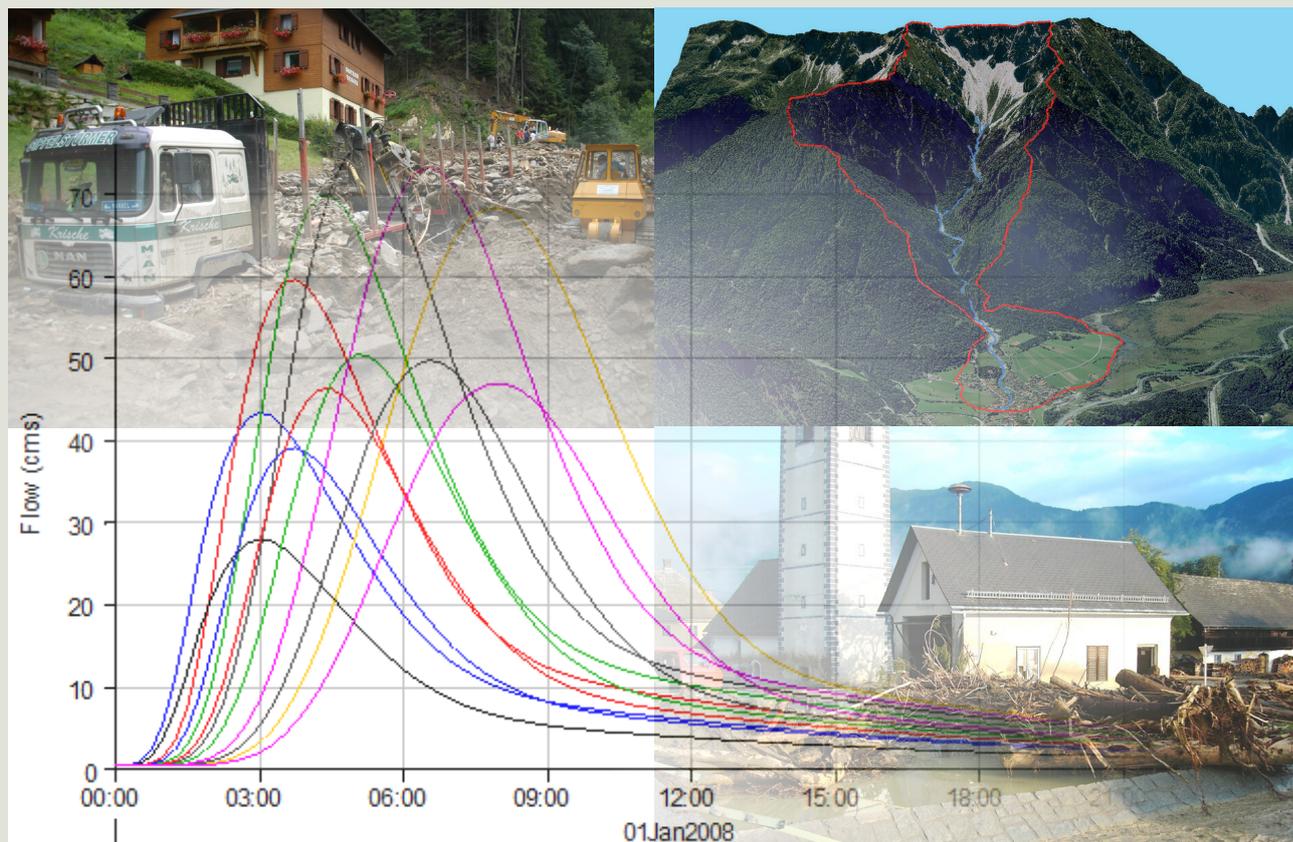


# OptiMeth

Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden zur Beschreibung von Wildbachprozessen

## SCHLUSSBERICHT



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit



die.wildbach  
und lawinerverbauung



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU



LAND KÄRNTEN

Klagenfurt, 2013

## Arbeitsgruppe OptiMeth

### AutorInnen

Rimböck, Andreas (Ltg.)	Bayer. Landesamt für Umwelt, Augsburg (D)
Barben, Martin	Bundesamt für Umwelt, Bern (CH)
Gruber, Harald	WLV Sektion Oberösterreich, Linz (A)
Hübl, Johannes	Universität für Bodenkultur, Wien (A)
Moser, Markus	WLV Sektion Salzburg, Salzburg (A)
Rickenmann, Dieter	Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf (CH)
Schober, Stephan	Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt (A)
Schwaller, Gabriele	Bayer. Landesamt für Umwelt, Augsburg (D)

### Mitwirkung und Beiträge von

Chiari, Michael	Universität für Bodenkultur, Wien (A)
Frick, Eva	tur gmbh, Naturgefahren, Ingenieurwesen, Forstwesen, Davos (CH)
Gertsch, Eva	belop gmbh, Ingenieure und Naturgefahrenfachleute, Sarnen (CH)
Glutz, Marco von	belop gmbh, Ingenieure und Naturgefahrenfachleute, Sarnen (CH)
Graf, Christoph	Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf (CH)
Hannweber, Markus	Wasserwirtschaftsamt Weilheim, Weilheim (D)
Holle, Franz-Clemens	Bayer. Landesamt für Umwelt, Augsburg (D)
Holzinger, Gerhard	WLV Sektion Wien, Niederösterreich und Burgenland, Wien (A)
Höhne, Rainer	Bayer. Landesamt für Umwelt, Augsburg (D)
Jäger, Gerald	WLV Sektion Vorarlberg, Bregenz (A)
Kienholz, Hans	Geographisches Institut der Universität Bern, Bern (CH)
Loipersberger, Anton	Bayer. Landesamt für Umwelt, Augsburg (D)
Mazzorana, Bruno	Autonome Provinz Bozen-Südtirol, Bozen (I)
Mölk, Michael	WLV Sektion Tirol, Innsbruck (A)
Riedl, Johannes	Wasserwirtschaftsamt Weilheim, Weilheim (D)
Schaipp, Bernhard	Bayer. Landesamt für Umwelt, Augsburg (D)
Scheidl, Christian	Universität für Bodenkultur, Wien (A)
Schmalzl, Klaus	Wasserwirtschaftsamt Rosenheim, Rosenheim (D)
Sereinig, Norbert	Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt (A)
Stocker, Andrea	Geographisches Institut der Universität Bern, Bern (CH)
Waldner, Peter	Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf (CH)

### Redaktion

Rimböck, Andreas	Bayer. Landesamt für Umwelt, Augsburg (D)
Koboltschnig, Gernot	Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Klagenfurt (A)

### Gestaltung und Druck

Satz- & Druck-Team, Klagenfurt, Österreich

### Zitiervorschlag

Rimböck A., Barben M., Gruber H., Hübl, J., Moser M., Rickenmann D., Schober S., Schwaller G. (2013): OptiMeth – Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden zur Beschreibung von Wildbachprozessen. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Schriftenreihe 1, Handbuch 3, Klagenfurt

### Bezug

Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT  
c/o Amt der Kärntner Landesregierung  
Abt. 8 - Kompetenzzentrum Umwelt, Wasser und Naturschutz  
Flatschacher Straße 70, 9020 Klagenfurt, Österreich  
ISBN 978-3-901164-20-0

### Broschüre zum Download im Internet

[www.interpraevent.at](http://www.interpraevent.at) → Service → Veröffentlichungen

### Weitere Unterlagen (Anhänge digital)

[www.interpraevent.at/optimeth](http://www.interpraevent.at/optimeth)

© Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Klagenfurt (Österreich)

# **OptiMeth**

Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden  
zur Beschreibung von Wildbachprozessen

## **SCHLUSSBERICHT**

Die Interpraevent versteht sich als Netzwerk von Wissenschaftlern und Praktikern aus dem Bereich Schutz vor Naturgefahren. Sie tritt vor allem mit den Kongressen, die abwechselnd alle zwei Jahre im Alpenraum und im pazifischen Raum abgehalten werden, in Erscheinung. Aber es gibt auch viele Aktivitäten zwischen den Kongressen. So bietet sich für Mitglieder der Interpraevent die Möglichkeit, ein Problem oder eine Fragestellung nicht nur im eigenen Umfeld bzw. national zu bearbeiten sondern auf das internationale Netzwerk zurückzugreifen. Dazu können Arbeitsgruppen einberufen werden, die sich einem speziellen Thema widmen. Schließlich sind die Fragestellungen und Probleme zum Schutz vor Naturgefahren trotz Staats-, Verwaltungs- und Sprachgrenzen im Alpenraum immer wieder die gleichen. Wo es bei der Bewältigung rein wissenschaftlicher Herausforderungen auch Konkurrenzdenken geben kann, sind Praktiker umso eher bemüht gute Lösungsvorschläge wo anders abzuschauen und auch zu übernehmen. Das Rad muss schließlich nicht neu erfunden werden. Was es aber unbedingt braucht, das sind Menschen, die die Initiative ergreifen und andere motivieren, mitzuarbeiten. Ganz herzlich bedanken wollen wir uns daher bei DI Toni Loipersberger, der die Arbeitsgruppe „OptiMeth“ ins Leben gerufen hat und bei Dr. Andreas Rimböck, der ihn dabei unterstützt und dann als sein Nachfolger am LfU die Arbeit weitergeführt und schließlich die wertvollen Ergebnisse publikationsreif gemacht hat.



**DI Kurt Rohner**  
Präsident



**Dr. Gernot Koboltschnig**  
Geschäftsführer

Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT



**INTERPRAEVENT**  
Internationale  
Forschungsgesellschaft

Für Deutschland sind Wildbäche im wahrsten Sinne des Wortes eine Randerscheinung, dennoch prägen sie das Erscheinungsbild und das Leben im südlichen Teil Bayerns enorm. Daher hat der Wissens- und Erfahrungsaustausch mit den „Alpenländern“ seit jeher für uns einen besonderen Stellenwert. Dies gilt umso mehr als die ingenieurmäßig korrekte und allgemeingültige Abbildung und Berechnung von Naturgefahren schwierig ist und somit die Wildbachverbauung besonders praxisorientiert ist. Dies ist auch der Grund dafür, dass sich in den Alpenländern sehr viele unterschiedliche Berechnungs- und Modellansätze entwickelt haben. Diese Vielzahl ist für Planer nur schwer zu überblicken und kann durchaus auch verunsichern. Auch die „Übersetzung“ der wissenschaftlichen Erkenntnisse in eine Sprache, die der Praktiker versteht, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dies war für uns Anlass, die Initiative für die Arbeitsgruppe OptiMeth zu ergreifen. Umso dankbarer sind wir, dass der Gedanke auf offene Ohren stieß und von der INTERPRAEVENT immer voll unterstützt wurde. In Bayern wirkt sich das Ergebnis der Arbeitsgruppe schon konkret aus: es bildet die Grundlage für unsere geplante Ermittlung der Wildbachgefährdungsbereiche. Diese sind bei uns noch umstritten und die Arbeit daran wird kritisch hinterfragt. OptiMeth sorgt hier für mehr Transparenz und Entscheidungssicherheit. Daher bedanke ich mich im Namen des Bayerischen Umweltministeriums bei allen Mitgliedern der OptiMeth Arbeitsgruppe und für die vielen wertvollen Beiträge.



**MR Christian Wanger**

Leiter Referat Wasserwirtschaft im ländlichen Raum,  
Gewässerökologie, Wildbachverbauung  
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt  
und Gesundheit, München



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit



Wildbäche in unseren Alpen üben eine große Faszination auf uns aus, bergen aber auch erhebliche Gefahren. Ein Bach der heute ruhig dahinplätschert kann uns morgen schon ein verheerendes Hochwasser bescheren. Dabei laufen zahlreiche, vielfältige und komplexe Prozesse ab und es treten auch für Experten oft schwer erfassbare Wechselwirkungen auf. Um für künftige Ereignisse vorzusorgen, ist es daher von großer Bedeutung, solche Vorgänge zu berechnen und zu modellieren. Trotz aller technischen Entwicklungen bleibt dies eine große Herausforderung und ein Überblick über die vorhandenen Hilfsmittel ist für den einzelnen schwierig zu bekommen.

Umso wichtiger ist es, die verwendeten Methoden zu sammeln, die gemachten Erfahrungen und Beobachtungen auszutauschen und so voneinander zu lernen. Dem hat sich die internationale Arbeitsgruppe OptiMeth gestellt und präsentiert hiermit Ihre beeindruckenden Ergebnisse. Der Bericht zeigt deutlich auf, welche Leistungen bei der Gefahrenanalyse schon erzielt wurden, aber auch, dass die Arbeit bei weitem nicht zu Ende ist. Ich hoffe, dass der hier aufgezeigte Forschungs- und Entwicklungsbedarf Eingang in künftige Untersuchungsprogramme findet.

Als Leiterin der österreichischen Wildbach- und Lawinerverbauung freut es mich besonders, dass das Ergebnis der internationalen Arbeitsgruppe hiermit von der INTERPRAEVENT einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.



**DI Maria Patek**

Leiterin Abteilung IV/5

Österreichisches Lebensministerium; Wien



lebensministerium.at

Die Schweiz als stark alpin geprägtes Land ist durchzogen von zahlreichen Wildbächen. Um die Gefahren zu beurteilen und wirksame Vorsorge zu betreiben, ist es für uns wichtig, einen aktuellen Überblick über die vorhandenen und angewandten Methoden zu haben. Daher standen wir immer schon in engem Kontakt mit Kolleginnen und Kollegen aus anderen Alpenregionen. Damit wollten und wollen wir einen fruchtbaren Gedankenaustausch zu Methoden und Messwerten pflegen mit dem Ziel, aus eigenem (Miss-)Erfolg zu lernen und von den Erfahrungen anderer Personen und Institutionen, die in denselben Bereichen tätig sind, zu profitieren.

Gerade die Hydrologie und die Hydraulik im Umfeld der Naturgefahren sind zwei Disziplinen, die im Bereich der Extrapolation und der Regionalisierung arbeiten (z.B. Modellierung von Einzugsgebieten und von ungemessenen Flüssen). Es ist also unabdingbar, dass diese heiklen Arbeiten kritisch beurteilt werden und dass man den Mangel oder das Fehlen von Messwerten ersetzt durch einen Konsens der Fachgremien bezüglich dem Stand der Technik. Im Namen des Schweizer Bundesamtes für Umwelt danke ich der Arbeitsgruppe für Ihre Untersuchungen, wünsche Ihnen eine anregende Lektüre und uns allen auch künftig wertvolle neue Erkenntnisse zu Fragen, wie sie im Bericht aufgezeigt werden.



**Dr. Olivier Overney**

Sektionschef der Sektion Hochwasserschutz

Bundesamt für Umwelt, Bern



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Umwelt BAFU**

<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>A. Einleitung</b>	<b>7</b>
a) Hintergrund	7
b) Ziele der Arbeitsgruppe	7
c) Abgrenzung und Arbeitsplan	7
d) Ergebnisse	7
<b>B. Arbeits- und Berechnungsschritte</b>	<b>8</b>
<b>1. Übersicht Gesamtablauf</b>	<b>8</b>
<b>2. Überblick, Vorarbeiten, Systembeschreibung</b>	<b>10</b>
2.1. Datengrundlagen	10
2.2. Systemerfassung und -abgrenzung	10
2.3. Magnitude und Frequenz von Wildbachereignissen	11
2.4. Belastungen des Systems	12
2.5. Abschätzung von Leitprozessen	12
<b>3. Abflussbildung und Feststoffmobilisierung</b>	<b>13</b>
3.1. Hydrologie (Hy): Abflussbildung und -konzentration	13
3.1.1. Überblick Methoden	13
3.1.2. Bemerkungen zu den Methoden	14
3.1.3. Vergleichsberechnungen	16
3.1.4. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl	16
3.1.5. Anwendungshinweise	16
3.1.6. Forschungs- und Entwicklungsbedarf	17
3.2. Feststoffpotenzial und -fracht (1): für Geschiebetransport und Murgang (Ge)	17
3.2.1. Überblick Methoden	18
3.2.2. Bemerkungen zu den Methoden	18
3.2.3. Forschungs- und Entwicklungsbedarf	19
3.3. Feststoffpotenzial und -fracht (2): Schwemmholz (S)	19
3.3.1. Überblick Methoden	19
3.3.2. Bemerkungen zu den Methoden	19
3.3.3. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl	19
3.3.4. Anwendungshinweise	20
3.3.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf	20
<b>4. Gerinneabfluss und Feststoffverlagerung</b>	<b>20</b>
4.1. Hochwasserabfluss (Hw)	20
4.1.1. Überblick Methoden	20
4.1.2. Bemerkungen zu den Methoden	21
4.1.3. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl	22
4.1.4. Anwendungshinweise	23
4.1.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf	23
4.2. Geschiebetransport (Gt)	23
4.2.1. Überblick Methoden	23
4.2.2. Bemerkungen zu den Methoden	25
4.2.3. Anwendungshinweise	26
4.2.4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf	26
4.3. Murgang (M)	26
4.3.1. Überblick Methoden	27
4.3.2. Gruppierung von Methoden	27
4.3.3. Bemerkungen zu den Methoden	27
4.3.4. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl	28
4.3.5. Anwendungshinweise	28
4.3.6. Forschungs- und Entwicklungsbedarf	28

# Inhalt

<b>C. Themenübergreifende Feststellungen</b>	<b>29</b>	<hr/>
a) Vorarbeiten / Einschätzungen	29	5
b) Methodenanwendung	30	
c) Dokumentation, Ergebnisdarstellung	30	
<b>D. Ausblick</b>	<b>31</b>	
a) Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Methoden	31	
b) Neue künftige Aufgabenbereiche	32	
<b>E. Literaturverzeichnis nach Themenbereichen</b>	<b>33</b>	

**Anhänge** (nur zum download unter [www.interpraevent.at/optimeth](http://www.interpraevent.at/optimeth)):

Anhang Hydrologie

Anhang Hydraulik

Anhänge Methodensteckbriefe:

Anhang Hy: Methodensteckbriefe Hydrologie

Anhang Ge: Methodensteckbriefe Geschiebepotenzial und -fracht

Anhang S: Methodensteckbriefe Schwemmholt

Anhang Hw: Methodensteckbriefe Hydraulik / Hochwasserabfluss

Anhang Gt: Methodensteckbriefe Geschiebetransport

Anhang M: Methodensteckbriefe Murgang

### Kurzzusammenfassung

Eine zuverlässige Einschätzung von Wildbachprozessen (Hochwasserabfluss, Murgang, Feststofftransport) ist eine entscheidende Grundlage für die Bestimmung von Gefahrenzonen und die Entwicklung von integralen Schutzkonzepten. Diese Aufgabe stellt sich jedoch meist als sehr schwierig heraus, weil die Prozesse sehr schnell und komplex ablaufen und genaue Beobachtungen oder gar Messungen zum Ablauf der Ereignisse in der Regel nicht verfügbar sind. Heute stehen zwar eine ganze Reihe von Verfahren, Berechnungs- und Modellansätzen, die im Folgenden als Methoden bezeichnet werden, zur Verfügung, es ist jedoch für den einzelnen oft schwierig, deren Zuverlässigkeit und die Randbedingungen für deren Anwendung richtig einzuschätzen.

Dies gab Anlass, im Rahmen einer internationalen Arbeitsgruppe namens OptiMeth den „State of the Art“ im Alpenraum zu ermitteln, die in der Praxis bereits verwendeten Methoden zusammenzustellen sowie Hinweise und Anregungen zur Anwendung dieser Methoden zu erarbeiten. Ziel war es, Qualitätsstandards zu definieren und auch länderübergreifend ein vergleichbares Niveau sicher zu stellen. Die Arbeitsgruppe wurde von der Internationalen Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT ins Leben gerufen.

Die Arbeitsgruppe beschränkte sich auf die Wildbachprozesse: Hochwasser, fluvialer Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang. Im Rahmen von OptiMeth wurden nur Methoden betrachtet, die praxistauglich erscheinen und sich in der Anwendung bereits bewährt haben. Darüber hinaus musste die generelle Verfügbarkeit der Methode gewährleistet sein. Die untersuchten Methoden wurden in Methodensteckbriefen einheitlich beschrieben und bewertet.

Der nachfolgende Bericht gibt zunächst einen Überblick über die erforderlichen Schritte, die im Rahmen einer Ge-

fahrenanalyse bzw. bei der Planung von Schutzmaßnahmen durchlaufen werden sollten. Anschließend werden die einzelnen Teilbereiche näher beleuchtet. Dabei werden die vorhandenen Methoden aufgelistet sowie Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl genannt. Neben Anwendungshinweisen wird auch der Forschungs- und Entwicklungsbedarf der einzelnen Teilbereiche aufgezeigt.

Die hier dargestellten Ergebnisse und Empfehlungen der Arbeitsgruppe OptiMeth zeigen, dass Erfahrung und Experteneinschätzung bei der Beurteilung von Wildbachprozessen auch in Zukunft eine große Rolle spielen. Es ist daher wichtig, dem Erfahrungs- und Wissensaustausch zwischen Experten und Praktikern große Beachtung zu schenken.

Der Umgang mit Vertrauensbereichen muss in die Praxis vermittelt werden. Damit ist gemeint, dass man Ergebnisse aus verschiedenen Methoden kritisch hinterfragt und sich über die unvermeidlichen Unsicherheiten der Ergebnisse im Klaren ist. Als logische Konsequenz folgt daraus auch die notwendige Betrachtung des Überlastfalles. Also was passiert, wenn das festgelegte Bemessungsereignis überschritten wird? Oder mit anderen Worten, wie hoch ist das unvermeidliche Restrisiko und ist dieses akzeptabel? Damit kommt man schließlich in den Risikodialog mit den Betroffenen, die ja letztlich mit dem Restrisiko leben müssen.

Die im vorliegenden Bericht genannten Aspekte erfordern natürlich einen hohen zeitlichen und z.T. auch finanziellen Aufwand bei der Erarbeitung von Gefahrenanalysen oder integralen Schutzkonzepten. Das ist gerade heute in der allgemein recht angespannten personellen und finanziellen Situation nicht immer ganz einfach. Aber im Hinblick auf die Entwicklung nachhaltiger, nachvollziehbarer und gleichzeitig auch wirtschaftlicher Lösungsansätze wird kein Weg an dieser Vorgehensweise vorbei führen.

## A. Einleitung

### a) Hintergrund

Naturereignisse im Bergland wie Hochwasser und Muren, Lawinen und Rutschungen laufen in einem komplexen Zusammenwirken verschiedenster Einflussfaktoren ab. Deshalb ist es sehr schwierig, diese Prozesse theoretisch zu beschreiben und zu erfassen.

Neben bereits vorhandenen zahlreichen Formelansätzen und empirischen Ansätzen kommen seit einigen Jahren auch zunehmend Modelle zum Einsatz, um den Prozessablauf von künftig zu erwartenden selteneren Ereignissen zu quantifizieren. Die Prozesse laufen jedoch in der Regel sehr schnell ab, meist innerhalb weniger Stunden oder gar Minuten. Aus diesem Grund stehen gemessene Größen in der Regel nicht zur Verfügung, weshalb die Modellparameter oft nur schwierig geeicht werden können. Es ist damit in der Praxis sehr schwierig, die Qualität und Genauigkeit der berechneten Größen zutreffend einzuschätzen. Eine sorgfältige Ereignisdokumentation ist hier eine sehr wertvolle Hilfe.

Dabei ist es für die Zukunft wichtig, auch in der Diskussion mit einer zunehmend kritischen Öffentlichkeit (z.B. Ausweisung der Wildbachgefährdungsbereiche oder Gefahrenzonenpläne), möglichst zuverlässige Angaben zu den Bemessungsgrößen und deren Jährlichkeiten zu haben.

Aus vielen alpenweiten Kontakten ist bekannt, dass die geschilderten Probleme und Fragen in allen Alpenländern aktuell sind. Von der internationalen Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT wurde nach längeren Vorgesprächen mit den Beteiligten im Herbst 2009 eine internationale Arbeitsgruppe „OptiMeth“ (Teilnehmer siehe Impressum) eingerichtet. Weitere Vertreter wurden zur Diskussion eingeladen.

### b) Ziele der Arbeitsgruppe

Hauptziel der Arbeitsgruppe war es, den „State of the Art“ im Alpenraum zu ermitteln. Die in der Praxis bereits verwendeten Methoden sollten zusammengestellt, dokumentiert und teilweise vergleichend diskutiert werden. Dadurch können alle Beteiligten ihren eigenen Wissensstand im Vergleich mit anderen Methoden einordnen und gegebenenfalls Verbesserungspotenziale erkennen.

Darüber hinaus sollten gemeinsame Qualitätsstandards definiert, Möglichkeiten und Grenzen der derzeit verwendeten Methoden aufgezeigt sowie künftiger Bedarf an Forschung und Weiterentwicklung formuliert werden.

*Der Begriff „Methode“ wird in diesem Bericht als Sammelbegriff für empirische und theoretische Formelansätze, Programme, Modelle sowie weitere Verfahren verwendet.*

### c) Abgrenzung und Arbeitsplan

In der Startsituation im Januar 2010 einigte sich die Arbeitsgruppe darauf, sich ausschließlich auf Wildbachprozesse zu

beschränken. Weitere Prozesse wie Lawinen und geologische Gefahren wurden nicht bearbeitet.

Im Einzelnen wurden folgende Wildbachprozesse zur näheren Betrachtung ausgewählt:

- Hochwasser (Hydrologie, Hydraulik)
- fluviatiler Feststofftransport (Schwebstoff, Geschiebe, Schwemmholz)
- murartiger Feststofftransport und Murgang

Aufgrund der im Vergleich zum Geschiebe und Murgängen untergeordneten Bedeutung der Schwebstoffe, werden diese nicht separat betrachtet. Im Folgenden werden sie im Prozess Hochwasser mit behandelt.

Im ersten Schritt wurden die vorhandenen Methoden zusammengestellt. Dabei wurden nur solche betrachtet, die in der Praxis einsetzbar sind und sich bereits bewährt haben. Darüber hinaus war Voraussetzung, dass die generelle Verfügbarkeit der Methode gewährleistet ist.

Um eine einheitliche Erfassung der Methoden sicherzustellen, wurde ein Methodensteckbrief entworfen. Nach diesem Muster wurden die vorhandenen Methoden beschrieben und eine Ersteinschätzung u.a. hinsichtlich Aufwand und Anwendungsgrenzen durchgeführt.

Im Bereich Hydrologie wurden zudem vergleichende Berechnungen für sechs Testgebiete durchgeführt. Dabei wurden, basierend auf einheitlichen Grundlagedaten, die maximalen Abflusswerte mit den unterschiedlichen Methoden berechnet und gegenübergestellt.

Für die anderen Prozesse konnten keine Vergleichsberechnungen erstellt werden. Hier wäre der Aufwand im Rahmen der Arbeitsgruppe zu groß gewesen. Zudem sind die Datengrundlagen in allen Ländern unterschiedlich bzgl. Inhalt, Verfügbarkeit, Datenformat, um die Ergebnisse der Berechnungen kalibrieren und validieren zu können.

Nach der Zusammenstellung der vorhandenen Methoden wurden Hinweise zur Wahl und Anwendung formuliert.

### d) Ergebnisse

Als Ergebnis der Arbeitsgruppe liegt im Folgenden eine Zusammenstellung gängiger und in der Praxis bewährter Methoden vor, die in den Methodensteckbriefen dokumentiert sind. Die Steckbriefe sind im Anhang aufgeführt.

Darüber hinaus werden Anwendungshinweise für die Praktiker formuliert, um deren Arbeit zu erleichtern und zu verbessern. Für jeden Bereich wird der Forschungs- und Entwicklungsbedarf genannt.

Für den Bereich Hydrologie wurde zusätzlich ein detaillierter Bericht verfasst, der u.a. die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen ausführlich aufzeigt (Anhang Hydrologie).

Im vorliegenden Bericht werden keine neuen Methoden präsentiert, sondern lediglich der „State of the Art“ im Alpenraum aufgezeigt.

## B. Arbeits- und Berechnungsschritte

### 1. Übersicht Gesamtablauf

Folgende Schritte sind im Rahmen einer Gefahrenanalyse bzw. Planung von Schutzmaßnahmen zu durchlaufen (vgl. Abb. 1). Der erforderliche Aufwand und die Intensität der Bearbeitung hängen von der Fragestellung und dem angestrebten Ergebnis ab.

#### • Überblick, Vorarbeiten, Systemabgrenzung

- Datengrundlagen
  - ⇒ Sichten der vorhandenen analogen und digitalen Grundlagendaten; ggf. erforderliche zusätzliche Datenerhebungen definieren
  - ⇒ erste Ortseinsicht
- Systemerfassung und -abgrenzung
  - ⇒ Abgrenzung Belastungs- und Auswirkungssystem (Sammel- und Ablagerungsgebiet)
  - ⇒ Bestimmung und Lokalisierung von möglichen Prozessgebieten (Massenbewegungen, Rutschungen, Wildholz)
  - ⇒ Abgrenzung Teileinzugsgebiete (TEG)
  - ⇒ Abgrenzung von homogenen Gerinneabschnitten (Knotenpunkte)

Die Vorarbeiten sollen einen ersten Eindruck des Einzugsgebiets (EZG) liefern und Hinweise auf die Leitprozesse geben. Darauf bauen die anschließend durchzuführenden Felderhebungen auf.

Die Leitprozesse hängen von der Ausprägung und Kombination der Belastungen in Verbindung mit der Disposition des Einzugsgebietes ab. Hilfsmittel zur Charakterisierung und Klassifizierung von Ereignissen ist dabei das Magnituden- (Intensitäts-) und Frequenz- (Häufigkeits-)konzept, wobei es sich auf die Belastungssituation oder das Ausmaß der Prozesse beziehen kann.

- Belastungen (je Teileinzugsgebiet, bzw Gerinneabschnitt)
  - ⇒ Wasser (Niederschlagsstatistik, zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung)
  - ⇒ Feststoffe - Geschiebe (Geschiebeherde, Geschiebepotenzial, zeitliche und räumliche Mobilisierung)
  - ⇒ Feststoffe - Wildholz (Wildholzpotenzial)
  - ⇒ Bestimmung Disposition (Voraussetzungen für Entstehen von Prozessen)
  - ⇒ Szenarienentwicklung
- Abschätzung von Leitprozessen im Wirkungsbereich
  - ⇒ Welche Wildbachprozesse können im betrachteten Wildbach eine Rolle spielen?
  - ⇒ Hochwasser (mit Feststofftransport)
  - ⇒ Murgang

- Magnituden- / Frequenzbetrachtungen
  - ⇒ Festlegung von Dimensionierungsgrößen eines Bemessungsereignisses z.B. für Gefahren- / Risikoanalysen, Schutzkonzepte etc. hinsichtlich einer bestimmten Wiederkehrwahrscheinlichkeit (Frequenz)
  - ⇒ Bestimmung der Magnitude für gewähltes Szenario eines Leitprozesses
  - ⇒ Berücksichtigung historischer Ereignisse

#### • Abflussbildung und Feststoffmobilisierung

- Festlegung von hydrologischen Szenarien
  - ⇒ Bestimmung des Direktabflusses bzw. des Effektivniederschlages für ausgewählte Teileinzugsgebiete
  - ⇒ Bestimmung von Abflussganglinien dieser Teileinzugsgebiete
  - ⇒ Festlegung von prozessorientierten Szenarien
  - ⇒ Bestimmung der Feststoffeinträge (Geschiebe; Wildholz)
  - ⇒ Bestimmung der Prozesse der homogenen Gerinneabschnitte (z.B. mit abstrahiertem Gerinnesystem)
  - ⇒ Bestimmung der Abflussspitzen und Abflussfrachten aus Geschiebeeinträgen

#### • Gerinneabfluss und Feststoffverlagerung

- Hochwasser und Geschiebetransport bzw. Murgang:
  - ⇒ Wahl des hydraulischen Modells je nach vorliegender Prozessart (Hochwasser zu Murgang je nach Leitprozess und Feststoffanteil)
  - ⇒ Wahl des hydraulischen Modells (eindimensional (1D), zweidimensional (2D))
  - ⇒ Festlegung von Szenarien entlang des Gerinnes (z.B. Verklausungen, Rauigkeiten)
  - ⇒ Berechnung des Abflussverhaltens (der Wellenverformung) entlang des Gerinnes
  - ⇒ Berechnung des Feststofftransportes
  - ⇒ Berechnung der Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten (Energiehöhen)
  - ⇒ Berechnung der Überflutungsflächen
  - ⇒ Berechnung der Ablagerungsflächen (Sediment)

#### • Weitergehende Betrachtungen

- Überlastfall
- Klima-, Entwicklungsszenarien

#### • In allen Schritten wichtig:

- ⇒ Bewertung der (Zwischen-)Ergebnisse / Rückkopplungen
- ⇒ Vergleich zu abgelaufenen Ereignissen
- ⇒ Plausibilitätsprüfungen (ggf. erneute Geländebegehungen)

# Übersicht Gesamtverlauf

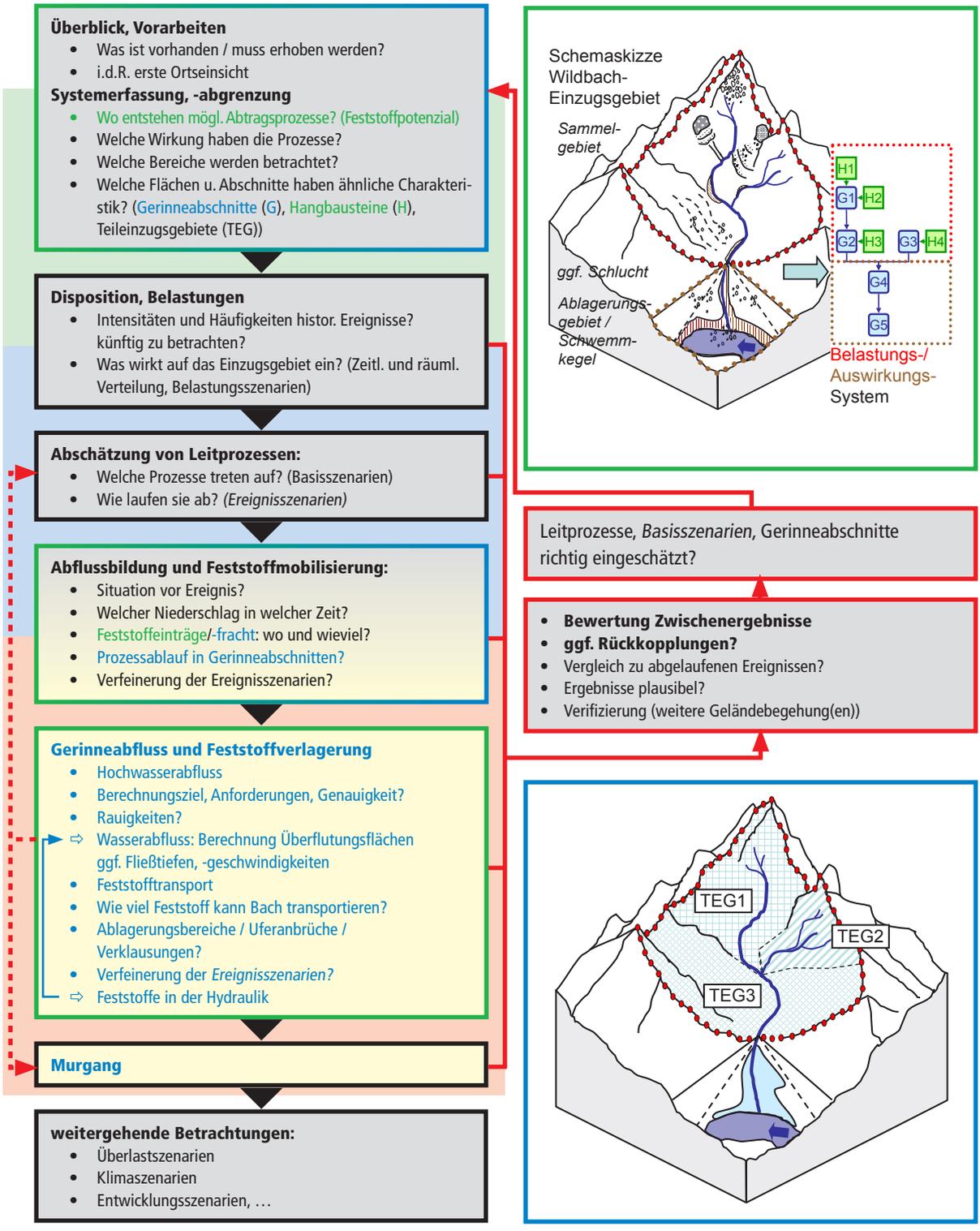


Abb. 1: Übersicht wesentlicher Arbeits- und Berechnungsschritte sowie ausgewählter Leitfragen (LfU)

## 2. Überblick, Vorarbeiten, Systembeschreibung

### 2.1. Datengrundlagen

Im Rahmen der Vorerhebungen stehen in den verschiedenen Ländern / Regionen unterschiedliche Daten in analoger bzw. digitaler Form zur Verfügung:

- Ereignischronik
- Luftbilder
- Stationsdaten (Niederschlag, Abfluss)
- Digitales Geländemodell DGM (Laserscan)
- Geologische, hydrogeologische Karten
- Bodenkarten
- Landnutzungskarten
- Vegetationskarten
- vorhandene Bauwerke (Sperrn, Murfänge, etc.) und deren Zustand (Bauwerkskataster)
- etc.

Auf dieser Grundlage kann am Schreibtisch eine Erstabschätzung der Disposition für die Bereiche Hydrologie, Geschiebe- und Schwemholzeintrag erfolgen.

Die vorhandenen Daten und ersten Abschätzungen geben Aufschluss, welche vertiefenden Aufnahmen erforderlich sind (z.B. terrestrische Vermessung) und dienen als Vorbereitung für die erste Geländebegehung.

Die Geländebegehungen nehmen eine nicht unerhebliche Zeit in Anspruch. Um die Wildbachprozesse richtig einschätzen und die Methoden bestmöglich anwenden zu können, sind Ortseinsichten unverzichtbar. Im Idealfall sollten im Laufe der Planung sogar mehrere Begehungen vor Ort erfolgen.

Im Rahmen der Ortseinsicht sollten u. a. auch Anwohner zu Ereignissen in der Vergangenheit befragt werden. Die Aussagen sind jedoch stets subjektiv und mit entsprechender Vorsicht zu bewerten. Hinweise auf abgelaufene Prozesse geben auch „stumme Zeugen“ (vgl. ETAI, 2003b).

### 2.2. Systemerfassung und -abgrenzung

Der Ereignisraum von Naturereignissen kann als ein dynamisches System betrachtet werden, in dem die räumlichen Einzelkomponenten Auslösungs-, Verlagerungs- und Ablagerungsbereich durch den auftretenden Prozess miteinander verbunden sind und zueinander in Wechselwirkung treten. Innerhalb der Teilsysteme kann es zu positiven oder negativen Rückkoppelungseffekten kommen, die sich auf weitere Teilsysteme auswirken.

Gravitative Naturereignisse haben gemeinsam, dass sie unter speziellen Randbedingungen aufgrund einer Zusatzbelastung oder Schwächung des Systems ausgelöst werden. Als methodischer Ansatz kann das von Kienholz (1995) entworfene **Dispositionmodell** angesehen werden, das für unterschiedliche Gefahrenarten weiter entwickelt wurde. **Be-**

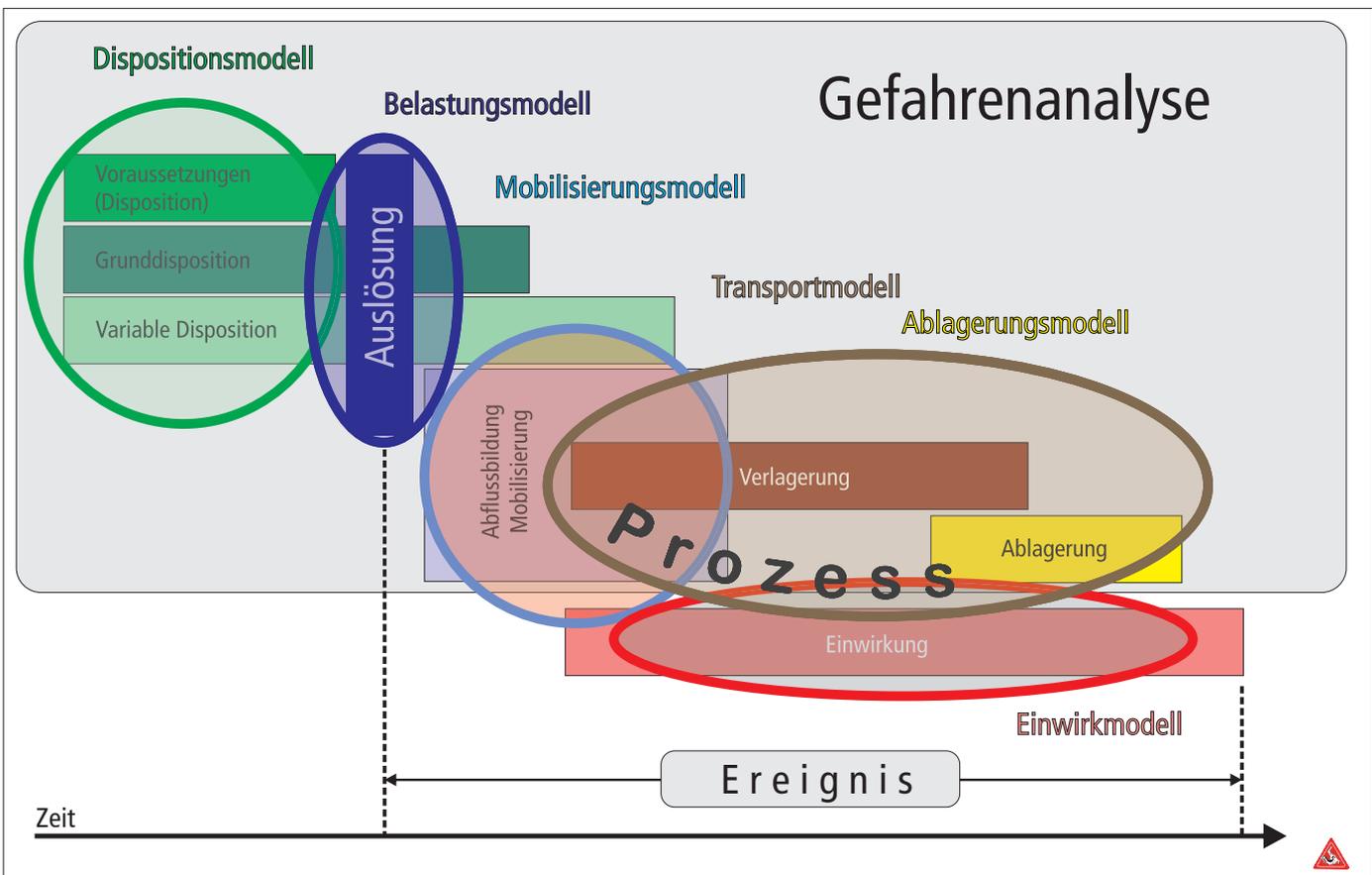


Abb. 2: Überblick über verschiedene Betrachtungsmodelle (BOKU)

**Lastungsmodelle** beschreiben das Auslöseereignis, in den meisten Fällen die Höhe des flüssigen oder festen Niederschlags. Die Mobilisierung von Feststoffen (**Mobilisierungsmodell**) und somit der Beginn der Feststoffverlagerung wird in den meisten Fällen nicht modelliert, da hierzu in der Regel quantitative Methoden fehlen und für die Betrachtung der Ablagerungsbereiche die Annahme einer bewegten Masse ausreicht. Die hydrologischen Ansätze zur Abflussbildung und Abflusskonzentration können auch unter „Mobilisierung“ subsummiert werden. Für die Verlagerung und Ablagerung stehen mittlerweile verschiedene Modellansätze (**Verlagerungsmodell**) für die meisten Wildbachprozesse zur Verfügung. Zumeist ist es ein Modell, das für die Verlagerung entwickelt wurde und das als Ergebnis Aussagen zum Ablagerungsverhalten trifft. **Einwirkungsmodelle** beschreiben die Interaktion zwischen Prozess und einem Objekt, auf das der Prozess während der Ver- bzw. Ablagerung trifft (Hübl, 2012).

Jedes der anzuwendenden Modelle kann nur dann ein „sicheres“ oder vertrauenswürdigen Ergebnis produzieren, wenn die Randbedingungen der Anwendung bekannt sind und die Eingangsdaten mit geringer Unsicherheit behaftet sind. Auf das Einzugsgebiet eines Wildbaches umgelegt bedeutet dies, dass das kausale Ursachen-Wirkungssystem erkannt wird und die Anwendung in den entsprechenden „homogenen“ Gerinneabschnitten erfolgt.

### 2.3. Magnitude und Frequenz von Wildbachereignissen

Wichtige Kenngrößen zur Charakterisierung bzw. Bewertung von Wildbachprozessen und deren Wirkung sind die Frequenz und die mit ihr korrelierende Magnitude der Ereignisse. Sie können über verschiedene Verfahren abgeschätzt oder bestimmt werden (siehe auch Rickenmann, 2013).

Je nach erforderlichem Schutzgrad kann die Frequenz unterschiedlich gewählt werden. Für häufigere Ereignisse werden Wiederkehrintervalle von 30, für seltene 100 und für sehr seltene 300 Jahre angesetzt. Vermehrt sollten auch Überlastfälle, denen ebenfalls Frequenzen unterstellt werden können, in die Betrachtungen einbezogen werden.

#### Magnitude (Intensität)

Die Magnitude oder Intensität ist ein physikalisches Maß eines Ereignisses, das die Größenordnung seiner Wirkung ausdrückt (ONR 24800). Die Magnitude bei Wildbachprozessen wird zum Beispiel durch die Größe des Abflusses (Hydrograph) oder durch die bei einem Ereignis transportierte Feststofffracht ausgedrückt. Die Intensität bezieht sich in der Regel auf abgeleitete Größen (z.B. Abflusstiefe, Fließgeschwindigkeit, Ablagerungsmächtigkeit), welche einen direkten Bezug zum möglichen Schadenausmaß an einem bestimmten Ort haben.

Die Abschätzung einer Beziehung zwischen Magnitude und Frequenz ist zentral für die Gefahrenbeurteilung, da in vielen Ländern die Bestimmung der Gefahrenstufe von der Intensität und Ereignishäufigkeit abhängig ist (z.B. BWW/BRP/BUWAL, 1997). Allerdings ist die Abschätzung einer Bezie-

hung zwischen Magnitude und Frequenz in Wildbachgebieten oft sehr schwierig, da in der Regel keine Datenreihen mit Messwerten dazu existieren. Daher ist das Konzept der Extremwertanalyse von Hochwasserabflüssen nur bedingt auf Wildbachereignisse übertragbar. So kann zum Beispiel bei beschränktem Geschiebepotenzial die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Ereignisses auch vom Ausräumungszustand und der Geschiebeproduktion des Gebietes abhängen.

Zudem existieren derzeit keine Methoden, womit eine genaue Auftretenswahrscheinlichkeit von Murgangereignissen einer bestimmten Größe in Wildbachgebieten gemacht werden kann. Diese Aussage gilt ähnlich auch für geschiebeführende Hochwasserereignisse in Wildbächen. In diesem Fall kann allerdings eine engere Verknüpfung mit einem Hochwasser einer bestimmten Jährlichkeit gemacht werden. Falls Daten über frühere Ereignisse vorhanden sind, ist dies oft eine sehr wichtige Information, auch wenn in der Regel damit keine statistischen Auswertungen im engeren Sinne gemacht werden können.

Die wichtigsten Faktoren im Zusammenhang mit dem Auftreten von Murgängen sind die Identifizierung möglicher Anrisszonen und Feststoffherde (und damit der Ereignisgröße) sowie die Abschätzung der Ereignishäufigkeit. Die Ereignisgröße (Feststofffracht oder Murenfracht) ist einer der wichtigsten Parameter, und deren Bezug zur Ereignishäufigkeit ist für die Gefahrenbeurteilung von großer Wichtigkeit. In murfähigen Wildbächen ist in der Regel die Murenfracht (wesentlich) größer als die Fracht eines Hochwasserereignisses mit nur fluvialen Geschiebetransport und damit für die Gefahrenbeurteilung relevanter.

#### Frequenz (Häufigkeit)

Die Frequenz oder Häufigkeit beschreibt die Anzahl von Ereignissen bestimmter Größe, die innerhalb einer Zeitspanne auftreten. Für Wildbachereignisse wird die Ereignishäufigkeit in der Regel als Jährlichkeit (Wiederkehrintervall)  $T$  ausgedrückt (ONR 24800).

Bei Wildbachereignissen mit fluvialen Geschiebetransport (bzw. Feststofftransport) wird die Häufigkeit meistens über die Häufigkeit eines Hochwasserereignisses bzw. des entsprechenden Niederschlagsereignisses bestimmt.

Die zuverlässigste Abschätzung der möglichen zukünftigen Ereignishäufigkeit beruht auf Angaben über vergangene Ereignisse. Eine wichtige Quelle sind historische Dokumente (auch mündliche Überlieferung). Eine andere Möglichkeit besteht in der Analyse und Interpretation geomorphologischer Spuren. Oft sind die Angaben über frühere Ereignisse beschränkt und unvollständig. Die Abschätzung der Auftretenshäufigkeit von Ereignissen bestimmter Größe ist nur grob und nicht mittels statistischer Methoden möglich. Man wird deshalb auch mit Szenarien arbeiten, welchen ungefähre Wiederkehrperioden zugeordnet werden. Einen sehr groben Hinweis kann man allenfalls aus der Häufigkeit von Grenzniederschlagsituationen ableiten, wobei diese Betrachtung in der Regel mit größeren Unsicherheiten behaftet ist.

Bei Murgängen beeinflussen primär der Entstehungsort und

die Auslöseart die Ereignisgröße. Beide Elemente zusammen sind wesentlich für das Fließverhalten im Gerinne. In einem Gebiet mit beschränktem Feststoffpotenzial („Jungschutt“-Wildbach) können die Häufigkeit und die Größe zukünftiger Murgänge davon abhängen, wo im Gerinne in der Vergangenheit bereits wie viel Material ausgetragen wurde (Zimmermann et al., 1997).

## 2.4. Belastungen des Systems

Das System Wildbach wird im Bemessungsfall von folgenden Elementen belastet:

- Wasser (aus Niederschlag oder Schneeschmelze),
- Geschiebe (Sedimente) aus Massenverlagerungsprozessen und
- Wildholz aus verschiedenen Eintragsvorgängen.

Erfahrungsgemäß sind die Belastungen räumlich und zeitlich unterschiedlich verteilt, so dass bei entsprechender Größe eines Einzugsgebietes auch von unterschiedlichen Szenarien ausgegangen werden sollte. Dabei kann auch die Frage der Frequenz und Magnitude näher beleuchtet werden, indem in den unterschiedlichen Szenarien den möglichen Belastungen (z.B. Geschiebeherde, Verkläuerungen) entsprechende Mobilisierungswahrscheinlichkeiten unterstellt werden (vgl. Dispositionsklassen nach ETAlp, 2003a).

Belastungen aus Wasser und deren Ermittlung (Niederschlagsmessung, Verteilung über die Zeit und Fläche, Starkregenzellen, ...) wurden im Rahmen von OptiMeth nicht betrachtet.

Wichtige Eingangsgröße zur Beurteilung möglicher Feststoffbelastungen ist das Geschiebe- bzw. Schwemmholzpotenzial, d.h. die Feststoffmenge, die im Einzugsgebiet bereit steht und unter gewissen Randbedingungen (Grund- und variable Disposition) mobilisiert werden kann. Einen Eindruck davon gewinnt man durch Karten und Luftbilder oder auch durch verschiedene empirische Schätzformeln (Rickenmann, 2013), am besten jedoch durch eine Geländebegehung.

Im Rahmen von OptiMeth wurden aufgrund der geringen Genauigkeit und Bedeutung keine Schätzformeln oder Verfahren betrachtet, die ausschließlich das Geschiebepotenzial ermitteln.

Einige Methoden ermitteln sowohl das Feststoffpotenzial, als auch tatsächlich transportierbare Feststofffrachten von Lockermaterial (z.B. Sedex). Diese werden in Kapitel 3.2 vorgestellt. Für den Bereich Schwemmholz bestehen noch wenige Erfahrungen bezüglich dem tatsächlich mobilisiertem Potenzial. Im Kapitel 3.3 werden sowohl Methoden zur Ermittlung der Potenziale als auch zur Ermittlung der Frachten vorgestellt.

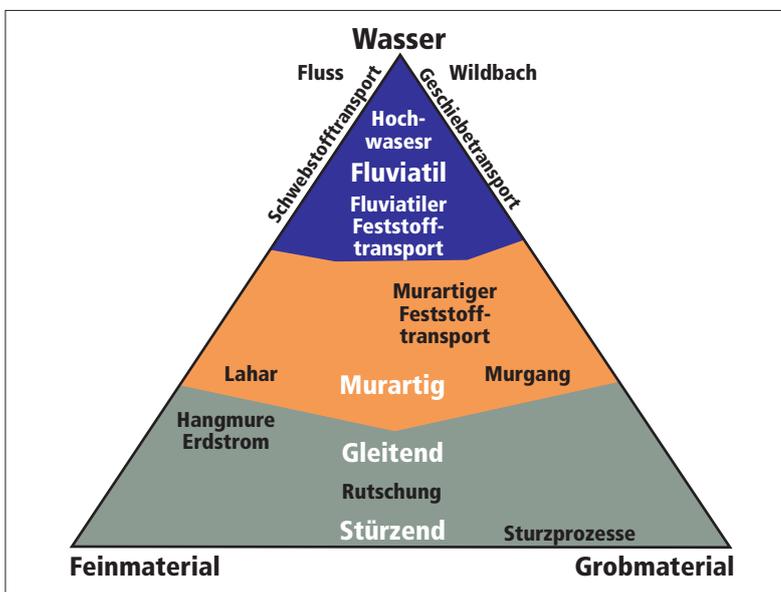


Abb. 3: Verlagerungsprozesse in Abhängigkeit des Komponentenanteils (nach Philipps & Davies, 1991)

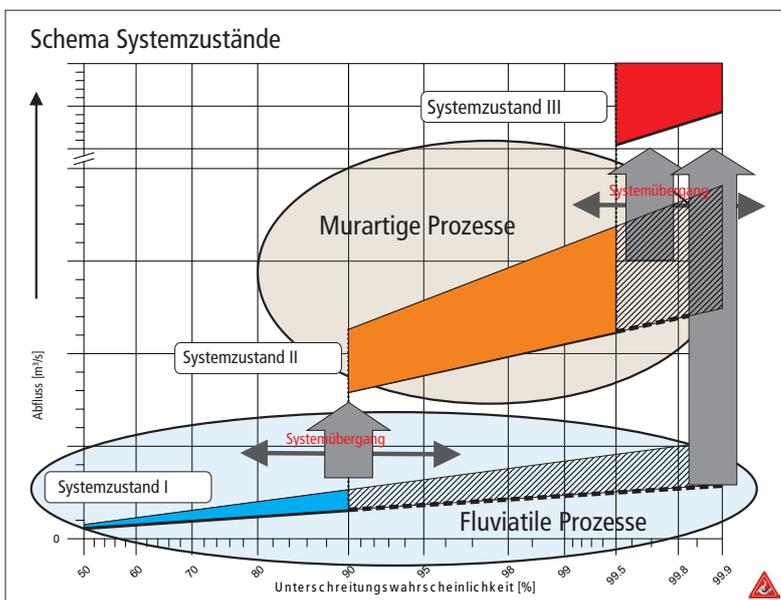


Abb. 4: Schemaskizze Systemzustände von Wildbacheinzugsgebieten (BOKU)

## 2.5. Abschätzung von Leitprozessen

Der vorhandene Ablagerungskegel gibt Auskunft über die dominierende Prozessart. Sowohl die Interpretation der „stummen Zeugen“ als auch der geomorphologischen Kennzahlen ermöglicht die Festlegung eines Leitprozesses, der aber auch mit den historischen Aufzeichnungen übereinstimmen sollte.

Prinzipiell setzen sich die Verlagerungsprozesse aus den Komponenten Wasser, Geschiebe (Sedimente) und Wildholz zusammen. Je nach Mobilisierungsintensität dieser Inhaltsstoffe bilden sich die oben genannten Prozesse aus, die man in die Gruppe der fluvialen und murartigen Prozesse einordnen kann (vgl. Abb. 3). Der Übergang zwischen beiden Gruppen ist von der Intensität der Feststoffbereitstellung abhängig. Sind z.B. leicht mobilisierbare Geschiebeherde vorhanden, kann bereits ein geringer Wasserabfluss (entspricht einer hohen Frequenz des Ereignisses) einen Systemwechsel zu murartigen Prozessen (Systemzustand II, vgl. Abb. 4) hervorrufen. Umgekehrt wird bei Fehlen von relevanten Geschiebeherden der Wildbach im Systemzustand I (fluvial)

verharren. Wesentlich scheint die Festlegung der Jährlichkeit des Systemüberganges, weil damit die Bestimmung der auftretenden Leitprozesse verbunden ist.

Darüber hinaus können Extremereignisse jenseits jeglicher Bemessungsereignisse auftreten, welche im Systemzustand III zusammengefasst werden.

Dies macht es auch unabdingbar, die zunächst durchgeführte Abschätzung der Leitprozesse in den weiteren Schritten und bei Geländebegehungen immer wieder zu verifizieren.

## 3. Abflussbildung und Feststoffmobilisierung

### 3.1. Hydrologie (Hy): Abflussbildung und -konzentration

#### 3.1.1. Überblick Methoden

Folgende Methoden wurden im Rahmen von OptiMeth näher betrachtet:

#### Gruppierung von Methoden

Es lassen sich vereinfacht drei Methodengruppen zur Bestimmung der hydrologischen Bemessungsgrößen abgrenzen:

- a) Statistische Ansätze (basierend auf Pegelstatistik)
- b) Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle)
- c) Hüllkurven (i.d.R. ohne Betrachtung der Jährlichkeit)

a) Bei den statistischen Ansätzen werden lange Abflussmessreihen benötigt, um eine belastbare Auswertung vornehmen zu können.

Falls im betrachteten Einzugsgebiet (EZG) ein Pegel mit einer entsprechend langen Datenmessreihe vorhanden ist, kann der Abflusswert einer bestimmten Jährlichkeit direkt über eine Auswertung der Pegelaufzeichnungen ermittelt werden. Hierfür gibt es mehrere Verfahren und Programme, auf die im Rahmen von OptiMeth nicht näher eingegangen wird, da die Anwendung durch Spezialisten auf diesem Fachgebiet erfol-

	Verfahren / Modell / Programm	Abflusswert	HQ <sub>T</sub> *	Ganglinie	Anhang
Statistik	Statistische Auswertung des HQT aus Pegelwerten ( <b>Pegelstatistik</b> )	x	x		Hy.1
	Modell <b>BaD7</b> (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x	x		Hy.2
	Modell <b>Momente</b> (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x	x		Hy.3
N-A-Modelle	Modell <b>HecHMS</b> (Einheitsganglinienverfahren, SCS)	x	x	x	Hy.4
	Modell <b>IHK-HW</b> (Einheitsganglinienverfahren, Lutz)	x	x	x	Hy.5
	Programm <b>Zemokost</b> (Laufzeitverfahren)	x	x	x	Hy.6
	Programm <b>EGLSYN</b> (Einheitsganglinienverfahren, SCS)	x	x	x	Hy.7
	<b>EGL-X</b> : Flächendetailliertes NA-Modell auf Excel-Basis	x	x	x	Hy.8
	Verfahren <b>ClarkWSL</b> (Softwarepaket HAKESCH)	x	x	x	Hy.9
	Verfahren nach Kölla " <b>Kölla meso</b> " (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x	x		Hy.10
	<b>Modifiziertes Fließzeitverfahren</b> (Softwarepaket HAKESCH)	x	x		Hy.11
	Verfahren nach <b>Taubmann / Thiess / Chow</b> (Softwarepaket HAKESCH)	x	x		Hy.12
Hüllkurven	Verfahren nach <b>Wundt</b>	x			Hy.13
	Modell <b>GIUB'96 Regionalisierung</b> (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x	x		Hy.14
	Verfahren nach <b>Kürsteiner</b> (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x			Hy.15
	Verfahren nach <b>Müller-Zeller</b> (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x			Hy.16

\*HQT = Es kann ein Abflusswert mit einer konkreten Jährlichkeit ermittelt werden

Tabelle 3-1 Überblick Methoden Hydrologie

gen sollte. Diese Art der Bestimmung des Abflusswertes liefert das Ergebnis mit dem geringsten Unsicherheitsbereich.

Falls im betrachteten EZG kein Pegel mit einer entsprechend langen Datenmessreihe vorhanden ist, kann der Abflusswert auch über statistisch ausgewertete Referenzgebiete abgeleitet werden. In diesen Referenzgebieten, für die lange Abflussmessreihen vorliegen, werden die beiden „Momente“ [mittlere Jahreshochwasserspitze mHQ und Standardabweichung der Jahreshochwasserspitze s(HQ)] der hydrologischen Grundgleichung

$$HQ_x = mHQ + K_x \cdot s(HQ)$$

bestimmt und in Bezug zu den dortigen Gebietsparametern (z.B. Neigung, Ödlandanteil, etc.) gesetzt. Über die Gebietsparameter des betrachteten EZG kann dann der Abflusswert abgeschätzt werden. Über den Faktor K<sub>x</sub> wird die Jährlichkeit des Abflusswertes bestimmt.

Eine Ganglinie kann mit Hilfe der statistischen Ansätze nicht berechnet werden. Die Qualität der Ergebnisse der statistischen Auswertung steigt mit der Länge der vorhandenen Abflussmessreihe.

b) Bei den N-A-Modellen wird der Abfluss über den Niederschlag berechnet. Dabei geht man vereinfachend davon aus, dass aus einem T-jährlichen Niederschlag, mit der für das Einzugsgebiet maßgebenden Niederschlagsdauer bei sonst mittleren Abflussverhältnissen ein T-jährlicher Abfluss erzeugt wird. Für die Berechnung der Abflussbildung und Abflussverformung stehen in der Hydrologie verschiedene Verfahren zur Verfügung (einfache und aufwendigere, siehe Methodensteckbriefe). Bei den einfachen N-A-Modellen kann meist nur der Abflusswert für eine bestimmte Jährlichkeit und keine Ganglinie ermittelt werden.

Um die N-A-Modelle kalibrieren zu können, sind Abflussmessungen im berechneten Einzugsgebiet erforderlich. Ohne eine Kalibrierung ist die Qualität der Ergebnisse deutlich ge-

ringer und der Schwankungsbereich der Ergebnisse entsprechend groß.

c) Bei der Methode der Hüllkurve werden mehrere beobachtete, maximale Abflussspenden zu einer Hüllkurve ausgewertet (z.B.  $Q_{max} = a \cdot EZG^b$ ). Die Parameter a und b werden aus den beobachteten Ereignissen bestimmt.

Um einen Abflusswert zu erhalten, muss der Anwender nur wenige einfache Eingangsgrößen (z.B. die EZG-Größe) in die Formel einsetzen, um zu einem Ergebnis zu kommen. Abfluss- bzw. Niederschlagsmessreihen für das EZG werden nicht benötigt.

Das Ergebnis ist aber nur ein Abflusswert, i.d.R. ohne Jährlichkeit (Q<sub>max</sub>). Die Qualität ist entsprechend gering einzustufen, für eine erste grobe Einschätzung aber möglicherweise ausreichend.

Bei den Hüllkurvenansätzen kann unter Umständen eine beträchtliche Verbesserung erreicht werden, wenn Hüllkurven für homogene Hochwasserregionen gebildet werden. Kan (1995) und Weingartner (1999) haben als Grundlage für das Modell GIUB'96 über 700 Hochwasserspitzen ausgewertet.

Aus dem gesamtschweizerischen Datenkollektiv wurden Regionen mit vergleichbarem Hochwasserverhalten abgeleitet. Für alle Hochwasserregionen wurden Kennwerte bestimmt, welche die Abschätzung von 100-jährlichen Hochwasserspitzen und von Q<sub>max</sub>-Werten erlauben. Die Ergebnisse mit den regionalen Hüllkurven sind deutlich besser als mit dem generellen Ansatz für die ganze Schweiz.

### 3.1.2. Bemerkungen zu den Methoden

Die wesentliche Erkenntnis der Diskussion war, dass alle Teilnehmer der Arbeitsgruppe im Bereich der Wildbachhydrologie mit den gleichen Problemen zu kämpfen haben.

Die Grundlagen- / Eingangsparameter für fast alle N-A-Modelle sind im Wesentlichen gleich, fließen aber nicht in gleicher Weise ins Modell ein. Die gängigen N-A-Modelle basieren alle auf Einheitsganglinienverfahren und meist auf

	Art des Ergebnisses	erforderliche Abfluss- / Niederschlagsdaten	Qualität der Ergebnisse
<b>Statistische Ansätze (Pegel im EZG)</b>	Abflusswert mit Jährlichkeit; keine Ganglinie	lange Abflussmessreihen im EZG	Abnahme ↓
<b>aufwendigere N-A-Modelle</b>	Abflusswert mit Jährlichkeit und Ganglinie	Niederschlagsdaten; Abflussmessungen zur Modellkalibrierung	
<b>Statistische Ansätze (kein Pegel im EZG)</b>	Abflusswert mit Jährlichkeit; keine Ganglinie	lange Abflussmessreihen in Referenzgebieten	
<b>einfache N-A-Modelle</b>	Abflusswert mit Jährlichkeit; keine Ganglinie	Niederschlagsdaten; Abflussmessungen zur Modellkalibrierung	
<b>Hüllkurven</b>	Abflusswert i.d.R. ohne Jährlichkeit; keine Ganglinie	keine	

Tabelle 3-2: Gruppierung der Methoden Hydrologie

dem „SCS-Verfahren“ des Natural Resources Conservation Service (NRCS), bekannt auch unter dem Namen „Soil Conservation Service“ (SCS) (vgl. USDA, SCS, 1955). Dabei wird der abflusswirksame Anteil des Niederschlages in Abhängigkeit der Niederschlagshöhe und einer Gebietskenngröße (CN – Curve Number) ermittelt und mit einer SCS-Einheitsganglinie zur Definition der Abflussverformung der Abfluss errechnet. Sie können als gleichwertig angesehen werden. Z.T. wurden sie noch auf die regionalspezifischen Besonderheiten angepasst.

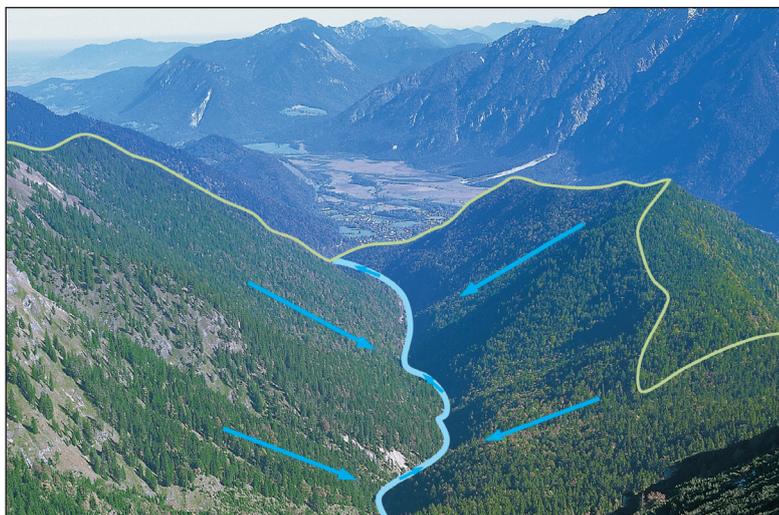
Die statistischen Verfahren und daraus abgeleiteten Regionalisierungen gelten immer nur für die Bereiche, für die sie abgeleitet wurden und sind damit nicht direkt übertragbar. Die Methodik ist zwar übertragbar, scheitert aber in der Regel an der nicht vorhandenen bzw. unsicheren Datenlage (Abflusserien an Pegeln in vergleichbaren Regionen).

Einfache Methoden werden vom Praktiker immer noch bevorzugt angewandt (z.B. Wundt). Eine Methode, die wesentlich besser und zuverlässiger als die anderen ist, gibt es (derzeit) nicht.

Alle Methoden zur Bestimmung der Hochwasserabflüsse für Wildbäche sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies resultiert vor allem aus dem Fehlen von Pegeln und Messwerten in kleinen Einzugsgebieten, um die Modelle kalibrieren zu können.

Auch die Niederschlagsdaten, die den NA-Modellen zu Grunde gelegt werden, weisen einen nicht unerheblichen Toleranzbereich auf (statistische Auswertung).

Probleme bereiten ebenfalls die schlechte Zugänglichkeit im Gelände und die technischen Möglichkeiten zur Bestimmung von Extremabflüssen bei hohen Feststoffanteilen.



Einzugsgebiet (gelb), Abflusskonzentration (dunkelblau), Abflussfortpflanzung (hellblau); Lahnenwiesgraben; Landkreis Garmisch-Partenkirchen; Foto: LfU

Methode	EZG-größe	AUT	AUT	BY	CH	CH	CH
		Fischbach	Schmittenbach	Laingraben	Längenbachgr.	Erlenbach	Rotenbach
		11,9 km <sup>2</sup>	10,4 km <sup>2</sup>	2,3 km <sup>2</sup>	2,21 km <sup>2</sup>	0,72 km <sup>2</sup>	1,69 km <sup>2</sup>
<b>Pegelstat.</b>	<b>HQ<sub>100</sub></b> [m <sup>3</sup> /s]	-	-	-	-	-	<b>16,7</b>
<b>Wundt 90</b>	- [m <sup>3</sup> /s]	<b>60</b>	<b>56</b>	<b>22,6</b> 21,1 (n. Länger)	<b>22,1</b> 20,5 (n. Länger)	<b>11,4</b> 9,3 (n. Länger)	<b>18,9</b> 17,0 (n. Länger)
<b>HEC-HMS</b>	<b>HQ<sub>100</sub></b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>89</b>	<b>63</b>	<b>7,7 **</b>	<b>10 **</b>	<b>6,5 **</b>	<b>12 **</b>
	N-dauer* [h]	1,5	<b>1</b>	3	1	1	1
	N-Verteilung*	mittenbet.	Mittenbet.	mittenbet.	DVWK	DVWK	DVWK
<b>ZEMO-KOST</b>	<b>HQ<sub>100</sub></b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>84.2</b>	<b>62</b>	<b>6</b>	-	-	-
	N-dauer* [h]	<b>1,5</b>	<b>1</b>	1,5	-	-	-
	N-Verteilung*	-	-	-	-	-	-
<b>EGLSYN-SCS</b>	<b>HQ<sub>100</sub></b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>104-109</b>	<b>95</b>	<b>15,3</b>	<b>15,99</b>	<b>12,77</b>	<b>17,66</b>
	N-dauer* [h]	1,5	1	2	1	1	1
	N-Verteilung*	mittenbet.	mittenbet.	mittenbet.			
<b>HAKESCH</b>	<b>HQ<sub>100</sub></b> [m <sup>3</sup> /s]	-	-	-	<b>14,3</b>	<b>13,2</b>	<b>18,5</b>
	HQ <sub>100</sub> (Taubmann) [m <sup>3</sup> /s]	-	-	-	0,9	4,7	10
	HQ <sub>100</sub> (mod. Fließbz.) [m <sup>3</sup> /s]	-	-	-	10,3	13,1	19
	HQ <sub>100</sub> (Kölla) [m <sup>3</sup> /s]	-	-	-	7,6	13,1	10
	HQ <sub>100</sub> (Clark-WSL) [m <sup>3</sup> /s]	-	-	-	18,2	13,3	18
	HQ <sub>100</sub> (Müller) [m <sup>3</sup> /s]	-	-	-	29	13,9	23

\*N = Niederschlag

\*\* = CN II

Tabelle 3-3: Ergebnisse Vergleichsrechnungen

### 3.1.3. Vergleichsberechnungen

Für sechs kleine Wildbacheinzugsgebiete aus verschiedenen Bereichen der Alpen wurden hydrologische Vergleichsberechnungen durchgeführt. Es wurde mit dem SCS-Verfahren (enthalten im Programmpaket EGLSYN, Bayern), den in Österreich verwendeten Programmen HEC-HMS (SCS-Verfahren) bzw. Zemokost (Laufzeitverfahren) und dem schweizerischen Programmpaket HAKESCH gerechnet. Ausführliche Ergebnisse können dem Bericht (Anhang Hydrologie) entnommen werden.

Der Vergleich der Ergebnisse bei den beiden österreichischen und dem bayerischen EZG zeigt, dass mit dem Programm EGLSYN z.T. deutlich höhere Abflusswerte (bis zu Faktor 2,5) ermittelt wurden als mit HEC-HMS bzw. Zemokost (siehe Tabelle).

HAKESCH liefert bei den drei schweizerischen EZG einen rd. 1,5 bis 2-fach höheren Abflusswert als HEC-HMS.

Für die Streuung der Ergebnisse der Vergleichsrechnungen wurden zwei wesentliche Gründe genannt. Neben der Wahl der Curve-Number-Werte (CN-Werte) wirkt sich auch die Aufteilung in Teileinzugsgebiete erheblich auf das Ergebnis einer Berechnung aus.

Bei EGLSYN wird das EZG im Gegensatz zu HEC-HMS und Zemokost nicht in Teileinzugsgebiete aufgeteilt und damit werden durch die Aggregation der Parameter in der Regel ungünstigere Parameter gewählt. Zusätzlich wird zwar bei den synthetischen Einheitsganglinien eine mittlere Überlagerung der Teilzuflüsse berücksichtigt, in realen alpinen Gebieten mit stark unterschiedlichem Laufzeitverhalten ergeben sich jedoch bei einer flächendetaillierten Betrachtung häufig geringerer Spitzenabflüsse.

Die wichtigste Rolle bei der Anwendung der Methoden spielt die Abschätzung der Abflussbeiwerte durch den jeweiligen Bearbeiter. Die in der Literatur angegebenen CN-Werte streuen erheblich.

Welche Methode das bessere Ergebnis liefert, konnte anhand der durchgeführten Vergleichsrechnungen nicht beurteilt werden, da mit Ausnahme des Rotenbachs und des Erlenbachs (vgl. Anhang Hydrologie) keine Messwerte vorhanden sind.

Für die im Rahmen von OptiMeth durchgeführten Vergleichsrechnungen Hydrologie wurden keine Ortseinsichten durchgeführt. Der Aufwand für die Berechnung eines Einzugsgebietes mit einem Programm konnte somit auf rund einen Tag beschränkt werden.

Fazit der Vergleichsrechnungen (vgl. auch Nr. 3.8. im Anhang Hydrologie):

- Die Datengrundlagen unterscheiden sich zum Teil deutlich in den verschiedenen Ländern, was einen vollumfänglichen Vergleich sehr schwierig gestaltet.
- Die verwendeten Methoden sind mitunter stark auf die jeweiligen Datengrundlagen „zugeschnitten“ und nur bedingt übertragbar.
- Eine Berechnung mit mehreren Methoden wird empfohlen.
- Die korrekte Charakterisierung des Einzugsgebietes (Böden, Relief, ...) ist sehr wichtig.
- Wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben die Vor-

befeuchtung und die Art der Überregnung.

- Zur sachgerechten Ermittlung ist ausreichend Erfahrung und kritische Betrachtung der Ergebnisse nötig.
- Fehlende Pegel in kleinen Einzugsgebieten stellen ein großes Problem für die Entwicklung und Beurteilung der Methoden dar.

### 3.1.4. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl

Bei der Wahl der Methode sind folgende Fragestellungen entscheidend:

- Ziel der Berechnung:  
Welche Art von Ergebnis wird gewünscht? Reicht ein Hochwasser-Spitzenabflusswert aus oder muss z.B. für eine Rückhaltemaßnahme zusätzlich eine Ganglinie ermittelt werden? Wird ein Abfluss einer bestimmten Jährlichkeit benötigt oder nur ein Extremwert?
- vorhandene Abfluss- / Niederschlagsdaten:  
Liegen für das EZG Abfluss- / Niederschlagsdaten vor? Wie lange sind die Messreihen?
- Qualität des Ergebnisses:  
Reicht eine grobe Abschätzung des Abflusswertes, ohne das EZG näher zu betrachten, für ein frühes Planungsstadium aus oder muss der Toleranzbereich der Ergebnisse so gering wie möglich sein?

### 3.1.5. Anwendungshinweise

Zur besseren Abschätzung der Unsicherheiten sollten zur Bestimmung eines HQT-Wertes in der Regel mehrere Methoden parallel angewandt werden (vgl. Programmpakete -> CH). Es gibt nicht ein Modell oder eine Vorgangsweise, die die Realität am besten abbildet, sondern es ist immer eine Kombination von mehreren Modellen hilfreich um sich an die beste Abflussermittlung (Ganglinie, Scheitelwert) anzunähern.

Die bei der Ermittlung von Hochwasserabflüssen getroffenen Entscheidungen (z.B. Wahl der Modellparameter) müssen stets begründet und die Vorgehensweise dokumentiert werden. Der Modellanwender sollte über ausreichend Erfahrung verfügen. Allein die Anzahl der Parameter gibt keine Auskunft über die Genauigkeit des Modells. Die Sensitivität der Parameter sollte bekannt sein bzw. untersucht werden und bei der Wahl der Eingangswerte berücksichtigt werden, z.B. durch Vergleichsrechnungen.

Durch eine Ortseinsicht lassen sich die in der Literatur angegebenen CN-Werte wesentlich besser abschätzen als nur auf Grundlage von Orthofotos, o.ä.. Wesentlich ist eine korrekte Charakterisierung der Einzugsgebiete entsprechend der unterschiedlichen Böden, der unterschiedlichen geologischen Voraussetzungen, der Nutzung und dem Gewässernetz (Geometrie, Rauigkeit und Topologie). Es können nur ähnliche Einzugsgebiete miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse eines Modells sollten stets kritisch hinterfragt und mit den bereits gemachten Erfahrungswerten abgeglichen werden. Die Plausibilität kann z.B. über die Ereignisdokumentation in Verbindung mit dem Gewässerregime erfolgen.

Zudem sollten außergewöhnliche hydrogeologische Verhältnisse bei Abflusswerten berücksichtigt werden. Beispielsweise wurde im Rahmen des Projektes HOWATI-HochWasser

Tirol eine hydrogeologische Bewertung in Leiteinzugsgebieten durchgeführt. Das Ziel war die Einschätzung unterirdischer Abflussprozesse, die als Grundlage für die Abflussmodellierung dienen. Wichtig dabei ist die Unterscheidung zwischen oberflächlichem, seichtgründigem und tiefgründigem Abfluss, da dadurch die Speicherfähigkeit des Gebietes in Modellen besser erfasst wird. Zur Beschreibung wurde eine Methodenkombination aus Hydrogeologie und Geomorphologie entwickelt und in zahlreichen Kleineinzugsgebieten getestet und verbessert. Details dazu finden sich in der Originalarbeit von Rogger et. al. (2011) sowie Pirkl (2000).

Gegebenenfalls sollten mehrere Rechnungen mit unterschiedlicher, aber realistischer Parameterwahl und mit unterschiedlichen Aufteilungen des EZG durchgeführt werden. Die Art der Überregnung (mittenbetont, eher nur in Teilbereichen des Einzugsgebietes, ...) beeinflusst das Ergebnis ebenfalls wesentlich – hier können Beobachtungen und die Ereignisdokumentation helfen. Wesentlich ist dabei auch die Möglichkeit / Unterscheidung der Diskretisierung im Einzugsgebiet (nicht flächendetaillierte bzw. flächendetaillierte Modelle). Eine Unterteilung ist immer dann erforderlich, wenn die Homogenität im EZG nicht gegeben ist. Grundlage für die Aufteilung können die Topographie und Hinweise auf Schauerzellen bieten. Für Schauerzellen stehen allerdings keine systematisch erfassten Auswertungen zur Verfügung. Damit ist die objektive Beurteilung solcher Gebiete schwer möglich.

Der Leitfaden zur Niederschlag-Abflussimulation (ÖWAV, 2013) gibt weitere Hinweise zur Steigerung der **Qualität einzelner Modellierung**.

### 3.1.6. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Verbesserung der Abflussermittlung an Wildbach-EZG stellt ein wichtiges Ziel dar, ist aber mit großen Schwierigkeiten behaftet.

Die Festlegung der **Vorbefeuchtung** ist für die Ergebnisse wesentlich – hier ist weiterer Forschungsbedarf zu den Datengrundlagen und der methodischen Umsetzung vorhanden (Bsp. Fernerkundungsmethoden zur Abschätzung des Bodenfeuchtezustandes).

Es ist zu prüfen, ob die **Abflussbeiwerte**, z.B. EGAR-Daten und die Erkenntnisse aus zahlreichen durchgeführten Beregnungsversuchen auf kleinen Flächen helfen können, die Bodeneigenschaften und Abflussbeiwerte bzw. CN-Werte in Zukunft bezogen auf die Ebene der Einzugsgebiete besser einschätzen zu können.

Wesentlich erscheint die Verifizierung der Modellergebnisse mit **regionalisierten Kennwerten**. Über eine sukzessive Verdichtung der Messdaten in kleinen EZG können regionalisierte Parameter (z.B. Abflussspenden, Abflussbeiwerte, etc.) verbessert und so die Unsicherheiten der Modellrechnungen eingeschränkt werden.

Ein Grundproblem bei der Entwicklung und Anwendung von Hochwasserabflussmodellen ist einerseits die Heterogenität kleiner Einzugsgebiete, andererseits aber auch das **Fehlen von geeigneten kleinen beobachteten Einzugsgebieten mit langen Messreihen**. Zusätzliche Probleme ergeben sich aus den technischen Grenzen zur Ermittlung von

Abflüssen im Extrembereich.

Eine flächendeckende Erfassung durch Pegel ist für die hydrographischen Dienste auf Grund der Errichtungskosten und des Betreuungsaufwandes nicht realistisch. Daher ist eine Auswahl an gut beobachteten, repräsentativen Einzugsgebieten (unterschiedlicher Typ, Charakterisierung, etc.) zu empfehlen. Die Übertragung von Parametern und Erfahrungen aus beobachteten Einzugsgebieten ist eine wesentliche Hilfestellung für die Ermittlung und Plausibilisierung von Abflüssen in unbeobachteten Gebieten. Die Messtechnik sollte im Extrembereich verbessert werden.

### 3.2. Feststoffpotenzial und -fracht (1): für Geschiebetransport und Murgang (Ge)

Gemäß ONR 24800 (2009) versteht man unter Feststoffpotenzial das langfristig mobilisierbare Feststoffvolumen, das in den Erosionsherden (Feststoffherden) gespeichert ist. Dieses ist somit unabhängig vom Einzelereignis und dessen Ereignishäufigkeit.

Die Feststofffracht bezeichnet dagegen jenen Teil des Feststoffpotenzials, der während der gesamten Dauer eines (Bemessungs-)Ereignisses an einer bestimmten Stelle des Bachlaufes transportiert wird (nach ONR 24800, 2009). Sie ist damit direkt von der Magnitude und Frequenz (vgl. Kapitel 2.3) des betrachteten Ereignisses abhängig (siehe auch Rickenmann, 2013).



Geschiebepotenzial in einem Seitengraben des Söllbaches; Gemeinde Bad Wiessee; Landkreis Miesbach; Foto: K. Mayer, LFU

Empirische Ansätze zur Abschätzung der Muren- oder Feststofffracht eines Wildbachereignisses enthalten in der Regel einfache Parameter des Einzugsgebietes. Sie erlauben die Abschätzung entweder eines oberen „Grenz“-Wertes oder eines mittleren Wertes der möglichen Muren- oder Feststofffracht. Der Vergleich zwischen beobachteten Frachten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße zeigt aber eine große Streuung von mehreren Größenordnungen; diese Streuung kann mit solchen Schätzformeln nur sehr grob mitberücksichtigt werden. Solche Ansätze kommen daher eventuell auf Stufe Gefahrenhinweiskarte zur Anwendung.

Es kann in speziellen Fällen hilfreich sein, eine für die Gefahrenbeurteilung geschätzte Feststofffracht mit empirischen Werten von früheren Ereignissen und Beobachtungen zu vergleichen. Hierfür sind gute Ereignisdokumentationen sehr hilfreich. Weitere beispielhafte Informationsquellen können sein: Zusammenstellung der spezifischen Geschiebefrachten von Wildbachereignissen der Schweiz gruppiert nach der vorherrschenden Lithologie des Gebietes, d.h. für Ereignisse in den Kalkalpen, im Kristallin, in Molasse- und Flyschgebieten (Spreafico et al., 2005) oder Projekt HOWATI (vgl. Rogger et al. (2011) sowie Pirkl (2000)).

Für die Entwicklung zuverlässigerer Ansätze müssen insbesondere die geologischen, geomorphologischen und hydrologischen Besonderheiten besser berücksichtigt werden (wozu noch weitere Untersuchungen erforderlich sind). Für eine genauere Beurteilung des Feststoffpotenzials (Stufe Gefahrenkarte), welches während eines Murgangereignisses mobilisiert werden kann, ist eine geologisch-geomorphologische Beurteilung des Einzugsgebietes zu empfehlen, wobei der Einbezug eines geographischen Informationssystems hilfreich sein kann. Die potentiellen Entstehungsgebiete von Murgängen sind v.a. steile Rinnen mit viel Geschiebe oder instabile Hänge. Letztere sind auch von Bedeutung für die Entstehung von Hangmuren und den weiteren Materialeintragen entlang des Fließweges.

### 3.2.1. Überblick Methoden

Folgende Methoden wurden im Rahmen von OptiMeth näher betrachtet:

	Methoden	Anlage
Schätzverfahren	SEDEX	Ge.1
	GERTSCH	Ge.2
	ETAlp: Geschiebepotenzialband / -frachtdiagramm	Ge.3

Tabelle 3-4: Überblick Methoden Feststoffpotenzial und -fracht (1): für Geschiebetransport und Murgang (Ge)

### 3.2.2. Bemerkungen zu den Methoden

Wie viel Geschiebe bei welchem (Niederschlags-)Ereignis im EZG verfügbar ist, kann nur sehr schwer abgeschätzt werden (z.B. Anbruchszszenarien). Hier kommt es auf die individuelle Einschätzung eines Experten mit guten geomorphologischen Kenntnissen an. Modelle zur Berechnung gibt es hierfür der-

zeit nicht und sind nach Einschätzung der Teilnehmer in naher Zukunft auch nicht zu erwarten.

**SEDEX** ist eine Methode, die den Experten helfen soll, das Geschiebepotenzial im Gelände besser abzuschätzen (Frick et al., 2008, 2011). Sie ist im Wesentlichen eine Feldanleitung zur systematisierten Geländeaufnahme. Dabei werden mehrere mögliche Ereignisszenarien und die vorhandenen Unsicherheiten systematisch berücksichtigt. Sie liefert Resultate auf Stufe Detailplanung auf Basis einer von der Anwenderin oder dem Anwender vordefinierten Jährlichkeit. Ein Ziel ist es auch, die Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Beurteilungen sicherzustellen. Die Methode SEDEX stellt eine Verfeinerung eines ähnlichen, früheren Ansatzes dar, welcher von Lehmann (1993) entwickelt und in Spreafico et al. (1996) weiter diskutiert wurde.

Die **Methode „Gertsch“** dient der Abschätzung der Ereignisgröße bei Murgängen und fluvialem Geschiebetransport in Wildbächen (Gertsch, 2009). Ziel der Methode ist die Abschätzung der ereignisspezifischen Geschiebefracht am Kegelhalbs für Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode von mehr als 100 Jahren. Die Methode ermöglicht auch einen hohen Grad an Nachvollziehbarkeit der Beurteilung. Es wird davon ausgegangen, dass das Ausmaß der Geschiebemobilisierung in einem Gerinneabschnitt erstens von den Bedingungen im Gerinneabschnitt selber, zweitens von den Bedingungen und Prozessen in oberhalb liegenden Gerinneabschnitten und drittens von allfälligen Schwellenprozessen im Gesamtsystem beeinflusst wird.

Das **Abstrahierte Gerinnesystem bzw. Geschiebefrachtdiagramm** (basierend auf ETAlp, 2003) kombiniert die Ermittlung der Feststofffrachten unter Berücksichtigung verschiedener Dispositionen der Geschiebeherde mit den daraus resultierenden Gerinneprozessen. Die Umsetzung der Methode erfolgt auf Basis von Expertenwissen.

Die Ermittlung des Geschiebepotenzials erfolgt getrennt für Gerinne (durchflossener Querschnitt), Böschungen (ungefähr eine Baumlänge), Gerinneabhängungen und Talflanke.

Für diese Betrachtungsbereiche werden alle potenziellen Geschiebeherde unter Ansprache des vermuteten Abtragsprozesses ausgewiesen. Die Geschiebeherde werden hinsichtlich Lage, Ausdehnung, Aktivität, Mächtigkeit, Relevanz für das Gerinne (Dispositionsklassen nach ETAlp) und Abtragsprozess abgegrenzt und quantitativ erfasst.

Dadurch kann das Geschiebepotenzial auf ein Ereignispotenzial bestimmter Frequenz reduziert werden.

Die Darstellung kann mit dem **Geschiebepotenzialband** erfolgen.

Berechnungen zum fluvialen Geschiebetransport sind angezeigt, wenn in flacheren Wildbachgerinnen die Auftretenswahrscheinlichkeit für Murgänge gering ist. Dann ist es sinnvoll, Abschätzungen zu möglichen Ereignisfrachten mittels einer Integration des Geschiebetransportes über eine Hochwasserganglinie zu machen. Bei den Berechnungen zum fluvialen Geschiebetransport ist zu berücksichtigen, dass die Transportformeln eine maximale Geschiebetransportrate er-

geben, welche durch den Abfluss und das Fließverhalten (Hydraulik) bestimmt ist. Gerade in Wildbächen können aber die transportierten Geschiebefrachten auch wesentlich von der Geschiebeverfügbarkeit abhängen bzw. begrenzt werden.

### 3.2.3. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die **Feststoffmobilisierung** und die Feststoffaufnahme entlang des Fließweges sind komplexe Prozesse, die schwierig zu quantifizieren sind. Hier sind weitere detaillierte Felduntersuchungen nötig, welche auch helfen können, halbquantitative bzw. erfahrungsbasierte Methoden zu verbessern und so die Überlegungen zu Magnitude und Frequenz der Ereignisse unterstützen.

Hierzu gehören:

- Regelmäßige Vorher-Nachher-Vergleiche von Feststoffherden z.B. durch Befliegung, LaserScan-Aufnahmen oder andere Messmethoden -> Ziel: Quantifizierung der Abtragsmengen und damit Datenbasis für Plausibilisierung und ggf. Validierung der Methoden
- Detaillierte Beobachtungen der Vorgänge nach einem Ereignis (z.B. Nachböschungsvorgänge) zum besseren Verständnis der Prozesse, welche zu einer kurzfristigen erneuten Geschiebebereitstellung nach einem Ereignis führen. Damit könnte die zeitliche Veränderung der Geschiebeverfügbarkeit besser verstanden und berücksichtigt werden
- Bezüglich der Einschätzung der Häufigkeit von Wildbachereignissen wäre es sinnvoll, weitere Untersuchungen im Sinne einer **Typisierung von Wildbächen und charakteristischer Ereignisaktivität** analog zum Ansatz Zimmermann et al. (1997b) durchzuführen. Aufbauend auf DIN 19663 (1985), Kapitel 4.10 Wildbachtypen, könnten erweiterte Klassifikationen nach typischen Geschiebeherden vertiefte Informationen über die Geschiebebereitstellung im Einzugsgebiet geben und auf transport- oder feststofflimitiertes Verhalten hinweisen.

### 3.3. Feststoffpotenzial und -fracht (2): Schwemmholz (S)

#### 3.3.1. Überblick Methoden

	Methoden	Anhang
Formel	<b>Schätzformeln</b> Schwemmholzpotenzial bzw. -fracht	S.1
	<b>Schätzverfahren</b>	
	<b>LASP</b> – luftbildbasierte Abschätzung	S.2
	<b>belop</b>	S.3
	<b>Oeko-B</b>	S.4
	Schwemmholztransportindikatoren	S.5

Tabelle 3-5: Überblick Methoden Feststoffpotenzial und -fracht (2): Schwemmholz

Grundsätzlich ist im Bereich Schwemmholz, wie auch beim Geschiebe, zu unterscheiden zwischen dem im Einzugsgebiet vorhandenen *Schwemmholzpotenzial* und der tatsächlich bei einem Ereignis im Bach transportierten *Schwemmholzfracht*.

#### Gruppierung von Methoden

Die Methoden zur Ermittlung des Schwemmholzpotenzials können in zwei Gruppen gegliedert werden:

- Formelansätze: mehr oder weniger pauschal und empirisch, meist abhängig von der Einzugsgebietsgröße
- Schätzverfahren: in der Regel weiter untergliedert (siehe unten)

Den Schätzverfahren gemeinsam ist, dass sie verschiedene Teilpotenziale betrachten und aufsummieren. Eine Gruppe von Verfahren betrachtet hierzu verschiedene Mechanismen für den Eintrag des Holzes in das Bachbett:

- Ufererosion
- Rutschung
- Windwurf
- Schneedruck, Lawinen

Eine andere Gruppe betrachtet hierzu Teilpotenziale mit unterschiedlichen Mobilisierungswahrscheinlichkeiten

- Holz im Bach / Abflussbereich
- Holz am Ufer, das direkt in den Abflussbereich gelangen kann (ggf. weiter unterteilt)
- Holz in den Hängen, das nur durch Rutsch- oder Murprozesse in den Bach gelangt.

#### 3.3.2. Bemerkungen zu den Methoden

Derzeit existieren keine verifizierten und in der Praxis angewandten analytischen Verfahren: weder zur Berechnung von Holzpotenzial noch zum Holztransport, so dass beide Größen vorwiegend empirisch ermittelt werden. Dafür bildet auch die Ereignisdokumentation eine wichtige Grundlage. Die Zuordnung einer Jährlichkeit lässt sich am ehesten bewerkstelligen über denjenigen Anteil des Holzpotenzials, der beim Ereignis abtransportiert wird.

In der Schweiz wurden beispielhaft detaillierte Schwemmholzbilanzen für das Hochwasser 2005 ermittelt (vgl. WSL, 2009). Diese bestätigen im Wesentlichen die existierenden empirischen Ansätze.

Schwierigkeiten bereitet häufig die Frage nach dem Holzvorrat auf der Fläche, d.h. den entsprechenden Bestockungszahlen. Die Datengrundlagen sind hier sehr heterogen.

#### 3.3.3. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl

Grundsätzlich hängt die Methodenwahl von der erforderlichen Genauigkeit der Ergebnisse ab. Für einen Überblick über das Einzugsgebiet und eine erste Abschätzung der Volumina werden häufig die Formelansätze zielführend sein. Soll allerdings das Holzvolumen Grundlage für die Bemessung einer Holzurückhaltesperre sein, so werden detaillierte Abschätzverfahren zur Anwendung empfohlen. Dabei sollten zumindest die maßgeblichen bzw. unsicheren Teilpotenziale

durch eine Ortseinsicht im Gelände und einem Abgleich mit Dokumentationen vergangener Ereignisse verifiziert bzw. korrigiert werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlagen werden sicherlich einzelne Verfahren nur in einzelnen Ländern sinnvoll angewendet werden können. So baut z.B. das Verfahren LASP (vgl. Rimböck, 2001) auf die Hanglabilitätskartierung auf, die in Bayern flächendeckend zur Verfügung steht. Für die Anwendung in anderen Regionen müsste das Verfahren entsprechend angepasst werden.

### 3.3.4. Anwendungshinweise

Schwemmholz wird aufgrund seiner Abmessungen in nennenswertem Umfang erst bei größeren Abflüssen bzw. in größeren Fließquerschnitten überhaupt transportiert. Hier erscheint es sinnvoll, die Potenzialermittlung auf die Bach-



Schwemmholz an der Leitzach; Lkr. Rosenheim beim Hochwasser Juni 2013; Foto: J. Hartmann, LfU

abschnitte zu beschränken, in denen ein Holztransport überhaupt stattfinden kann (vgl. Rimböck, 2001; Rimböck und Strobl, 2001).

Im Rahmen der Gefahrenbeurteilung steht häufig die Abschätzung der Verklausungswahrscheinlichkeit von Brücken oder anderen Engstellen im Mittelpunkt. Diese ist stark abhängig von den Abmessungen des transportierten Schwemmholzes bzw. dem Vorhandensein von Wurzelstöcken. Zudem ist wichtig, ob der Transport einzeln oder schubweise erfolgt. Dafür sind keine Methoden bekannt – es muss hier eine Experteneinschätzung vorgenommen werden (Hinweise in Lange und Bezzola, 2006). Aufgrund der Unsicherheiten ist es sinnvoll, hier mehrere Verklausungsszenarien aufzustellen und zu betrachten.

Wichtig ist bei allen durch Schwemmholztransport gefährdeten Wildbächen, auf eine risikomindernde forstliche Bewirtschaftung hinzuwirken (vgl. INTERPRAEVENT, Hrg. 2011). So wurde im Rahmen einer Untersuchung am Schächen (Kanton Uri) gezeigt, dass eine Reduktion des Schwemmholzpotenzials um rund 50% durch eine gezielte Bewirtschaftung des ufernahen Waldes erreicht werden kann (vgl. Gunder und Wyler, 2009). Zudem könnte durch Zersägen des im Bach liegenden Totholzes eine weitere Reduktion der Verklausungsgefahr erreicht werden.

### 3.3.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Um den Erfahrungsstand in Zukunft zu erweitern, wird vorgeschlagen, **kommende Ereignisse vertieft auszuwerten**:

Nur mit weiteren Aufnahmen, die unmittelbar nach Ereignissen erfolgen müssen, kann die Datenbasis vergrößert und die Unsicherheit verkleinert werden. Wie Versuche der VAW-ETHZ zeigten, beeinflussen die größte Länge und der größte Wurzelstock-durchmesser das Verklausungsrisiko an Flussbauten maßgebend (Lange und Bezzola, 2006). Zusammen mit der transportierten Holzfracht (Festmeter) sollte auch die Geschiebefracht erfasst werden. Es gibt grundsätzlich eine Korrelation zwischen Geschiebetransport(-fracht) und Wildholzfracht.

Auf Basis der oben dargestellten Methoden erscheint es denkbar und sinnvoll, (halb)-automatisierte **GIS gestützte Verfahren** zu entwickeln, die abgestimmt auf die jeweilige Datenbasis der einzelnen Länder sind.

Eine **Kombination der Abschätzung des Feststoffpotenzials** (vgl. Kapitel 3.2) mit der Abschätzung des Schwemmholzpotenzials könnte weitreichende Synergien vor allem bei einer Verifikation im Gelände freisetzen. Potenzielle Rutschflächen oder Lawenstriche sind zudem in beiden Fällen zu berücksichtigen. Gegebenenfalls sollte eine Weiterentwicklung eines geeigneten Feststoffpotenzialverfahrens mit der Abschätzung der Schwemmholzfracht kombiniert werden.

Zur **Verklausungswahrscheinlichkeit** und im Bereich der Abschätzung von **Jährlichkeiten** ist noch weiterer Untersuchungs- und Forschungsbedarf gegeben.

Von Interesse wären auch einfache Methoden zur Ermittlung des Holzvorrates auf den Flächen, auf denen Datengrundlagen bisher fehlen.

## 4. Gerinneabfluss und Feststoffverlagerung

### 4.1. Hochwasserabfluss (Hw)

#### 4.1.1. Überblick Methoden

Folgende Methoden wurden im Rahmen von OptiMeth näher betrachtet:

	Methoden	Anhang
<b>Formeln</b>	„ <b>Fließformeln</b> “: Formeln zur Berechnung des Fließwiderstandes und der Energieverluste in steilen Gerinnen	Hw.1
<b>1D</b>	<b>HEC-RAS</b>	Hw.2
	<b>WSP-Win</b>	Hw.3
<b>2D</b>	<b>FLUMEN</b>	Hw.4 (=Gt.10)
	<b>FLO-2D</b>	Hw.5
	<b>Hydro_AS-2D</b>	Hw.6

Tabelle 4-1: Überblick Methoden Hochwasserabfluss (Hw)

Im Rahmen von OptiMeth wurden nur gängige, weit verbreitete Methoden näher betrachtet. Für Methoden, für die keine oder nur geringe Erfahrungswerte aus der Praxis vorliegen, wurden daher keine Methodensteckbriefe erstellt.

In Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie des ÖWAV (Habersack et al., 2011) sind weitere Methoden beschrieben.

### Gruppierung von Methoden

Die Methoden lassen sich grundsätzlich wie folgt einteilen:

- einfache Formeln bei stationär gleichförmigen Verhältnissen, i.d.R. für Einzelprofile angewandt
- 1D-Modelle
- 2D-Modelle

Abb. 6 gibt einen Überblick, welche „Modelle Reinwasser“ in Abhängigkeit der unterschiedlichen Parameter eingesetzt werden können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Oberlauf der Wildbäche fast nur 1D-Modelle angewandt werden können. Am Schwemmkegel kann je nach Zielsetzung der Berechnung zwischen 1D- und 2D-Modellen gewählt werden.

### 4.1.2. Bemerkungen zu den Methoden

#### Grundlagen der Abflussberechnung

Die Manning-Strickler-Gleichung ist die am häufigsten eingesetzte Formel zur Abflussberechnung. In der Gleichung sind Reibungsverluste über die empirisch ermittelten Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler ( $k_{st}$ ) zu berücksichtigen. Bei der Aus-

wahl der Rauigkeitsbeiwerte ist zu beachten, dass sie sich über die Wassertiefe verändern und nicht einheitlich über alle Bemessungsabflüsse an einem betrachteten Gewässerquerschnitt gelten. Eine Über- bzw. Unterschätzung der berechneten Abflussmengen wäre zu erwarten. Außerdem sollte bei der Auswahl der Rauigkeitsbeiwerte darauf geachtet werden, dass sie den Gewässerquerschnitt auch nach der Bauausführung noch zutreffend charakterisieren.

Für relative Abflusstiefen, d.h. das Verhältnis Abflusstiefe zur Korngröße,  $h/d < 4-7$  ist die Strickler-Gleichung im Prinzip nicht mehr gültig und die Reibungsverluste sind deutlich größer als bei größeren relativen Abflusstiefen (Rickenmann & Recking, 2011). Daher wird die Geschiebetransportkapazität von den herkömmlichen Modellen und Formeln erheblich überschätzt (Rickenmann, 2001, 2012). Bei einem Verhältnis  $h/d > 4-7$  passen log- bzw. ln-Formeln noch recht gut. Bei  $h/d < 4-7$  gibt es auch mit diesen Ansätzen gewisse Probleme (z.B. die Berechnung von „negativen“ Fließgeschwindigkeiten). Ein neuer Ansatz zur Abschätzung des Fließwiderstandes für raue Bachbetten mit relativen Abflusstiefen  $h/d < 4-7$  wurde von Ferguson (2007) vorgeschlagen. Zusammen mit einer Korrektur des Energieliniengefälles kann damit auch eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Geschiebefrachten in steilen und rauen Gerinnen erreicht werden (Rickenmann & Recking, 2011; Nitsche et al., 2011; Rickenmann, 2012) (Details s. in den Methodensteckbriefen).

In steilen und hydraulisch glatten Gerinnen sind stationäre Abflussverhältnisse kaum anzutreffen. Bei schießendem Abfluss und großen Froudezahlen ( $Fr > 2$ ) können sich Rollwellen ausbilden, die in regelmäßigem Abstand das Gerinne hinabströmen (Jirka und Lang, 2009, Abb. 5).



Abb. 5: Beispiel Rollwelle Gadria, Schlanders, Südtirol, BOKU

### Berechnungsmodelle

Für die Hydraulik sind mehrere 1D- bzw. 2D-Modelle auf dem Markt. 1D-Modelle waren bis vor wenigen Jahren noch weitgehend im Wildbachbereich Standard. Auch heute werden für die hydraulische Berechnung von einfacheren Systemen noch 1D-Modelle verwendet. Sobald jedoch Ausuferungen auftreten oder komplexe Strömungsverhältnisse (plötzliche Querschnittswechsel, Wechsel des Fließzustandes, Krümmungen etc.) entstehen, sollte ein 2D-Modell herangezogen werden. Insbesondere Wasserspiegelüberhöhungen in den Außenkurven von Krümmungen können bei den hohen Fließgeschwindigkeiten im Wildbachbereich durchaus Größenordnungen im Bereich von Dezimetern erreichen und sind dann nicht mehr vernachlässigbar. Darüber hinaus verlangen ereignisbezogene Schutzkonzepte u.U. instationäre Berechnungen (wie lange / welche Mengen ufern aus), die mit 1D-stationär-ungleichförmigen Modellen nicht erfasst werden können.



Ausuferung ohne Geschiebe beim Hochwasser an der Lavant; Juli 2012; in Kärnten;  
Foto: Mokoru

Der um ein Vielfaches größere Zeitaufwand im 2D-Bereich ergibt sich im Wesentlichen aus der Berechnungszeit: Der Modellierungsaufwand ist bei gleicher Aufgabenstellung unter Berücksichtigung aller erforderlichen Angaben (terrestrisch vermessene Querprofile, Bauwerksdaten, Parameter für Rauigkeiten) für 2D nicht wesentlich höher als für 1D. Allerdings benötigen 2D-Berechnungen sehr lange Rechenzeiten – oft von mehreren Stunden bis Tagen – gegenüber 1D-Berechnungen.

Sowohl in Österreich als auch in Bayern hat sich das 2D-instationäre-ungleichförmige Abflussmodell Hydro\_AS-2D in der Praxis bewährt (rechnet mit trockener Sohle als Anfangszustand; auch größer 10% Gefälle möglich). In Bayern wird

darüber hinaus das 1D-stationär-ungleichförmige Abflussmodell WSP-Win verwendet. HEC-RAS (1D) entspricht im Wesentlichen WSP-Win und wird in Österreich für die Reinwasserberechnung benutzt.

In der Schweiz werden u.a. HEC-RAS sowie die 1D- und 2D-Programme FLUMEN ([www.fluvial.ch](http://www.fluvial.ch)) sowie neuerdings (daher noch kein Steckbrief) BASEMENT ([www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch)) eingesetzt. Insgesamt sind die besprochenen hydraulischen Modelle in sich vergleichbar und basieren auf den gleichen Grundlagen (Formeln). Je steiler der Einsatzbereich der Modelle ist, desto größer werden die Unsicherheiten.

### 4.1.3. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl

Ausführliche Kriterien und Hinweise zur Wahl zwischen 1D- und 2D-Modellen finden sich im Anhang Hydraulik.

Zur hydraulischen Berechnung von Fließgewässern existieren Simulationsmodelle unterschiedlicher räumlicher Dimensionalität. Generell bewirkt dabei eine Reduzierung der Dimensionalität zwar eine Verminderung des Rechenaufwands, schlägt sich jedoch in der Genauigkeit der Ergebnisse nieder. Bei der Auswahl eines 1- oder 2-dimensionalen hydraulischen Modells sind im Wesentlichen folgende Aspekte zu berücksichtigen:

#### a) Ziel der Modellierung

- Grobabschätzungen und Vorbemessungen anhand ermittelter Wasserspiegellagen,
- Ermittlung von Überschwemmungsgrenzen,
- detailliertere Aussagen zum Strömungsgeschehen während eines Hochwasserereignisses.

Je komplexer die Aufgabenstellung, desto eher sollten mehrdimensionale Verfahren eingesetzt werden, die räumlich differenzierte Berechnungsergebnisse liefern. Zusätzlich ist zu beachten, dass neben der räumlichen auch eine zeitliche Differenzierung (instationäre Berechnung) für viele Aufgaben zwingend nötig ist, z.B. zur Analyse einer Flutwellenausbreitung, zur Ermittlung der Überflutungsdauer. Im Wildbachgeschehen liefern instationäre Berechnungen bereits bei der Bestimmung von Überschwemmungsgrenzen exaktere Ergebnisse, da Hochwasserabflüsse i.d.R. eine kurze Zeitdauer aufweisen.

#### b) Fluss- und Geländeform (Morphologie)

- geradlinige Gewässer mit regelmäßigen Querprofilen und stetig ansteigenden Vorländern,
- mäandrierende Gewässer,
- verzweigte Gewässer mit ausgeprägten und stark gegliederten Auebereichen.

Bei der 1d-Modellierung werden die Berechnungsgrößen über den gesamten Fließquerschnitt – oder bei manchen Modellen über Abschnitte des Fließquerschnitts – gemittelt, und die Fließbewegung wird nur in einer Hauptströmungsrichtung berücksichtigt. Entsprechend kann eine 1D-Modellierung nur dann zuverlässige Ergebnisse erbringen, wenn auch

in der Realität die Strömung im Wesentlichen eindimensional ist, so vor allem bei großen (Ab-)Flüssen mit geradlinigem Verlauf. Bei der 2D-Simulation werden in einem flächendeckenden engmaschigen Netz für jeden Knoten die Wassertiefe und die Fließgeschwindigkeit in zwei Richtungskomponenten berechnet. Bei komplexer Fluss- und/oder Vorlandtopographie liefern 2D-Modelle exaktere Ergebnisse als 1D-Modelle.

#### 4.1.4. Anwendungshinweise

Für 1D- und 2D-Modelle sollten laut Erfahrungen unterschiedliche Rauigkeiten angesetzt werden. In 2D-Modellen sollen demnach die Rauigkeiten geringer (d.h. „glatter“) gewählt werden.

Die Kalibrierung der Modelle ist vor allem im Wildbachbereich ein Problem. Deshalb sind Vergleichsrechnungen, Plausibilitätsprüfungen oder Sensitivitätsanalysen (z.B. kst-Änderungen bewirken wie viel?) zu empfehlen.

Die größte Herausforderung im Bereich der Hydraulik (bei allen Methoden) ist die Bestimmung geeigneter Rauigkeitsbeiwerte. Für die Planung und Berechnung gibt die Literatur eine große Bandbreite an Stricklerwerten vor. Zudem differieren häufig Planung und Ausführung bzw. der natürliche Zustand der Gewässersohle.

In der Praxis werden viele Berechnungen basierend auf der Manning-Strickler Formel durchgeführt. Dabei ist die Wahl eines geeigneten Rauigkeitsbeiwertes stark von den Gerinneigenschaften, d.h. den dominanten Korngrößen und den morphologischen Strukturen abhängig. Zur Wahl des Manning-Wertes gibt es bebilderte Publikationen von Barnes (1967) über nordamerikanische sowie von Hicks & Mason (1991) über neuseeländische Gewässer. Für schweizerische Fließgewässer mit den vielfältigen geologischen und topographischen Verhältnissen zwischen den Alpen und dem Jura wurde eine ähnliche Publikation zur Wahl von geeigneten Strickler-Werten von Spreafico et al. (2001) veröffentlicht.

#### 4.1.5. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Neuere Untersuchungen zeigen, dass sich in **steilen und rauen Gerinnen (mit  $h/d < 4$ ) der Fließwiderstand** besser mit einem Potenzgesetz nach Ferguson (2007) als mit einer Strickler Formel oder mit einem logarithmischen Fließgesetz beschreiben lässt. Allerdings ist auch in diesem Potenzgesetz ein Rauigkeitskoeffizient enthalten, der stark von der Gerinnehomorphologie abhängig ist. Es ist bekannt, dass der Strickler-Wert für steilere Wildbäche (ca. > 5%) in einem Bereich von etwa 2  $m^{1/3}/s$  bis zu etwa 30  $m^{1/3}/s$  variieren kann. Der Rauigkeitskoeffizient des Potenzgesetzes dürfte ähnlich stark variieren. Allerdings sind hierzu noch mehr Untersuchungen nötig. So kann gemäß der Studie von Rickenmann & Recking (2011) z.B. die Fließgeschwindigkeit für sehr raue Bäche (z.T. mit Schwemmholz) gegenüber dem mittleren Trend der übrigen Daten bis um etwa den Faktor 5 bis 6 vermindert sein. Auch große Blöcke erhöhen den Fließwiderstand im Vergleich zum mittleren Trend (Nitsche et al., 2012).

Im Weiteren ist auch zu berücksichtigen, dass das **Strömungsverhalten in Wildbächen** teilweise nicht mehr mit einer eindimensionalen Betrachtung angenähert werden

kann, dass lokal häufige Fließwechsel zwischen Strömen und Schießen erfolgen können und dass die Fließverhältnisse generell stark vom Abfluss bzw. der relativen Abflusstiefe abhängig sind. Viele dieser Aspekte bedürfen auch noch weiterer detaillierter Untersuchungen.

In steilen und (sehr) glatten Gerinnen treten hohe Fließgeschwindigkeiten auf. Dort ist mit dem Auftreten von Rollwellen (vgl. Abb. 5) zu rechnen, für welche noch Berechnungsmethoden entwickelt werden müssten.

Die Hypothese, dass in steileren Gerinnen nicht über längere Abschnitte schießender Abfluss auftreten kann, ist bisher nicht verifiziert. Dies sollte systematisch untersucht werden. Sollte sich die Hypothese bestätigen, müssten die entsprechenden Konsequenzen für die Anwendung der Modelle gezogen werden.

Eine weitere Herausforderung bei der hydraulischen Modellierung stellt nach wie vor die Interaktion mit Bauwerken, z.B. Staffelstrecken, Abstürze, etc. dar. Systematische Untersuchungen zur Berücksichtigung der Bauwerke und ggf. der Bauwerkszustände in den Berechnungen fehlen bisher. In längeren Abschnitten können evtl. auch schwallartige Abflüsse auftreten, was ebenfalls noch näher zu erforschen wäre.

#### 4.2. Geschiebetransport (Gt)

Grundsätzlich fällt auch der Schwebstofftransport unter Geschiebetransport. Er wird hier aber nicht separat betrachtet.

##### 4.2.1. Überblick Methoden

Folgende Methoden wurden im Rahmen von OptiMeth näher betrachtet:

	Methoden	Anhang
Formeln	<b>GTK 2.0:</b> (Geschiebformeln / Schleppspannung)	Gt.1
	<b>Transportformeln:</b> Beginn Mobilisierung, Ermittlung Transportkapazität	Gt.2
	<b>Wildbachformeln:</b> Geschiebetransportformeln für steile Gerinne	Gt.3
1D	<b>Tom<sup>Sed</sup></b>	Gt.4
	<b>HEC-RAS (Feststoff)</b>	Gt.5
	<b>Scen.AT 1.0, Flusswin 1.0</b>	Gt.6
2D	<b>Hydro_FT-2D</b>	Gt.7
	<b>CCHE 2D</b>	Gt.8
	<b>Flo-2D</b> (Sediment, Murgang)	Gt.9 (=M.3)
	<b>Flumen</b>	Gt.10 (=Hw.4)

Tabelle 4-2: Überblick Methoden Geschiebetransport

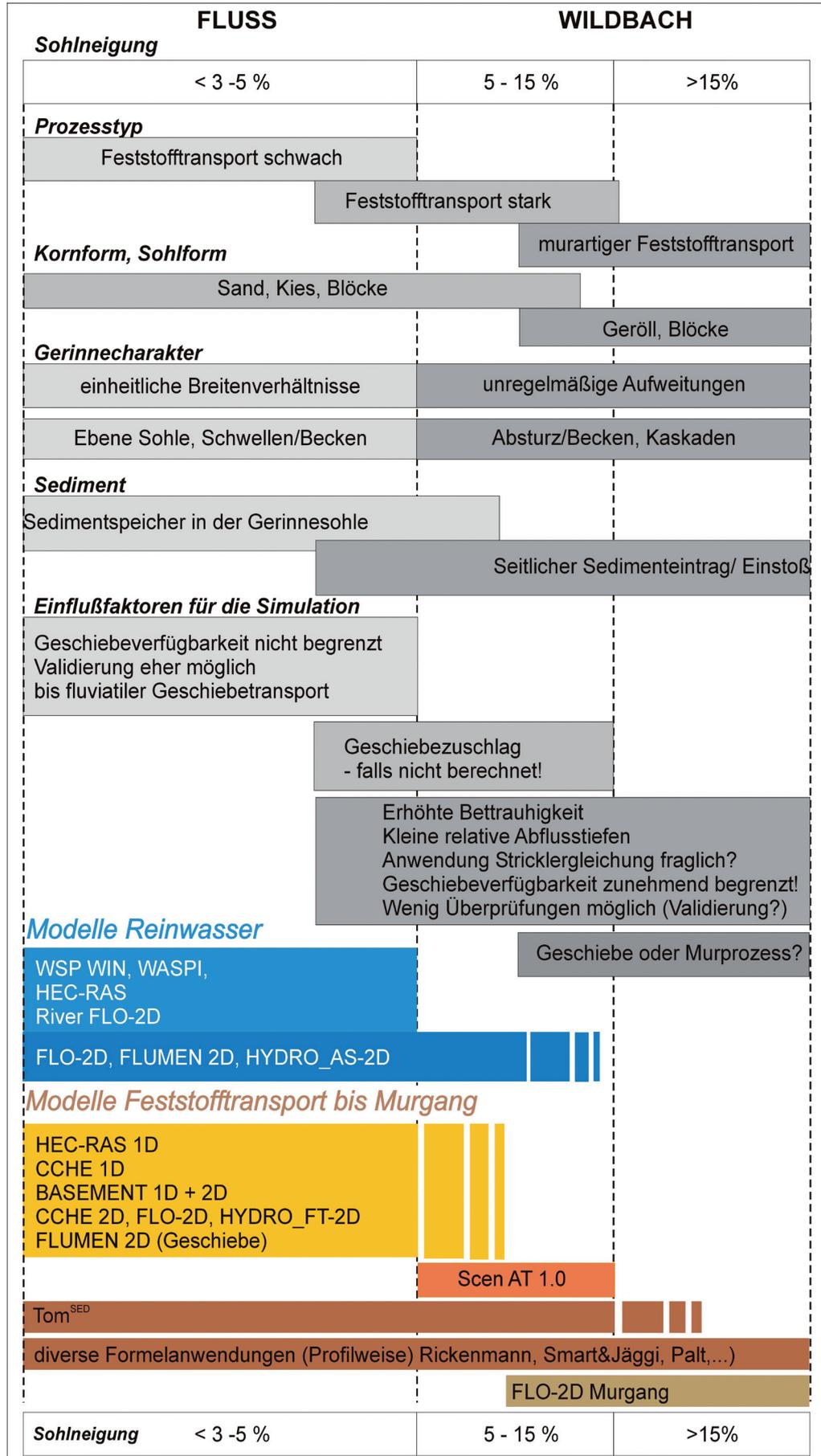


Abb. 6: Anwendungsbereiche Hydraulischer Modelle (vgl. auch Tabelle 4.1 Kapitel 4.1)

	Art des Ergebnisses	erforderliche Daten	Anmerkung
<b>Formeln, Querschnittsberechnung</b>	Bewegungsbeginn, Transportkapazität	Abfluss, Geometrie: Querprofil, Gefälle, charakteristische Korngrößen	Punktweise Betrachtung ohne Berücksichtigung der Geschiebeverfügbarkeit
<b>Numerische Modelle 1D</b>	Geschiebeganglinie für jeden Berechnungsknoten, Sohländerung entlang des Längsprofils	wie oben und Lage der Geschiebeherde (mögliche Erosionstiefen entlang des Längsprofils) sowie Abflussganglinie	Linienartige Betrachtung der Sohländerung (Auflandung / Erosion) unter Berücksichtigung der Geschiebeverfügbarkeit
<b>Numerische Modelle 2D</b>	Geschiebetransport für jeden Berechnungsknoten, flächige Sohländerung	wie 1D	Flächige Betrachtung der Sohländerung (Auflandung / Erosion) unter Berücksichtigung der Geschiebeverfügbarkeit

Tabelle 4-3: Gruppierung der Methoden Geschiebetransport

Eine grobe Abgrenzung der möglichen Anwendung von (numerischen) Simulationsmodellen für die Berechnung des Geschiebetransportes zeigt Abb. 6 in Abhängigkeit des Gerinnegefälles. Die Abgrenzung erfolgt hauptsächlich aufgrund der erhöhten Sohlrauigkeit bei Gefällen über ca. 3-5% bzw. dem wahrscheinlichen Auftreten von Murgängen bei Gefällen über ca. 15%. Detailliertere Angaben zur Berechnung des Geschiebetransportes in Wildbächen finden sich u.a. in Rickenmann (2013).

**4.2.2. Bemerkungen zu den Methoden**

Beim Geschiebe gibt es im Wildbachbereich zwei wesentliche Fragestellungen:

- Wie groß ist das Feststoffpotenzial? Was kann in das Bachgerinne gelangen? (siehe Kap. 3.2 und 3.3)
- Wie viel Geschiebe davon kann vom Bach bei einem Ereignis mobilisiert und transportiert werden (Fracht), wie wird es transportiert (Ganglinie) und wo treten Erosion oder Akkumulation auf?

Für den Geschiebetransport im Gerinne gibt es vor allem für den Bereich geringerer Gefälle (< 3 - 5%) und genügender Sedimentverfügbarkeit geeignete Modelle und auch eine größere Erfahrung, um den Geschiebetransport in Abhängigkeit der Abflussganglinie zu berechnen.

In steileren Gerinnen mit ausgeprägter Sohlrauigkeit (Makrorauigkeit) und oft eingeschränkter Sedimentverfügbarkeit nimmt die Unsicherheit der Berechnungsergebnisse stark zu. Ein wichtiger Faktor ist hierbei die Auswirkung des erhöhten Fließwiderstandes auf die Geschiebetransportraten, welcher in vielen Modellen bisher nicht berücksichtigt wurde. Verschiedene numerische Modelle für den Geschiebetransport funktionieren bei Gefällen größer als ca. 3 - 5% nicht, möglicherweise wegen stark überschätzter Geschiebetransport-



Geschiebetransport der Maisach, Juli 2010; Gemeinde Scheidegg; Landkreis Lindau; Foto: WWA Kempten

kapazität. Mit neuen Ansätzen unter Berücksichtigung des hohen Fließwiderstandes für raue Bachbetten mit relativen Abflusstiefen  $h/d < 4-7$  stimmt die berechnete Geschiebetransportkapazität besser mit Beobachtungen überein. Im Weiteren nimmt mit zunehmendem Gefälle auch der Grenzabfluss für den Transportbeginn zu.

Zu beachten ist ferner, dass für den Geschiebetransport auf fester Sohle wie z.B. in einer Wildbachschale z.T. angepasste Formeln zu verwenden sind (vgl. Lichtenhahn, 1977; Vorlesung Flussbau, Teil B 4.4; Smart & Jäggi, 1983).

Einige Erfahrungen mit Simulationsmodellen:

Im Modell Hydro\_FT-2D muss die Fracht explizit zugegeben werden (gutachterliche Einschätzung) oder kann an einen Querschnitt im Berechnungsgebiet gekoppelt werden. HEC-

RAS ist nur für Gerinnegefälle kleiner als 1-2 % brauchbar. In Österreich und der Schweiz wird SETRAC (1D) bzw. TOMSed (Nachfolgemodell) zur Ermittlung des Geschiebetransports auch bei größerem Gefälle verwendet. Der Geschiebeeintrag bzw. die Geschiebeverfügbarkeit muss auch hier gutachterlich festgelegt werden. In der Schweiz gibt es auch erste Erfahrungen (daher noch kein Methodensteckbrief) mit dem neuen 1D-Geschiebetransportmodell sedFlow (an der WSL entwickelt), welches ab 2014 frei verfügbar sein sollte.

Das Modell FLUMEN beinhaltet auch den Geschiebetransport (siehe unter 4.2.1), läuft aber nur unter dem Betriebssystem Linux.

Bei der Modellierung des Geschiebetransportes hat sich eine abschnittsweise Betrachtung gleichartiger Gerinneabschnitte bewährt. Bei großen Gerinnegefällen ist zusätzlich auch die Experteneinschätzung gefragt. Hier geben Modelle nur eine Größenordnung des Geschiebetransportes an, qualitative Hinweise zu möglichen Veränderungen können aber auch nützlich sein. Eine wichtige Hilfestellung für den Experten stellt immer die Ereignisdokumentation dar. Geländebegehungen und „stumme Zeugen“ im Gelände liefern wichtige Informationen (Einzugsgebietsanalyse).

### 4.2.3. Anwendungshinweise

Es sollten verschiedene (Anlandungs- bzw. Verklauungs-) Szenarien betrachtet und die Auswirkungen auf das Überflutungsbild in mehreren Berechnungsläufen ermittelt werden (siehe u.a. Brauner, Scherz, 2010).

Für die Ermittlung des Geschiebetransports sollten unbedingt Schätzungen im Feld vorgenommen werden (z.B. Sedimenteintrag von den Seitenbächen). Parallel dazu sollten Berechnungen mit (verschiedenen) Modellen durchgeführt werden. Die Ergebnisse sollten für das endgültige Expertengutachten verglichen und interpretiert werden.

Mögliche Vorgaben an die Bearbeiter (auch im Rahmen von Vergaben!):

- Kartenstudium (u.a. Interpretation eines digitalen Höhenmodells)
- Chronikanalyse
- „Stumme Zeugen“ suchen
- Begehungen im gesamten EZG
- Beilage einer Fotodokumentation
- Begründung der Bewertungen
- Checkliste für die div. abzuarbeitenden Themen
- Ereignisdokumentation (Handbuch DISALP)

### 4.2.4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Bei der Berechnung des Geschiebetransportes sollten neue Ansätze zur Berücksichtigung der **hohen Energieverluste in rauen und steilen Gerinnen** (mit Sohlengefällen größer als etwa 5%) mit weiteren Beobachtungen getestet werden. Weiter besteht Forschungsbedarf bezüglich der Einschätzung und Quantifizierung der Rolle der Sedimentverfügbarkeit.

Bei der Modellierung des Geschiebetransportes ist zu überprüfen, wie stark **sich Vereinfachungen in der**

**Berechnung** z.B. bezüglich Gerinnegeometrie oder dem hydraulischen Routing auf die Berechnungsergebnisse **auswirken**, auch im Vergleich zu anderen Unsicherheiten bezüglich der Eingabeparameter oder der verwendeten Geschiebetransportformel.

Für die Beantwortung dieser Fragen sind **kontinuierliche Messungen des Geschiebetransportes** in einem Querprofil notwendig. Dazu bieten sich z.B. indirekte Messungen mit Geophonen und Hydrophonen (Mikrophone) an, welche bereits an einigen Gewässern in Österreich und in der Schweiz installiert sind (Turowski et al., 2008; Rickenmann et al., 2013). Um diese Messungen an den Geschiebetransport anzueichen, sind direkte Geschiebemessungen erforderlich. Dies geschieht zumeist durch den Bau von Geschiebefallen. Es besteht auch ein Bedarf an (vermehrten) Messungen des Schwebstofftransportes in Gebirgsflüssen und Wildbächen (Grasso et al., 2007). Komplementär dazu sind detaillierte Erfassungen der Geschiebebilanzen nach größeren Hochwassern im Rahmen von Ereignisdokumentationen sehr hilfreich. Wichtig ist auch eine Erweiterung dieser Punktmessungen zu Geschiebebilanzen in größeren Abschnitten. Diese können entweder ereignisbezogen (z.B. Fotogrammetrie, LIDAR) oder periodisch (z.B. Querprofile) erstellt werden.

Durch das Alpine Space Programm **SedAlp** (2012-2015) sollen die derzeit laufenden Messungen an alpinen Bächen und Flüssen vergleichbar gemacht werden, um die Datenbasis zu erhöhen. Zugleich soll auch ein Standard für zukünftige Messungen definiert werden.

### 4.3. Murgang (M)

Zu den Muren werden murartiger Feststofftransport und Murgang gezählt. Ersterer wird auch als stark geschiebeführendes Hochwasser, hyperkonzentrierter Abfluss, umgangssprachlich aber auch als Mure bezeichnet (ONR 24800). Von einem Murgang spricht man, wenn ein langsam bis schnell abfließendes breiartiges Gemisch von Wasser und Feststoffen in einem oder mehreren Schüben auftritt. Die genannten Verlagerungsarten (Prozesse) unterscheiden sich durch ihr Fließverhalten, ihre Dichte, ihre Einwirkung auf Objekte sowie ihr Ablagerungsverhalten.

Muren entstehen, wenn Lockergestein in relativ kurzer Zeit mobilisiert wird und in ein Gerinnesystem eingebracht wird. Es treten dann, relativ unabhängig von den Niederschlägen, hohe Abflüsse (als Wasser-Feststoffgemisch) in den Einzugsgebieten auf, die aber nur kurze Zeit (einige Minuten) andauern. Die Mobilisierungs-, Ver- und Ablagerungsvorgänge sind sehr komplex und können nur ansatzweise berechnet werden.

Der Spitzenabfluss einer Mure wird im Bereich der Murfront erreicht und kann ein Mehrfaches des „theoretischen“ hydrologischen Abflusses aufweisen. Abflüsse von mehr als 100 m<sup>3</sup>/s, bei Fließhöhen von mehreren Metern, werden auch in sehr kleinen alpinen Einzugsgebieten erreicht. Können in einem Einzugsgebiet keine Geschiebeherde mehr mobilisiert werden, erlischt die Murtätigkeit. Detailliertere Hinweise zur Prozess- und Gefahrenbeurteilung von Murgängen finden sich u.a. in Rickenmann (2013).

## 4.3.1. Überblick Methoden

Folgende Methoden wurden im Rahmen von OptiMeth näher betrachtet:

	Methoden	Anhang
Empir. Modelle	Ansätze zur Bestimmung der Reichweite / TopFlowDF	M.1
	TopRunDF	M.2
Phys. Modelle	Flo-2D	M.3 (= Gt.3)
	RAMMS	M.4

Tabelle 4 4: Überblick Methoden Murgang

## 4.3.2. Gruppierung von Methoden

Die Methoden in Tabelle 4-4 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.

### Empirische Modelle

Eine Übersicht zu verschiedenen empirischen Modellen gibt Rickenmann (2013). Zu den empirischen Modellen zählen unter anderem Ansätze die einen Zusammenhang zwischen der Größe des abgelagerten Volumens und der Reichweite eines Ereignisses beschreiben (Corominas, 1996; Rickenmann, 1999). Beobachtungen zeigten, dass die Reichweite (bzw. 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 für Bergstürze dieser pauschale Widerstand als dimensionsloser Reibungswinkel – dem Pauschalgefälle – darstellbar. Weitere empirische Ansätze sind Formeln, die zum Beispiel die Ereignisfracht als Funktion von Einzugsgebietsparametern schätzen (Hampel, 1977; Kronfellner-Krauss, 1982; Mizuyama et al., 1992; Rickenmann und Zimmermann, 1993), aber auch einfache Verfahren, die die flächige Verteilung der Murenablagerungen und die mittleren Ablagerungshöhen aufgrund einer einfachen geometrischen Ähnlichkeitsbeziehung (Iverson et al., 1998; Scheidl und Rickenmann, 2010) ermitteln (z.B. TopRunDF).

### Physikalisch basierte Modelle

Eine mathematische Formulierung der physikalischen Gesetze der teilweise sehr komplexen Teilprozesse eines Systems ist möglich. Obwohl die physikalischen Ansätze zumeist vereinfacht werden, ist die mathematische Umsetzung sehr kompliziert und erfordert enormen Aufwand an Daten und Rechenzeit. Zu dieser Gruppe zählen Flo2D und RAMMS. Eine sinnvolle Anwendung für physikalisch basierte Modelle ist die Berechnung

eines flächigen Ablagerungsverhaltens von Murgängen für Rastergrößen von 3 bis 5 Meter, wenn ein Großteil des Materials das Gerinne verlässt.

## 4.3.3. Bemerkungen zu den Methoden

Je nach Modell wird ein Volumen oder eine Eingangsganglinie, die aus der hydrologischen Simulation stammt, gewählt. Beide Ansätze bilden die Realität nicht ab, müssen aber als Annäherung akzeptiert werden. Änderungen des Prozessverhaltens können in der Modellierung nicht abgebildet werden, ebenso nicht die typischen Ablagerungsmuster, da die Ablagerungen nicht in das Höhenmodell integriert werden.

Ist als Bemessungsereignis ein Murgang anzusetzen, darf kein Reinwasser-Transportmodell verwendet werden. Dieser Forderung zu entsprechen, ist jedoch nicht einfach, da für die Modellierung von Murgängen nur wenige Produkte verfügbar sind. Aber nicht nur die eingeschränkte Modellauswahl erschwert die Berechnungen, sondern auch fehlende Eingangsdaten für die Modellparameter. Viskosität, Grenzschubspannung, Dichte, Porenwasserdruck oder Feststoffkonzentration können als unbekannt angesehen werden, obwohl einige Werte aus Publikationen zur Verfügung stehen.



Murgangablagerung an der B21 Juli 2010; Lkr. Berchtesgadener Land; Foto: K. Mayer, LfU

Den wichtigsten Inputparameter in ein Transportmodell stellt oft eine Ganglinie dar, die in weiterer Folge durch das Gerinne verlagert wird. Muren zeichnen sich durch einen äußerst raschen Anstieg, einen hohen Scheitelabfluss und eine kurze Dauer eines Schubes aus. Dadurch unterscheiden sich die Reinwasser-Hydrographen maßgeblich von den Murgang-Ganglinien, in deren Fracht das Geschiebe und das Wasser enthalten sind. Eine reine Erhöhung des Spitzenabflusses bei gleichzeitig unveränderter Dauer von hydrologisch ermittelten Ganglinien ist somit nicht zielführend.

Vereinfacht kann deshalb ein Muren-Hydrograph dreiecksförmig angenommen werden, mit einem Anstieg im Sekundenbereich und einer Fläche, die der Fracht des mobilisierten Geschiebevolumens inklusive Wassergehalt entspricht.

Wird eine zu große räumliche Auflösung des Höhenmodells

gewählt, steigt die Rechenzeit dramatisch an, obwohl die Aussagegenauigkeit, aufgrund der Variabilität der Modellparameter, nicht zunimmt.

Flächig verteilte Messdaten von Murgängen (Geschwindigkeit, Abflusstiefe) sind üblicherweise nicht verfügbar, so dass eine Kalibrierung bzw. Validierung der Modellannahmen nur mit Hilfe der Umhüllenden des Ablagerungsbereiches erfolgen kann. Dies kann nur mit einer ausreichend genau ausgeführten Ereignisdokumentation sichergestellt werden, an der die Modelle, aber auch die Modellannawender überprüft werden können.

#### 4.3.4. Grundlagen und Kriterien zur Methodenwahl

Die Methodenwahl wird vom Anwendungszweck bestimmt. Interessiert nur die Kenntnis der möglichen Ablagerungsfläche bzw. -tiefe, kann ein empirisches Modell ausreichen. Sind jedoch Geschwindigkeiten und Abflusstiefen zu ermitteln, muss auf physikalisch basierte 2D-Modelle zurückgegriffen werden.

Als weiteres Kriterium ist sicher die Verfügbarkeit eines Modells bzw. Modellannawenders bei entsprechender Rechnerleistung zu nennen. Höhenmodelle stellen heute keine Anwendungsgrenze mehr dar, da sie fast flächendeckend zur Verfügung stehen.

#### 4.3.5. Anwendungshinweise

Empfehlenswert ist die Anwendung von 2D-Murenmodellen nur in Ausbreitungs- bzw. Ablagerungsbereichen, um Hinweise für Ausläuflängen und Ablagerungstiefen zu erhalten. Das Ablagerungsmuster von Murgängen wird derzeit noch nicht realistisch berechnet. Als Eingangsdatensatz (Ende des Zubringergerinnes) kann für diesen Bereich eine frei gewählte Ganglinie mit bestimmten rheologischen Parameterwerten benutzt werden. Die Modellierung des Transitbereiches, die mit großen Unsicherheiten behaftet ist, kann somit entfallen. Zeitlich variable Verkläusungsszenarien können nicht simuliert werden, ebenso der Aufprall an Objekten.

Kontinuumsmechanische Simulationsmodelle liefern grundsätzlich die genaueste Beschreibung des Bewegungs- oder Fließvorganges, einschließlich der Deformation der bewegten Masse entlang des Weges sowie der räumlich und zeitlich detaillierten Angaben zu den Fließparametern. Die Kenntnis der räumlichen Verteilung der Parameter Fließgeschwindigkeit und Abflusstiefe ist wichtig für die Gefahrenkartierung nach den Schweizer Empfehlungen. Es muss allerdings betont werden, dass die rheologischen Modellparameter oder Reibungsparameter in der Regel nicht auf direkte Weise (z.B. anhand von Proben) bestimmt werden können, sondern aufgrund von Erfahrung angenommen oder im besseren Fall anhand von früheren Ereignissen im gleichen Gebiet „geeicht“ werden müssen (Rickenmann et al., 2006). Der Plausibilisierung der Modellergebnisse ist daher größte Bedeutung beizumessen. Eine Übertragung der Erfahrung aus Nachbareinzugsgebieten ist bei Murgängen problematisch, da die Leitprozesse (die Feststoffvolumina) sehr stark variieren können und sich die Einzugsgebiete komplett unterschiedlich verhalten können.

Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass für das Ablagerungsverhalten von Murgängen auf dem Kegel die Topographie

ein sehr wesentlicher und steuernder Faktor ist (Rickenmann et al., 2006; Scheidl & Rickenmann, 2010; Rickenmann & Scheidl, 2010). In diesem Sinne ist es auch wichtig, dass das Gerinne auf dem Kegel im Geländemodell möglichst genau abgebildet ist. Falls z.B. der Gerinnequerschnitt im Modell in einem oberen Abschnitt kleiner ist als in der Realität, könnte dort ein Ausbrechen simuliert werden, aber in der Realität wäre vielleicht ein Abschnitt weiter unten auf dem Kegel kritischer für einen möglichen Ausbruch des Murganges aus dem Gerinne. Bei den Szenarien bezüglich der Ausgangsbedingungen sind neben der Annahme des totalen Murgangvolumens bei einem Ereignis z.B. auch die Annahmen über die Anzahl der Schübe und über eine mögliche Änderung der Sohlenlage im Gerinne auf dem Kegel (z.B. durch Ablagerung von langsameren Schüben) zu berücksichtigen.

#### 4.3.6. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die derzeitigen Simulationstools verwenden einfache Einphasen-Modellansätze zur Beschreibung des Fließverhaltens von Muren. Diese Modellansätze reflektieren jedoch die Physik eines Murganges nur eingeschränkt. **Sekundäre Prozesse**, wie Erosion, Ausbildung einer granularen Front oder Rollwellen-Entwicklung, werden überhaupt nicht abgebildet. Außerdem kann die spezielle Ausprägung des Prozesses – von einem viskosen „Schlammstrom“ mit großem Feinanteil bis zu einem granularen Murgang – stark variieren und wird mit herkömmlichen Modellen nur durch die Wahl der Modellparameter berücksichtigt. Daher ist ein besseres Verständnis des Fließverhaltens verschiedener Materialzusammensetzungen und der damit zusammenhängenden sekundären Prozesse anzustreben.

Zur Beschreibung des Material- bzw. Fließverhaltens von Murgängen existieren verschiedene Ansätze, welche auch in numerischen Simulationsmodellen implementiert sind. Dabei besteht ein Hauptproblem darin, dass es keine klaren Kriterien gibt, welche Ansätze auf welche Murgangstypen in der Natur am besten angewendet werden sollen.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht bezüglich des Ausmaßes der Aufnahme und Ablagerung von Material während des Murganges an Sohle und Ufern.

### C. Themenübergreifende Feststellungen

Aus der Arbeit mit den verschiedenen Methoden zur Beschreibung der vorgenannten Prozesse haben sich einige übergreifende Aussagen herauskristallisiert, welche hier als allgemeine Empfehlungen zusammengefasst werden sollen:

#### a) Vorarbeiten / Einschätzungen

Die **Vorüberlegungen und Erhebungen** nehmen zwar eine gewisse Zeit in Anspruch. Sie sind jedoch für eine sachgerechte weitere Betrachtung und evtl. Ausarbeitung von Gutachten oder Planungen **unerlässlich**. Diese weitere Bearbeitung kann dann entsprechend zielorientiert erfolgen, wobei der für die Vorarbeiten erforderliche Aufwand wieder kompensiert werden kann.



fehlen und damit auch die Möglichkeit, Modellparameter zu eichen oder anzupassen. Selbst wenn solche vorhanden sind, sollten sie kritisch hinterfragt werden. Hierbei sind vor allem die zugrundeliegende Messtechnik und deren Grenzen zu betrachten.

Eine Zuverlässigkeit der Ergebnisse von  $\pm 25\%$  bei der Berechnung oder Modellierung des Fließverhaltens kann durchaus als zufriedenstellend angesehen werden. Größere Abweichungen sind möglich, gerade wenn es sich um die Transportprozesse handelt. Die besten Ergebnisse können noch im Bereich der Reinwasserhydraulik erzielt werden.

Umso wichtiger ist es, dass bei der Einschätzung auf eine fundierte und zuverlässige **Ereignisdokumentation** zurückgegriffen werden kann.

Es ist anzumerken, dass die **Abschätzung von Geschiebefrachten** in Wildbächen für Ereignisse unterschiedlicher



Ereignisdokumentation: Freidinggraben bei Normalabfluss und Hochwasser 2005; Landkreis Berchtesgadener Land; Fotos: WWA Traunstein

Insbesondere die **Interaktion und Überlagerung verschiedener Prozesse**, z.T. auch zeitgleich, macht einen großen Teil der Schwierigkeiten bei der Erfassung und Beurteilung aus. Dabei stößt z.T. auch die Vorstellungsfähigkeit der beurteilenden Personen an ihre Grenzen – sie haben z.T. verschiedene Ereignisse erlebt und ziehen daraus entsprechende Schlüsse. Diese müssen jedoch kritisch hinterfragt werden und ggf. auch andere Kombinationen oder Prozesse mit einbezogen werden.

**Geländebegehungen** sind zeitintensiv, aber ein **unverzichtbarer Bestandteil** für die Beurteilung von Wildbachprozessen. Im Idealfall sollten im Lauf der Planung sogar mehrere Begehungen vor Ort erfolgen. Schwierigkeiten können sich aus der Zugänglichkeit ergeben.

Für alle betrachteten Prozesse besteht das Problem, dass **verlässliche Messdaten** z.B. an Pegelstellen in der Regel

**Jährlichkeiten** im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung mit einer **beträchtlichen Unsicherheit** verbunden ist. Es gibt dafür nur bedingt quantitative Ansätze. Die Abschätzungen basieren häufig auf Frachten von früheren Ereignissen und oft auch stark auf gutachterlichen und feldbasierten Einschätzungen der Verhältnisse im Einzugsgebiet. Unterschiede in den abgeschätzten Geschiebefrachten von einem Faktor 2 (zwischen verschiedenen Gutachtern) liegen durchaus im Rahmen einer üblichen Unsicherheit.

Den Unsicherheiten wird häufig mit der Betrachtung unterschiedlicher Szenarien begegnet. Aufgrund der Vielzahl der Möglichkeiten muss hier eine bearbeitbare **Auswahl an realistischen Szenarien** erfolgen, was eine entsprechende Erfahrung des Bearbeiters voraussetzt. Hierbei sollte auch eine übergreifende Sichtweise erfolgen und die Konsequenzen z.B. für Unterlieger in die Überlegungen einfließen.

### b) Methodenanwendung

Gerade im Hinblick auf die doch relativ großen Unsicherheiten ist es zu empfehlen, eine Fragestellung mit **mehreren Methoden** zu untersuchen. Damit kann ein zutreffendes Ergebnis besser eingegrenzt werden. In jedem Fall müssen die Ergebnisse von einem erfahrenen Experten bewertet werden. Große Bedeutung kommt der Ereignisdokumentation zu, da diese oft sehr wichtige Hinweise auf mögliche Prozessabläufe liefert.

Die **Ergebnisse** einer Methode sollten stets **kritisch hinterfragt** und mit bereits gemachten Erfahrungen sowie möglichst mit Ergebnissen alternativer Methoden abgeglichen werden. Die in der Modellierung verwendeten Daten sollten jedenfalls auf mögliche Fehler und die Modellparameter auf Plausibilität überprüft werden. Die durch die jeweilige Modellwahl eingeschränkte Abbildung der Realität kann durch die Verwendung von Szenarien teilweise kompensiert werden. Diese sollten auch die Möglichkeit bieten, Sprünge im Systemverhalten darstellen zu können. Eine Plausibilisierung der Ergebnisse mit verschiedenen Methoden ist für die Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse durchzuführen (Hübl WLV, 2012).

Dazu ist es nötig, dass der **Anwender über ausreichend Erfahrung** verfügt. Bei der Einschätzung der Parameter muss er wissen, welche Auswirkungen sich dadurch ergeben. Es ist daher notwendig, dass an den zuständigen Dienststellen Mitarbeiter **entsprechend ausgebildet und geschult werden**. Eine regelmäßige **Fortbildung und ein Erfahrungsaustausch** sind dringend zu empfehlen.

Eine häufige Problemstellung betrifft die Frage, inwieweit existierende oder geplante **Schutzmaßnahmen** bei der Abschätzung der Geschiebefrachten und der Hochwasserbildung in Wildbächen **berücksichtigt werden sollen oder dürfen**. Hierzu sind quantitative Aussagen oft schwierig zu machen. Eine ausführliche Diskussion über die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen in Wildbächen im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung findet sich in PLANAT (2008).

### c) Dokumentation, Ergebnisdarstellung

Nach Kienholz (1999, 2002) bzw. PLANAT (2000) sind die sachliche Richtigkeit und die gute Nachvollziehbarkeit, d.h. die **Transparenz** bezüglich Ablauf der Beurteilung und der eingesetzten Methoden, die zwei wichtigsten Anforderungen

an technische Berichte im Zusammenhang mit der Beurteilung von Naturgefahren.

In der Praxis muss die Beurteilung außerdem mit **angemessenem Zeitaufwand** (d.h. möglichst kostengünstig) erfolgen. Zu den Hauptanforderungen äußert sich Kienholz (1999) im Weiteren wie folgt: „...Allerdings lässt sich die sachliche Richtigkeit von Gefahrenbeurteilungen nicht ohne weiteres überprüfen. Ob eine Gefahrenbeurteilung richtig gewesen ist bzw. ist, lässt sich nie absolut ermitteln. Eine direkte Überprüfung ist letztlich nur anhand des Eintretens oder Nicht-Eintretens und des Ablaufs des vorhergesagten Ereignisses möglich. ...Weil gerade die am meisten interessierenden großen Gefahrenereignisse an einem bestimmten Ort in der Regel sehr selten sind, ist hier die direkte Kontrolle der Qualität der Gefahrenbeurteilung oft nur in Katastrophenfällen möglich. Aus diesen Gründen bedeutet das Anstreben sachlicher Richtigkeit ein Vorgehen nach den <Regeln der Kunst>“. Umso wichtiger ist daher die **Nachvollziehbarkeit der Beurteilung**, da eine Überprüfung der sachlichen Richtigkeit nur selten möglich ist.

Im Hinblick auf die notwendige **gute Dokumentation** von technischen Berichten soll die Zusammenstellung von vorhandenen Dokumenten und Untersuchungen im Rahmen von OptiMeth einen Beitrag zur besseren Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Berichten zur Gefahrenbeurteilung liefern. Die **Qualität einer Dokumentation** und damit auch die Qualität der Modellierung insgesamt kann durch die Einhaltung folgender Punkte gesteigert werden:

- Dokumentation der Modellwahl inklusive der ausschlaggebenden Gründe
- Dokumentation der getroffenen Annahmen bei der Konzeption des Modells und bei der Modellanwendung
- Dokumentation der berücksichtigten und vernachlässigten Daten
- Dokumentation der Aufbereitung und Darstellung der Modellierungsergebnisse
- Dokumentation der im Modellierungsprozess involvierten Personen und deren Qualifikationen
- Dokumentation von notwendigen Adaptierungen aufgrund äußerer Einflüsse (z.B. durch Auftraggeber vorgegebenes Modell, Datenkorrekturen, etc.)

## D. Ausblick

Neben dem in den Methodenkapiteln genannten Forschungs- und Entwicklungsbedarf sollen hier weitergehende Arbeiten und Verbesserungen skizziert werden. Die Arbeitsgruppe kann hier nur **Empfehlungen** für künftige Arbeiten aus ihrer Sicht und auf Basis der gemachten Erfahrungen und Diskussionen abgeben. Die Arbeitsgruppe hofft natürlich, dass einige davon in Projekten oder Aufträgen verwirklicht werden können. In Ermangelung eines eigenen Budgets kann die Arbeitsgruppe keine eigenen Projekte initiieren.

### a) Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Methoden

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen Methoden stellen den derzeitigen Stand der Technik dar. Aufgrund der zahlreichen laufenden Forschungsarbeiten und hoffentlich auch künftigen Arbeiten auf Basis des im Bericht aufgezeigten Bedarfes, sind Verbesserungen und Weiterentwicklungen der Methoden zu erwarten. Deshalb sollte in rund 5–10 Jahren eine **Fortschreibung** des Berichtes erfolgen.

Als Grundlage für alle Weiterentwicklungen aber auch für die verbesserte Anwendung der Methoden ist es unbedingt erforderlich, **mehr zuverlässige Messdaten** (z.B. Abflussmessungen in kleinen Einzugsgebieten, Geschiebemessungen, ...) und fundierte **Ereignisdokumentationen** zu bekommen. Anstrengungen in diesem Bereich sind unverzichtbar für alle anderen Arbeiten.

Eine **Ausweitung von Vergleichsrechnungen** mit mehreren Methoden erscheint wünschenswert, übersteigt aufgrund des großen Aufwandes vor allem bzgl. der Schaffung wirklich vergleichbarer Datengrundlagen die Möglichkeiten der Arbeitsgruppe. Hierzu wären folgende Voraussetzungen zu schaffen:

- Ein Projekt mit Finanzmitteln müsste initiiert werden
- Die unterschiedlichen Datengrundlagen müssten angeglichen werden, evtl. müssten weitere Daten erhoben werden.
- Manche Methoden müssten angepasst werden, um mit den unterschiedlichen Eingangsdaten arbeiten zu können. Dazu müsste z.T. eine Zusammenarbeit mit Entwicklern erfolgen.
- Bei den Ereignisdokumentationen sollte verstärkt darauf geachtet werden, dass die erhobenen Daten auch für Vergleichsrechnungen oder Validierungen verwendbar sind. Hierzu wird eine entsprechende Fortschreibung der Empfehlungen zur Ereignisdokumentation (Domodis – vgl. Hübl et al., 2006) angeregt.
- Bei der Neu- oder Weiterentwicklung von Methoden sollte künftig verstärkt darauf geachtet werden, dass Methoden mit anderen verglichen werden können und sie auch auf andere Datengrundlagen erweitert werden können.

Auch mit vorliegendem Bericht wird es für den anwendenden „Praktiker“ immer schwieriger, Model-

lergebnisse kritisch zu bewerten und zu beurteilen, zumal hier nicht alle Methoden betrachtet werden konnten. Insofern wäre eine **zielgerichtete Weiterführung der bisherigen Arbeiten** der Arbeitsgruppe OptiMeth sinnvoll. Insbesondere folgende Aspekte / Elemente werden empfohlen:

- Für die einzelnen Methoden sollten **Kriterien** erstellt werden, welche zur besseren Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Möglichkeit der (Zweit-)Beurteilung der Ergebnisse beitragen. Hierzu zählen insbesondere **Vorgaben zur Dokumentation** von Eingangsparametern, Randbedingungen, Zwischenergebnissen und weiteren Endergebnissen. Damit könnte eine schnelle Plausibilisierung der Ergebnisse ermöglicht werden.
- Bei der umfassenden Gefahrenanalyse in Wildbacheinzugsgebieten müssen in den verschiedenen Berechnungsschritten unterschiedliche Methoden eingesetzt werden. **Standardisierte Schnittstellen** zwischen den Methoden sollten entwickelt werden, welche eine Ergebnisübergabe und Weiterverarbeitung vereinfachen.
- Da Ausbildung, Sachkenntnis und Erfahrung der Bearbeiter für plausible und realitätsnahe Ergebnisse wesentlich sind, sollte bei der **Aus- und Fortbildung** auf die Empfehlungen der Arbeitsgruppe eingegangen werden und ggf. neue Fortbildungen zum Umgang mit und vor allem zur Plausibilisierung der Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden angeboten werden.
- Ein **Erfahrungs- und Wissensaustausch** ist ebenso wichtig und wird empfohlen.

Alle bisher genannten Empfehlungen tragen auch wesentlich zu einer fundierten **Qualitätssicherung** von Gefahrenanalyse und Planung von Schutzmaßnahmen bei.



Fernübertragene Abflussmessung mit Niederschlags- und Lufttemperaturmessung am vergletscherten nur 2,7 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet des Goldbergbaches unter dem Hohen Sonnblick; Foto: Koboltschnig

### b) Neue künftige Aufgabenbereiche

Im Folgenden sollen noch **zwei Bereiche** betrachtet werden, welche **zunehmend an Bedeutung** für Gefahrenanalysen gewinnen und in denen noch **Defizite bei den Methoden** bestehen. Auch hierzu gibt die Arbeitsgruppe Empfehlungen:

Neben dem Bemessungsfall sollte zwingend der **Überlastfall** betrachtet werden. Allerdings bestehen Unsicherheiten bei der Art und Weise der Betrachtung und Einbeziehung in die Gefahrenanalyse bzw. Planung von Schutzmaßnahmen. Die vorhandenen Unsicherheiten und Defizite bei den Methoden erschweren dem Planer den Umgang mit dem Überlastfall. Hierzu sollten Hilfestellungen zu folgenden Fragen / Aspekten erarbeitet und zur Verfügung gestellt werden:

- Wie soll der Überlastfall betrachtet werden?
- Welche Methoden können mit herangezogen werden, wo ist nur eine Experteneinschätzung möglich?
- Wo können Methoden ggf. für den Überlastfall weiterentwickelt werden?
- Wie können sich im Überlastfall Leitprozesse verändern?
- Wie geht man mit vorhandenen Bauwerken im Überlastfall um?

Die letzte Frage stellt schon den zweiten Bereich mit Bedarf an Hilfestellungen und Methoden dar: Wie gehen wir mit vorhandenen Bauwerken um? Diese Frage stellt sich allerdings auch schon für den Bemessungsfall. Die zahlreichen Bauwerke in den Wildbächen haben ganz unterschiedliche Qualität und Erhaltungszustände. Insofern sollten dem Planer noch Hilfestellungen zum Umgang mit **vorhandenen Bauwerken** bei der Gefahrenanalyse und bei der Planung ergänzender bzw. neuer Schutzmaßnahmen gegeben werden. Dazu wäre die Untersuchung folgender Fragestellungen nötig:

- Wann ist ein Vergleich Zustand vor Bauwerken und Zustand nach Errichtung der Bauwerke erforderlich? Wie bzw. mit welchen Methoden kann dieser Vergleich angestellt werden?
- Was passiert, wenn Bauwerke versagen?
- Welche Bauwerke müssen zwingend erhalten werden? Wann ist der letztmögliche Zeitpunkt für die Sanierung?
- Wie verändern sich die Randbedingungen mit der Zeit (z.B. Veränderung der Rauigkeiten bei Gewässern durch Bewuchs)?
- Sind die vorhandenen Bauwerke auf den heute abgeschätzten Leitprozess ausgelegt? Wie können Sie ggf. angepasst werden?
- Wie sind bestehende Bauwerke bei einer Sanierung zu bemessen? Wann kann nicht mehr saniert werden, sondern muss neu gebaut werden?

### Fazit:

Aus der Arbeit an der Überprüfung und kritischen Betrachtung der vorhandenen Methoden für Wildbachprozesse sind mit vorliegendem Bericht wichtige Hilfestellungen für den Umgang mit den Methoden in der Praxis entstanden. Darüber hinaus wurden auch wichtige noch weitgehend offene Fragestellungen aus der Praxis zusammengetragen. Die Arbeitsgruppe würde sich wünschen, dass diese Fragestellungen in laufenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit einfließen und so deren Ergebnisse noch besser auf den Bedarf der Praxis zuschneiden. Darüber hinaus wären aber auch neue Projekte Basis des aufgezeigten Forschungs- und Entwicklungsbedarfes sinnvoll, welche künftig praxisnahe Hilfestellungen für die Bearbeiter ermöglichen.

Insofern ist „OptiMeth“ nicht als abgeschlossen zu betrachten, sondern nur als Beginn eines längeren Prozesses zu sehen.

## E. Literaturverzeichnis nach Themenbereichen

### Allgemeine Literatur

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), Biel, Schweiz, 32p.

ETAlp (2003a): Erosion, Transport in Alpinen Systemen, Handbuch Detailebene, Projektteam ETAlp, WLV / BMLFUW, 11.12.2003.

ETAlp (2003b): Erosion, Transport in Alpinen Systemen, Kompendien, „Stumme Zeugen Katalog“, Projektteam ETAlp, WLV / BMLFUW, 15.12.2003.

Hübl, J., Kienholz, H., Loipersberger, A. (Hrsg.) (2006): DOMODIS: Dokumentation alpiner Naturereignisse; Handbuch; Forschungsgesellschaft Interpraevent 2006.

Kienholz, H. (1999): Anmerkungen zur Beurteilung von Naturgefahren in den Alpen. In: Relief, Boden, Paläoklima, Gebr. Borntraeger: Berlin, Stuttgart, v.14, p. 165–184.

Kienholz, H., Herzog, B., Bischoff, A., Willi, H.P. (2002): Fragen der Qualitätssicherung bei der Gefahrenbeurteilung. Bänderwald, 55. Jg. 1 / 02, p. 57–67.

Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2012b): Verbesserung von Geschiebevorhersagen in Wildbächen und Gebirgsflüssen durch Berücksichtigung von Makrorauigkeit. Wasser, Energie, Luft, 104 (2): 129–139.

ONR 24800 (2009): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung; Austrian Standards Institute, 2009.

PLANAT (2000): Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei der Beurteilung von Naturgefahren. Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT), c/o Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 20 S.

PLANAT (2008): Wirkung von Schutzmaßnahmen. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Bern, Strategie Naturgefahren Schweiz, Umsetzung des Aktionsplans PLANAT 2005–2008, Projekt A3, Schlussbericht 2. Phase, Testversion, Dezember 2008. 289p.

Rickenmann, D. (2013): Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. Bericht WSL Nr. xx, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz, ISSN Nr. 2296–3456 (in Vorbereitung).

### Hydrologie

BWG (2002): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Praxishilfe Berichte des BWG – Serie Wasser, Nr. 4, Bern.

Kan, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 169, Bern.

Pirkl, H. (2000): Absicherung von Kartierungs- und Be-

wertungsindikatoren des spezifischen Flächenbeitrags Schutz- und Wasserhaushaltsregelungsfunktionen in Wildbacheinzugsgebieten typischer alpiner Kulturlandschaften als Basis einer Einzugsgebiets-Management-Planung. Abschlussbericht. Unveröffentl. Bericht im Auftrag BMLF und BMWV.

Rogger, M.; Kohl, B.; Pirkl, H.; Hofer, M.; Kirnbauer, R.; Merz, R.; Komma, J.; Viglione, A.; Blöschl, G. (2011): HOWATI – Hochwasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich; In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 7–8 / 2011, Springer WienNewYork.

USDA, SCS – US Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1955): The hydrology guide for use in watershed planning; National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4.

Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern.

### Geschiebe, Geschiebetransport

Brauner, Scherz (2010): Methodik einer Szenarien-Analyse; AdaptAlp – Workpackage 5, im Auftrag der Bundeswasserbauverwaltung/Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt. Wien.

DIN 19663 (1985): Wildbachverbauung – Begriffe, Planung und Bau; Deutsches Normeninstitut, Beuth Verlag, Berlin, 1985.

Frick, E., Kienholz, H., Roth, H., (2008): SEDEX – eine Methodik zur gut dokumentierten Abschätzung der Feststofflieferung in Wildbächen. Wasser Energie Luft, 100 (2), 131–136.

Frick, E., Kienholz, H., Romang, H., (2011): SEDEX (SEdiments and EXperts), Anwenderhandbuch. Geographica Bernensia P42. Geographisches Institut der Universität Bern.

Gertsch, E., (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Großereignissen – Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern.

Grasso, D.A., Jakob, A., Spreafico, M. (2007): Abschätzung der Schwebstofffrachten mittels zweier Methoden (Beispiel Hochwasser August 2005). Wasser Energie Luft, 99 (3): 273–280.

Lehmann, C. 1993: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen – Grundlagen und Anleitung. Geographica Bernensia G42. Bern.

Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2011): Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. Water Resources Research, 47, W08513, doi:10.1029 / 2011WR010645.

Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. Water Resources Research, 37(12): 3295–3305.

Rickenmann, D. (2012): Alluvial steep channels: flow resistance, bedload transport and transition to debris flows. In: Gravel Bed Rivers: Processes, Tools, Environment, edited by M. Church, P. Biron and A. Roy, John Wiley & Sons, Chichester, England, pp. 386–397.

Rickenmann, D. et al. (2013): Bedload transport estimation with geophones: comparison of calibration measurements from different field sites. Manuscript submitted to Earth Surface Processes and Landforms.

Spreafico, M., Lehmann, C., Naef, O. (1996): Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Teil I: Handbuch, 46p. + Anhang, und Teil II: Fachliche Grundlagen, 113p., Groupe de travail pour l'hydrologie operationelle (GHO), Mitt. Nr. 4, Herausgabe und Vertrieb: Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Spreafico, M., Lehmann, Ch., Jakob, A., Grasso, A. (2005): Feststoffbeobachtung in der Schweiz. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 8, Bern.

Turowski, J.M., Badoux, A., Rickenmann, D., Fritschi, B. (2008): Erfassung des Sedimenttransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen – Anwendungsmöglichkeiten von Geophonmesanlagern. Wasser Energie Luft, 100 (1): 69–74.

Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker, G. (1997a): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, vdf-ETH, Zürich, Switzerland, 161p.

Zimmermann, M., Mani, P., Romang, H. (1997b): Magnitude-frequency aspects of Alpine debris flows. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 90 (3): 415–420.

### Schwemmholz

Gunder, K.; Wyler, R. (2009): Schwemmholzurückhalt Einzugsgebiet Schächen, Studie über das Aufkommen und den Rückhalt von Schwemmholz, IG Wasserbau Uri, Öko-B AG, Stans. INTERPRAEVENT (Hrg. 2011): Praxisleitfaden Wildholz, internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt.

Lange, D.; Bezzola, G.R. (2006): Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze, Mitteilung Nr. 188, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW der ETH Zürich.

Rimböck, A. (2001): Luftbildbasierte Abschätzung des Schwemmholzpotenzials (LASP) in Wildbächen; Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr.91; S. 202–213.

Rimböck, A. und Strobl, Th. (2001): Schwemmholzpotenzial und Schwemmholzurückhalt am Beispiel Partnach / Ferchenbach (Oberbayern); Wildbach- und Lawinenverbau, Zeitschrift des Vereins der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs, 65. Jahrgang August 2001 Heft 145.

WSL (2009): Schwemmholz der Ereignisanalyse des Hochwassers 2005. Schlussbericht des Teilprojekts ‚Schwemmholz‘; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 2009.

### Hydraulik

Barnes, H.H. (1967): Roughness characteristics of natural channels, Geological Survey Water-Supply Paper 1849. United States government printing office, Washington.

Ferguson, R. (2007). Flow resistance equations for gravel- and boulderbed streams, *Water Resour. Res.*, 43, W05427, doi:10.1029/2006WR005422. Hicks, D.M., Mason, P.D. (1993): Roughness Characteristics of New Zealand Rivers, Water Resources Survey, Wellington, New Zealand.

Habersack, H., Sattler, S., Badura, H., Gabriel, H., Hengl, M., Huber, B. et al. (2011): ÖWAV Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie; BMLFUW.

Jirka, G.H., Lang, C. (2009): Einführung in die Gerinnehydraulik, Universitätsverlag Karlsruhe.

Nitsche, M., Rickenmann, D., Kirchner, J.W., Turowski, J.M., Badoux, A. (2012): Macro-roughness and variations in reach-averaged flow resistance in steep mountain streams, *Water Resources Research*, 48, W12518, doi: 10.1029/2012WR012091.

Rickenmann, D., Recking, A. (2011): Evaluation of flow resistance equations using a large field data base. *Water Resources Research*. 47, W07538, doi:10.1029/2010WR009793.

Spreafico, M., Hodel, H.P., Kaspar, H. (2001): Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 1, Bern, 102p.

### Murgang

Corominas, J. (1996): The angle of reach as mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33, 260–271.

Heim, A. (1932): Bergsturz und Menschenleben. Zürich: Fretz & Wasmuth Verlag AG.

Hampel, R. (1977): Geschiebewirtschaft in Wildbächen. Wildbach und Lawinenverbau, 41 (I): 3–34.

Kronfellner-Krauss, G. (1982): Ueber den Geschiebe- und Feststofftransport in Wildbächen. *Oester. Wasserwirtschaft*, 34(1/2): 12–21.

Mizuyama, T., KOBASHI, S., OU, G. (1992): Prediction of debris-flow peak discharge, *International Congress Interpraevent*, 1992, 4, 99–108.

Phillips, C.J., Davies, T.R.H. (1991): Determining rheological parameters of debris flow materials. *Geomorphology*, 4, 101–110.

Rickenmann, D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows, *Natural Hazards* 19, 47–77.

Rickenmann, D., Laigle, D., McArdeall, B.W., Hübl, J. (2006): Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences*, 10: 241–264.

Rickenmann, D., Scheidl, C. (2010): Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen. *Wasser, Energie, Luft*, 102(1): 17–26.

Rickenmann, D., Zimmermann, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis *Geomorphology* 8, 175–189.

Scheidl, C., Rickenmann, D. (2010): Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 157–173.

Iverson, R. M., Schilling, S. P., Vallance, J.W. (1998): Objective delineation of lahar inundation hazard zones *Geological Society of America Bulletin*, 110, 972–984.

Zimmermann, M., Mani, P., Romang, H. (1997): Magnitude-frequency aspects of Alpine debris flows. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 90 (3): 415–420.

### Anhänge

(nur zum download unter [www.interpraevent.at/optimeth](http://www.interpraevent.at/optimeth)):

Anhang Hydrologie

Anhang Hydraulik

Anhänge Methodensteckbriefe:

Anhang Hy:  
Methodensteckbriefe Hydrologie

Anhang Ge:  
Methodensteckbriefe Geschiebepotenzial und -fracht

Anhang S:  
Methodensteckbriefe Schwemmholz

Anhang Hw:  
Methodensteckbriefe Hydraulik / Hochwasserabfluss

Anhang Gt:  
Methodensteckbriefe Geschiebetransport

Anhang M:  
Methodensteckbriefe Murgang



