}) C_r}{(\rho_s - \rho_{wa}) C_r + \rho_{wa} \tan\phi \cos\theta}$
Basal Shear Stress:	$\tau_0 = \rho g h \cos\theta \tan\phi$	Yield Shear Stress: $\tau_y = \exp f(C_r)$	Basal Shear Stress: $\tau_0 = \frac{3}{2} \tau_y + 3 \mu_b \frac{V}{h}$ $\mu_b = \exp f(C_r)$ $\tau_y = \exp f(C_r)$	Basal Shear Stress: $2\tau'_x - (\tau_x + 2\frac{\partial v_x}{\partial x})^2 + \tau'_z = 0$ $\mu_b = \exp f(C_r)$ $\tau_y = \exp f(C_r)$	Basal Shear Stress: $\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^{0.33}$	Basal Shear Stress: $\tau = 3 \frac{\mu V}{h}$ (Poiseuille equation)	Basal Shear Stress: $\tau = \rho_{wat} g v_i^2 C^{-2}$	Basal Shear Stress: $\tau = \rho_{wat} g n^2 v_i^2 h_i^{-1/3}$ (Manning equation)	Basal Shear Stress: $\tau_0 = \rho_{wat} g h \sin\theta$ $\tau_i = \rho_{wat} (I_{N,cond})^2 v^2$ (stationary)	Basal Shear Stress: $\tau_0 = a \sin\phi \rho_s \lambda^2 (d_{nc,an})^2 v_i^2$ $\frac{1}{\lambda} = \left( \frac{C_{r,an}}{C_r} \right)^{m-1}$
	$\tau = \tau_c + \sigma_n \tan\phi$ 	$\tau = \tau_y$ 	$\tau = \tau_y + \mu_b \dot{\gamma}$ Generalised Viscoplastic Fluid Model: $\tau = \tau_y \cos\phi + \rho_b g h \sin\phi + \mu_{wt} \dot{\gamma}^e$			$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^{0.33}$ 	$\tau = \mu_b \dot{\gamma}$ 	$\tau = \rho_{wat} g v_i^2 C^{-2}$ 	$\tau = \rho_{wat} g n^2 v_i^2 h_i^{-1/3}$ (Manning equation) 	$\tau = \rho_{wat} (I_{N,cond})^2 v^2$ (stationary) 
			DFEM-1D Rutschmann-CH	DAN-W Hung-CAN	Bing Imman-USA	DFEM-1D Rutschmann-CH	DAN-W Hung-CAN		DAN-W Hung-CAN	

Voellmy fluid model  
(e.g. RAMMS SLF-WSL)

Herschel-Bulkley model  
(Cousot - Laigle)

FLO-2D model (O'Brien et al.)

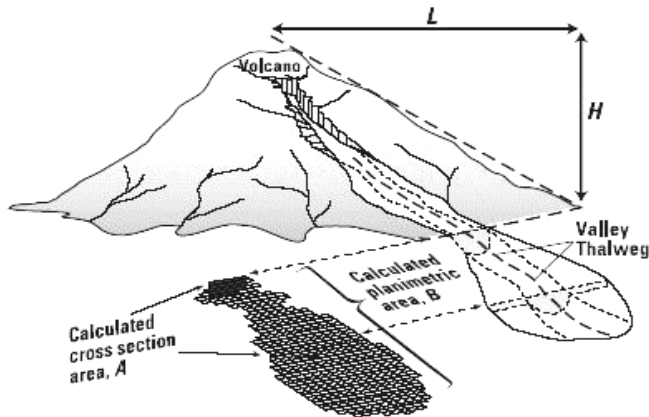
# Numerische Modelle: Parameter Schätzung für die Voellmy Fluid Rheologie



Turbulent and coulomb friction best-fit parameters for back-calculations of observed events with a continuum model for flow simulations based on a Voellmy “fluid”, as obtained in selected studies.

# Geometric similarity of depositional areas

LAHARZ: Abgrenzung von Lahar-gefährdeten Ablagerungszonen (Iverson et al., 1998).



Das Modell sagt die Ablagerungsfläche auf der Basis von zwei (halbempirischen) Beziehungen voraus:

$$B = 200 \cdot V^{2/3}$$

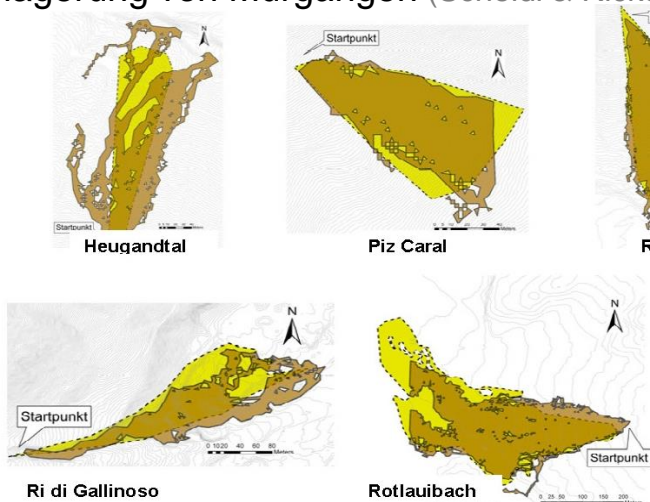
$$A = 0.05 \cdot V^{2/3}$$

V = Ereignisvolumen

B = Planimetrische Ablagerungsfläche

A = Querschnittfläche der Ablagerungen

TopRunDF: Topographisch basiertes Modell für die Ablagerung von Murgängen (Scheidl & Rickenmann, 2010).



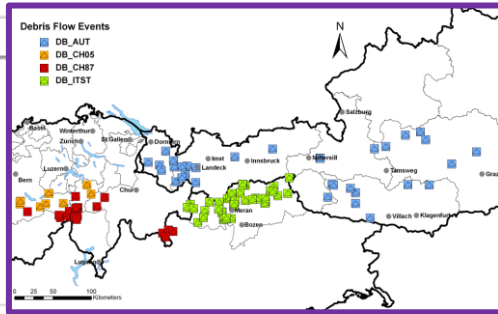
simulated area (geometric similarity, observed  $k_B$  values)  
 Observed deposition area

Eine halbempirische Skalierung für Ablagerungen gibt es auch für Murgänge.

Auf der Grundlage der geometrischen Ähnlichkeit wird der dimensionslose **Mobilitätskoeffizient  $k_B$**  wie folgt bestimmt:

$$k_B = B / V^{2/3}$$

# Mobilitätskoeffizient $k_B$ : genereller rheologischer Parameter ?



Data of 106 debris-flow events in CH, A,

- Capra et al. (2002)
- Berti and Simoni (2007)
- Yu et al. (2006)
- Griswold (2004)
- Crosta (2003)

**Increase in:**

- Water content
- Fine particle fraction

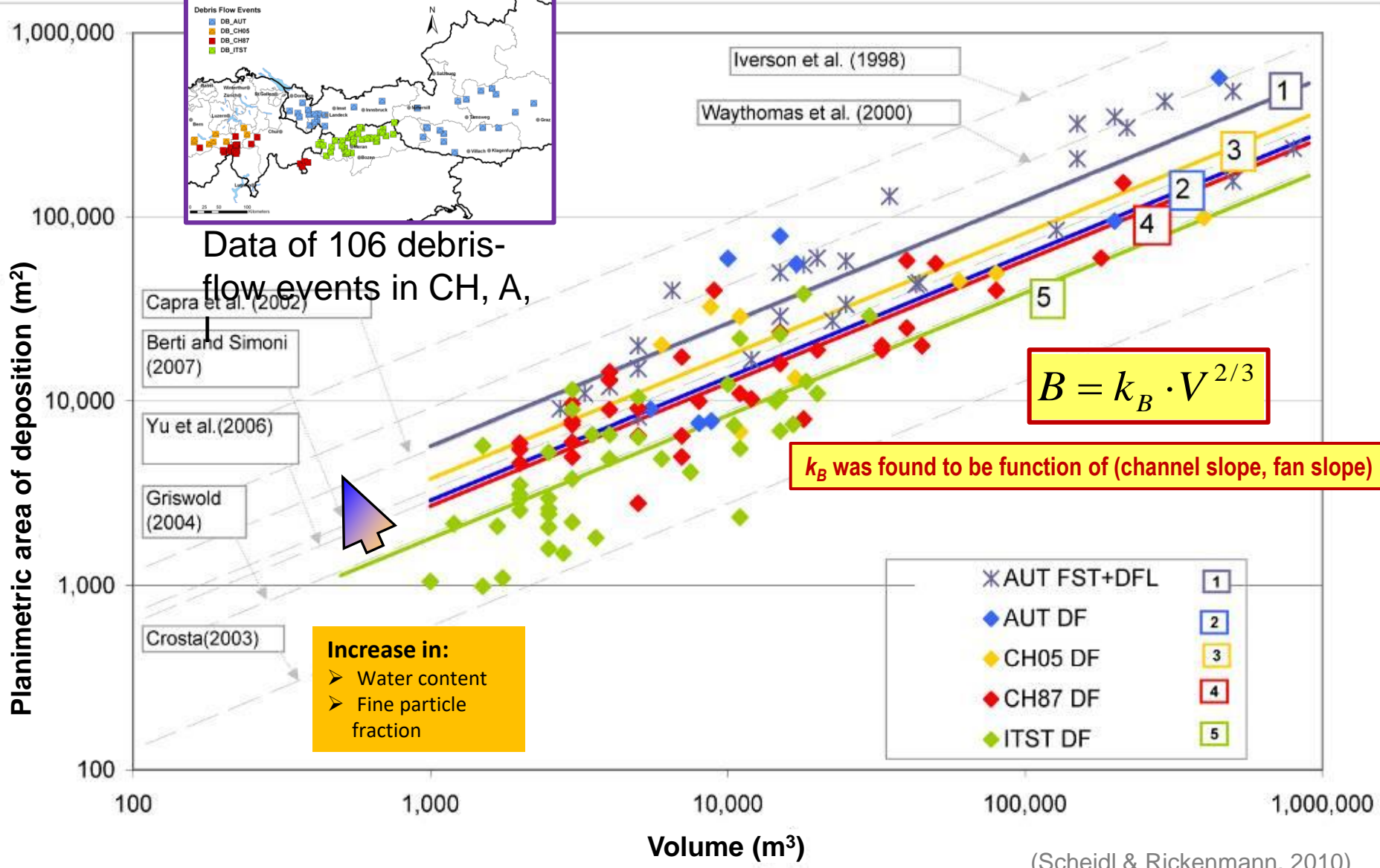
Iverson et al. (1998)

Waythomas et al. (2000)

$$B = k_B \cdot V^{2/3}$$

$k_B$  was found to be function of (channel slope, fan slope)

- ✕ AUT FST+DFL [1]
- ◆ AUT DF [2]
- ◆ CH05 DF [3]
- ◆ CH87 DF [4]
- ◆ ITST DF [5]



# Murgang (FlieBsweg / Kegel): Analytische Modelle

- (1) Massenpunktmodell (für den gesamten FlieBsweg) mit **zwei Reibungsparametern** ähnlich der Voellmy'schen Flüssigkeit (einschliesslich des basalen Reibungskoeffizienten  $\mu_m$ ):

$$dv/dt = g (\sin \theta - \mu_m \cos \theta) - (1/k)v^2$$

(Körner, 1980  
Perla et al., 1980)

$v$  = flow velocity;  $t$  = time;  $k$  = Chezy C or  $\xi$  in Voellmy fluid;  $\theta$  = slope angle of flow path

- (2) Massenfluss (**MF**) Modell zur Schätzung der Auslauf- oder Ablagerungslänge auf dem Kegel von Schneelawinen und Murgängen (nur **ein Reibungsparameter**, das basale Reibungsgefälle:  $S_f$ ):

$$s_T = A_V^2 / G$$

Hungr et al. (1984)  
Takahashi (1991)

$$A_V = v_u \cos (\theta_u - \theta) [1 + (g h_u \cos \theta_w) / (2v_u^2)]$$

$$G = g (S_f \cos \theta - \sin \theta)$$

$s_T$  = runout length on fan;  $v$  = flow velocity;  $h$  = flow depth;  $\theta$  = slope angle

( $S_f = S_{MF}$  in later graphs)

# Numerische Murgangsimulation: Voellmy Fluid Rheologie

- (3) 2d-Simulation der Ablagerung auf einem Kegel mit einer Voellmy-Fluid-Rheologie, mit **zwei Reibungsparametern** (einschliesslich des basalen Reibungskoeffizienten  $\mu$ ):



RAMMS > Software > Debrisflow

## RAMMS::Debrisflow

The **RAMMS::Debrisflow** module was developed to simulate the runout of muddy and debris-laden flows in complex terrain. The module is used in Switzerland and worldwide for debris flow hazard analysis and to aid in the design mitigation measures. It combines state-of-the-art numerical solution methods with helpful input features and user-friendly visualization tools. Many of the input and output features have been optimized to allow engineers and geoscientists to define event scenarios, evaluate simulation results, and predict the influence of proposed structural mitigation measures on the runout of debris flows.



### Voellmy fluid „rheology“

$$S_f = \left[ \mu \cos a + \frac{(U_x^2 + U_y^2)}{H \xi} \right]$$

$S_f$  = friction slope

$U_x, U_y$  = mean flow velocity in  
x- and y- direction

$H$  = flow depth

$\alpha$  = angle of channel slope

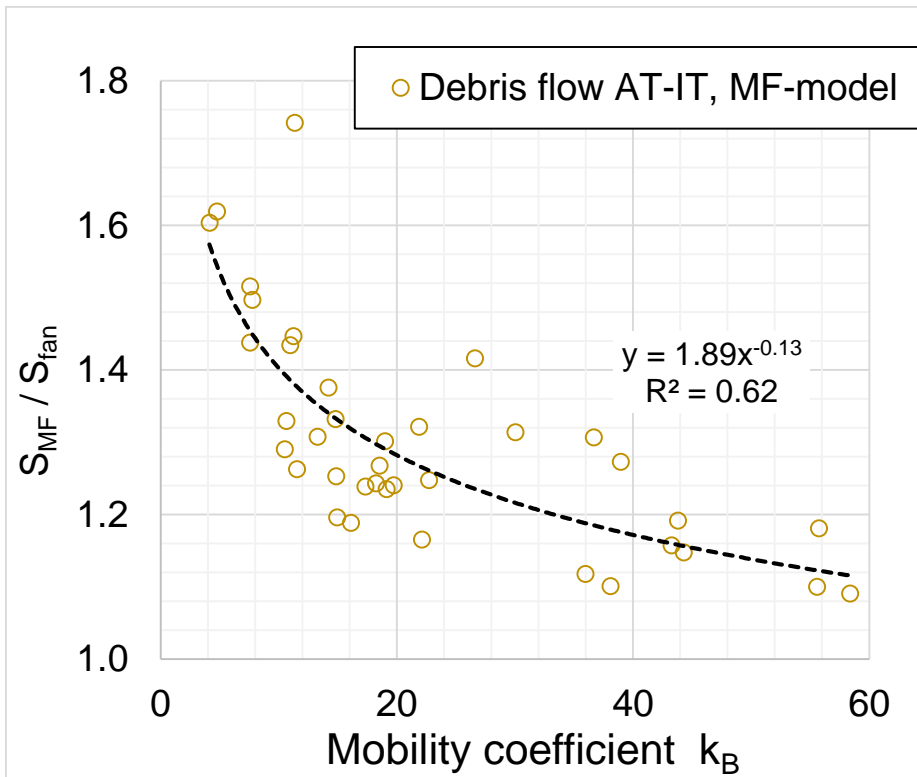
$\xi = C^2 =$  **Chezy - coefficient (for turbulent and granular friction)**

$\mu =$  **basal friction coefficient**

( $\mu = S_{VF}$  in later graphs)

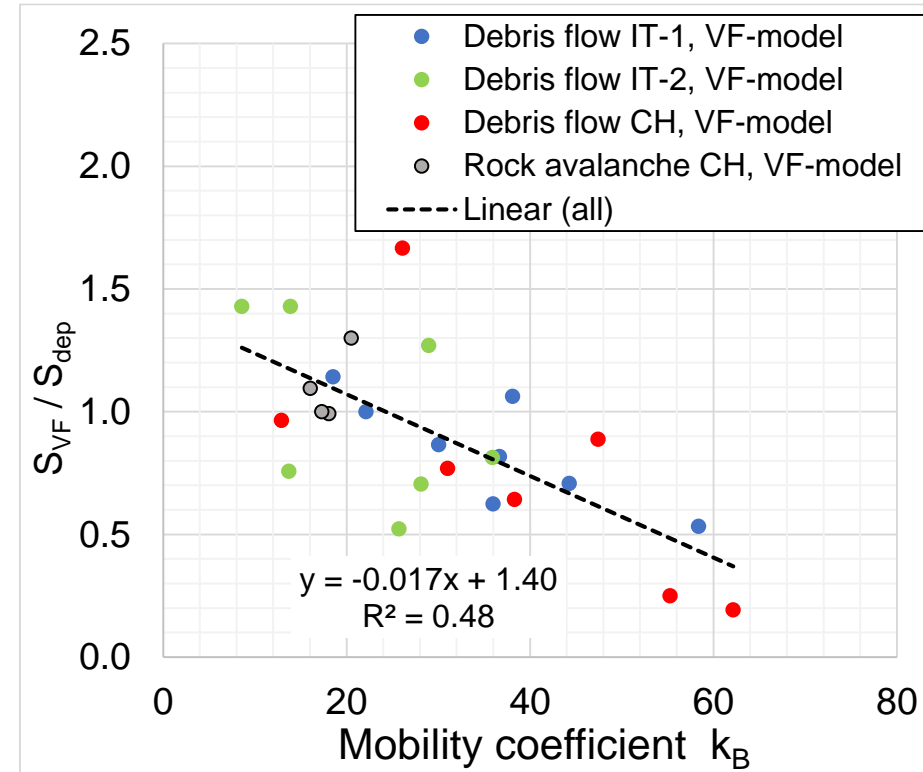
# Modellierung der Murgangablagerung auf dem Kegel

## Massenfluss (MF) Modell



$S_{MF}$  = back-calculated basal friction coefficient;  
 $S_{fan}$  = fan slope.

## Voellmy fluid (VF) Modell



$S_{VF}$  = back-calculated basal friction coefficient;  
 $S_{dep}$  = fan slope at the depositional area

$k_B$  = observed mobility coefficient

1) Einleitung

2) Einige offene Fragen zur  
Gefahrenbeurteilung

3) Gerinneprozesse und Fließverhalten  
auf dem Wildbach-Kegel

**4) Schlussbemerkungen**

# Schlussbemerkungen

---

- Magnitude-Frequenz-Beziehungen werden von technologischen Entwicklungen profitieren.
- Die Verfügbarkeit und Erschöpfung von Sedimenten in Einzugsgebieten muss besser beschrieben werden.
- Kurvenüberhöhung und Auflaufhöhe von Murgängen (oder nicht-newtonschen Flüssigkeiten) müssen besser verstanden werden.
- Bei der Vorhersage potenzieller Anlagerungsgebiete muss die Abhängigkeit der (rückgerechneten) Modellreibungskoeffizienten vom Geländegefälle und vom Mobilitätskoeffizienten berücksichtigt werden.
- Die verschiedenen Fliesstypen (Murgang bis fluvialer Geschiebetransport) müssen im Feld und in Rinnenexperimenten besser charakterisiert werden.
- Ebenso ist ein besseres theoretisches Verständnis des Übergangs zwischen verschiedenen Fliesstypen erforderlich.