



Wildbach- und Lawinenverbau

Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz
Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering

Modellierung von Naturgefahren-Prozessen

verein der diplomingenieure
der wildbach und lawinenverbauung
österreichs

ISBN: 978-3-9503089-3-8

76. Jahrgang, September 2012, Heft Nr. 169

Heft 169

Wildbach- und Lawinenverbau

Impressum:

Herausgeber:

Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung
Österreichs, A-9500 Villach

Schriftleiter:

Dipl.-Ing. Dr. Florian RUDOLF-MIKLAU
c/o Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung IV/5 - Wildbach- und
Lawinenverbauung, Marxergasse 2, 1030 Wien
+43 1 71100 7333 – Fax: +43 1 71100 7399
florian.rudolf-miklau@wlv-austria.at

Titelbild:

Staublawine / Hochwasser 2005 Paznauntal (Tirol) / Felssturz Randa (Schweiz) / Murgang 2005 Starkenbach (Tirol)

Quelle: alle Bilder © WLV

Inhalt Heft 169



*... Nur für Sie
gehen wir in die Luft ...*

- Rettungsflüge • Film- und Fotoflüge*
- Montagen • Tierbergungen*
- Lawinsprengungen • Hüttenversorgung*
- Holztransporte • Leitungskontrollen*
- Feuerbekämpfung • VIP- und Shuttleflüge*



Heli Tirol GmbH
A-6462 Karres, Tiroler Bundesstraße 1
Tel +43 (0)5412 - 61 421
Mail fly@heli-tirol.at

Heli Austria GmbH
A-5600 St. Johann im Pongau, Heliport
Tel +43 (0)6462 - 4200
Mail fly@heli-austria.at

Editorial

Seite 12

Trauer um den Mahner und Visionär Herbert Aulitzky
Ein Nachruf

Seite 14

Corrigendum Heft 168

Seite 16

Johannes Hübl:
**Anwendungsbereich und Grenzen der Prozessmodellierung
von gravitativen Naturgefahren in Praxis und Wissenschaft**

Seite 18

Robert Kirnbauer, Bernhard Kohl, Johannes Hübl, Günter Blöschl:
**N/A-Modelle: Anwendung des neuen
ÖWAV-Leitfadens für Wildbacheinzugsgebiete**

Seite 28

Gerald Jäger, Markus Moser, Helmut Habersack:
**Methoden und Modelle zur Berechnung von
Abflusskapazitäten und Geschiebetransport in alpinen Fließgewässern**

Seite 46

Matthias Granig:
Grundlagen und Anwendung von Lawinsimulationsmodellen

Seite 68

Sandra Melzner, Alexander Preh:
Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis

Seite 78

Christoph Skolaut:
**Anwendung von Modellen in der Gefahrenzonenplanung
der Wildbach- und Lawinerverbauung**

Seite 98

KURZBEI-
TRÄGE

HAUPARTIKEL "SCHWERPUNKTTHEMA"



Wildbachschutz Gadaunerbach, Bad Hofgastein

Sicher bauen.

Bauen auf schwierigem Terrain. Am Gadaunerbach im Team erfolgreich:

Nach bestem Wissen

MEVA Schalungs-Systeme, Alzner Baumaschinen und die

und Gewässer.

Wildbach- und Lawinenverbau, GBL, Pongau. Danke für's Teamwork.



www.meva.at • info@meva.at • Tel. 02252 209000
www.alzner.at • office@alzner.at • Tel. 06219 8065

Inhalt Heft 169

KURZBEITRÄGE "SCHWERPUNKTTHEMA"

Peter Andreacs, Karl Hagen:
Methodik zur Bewertung von Naturgefahrenprozessen

Seite 102

Klaus Klebinder, Bernadette Sotier, Alexander Eder, Peter Straus,
Gerhard Markart, Helmut Aigner, Gerhard Holzinger, Christian Kramer:
Hydrologische Bodenkennwerte und Abflussreaktionstypen für Niederösterreich

Seite 114

Michael Botthof, Gerhard Holzinger, Stefan Janu, Gerald Jäger,
Daniel Kurz, Susanne Mehlhorn, Markus Moser, Christian Pürstinger:
**Modellanwendung für die Planungspraxis der WLW:
Konzept für einen Leitfaden des Fachbereichs Wildbachprozesse**

Seite 124

Stefan Janu, Susanne Mehlhorn:
**Sensitivitätsanalyse und Vergleich
2-dimensionaler Hochwasserabflussmodelle**

Seite 136

Werner Heller:
Praxisbeispiel – EDV-gestützte Revision von Gefahrenzonenplänen mit Flo-2D

Seite 150

Diethart Peters-Walker, Karl-Heinz Krause, Tom Strellen,
Hannes Kleindienst, Frederic Petrini-Monteferri, Volker Wichmann:
**Modellierung von Abfluss und Geschiebetransport in alpinen
Wildbacheinzugsgebieten mit SimAlp/HQsim**

Seite 154

Julia Eisl, Stefan Fieger, Johannes Hübl:
**Vom Ereignis zur Projektierung - Evaluierung von Methoden zur Gefahren-
abschätzung anhand eines dokumentierten Ereignisses (Beispiel Oberwölz)**

Seite 168

Andrea Kreisler, Helmut Habersack:
Erste Ergebnisse der Geschiebemessungen an der Ursiau

Seite 180

Markus Moser, Gerald Jäger:
**Ingenieurmäßige profilweise Methode zur Berechnung des
Geschiebetransportes – Spezialsachverständigengutachten
im Zusammenhang mit Kleinkraftwerken**

Seite 190



Go ahead...

Wir sind Ihr absolut kompetenter Partner bei Planungen, Gutachten und Projektmanagement von...

- Wildbachverbauungen
- Schutzwasserbauten
- Böschungssicherungen
- Lawinerverbauungen
- Forst- und Güterwegen
- Landschaftspflegerische Begleitplanung
- Speicherteiche
- Schneeanlagengesamtplanung
- Skipistenbau
- Schneileitungssystemen
- Wasser- und Quellfassungen
- Wasserver- und entsorgung
- schiGIS[®]-Infosystem für Skigebiete
- uvm...



Holzstützverbauung



Forst- und Güterwegplanung



Alperschonbach

www.klenkhart.at

Klenkhart & Partner Consulting
A-6067 Absam · Salzbergstrasse 15
Telefon: +43 (0) 50226-0 · Fax: +43 (0) 50226-20
e-mail: office@klenkhart.at



Daniel Kurz, Helmut Kulisch:
Theoretische Bemessung und Optimierung eines Entnahmebauwerks mit hydraulischen Modellversuchen

Seite 200

Philipp Jörg, Matthias Granig, Yves Bühler, Peter Gauer, Helmut Schreiber:
Vergleich von gemessenen und simulierten Lawinengeschwindigkeiten

Seite 214

Jan-Thomas Fischer, Matthias Granig, Uwe Schlifkowitz, Nick Schumacher:
Eine neue Auswertungsmethode der Lawinsimulationssoftware SamosAT

Seite 226

Alexander Prokop, Anna Wirbel, Bernhard Payer, Christina Delaney:
Schneeverfrachtungsmodellierung – Stand der Technik

Seite 236

Engelbert Gleirscher, Jan-Thomas Fischer, Robert Winkler:
Optimierung des Reflexionsdammes der Mühlauer-Klamm-Lawine

Seite 246

Luuk Dorren, Bernard Loup, Hugo Raetzo:
Einsatz von Modellen in der Schweizer Sturzgefahrenbeurteilung

Seite 256

Thomas Zwack:
Vergleich zweier kommerziell erhältlicher Programme zur numerischen 2D-Steinschlagsimulation anhand eines Fallbeispiels

Seite 268

Marc Christen, Werner Gerber, Christoph Graf, Yves Bühler, Perry Bartelt, James Glover, Brian W. McArdeall, Thomas Feistl, Walter Steinkogler:
Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit "RAMMS" (Rapid Mass Movements)

Seite 282

Bettina Neuhäuser, Joachim Schweigl, Bodo Damm, Birgit Terhorst:
Rutschprozesse im Wienerwald in Niederösterreich und Wien

Seite 294



**tiroler
wasser
kraft**

frische *Energie* für unser Land!

TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG

Praxis-Pinnwand	<p>Pichler: SedAlp Ellmer: Leitfaden Hochwasserrückhaltebecken Goldmann: WLK-Bauwerkskataster Status</p>	Seite 306-307
	<p>Sotier: UAV (unmanned aerial vehicles)</p>	Seite 308
	<p>Gleirscher: Snowcatcher Stadlbauer: Ankerdimensionierung nach ONR 24810</p>	Seite 310
Aktuelles	<ul style="list-style-type: none"> • Kongress Interprävent 2012 Grenoble • ÖWAV-Ausbildung WildbachaufseherIN • Buchempfehlung "Praxishandbuch zur Samengewinnung und Renaturierung von artenreichem Grünland" (Verlag Cleup Padova, Italien) 	Seite 312-313
	<ul style="list-style-type: none"> • Buchempfehlung „Tracking torrential processes on fans and cones“ (Advances in Global Change Research, Verlag Springer) • Buchempfehlung "Bauen und Naturgefahren - Handbuch für den Technischen Gebäudeschutz" (Verlag Springer) 	Seite 314-315
	<ul style="list-style-type: none"> • Dissertation (Abstract): Development of acoustic monitoring for Alpine mass movements • Dissertation (Abstract): Tree rings and torrential activity – tree disturbance and event histories 	Seite 316-317
	<ul style="list-style-type: none"> • BOKU - Aktuelle Diplomarbeiten • Unsicherheiten im Naturgefahrenmanagement - Ein Literaturvergleich 	Seite 318-319
Verzeichnis der Inserenten		Seite 320

FLORIAN RUDOLF-MIKLAU

Editorial

Liebe Leserin, Lieber Leser,

der Ablauf von Hochwasser, Muren, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen – technisch als Naturgefahrenprozesse bezeichnet – lässt sich heute mit komplexen, numerischen Modellen auf dem Computer simulieren. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden in „bunten Karten“ attraktiv präsentiert oder vermitteln als bewegte Animationen auf dem Bildschirm den realitätsnahen Eindruck. Prozessmodelle unterstützen das Vorstellungsvermögen der betroffenen Bevölkerung und erheben den Anspruch hoher Ergebnisgenauigkeit und technologischer Qualität. Aus diesen und vielen anderen Gründen stellt die Simulation von Naturgefahrenprozessen heute – teilweise zu Recht – den „Stand der Technik“ der Gefahrenanalyse dar. Das erregt häufig die Skepsis „alter Praktiker“.

Es war daher eine große Herausforderung, das erste Heft nach der Übernahme der Schriftleitung einen Schwerpunkt zu diesem spannenden und kontroversiellen Thema zu widmen. Der Anspruch war, Beiträge zu allen relevanten Naturgefahrenprozessen, über wissenschaftliche Grundlagen von Modellen genauso wie über die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung sowie von Befürwortern und Skeptikern der Simulation in gleicher Weise zu erhalten. Die Erwartung war zwiespältig, umso überwältigender ist der Rücklauf. Autoren aus Österreich, Schweiz und Deutschland sowie aus allen möglichen Fachbereichen haben es geschafft, dieses Thema tatsächlich (fast) erschöpfend abzudecken. So ist es gelungen, dem Leser auf etwas mehr als 300 Seiten einen vollständigen Überblick über den Stand des Wissens und der Technik der Prozessmodellierung für hydrologische und gravitative Naturgefahren und zudem noch einen vielfältigen Eindruck über die Erfahrungen der Ingenieurpraxis mit der Modellanwendung zu geben. Das Heft begleitet die intensive Innovationstätigkeit der Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich in den Fachbereichen „Wildbachprozesse“, „Schnee- und Lawinen“ und „Geologie“ bezüglich der Prozessmodellierung.

Was diese Publikation nicht leisten kann, ist jemandem seine „Modellgläubigkeit“ zu nehmen

oder fundamentale Skeptiker vom Mehrwert der numerischen Simulation zu überzeugen. Allerdings werden Sie, geschätzte Leserinnen und Leser, nach der Lektüre der hervorragenden Beiträge ein Gefühl dafür entwickelt haben, welche Teile der Wirklichkeit Prozessmodelle heute simulieren können und welche uns dennoch verborgen bleiben. Sie werden einen Überblick aller Dimensionen der Modellierung – von der einfachen Faustformel bis zum empirischen Labormodell – erhalten. Und sie werden ein wenig besser verstehen, was wirklich hinter der Modellgenauigkeit steckt ... oder wie hat es doch ein italienischer Universitätsprofessor seinerzeit bei einer Tagung in Nizza ausgedrückt: Modellgenauigkeit 10 % - Das Modell ist falsch! Modellgenauigkeit 30 % - Ungenaue Darstellung der Realität! Modellgenauigkeit 60 % - Das Modell entspricht der Wirklichkeit! Modellgenauigkeit 90 %: Der Modellierer lügt!

Ich wünsche Ihnen viel Freude in der virtuellen Realität der Naturgefahrenprozesse,
Ihr



Dr. Florian Rudolf-Miklau
Schriftleiter

CHRISTOPH SEYMANN, JOHANNES HÜBL, FLORIAN RUDOLF-MIKLAU

Trauer um den Mahner und Visionär Herbert Aulitzky

Ein Nachruf



Em.o.Univ.Prof., w. Hofrat i.R., Dipl. Ing. Dr. Univ.-Doz. Herbert Aulitzky, eine prägende Persönlichkeit der Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich und akademischer Lehrer einer ganzen Generation von „Wildbachlern“ ist am 8. April 2012 im 91. Lebensjahr verstorben. Für seine fachlichen Wegbegleiter war er Visionär, Querdenker und treibende Kraft zahlreicher Entwicklungen im Schutz vor alpinen Naturgefahren. Für seine Studenten war der „Auli“ ein strenger, manchmal gefürchteter, und menschlich zu tiefst prägender Professor. Für die Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung war er zugleich ein Identifikationspunkt für das Selbstverständnis des Dienstzweiges, als auch ein hartnäckiger Kritiker in allen Ent-

wicklungsphasen bis knapp vor seinem Tod.

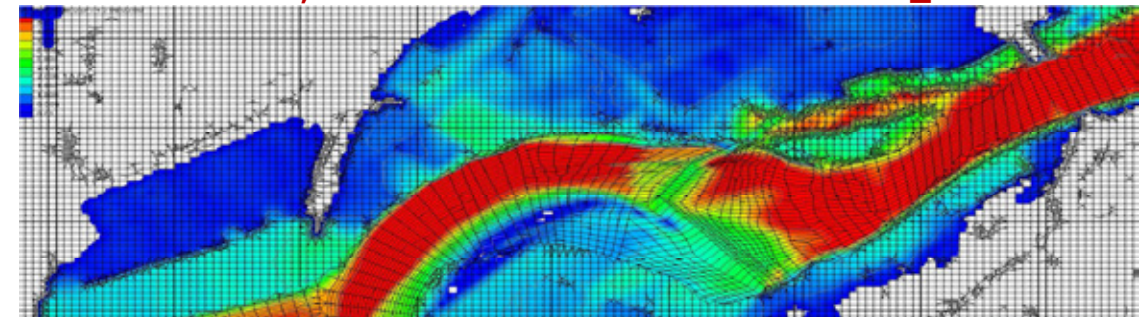
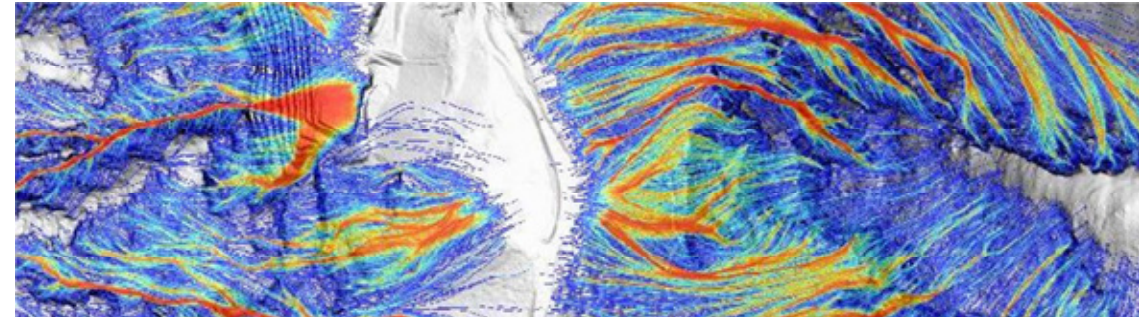
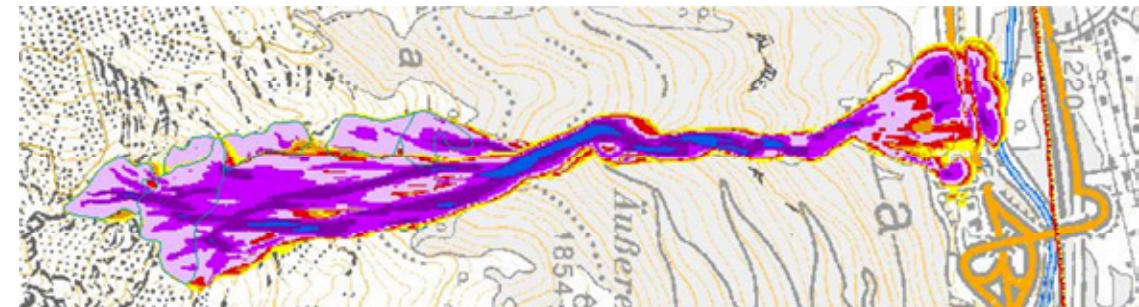
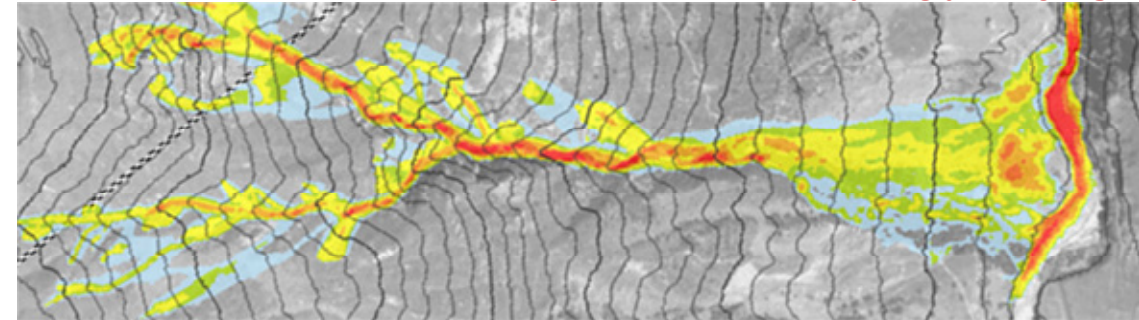
Die außergewöhnliche Persönlichkeit Herbert Aulitzky zu beschreiben, gelingt vielleicht am besten anhand von Erinnerungen und Gedanken. Jenseits allen fachlichen Wissens lehrte er seine Studenten, dass „gesunder Hausverstand erlaubt ist, jedoch nicht gepflegt wird“. Geschätzt und gefürchtet war seine Härte und Ausdauer in der akademischen Arbeit, zu sich selbst und zu seinen Schülern. Von ihm zu lernen, bedeutete, sich niemals mit der erstbesten oder einfachsten Lösung zufrieden zu geben, sondern die Dinge ganzheitlich zu betrachten.

Seinen oft radikalen Denkansätzen verdanken wir auch den Paradigmenwechsel in der Wildbachverbauung der 1970-er Jahre, weg von der reinen Verbauungstätigkeit, hin zur Gefahrenzonenplanung, den Herbert Aulitzky maßgeblich mitprägt hat. Ein weiteres Credo lautete, dass „Vorbeugen besser als Heilen“ ist. Vielleicht war es sein besonderes Verständnis für die Zusammenhänge der Natur und die Grenzen der menschlichen Entwicklungsmöglichkeiten, die ihn als einen der ersten erkennen ließen, dass „viele Katastrophen nicht von Natur aus notwendig sind, sondern vom Menschen selbst verursacht, weil er die Wichtigkeit einer ganzheitlichen Betrachtungsweise verloren hat“. Kompromisslos für seine Visionen kämpfend und in der Systemkritik manchmal bis an die Grenzen der politischen Akzeptanz gehend hat er häufig die Konfrontation mit Entscheidungsträgern und Eliten gesucht; trotz ministerieller „Warnung“ hat er seinen Kampf für die Gefahrenzonenplanung bis zur Verankerung im Forstgesetz 1975 durchgeföhrt, Hofrat und Universitätsprofessor ist er trotzdem (oder gerade deswegen) geworden.

Als gebürtiger Tiroler wuchs Herbert Aulitzky in Wien auf. Die schrecklichen Erlebnisse als Frontsoldat im 2. Weltkrieg (Stalingrad) waren wohl Triebfeder für seine akademische Ausbildung an der Universität für Bodenkultur in Mindestzeit, die er bereits 1950 mit dem Doktorat „summa cum laude“ abschloss. Nach ersten Jahren als Bauleiter bei der Wildbach- und Lawinenverbauung in Tirol vollzog er als Leiter der Forschungsstelle für Subalpine Waldforschung (Obergurgl, Patscherkofel) von 1953 – 1963 die Weichenstellung zu seiner wissenschaftlichen Karriere. Auf diese Zeit gehen wichtige Forschungsleistungen, wie das „Wind-Schnee-Ökogramm“ zur praktischen Durchführung der Hochlagenaufforstung oder die Bewirtschaftungsmethodik für den Lärchen-Zirbenwald zurück. Auch nach seiner Bestellung zum Leiter der Gebietsbauleitung Inns-

bruck der WLW blieb er der Wissenschaft in Forschung und Lehre treu und erreichte den vorläufigen Höhepunkt der akademischen Laufbahn mit der Verleihung des Titels „Universitätsdozent für forstliche Bioklimatologie“ an der Universität für Bodenkultur. Damit war sein weiterer Weg zum ordentlichen Universitätsprofessor für Wildbach- und Lawinenverbauung vorgezeichnet, den er über den „Umweg“ des Sektionsleiters der WLW in Oberösterreich (ab 1971), im Jahr 1972 erreichte. Ab diesem Zeitpunkt war Herbert Aulitzky – neben seiner Lehr- und Forschungstätigkeit – in zahlreichen Funktionen und Aufgaben aktiv. Zu seinem Wirken zählen Lehr- und Vortragstätigkeiten in Japan, China, Italien, Griechenland, Polen und der Schweiz, die Leitung des Wissenschaftlich-technischen Beirates der Internationalen Forschungsgesellschaft INTERPRÄVENT, Konsulententätigkeiten für die UNESCO (Paris), das österreichische Parlament und den Europarat (Straßburg) sowie das Verfassen von zahlreichen Beiträgen und Monographien. Er war Träger des Österreichischen Ehrenkreuzes für Wissenschaft und Kunst 1. Klasse und Ehrenmitglied der Ingenieurvereine der Wildbachverbauung in China und Österreich. Am 1. Oktober 1990 emeritierte Universitätsprofessor Herbert Aulitzky, nahm jedoch auch nach seinem Rückzug ins Privatleben rege am fachpolitischen Diskurs teil.

Herbert Aulitzky hat vieles für die Wildbach- und Lawinenverbauung bewegt, bewegend ist auch die Erinnerung an seine Persönlichkeit und sein Wirken. Vielen bedeutenden Menschen wird nach ihrem Tod ein Denkmal gesetzt. Die nachhaltigsten Monumente für Aulitzky sind wahrscheinlich die „Stummen Zeugen“ vergangener Katastrophen in der Natur, weil sie zeitlos sowohl an die Naturgefahren als auch an seine Visionen und Mahnungen erinnern. Den Schutz vor Naturgefahren in Österreich in seinem Sinne weiterzuentwickeln, muss uns allen ein Ansporn sein.



Corrigendum zu Heft 168

Correction to edition 168

Der im Heft 168 – Study trip 2011 Iceland – veröffentlichte Artikel „Machbarkeit von Stützverbauungen zum Lawinenschutz in Island – das Pilotprojekt in Siglufjörður“ basiert weitestgehend auf den zwei folgenden Publikationen:

Jóhannesson, T., Larsen, J.O., Hopf, J., 1998, Pilot Project in Siglufjörður – Interpretation of observations from the winter 1996/1997 and comparison with similar observations from other countries, Veðurstofa Islands Report, VI-G98O33-JR26

Jóhannesson, T., Hopf, J., 2008, Loading of supporting structures under Icelandic conditions. The type of structures and requirements in future Projects, International Symposium on Mitigative Measures against Snow Avalanches, Egilstadir, Iceland, p. 70-77

Diese Arbeiten wurden bedauerlicherweise in der Referenzliste nicht angeführt, was hiermit nachgeholt und im Einvernehmen mit den Autoren klarstellend dem Leserkreis zur Kenntnis gebracht werden darf.
Der Herausgeber

The article “Feasibility of supporting structures for avalanche projection in Iceland – Siglufjörður pilot project” published in issue 168 – Study trip 2011 Iceland – is to a large extent based on the following two publications:

Jóhannesson, T., Larsen, J.O., Hopf, J., 1998, Pilot Project in Siglufjörður – Interpretation of observations from the winter 1996/1997 and comparison with similar observations from other countries, Veðurstofa Islands Report, VI-G98O33-JR26

Jóhannesson, T., Hopf, J., 2008, Loading of supporting structures under Icelandic conditions. The type of structures and requirements in future Projects, International Symposium on Mitigative Measures against Snow Avalanches, Egilstadir, Iceland, p. 70-77

Regrettably, the papers are not quoted in the adjacent reference list. In accordance with the authors, we would herewith like to clarify and make up for this missing point to the circle of readers.

The Editor

JOHANNES HÜBL

Anwendungsbereich und Grenzen der Prozessmodellierung von gravitativen Naturgefahren in Praxis und Wissenschaft

Modelling of natural hazards in science and practice: scope and limits of application

Zusammenfassung

Naturgefahren sind das Ergebnis natürlicher Prozesse, die in ihrer komplexen Gesamtheit zu meist nicht nachvollzogen werden können. Deshalb bedient man sich einer vereinfachten Darstellung der Realität, eines Modells, das einerseits eine Erklärung des Phänomens, aber auch eine Prognose über das zukünftige Verhalten des Systems ermöglichen sollte. Eingangsdaten, Modellparameter und Modellstruktur stecken die Anwendungsmöglichkeiten von Modellen ab. Vom Anwender solcher Modelle ist zu fordern, dass die Ergebnisse von Modellberechnungen auf ihre Plausibilität überprüft werden und die Qualität der Modellierung durch eine entsprechende Dokumentation der Phasen des Modellierungsprozesses nachgewiesen wird.

Stichwörter

Naturgefahren, Modellierung, Anwendungsgrenzen, Unsicherheiten

Abstract

Natural hazards are the result of natural processes of high complexity within a non-linear system. The interrelation of all those elements is difficult to trace, therefore simplified concepts are introduced to find explanations for phenomena of natural hazards and to facilitate statements about the future behaviour of the system. Input data, parameter and structure of the model confine the application of models. The users of models are requested to verify the modelling results by a plausibility check and to enhance the quality of modelling procedure by documenting all relevant steps.

Keywords

Natural hazards, modelling, limits of application, uncertainties

Einleitung

Grundlage jeder begründeten Entscheidung ist ein Gedankenmodell, das die real ablaufenden und zumeist sehr komplexen Vorgänge einfach, verständlich und nachvollziehbar darstellt. Dieses Modell kann auf Erfahrung, mathematischen Zusammenhängen oder auf physikalisch basierten Erkenntnissen beruhen. Um Modelle anwenden zu können, sind jedenfalls Daten erforderlich, die das Modell „füttern“. Die dann mit dem Modell produzierten Resultate sollten ein Abbild der Realität bzw. der zu erklärenden Phänomene geben und ein weites Spektrum von Anwendungsfällen plausibel erklären können.

Was sind die Ziele der Modellbildung?

Modelle werden entwickelt um bestimmte Ziele zu erreichen, sie sind somit zweckorientiert. Solche Ziele können sein (Schaldach, 2009):

- **Funktionalität:** Modelle werden gemacht, damit sie bestimmte Funktionen erfüllen. Oft werden sie gegenüber dem „Original“ bevorzugt, weil sie einfacher und leichter zu handhaben sind.
- **Simulation:** Am Modell sollen Operationen durchgeführt und getestet werden, die sich am Originalobjekt selbst nicht oder nur sehr schwer durchführen lassen. Das Modell ersetzt probeweise das Original.
- **Erklärung:** Das Modell soll gewisse Phänomene oder das Verhalten von Objekten erklären.
- **Voraussage:** Modelle müssen auch in der Lage sein, Voraussagen über das zukünftige Verhalten der Objekte zu machen (Szenarien).

Da gefährliche Naturprozesse doch eher selten auftreten und entweder ein Ereignis nachgerechnet oder

bemessen werden sollte, liegt der Zweck der angewendeten Modelle in der Erklärung und Prognose.

Was sind Modelle?

Modelle stellen Abbilder der Realität dar, das Verhalten eines Systems soll durch das Modell beschrieben werden können. Nach Bailer-Jones (2002) haben Modelle folgende Eigenschaften in Bezug auf die durch sie zu beschreibende Wirklichkeit:

- **Ungenauigkeit:** Modelle beruhen auf Annäherungen und Vereinfachungen.
- **Inkonsistenz:** manchmal stehen Modelle im Widerspruch zu anerkannten Prinzipien, zu bekannten Tatsachen oder zu anderen Modellen.
- **Unvollständigkeit:** die meisten Modelle konzentrieren sich lediglich auf eine Betrachtungsweise eines Phänomens und geben damit keine vollständige Beschreibung des Gesamtprozesses.

Trotz dieser Einschränkungen können Modelle als Abbilder eines realen Geschehens verwendet werden (Bailer-Jones, 2002):

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

Die Anwendung eines Modells zur Erklärung eines bestimmten Phänomens liegt allein beim Modellbenutzer. Dieser entscheidet über die Brauchbarkeit und ordnet das Modell jenem Aspekt eines Phänomens zu, für den dieses formuliert worden ist (Hochschwarzer, 2009). Das Kriterium, ob ein Modell anwendbar ist, ist die Überprüfung in der Wirklichkeit an realen Ereignissen.

Welche Modelltypen gibt es?

Man unterscheidet zwischen deterministischen und stochastischen Modellen. In hybriden Modellen werden beide Typen miteinander verknüpft.

Deterministische Modelle

Deterministische Modelle setzen voraus, dass alle Teilprozesse in einem System bekannt sind und verstanden werden. Sind alle Gesetze und Parameter dieses Systems bekannt, ist dieses berechenbar und Ereignisse prognostizierbar. Dieser Modelltyp ist unabhängig von Wahrscheinlichkeit und Zufall.

Empirische Modelle (Black – Box Modelle)

Allgemein versteht man unter Empirie die Beobachtung und Sammlung von Informationen im Gelände oder im Labor; man spricht von der Erhebung empirischer Daten. Verknüpft man diese Beobachtungsdaten durch eine mathematische Beziehung, erhält man ein empirisches Modell. Dieses enthält keine physikalisch begründeten Transferfunktionen zwischen System-Input in System-Output. Somit gibt das Modell keinen Aufschluss über die dem Prozess zugrundeliegenden Funktionen, sondern ver-

sucht die Reaktion eines Systems mathematisch zu beschreiben.

Ein empirisches Modell ist nur auf die Bandbreite der erhobenen Daten kalibriert. Deshalb ist dieser Modelltyp in der Anwendung einerseits auf die Größenordnung der zugrundeliegenden Daten beschränkt, andererseits räumlich an das Gebiet der empirischen Daten gebunden. Eine Extrapolation ist deshalb nur bedingt möglich. Je größer und je einheitlicher der verwendete Datensatz, desto genauer beschreiben empirische Modelle die Wirklichkeit.

Im Naturgefahrenbereich gibt es eine große Anzahl an empirischen Modellen (Schätzformeln). Am bekanntesten ist wohl die Abflussformel nach Wundt (1949).

Physikalisch basierte Modelle (White - Box Modelle)

Sind die physikalischen Gesetze der teilweise sehr komplexen Teilprozesse eines Systems bekannt und können sie in mathematischen Modellen formuliert werden, spricht man von White-Box Modellen. Die mathematische Umsetzung der meist vereinfachten physikalischen Ansätze ist kompliziert und erfordert hohen Aufwand an Daten und Rechenzeit. Die Verknüpfung von richtig formulierten Teilprozessen muss nicht zwangsläufig in der richtigen Formulierung des Gesamtprozesses münden. Die Lösung der mathematischen Probleme kann je nach Ansatz analytisch, d.h. mit bekannten Funktionen, oder numerisch, durch z.B. Finite-Differenzen-Methode, gewonnen werden. Bei der räumlichen Diskretisierung der Modellstruktur wird zwischen gegliederten Modellen und Blockmodellen unterschieden. Gegliederte Modelle versuchen die räumliche Heterogenität der Gebietscharakteristika sowie die räumliche Variabilität der Eingangsdaten zu erfassen, während Blockmodelle dies nicht berücksichtigen (Nachtnebel, 2003).

Konzeptuelle Modelle (Grey - Box Modelle)

Erfolgt die Beschreibung der Prozesse mit semiempirischen Formeln, die teilweise auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhen, spricht man von konzeptuellen Modellen. Sie nehmen eine Stellung zwischen Black-Box und White-Box Modellen ein. Wenn die in diesen Modellen verwendeten Parameter für größere Flächeneinheiten gelten (z.B. Mittelwerte), wird dieser Modelltyp als „Lumped Model“ bezeichnet. Diese Art von Modellen wird oft in der Hydrologie verwendet.

Stochastische Modelle

Stochastische Modelle unterstellen keine physikalische Beziehung zwischen den verschiedenen Elementen des betrachteten Prozesses. Die verwendeten Parameter sind Zufallsvariablen, die Eingangsfunktion eine Zufallsfunktion.

Von der Art der Prozessbeschreibung sind stochastische Modelle mit empirischen Black-Box Modellen vergleichbar.

Hybride Modelle (stochastisch-deterministisch)

Dieser Modelltyp kombiniert deterministische mit stochastischen Modellansätzen.

Ergänzende Unterscheidungsmerkmale

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Modelltypen ist die Berücksichtigung der zeitlichen Komponente (Schaldach, 2009):

- statische Modelle liefern für jeden Eingangswert einen genau definierten Wert der Systemvariablen. Alle Größen sind zeitunabhängig.
- dynamische Modelle beschreiben die zeitliche Dynamik eines Systems. Ein- und Ausgangsgrößen, sowie Modellparameter sind daher zeitabhängig.

Wesentlich scheint noch die Unterscheidung der Modelle auf Basis der räumlichen Betrachtung der Prozesse in ein-, zwei oder dreidimensionale Modelle.

Im Bereich von Naturgefahren-Prozessen ist weiters die Zusammensetzung von Suspensionen und der im Modell berücksichtigten Phasen (single phase, multi phase) von großer Bedeutung.

Welche Modelle werden zur Beschreibung gravitativer Naturgefahren eingesetzt?

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 (Abbildung 1).

Gravitative Naturereignisse haben gemeinsam, dass sie unter speziellen Randbedingungen aufgrund einer Zusatzbelastung (aber auch Schwächung) des Systems ausgelöst werden. Als methodischer Ansatz kann das von Kienholz (1995) entworfene Dispositionsmodell (Abbildung 2) angesehen werden, das für unterschiedliche Gefahrenarten weiter entwickelt wurde. Als mögliches Resultat solcher Modellierung können Suszeptibilitätskarten angesehen werden.

Belastungsmodelle beschreiben das Auslöseereignis, in den meisten Fällen die Höhe des flüssigen oder festen Niederschlags. Als vorteilhaft erweisen sich überregional gültige Bemessungswerte, die zwar den Modellierungsfreiraum einschränken, dafür aber Unsicherheiten in den Annahmen für die Eingangsdaten reduzieren.

Das Materialversagen und somit der Beginn der Materialverlagerung wird in den meisten Fällen nicht modelliert, da die Bemessung

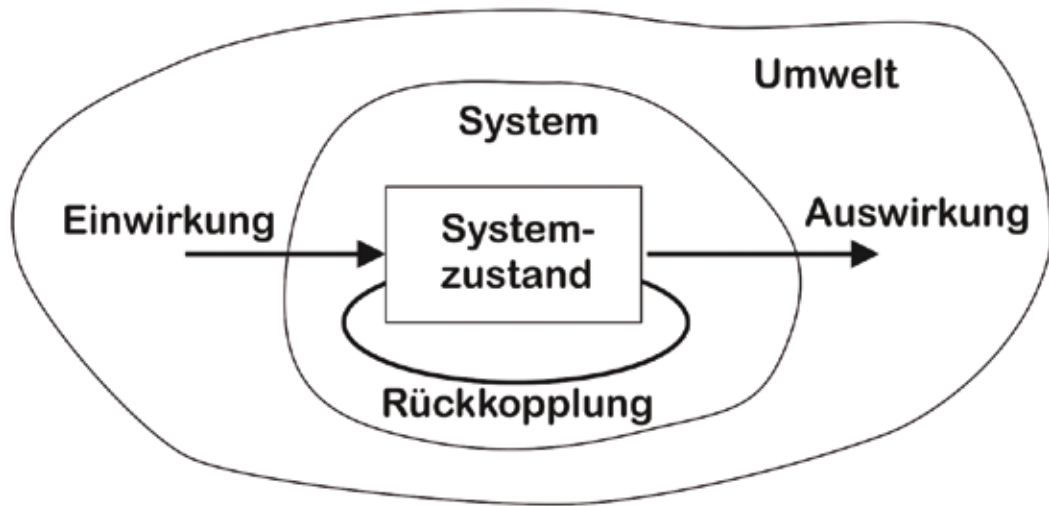


Abb. 1: Systemdynamik durch Einwirkung aus der Systemumwelt und durch Rückkoppelungseffekte der Systemzustände (Bossel, 2004)

Fig. 1: Dynamic systems divers: environmental loads and reaction coupling (Bossel, 2004)

voraussetzt, dass sich eine Masse in Bewegung setzt. Möglich wären sowohl empirische als auch physikalische Modelltypen. Die hydrologischen

Ansätze zur Abflussbildung und Abflusskonzentration können auch unter „Versagen“ subsumiert werden.

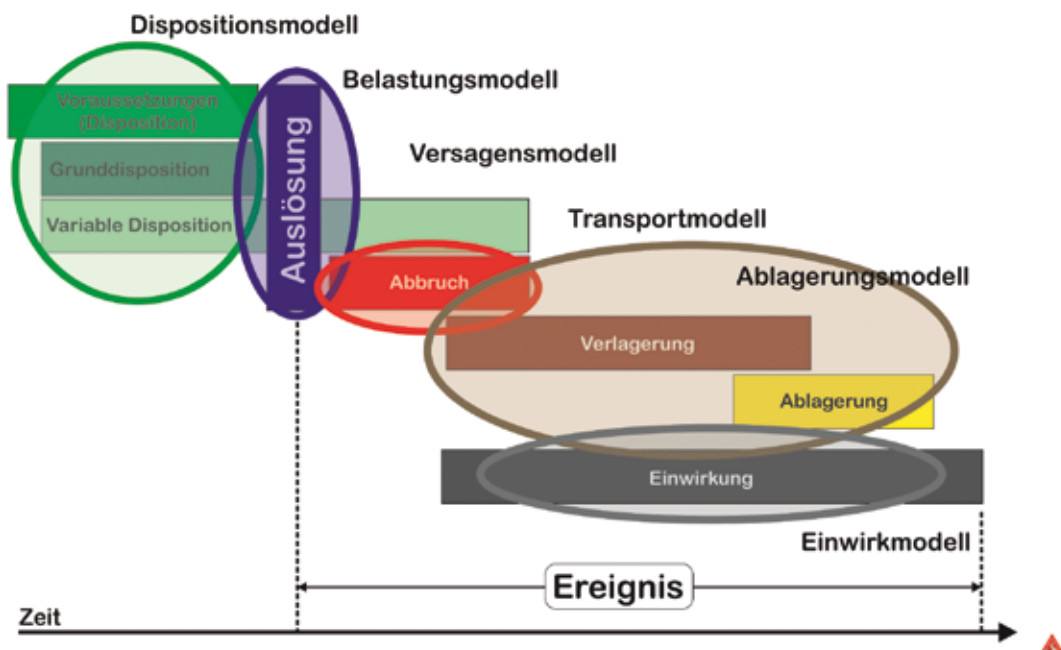


Abb. 2: Abfolge von Modellen zur Beschreibung gravitativer Naturgefahren

Fig. 2: Sequence of models for mass movements

Systemkomponenten	Modelltypen				
	deterministisch			stochastisch	hybrid
	empirisch	physikalisch	konzeptuell		
Disposition	X				X
Belastung		X		X	
Versagen	X	X	X		
Transport		X	X	X	
Ablagerung	X	X	X		
Einwirkung		X			

Tab. 1: Mögliche Ausgabeparameter einer Auswahl von Massensturzmodellen (zusammengestellt von Preh)

Tab. 1: Available output parameters of a selection of large volume rockfalls and rock avalanche models (compilation by Preh).

Für die Verlagerung und Ablagerung stehen mittlerweile verschiedene Modellansätze für die meisten Prozessstypen zur Verfügung. Zumeist ist es ein Modell, das für die Verlagerung entwickelt wurde und das als Randbedingung die Ablagerung aufweist. Für sehr viele Anwendungen werden die Flachwassergleichungen gelöst, für Suspensionen (z.B. Muren) wird anstelle der Newton'schen Flüssigkeit derzeit ein rheologisches Modell implementiert. Für lineare Prozesse (z.B. Transitstrecke) sind oft 1D-Modelle ausreichend, die Ausbreitung und flächige Ablagerung kann aber nur in einem 2D-Modell modelliert werden. Die schrittweise Anpassung der Veränderungen des Höhenmodells durch die Ablagerungen wird noch in keinem Modell realisiert.

Einwirkungsmodelle beschreiben die Interaktion zwischen Prozess und einem Objekt, auf das der Prozess während der Ver- bzw. Ablagerung trifft. Es gibt unterschiedliche physikalische Modellansätze die zur Ermittlung der Einwirkungskräfte herangezogen werden können. Messdaten, vor allem im Zusammenhang mit der Reaktion eines Bauwerkes, sind jedoch kaum verfügbar.

Eine Zuordnung der oben aufgelisteten

Systemkomponenten zu den Modelltypen versucht Tabelle 1. Empirische Modelle sind für die Komponenten Disposition, Versagen und Ablagerung weit verbreitet. Physikalische Modelle decken fast alle Prozesselemente ab, sind zumeist aber nicht miteinander gekoppelt. Das Ergebnis eines Modells dient somit als Startwert für das nächste Modell. Stochastische Modelle sind in der Belastungsbildung (z.B. Bemessungsniederschlag) und vereinzelt für den Transport (Geschiebetransport) zu finden.

Welche Faktoren begrenzen die Anwendbarkeit von Modellen

Die Wahl eines anzuwendenden Modells ist prinzipiell von der Aufgabenstellung abhängig. Es wird jedoch die Verfügbarkeit und die Genauigkeit der erforderlichen Eingangsdaten die Modellauswahl mitbestimmen. Welches Modell schlussendlich Anwendung findet, ist somit ein Kompromiss zwischen Modellrelevanz und Datenverfügbarkeit. Als weitere Aspekte sind die kommerzielle Verfügbarkeit, die verfügbare Rech-

nerleistung und der für die Berechnung erforderliche Zeitaufwand zu berücksichtigen. Nicht zuletzt sind MitarbeiterInnen erforderlich, denen der theoretische Hintergrund des Modells bekannt ist. Dies schließt die Kenntnis des ursprünglichen Anwendungszweckes des Modells mit ein.

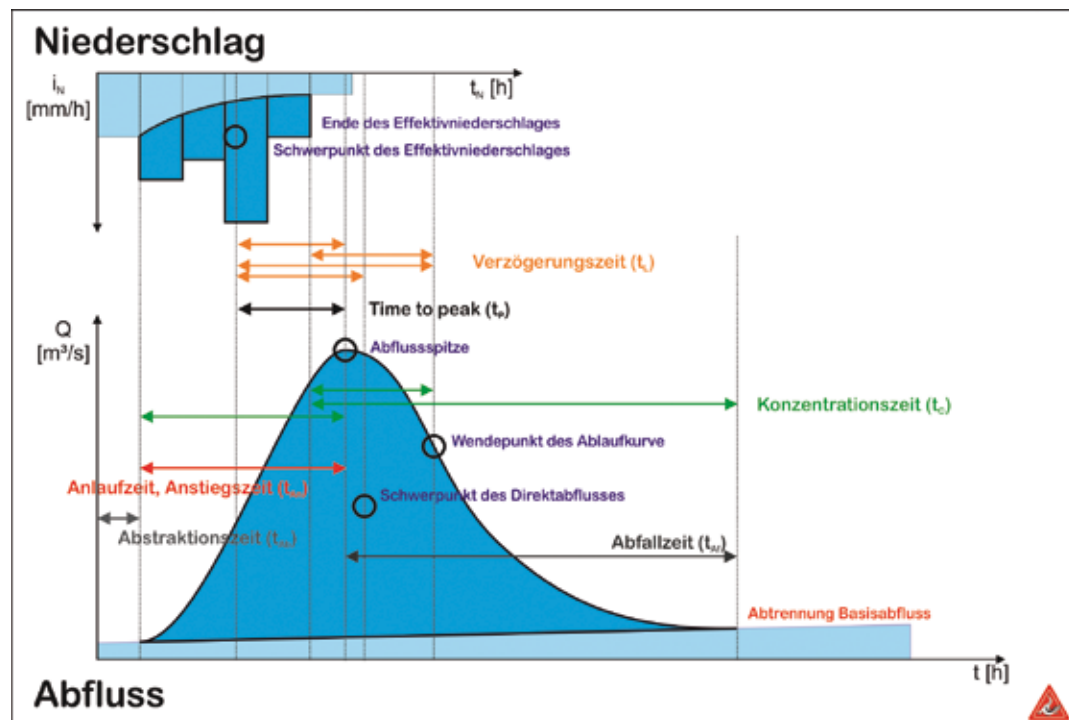
Prozessabbildung

Modelle werden für genau definierte Prozesse entwickelt und können nicht prozessübergreifend angewendet werden. So kann ein Staublawnenmodell nicht für die Modellierung einer Nassschneelawine eingesetzt werden, ein hydrodynamisches Abflussmodell nicht zur Abbildung von Murgängen. Die Abgrenzung der Prozesse muss im Ereignisraum räumlich, aber eventuell auch zeitlich erfolgen, wenn das reale Prozessgeschehen modelliert werden sollte.

Parametrierung

Da jedes Modell verschiedene Parameterkonstellationen verwendet, muss deren Definition bekannt sein. Die Gültigkeitsgrenzen der Parameter sind einzuhalten. Innerhalb der zulässigen Schwankungsbreite ist die Sensitivität der Parameterwerte durch verschiedene Szenarien zu bestimmen. Weiters muss die räumliche und zeitliche Auflösung aller Eingangsdaten der geforderten Genauigkeit der Resultate entsprechen.

Als Beispiel eines Parameters, der zu großer Verwirrung beitragen kann, sei die Konzentrationszeit genannt (Abbildung 3). Die Konzentrationszeit ist als die Zeit definiert, die ein Niederschlagstropfen vom Auftreffen im entferntesten Punkt des Einzugsgebietes bis zum Abfluss im Ausgangsprofil ohne nennenswerte Speicherung benötigt, bei einem konstanten, gleichmäßig



Abfluss

Abb. 3: Beispiel für unterschiedliche Definitionen des Modellparameters Konzentrationszeit

Fig. 3: Example of different definitions for the term „time of concentration“

über das Einzugsgebiet verteilten Niederschlag. Da diese Definition sowohl für die Zeit vom Beginn des Niederschlages bis zum Erreichen des Spitzenabflusses als auch für die Zeit des abfallenden Astes der Ganglinie gültig ist, verwenden Autoren unterschiedliche Modellparameter zur Bestimmung der Konzentrationszeit. Zusätzlich in der Fachliteratur eingeführte Begriffe (Anstiegszeit, Anlaufzeit, Lagtime) tragen zu weiterer Konfusion bei.

Kalibrierung

Kalibrierung ist die Anpassung der Modellparameter, bis sich die Ergebnisse aus den Modellrechnungen den Messdaten möglichst gut annähern. Sie kann entweder manuell oder automatisiert erfolgen. Der Vorteil der manuellen Kalibrierung ist die Integration von Expertenwissen über die tatsächlich auftretenden Prozesse und deren Einfluss auf die Ergebnisse. Bei einer sehr großen Anzahl an zu kalibrierenden Parametern stößt die manuelle Kalibrierung rasch an ihre Grenzen.

Fast alle Berechnungen gravitativer Naturgefahren können jedoch aufgrund fehlender Messdaten nicht kalibriert werden. So bleibt nur die Möglichkeit, Modelle an den wenigen messtechnisch erfassten Extremereignissen zu kalibrieren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können mit Einschränkungen auf andere Gebiete mittels Analogie übertragen werden.

Validierung

Das Testen eines Modells nach der Kalibrierung gegen zusätzliche empirische Daten (Messdaten) ohne Veränderung der Modellparameter wird als Validierung bezeichnet. Die in der Validierung verwendeten Datensets dürfen nicht bereits für die Kalibrierung benutzt worden sein.

Plausibilisierung

Die überschlagsmäßige Überprüfung von Ergebnissen von Modellberechnungen auf Plausibilität soll mit möglichst geringem Aufwand feststellen, ob die Rechenwerte schlüssig, erklärbar und nachvollziehbar sind. Da, wie oben schon erwähnt, die Datenbasis zur Berechnung gravitativer Naturgefahren nur begrenzt verfügbar ist, ist der Plausibilisierung ein sehr hoher Stellenwert beizumessen.

Der Umgang mit der Unsicherheit in den Modellen

Je nach Qualität und Verfügbarkeit der Eingangsdaten, der Güte der verwendeten Modellparameter und der zutreffenden Charakteristik des angewendeten Modells schwanken die Ergebnisse der Modelle. Deshalb ist es unumgänglich, dass auf die mögliche Bandbreite der Ergebnisse hingewiesen wird.

Die in der Modellierung verwendeten Daten sollten jedenfalls auf mögliche Fehler 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.

Die Qualität einer Modellierung kann durch die Einhaltung folgender Punkte nach „Leitfaden zur Niederschlag-Abflussimulation“ (ÖWAV, 2013) 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.)

Modellübersicht

Eine Übersicht und Kurzbeschreibungen von verfügbaren Modellen im Bereich Wasser bieten ETALP (2003), die Arbeitsbehelfe des ÖWAV zum Thema Hydrodynamik (2007), Feststoffmodellierung (2011) und Niederschlag-Abfluss (2013) sowie in naher Zukunft eine Publikation der Forschungsgesellschaft Interpraevent mit dem Titel „OPTIMETH: Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden zur Beschreibung von Wildbachprozessen“.

Anwendung in Wissenschaft und Praxis

Die in der Wissenschaft verwendeten Modelle werden sehr oft nur von einem kleinen Anwenderkreis benutzt. Von diesem sollte man annehmen, dass ihm der theoretische Hintergrund des Modells bekannt ist. Fehler im Modell bzw. in der Anwendung müssten im wissenschaftlichen Kontrollprozess erkannt werden, sodass keine „Gefährdung“ von potentiell Betroffenen durch gravitative Naturgefahren durch die Anwendung der Modellergebnisse gegeben sein dürfte. Der Benutzer der Modelle ist somit in vielen Fällen auch der Adressat der produzierten Resultate.

Modellanwendungen in und für die Praxis zeigen hingegen eine rasche Auswirkung auf potentiell Betroffene. Vor allem die Resultate von Überflutungs- und Ablagerungsbereichen können weitreichende Folgen auf die Raumnutzung und den Versicherungsschutz haben. Die Ergebnisse der Modellanwendung werden in Tabellen, Graphen oder „bunten“ Karten dargestellt, die die Verantwortlichen aus Politik und Verwaltung als Entscheidungsgrundlage benutzen. Diese Ergebnisse beinhalten aber keine Information, wie die Entscheidungsgrundlagen tatsächlich ermittelt wurden, welche Daten, Modelle und Modellparameter verwendet wurden, und natürlich welche Unsicherheit in den Ergebnissen verborgen ist. Es fehlen somit wesentliche Hinweise zur Erklärung der Ergebnisse, da die Gruppe der „Produzenten“ von Modellergebnissen nicht mit der Gruppe der Anwender kongruent ist.

Schlussfolgerungen

Die Entwicklung und Anwendung von Prozessmodellen hat in den letzten beiden Jahrzehnten stark zugenommen. Dies ist nicht so sehr auf die Entdeckung neuer physikalischer Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen, sondern auf verbesserte numerische Lösungsmöglichkeiten, verbunden mit größerer Rechnerleistung. Zugleich wurde die Anwenderfreundlichkeit der Software verbessert, sodass zahlreiche Modelle ohne allzu viele modelltheoretische Vorkenntnisse angewendet werden können. Dies bedeutet, dass Plausibilitäts- und Kontrollroutinen erforderlich sind, um die Qualität der Modellergebnisse rasch überprüfen zu können. Die Anwendung von Modellen bedeutet Verantwortung zu übernehmen, sowohl im Hinblick auf die Integrität der Erstellung, als auch für die Konsequenzen der Betroffenen der Modellergebnisse.

Anschrift des Verfassers / Author's address:

Univ. Prof. DI Dr. Johannes Huebl
 Institut für Alpine Naturgefahren,
 Department Bautechnik und Naturgefahren
 Universität für Bodenkultur Wien
 Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien
 johannes.huebl@boku.ac.at

Literatur / References:

- BAILER-JONES, D. (2002):
 Naturwissenschaftliche Modelle: Von Epistemologie zu Ontologie; in A. Beckermann und C. Nimitz, Argument und Analyse - Sektionsvorträge. Paderborn
- BOSEL, H. (2004):
 Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation, Books on Demand GmbH, Norderstedt
- HOCHSCHWARZER, M. (2009):
 Vergleich von Simulationsmodellen zur Reichweitenabschätzung alpiner Murgänge am Beispiel südtiroler Ereignisse; Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur

KIENHOLZ, H. (1995):
 Gefahrenbeurteilung und -bewertung: Auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. Schweizer Zeitschrift für das Forstwesen, Jg. 146 (9): 701-725.

NACHTNEBEL, H. P. (2003):
 Hydrologie: Vorlesungsunterlagen, 123 1234 BOKU Wien, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Wien

ÖWAV (2011):
 Arbeitsbehelf Fließgewässermodellierung - Feststofftransport und Gewässermorphologie

ÖWAV (2007):
 Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik, Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis

ÖWAV (2013):
 Arbeitsbehelf Niederschlag-Abfluss Modellierung (in Ausarbeitung)

PROJEKTTEAM ETALP (2003):
 ETALP-Erosion, Transport in alpinen Systemen, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Wien

SCHALDACH, M. (2009):
 Grundsätzliches zu Modellen; Vorlesungsunterlagen (Zugriff am 30.5.2012) download von: ftp://ftp.usf.uni-kassel.de/lehre/schaldach/vl_modellbildung_simulation/MoSim3.pdf

WUNDT, W. (1949)
 Die größten Abflussspenden in Abhängigkeit von der Fläche. Die Wasserwirtschaft, 40, 59-64.



Hydrologie



Meteorologie



Geologie

**Für temporäre Maßnahmen oder
dauerhafte Überwachung**

bieten wir Ihnen die Komplettlösung aus einer Hand!

NEU - NEU - NEU - NEU



» RQ-24 «
Berührungslose
Abflussmessung
mit Radar-
technologie



Sommer Mess-Systemtechnik
Straßenhäuser 27, A-6842 Koblach
Tel: +43-5523-55989
Email: office@sommer.at
Internet: www.sommer.at

**Spezialsensorik · Beratung · Planung
Anlagenbau · Systemintegration**

ROBERT KIRNBAUER, BERNHARD KOHL, JOHANNES HÜBL, GÜNTER BLÖSCHL

N/A-Modelle: Anwendung des neuen ÖWAV-Leitfadens für Wildbacheinzugsgebiete

P/R-Models: Application of the new ÖWAV-Guideline for torrential catchments

Zusammenfassung

Der neue ÖWAV-Leitfaden „Niederschlag-Abflussmodellierung“ wird für Modell Anwender (z.B. Ingenieurbüros oder Ingenieure aus dem Kreis des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung), also für Personen entwickelt, die Ergebnisse von Modellierungen zu interpretieren und zu beurteilen haben, aber auch für Modellentwickler. In diesem Beitrag werden Hinweise auf wichtige Kapitel und Grundgedanken in diesem Leitfaden gegeben.

Stichwörter

N/A-Modellierung, ÖWAV-Leitfaden, Wildbacheinzugsgebiete

Abstract

The new ÖWAV-Guideline for Rainfall Runoff Modelling is developed for model users (e.g. engineering consultants or engineers from the Austrian Service for Torrent and Avalanche Control), in other words for experts from authorities in charge of interpreting and evaluating modelling results, and even for model developers. Therefore, this paper presents the content and ideas of the main chapters of the Guideline.

Keywords

precipitation-runoff-modelling, ÖWAV-guideline, torrent catchments

Einleitung

Der Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) hat 2008 einen Arbeitskreis zur Erstellung eines Leitfadens für die Verwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in der Wasserwirtschaft eingerichtet. Im vorliegenden Beitrag soll ein Überblick über Inhalt und Struktur des Leitfadens gegeben werden, und es soll darauf eingegangen werden, welche Teile und in welcher Form für Wildbacheinzugsgebiete anwendbar sein werden.

Der Leitfaden befindet sich noch in Ausarbeitung und daher noch nicht in der Endfassung vor. Die Struktur steht allerdings fest, die meisten Kapitel sind sehr weit gediehen, und tiefgreifende inhaltliche Änderungen dieser Kapitel sind nicht mehr zu erwarten. Allerdings bedarf das gesamte Opus einer umfassenden Endredaktion, um die angesichts der großen Zahl von Autoren und Koautoren der einzelnen Kapitel unvermeidlichen Heterogenitäten in Inhalt und Stil bestmöglich auszugleichen.

In den ersten Sitzungen der Arbeitsgruppe war die generelle Gliederung des Leitfadens festgelegt worden, und für die einzelnen Kapitel fand sich jeweils ein(e) Kapitelverantwortliche(r). Diese(r) rekrutierte zusätzliche Experten, die zum jeweiligen Kapitel, aufbauend auf ihren eigenen Tätigkeiten bzw. Erfahrungen, Beiträge zu leisten gewillt waren. Dieser Umstand bedingt die oben erwähnte Heterogenität des Leitfadens im gegenwärtigen Stadium.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages werden Hinweise gegeben, welche Kapitelinhalte für die Wildbach- und Lawinenverbauung sehr

wichtig erscheinen, sodass sie in der WLV-spezifischen Anwendungssituation genauer studiert werden sollten. Ein für die Arbeit der Wildbach- und Lawinenverbauung außerordentlich wichtiges Problem, nämlich der Zusammenhang zwischen Abfluss und Feststofftransport, ist im Leitfaden bewusst ausgeklammert.

Der Beitrag enthält eine Inhaltsübersicht des Leitfadens. In der Folge werden die Haupt- und Unterkapitel aufgezählt und einzelne für die WLV wichtig erscheinende Hinweise gegeben.

Kapitel 1: Anwendungssituationen

1 Anwendungssituationen

1.1 Aufgabenstellungen:

Hochwasserbemessung

Wasserbewirtschaftung

Vorhersage

Risikoanalyse

Analyse von Veränderungen

Grundlage für die Modellierung des Stofftransportes

Prozessverständnis

1.2 Zusammenspiel:

Aufgabe, Modell, Datenlage, hydrologische Prozesse (*wird noch ergänzt!*)

Das „Prozessverständnis“, das „Zusammenspiel von Aufgabe, Modell, Datenlage, und hydrologischen Prozessen“, die „Hochwasserbemessung“ und die „Risikoanalyse“ stehen im Zentrum des Interesses der Wildbach- und Lawinenverbauung. In Einzelfällen können auch Überlegungen zur Erstellung eines Vorhersagemodells mit einem N/A-Modell angestellt werden.

Kapitel 2: Wahl von Eingangsgrößen

- 2 Wahl von Eingangsgrößen
 - 2.1 Hydrometeorologische Stations- und Flächendaten
 - 2.1.1 Typische meteorologische und hydrologische Stationsdaten
 - 2.1.2 Auswahl der Stationsdaten und zeitliche Auflösung
 - 2.1.3 Datenprüfung und Korrektur
 - 2.1.3.1 Niederschlag
 - 2.1.3.2 Wasserstand und Durchfluss
 - 2.1.4 Beeinflussung von Daten
 - 2.1.5 Vom Stationswert zum Gebietswert - Regionalisierung hydrometeorologischer Größen
 - 2.1.5.1 Gebietsniederschlag
 - 2.1.5.2 Schneedaten im Gebiet
 - 2.1.5.3 Gebietswerte für die Lufttemperatur
 - 2.2 Gebieteigenschaften
 - 2.2.1 „Statische“ Einzugsgebietsdaten
 - 2.2.2 Zeitlich veränderliche Einzugsgebietsdaten
 - 2.3 Startwerte für Systemzustände des Modells
 - 2.4 Meteorologische Vorhersagen und Klimaprojektionen

In diesem Kapitel werden jene Eingangsdaten beschrieben, die je nach der Aufgabenstellung dem zu modellierenden Prozess, der Charakteristik des Einzugsgebietes, der Verfügbarkeit der Daten und ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung bzw. je nach dem Modell erforderlich sind.

Hierbei wird nach Beobachtungsdaten von Naturvorgängen, die den Prozess der Abflusssentstehung „antreiben“ (z. B. Niederschlag, Temperatur, Schneeschmelze, Verdunstung) und nach

Gebietsdaten zur Beschreibung der Eigenschaften des zu modellierenden Gebietes oder der Fläche (z. B. topographische Daten und solche zum Boden-Vegetationskomplex und der Geologie) unterschieden. Zu den „antreibenden“ Daten zählen auch jene, die zur Verifizierung bzw. Falsifizierung des Modells benötigt werden. Diese Daten beschreiben generell Prozesse mit großer Dynamik und sollten daher in einer zeitlichen Auflösung vorliegen, die für den zu beschreibenden Prozess adäquat ist; beispielsweise wären Tagessummen des Niederschlages als Eingangsdaten in ein N/A-Modell für ein kleines Wildbacheinzugsgebiet inadäquat. Die Gebietsdaten können meist als statische Daten betrachtet werden, es sei denn, es müssten längerfristige Veränderungen in einem Einzugsgebiet analysiert und dann prognostiziert werden.

Generell gilt laut Leitfaden:

Empfohlen wird eine umfassende Datenerhebung. Über die unmittelbar erforderlichen Stationsdaten hinaus sollten weitere Daten herangezogen werden, z.B. für den Niederschlag nicht nur Daten von Ombrographen, sondern auch Ombrometerdaten. Auch Stationsdaten aus der Umgebung des zu modellierenden Gebietes sollten Berücksichtigung finden.

Empfehlenswert ist auch die Erhebung von Zusatzinformationen, z.B. aus Ereignisdokumentationen, Chroniken, Projektberichten, berechneten oder geschätzten hydrologischen Werten etc. Solche Zusatzinformationen haben vor allem bei der Modellierung unbeobachteter Gebiete einen hohen Stellenwert.

Der Abschnitt über die Datenprüfung und -korrektur verdient besondere Beachtung. Gerade bei kleinen Einzugsgebieten können insbesondere ältere Abflussbeobachtungen erhebliche Fehler enthalten.

Dies gilt auch für Daten, die von nicht ausreichend geschultem Personal erhoben werden. Der Leitfaden stellt umfangreiche Tabellen mit Empfehlungen betreffend die Datenkontrolle zur Verfügung.

Ungesicherte Daten aus unbekanntem Quellen sollten nicht verwendet werden. Die örtliche Lage von Messeinrichtungen, deren Daten verwendet werden, sollte dem Nutzer der Daten bekannt sein. Im Zuge von Gebietsbegehungen sollten die Aufstellungsorte von Messgeräten dokumentiert und fotografisch festgehalten werden. Insbesondere Schneemessungen sind regelmäßig mit systematischen Fehlern behaftet; durch Windinflüsse wird in der Regel eine erheblich kleinere Niederschlagsmenge gemessen, wenn der Niederschlag als Schnee fällt und in konventionellen Ombrometern oder Ombrographen aufgefangen wird. Das Messprinzip (beheizte Wippe oder Waage) ist in diesem Fall unerheblich.

Inhomogenitäten in den Datenreihen (z.B. Trends, sprunghafte Änderungen) können die Folge von Stationsverlegungen oder Änderungen des Messgerätetyps sein (z. B. höhere gemessene Niederschlagsintensitäten als Folge der Umstellung eines alten Ombrographentyps auf ein modernes Messsystem, das höhere Intensitäten messen kann). Diese höheren Intensitäten als Folge des Klimawandels zu bewerten wäre eine Fehlinterpretation. Eine sorgfältige Durchsicht der Stammdaten der Messstellen wird empfohlen. Der Leitfaden gibt weitere Hinweise darauf, wie Niederschlagsdaten korrigiert werden können.

Flächendetaillierte N/A-Modelle verlangen grundsätzlich flächendetaillierte Eingangs- und Kontrolldaten. Zu diesem Zweck müssen Punktdaten auf die Fläche interpoliert werden oder es kann notwendig sein, zumindest kurzzeitig zusätzliche Messstellen (z. B. zusätzliche Ombrographen, zusätzliche Pegel an Zubringern, etc.) einzurichten. Im Leitfaden werden diverse

Interpolationsverfahren vorgestellt, wobei jeweils auf die spezifische Literatur verwiesen wird.

Bei flächendetaillierten, kontinuierlich rechnenden N/A-Modellen (Wasserhaushaltsmodellen, soil moisture accounting schemes) ist der Schnee eine wichtige Bilanz- und Kontrollgröße. Als adäquate Maßzahl muss die räumliche Verteilung des Schneewasseräquivalentes (SWE) im Gebiet ermittelt werden. Diese Größe ist derzeit nur indirekt ermittelbar, sei es durch punktförmige Messungen entlang von sogenannten „snow courses“, sei es durch Fernerkundungsmethoden. Die Fernerkundung (terrestrisch oder aus der Luft aufgenommene Fotos, Satellitenbilder oder Laserscans) liefert Daten über die Schneebedeckung (Schneedecke ja/nein) oder – bei Verwendung der Laserscanner-Technologie – flächendetaillierte Daten zur Schneehöhe. Das Ergebnis von Snow-Course-Messungen sind SWE-Werte als Eingangsdaten in ein Interpolationsverfahren, Laserscanner-Daten der Schneehöhe können mit einem Regressionsmodell in SWE-Werte umgerechnet werden, Fernerkundungsdaten zur Schneedecke (Schneedecke ja/nein) sind nicht unmittelbar in SWE-Daten umsetzbar, jedoch erlauben Serienaufnahmen der Schneebedeckung die Kontrolle des Schneeschmelzansatzes eines kontinuierlichen flächendetaillierten N/A-Modells: Wenn die mit dem Modell berechnete Ausaperung des Gebietes mit den Bildern aus der Fernerkundung gut übereinstimmt, dann ist sowohl die Interpolation der Eingangsdaten (Niederschlag als Regen oder Schnee) als auch der Schneeschmelzansatz vertrauenswürdig.

Der Leitfaden geht auf das Problem der Erfassung von Schneedaten umfassend ein. Sowohl die Punktmessungen von Schneehöhe und SWE als auch die Regionalisierung im Gebiet, basierend auf Punkt- bzw. Fernerkundungsdaten, und ihre Verwendung bei der N/A-Modellierung werden eingehend beschrieben.

Dasselbe gilt auch für die Regionalisierung der Lufttemperatur, die speziell bei Wasserhaushaltsmodellen eine wichtige Eingangsgröße für die Berechnung der Verdunstung und für die Unterscheidung des Niederschlages als Regen oder Schnee darstellt.

Gebietseigenschaften dominieren – neben dem Niederschlag – das Niederschlag-Abfluss-Verhalten eines Gebietes. Die Topographie, die Vegetation, die Böden, der Felsuntergrund und die hydrogeologische Situation eines Gebietes sind im Rahmen des bei N/A-Modellen zu betrachtenden Zeithorizontes weitgehend invariant. Für alle diese Größen existieren – zumindest in Österreich – viele Unterlagen in analoger (Landkarten) bzw. digitaler Form (für die Böden in Wildbacheinzugsgebieten gilt das allerdings nicht immer). Die GIS-Technologie erlaubt es, die vorhandenen Unterlagen darzustellen und – notfalls durch Verschneiden – für die N/A-Modellierung nutzbar zu machen. Insbesondere der Boden-Vegetations-Komplex ist eine dominante Einflussgröße auf den Niederschlag-Abfluss-Prozess und sollte an Hand von Gebietsbegehungen analysiert, kartiert und so für die Modellierung nutzbar gemacht werden. Ein praxisorientiertes Analysewerkzeug findet sich u. a. bei Markart et al. (2004).

Hierzu der Leitfaden:

Es wird empfohlen, die gewonnenen Einzugsgebietsdaten stichprobenartig vor Ort zu überprüfen. Liegen keine Daten vor, sollten sie direkt erhoben werden, am besten durch Gebietsbegehung („Landschaft lesen“). Für größere Gebiete sollte dies zumindest punktuell vorgenommen werden. Grundsätzlich ist einer Gebietsbegehung der Vorzug vor einer ausschließlichen Nutzung von GIS einzuräumen (vgl. auch Kapitel 4.5).

Durch Überlagerung von prozessrelevanten Gebietseigenschaften können weitere wichtige Flächeninformationen für den Niederschlags-Abfluss-Prozess abgeleitet werden.

Zeitlich veränderliche Gebietseigenschaften müssen berücksichtigt werden, wenn innerhalb des Zeithorizontes, den die Analyse bzw. Prognose des N/A-Prozesses abdeckt, größere Änderungen bestimmter Gebietseigenschaften auftreten. Regelmäßig verändert sich die Vegetation im Jahreslauf. Wenn das N/A-Modell in der Lage ist, solche Veränderungen abzubilden, dann ist es sinnvoll, sie zu berücksichtigen. Landnutzungsänderungen, Neubau von planierten Schipisten oder jahreszeitlich unterschiedliches Abflussverhalten von stark beweideten Flächen sind typische Beispiele für zeitlich variable Einzugsgebietscharakteristiken, die berücksichtigt werden sollen. Wie schon erwähnt, muss das N/A-Modell in der Lage sein, Informationen über diese Variabilitäten zu verarbeiten. Der Leitfaden enthält im Kapitel „Modellwahl“ diesbezügliche Anleitungen.

Startwerte für Systemzustände des Modells müssen vorhanden sein (oder plausibel gewählt werden). Hierzu der Leitfaden:

Zu Beginn der Berechnungen müssen plausible Startwerte für Systemzustände gewählt werden. Bei Ereignismodellen ist die Wahl bzw. Vorgabe der Startwerte essentiell. Auch bei kontinuierlichen Modellen sollten die Startwerte bestmöglich gewählt werden.

Die Startwerte können Messwerte zu Berechnungsbeginn oder plausible Annahmen sein. Es kann auch der Berechnungsbeginn entsprechend vorhandener Startwerte (Messwerte, Beobachtungen) gewählt werden (z.B. nach Schneeschmelze oder nach einem Regenereignis).

Bei kontinuierlich rechnenden Modellen ist es möglich, durch einen Vorlauf des Modells vor dem eigentlichen Berechnungsbeginn die plausiblen Startwerte vom Modell selbst berechnen zu lassen: Wenn die Reihe der Beobachtungsdaten ausreichend lang ist, lässt man das Modell vom Beginn der Datenreihe an rechnen, verwendet die Ergebnisse aber erst ab dem Berechnungsschritt nach einem Jahr nach Beginn. Es ist sinnvoll, den Berechnungsbeginn so zu legen, dass die Speicher im Einzugsgebiet weitgehend leer sind: D.h. kein Schnee im Gebiet, Bodenspeicher möglichst leer. Dieser Zustand fällt in Österreich annähernd mit dem Ende des hydrologischen Jahres zusammen. Die Berechnung eines kontinuierlichen Modells mit Vorlauf ist weniger kompliziert als das plausible Wählen von Startwerten. Notfalls kann man das erste Jahr der Beobachtungsdaten ein zweites Mal an den Beginn der Datenreihe setzen.

Für Ereignismodelle ist die Wahl der Startwerte essentiell. Bei der Ermittlung von Bemessungshochwässern können die Startwerte entscheidend für das Ergebnis sein. Der Modellierer sieht sich hier einem Entscheidungsproblem gegenüber. Schätzt er die Bodenspeicher vor dem Bemessungsregen als gefüllt an („worst case“), kann das Ergebnis unplausibel groß sein, schätzt er sie als leer ein, gilt das Gegenteil. Mehrere Simulationsrechnungen mit Szenarien, die zwischen den extremen Annahmen liegen, sollten durchgeführt werden, um die Spannweite der möglichen Ergebnisse auszuloten.

Im Arbeitsbereich der Wildbach- und Lawinerverbauung wird das Erstellen eines operationellen Vorhersagemodells eher eine Seltenheit sein. Gegebenenfalls findet der Anwender im Leitfaden hierzu verwendbare Angaben, insbesondere was die erhältlichen Niederschlagsvorhersagen anbelangt. Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, dass die meteorologischen Vorhersagemodelle derzeit noch nicht in der Lage sind, konvektive

Starkregenereignisse nach Ort und Zeit des Auftretens sowie nach Ausdehnung, Intensität und Dauer exakt zu prognostizieren.

Kapitel 3: Modellwahl (Modellkonzepte)

- 3 Modellwahl (Modellkonzepte)
 - 3.1 Einleitung
 - 3.2 Kausalität der Modelle
 - 3.3 Zeitliche Diskretisierung und Betrachtungszeitraum
 - 3.4 Räumliche Diskretisierung
 - 3.5 Anwendungen und Fallbeispiele

Am Beginn einer Modellierungsarbeit muss die Überlegung stehen, welchem Zweck sie primär dienen soll und welche zusätzlichen Aussagen wünschenswert sind. Ist das primäre Ziel beispielsweise die Ermittlung von Hochwasserscheitelwerten mit Zusatzaussagen zur Wellenform und Hochwasserfracht, so kann damit bereits eine Vorauswahl von potenziell anwendbaren Modellen stattfinden. Im nächsten Schritt sind die Modelle auf ihre Anforderungen hinsichtlich Eingangs- und Kontrolldaten zu analysieren und es muss entschieden werden, ob die notwendigen Daten vorhanden bzw. mit vertretbarem Aufwand an Mühe und Zeit zu beschaffen sind. Häufig werden diese Überlegungen zur Erkenntnis führen, dass die angestrebten Ergebnisse mit relativ einfachen Modellen erreichbar sind („Subsidiaritätsprinzip der Modellierung“).

Im Leitfaden wird ein Überblick über die Typen hydrologischer Modelle gegeben, der dem Leser die Auswahl des passenden Modells, je nach Anforderungen und Datenlage, erleichtern kann. Nach dem physikalischen Zugang wird unterschieden in:

- Statistische Modelle
- Stochastische Modelle
- Deterministische Modelle
 - White-Box-Modelle, physikalisch basierte Modelle

- Grey-Box-Modelle, Konzeptmodelle
- Black-Box-Modelle, Block- oder Systemmodelle

Für die Zwecke der Wildbach- und Lawinverbauung sind **statistische Modelle** im Allgemeinen nicht passend, denn sie erlauben nur die Beschreibung des statistischen Verhaltens von vorhandenen Beobachtungsdaten. Der erforderliche Datenumfang ist groß und, weil das Modell die physikalischen Prozesse nicht berücksichtigt, kann im Allgemeinen Naturrauminformation nicht verwendet werden. Solche Modelle sind z. B. zur Simulation von geänderten Verhältnissen im Einzugsgebiet ungeeignet, darüber hinaus ist auch eine Extrapolation über die in den Daten vorhandene Information (z. B. Extremereignisse) nicht möglich. Die prognostische Kraft solcher Modelle ist also gering.

Stochastische Modelle in ihrer reinen Form sind z.B. Zeitreihenmodelle oder Modelle auf der Basis von neuronalen Netzen. Auch sie bedürfen zu ihrer Kalibrierung einer großen Menge von Daten. Ihre prognostische Kraft ist vergleichsweise gering. Im übertragenen Sinn ist allerdings die stochastische Betrachtungsweise auf deterministische Modelle sinnvoll anwendbar. Bei dieser Betrachtungsweise sind Parameter von deterministischen Modellen keine Konstanten sondern können als Zufallszahlen beschrieben werden. Diese Erfahrung kann jeder machen, der dasselbe Modell mit unterschiedlichen Daten kalibriert: Die kalibrierten Parameter gruppieren sich um Häufungspunkte, aber es sind Abweichungen und Ausreißer vorhanden. Somit kann es sinnvoll sein, Simulationsläufe mit zufällig veränderten Parametern bei gleichem (Bemessungs-) Niederschlag durchzuführen.

Deterministische Modelle beschreiben den zu modellierenden Prozess, indem die Annahmen darüber, wie dieser funktioniert, in mathematische Algorithmen umgesetzt werden.

Wenn die Kausalzusammenhänge, nach denen der Prozess abläuft, richtig erkannt werden und das Modell die wesentlichen Einflussfaktoren prozess- bzw. phänomennahe beschreibt, muss das Modell nicht besonders kompliziert sein, um plausible Resultate zu liefern. Allerdings besteht die Gefahr, dass im Fall geänderter Bedingungen, die von den Kalibrierungsbedingungen wesentlich abweichen, Prozesse auftreten, die im Modell nicht abgebildet sind. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn bei Extremereignissen bisher nicht beobachtete Phänomene auftreten, oder in einem einfachen Fall, wenn für ein Einzugsgebiet ein N/A-Modell ohne einen Schneeschmelzansatz erstellt worden ist, weil im Datensatz keine Schmelzereignisse dokumentiert sind, in einer Ausnahmesituation aber unerwartet ein gemischtes Starkregen-Schmelzereignis auftritt.

Die **White Box Modelle** versuchen eine Annäherung an den Naturvorgang auf dem Weg über die physikalischen Grundgleichungen der Wasserbewegung auf der Landoberfläche und im Untergrund und berücksichtigen auch die zwischen dem Boden-Vegetations-Komplex und der Atmosphäre ablaufenden Austauschvorgänge. Angesichts dieses Detaillierungsgrades der Prozessbeschreibung ist ihre Anwendung nur sinnvoll, wenn sie als kontinuierliche Modelle in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung verwendet werden. Dies bedingt einen großen Datenbedarf als Input, für die Beschreibung des Naturraumes und für Kalibrierung und Verifizierung. Die prognostische Kraft solcher Modelle ist grundsätzlich groß. Die Anwendung derartiger Modelle ist nicht sinnvoll, wenn die notwendigen Daten nicht verfügbar sind.

Grey Box Modelle beschreiben den Naturvorgang mit Konzept-Ansätzen, die bisweilen starke Vereinfachungen der physikalischen Grundgleichungen sind (z. B. Strickler-Formel statt St.-Venant-Gleichungen), bisweilen das Phä-

nomen summarisch modellieren (z. B. Speicheransätze für die Prozesse im Boden oder auf der Geländeoberfläche). Mit einigem Geschick angewendet bilden sie den Niederschlag-Abfluss-Prozess recht gut ab. Auch ihre prognostische Kraft ist gut. Der Datenbedarf der Konzeptmodelle ist im Allgemeinen deutlich geringer als jener der White Box Modelle.

Black Box- oder Systemmodelle basieren nicht auf physikalischen Grundgesetzen sondern beschreiben Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen System-Ein- und -Ausgang. Der typische Vertreter dieser Modellgruppe ist das "Unit-Hydrograph-Verfahren". Die Modelle müssen an Hand von Beobachtungsdaten von Niederschlag und Abfluss kalibriert werden und beschreiben dann den Prozess recht gut. Ihre prognostische Kraft ist jedoch nicht groß, weil sie keine Naturrauminformation verarbeiten können. Nach dem Betrachtungszeitraum wird unterschieden in

- Ereignismodelle und
- Kontinuierliche Modelle.

Ereignismodelle werden meist angewendet, wenn Bemessungsereignisse ermittelt werden sollen. Im Abschnitt 2 wurde bereits auf die Wichtigkeit der Startwerte für die Systemzustände, insbesondere auf den Vorfeuchtezustand des Einzugsgebietes hingewiesen. Mindestens ebenso wichtig ist die Wahl des Bemessungsniederschlags. Auf diese Frage geht der Abschnitt 5 (sowohl hier als auch im Leitfaden) ein.

Bei den **kontinuierlichen Modellen** ist das Problem der Wahl plausibler Startwerte (siehe Abschnitt 2) dadurch etwas entschärft, dass bei diesem Modelltyp die Systemzustände kontinuierlich mitgerechnet werden. Für die Ermittlung von Bemessungsereignissen kann ein Bemessungsniederschlag (siehe Abschnitt 5) in die Beobachtungsreihe der Niederschläge eingesetzt werden. Um die Entscheidung, an welchem Zeitpunkt der

Bemessungsregen eingefügt wird (bei trockenen, mittleren oder feuchten Vorbedingungen) kommt der Modellierer allerdings nicht herum. Abhilfe schafft ein Simulationsmodell, mit dessen Hilfe eine lange Zeitreihe von Abflüssen simuliert wird, die mit den Methoden der Hochwasserstatistik weiter analysiert wird.

Nach der räumlichen Diskretisierung wird unterschieden in

- Blockmodelle
- Gegliederte Modelle
 - halbverteilte Modelle (semidistributed models): Hydrotopmodelle, Isochronenmodelle
 - flächendetaillierte Modelle (distributed models): Rastermodelle

Blockmodelle sind solche, die ein Einzugsgebiet so beschreiben, als wäre es hinsichtlich seiner Gebietseigenschaften homogen. Diese Modellannahme ist zwar grundsätzlich in Frage zu stellen, aber in speziellen Fällen kann sie dennoch gewählt werden. Ist z. B. ein Gebiet klein, flächendeckend bewaldet mit einem quasi homogenen Bestand und weist weder größere Vernässungszonen noch Blaiken auf, kann als Ergebnis einer Gebietsbegehung die Wahl eines Blockmodells vertretbar und sinnvoll erscheinen.

Halbverteilte Modelle gliedern das Einzugsgebiet nach den Gesichtspunkten „Laufzeit zum Gebietsauslass“ (Isochronenmodelle) oder „hydrologische Einheitlichkeit von Teilflächen“ (Hydrotopmodelle). Isochronenmodelle werden im Allgemeinen mit Hydrotopansätzen kombiniert, weil nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Flächen zwischen den Isochronen in sich hydrologisch einheitlich sind. Bei derartigen kombinierten Modellen wird somit Laufzeit und Naturraum-Information kombiniert.

Für **flächendetaillierte Modelle** gilt Ähnliches: Theoretisch müsste jedem Rasterelement des detaillierten Modells ein eigener Parameter-

satz der Naturrauminformation zugewiesen werden. Dies ist praktisch nicht durchführbar. Daher wird auf Basis der vorhandenen Unterlagen (z.B. thematische Landkarten, Ergebnisse von Begehungen) eine Hydrotopgliederung des Einzugsgebietes definiert und dann mit dem Raster verschnitten.

Sowohl für halbverteilte als auch für flächendetaillierte Modelle gilt, dass der in den Flächenelementen (Hydrotopen, Isochronenflächen, Rasterelementen) entstehende Abfluss zum Gebietsauslass transferiert werden muss. Für dieses „Routing“ gibt der Leitfaden die Empfehlung:

Für Routingprozesse (in Gerinnen wie auch flächigen Abflusskonzentrationen) gilt grundlegend, dass die räumliche mit der zeitlichen Diskretisierung abgestimmt werden muss. Grundsätzlich sollte der Wellenablauf durch die gewählte zeitliche Auflösung abgebildet sein. Damit verknüpft ist die entsprechende Wahl der räumlichen Ausdehnung von Fließabschnitten.

Kapitel 4: Wahl der Modellparameterwerte und Modellvalidierung

4 Wahl der Modellparameterwerte und Modellvalidierung

4.1 Einleitung

4.2 Grundlegende Aspekte / Parameter allgemein

4.2.1 Messbarkeit der Parameter

4.2.2 Typen von Parameter

4.2.3 Ausgleich systematischer Fehler in den Eingangsdaten

4.3 Überparametrisierung / Modellkomplexität

4.4 Parameterwahl in ländlichen vs. städtischen Gebieten

4.5 Modellkalibrierung

4.5.1 Zielfunktion

4.5.2 Manuelle Kalibrierung

4.5.3 Automatisierte Kalibrierung

4.6 Einzugsgebiete ohne Abflussdaten

4.7 Parameter für geänderte Bedingungen (Klima/Landnutzung/ Abflussbedingungen)

4.7.1 Analyse von

Landnutzungsänderungen

4.7.2 Klimaschwankungen und Klimaänderungen

4.7.3 Anforderungen an die Eigenschaften der NA-Modelle

4.8 Kombinierte Parameteridentifikation

4.9 Validierung

Kapitel 4 des Leitfadens widmet sich der Wahl der Modellparameterwerte und der Modellvalidierung. Parameter und Modellgleichungen sollten darauf abgestimmt sein, die Abflussprozesse für das speziell zu untersuchende System möglichst getreu zu charakterisieren. Diese Parameter und Gleichungen können manchmal direkt gemessen bzw. aus theoretischen Überlegungen abgeleitet werden. In vielen Fällen ist das allerdings nicht möglich. Man hilft sich dann mit einem Vergleich der Modellantwort mit den Messdaten und versucht daraus, die Parameter und Modellgleichungen zu erschließen („Kalibrierung“).

Liegen Messungen des Abflussgeschehens nicht vor (unbeobachtete Einzugsgebiete), was der Regelfall der wildbachspezifischen Anwendungssituationen darstellt, dann schlägt der Leitfaden als Basis von Parameterwahl und Modellvalidierung Folgendes vor: Umfassende Gebietskenntnis (Begehungen und Feldversuche), Analyse hinsichtlich dominanter hydrologischer Prozesse (Oberflächenabfluss, seicht- und tiefgründiger unterirdischer Abfluss, ...), Plausibilitätsprüfung und Validierung der Modellvorstel-

lungen mit Expertenwissen, Einbeziehen von Zusatzinformation („stumme Zeugen“, Chroniken, Ereignisberichte, etc).

Je nach Modellkonzept für die einzelnen hydrologischen Prozesse (vgl. Kapitel 3) werden unterschiedliche **physikalisch basierte** (z.B. Fließlänge) oder **konzeptionelle Parameter** (physikalisch nicht direkt begründbar, z.B. Ereignisabflussbeiwert) benötigt. Bezüglich deren Bestimmung können vier Kategorien von Parametern unterschieden werden:

- Parameter, die etwa durch punktuelle Felduntersuchungen abgeleitet werden können.
- Parameter, die aus Gebietseigenschaften bzw. aus einer Kombination unterschiedlicher Daten in Verbindung mit hydrologischem Expertenwissen abgeleitet werden können.
- Parameter, die im Wesentlichen durch Kalibrierung bestimmt werden müssen.

Abgesehen von manchen konzeptionellen Parametern sind zwar die meisten Kennwerte prinzipiell messbar, die Übertragbarkeit vom Punkt in die Fläche jedoch meist problematisch. Daher finden gemessene Parameter, mit Ausnahme der Höheninformation von Geländemodellen, selten direkt in Modellen Eingang.

Für die (flächenhafte) Schätzung jener Parameter, die aus unterschiedlichen Gebietseigenschaften (Topographie, Vegetation, Boden, Landnutzung, Geologie, vgl. Abschnitt 2) ermittelt oder abgeleitet werden können, ist die Verwendung von GIS-Werkzeugen, Fernerkundungsdaten und anderen digitalen Datenschichten heute Standard. Relativ genau aus den topographischen Verhältnissen abgeleitet werden kann beispielsweise der Topographische Index, der in manchen Modellen die Verteilung von Sättigungsflächen beschreibt. Die Genauigkeit der Ableitbarkeit lässt aber keinen Schluss auf die hydrologische Aussagekraft des Parameters zu.

Als eigene Kategorie können konzeptionelle Parameter betrachtet werden, die aus einer Kombination von unterschiedlichen Datenschichten (Vegetation, Landnutzung, Boden, Geologie) und hydrologischem Expertenwissen gewonnen werden. In diese Kategorie fallen beispielsweise Parameter zur Beschreibung der Abflussbereitschaft (Oberflächenabflussbeiwert als Standortparameter nach Markart et al., 2006; CN-Kurvennummern des SCS Verfahrens; Bewertung hochwasserrelevanter Flächen nach dominanten Abflussprozessen (Dominant-Runoff-Processes DRP, Scherrer et al., 2002, u.a.)).

Eine Anwendung des SCS-Kurvennummern-Verfahrens für die direkte Ermittlung der Abflussreaktion wird für Österreich nicht empfohlen. CN-Kurvenwerte können aber eventuell zum Vergleich von Einzugsgebieten aus den Niederschlag-Abfluss-Daten rückgerechnet werden und für eine Einschätzung der Extrapolation des Zusammenhangs Niederschlag-Abflussbeiwert auf Extrembedingungen als Hilfestellung verwendet werden.

Modellkalibrierung, Zielfunktionen und Gütemaße werden im Leitfaden im Kapitel 4 ausführlich behandelt. Dem Spezialfall „unbeobachtete Einzugsgebiete“, bei denen eine Kalibrierung definitionsgemäß nicht möglich ist, widmet sich der Absatz 4.6. Für die Modellierung von Einzugsgebieten ohne Abflussdaten wird folgende Herangehensweise empfohlen:

1. Im Vordergrund der Betrachtung müssen Prozessanalyse und Prozessverständnis stehen. Daher: Interdisziplinäre Betrachtungsweise des Einzugsgebietes: Hydrometeorologie, Boden-, Vegetationskunde, Ökologie, Hydrogeologie. Zusammenführen der Information in geographischem Informationssystem und Vergleichen mit den Analyseergebnissen anderer, womöglich beobachteter Gebiete.

2. Das wichtigste Mittel zur Erlangung eines Prozessverständnisses sind Felderhebungen und Kartierungen im Rahmen von Begehungen oder Befahrungen. In diesem Rahmen ist zu klären: Welche dominanten Prozesse sind in welchen Gebietsteilen zu erwarten? Daraus ergibt sich die Hydrotopgliederung. Welche Prozessparameter können für die Hydrotope abgeschätzt werden? Welche Unschärfe dieser Parameter ist anzunehmen? Die Auswirkung der Unschärfe kann mit Sensitivitätsanalysen (Leitfaden Kapitel 6) abgeschätzt werden.

3. Eine Kalibrierung kann unter Umständen in ähnlichen, beobachteten Nachbareinzugsgebieten mit anschließender Parameterübertragung erfolgen. Die Ähnlichkeit der Nachbaregebiete ist an Hand der folgenden Größen zu prüfen: Gebietsgröße, Topographie, Niederschlag, Boden-Vegetationskomplex. Die Beurteilung der Übertragbarkeit der Parameter kann sich orientieren an: Vergleich von geologischen und Bodenkarten, hydrogeologische Karten, Dichte und Ausbildung des Gerinnenetzes; im Zuge vergleichender Begehungen ist auf Erosionsrinnen und -spuren sowie sonstige „stumme Zeugen“ zu achten.

Eine Validierung der Parameter (und auch der verwendeten Modellstruktur) ist von höchster Wichtigkeit, um die Prognosefähigkeit eines Modells zu belegen. Hierzu werden die vom Modell errechneten Ergebnisse, im Allgemeinen also Abflüsse, mit den entsprechenden Beobachtungsdaten verglichen. Zur Validierung der Parameter ist ein vom Kalibrierungszeitraum unabhängiger Datensatz heranzuziehen („Split-sample“). Neben dem unterschiedlichen Zeitraum ist darauf zu achten, dass wenn möglich auch Perioden und Ereignisse inkludiert sind, die sich dem Charakter nach von denen im Kalibrierungszeitraum unterscheiden. Allerdings sollten im Validierungszeitraum die Inputdaten

nicht wesentlich anders sein als im Kalibrierungszeitraum: Es sollten weder deutlich mehr noch weniger Niederschlagsstationen sowie keine andere Routine zu deren Verarbeitung verwendet werden.

Eine Validierung ist auch dann durchzuführen, wenn in einem Gebiet keine Daten vorhanden sind. In diesem Fall werden Daten von (hydrologisch ähnlichen) Nachbaregebieten herangezogen oder/und eine sorgfältige qualitative Einschätzung bzw. Plausibilisierung der Modellergebnisse vorgenommen. Damit wird geprüft, ob das Modell hinsichtlich der Modellvorstellung und der Experteneinschätzung des Hydrologen entsprechend reagiert (=indirekte Validierung). Auch Schätzdaten (Proxydaten) sind bei der Modell- und Parametervalidierung wirksam: Aus Anschlaglinien rückgerechnete Scheitelwerte sowie aus Chroniken oder Informationen Ortskundiger abgeschätzte Daten geben annähernd Auskunft über die Modellgüte hinsichtlich der Hochwasser, notfalls auch Faustformeln für Hochwasserabflüsse (Hagen et al., 2007). Einzelmessungen des Abflusses in Mittel- oder Niederwasserzeiträumen können hilfreich sein, jene Modellbausteine zu validieren, die den bodenbürtigen Abfluss beschreiben. Regionalisierte Hochwasserspenden und Abflussbeiwerte (HORA, 2012; Rogger et al., 2011) sind weitere Hilfsmittel zur Modellvalidierung.

Dazu im Leitfaden:

Bei der Validierung wird zur Interpretation der Ergebnisse eine ähnliche Strategie empfohlen wie bei der Kalibrierung durch Heranziehen der Zusatzinformationen (kombinierte Parameteridentifikation). Teilergebnisse, Zustandsgrößen und bei flächendetaillierten Modellen räumliche Muster sollten in ähnlicher Weise und unter Heranziehen von verschiedenen Daten und Informationen interpretiert werden wie im

Kalibrierungszeitraum. Zur Vergleichbarkeit ist es günstig, gleiche Gütemaße zu verwenden wie in der Kalibrierung.

Kapitel 5: Spezielle Aspekte bei der Ermittlung von HQn mit N/A-Modellen

5 Spezielle Aspekte bei der Ermittlung von HQ_n mit N/A-Modellen

5.1 Problemstellung

5.2 Bemessungsniederschlag

5.2.1 Jährlichkeit des

Bemessungsniederschlags

5.2.2 Höhe und Dauer des

Bemessungsniederschlags

5.2.3 zeitliche Verteilung des

Bemessungsniederschlags

5.2.4 räumliche Verteilung des

Bemessungsniederschlags

5.3 Modellwahl

5.4 Wahl der Modellparameterwerte und Modellvalidierung

Das Kapitel über spezielle Aspekte bei der Ermittlung von HQn mit N/A-Modellen verdient besondere Beachtung. Die Ermittlung von Hochwasserkennwerten für Wildbacheinzugsgebiete ist gängige Praxis des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung. Mittels N/A-Modellen ist es möglich, neben der Abschätzung von Scheiteldurchflüssen einer bestimmten Jährlichkeit (HQn) charakteristische Wellenformen und -frachten festzulegen. Die traditionelle Vorgangsweise bei der Verwendung von N/A-Modellen zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen definierter Wahrscheinlichkeit besteht darin, ein charakteristisches Niederschlagsereignis zu wählen, und dieses in ein Abflussereignis zu transformieren. Diese Vorgehensweise ist in der Praxis am weitesten verbreitet, da sie relativ einfach ist und häufig eine

geringe Anzahl von Modellparametern aufweist. Zudem ist es damit möglich, die im Gebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse im Detail zu beschreiben.

Im Zuge derartiger Modellrechnungen sind folgende spezielle Aspekte zu berücksichtigen:

- Aspekt der zu verwendenden Niederschlagsdaten
- Aspekt der Jährlichkeit der ermittelten Abflüsse
- Aspekt der Möglichkeiten Modellparameter zu ermitteln

Die Interpretation der Ergebnisse und die Einschätzung der Unsicherheit betreffend die Ermittlung von Hochwasserkennwerten werden in Kapitel 6 erörtert.

Die Ermittlung extremer Ereignisse erfolgt in der Regel mit Ereignismodellen. Hierbei ist das erste Problem die **Wahl eines geeigneten Bemessungsniederschlags**. Der Leitfaden behandelt die im Internetportal für hydrographische Daten Österreichs, (eHYD, Bundesministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW, Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt, <http://gis.lebensministerium.at/ehyd>) verfügbaren Bemessungsniederschläge. Dies sind interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (ÖKOSTRA), maximierte Modellniederschläge (MaxModN), und die Bemessungsniederschläge als gewichtete Auswertung der beiden vorher genannten Auswertungen.

Für den Regelfall wird die Verwendung von Bemessungsniederschlägen (mittlere Werte) empfohlen. Es können jedoch regional und in begründeten Fällen (z.B. durch Niederschlagsaufzeichnungen und Analysen bestätigt) die Modeldaten (MaxModN-Werte) oder die ÖKOSTRA-Werte Anwendung finden. Zusätzlich wird die Auswertung von Niederschlagsaufzeichnungen im Einzugsgebiet empfohlen, um die lokalen Niederschlagsverhältnisse besser einschätzen zu können.

Ein wichtiger Schritt bei der Festlegung des Bemessungsniederschlags ist die Wahl der Regendauer. Grundsätzlich gilt die hydrologische Regel:

- Kurzzeitige, in etwa der Konzentrationszeit entsprechende extreme Niederschlagsereignisse liefern hohe Abflussspitzen mit kleineren Abflussfrachten.
- Länger andauernde extreme Niederschlagsereignisse liefern weniger hohe Abflussspitzen jedoch hohe Abflussfrachten.

In der Regel werden Bemessungsniederschläge unterschiedlicher Dauer für die Berechnung herangezogen, und der maximale Scheitel wird als Grundlage für die Bemessung verwendet. Zwei Aspekte sind dabei zu berücksichtigen:

- Da durch die Wahl des Größtwertes eine Maximierung stattfindet, sollten nicht alle anderen Kenngrößen (z.B. Modellparameter) maximiert werden.
- Bei der Bestimmung von Bemessungshochwässern für Speicherbecken, in denen ein Wasserrückhalt stattfindet, gibt meist ein Durchfluss, der kleiner ist als der maximale Durchfluss, jedoch eine größere Fülle besitzt, die maßgebenden Wasserstände im Becken. Es ist deshalb auch die Retention im Becken zu berücksichtigen.

In Bezug auf die **zeitliche Verteilung** des Bemessungsniederschlags empfiehlt der Leitfaden:

Es wird empfohlen, die zeitliche Verteilungen beobachteter Niederschlagsereignisse und mehrere synthetische Verteilungen des Niederschlags heranzuziehen und die damit berechneten Abflüsse zu bewerten.

Zusätzlich zur Wahl des entsprechenden Bemessungsniederschlags und seiner zeitlichen Aufteilung ist die **räumliche Verteilung** des Niederschlags abhängig von der Einzugsgebietsgröße von großer Bedeutung. Die Flächenabminderung

ist auch im Zusammenhang mit möglichen relevanten Abflussszenarien bzw. den Ergebnissen von Abflussanalysen zu sehen. Der Leitfaden zeigt drei Arten der Flächenabminderungen auf, für den Regelfall wird die Verwendung der Bemessungsniederschläge (mittlere Werte) und mittlere Flächenabminderung (Blöschl, 2009) empfohlen.

Die N/A-Berechnungen auf Ereignisbasis können, wenn Abflussdaten zur Verfügung stehen, auch mit kalibrierten kontinuierlichen Modellen durchgeführt werden. Für unbeobachtete Gebiete, die das Gros der Wildbacheinzugsgebiete darstellen, kommen meist Ereignismodelle zum Einsatz. Nach Maßgabe vergleichbarer Gebietseigenschaften kann die Übertragung eines an einem beobachteten Nachbargebiet kalibrierten Modells ebenfalls zweckmäßig sein. Die Modellwahl richtet sich daher maßgeblich nach der Verfügbarkeit von Abfluss- und Gebietsdaten.

Entsprechend obiger Maßgabe bestehen auch mehrere Möglichkeiten, die **Modellparameter** zu ermitteln:

- Kalibrierung der Modellparameter an beobachtete Abflussereignisse
- Übertragung der Modellparameter aus ähnlichen Gebieten
- Ermittlung der Modellparameter aus Gebietskenngrößen

Wie in Abschnitt 2 aufgezeigt wurde, ist insbesondere der Boden-Vegetations-Komplex eine dominante Einflussgröße auf den Niederschlag-Abfluss-Prozess und sollte, speziell in unbeobachteten Einzugsgebieten, an Hand von Gebietsbegehungen analysiert, kartiert und so für die Modellierung nutzbar gemacht werden.

Ein weiterer spezieller Aspekt bei der Ermittlung von HQ_n mit N/A-Modellen ist die Frage der **Jährlichkeit** der ermittelten Abflüsse, da diese in Abhängigkeit von den Modellannahmen von der Jährlichkeit der Bemessungsniederschläge abweichen kann. Die Jährlichkeit hängt davon

ab, wie die Parameter des N/A-Modells gewählt werden. Nur unter bestimmten Parameterkombinationen entspricht die Jährlichkeit des Abflusses der Jährlichkeit des Niederschlags. Da durch die Wahl des maximalen Scheitelwertes als Grundlage für die Bemessung eine Maximierung stattfindet, sollten nicht alle anderen Kenngrößen (z.B. Modellparameter) maximiert werden.

Empfehlung im Leitfaden:

Die Qualität der Erfüllung des HQ_n-Jährlichkeitsanspruchs mit N/A-Modellen steigt, wenn abflussstatistische Ergebnisse – auch wenn sie nur regional vorhanden sind – mit einbezogen werden. In der Regel geschieht dies indem die Endergebnisse von N/A-Modellen mit den regionalen Ergebnissen der Abflussstatistik und Regionalisierung von Abflussstatistik verglichen werden (= Plausibilisierung der Gesamtergebnisse).

Der Leitfaden weist ausdrücklich darauf hin, dass die Ergebnisse von N/A-Modellen noch keine unmittelbaren Bemessungswerte darstellen. Die Bemessung muss durch Berücksichtigung zusätzlicher Entscheidungsfaktoren im Zuge der Projektierung festgelegt werden (z.B. Berücksichtigung des Feststofftransportes, Berücksichtigung von Unsicherheiten, Berücksichtigung von Ergebnissen der Hochwasserabflussstatistik), sofern diese nicht schon im Zuge der Modellierung berücksichtigt wurden.

Kapitel 6: Interpretation der Ergebnisse und Einschätzung der Unsicherheit

6 Interpretation der Ergebnisse und

Einschätzung der Unsicherheit

6.1 Allgemeines

6.2 Quellen von Unsicherheiten

6.2.1 Unsicherheiten zufolge Daten

6.2.2 Unsicherheit zufolge

Modellstruktur

6.2.3 Parameterunsicherheit

6.3 Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Modellierung

6.4 Prüfung der Modellergebnisse auf Plausibilität

6.4.1 Wildbachgebiete

6.4.2 Ländliche Einzugsgebiete

6.4.3 Städtische Einzugsgebiete

6.5 Interpretation und Kommunikation von Unsicherheiten

6.5.1 Qualitätssicherung in der Modellierung

6.5.2 Verwendung von Modellierungsergebnissen in der Entscheidungsfindung

Das Ziel dieses Kapitels im Leitfaden ist es, einen Modellanwender auf mögliche Unsicherheitsquellen hinzuweisen und Vorschläge zu machen, wie diese analysiert werden können.

In der WLV-spezifischen Anwendungssituation, zumeist ereignisbasierte N/A-Modellierung zu Bemessungszwecken, liegen die größten Unsicherheitsquellen in den verwendeten Daten (z.B. Niederschlagsdaten, Einzugsgebietsdaten) und in der Modellstruktur (z.B. nicht berücksichtigte aber relevante Prozesse). Um den Einfluss der verschiedenen Quellen von Unsicherheiten auf die Modellergebnisse einschätzen zu können empfiehlt der Leitfaden:

Eine zumindest grundlegende Untersuchung der Unsicherheiten eines Modells ist zur Beurteilung der Qualität der Modellergebnisse von großer Bedeutung. Da die Sensitivitätsanalysen von Parametern bzw. Szenarienanalysen lediglich einen geringen zusätzlichen Rechenaufwand bedeuten und auch keine besonderen Anforderungen an die Modellierungswerkzeuge gestellt werden (die Parameterkombination können händisch gesetzt werden), wird empfohlen sie auf jeden Fall durchzuführen.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse erlauben eine Beurteilung der Aussagequalität der Modellrechnungen. Viele Parameter können nur in Bandbreiten geschätzt werden. Durch die Sensitivitätsanalyse wird abgeschätzt, wie sich Modellergebnisse durch Variation dieser Parameter verändern. Dies ist besonders für WLV-spezifische Anwendungssituation wichtig, wo meist keine Messdaten zur Modellkalibrierung vorliegen (z. B. Extremereignisse). Auch die Eingangsdaten in das Modell (z.B. Wahl eines geeigneten Bemessungsniederschlags) sind mit großen Unsicherheiten behaftet (siehe Kapitel 5). Eine weitere Notwendigkeit von Sensitivitätsanalysen besteht bei der Beurteilung der Aussagequalität von Variantenuntersuchungen.

Die Parametersätze können entsprechend verschiedener Annahmen gewählt werden z.B.:

- wahrscheinlichstes Szenario: Kombinationen, die zu erwartet sind.
- „worst case“ Szenario: Überlagerung von ungünstigen Kombinationen (z.B. höchster Niederschlag, höchster Abflussbeiwert)
- „best case“ Szenario: Überlagerung von günstigen Kombinationen.

Bei der Sensitivitätsanalyse ist jedoch Vorsicht geboten. Da bei der Bemessungsmodellierung durch die Wahl des maximalen Scheitelwertes bereits eine Maximierung stattfindet, sollten nicht alle anderen Kenngrößen maximiert werden (Jährlichkeitsproblematik, vgl. Kapitel 5).

Bei der Simulation des Abflussverhaltens unbeobachteter Einzugsgebiete, kommt neben der Sensitivitätsanalyse der Plausibilitätsprüfung besondere Bedeutung zu. Der Leitfaden schlägt in Analogie zu ETALP (2003) Methoden vor, mit deren Hilfe die Ergebnisse der Modellierung unbeobachteter Wildbacheinzugsgebiete auf Plausibilität geprüft werden können. Da im Regelfall in den Wildbacheinzugsgebieten weder Aufzeichnungen über das Niederschlagsgeschehen noch

über den Abfluss vorliegen, ist man auf indirekte Datenquellen für die Plausibilitätsprüfung angewiesen. Dies geschieht z.B. mit Hilfe der Aussagen bzw. von Hinweisen Ortsansässiger, der Auswertung von Chroniken und unter Beachtung des im Einzugsgebiet anzutreffenden geomorphologischen Formenschatzes, der sogenannten „Stummen Zeugen“ (Aulitzky 1992).

Gleichwohl weist der Leitfaden darauf hin, dass

das Ergebnis einer Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse einer hydrologischen Modellierung nie die absolute Sicherheit von der Richtigkeit jeglicher Simulationsergebnisse sein kann. Insbesondere bei der Ermittlung von Bemessungshochwässern liegt die größte Unsicherheit nicht im Modell sondern im Bemessungsniederschlag, bei Ereignismodellen zusätzlich noch in der Einschätzung der Abflussverluste.

Tritt der Forsttechnische Dienst für Wildbach- und Lawinverbauung als Auftraggeber von N/A-Modellierungen auf, so wird empfohlen in der Ausschreibung die Behandlung von Unsicherheiten explizit zu fordern. Im Leitfaden wird eine Checkliste zur Sicherung eines einzuhaltenden Qualitätsstandards als Punkte im Projektbericht empfohlen (Hübl, 2012).

Welche Ergebnisse für weitere Planungen verwendet werden sollen, hängt von der Aufgabenstellung ab. Sie sind mit den in die Entscheidungsfindung involvierten Institutionen (z.B. Hydrographische Dienste, Wasserwirtschaft, Raumplanung, etc.) abzustimmen. Ein bedeutender Vorteil der N/A-Modellierung liegt dabei darin, dass Szenarienanalysen, insbesondere auch Prognosen zur zukünftigen Entwicklung (z.B. Landnutzungsänderungen) leicht durchgeführt werden können. Dieser Vorteil gegenüber traditionellen Werkzeugen der Planung (z.B. Hochwasserstatistik, Hochwasserformeln) sollte auch ausgenutzt werden.

Kapitel 7: Software und Daten

- 7 Software und Daten
 - 7.1 Kriterien zur Softwareauswahl
 - 7.2 Kurzdarstellung gängiger Software
 - 7.2.1 Hydrologie
 - 7.2.2 Siedlungswasserwirtschaft
 - 7.3 Softwarevergleich
 - 7.4 Datenquellen in Österreich
 - 7.4.1 Hydro-Meteorologische Daten
 - 7.4.2 Modell-Gebietsdaten (GIS)

Der Wildbachverbauer steht, von einfach zu lösenden Aufgaben abgesehen, vor dem Problem, eine geeignete Software auswählen zu müssen. Da diese Wahl naturgemäß stark von persönlichen Vorlieben und etwaigen Erfahrungen geprägt ist, werden im Leitfaden beispielhaft einige Kriterien und Überlegungen zur Softwareauswahl genannt, welche in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden sollten und die Auswahl unterstützen können. Weiters enthält der Leitfaden eine Kurzdarstellung in Österreich häufig verwendeter Modelle bzw. Software untergliedert nach den Anwendungsgebieten Einzugsgebietshydrologie und Siedlungswasserwirtschaft.

Der Leitfaden Kapitel 7.4 enthält einen Überblick über Institutionen, bei denen bearbeitete und geprüfte Hydro-Meteorologische Daten und Modell-Gebietsdaten (GIS) zur Modellierung bezogen werden können.

Weiters wird der Leitfaden ein Beispiel zur praktischen Anwendung des Leitfadens und ein Glossar der verwendeten Begriffe enthalten.

Danksagung

Der ÖWAV-Arbeitskreis „N/A-Modellierung“ hat eine große Zahl von Mitgliedern, die sich in unterschiedlicher Intensität an der Entstehung des Leitfadens beteiligt haben. Stellvertretend

für alle ehrenamtlich arbeitenden Koautoren sei den Kapitelverantwortlichen für ihren intensiven Arbeitseinsatz gedankt. Es sind dies insbesondere Gabriele Müller (HZB), Stefan Achleitner (Uni Innsbruck), Manfred Kleidorfer (Uni Innsbruck), Christian Reszler (Joanneum Research), Johannes Schöber (alpS GmbH), Johannes Wiesenegger (HD Salzburg). Dem Team des ÖWAV gebührt ein herzlicher Dank für die professionelle Unterstützung des Arbeitskreises.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Dr. Robert Kirnbauer
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie,
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
kirnbauer@hydro.tuwien.ac.at

Dr. Bernhard Kohl
Institut für Naturgefahren, Bundesforschungs- und
Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und
Landschaft BFW
Hofburg Rennweg 1, A-6020 Innsbruck
bernhard.kohl@uibk.ac.at

Univ. Prof. Dr. Johannes Hübl
Institut für Alpine Naturgefahren (IAN), Universi-
tät für Bodenkultur Wien
Peter Jordanstraße 82, A-1190 Wien
johannes.huebl@boku.ac.at

Univ. Prof. Dr. Günter Blöschl
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie,
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Literatur / References:

AULITZKY, H. (1992):
Die Sprache der „Stummen Zeugen“, Tagungspublikation Interpraevent, Band 6, S. 139-174.

BLÖSCHL, G. (2009):
Skriptum Ingenieurhydrologie (Vorl. Nr. 223.027) www.hydro.tuwien.ac.at/lehre/lva/downloads.html.

ETALP (2003):
Agerer H., Aigner H., Angerer H., Anker F., Bunza G., Ferlan E., Gattermayr W., Hafner K., Hehn F., Honsowitz H., Hübl H., Kirnbauer R., Klaus W., Kohl B., Markart G., Marschallinger R., Mayer R., Mayerl M., Mölk M., Ötner G., Pirkel H., Pittracher M., Rickenmann D., Schiegg H., Schiffer M., Schmid F., Schmidt R., Schnetzer I., Stepanek L.: "ETALP - Erosion, Transport in Alpinen Systemen - Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten", Projektbericht bestehend aus den Teilen: ETALP Leitfaden; ETALP Handbuch Grundlagen; ETALP Handbuch Regionale Ebene; ETALP Handbuch Mittlere Ebene; ETALP Handbuch Detailebene; ETALP Kompendien; BMLFUW, Wien, 716.

HAGEN K., GANAHL E., HÜBL J. (2007):
Analyse und Evaluierung von gebräuchlichen empirischen Ansätzen zur Hochwasserabschätzung in Wildbächen, BFW Berichte, Band 137, 112

HORA (2012):
National Hazard Overview and Risk Assessment Austria. <http://www.hora.gv.at/> (Abrufdatum 2012-07-15)

HÜBL J. (2012):
Anwendungsbereich und Grenzen der Prozessmodellierung von gravitativen Naturgefahren in Praxis und Wissenschaft. Dieses Heft.

MARKART G., KOHL B., SOTIER B., SCHAUER T., BUNZA G., STERN R. (2006):
Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen - Grundzüge und erste Erfahrungen. ÖWAV-Seminar „Methoden der hydrologischen Regionalisierung“ im Lebensministerium, 18.-19.5.2006, Wiener Mitteilungen, Band 197, 159-178.

MARKART G., KOHL B., SOTIER B., SCHAUER T., BUNZA G., STERN R. (2004):
Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation, Schriftenreihe des BFW, Wien Nr. 3(2004)

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. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 63, (7-8), 153-161.

SCHERRER S., DEMUTH N., MEUSER A. (2002) A procedure for the identification of dominant runoff processes by field investigations to delineate the relevant contributing area for flood modelling. In Spreafico and Weingartner (eds.): International Conference on Flood Estimation. Conference Proceedings. CHR/KHR Report II-17, Lelystad, NL, 2002. 219-228.

Ihr verlässlicher Partner**GeoExpert**

- ✓ unterstützt bei Gefahrenzonenplanung
- ✓ schützt vor Lawinen, Steinschlag und Muren
- ✓ begeistert mit aktueller GIS-Technologie

GeoExpert Research and Planning GmbH

Ingenieurbüro für Forstwirtschaft und Geologie

Brunhildengasse 1 - 1150 Wien - Tel. 01/367 44 05 - office@geoexpert.at - www.geoexpert.at

Ludwigsplatz, Rosenheim



Bleckstufen, Gästehaus in Kopting



Landschaft mit Bruchsteinmauerwerk

SCHÄRDINGER
Granit
INDUSTRIE AG

Schärdinger Granit Industrie AG
A-4782 St. Florian am Inn, Gopperding 17
Tel.: 07712/3116-0, Fax: 07712/3116-50
e-mail: info@schaerdingergranit.at
www.schaerdingergranit.at

PLANEN mit WEITBLICK

REVITAL Integrative Naturraumplanung GmbH | www.revital-ib.at

GERALD JÄGER, MARKUS MOSER, HELMUT HABERSACK

Methoden und Modelle zur Berechnung von Abflusskapazitäten und Geschiebetransport in alpinen Fließgewässern

Methods and models for calculating discharge capacity and bed-load transport in alpine streams and torrents

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit der Berechnung hydraulischer und geschiebetechnischer Fragestellungen hat die Weiterentwicklung von Methoden und Modellen vorangetrieben. Waren früher noch eindimensionale profilweise Ansätze zur Berechnung Standard, so hat sich mit der Erfordernis auch großflächige Vorlandflächen zu beurteilen die 2-dimensionale Betrachtung (2D) durchgesetzt und ist speziell für Berechnungen fluviatiler Prozesse derzeit Stand der Technik. Die Berechnung des Geschiebetransportes oder eines Murgangs mit Modellen ist schwieriger, da der Abflussprozess infolge des Fließverhaltens, Geschiebeverfügbarkeit, stark variablen Abflusstiefen und dergleichen nicht eindeutig definierbar ist. Im 1-dimensionalen Bereich (1D) wurden jedoch bereits durchaus brauchbare Modelle entwickelt, die dem Planer zumindest einen Richtwert geben können. Mit diesem Beitrag soll ein Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der Methoden und Modelle in alpinen Fließgewässern gegeben werden. Für die praktische Tätigkeit werden die derzeit gängigen Modelle kurz beschrieben sowie Empfehlungen für den praktischen Einsatz formuliert.

Stichwörter

Modellierung von Wildbachprozessen, Hochwasser, Geschiebetransport, Murgang

Abstract

The necessity of calculating hydraulic and relevant bed-load parameters has spurred the devel-

opment and refinement of methodologies and models. Whereas one-dimensional calculations along a vertical profile earlier constituted the engineering standard, large-scale two-dimensional calculations in foreland regions have now become standard practice, with the calculation of fluvial processes especially now constituting the state of the art. The calculation of bed-load transport capacities and debris flows with models remains more difficult, as the discharge processes cannot clearly be defined, due to flow behaviours, bed-load availability, highly variable flow depths and so on. Useful one-dimensional models are however currently available, with which planners may at least obtain guidance values. This contribution is intended to provide an overview of the application possibilities of the methodologies and models in alpine streams and torrents. The current models are shortly described as well as suggestions given with a view to their practical applications.

Keywords

Modeling of torrent processes, flood, bedload transport, debris flow

Einleitung

Seit den Anfängen der Wildbach- und Lawinenverbauung haben sich die Ingenieure mit der Berechnung von Abflüssen, der Abschätzung von Geschiebemengen und deren Auswirkung auf die Siedlungsgebiete beschäftigt. Verschiedenste – mit einfachen Mitteln berechenbare – Ansätze wurden schon im 20. Jhd. entwickelt und haben mehr oder weniger heute noch große Bedeutung. Was hat sich seit damals geändert?

Heutzutage stehen den Experten für Bemessungsfragen andere Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, die sich in Folge der EDV-Entwicklung sowie der Erstellungsmöglichkeit detaillierter, Laserscan-basierter Geländemodelle entwickelt haben.

Für bestimmte Fragestellungen, wie z.B. eine grobe Abschätzung auf Basis weniger Eingangswerte sind die einfachen empirischen Schätzformeln heute noch gültig und anwendbar. Für ingenieurpraktische Anwendungen reichen

diese Ansätze allein nicht mehr aus, um die notwendigen Bemessungswerte für Planungen und Gefahrenzonenabgrenzungen zu bekommen. Dem Stand der Technik entsprechend sind in diesen Fällen 1D- oder 2D-Modelle anzuwenden.

Entwicklung der Berechnungsmöglichkeiten

Früher waren eindimensionale profilweise Ansätze zur Berechnung der Abflusskapazitäten im Gerinne selbst Standard im Ingenieurwesen der Wildbachverbauung. Mit der Notwendigkeit auch großflächige Vorlandflächen zu beurteilen hat sich auch die 2D-Betrachtung durchgesetzt und ist speziell für Berechnungen fluviatiler Prozesse (nach ONR 24800: Terminus: Hochwasser; Prozessstyp: Reinwasserprozesse) mit vernachlässigbarem Sediment- und Geschiebetransport derzeit Stand der Technik.

Die Berechnung der Abflussprozesse kann nur mit einer Vielzahl von Eingangsdaten seriös durchgeführt werden. Die Bestimmung der Eingangsdaten ist - im Wandel der Zeit - natürlich

ständigen Weiterentwicklungen und Änderungen unterworfen (Moser & Jäger, 2009). Ein besonderer Entwicklungsschub erfolgte durch die Verbesserung der topografischen Grundlagendaten (Geländemodell Daten für große Flächen mit hoher Genauigkeit,...), die computergestützten Berechnungsmöglichkeiten mit der Entwicklung von Modellen und die Weiterentwicklung der Ereignisdokumentation als Folge der Jahrhunderthochwässer 2002 und 2005. Mit der Ereignisdokumentation begann auch die systematische Aufarbeitung der historischen Daten, wodurch ein sogenannter retrospektiver Ereigniskataster erstellt werden konnte und soweit noch möglich auch wichtige Informationen von Zeitzeugen einfließen (Hübl, 2007).

Die Ereignisdokumentation hat auch in der Entwicklung und Anwendung von hydraulischen Modellen einen sehr hohen Stellenwert. Deren erfolgreicher Einsatz im Bereich der Hochwasserdokumentation und -analyse hat auch die Akzeptanz in der Anwendung im Bereich der Planungstätigkeit wesentlich verbessert. Mit der Kalibrierung und der Sensitivitätsanalyse kann der Nachweis erbracht werden, dass ein bestimmtes Modell die maßgebenden Prozesse, für die es eingesetzt wird, richtig wiedergibt. Sollte dies nicht möglich sein, ist von einer Verwendung abzuraten bzw. müssen die Ergebnisse entsprechend gewertet werden. In den Arbeitsbehelfen des ÖWAV „Fließgewässermodellierung - Hydrodynamik“ (BMLFUW & ÖWAV, 2007) und „Fließgewässermodellierung – Feststofftransport und Gewässermorphologie“ (BMLFUW & ÖWAV, 2011) sind die Grundlagen systematisch aufbereitet und können als wertvolles Nachschlagewerk Hilfestellung leisten.

Besonderheiten der alpinen Fließgewässer

Den Prozessstyp „Reinwasser“ findet man im Wildbachbereich in einigen Unterläufen meist nur bei Niedrig- und Mittelwasser und vor allem in den

Flächen mit Vorlandabflüssen. Für die in Wildbächen häufiger auftretenden Prozessstypen wie schwacher und starker Feststofftransport sowie Murgängen gelten die reinen hydrodynamischen Ansätze nicht mehr, in diesem Fall kann man von einer Überlagerung von mehreren Einzelprozessen sprechen.

In Gebirgsflüssen und Wildbachgerinnen sind sowohl die hydrologischen als auch die hydraulischen Prozesse durch extreme Veränderungen räumlicher und zeitlicher Natur charakterisiert (Sieben, 1993). Die Ursache hierfür liegt in der überaus starken geologischen und morphologischen Prägung des Gerinnesystems in alpinen Einzugsgebieten. Daraus folgt die hohe Variabilität der folgenden Parameter (BMLFUW & ÖWAV, 2011):

1. Geschiebeverfügbarkeit und Geschiebeführung (transportlimitiert infolge zu geringer Transportkapazität bei großem Geschiebeeintrag, z.B. durch Geschiebeeinstöße oder Hangmuren/Rutschungen = Anlandungstendenzen; sedimentlimitiert, z.B. durch Rückhalt an Geschiebe im Einzugsgebiet)
2. Zusammensetzung der Kornverteilung des Sohlmaterials sowie der Geschiebequellen
3. Flussgeometrie in Längs- und Querrichtung
4. Stark variable, aber insgesamt geringe Abflusstiefen
5. Fließverhalten zwischen „Strömen“ und „Schießen“, häufige Fließwechsel

Typische Wildbachgerinne werden von diesen Parametern stark geprägt, daher hat die Berücksichtigung der geologischen und morphologischen Ausgangssituation im Gerinne und seinen Nahbereichen einen hohen Stellenwert und darf nicht vernachlässigt werden. Gebirgsflüsse weisen hingegen bereits stärker selbst formenden Charakter auf. Wildbäche sind charakterisiert durch steile Gefälle, starken Geschiebetrans-

port bis hin zu murgangähnlichem Abfluss und dem Auftreten von Murgängen (als eigener Verlagerungsprozess), relativ stabilen Sohlformen mit hohem Fließwiderstand und der großen Bedeutung des seitlichen Sedimenteintrages durch Hangprozesse.

Ein weiterer wichtiger Unterschied der Wildbachgerinne zu alluvialen Gebirgsflüssen besteht in dem Verhältnis zwischen Feststoffbereitstellung und Abflussgeschehen. Etwas vereinfachend kann eine Unterscheidung zwischen transportlimitierenden Verhältnissen und sedimentlimitierenden Verhältnissen getroffen werden. Während für den Transportvorgang bei transportlimitiertem Regime der Wasseranfall entscheidend ist, ist bei sedimentlimitiertem Regime die Feststoffverfügbarkeit der Minimumfaktor. Häufig sind infolge von Rückhaltemaßnahmen neben Wildbächen auch Flüsse sedimentlimitiert. In Wildbächen wird durch entsprechende Bautypen die Durchlässigkeit für Geschiebe laufend verbessert, sodass bei kleineren und mittleren Hochwasserereignissen Geschiebe auch für die Flüsse bereitgestellt wird.

Grundlagen Hydrodynamik

Die hydrodynamischen Grundgleichungen der Modelle basieren auf den Erhaltungsgleichungen der Physik, nämlich Massen-, Impuls und Energieerhaltung. Die „Navier-Stokes-Gleichungen“ stellen ein Allzweck-Werkzeug zur Berechnung von Reinwasserströmungen dar (GRÜNZNER et. al., 2009). In den meisten Fällen muss das Gleichungssystem aufwendig numerisch gelöst werden. Zur Verringerung des Rechenaufwandes werden die Ausgangsgleichungen vereinfacht und Terme mit geringem Einfluss vernachlässigt. Details dazu finden sich im Arbeitsbehelf „Hydrodynamik – Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis“ (ÖWAV, 2007).

Grundlagen Feststofftransport

In Gebirgsflüssen und Wildbächen stellt der Geschiebetransport bei genauer Betrachtung eine Überlagerung mehrerer Einzelprozesse dar. So findet eine Interaktion zwischen der räumlich sehr variablen Feststoffmobilisierung, dem aktiven Sedimenteintrag, der Deckschichtbildung/-mobilisierung sowie dem allfälligen Übergang zu murgangartigem Feststofftransport statt. Daraus ergibt sich vor allem im Übergangsbereich zu Murgängen ein nur bedingt funktionaler Zusammenhang zwischen Reinwasserabfluss und Feststofftransport, welcher in ein und demselben Gerinne stark variieren kann.

In Wildbächen kann ein episodischer Feststofftransport in Form von Pulsen oder Sedimentwellen festgestellt werden. Das kann auf hydraulische Instabilitäten während des Sedimenttransports oder auf diskontinuierliche Mobilisierungsmechanismen und Geschiebeverfügbarkeit zurückgeführt werden, welche zum Beispiel durch Turbulenzspitzen oder Nachböschungsvorgänge des Sohl-sediments, nach Auskolkung von Grobkomponenten oder der Destabilisierung von Sohlstrukturen (Aufreißen der Deckschicht) verursacht werden.

Natürliche Gerinnesohlen von Gebirgsflüssen und Wildbächen stellen durch ihr weites Korngrößenspektrum ein Mehrkorngemisch dar. Bei diesen ist der selektive Geschiebetransport beim Anlauf oder am Ende der Hochwasserwelle, knapp nach Mobilisierungsbeginn oder Mobilisierungsende, besonders stark ausgeprägt und verursacht Entmischungsvorgänge, die zu Deckschichtbildung führen können. Dieser selektive Geschiebetransport wird durch einen, alle Kornfraktionen umfassenden Geschiebetransport abgelöst, wenn auf Grund der hydraulischen Belastung das gesamte Korngrößenspektrum mobilisiert und transportiert wird. Es ist fraglich, in-

wieweit das Konzept der Deckschichtbildung in Gebirgsflüssen auf Wildbäche übertragen werden kann, wo die groben Blöcke in der Sohle oft auch aus Hangprozessen stammen und relativ stabile Sohlformen entstehen. Immerhin kann festgestellt werden, dass durch die Zerstörung von stabilen Sohlstrukturen wie Becken-Absturz-Sequenzen (step-pool Systeme) nach einem extremen Hochwasser die Geschiebeverfügbarkeit und damit der Geschiebetransport eine gewisse Zeit erhöht ist (TUROWSKI et al., 2009). Selektiver Transport und Abrieb sind auch in Wildbächen vorhanden, werden aber häufig von Morphodynamik (z.B. step –pool Systeme) überlagert. Deckungs- und Expositionseffekte führen dazu, dass z.B. Blöcke mit dazwischen liegenden „patches“ von Feinmaterial trotz Überschreiten der kritischen Sohl Schubspannung für die einzelne, relativ kleine Korngrößen der „patches“ existieren.

Die Erfassung kompletter Kornverteilungen ist durch ihre große Bandbreite nur durch die statistische Kombination unterschiedlicher Aufnahmeverfahren möglich (Fehr 1987). Es stellt sich dabei die Frage, ob damit die charakteristischen Korngrößen in ausreichender Genauigkeit für die sehr sensibel reagierenden Deckschichtkriterien ermittelt werden können (Palt, 2001).

Die kritische Schubspannung für kantiges Sediment liegt um bis zu 40% über der für gerundetes bis elliptisches Sediments (0,02-0,065) (Bezzola, 2002). Die bei steilen Gefällen im Vergleich zu flacheren Gefällen erhöhte kritische Schubspannung wird auch auf ein in Sohlennähe verändertes Geschwindigkeitsprofil und veränderte Turbulenz zurückgeführt (Lamb et al., 2008; Recking, 2009).

Ein weiterer schwierig zu bestimmender Parameter ist der Fließwiderstand in steilen Gerin-

nen. In Wildbachgerinnen mit sehr groben Kornfraktionen und sehr variabler Gerinnegeometrie mit ausgeprägten Sohlstrukturen ist eine genaue Unterscheidung zwischen Korn-, Form- und Gerinnerauigkeit schwierig; die Übergänge sind fließend. Eine Veränderung des Fließwiderstandes ist zudem bei Geschiebetransport zu erwarten.

Mathematische Modelle

Der Einsatz mathematischer Sedimenttransportmodelle hat durch das verbesserte Verständnis der physikalischen Teilprozesse und die gestiegene Computerleistung in den letzten Jahren einen großen Aufschwung erlebt.

Während bisherige Berechnungsmethoden auf Grundlage des Abflussverhaltens in festen Gerinnen beruhen und die im natürlichen Flusslauf auftretenden Sohlhöhen Schwankungen durch Korrekturfaktoren berücksichtigt wurden, erscheint es heute unumgänglich, Berechnungen mit Hilfe mathematischer Modelle durchzuführen, die sowohl den Stofftransport als auch den Abfluss beschreiben und eine bewegliche Flusssohle annehmen. Diese Modelle arbeiten auf Basis der Bewegungs- und Kontinuitätsgleichung unter Berücksichtigung von Anfangs- und Randbedingungen in Kombination mit diskretisierten Abflussganglinien und Kornverteilungskurven der Flusssohle.

Grundsätzlich ist die Hydrodynamik Voraussetzung für die Berechnung des Sedimenttransports. Damit ergeben sich die Energiegleichung, Kontinuitätsgleichung und Fließformel sowie weitere hydrodynamisch relevante Formeln für den Wassertransport. Für den Sedimenttransport sind zusätzlich die Kontinuitätsgleichung des Sediments und eine Sedimenttransportformel sowie weitere Ansätze erforderlich (BMLFUW & ÖWAV, 2011; HABERSACK et al., 2002).

Der Fließwiderstand ist in steilen Gerin-

nen mit kleinen relativen Abflusstiefen im Vergleich zu flacheren Gewässern stark erhöht. Bei der Entwicklung der Geschiebetransportformeln repräsentierten die Fließbedingungen in der Regel Verhältnisse mit großen relativen Abflusstiefen und ohne maßgebliche Sohlformen, d.h. einem Vorherrschen des durch Kornrauheit bedingten Fließwiderstandes. Für Berechnungen des Geschiebetransportes in steilen Gerinnen mit großer Sohlrauheit und kleinen relativen Abflusstiefen muss der erhöhte Fließwiderstand berücksichtigt werden. Näherungsweise können die zusätzlichen Fließverluste mit ähnlichen Ansätzen wie zur Aufteilung in Korn- und Formrauheit berücksichtigt werden.

Berücksichtigung des Einflusses der Formrauigkeit auf den Geschiebetransport (Formverluste):

1. Ansatz nach MEYER-PETER & MÜLLER (1949)

$$I_{red} = I_E \left[\frac{k_{ST}}{k_R} \right]^{1,5} \quad \text{Gl. (1)}$$

I_{red} Kornreibungsgefälle,
 I_E Energielinienneigung,
 k_{ST} Strickler -Beiwert,
 k_R Strickler-Beiwert auf das Korn bezogen

$$\left(k_R = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} ; \quad d_{90} \text{ 90.-te Perzentile der Kornverteilung in [m]} \right)$$

Berechnung von $\frac{k_{st}}{k_r}$ nach dem Ansatz von PALT (2001)

$$\frac{k_{st}}{k_r} = 0.13 * I^{-0.28} \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{0.21} \quad \text{Gl. (2)}$$

h Fließtiefe in [m],
 d_{90} in [m],
 I Sohlneigung in [%]

Transportrate bei selektiver Mobilisierung [Profil 4370]

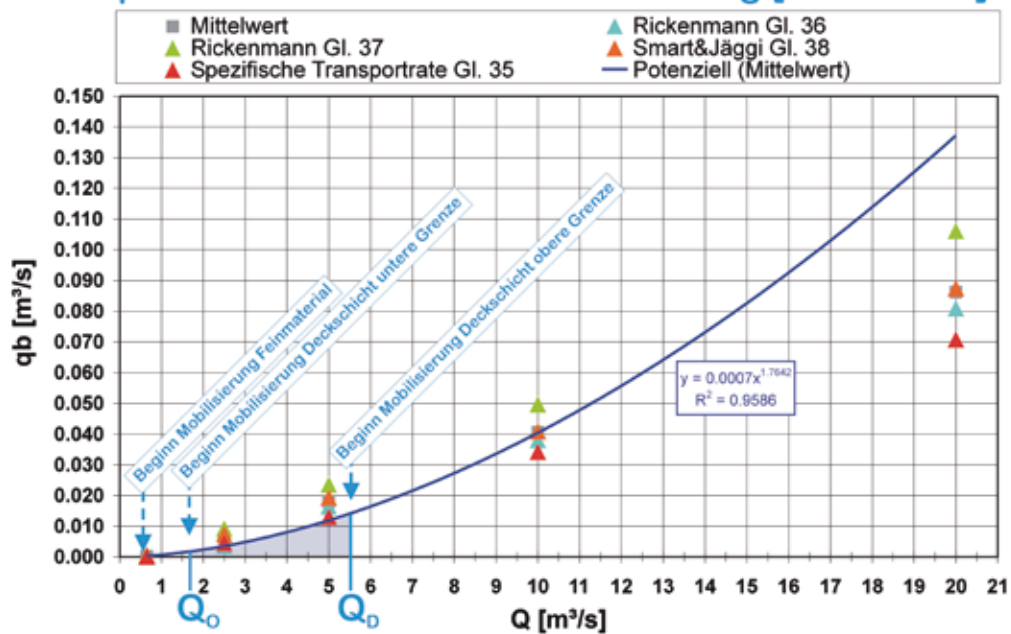


Abb. 1: Transportrate bei selektiver Mobilisierung. Q_0 initiale Mobilisierung, Q_D genereller Mobilisierungsbeginn nach Aufbrechen der Deckschicht (MOSER & JÄGER, 2008)

Fig. 1: Transportation rate by selective mobilization. Q_0 initial mobilization, Q_D general mobilization of natural bed-pavement

2. RICKENMANN (2006), CHIARI et. al. (2010)

Der Beitrag der Makrorauheit (in früheren Publikationen Formrauheit bezeichnet) zur gesamten Rauheit entspricht dabei der Differenz $(1 - n_r/n_{tot})$. Das Verhältnis n_r/n_{tot} kann vereinfacht auch als Funktion der relativen Abflusstiefe formuliert werden (RICKENMANN et al., 2006). Es lässt sich nun der Anteil I_{red} am gesamten Energieliniengefälle (Sohlgefälle) I bestimmen, welcher ausschließlich der Kornreibung zuzuordnen ist:

$$I_{red} = I \left[\frac{n_t}{n_{tot}} \right]^a \quad \text{Gl. (3)}$$

Aufgrund von Experimenten wird ein Exponent $a = 1.5$ vorgeschlagen. CHIARI et al. (2010) gehen davon aus, dass plausible Werte für a im Bereich von $1 \leq a \leq 2$ liegen. Der variable Exponent a kann somit in einem gewissen Sinne als Kalibrierungsparameter zur Anpassung an verschiedene Sohlformen betrachtet werden.

Nach RICKENMANN (2005) kann $\frac{n_t}{n_{tot}}$ nach folgenden Formeln berechnet werden.

$$\frac{n_t}{n_{tot}} = 0.092 \cdot I^{-0.35} \cdot \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{0.33} \quad \text{Gl. (4)}$$

oder

$$\frac{n_t}{n_{tot}} = 0.185 \cdot I^{-0.22} \cdot \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{0.55} \quad \text{Gl. (5)}$$

h Fließtiefe in [m],
 d_{90} in [m],
 I Sohlneigung in [%]

Geschiebetransport

Grundsätzlich sind die zwei generellen Typen von Transportgleichungen zu unterscheiden (BM-LFUW & ÖWAV, 2011):

- **Deterministische Formeln:**
 Ein kritischer Abfluss, eine kritische Wassertiefe oder eine kritische Sohlschubspannung ist für den Bewegungsbeginn und den Geschiebetransport entscheidend (z.B. DuBoys-Gleichungen).
- **Formeln mit statistischen Überlegungen:**
 Statistische Überlegungen zur Berücksichtigung der turbulenten Schwankungen sind entscheidend (z.B. Einstein-Gleichungen).

In der Praxis finden nahezu ausschließlich – insbesondere aufgrund der einfacheren Anwendbarkeit – deterministische Formeln Einsatz (siehe unten), obwohl Formeln mit statistischen Überlegungen den Prozess meist besser beschreiben.

Alle Formeln berechnen den Geschiebetransport q_b [$m^3/s \cdot m$] pro Meterstreifen.

Als Eingangsgrößen werden je nach Formelansatz die charakteristischen Korngrößen [d_{30} , d_m , d_{90}], die Sohlneigung oder Energieliniengefälle [I in %], Erdbeschleunigung [g in m/s^2 mit 9,81], die Dichte des Wassers [ρ_w in kg/m^3] und die Dichte des Sohlmaterials [ρ_s in kg/m^3], Kritische Sohlschubspannung nach GÜNTER (1971) [$\tau_{C\text{Krit}}$ N/m^2], Kritische Sohlschubspannung nach Shields Ansatz [τ_m^* , τ_C^* N/m^2], Grenztiefe [h_m in m], spezifischer Abfluss [q in m^3/sm] sowie der kritische spezifische Abfluss [q_c in m^3/sm] benötigt.

1. Rickenmann (2001)

RICKENMANN (1991) leitete aus 252 Laborversuchen von MEYER-PETER & MÜLLER (1948), SMART & JÄGGI (1983) und RICKENMANN

(1990) eine dimensionslose Geschiebetransportgleichung ab, die ein Gerinnegefälle I von 0.0004 bis 0.20 abdeckt. Die Untersuchungen wurden um die Schwebstofffraktion erweitert und dabei, bedingt durch die höhere Fluidichte, erhöhte Transportraten beobachtet. Die Schwebstofffraktion wurde bis zu einer Konzentration von 22,7% gesteigert, was dem Übergang zu Murgangartigem Transport entspricht. Durch einige Umformungen und Vereinfachungen ergibt sich die Transportformel wie folgt:

$$q_b[m^3/s \cdot m] = 3,1 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot (q - q_c) \cdot I^{1,5} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{-1,5} \quad \text{Gl. (6)}$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 20\%$; $(d_{90}/d_{30}) < 20$;

$$\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) = 1 - 1,29$$

2. RICKENMANN (2006)

$$q_b[m^3/s \cdot m] = 12,6 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot (q - q_c) \cdot I^2 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{-1,6} \quad \text{Gl. (7)}$$

Gültigkeitsbereich: $5 < I < 20\%$; $(d_{90}/d_{30})^{0,2} = 1,05$;

$$\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) = 1 - 1,29$$

3. SMART & JÄGGI (1983)

SMART & JÄGGI (1983) erweiterten die Untersuchungen von MEYER-PETER & MÜLLER auf Neigungen bis 20%. Der Verhältnisparameter (d_{90}/d_{30}) korrigiert die Transportleistung entsprechend der Sieblinie, wobei mit einem Verhältnis von maximal 10 zu rechnen ist. Diese wird in Wildbächen oft überschritten und ist großen Schwankungen von bis zu 60% unterworfen. Dieser Korrekturterm erhöht den Geschiebetransport geringfügig

und spiegelt den intensiveren Geschiebetransport bei breiteren Kornverteilungen wider. Die Formel SMART & JÄGGI (1983) berechnet die transportierte Feststoffmenge:

$$q_b[m^3/s \cdot m] = \frac{4}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)} \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot g \cdot I^{1,6} \cdot \left(1 - \frac{\theta_c \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \cdot d_m}{h \cdot I} \right) \quad \text{Gl. (8)}$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 20\%$; $(d_{90}/d_{30}) < 8,5$;

$$\theta_c = 0,05; \quad d_m > 0,4 \text{ mm}$$

4. SMART & JÄGGI (1983)

$$q_b[m^3/s \cdot m] = 2,5 \cdot q \cdot I^{0,6} \cdot \left(I - \frac{d_m}{12,1 \cdot h_m} \right) \quad \text{Gl. (9)}$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 20\%$; $(d_{90}/d_{30}) < 10$;

$$\theta_c = 0,05$$

5. MEYER-PETER & MÜLLER (1949)

Aufgrund umfangreicher Messungen und Versuche entwickelten MEYER-PETER & MÜLLER (1949) einen Zusammenhang zwischen den hydraulischen Daten eines Profils und dem Geschiebetrieb.

$$q_b[m^3/s \cdot m] = 8 \cdot (\tau_C^* \cdot \left(\frac{k_{ST}}{k_R} \right)^{1,5} - \tau_{C\text{Krit}})^{1,5} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \cdot g \cdot d_m^3} \quad \text{Gl. (10)}$$

Gültigkeitsbereich: $0,04 < I < 2\%$;

Korngrößen 0.04 bis 30 mm

Zur MEYER-PETER & MÜLLER-Formel ist anzuführen, dass sie die weltweit am häufigsten eingesetzte Geschiebetransportformel ist und sich in praktisch allen numerischen Modellen findet. Der Einsatz im Wildbachbereich ist auf Unterläufe beschränkt. Wichtig anzumerken ist, dass der empirische, kritische Shields-Parameter von 0,047

sehr sensitiv für das Ergebnis ist. Untersuchungen an Flüssen zeigten, dass im Vergleich zu Naturmessungen häufig Unterschätzungen des Transports ermittelt werden. Etwaige Änderungen des Shieldsparameters führen dann sehr rasch zu einer Überschätzung. Dies gilt für alle empirischen deterministischen Geschiebetransportformeln.

6. PALT (2001)

Gl. (11)

$$q_b[m^3/s.m] = 10041 \cdot (\tau_m^* \cdot (\frac{k_{ST}}{k_R})^2)^{5,25} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)} \cdot g \cdot d_m^3$$

$$\tau_m^* \cdot (\frac{k_{ST}}{k_R})^2 \leq 0,22$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 12,4$ %

$$q_b[m^3/s.m] = 29,57 \cdot (\tau_m^* \cdot (\frac{k_{ST}}{k_R})^2)^{1,42} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)} \cdot g \cdot d_m^3$$

$$\tau_m^* \cdot (\frac{k_{ST}}{k_R})^2 \Rightarrow 0,22$$

Gültigkeitsbereich: $5 < I < 20$ %

Die für die Berechnung des Geschiebetransportes verwendeten Formeln sind grundsätzlich für den Einsatzbereich gut geeignet. Prinzipiell ist für nahezu alle im Labor abgeleiteten Geschiebetransportformeln festzustellen, dass sie unter Gleichgewichtsbedingungen und unter vollem Geschiebeinput ermittelt wurden. Das Ergebnis stellt somit den potenziellen Geschiebetransport dar.

In der Realität handelt es sich bei Wildbächen in alpinen Gebieten mit hohem Waldanteil oder generell Vegetationsbedeckung um sogenannte „supply limited systems“, wo die Verfügbarkeit von Geschiebe bei einem bestimmten Abfluss entscheidend für den aktuellen Geschie-

betransport ist. Das bedeutet nicht, dass es nicht bei extremen Hochwässern oder Mureneinstößen einen Überschuss an Material bis hin zu einem Aufstau geben kann. Jedenfalls ist in den meisten Fällen ein Unterschied zwischen dem aktuellen (vielfach geringeren) und potenziellen Transport festzustellen.

Dies bedeutet, dass für die Entscheidung über die Gültigkeit der Ergebnisse und natürlich auch die Formelwahl ein Minimaldatensatz aus Naturmessungen erforderlich ist. Dies ist insbesondere auch deshalb wichtig, da die Geschiebetransportformeln empirische Parameter enthalten (z.B. SMART & JÄGGI, 1983; RICKENMANN, 2001), die grundsätzlich keine Allgemeingültigkeit besitzen, sondern aus den spezifischen Laborbedingungen oder Naturbedingungen (z.B. bei PALT, 2001) abgeleitet wurden. Um die empirischen Parameter zu kalibrieren sind Naturmessungen erforderlich.

Weiters besitzen die Geschiebetransportformeln bestimmte Gültigkeitsbereiche in Bezug auf

- Sohl- oder Energieliniengefälle
- Korngrößenverteilung
- Gewässertyp, Morphologie, Sohlformen etc.

Numerische Methoden zur Modellierung

Voraussetzung für die Modellierung des Feststofftransports ist das Vorliegen einer Lösung für das Strömungsfeld im Gewässer. Aus diesem Grund lösen nahezu alle Sedimenttransportmodelle nicht nur die jeweiligen Erhaltungsgleichungen für Schwebstoffe und Geschiebe, sondern ermitteln gleichzeitig auch die Strömungskenngrößen durch – je nach Dimensionalität – Lösung der 1-D-Saint-Venant-, 2-D-Flachwasser- oder 3-D-Navier-Stokes-Gleichungen (BMLFUW & ÖWAV, 2011).

Zur Lösung dieser nichtlinearen partiell-

len Differentialgleichungen stehen verschiedene numerische Verfahren im Vordergrund (entnommen aus BMLFUW & ÖWAV, 2007): Methode der finiten Differenzen (FD-Methode), die Methode der finite Volumen (FV-Methode) und die Methode der finiten Elemente (FE-Methode).

Methode der Finiten Differenzen (FD)

Die Methode der Finiten Differenzen geht von der Differentialform der Gleichung aus. Bei den FD gehen die erste und zweite Ableitung der unbekanntenen Strömungsgrößen (bzw. Schwebstoffkonzentrationen) aus einer Taylorreihenentwicklung um einen betrachteten Punkt hervor. Je nach Genauigkeitsansprüchen werden deren Glieder höherer Ableitungen vernachlässigt. Falls die Terme bis zu den quadratischen berücksichtigt werden, so spricht man von einer Genauigkeit zweiter Ordnung. Erste bzw. höhere Ableitungen lassen sich so als Differenzenquotienten benachbarter Knotenwerte darstellen. Die partielle Differentialgleichung wird folglich durch eine Reihe von Differenzenquotienten approximiert.

Methode der Finiten Elemente (FE)

Die Methode der Finiten Elemente verwendet weder die Differentialform noch die Integralform der Gleichung, sondern geht von der so genannten schwachen Integralform aus. Dies geschieht dadurch, dass auf die Ausgangsgleichung die Methode der gewichteten Residuen angewendet wird. Bei jeder Diskretisierung tritt ein Fehler auf, d.h. dass die Lösung des diskreten Systems von der effektiven Lösung der Ausgangsgleichung verschieden ist. Die Methode der gewichteten Residuen verlangt nun, dass der Fehler der mit einer Gewichtsfunktion versehenen Ausgangsgleichung verschwindet, sofern über das Gebiet integriert wird. Die bei FV verwendete Bilanz-

gleichung wird nicht mehr streng in jedem einzelnen Element erfüllt, sondern nur mehr über das Gesamtgebiet. Das bedeutet, dass die Bilanz in einzelnen Elementen geringfügig verletzt werden kann. Während bei den FV die unbekanntenen Strömungsgrößen durch einen konstanten Wert pro Zelle dargestellt werden, wird bei den FE eine Änderung derselben im Element durch einen linearen oder höherwertigen polynomialen Ansatz berücksichtigt. Es entsteht schlussendlich ein Gleichungssystem analog zu den FV oder FD.

Methode der Finiten Volumen (FV)

Für die Methode der Finiten Volumen transformiert man die partielle differentielle Ausgangsgleichung in eine etwas andere Form, indem man sie über das betrachtete Gebiet integriert. In jeder Zelle werden die Flüsse, die Quellen/Senken bzw. die zeitlichen Änderungen der betrachteten Größe bilanziert, was auf ein ähnliches Gleichungssystem mit Differenzenquotienten führt wie bei den FD. Ein gewichtiger Vorteil der Finiten-Volumen-Methode ergibt sich aus der Verwendung der Integralform, nämlich die unbedingte Erhaltung von Masse, Impuls und Energie, was bei FD nicht der Fall ist. Die Bilanzierung der Flüsse für jedes Volumen ist im Prinzip unabhängig von der Form des Elements, d.h. die FV ist geometrisch sehr viel flexibler als die FD.

Die drei beschriebenen Verfahren beinhalten jeweils Vor- und Nachteile hinsichtlich Rechengeschwindigkeit, Bilanzen und Stabilität. Daher ist zu empfehlen, bei der Auswahl der Modelle auch das numerische Verfahren zu berücksichtigen.

Raumdiskretisierung (inkl. Rechnernetze)

Während bei eindimensionalen Problemstellungen die natürliche Unterteilung des zu berechnen-

den Flussabschnitts in (vermessene) Querprofile besteht, bieten sich für zwei- und dreidimensionale Problemstellungen als grundlegende Unterscheidung strukturierte und unstrukturierte Rechennetze an. Die in manchen 1-D-Modellen implementierte Unterteilung des Querschnitts in einzelne Streifen/Stromröhren lässt sich in diesem Zusammenhang ebenfalls als strukturiertes Rechennetz auffassen.

Daten – Bedarf und Qualität – Besonderheiten im Wildbach

Ermittlung der Fließwiderstände

Ein wichtiger Aspekt betrifft die Hydraulik, welche eine Grundlage für die Feststofftransportberechnung darstellt. Die Auswahl und der Einsatz einer besonders für die Unterläufe geeigneten Fließformel bestimmt wesentlich die darauf aufbauende Geschiebetransportberechnung. Entsprechende Fehler setzen sich fort.

Für die Berechnung von regulierten Abflussquerschnitten ist in der Praxis die Fließgleichung nach STRICKLER (1935) sehr verbreitet. In diesem Fall ist die Gesamtraugigkeit lt. Tabellenwerke zu bestimmen. Der Anwendungsbereich dieses Formelansatzes liegt in einem Gefällsbereich bis 3-5%. Für steilere Wildbach(natur)gerinne mit rauher Sohle sind Ansätze zur Berücksichtigung der relativen Überdeckung durch einen Korrekturterm zwischen dem reduzierten Reibungsgefälle und der Gerinneneigung anzuwenden. Ansätze dazu gibt es z.B. von PALT (2001), MEYER-PETER & MÜLLER (1948) sowie RICKENMANN (2006).

Ermittlung der Korngrößen

Für die Berechnung mittels Geschiebetransportformeln sind die verwendeten Korngrößen als Inputparameter mitentscheidend. Dabei spielt die

Repräsentativität der Geschiebeprobe(n) (insbesondere Probenmenge und -anzahl) und die verwendete Methodik eine wesentliche Rolle.

Die Korngrößenzusammensetzung und die Kornform haben einen großen Einfluss auf den Feststofftransport alpiner Gewässer. Auf Grund der großen Variabilität der Sedimentverteilung, sowohl räumlich (bezogen auf Homogenabschnitte) als auch zeitlich (bezogen auf ein Ereignis oder einen Betrachtungszeitraum), stellt sich die Frage, ob eine umfassende Bestimmung der sedimentologischen Parameter möglich ist, bzw. welche Genauigkeit zu erwarten ist (BMLFUW, 2003). Erst dann kann eine auf die Fragestellung angepasste Bewertungsmethodik entwickelt werden.

Reinwasserabflussformeln und Feststofftransportberechnungen benötigen charakteristischen Korndurchmesser zur Bestimmung des Widerstandsverhaltens (d_m , d_{90}), des Mobilisierungsbeginns (d_{65} , d_{30} , Kornform) und der Effizienz in Abhängigkeit von der Kornsortierung (d_{30} , d_{90}). Bezogen auf einen Querschnitt stellt aber die aktuell aufgenommene Sieblinie nur eine Momentaufnahme dar, welche nur über die unmittelbar vergangenen hydraulischen Bedingungen informiert. Eine solche statische Aufnahme gibt daher nur einen teilweisen Einblick in die dynamisch veränderlichen sedimentologischen Verhältnisse während eines Ereignisses oder Betrachtungszeitraums.

Bestimmung der charakteristischen Korngrößen

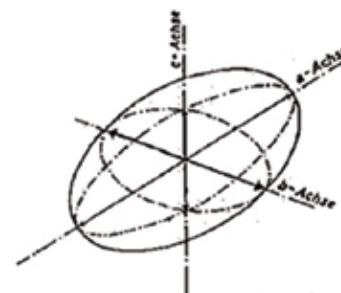
Die Kornform spielt besonders bei Mobilisierungsbeginn und bei Berücksichtigung des mittleren Korndurchmessers eine wichtige Rolle. Bei der Bestimmung von charakteristischen Korngrößen ist auf Grund der weiten Sieblinie und der schlechten Sortierung in Wildbächen bei allen Verfahren mit einer Schwankungsbreite von 40 – 60% (BMLFUW, 2003) zu rechnen. Nach HODEL

(1993) ist die Bestimmung der Korngrößenverteilung des Geschiebematerials von Wildbächen aufgrund der vorherrschenden Maximaldurchmesser größer als 20 cm mit einer Volumengewichtsanalyse mittels Siebung nicht durchführbar. Das Problem kann mit der Durchführung einer Linienzahlanalyse der Deckschicht gelöst werden.

Linienzahlanalysen der Deckschicht

Um systematische Fehler bei der Auswahl der zu untersuchenden Steine zu vermeiden, wird eine Schnur über die zu analysierende Deckschicht gespannt und dann werden die Steine, welche unter der Schnur liegen, nach Durchmesserklassen (Fraktionen) gezählt. Als Durchmesser gilt die mittlere Achse (b-Achse) der Steine. Um eine gute Repräsentativität der Analyse zu gewährleisten, sind als Minimum 150 Steine größer 1-2 cm mit wenigstens 10 Steinen in den häufigsten Klassen zu zählen. In der mittleren Klasse sollten wenigstens 30 Steine gezählt werden, wobei die Grenzdurchmesser der einzelnen Klassen eine geometrische Progression mit dem Quotienten $\sqrt{2}$ bilden sollten.

Die Linienzahlanalysen werden im Normalfall bei Niedrigwasser im Gerinne auf einer Bank am Rande zum fließenden Wasser durchgeführt. Die Linie wird in Fließrichtung gespannt, sodass zwischen Ufer- und Sohlenbereich unterschieden wird. Es ist allerdings darauf zu achten, falls das Sohlenmaterial untersucht werden soll, dass es sich bei der untersuchten Bank nicht nur um frisch abgelagertes Material handelt.



Das Bild zeigt ein Aufnahmegerät, das ein Dokument (das Aufnahmeblatt) fotografiert. Das Blatt enthält eine Tabelle mit Spalten für die verschiedenen Durchmesserfraktionen (z.B. d_{10}, d_{20}, d_{30}, d_{40}, d_{50}, d_{60}, d_{70}, d_{80}, d_{90}) und die Anzahl der in jeder Klasse gezählten Steine. Die Tabelle ist teilweise ausgefüllt.

Abb. 2: Hauptachsen des Steines (HODEL, 1993) und Aufnahmeblatt (die. wildbach)

Fig. 2: Principal axes of the stone (HODEL, 1993) and receiving sheet (die. wildbach)

Die Linienzahlanalyse wurde nach ANASTASI (1984) und FEHR (1987) ausgewertet und umgerechnet. Die Feinanteile werden über statistische Verteilungen (Fullerkurve) ergänzt.

Die in Österreich und der Schweiz meist verwendete Linienzahlanalyse ergibt im Vergleich zum international häufig eingesetzten Wolman-Count oft signifikante Unterschiede, die sich dann in den Berechnungsergebnissen fortsetzen. Bei kleineren Korngrößen ist auch die Entnahme und Analyse volumetrischer Proben sinnvoll einzusetzen.

Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung

Mit der Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung von Feststofftransportmodellen wird der Nachweis erbracht, dass mit dem gewählten Modell alle maßgebenden Prozesse mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden können (BMLFUW & ÖWAV, 2011). Bei Feststofftransportmodellen wird dieser Nachweis damit geführt, dass ausgehend von einem bestimmten Zeitpunkt über einen Zeitraum gemessene morphologische Veränderungen mit dem Modell nachgerechnet und wenn möglich mit direkten Geschiebetransportmessungen verglichen werden, wobei hier die Ergebnisse der Ereignisdokumentation einbezogen werden sollten. Bei der Kalibrierung erfolgt die Abstimmung zwischen Ergebnissen des Rechenmodells und vorhandenen Daten. Die Sensitivitätsanalyse gibt Auskunft, wie sich die Modellergebnisse verändern, wenn man die

Eingabegrößen in plausiblen Bandbreiten variiert. Mit der Validierung wird das kalibrierte Modell für gültig erklärt. Der Anwender weist damit nach, dass das Modell nicht nur für die kalibrierten Fälle anwendbar ist.

Wahl des Berechnungsansatzes-/Modells (je nach Wildbachprozess und praktische Anwendung)

Für den Anwender gibt es bereits eine Vielzahl von Modellen, die unterschiedliche numerische Methoden und Verfahren beinhalten und somit auch für verschiedene Einsatzbereiche geeignet sind. Für ein gutes Gelingen einer numerischen Simulation ist die Wahl des Modells demnach von entscheidender Bedeutung. Schon bei der Auswahl des Modells ist einerseits die Modellkenntnis (Was kann das Modell und was nicht?) wichtig, andererseits auch Expertenwissen (Gebietserfahrung, Vorstellung möglicher Szenarien) notwendig.

Als gängige Methode hat sich die profilweise Berechnung auf Basis von Profilgeometrie, Fließrauigkeit, Gefälle und HQ_{150} etabliert. Die Ergebnisse beinhalten die hydraulischen Kenndaten (Q in m^3/s , v in m/s , etc.) sowie die Abflusskapazität je Querprofil. Diese Abflusskapazität ist für die Dimensionierung des Gerinnes ausreichend, zur Bestimmung der flächigen Ausbreitung im Falle eines Überbordens des Gerinnes ist diese profilweise Betrachtung jedoch nicht geeignet. Nur mit 1D- bzw. 2D-Modellen sind auch flächige Überflutungen berechenbar. Die numerischen 1D-Modelle sind dabei überall dort einsetzbar, wo die Fließwege im Vorhinein bekannt sind bzw. wo die Abweichungen von den angenommenen Fließwegen vernachlässigbar sind (BMLFUW & ÖWAV, 2007). 2D-Modelle sind dann zu bevorzugen, wenn die Fließwege stark verzweigt und unbekannt sind. Als Eingangsdaten sind flächige Geländemodelle (bzw. im 1D-Bereich auch pro-

filweise Vermessung möglich), großflächig kartierte Fließrauigkeiten, hydraulisch relevante Einbauten (z.B. Brücken) und Abflussganglinien zur Beschreibung des Bemessungsabflusses (ev. auch der Zubringer) nötig.

Die Bestimmung der oben genannten Eingangsdaten ist nicht immer einfach, weshalb man auch in der Beurteilung der Ergebnisse die Genauigkeit der Eingangsdaten mit berücksichtigen sollte. Die Aussage, dass das Modellergebnis so gut wie die Eingangsdaten ist, stimmt zwar grundsätzlich, man sollte diese Aussage noch um die Beurteilung und Deutung des Ergebnisses erweitern. Auch in diesem Fall sind Erfahrungen mit dem Umgang von Simulationsprogrammen und die entsprechende Gebietskenntnis zur umfassenden Beurteilung sehr wichtig.

Kriterien für Methodenwahl

Kriterien sind:

- Neigungsbereich der Anwendung
($< 2,5\text{-}5\%$ | 5% bis 15% | $> 15\%$)
- Sohlrauigkeit, h/d -Verhältnis
- Gerinnecharakter

Fließrauigkeiten:

Die Festlegung der Fließrauigkeiten erfolgt gutachterlich. Literatur mit Beispielen gibt es (z.B. Schweizer Rückrechnungen) und können als gute Anhaltspunkte verwendet werden.

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 Strickler-Werten vor. Zudem differieren häufig Planung und Ausführung bzw. der natürliche Zustand der Gewässersohle.

In der Ingenieurpraxis werden viele Berechnungen basierend auf der STRICKLER/

Berechnungsmethoden und Modelle (nach charakteristischen Verlagerungsprozessen nach ONR 24800)

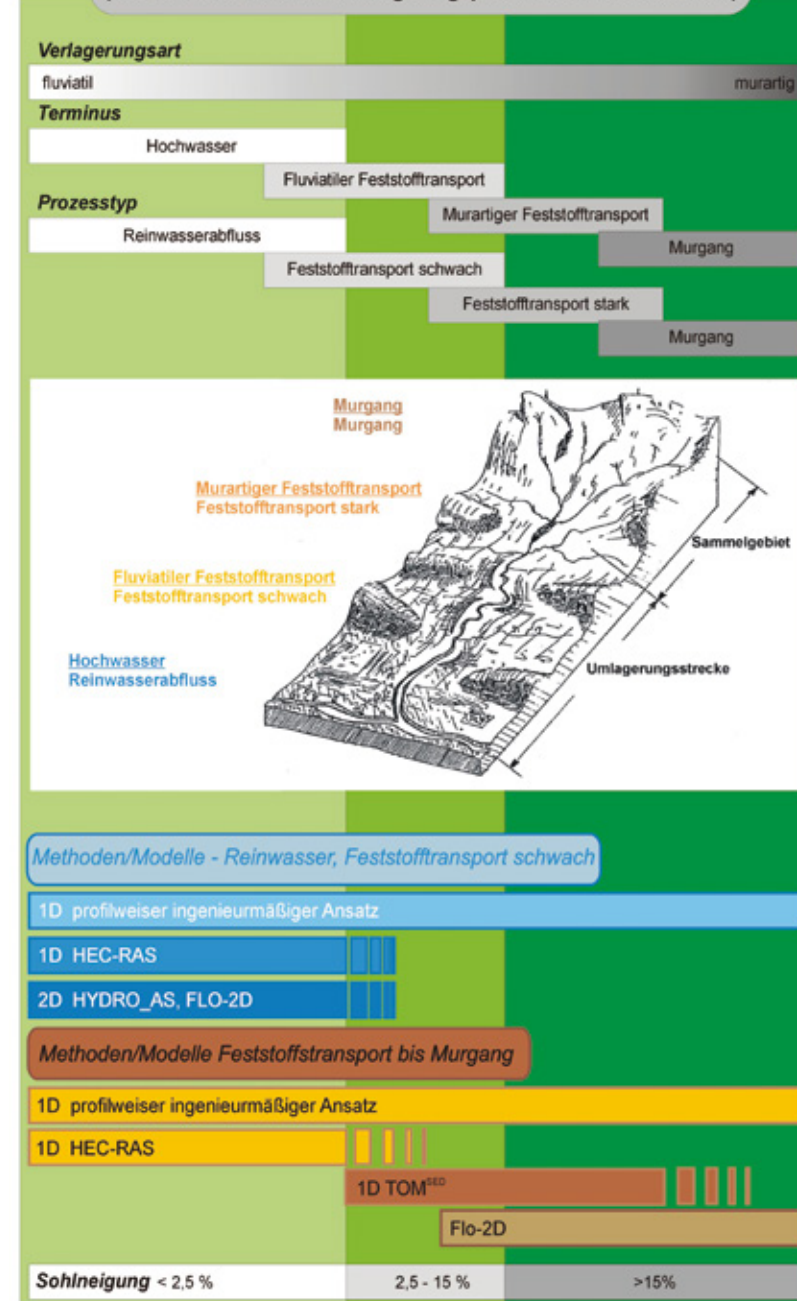


Abb. 3: Berechnungsmethoden und ausgewählte Modelle nach Verlagerungsprozessen und Sohlneigung

Fig. 3: Calculation methods and models selected for relocation processes and slope

(MANNING)-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 topografischen Verhältnissen zwischen den Alpen und dem Jura wurde eine ähnliche Publikation zur Wahl von geeigneten Strickler-Werten von SPREAFICO et al. (2001) veröffentlicht.

Für 1D- und 2D-Modelle sollten laut Erfahrungen unterschiedliche Rauigkeiten angesetzt werden. In 2D-Modellen sollen demnach die Rauigkeiten glatter sein.

Geschiebetransport:

Zwei wesentliche Fragestellungen stehen im Mittelpunkt:

- Wie groß ist das Feststoffpotential? Was kann in das Bachgerinne gelangen?
- Wie viel Geschiebe davon kann vom Bach mobilisiert werden (Fracht), wie wird es transportiert (Ganglinie) und wo treten Erosion oder Akkumulation auf?

Für den Geschiebetransport im Gerinne gibt vor allem für den Bereich geringerer Gefälle (< 2,5 bis 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 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. 2,5 - 5% nicht, möglicherweise wegen stark überschätzter Geschiebetransportkapazität. 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.

Zu beachten ist ferner, dass für den Geschiebetransport auf fester Sohle wie z.B. in einer Wildbachschale z.T. angepasste Formeln zu verwenden sind (SMART & JÄGGI, 1983).

Es sollten verschiedene Anlandungs- bzw. Verklausungsszenarien betrachtet und die Auswirkungen auf das Überflutungsbild in mehreren Berechnungsläufen ermittelt werden. Als Hilfestellung dazu kann der Arbeitsbehelf „Gefah-

renzonenausweisung Szenarien“ von SEREINIG & SCHÖBER (2012) herangezogen werden.

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

Mögliche Vorgaben an die Bearbeiter bzw. bei Beauftragung von Planungsleistungen:

- 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 (Kärnten: Musterausschreibung ist vorhanden)
- Ereignisdokumentation

Profilweiser ingenieurmäßiger Ansatz

Das Berechnungsverfahren setzt ein quasi-stationäres und bezogen auf den Betrachtungsabschnitt gleichförmiges Abflussverhalten, bei dem das Wasserspiegelgefälle dem Sohlgefälle entspricht, einen regelmäßigen Querschnitt und unbeschränkte Feststoffbereitstellung voraus. Bei der profilweisen Berechnung sind der Abflussquerschnitt und die Abflusstiefe bekannt, und es wird der entsprechende Reinwasserabfluss sowie die Feststofftransportrate berechnet. Dabei kann eine Deckschicht berücksichtigt werden.

Bei der ereignisbezogenen Feststofftransportrate wird für einen Homogenbereich und eine Abflussganglinie die zugehörige Feststofftransportganglinie berechnet. Dabei kann auch eine Deckschicht berücksichtigt werden (BMLFUW, 2003).

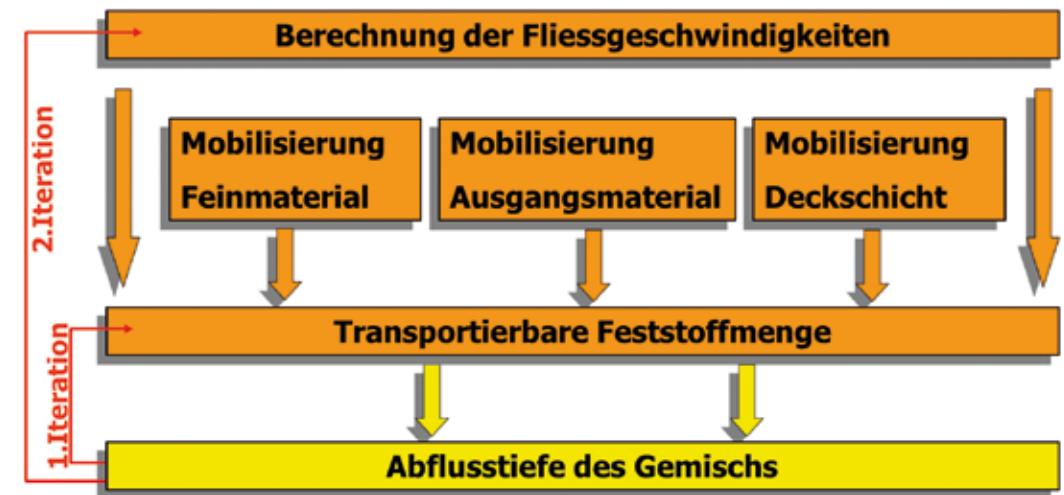


Abb. 4: Berechnungsschema Geschiebetransport nach ETALP (BMLUW, 2003)

Fig. 4: Calculation scheme for sediment transport ETALP (BMLFUW, 2003)

Aus hydraulischen Kenngrößen werden der Mobilisierungsbeginn und die Geschiebetransportkapazitäten mit verschiedenen Transportformeln ermittelt (z.B. MEYER-PETER & MÜLLER, 1948; WHITTAKER & JÄGGI, 1968; BATHURST, 1987; PALT, 2001; RICKENMANN, 1990; RICKENMANN, 2001; RICKENMANN, 2006; SMART & JÄGGI, 1983).

Als Ergebnisse erhält man die Wasserspiegellage, den Mobilisierungsbeginn (Feinmaterial, obere und untere Grenze Deckschicht), die Transportkapazität (m^3/s , pro Meterstreifen und je Profillbreite) und die Fracht (m^3/s).

Die oben angeführten Geschiebetransportformeln weichen z.B. in Bezug auf den einzusetzenden Gefällsbereich deutlich voneinander ab. Generell sind diese bis auf die MEYER-PETER/MÜLLER-Formel eher für steileres Gefälle gedacht, wobei dann eine Anwendung für die Unterläufe der Wildbäche nur sehr eingeschränkt oder nicht mehr möglich ist. Der Einfluss von Strukturen wird über Formverluste berücksichtigt, welche ebenfalls empirische Parameter, also de facto Kalibriergrößen enthalten.

Der wesentliche Nachteil des profilweisen, ingenieurmäßigen Ansatzes besteht in der oft großen Abweichung zwischen dem angenommenen Normalabfluss und den in Realität auftretenden instationären, ungleichförmigen Abflusssituationen und den daraus folgenden Geschiebetransportbedingungen.

1D-Modelle für Prozessstyp Reinwasserabfluss - Feststofftransport (Schwach, Stark)

Von den Dienststellen der Wildbach- und Lawinerverbauung werden derzeit 2 Modelle angewendet: Das Modell HEC-RAS bis zu einer Sohlneigung von ca. 2,5 % und das Modell TomSED ab einer Neigung von 2,5 %.

HEC-RAS

HEC-RAS ist ein 1D-Programm zur Berechnung stationärer und in stationären Abflüsse. In den letzten Jahren wurde das Modell stetig weiterentwickelt, mittlerweile sind Feststofftransportberechnungen mit beweglicher Sohle möglich und

liefern realistische Ergebnisse. Die Raumdiskretisierung erfolgt über Profile, wobei über eine Arc-Gis Extension (GeoRAS) aus Geländedaten (ALS-Laserscan) Inputdaten generiert werden können. Die Strömungssituation wird über Flachwassergleichungen gelöst. Im Modell HEC-RAS (grundsätzlich bei allen 1D-Strömungsmodellen) enthält die Gleichung nur die x-Komponente der Fließgeschwindigkeit. Querströmungen und vertikale Geschwindigkeiten werden nicht berücksichtigt. Die Lösungsgleichungen für den stationären Abfluss werden im Programm HEC-RAS nach dem „Standard-Step-Verfahren“ (Sekantenmethode) angenähert – für den instationären Abfluss durch ein implizites Finite-Differenzen-Schema.

Folgende Feststofftransportfunktionen werden im Modell berücksichtigt: ACKERS und WHITE; ENGELUND und HANSEN; COPELAND Version von LAURSEN; MEYER, PETER und MÜLLER; TOFFALETI, YANG, WILCOCK.

Als Berechnungsergebnisse erhält man Wasserspiegellagen pro Profil, die Strömungsgeschwindigkeiten pro Profil kann über die Arc-GIS Extension in linkes, rechtes Vorland und den Hauptfluss unterschieden werden, die Wassertiefen im Profil, die Überflutungsdauer, die Abflussaufteilung auf Flussschlauch und Vorländer, die Retentionswirkung, Sohlschubspannungen für stationäre und instationäre Abflüsse. Darüber hinaus lassen sich eine Vielzahl an hydraulischen und sedimentrelevanten Parametern ausgeben, die insbesondere auch für die Interpretation der Ergebnisse von großer Bedeutung sind (z.B. Froude-Zahl als Hinweis für den Fließzustand, kritische Tiefen).

Tom^{SED}

Tom^{SED} ist das Akronym für „Torrential Model for Sediment Transport“. Die grafische Benutzerschnittstelle erlaubt eine effiziente und übersicht-

liche Datenverwaltung. Neben der Visualisierung des Gerinnesystems können auch alle Querprofile sowie Längsprofile dargestellt werden. Des Weiteren können auch die eingegebenen Sedimentdaten als Sieblinien visualisiert werden. Die aufwändige grafische Benutzerschnittstelle dient neben der Abschätzung der Durchfluss- und Transportkapazität der einzelnen Querprofile auch zur Plausibilitätsprüfung der Eingabedaten. Das Topologieprotokoll informiert den Modellanwender über die korrekte Modellanwendung und weist auf unzulässige Modellanwendungen (z.B. gewählte Geschiebetransportformel eignet sich nicht für den Gefällsbereich im Projektgebiet) hin.

Die Abflussganglinien werden als kinematische Welle durch ein Gerinnesystem geleitet. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Fließwiderstands stehen dem Anwender zur Auswahl. Zusätzlich kann der Einfluss der Makrorauigkeit (Formrauigkeit) auf den Geschiebetransport berücksichtigt werden. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports (RICKENMANN, 1990; SMART & JÄGGI, 1983) stehen zur Verfügung. Die Querprofile werden zur Berechnung des Pegelschlüssels nach der Streifenmethode aufgeteilt. Die Anzahl der Streifen richtet sich dabei nach der Komplexität des Querprofils. So können auch gegliederte Profile gut abgebildet werden. In jedem Streifen wird neben der Fließgeschwindigkeit auch der Geschiebetrieb berechnet. In Tom^{SED} können auch Änderungen der Gerinnegeometrie durch Auflandung bzw. Erosion berücksichtigt werden, wobei jedem Gerinneabschnitt eine mögliche Erosionstiefe zugewiesen wird. Weiters stehen für den Geschiebetransport ein Einkorn- sowie ein Mehrkornmodell zur Verfügung. Bei der Anwendung des Einkornmodells kann alternativ zur Makrorauigkeit ein Deckschichtansatz gewählt werden. Bei der Wahl des Mehrkornmodells wird zwischen einer aktiven Austauschschicht und einer erodierbaren Unterschicht unterschieden.

Die Simulationsergebnisse stehen dem Modellanwender als Textdateien zur weiteren Analyse in frei wählbaren Zeitschritten für jeden Berechnungsknoten als Zeitreihe zur Verfügung. Des Weiteren können alle Längsprofile im Gerinnesystem zu jedem gespeicherten Zeitschritt ausgegeben werden. Das Vereinfacht die Visualisierung der Simulationsergebnisse, insbesondere der Sohlhöhenentwicklung.

Mit dem Modell Tom^{SED} können keine Murgänge simuliert werden, jedoch kommt es bei der Modellanwendung in sehr steilen Gerinnen (Gefälle > 25%) durch die Extrapolation der Geschiebetransportformeln zu sehr hohen Sedimentkonzentrationen, die durchaus mit murartigem Feststofftransport vergleichbar sind. Die Verlagerung von hohen Feststoffvolumen bei murgangartigem Transport kann näherungsweise durch Verwendung des Gerinnegefälles anstelle des reduzierten Energieliniengefälles simuliert werden. Durch die vereinfachte Hydraulik der kinematischen Welle werden Rückstauereffekte, wie sie durch Sperren oder Brückendurchlässe verursacht werden, vernachlässigt.

2D Modelle für Prozesstyp Reinwasserabfluss und Feststofftransport (HYDRO AS 2D/GS 2D)

HYDRO AS 2D

Das 2D-tiefengemittelte instationäre Modell nach der Finite-Volumen-Diskretisierung ist bei großer Genauigkeit gleichzeitig in der Anwendung relativ einfach und sehr robust. Als grafische Benutzeroberfläche dient die Software SMS (Surface Water-Modeling-System). Das Modell HYDRO AS 2D wird eingesetzt für die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten und Überschwemmungsgrenzen, als Bemessungshilfe für Hochwasserschutz- und Renaturierungsmaßnahmen, als Nachweis von Auswirkungen von Baumaß-

nahmen im und am Gewässer, zur Beurteilung der ökologischen Standortbedingungen sowie für die Untersuchung hoch instationärer Ereignisse (z.B. Dammbbruch). Bedeutende Entwicklungsziele in den letzten Jahren waren die Multiprozessorfähigkeit, die Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit sowie die Integration steuerbarer Bauwerke (Wehre, Drosseln). Zur Aufbereitung von digitalen Geländemodellen aus Laser-Scan-Messungen für die 2D Modellierung wurde das Programm LASER_AS-2D entwickelt. Das Modell HYDRO AS 2D liefert folgende Ergebnisparameter: Wasserspiegellagen, Strömungsgeschwindigkeiten, Wassertiefen, Überflutungsdauer, Abflussaufteilung auf Flussschlauch und Vorländer, Retentionswirkung, Sohlschubspannungen, für stationäre und instationäre Abflüsse.

HYDRO GS 2D

Der Geschiebemodul ist als Einkornmodell einsetzbar (Regelfall zur quantitativen ereignisbezogenen Bestimmung ablaufender Prozesse), die fraktionierte Variante ist i.d.R. Flüssen vorbehalten. In den letzten Jahren wurde das Einkornmodell auf fraktionierten Transport erweitert, derzeit wird die vollständige Koppelung mit dem Stofftransport (Geschiebe, Schwebstoff) und beweglicher Sohle (Schichtenmanagement) realisiert. Diese Erweiterungen sind für den Wildbachsektor von untergeordneter Bedeutung. Weitere Funktionen des Modells sind: bewegliche Ufer. Als Anwendungsgrenze der Geschiebeformel von MEYER-PETER und MÜLLER (MPM) gilt ein Gefälle von maximal 2,5 %. Die Wildholzproblematik kann nicht berücksichtigt werden.

2D-Modelle für Prozesstyp Murgang - FLO 2D

Das Modell FLO 2D bietet eine kombinierte Niederschlags-Abflussberechnung sowie eine Model-

lierung des Sedimenttransports, hyperkonzentrierter Abflüsse und viskoser Murgänge. Es dient zur Ermittlung von Überflutungsflächen und Überflutungsgrenzen, als Bemessungshilfe für Hochwasserschutzmaßnahmen, als Hilfe für die Abgrenzung von Gefahrenzonen (Hochwasser) sowie zur Untersuchung hoch instationärer Ereignisse (z.B. Dammbbruch).

Das Modell basiert auf der „Finite-Differenzen-Methode“ mit regulärer, strukturierter Netzstruktur (Berechnung in 8 Richtungen Möglich). Die Diskretisierung erfolgt nach der Zeit mittels explizitem Verfahren mit Stabilitätskriterium. Als Ergebnis erhält der Anwender Wassertiefen je regulärem, strukturiertem Netz (GRID), ebenso Strömungsgeschwindigkeiten, Überflutungsdauer, Retentionswirkung, Sohlschubspannungen, jeweils für stationäre und instationäre Abflüsse. Kombinierte hydrologische und hydraulische Berechnung sind möglich. Die Anwendungsgrenzen liegen in langen Rechenzeiten von sehr kleinen Netzstrukturen, weiters besteht keine Möglichkeit der Berechnung von unstrukturierten Netzen. Bezugsquelle: <http://www.flo-2d.com>

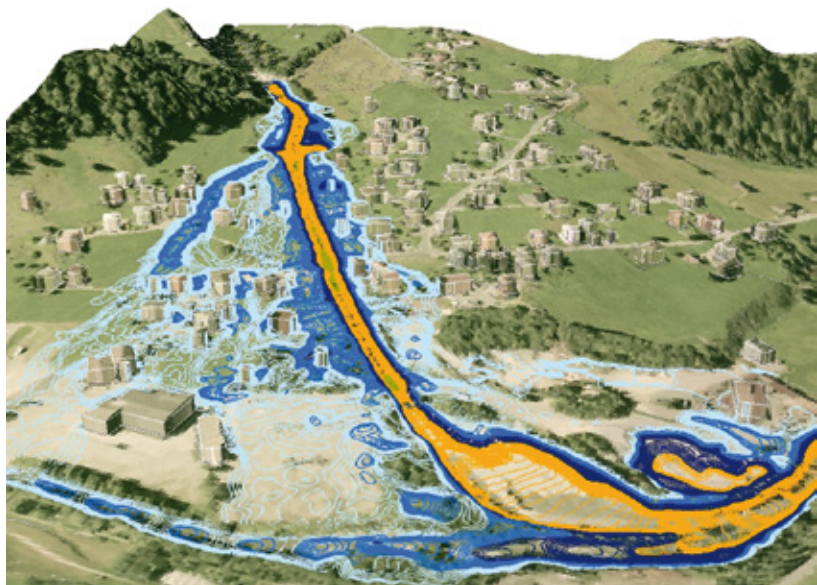


Abb. 5: Murgangsimulation mit Dammbbruch Gemeinde St. Gallenkirch mit FLO 2D

Fig. 5: Debris flow simulation with dam break village St. Gallenkirch with FLO 2D

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Als mathematische Grundlagen der Geschiebetransportmodellierung werden fünf Gleichungen (Energie- und Kontinuitätsgleichung des Wassers, Fließformel, Kontinuitätsgleichung des Sediments und eine Sedimenttransportformel) und weitere mathematische Beziehungen zur Erfassung zusätzlicher Teilprozesse (z.B. Deckung/Exposition) benötigt (BMLFUW & ÖWAV, 2011). Sowohl bei der Hydrodynamik als auch für die Modellierung des Feststofftransports ist die richtige Raumdiskretisierung (strukturierte oder unstrukturierte Rechenetze) und Zeitdiskretisierung (explizite oder implizite Verfahren) sowie die Definition der adäquaten Rand- und Anfangsbedingungen wichtig.

Die räumliche und zeitliche Auflösung und Ausdehnung sowie die gewünschte Modellaussage bestimmen in erster Linie die erforderliche Datenbasis für den Betrieb eines Feststofftransportmodells. In den Bereichen Morphologie und Geometrie (morphologische Charakterisierung, Geometrie, transportwirksamer Sohlbereich, Fließwiderstände, Bauwerke), Hydrologie und

Hydraulik (Abflüsse, Abflussgenerierung für die Prognose, Wasserspiegellagen), Sedimente (Gewässersohle einschließlich Erosionsbereiche, repräsentative Probenentnahme, Korngrößen und Korneigenschaften, Feststoffeintrag und -austrag) sind detaillierte, qualitätsgesicherte Daten erforderlich.

Der Modellauswahlprozess wird durch eine große Anzahl von Faktoren beeinflusst, die sowohl die einzuhaltenden Anforderungen als auch die zu beachtenden Limitierungen kennzeichnen. Das auszuwählende Programmpaket bestimmt nicht nur die Datenerfordernisse in qualitativer und quantitativer Hinsicht, sondern eine Reihe operationell maßgeblicher Aspekte (z.B. Softwarekosten).

Mit der Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Validierung von Feststofftransportmodellen wird der Nachweis erbracht, dass mit dem gewählten Modell alle maßgebenden Prozesse mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden können.

Zusammenfassend können numerische Modellierungen neben der Hydrodynamik einen Beitrag zur Verbesserung der Geschiebetransportberechnung in Wildbächen leisten, es sind aber zu Beginn klar Möglichkeiten und Grenzen je nach Aufgabenstellung, Wildbacheigenschaften und Datenverfügbarkeit zu definieren. Dabei ist u.a. auf die Abbildung wichtiger Prozesse (z.B. Deckschichtbildung, Deckungs- und Expositionseffekte) zu achten (BMLFUW & ÖWAV, 2011).

Als Schlussfolgerung lassen sich für Anwendung von Modellen für Wildbachprozesse folgende Empfehlungen ableiten:

1. Auswahl von geeigneten Geschiebetransportformeln für die gegebenen Randbedingungen
2. Kalibrierung der Formeln an Hand eines minimalen Naturmessdatensatzes
3. Optimierung der Ermittlung der Korngrößen

4. Spezifische Berechnung der hydraulischen Verhältnisse, Einfluss von wildbachspezifischen Sohlformen, Rauigkeiten etc.
5. Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten von zur Verfügung stehenden numerischen Hydrodynamik- und Geschiebetransportmodellen
6. Durchführung von Sensitivitätsanalysen zur Eingrenzung möglicher Folgen unsicherer Daten oder Auswirkungen verschiedener räumlicher und zeitlicher Diskretisierungen auf das Ergebnis

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Gerald Jäger
Fachbereich Wildbachprozesse
GBL Bregenz
Rheinstraße 32/5
A 6900 Bregenz
gerald.jaeger@die-wildbach.at

DI Markus Moser
Fachbereich Wildbachprozesse
GBL Lungau
Johann Löcker Str. 3
5580 Tamsweg
markus.moser@die-wildbach.at

Univ. Prof. DI Dr. Helmut Habersack
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
Christian Doppler Labor für Innovative Methoden in Fließgewässermonitoring, Modellierung und Flussbau
Universität für Bodenkultur Wien
Muthgasse 107
1190 Wien
helmut.habersack@boku.ac.at

Literatur / References:

- ANASTASI G. (1984): Geschiebeanalysen im Felde unter Berücksichtigung von Grobkomponenten. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der EHT Zürich, Nr. 70, 1984.
- BATHURST J. C., GRAF W. H., CAO H. H. (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In: Thorne C. R., Bathurst J. C., & Hey R. D. (Eds.) Sediment transport in gravel bed rivers. Wiley Chichester, p. 453-477.
- BARNES H. H., (1967): Roughness characteristics of natural channels. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849, 213 p.
- BEZZOLA G. R. (2002): Fließwiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 173.
- BMLFUW, ÖWAV (Hrsg.) (2007): Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik – Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien.
- BMLFUW, ÖWAV (Hrsg.) (2011): Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien.
- CHIARI M., FRIEDL K., RICKENMANN D. (2010): A one dimensional bedload transport model for steep slopes. Journal for Hydraulic Research, 48(2), p. 152-160.
- BMLFUW (2003): Erosion, Transport in Alpinen Systemen: Gesamtheitliche Erfassung und -bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- FEHR R. (1987): Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen – Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 92, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- GÜNTHER A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Eidgenössische Hochschule Zürich, Nr. 3
- GRÜNZNER M., BUI-M.-D., RUTSCHMANN. P. (2009): Hydraulik und Geschiebetransport 1D, 2D, 3D -Ist das Beste gut genug? In: Zukunftsfähiger(s) Wasserbau und Flussgebietsmanagement, Beiträge zur Fachtagung am 30. und 31. Juli 2009 in Wallgau, Oberbayern. Berichte des Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft München, Nr. 123/09.
- LAMP M. P., DIETRICH W. E., VENDITTI J. G. (2008): Is the critical Shields-stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? J. Geophysical Research, 113, article F02008.
- HABERSACK, H., LARONNE, J.B. (2002): Evaluation and improvement of bedload discharge formulas based on Helley-Smith sampling in an alpine gravel bed river, J. Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 5, 484-499.
- HICKS D. M. & MASO, P. D. (1991): Roughness characteristics of New Zealand Rivers. DSIR marine and freshwater, Wellington.
- HÜB, J. (2007): Ereignisdokumentation in Wildbächen – Systematik und mögliche Ergebnisse. In: Wiener Mitteilungen, Band 206 (Extreme Abflussereignisse: Dokumentation-Bedeutung-Bestimmungsmethoden), S 69 – 84.
- HODEL, H. (1993): Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauheit des Strömungswiderstandes und des Fließvorganges in Bergbächen. Dissertation ETH Nr. 9830, ETH Zürich.
- MEYER-PETER, E., & MÜLLER, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. Schweizerische Bauzeitung, Jg. 67, p 29-32.
- MOSER M., JÄGER G. (2008): Abschätzung des Geschiebetriebs in der Ausleitungsstrecke von Kraftwerksanlagen; Anwendung der ETAlp-Studie 2003 am Beispiel Ursiau/Handlergraben/Gde. Maria Alm. Wildbach- und Lawinenverbau, 72. Jg., Heft 158.
- MOSER M., JÄGER G. (2009): Hydrologische und Hydraulische Modellierung in der Gefahrenzonenplanung des forsttechnischen Dienstes. Wildbach- und Lawinenverbau, 73. Jg., Heft 163.
- PALT S. M. (2001): Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- RECKING A. (2009): Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bedload motion. Water Resources Research, 45, article W04401.
- RICKENMANN D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 103, p. 8-249.
- RICKENMANN D., CHIARI M., FRIEDL K. (2006): SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In: FERREIRA R., ALVES E., LEAL J. & CARDOSO A. (Eds), River Flow 2006, Taylor & Francis London, p. 843-852.
- SERENINIG N., SCHÖBER S., (2012): Arbeitsbehelf „Gefahrenzonenausweisung Szenarien“, Bundeswasserbauverwaltung Kärnten.
- SIEBEN, A. (1993): Hydraulics and morphology of mountain rivers: a literature survey. Report No. 93-4, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft.
- SMART G. M. & JÄGGI M. N. R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 64, p. 9-188.
- STRICKLER A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft Nr. 16, Bern.
- SPREAFICO M., HODEL H. P., KASPAR H. (2001): Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 1, Bern.
- TUROWSKI J. M., YAGER E. M., BADOUX A., RICKENMANN D., MOLNAR P. (2009): The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. Earth Surface Processes and Landforms 34: 1661–1673. doi: 10.1002/esp.1855.
- WHITTAKER J.G. & JÄGGI M. (1986): Blockschwellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 91.

Künstliche Lawinenauslösung, unsere Kernkompetenz
www.wyssen.com



wyssen avalanche control

MATTHIAS GRANIG

Grundlagen und Anwendung von Lawinensimulationsmodellen

Basics and Practical Application of Avalanche Simulation Models

Zusammenfassung:

Die Quantifizierung von Lawinenparametern – wie Fließhöhe, Geschwindigkeit oder Druckverteilungen – erfolgt unter Zuhilfenahme von Berechnungsmodellen. In nachvollziehbarer und reproduzierbarer Weise werden die im Lawinenschutz für Planungsaufgaben üblichen Parameter rechnerisch ermittelt. Anhand der laufenden Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis werden die Modelle stetig weiterentwickelt bzw. kommen neue auf den Markt. Der Beitrag gibt einen kurzen Einblick über die aktuell in der Wildbach- und Lawinenverbauung verwendeten Simulationsprogramme.

Stichwörter

Lawinensimulation, Lawinenmodellierung, Lawinen, SamosAT, Elba+

Abstract

With the help of avalanche simulation models the usual avalanche parameters – such as flow height, avalanche velocity, or pressure – are quantified. These factors can be calculated in a reproducible manner for different tasks in avalanche protection. Based on the latest scientific knowledge and experiences in engineering practice new avalanche models are available as well as major improvements in the modelling lead to further steps in the calculations. This contribution gives an overview of the actual models, which are in use within the Federal Service for Avalanche and Torrent Control.

Keywords

Avalanche simulation, avalanche modelling, avalanches, SamosAT, Elba+

Einleitung

Lawinensimulationsmodelle sind ein objektives Werkzeug, um die charakteristischen Größen der Lawinenbewegung (Geschwindigkeiten, Fließhöhen, Auslauflängen, Aufpralldrücke) für Planungsaufgaben zu bestimmen. In der Ingenieurpraxis des technischen Lawinenschutzes werden seit den 1970er-Jahren numerische Berechnungsmodelle routinemäßig eingesetzt. Nach dem Lawinenwinter 1999 erfuhr die Modellentwicklung in Mitteleuropa eine Forcierung, besonders im Bereich der mehrdimensionalen dynamischen Modelle wurden große Fortschritte erzielt. In der Gefahrenzonen- und der Maßnahmenplanung des technischen Lawinenschutzes zählen Simulationsmodelle mittlerweile zum „Stand der Technik“. Der Beitrag gibt einen Überblick über den aktuellen Status auf dem Sektor der Lawinenmodellierung.

Grundlagendaten und -informationen der Lawinenmodellierung

Eine wesentliche Basis für den Einsatz von Lawinenberechnungen liefert die Datenerhebung vor Ort. Im Gelände können zahlreiche Faktoren – z.B. Schlüsselstellen für den Prozessablauf, Stumme Zeugen, die Lage und Größe von Lawinenanbruchgebieten, potentielle Einwehungsbereiche, Flächen mit zusätzlicher Schneeaufnahme oder Oberflächenrauigkeiten (Blockhalden, Hochwald) – aufgenommen werden. Der Ermittlung realistischer Inputdaten kommt eine überragende Bedeutung zu, da die Ergebnisse der Berechnungen stark von diesen Daten abhängig sind. Die Lawinenchronik, die Analyse „stummer Zeugen“ und die Befragung der ortsansässigen Bevölkerung können zusätzliche Hinweise über den Prozessablauf von Lawinenereignissen liefern.

Bei der Modellierung eines Lawinenereignisses mit bestimmter Jährlichkeit müssen ins-

besondere die Größe der Lawinenanbruchgebiete und die potentielle Anrissmächtigkeit festgelegt werden. Salm et al. (1990) schlagen vor, als Ausgangswert für die Anrissmächtigkeit den Schneedeckenzuwachs der letzten drei Tage für eine bestimmte Jährlichkeit zu verwenden und diesen Wert als Funktion der Höhenlage und der Hangneigung im Anrissgebiet zu korrigieren. Für Westösterreich wurde von Leichtfried (2010) eine Karte zur lokalen Bestimmung des Höhenzuschlages entwickelt. Für die übrigen Gebiete wird üblicherweise eine Zunahme von 5cm/100m als Basiswert unterstellt. Aufgrund der verstärkt eingesetzten 2D-Simulationen muss besonders der Abgrenzung der Anbruchgebiete eine hohe Bedeutung zugesprochen werden, die den Ablauf der Simulationen maßgeblich beeinflussen. Durch die Bildung mehrerer Anbruchszenarien können im Modell verschiedene Varianten studiert werden und der Einfluss der unterschiedlichen Lawinenmassen abgeklärt werden. Der Umgang mit Kleinlawinen kann aus Granig & Sauer Moser (2009) entnommen werden. Die Nachrechnungen von Lawinenereignissen unterstreichen die Notwendigkeit des Einsatzes der zusätzlichen Schneeaufnahme entlang der Sturzbahn. Als plausibler Wert können – abhängig vom jeweiligen Lawinenmodell – 30cm Entrainment angegeben werden. Die entsprechenden Reibungswerte für Lawinen und die einzelnen Simulationsparameter können den jeweiligen Anwendungsrichtlinien und Modellhandbüchern entnommen werden.

Als topographische Berechnungsgrundlage dienen Karten, Orthophotos und digitale Geländemodelle, die in Österreich mittlerweile zu 99% aus luftgestützten („airborne“) Laserscanner Auswertungen generiert werden. Als Berechnungsgrundlage für mehrdimensionale Lawinenmodelle dienen die digitalen 3D-Geländemodelle (DGM). Luftgestützte Laserscanner ermöglichen hochauflösende DGM in einer Größenordnung

von zumeist statistisch einem Datenpunkt pro Quadratmeter, die in der Anwendung für die Zwecke der Simulationen auf eine Rasterweite von 5m ausgedünnt werden. Eine höhere Auflösung (<5m) ermöglicht keine signifikante Steigerung der Qualität der Simulationen.

Lawinenmodelle im Überblick: Einteilung und Klassifizierung

Ein systematischer Überblick über die Entwicklungen im Bereich der Lawinensimulationen wird am aktuellen Stand von Granig und Margreth in Abbildung 1 gegeben. Diese Klassifizierung beinhaltet die in Europa gebräuchlichsten Lawinenmodelle. Die Berechnungsmodelle können demnach in statistisch-topographische und physikalisch-dynamische Modelle eingeteilt werden. Je nach Lawinentypus gibt es eigene Modelle z.B. für Fließ- oder Staublavin.

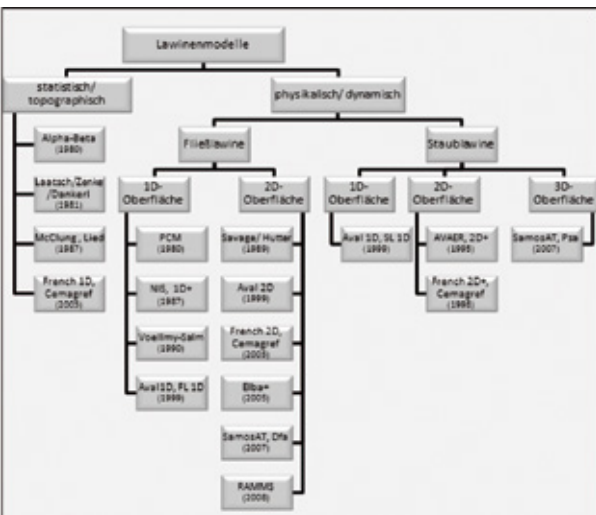


Abb. 1: Übersicht und Klassifizierung der gebräuchlichen Lawinenmodelle (Einteilung je nach Prozesstypus und Dimensionalität bezogen auf die jeweilige Berechnungsplattform (Quelle: Granig & Margreth, in Rudolf-Miklau & Sauer Moser (2011)).

Fig. 1: Overview of the common simulation tools (classification depending on the process type and the dimensioning of the calculation platform (Source: Granig & Margreth in Rudolf-Miklau & Sauer Moser (2011)).

In der Gruppe der statistisch-topographischen Modelle ist das von Lied & Bakkehoi (1980) veröffentlichte „Alpha-Beta-Modell“, eine statistische Methode zur Berechnung von Lawinauslaufstrecken, anzuführen. Dieses Modell wurde 1995 von Lied et al. für den Alpenraum adaptiert und ist heute vor allem für einfache, rasche Abschätzungen von Auslaufstrecken im Einsatz.

Ein großer Teil der physikalisch-dynamischen Modelle geht auf das „Voellmy-Fluid“-Stoffgesetz, welches auf einer Kombination des Chezy-Reibungsterms mit der trockenen Reibung von Coulomb beruht (Voellmy, 1955), zurück. Zu den Folgeentwicklungen zählen das „Voellmy-Salm-Modell“ (Salm et al., 1990), das Massenschwerpunktmodell nach Perla et al. (1980), genannt „PCM-Modell“, welches Lawinen als ein eindimensionales granulares Kontinuum darstellt, ebenso das numerische Lawinenmodell „Aval-1D“, das bei den Praktikern in vielen Ländern breite Anwendung fand und nun schrittweise durch das neue 2D-Modell RAMMS ersetzt wird. Am Schnee- und Lawinenforschungsinstitut SLF in Davos wurde seit 2005 das numerische Berechnungsprogramm RAMMS entwickelt (siehe Beitrag in diesem Heft), bei dem neben Lawinen auch Murgänge und Steinschlag auf digitalen Topographien berechnet werden können (Christen et al., 2008). Das Programm wurde im Besonderen anhand der lawindynamischen Daten der Testanlage von Vallée de la Sionne (VdS) kalibriert. Auch das zweidimensionale Simulationsmodell „Elba“ (aktuell: Elba+) (Volk, 2005) geht auf den Ansatz von Voellmy zurück, weist aber den Vorteil auf, dass kein spezifischer Lawinenpfad vordefiniert werden muss, sondern die Berechnung auf einer dreidimensionalen digitalen Geländeoberfläche erfolgt. In Österreich wurde nach der Lawinenkatastrophe 1999 die Entwicklung eines dynamischen 3D-Lawinenmodells „Samos(99)“ stark gefördert, das sowohl Fließ- als auch Staublavin

berechnen kann. Seit dem Jahr 2008 ist die Weiterentwicklung „SamosAT“ (Sampl, 2007; Oberndorfer, Granig, 2007) verfügbar. Im Jahr 2010 wurde ein zusätzliches Suspensionsmodell für SamosAT kalibriert und eingeführt. Die laufenden Entwicklungen und Erkenntnisse, sowohl aus dem wissenschaftlichen als auch aus dem angewandten Bereich, werden im Rahmen von Optimierungen in das Berechnungswerkzeug integriert.

Erläuterungen zu den Lawinenmodellen

Das **Alpha-Beta-Modell** wurde von Lied & Bakkehoi (1980) ursprünglich am Norwegischen Geotechnischen Institut (NGI) in Oslo entwickelt um anhand von leicht messbaren und objektiv verifizierbaren Kriterien zu einer kalkulierten Auslaufstrecke zu gelangen. Eine Reihe von gut bekannten Lawinauslaufstrecken wurde statistisch analysiert. Mittels multipler Regressionsanalysen

konnten schließlich vier topographische Parameter bestimmt werden, die für die Bestimmung der maximalen Auslaufstrecke (ausgedrückt durch den Winkel α) entscheidend sind. Die vier topographischen Parameter – die vertikale Fallhöhe H , die Neigung des Anrissgebietes ψ , die durchschnittliche Neigung der Sturzbahn β und das Längsprofil als Ausgleichsgerade, ausgedrückt durch die 2. Ableitung y'' – beziehen sich ausschließlich auf das Längsprofil der Lawinenbahn (Abbildung 2). Die durchschnittliche Neigung der Sturzbahn β kristallisierte sich als der dominierende Faktor der Berechnungsformel heraus. Somit konnte eine statistisch abgesicherte Formel mit nur zwei Parametern aufgestellt werden.

Die Adaption des Modells für die Alpen erfolgte auf Basis der Auswertung von 80 bekannten, maximalen Auslaufstrecken in Österreich nach Lied et al. (1995). Die 2-Parameter-Gleichung wurde mittels Regressionsanalyse für rasche,

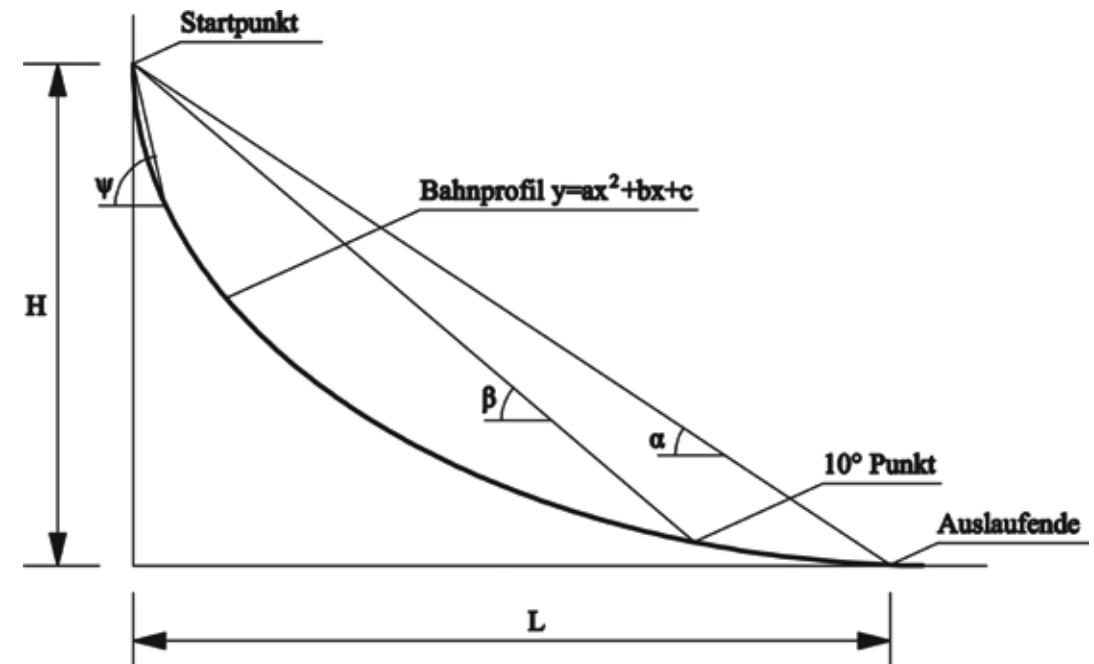


Abb. 2: Schema der Lawinenparameter des Alpha-Beta-Modells im Längsschnitt (Quelle: SSL).

Fig. 2: The schematic profile displays the avalanche parameters of the alpha beta model (Source: SSL).

grobe Abschätzungen von großen Fließlawinen, bzw. Fließlawinen mit Staubanteil, ermittelt. Zur Verbesserung der Handhabbarkeit wurde von Granig und Luxner (2006) das Modell auf eine einfache Berechnungsplattform gestellt. Die Neuerungen im „Alpha-Beta-Modell06“ bestehen in der raschen Anwendbarkeit und in der Entwicklung einer Matrix zur Ermittlung der entsprechenden Standardabweichung aufgrund von nachvollziehbaren, topologischen und klimatischen Faktoren. Im Rahmen eines Updates „Alpha-Beta-Modell06“ wurden zusätzliche Regressionsgeraden und Adaptierungsmöglichkeiten eingeführt. Das aktuelle Modell eignet sich für Lawinenbahnen mit in etwa parabelförmiger Sturzbahn um in einer ersten Annäherung die potentielle maximale Auslauflänge für Fließlawinen ggf. mit Staubanteil zu ermitteln.

Das 2D-Modell **Elba+** ist ein rasterbasiertes, numerisches Lawinensimulationsmodell. Elba+ ist ein Berechnungsmodul, das in eine GIS-Oberfläche integriert wurde, um Dateneingabe und Ausgabe rasch und übersichtlich bearbeiten zu können (Abbildung 3).

Das Modell baut auf dem Voellmy-Fluid, das durch die trockene (μ) und die turbulente (ξ) Reibung charakterisiert wird, auf. Die Modellgleichungen werden numerisch mit einem vorwärts gerichteten, expliziten Finite-Differenzen-Schema über einem Raster mit konstanter Zellengröße (5 x 5m) gelöst. Das Modell erlaubt auch eine vereinfachte Beschreibung des Snow-Entrainments entlang der Sturzbahn (Volk, 2005).

Der turbulente Reibungsbeiwert ξ hängt vorwiegend von der Geometrie der Gleitfläche ab und wird über ein logarithmisches Gesetz (Keule-

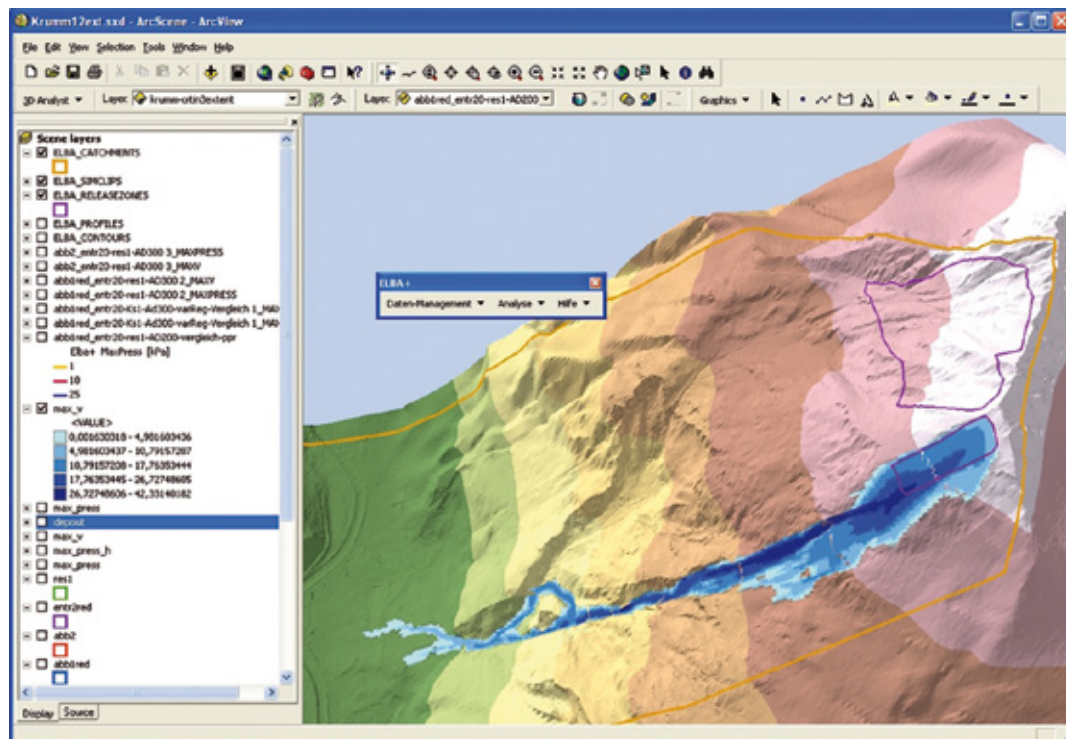


Abb. 3: Berechnungsoberfläche Elba+ (Quelle: SSL).

Fig. 3: Calculation platform Elba+ (Source: SSL).

gan-Relation) für jede Rasterzelle neu berechnet. In dieser Gleichung wird nach Volk (2005) eine Rauigkeitslänge (k_s) und die Fließhöhe zu einer relativen Rauigkeit in Beziehung gesetzt. Durch die Einführung der Keulegan-Relation entfällt die Bestimmung des Parameters ξ . Damit verbleibt die Festlegung der trockenen Reibung (μ) und der Normalbeschleunigung, die wiederum von der Hangneigung und der Zentrifugalbeschleunigung abhängt. Der Wert μ wurde in Elba+ für das Reibungsmodell „Variables Fließregime“ anhand einer Reihe von Referenzlawinen des Lawinenwinters von 1999 kalibriert, wobei für die Lawinenabbruch- und Ablagerungsphasen Mohr-Coulomb'sche Reibung und für die Sturzphase ein Voellmy-Fluid mit unterschiedlichen Reibungswinkeln vorgeschlagen wird. Die Übergangsphasen werden interpoliert.

Das Programm zeichnet sich durch die Sensitivität auf die feinen Geländestrukturen aus. Nach langjähriger und intensiver Anwendung für die zentralalpiner Hochtäler kann jedoch festgestellt werden, dass die Auslauflängen knapp ausfallen können. Daher wird in diesen Fällen empfohlen, die Ergebnisse in besonders kritischen Fällen anhand von Vergleichsrechnungen mit ähnlichen Modellen zu überprüfen. Ein Check der Fließhöhen gibt rasch Aufschluss über die Plausibilität der Druckwerte, um im Auslaufbereich - vor allem im Grenzneigungsbereich (10°) - ein unrealistisches „Ausrinnen“ mit Fließhöhen unter 1m erkennen zu können. Untersuchungen der Lawinengeschwindigkeiten mit Elba+ wurden von Jörg et al. (2012) ausgeführt. Diese ergaben leicht geringere Werte als die Messung in der Sturzbahn und eine bessere Übereinstimmung im Auslauf. Hinsichtlich weiterführender Informationen wird auf die Anwenderrichtlinien von Elba+ (2006) der Stabstelle Schnee und Lawinen (WLV) verwiesen.

Das zweidimensionale Fließlawinenberechnungsmodell **RAMMS** ist eine direkte Weiter-

entwicklung des eindimensionalen numerischen Modells Aval-1D und wird seit 2010 kommerziell angeboten. Der Geschwindigkeitsvektor wird im dreidimensionalen Gelände in zwei Richtungen berechnet und folglich die Fließrichtung und Fließbreite durch das Modell bestimmt (Abbildung 4). Die Generierung des Berechnungsgitters erfolgt aus einem digitalen Geländemodell.

Das Modell basiert auf der Annahme, dass sich im Lawinenkörper keine internen Deformationen ereignen. Die Reibungskräfte wirken hauptsächlich in einer Gleitschicht, die sich zwischen der Lawine und dem Untergrund befindet. Die Reibungsparameter μ und ξ beschreiben den Anteil der trockenen Reibung von Coulomb bzw. den geschwindigkeitsabhängigen Reibungswiderstand, beide Reibungswiderstände sind abhängig von der Größe der Lawine. Der basale Widerstand ist – gleich wie beim Voellmy-Salm-Modell – durch einen Coulomb-Reibungsterm proportional zur Normalkraft und einem turbulenten Reibungsterm proportional zum Geschwindigkeitsquadrat gegeben. Ein Finite-Volumen-Verfahren löst das mit den Flachwassergleichungen verwandte System im komplexen Gelände. Das Modell ist an das GIS-System GRASS gekoppelt, um die Bestimmung gewisser Eingabeparameter (Anrissgebiete und Reibungsparameter) mit Hilfe von automatischen Verfahren zu vereinfachen (Christen et al., 2008).

RAMMS wurde anhand von vielen beobachteten Großlawinen vom Lawinenwinter 1999 kalibriert, ebenso anhand von Lawinen aus der SLF-Lawinendatenbank sowie aus dem Lawinenversuchsgelände Vallée de la Sionne (Wallis/Schweiz). Für die Visualisierung der Eingabegrößen und Resultate können georeferenzierte Karten oder Luftbilder als Texturdaten eingelesen und auf der Topographie abgebildet werden (Christen et al., 2010).

Es hat sich gezeigt, dass die Festlegung der Lage und Größe eines Anrissgebietes im Vergleich

zum Voellmy-Salm-Modell oder Aval-1D von größerer Bedeutung ist. Die schwierige Bestimmung der Lawinenbreiten fällt durch den 2D-Berechnungsvorgang weg. Diese Eingabe gestaltete sich manchmal schwierig und beeinflusste die Auslauflänge der berechneten Lawine signifikant.

Das Modell bewährt sich vor allem bei großen Lawinen im zentralalpinen Raum. Aufgrund der Kalibrierung anhand der dynamischen Lawinengeschwindigkeiten eine hohe Plausibilität zugeordnet. Ein kritischer Blick über die Ergebnisse ist wie bei allen Modellen dennoch nötig, ggf. muss – basierend auf Erfahrungswerten – gutachterlich in die Ausgabe eingegriffen, bzw. mit geänderten Eingabedaten neu simuliert werden. Im Rahmen der Ergebnisinterpretation muss beachtet werden, dass generell in der wissenschaftlichen Betrachtungsweise von der klaren Trennung zwischen Fließ- und Staublawinen abgegangen wird, hin zur Beschreibung des „Fluidised Layers“ als

dichtere Mischform einer Lawine. Die Betrachtungsweise in RAMMS geht in diese Richtung.

Das Modell **SamosAT** (Abbildung 5) wurde anhand von 22 Referenzlawinen kalibriert und wird seit 2008 in der Wildbach und Lawinenverbauung in Österreich als Nachfolgemodell von Samos99, darüber hinaus auch in Island (Gislason, 2009) sowie im Rahmen von Expertisen auch in Südtirol und Russland eingesetzt.

Der Modellansatz von Savage und Hutter (1991) wurde im Modell SamosAT überarbeitet und entspricht einem erweiterten Voellmy-Ansatz mit variablen Reibungsbeiwerten μ und ξ unter Beachtung des Flachwasser-Ansatzes (Sampl, 2007). Das Reibungsmodell für Fließlawinenberechnungen wurde sowohl von Fließgeschwindigkeiten als auch von Fließhöhen abhängig gemacht. Dadurch wird einerseits eine stärkere Bremsung im Auslauf und andererseits ein geringeres Nachfließen erreicht.

Der modellhafte Aufbau einer Staublawi-

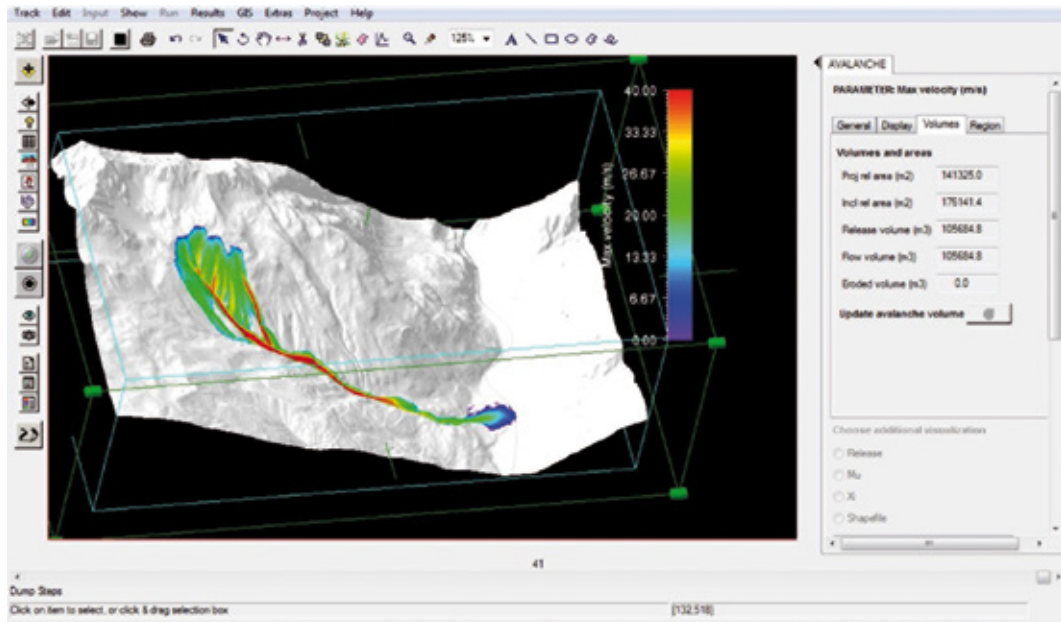


Abb. 4: Eingabeoberfläche RAMMS (Quelle: SSL).

Fig. 4: Calculation platform RAMMS (Source: SSL).

ne (Mischlawine) besteht nach Sampl (2007) aus einer Fließschicht, die über die Geländeoberfläche abgleitet. Der Fließzustand ohne nennenswerte zwischengelagerte Luftanteile wird als Fließlawine bezeichnet (Volumensanteil < 1:10). Die mittlere Dichte einer solchen Strömung beträgt im Mittel ca. 300kg/m³. An die Fließschicht schließt sich die als sehr dünn zu betrachtende Resuspensionsschicht an. Darüber kann sich eine Staubschicht entwickeln, welche in ihrer Ausdehnung die zuvor angeführten Schichten bei weitem übertreffen kann.

Eine Staublawine wird im Modell wie eine turbulente, partikelbeladene Gasströmung mit kleinem Geschwindigkeitsunterschied zwischen Partikel und Luft behandelt. Die Berech-

nung des Staubanteils erfolgt in SamosAT in der AVL-FIRE© Berechnungsplattform, die über das Resuspensionsmodell mit dem Fließanteil als Randbedingung gekoppelt wird (Sampl, 2007).

SamosAT ermöglicht eine echte Zweiphasen-Berechnung der Eispartikel und der Luftschichten, um die gasdynamischen Prozesse realistischer darstellen zu können. Neben dem Massenzuwachs ermöglicht diese Methode auch den Massenverlust durch Sedimentation entlang der Lawinensturzbahn. Somit kann dieser Massenverlust auch zu einer Verzögerung der Lawine führen, insbesondere an starken Knickungen und Biegungen. Das Berechnungsgitter muss in Lawinen-Stoßrichtung entsprechend groß ausgelegt werden, damit die bremsende Wirkung der

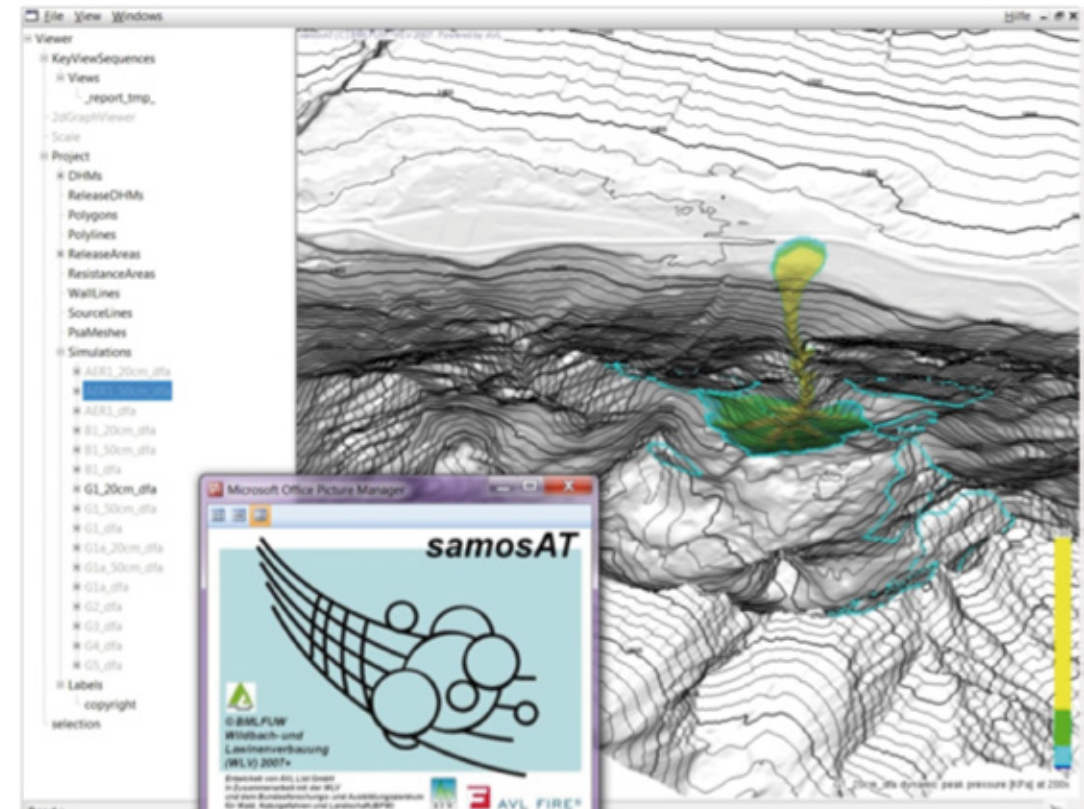


Abb. 5: Eingabeoberfläche SamosAT (Quelle: SSL).

Fig. 5: Calculation platform SamosAT (Source: SSL).

zu verdrängenden Luft auch im Auslaufbereich ausreichend berücksichtigt wird.

Seit dem ursprünglichen Release der Software 2007 wurden eine Reihe von zusätzlichen Features eingebaut. Es wurden verschiedene Arten des Entrainments integriert, an deren Verwendung aktuell intensiv gearbeitet wird. Die Nachrechnungen von bekannten Ereignissen verdeutlichen die Notwendigkeit dieser Maßnahme immer wieder. Beispielweise wird an einem neuen Anwendungsprozess wie z.B. dem „Mountain Snow Cover“ gearbeitet (Fischer et al., 2012), da die Lawinestartmasse dadurch enorm vergrößert wird. Kleinere Maßnahmen konnten auf der technischen Seite der Oberfläche integriert werden, wie die Berücksichtigung von Vorlawinen im DGM, wobei der Einfluss nur sehr gering ist, aber auch das Ausdünnen von großen Datensätzen aus hochgenauen Laserdaten auf einen verwendbaren 5m Raster um das Handling zu verbessern.

Schlussfolgerungen

Aufgrund der Unsicherheiten, sowohl bei den Eingangsdaten als auch in den Modellrechnungen selbst, wird empfohlen, in der Lawinensimulation mit Bandbreiten zu arbeiten. Dies kann sowohl durch verschiedene Anbruchszszenarien, als auch durch zusätzliche Simulationen mit und ohne Entrainment, bzw. mit geänderten Reibungsparametern, wie z.B. für Waldbereiche, erreicht werden. Jedes verfügbare Modell weist Stärken und Schwächen auf, die es auszuloten und in Folge in der Interpretation zu berücksichtigen gilt. Die Anwendungsbereiche und Grenzen der Modellierung wurden bereits detailliert in Rudolf-Miklau und Sauer Moser (2011) und Granig und Sauer Moser (2009) beschrieben.

Die numerische Modellierung ist eine wertvolle Unterstützung in der Planung von Lawinenschutzmaßnahmen, kann jedoch die

Aufnahmen und Einschätzungen vor Ort, die Interpretation der Chronik, Stummen Zeugen, Geländeuntersuchungen und die Befragung der ansässigen Bevölkerung nicht ersetzen. Je mehr Informationen über ein Einzugsgebiet verfügbar sind, desto größer wird im Allgemeinen die Aussagekraft und Qualität der Berechnungen. Wichtig ist, dass der Modellanwender das mögliche Prozessausmaß unabhängig von Berechnungen realistisch abschätzen kann und so zur Validierung der Ergebnisse in der Lage ist.

Anschrift des Verfassers / Author's address:

DI. Matthias Granig
Wildbach- und Lawinenverbauung
Stabstelle Schnee und Lawinen
Swarovskistraße 22a
6130 Schwaz
matthias.granig@die-wildbach.at

Literatur / References:

- CHRISTEN M., BÜHLER Y., BARTELT P., SCHUMACHER L. (2010): RAMMS Rapid mass movements User manual, WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos.
- CHRISTEN M., BARTELT P., KOWALSKI J. (2008): Calculation of dense Snow Avalanches in three-dimensional Terrain with the numerical Simulation Program RAMMS. WSL Institut for Snow and Avalanche Research, SLF, Department of Avalanches, Debris Flows and Rockfalls. ISSW, Whistler.
- FISCHER JT, GRANIG M., JÖRG P. (2012): Snow entrainment in applied avalanche modeling using SamosAT, EGU General Assembly 2012, Vol. 14, Vienna.
- GISLASON E., JOHANNESSON T. (2007): Calibration of the SamosAT 2D avalanche model for large Icelandic dry-snow avalanches. Reykjavik, Vedustofa Islands. Report 07006. 17pp.
- GRANIG M., SAUERMOSE S. (2009): Ein Erfahrungsbericht über die Lawinenmodellierung aus der aktuellen praktischen Arbeit der WLV. Wildbach und Lawinenverbau, 73. Jg., Heft Nr. 163, 142-151.
- GRANIG M. (2006): Handbuch Alpha-Beta-Modell06. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung. Stabstelle Schnee und Lawinen, Schwaz.

JÖRG P., GRANIG M., BÜHLER Y., SCHREIBER H. (2012): Comparison of measured and simulated snow avalanche velocities, 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Grenoble.

LEICHTFRIED A. (2010): Bestimmung der extremen Schneehöhen für die Stützverbauung in Anbruchgebieten von Lawinen für Tirol und Voralberg. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG Innsbruck.

LIED K., HOPF J., BAKKEHOI S., WEILER C. (1995): Calculation methods for avalanche run-out distance for the Austrian Alps, Norwegian Geotechnical Institute NGI Publication 581210.3, Oslo.

LIED, K. AND BAKKEHOI, S. (1980): Empirical calculations of snow-avalanche run out distance based on topographic parameters. Journal of Glaciology, 26:165-177.

OBERNDORFER S., GRANIG M. (2007): Modellkalibrierung des Lawinensimulationsmodells SamosAT. WLV, Stabstelle Schnee und Lawinen, Schwaz.

PERLA R., CHENG T. T., MCCLUNG, D. (1980): A two parameter model of snow avalanche motion. Journal of Glaciology, 26, Nr. 94, 197-202.

RUDOLF-MIKLAU F., SAUERMOSE S. (2011): Handbuch Technischer Lawinenschutz, 1. Auflage, Ernst & Sohn GmbH & Co.KG, Berlin.

SALM B., BURKHARD A., GUBLER H. U. (1990): Berechnung von Fliesslawinen: Eine Anleitung für Praktiker; mit Beispielen. Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 47:1-37.

SAMPL P. (2007): „SamosAT – Modelltheorie und Numerik“. AVL List GmbH, Graz.

SAVAGE S. B., HUTTER, K. (1991): The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis, Acta Mechanica 86, 201-223

VOELLMY A. (1955): Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizer Bauzeitung, 73. Jg.

VOLK G. (2005): Handbuch ELBA+. NiT Technisches Büro GmbH, Pressbaum.

PRIV. DOZ. DIPL.-ING. DR. TECHN.
ROBERT HOFMANN
UNIVERSITÄTSDOZENT AM INSTITUT FÜR GEOTECHNIK
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT WIEN



ZIVILTECHNIKER
INGENIEURKONSULENT FÜR BAUWESEN

A-2380 PERCHTOLDSDORF, HOCHSTRASSE 17/2, TEL.: 01 86 58 943, 0664 13 21 649, hofmann.geotechnik@aon.at

**GEOTECHNIK UND NATURGEFAHREN
SCHUTZBAUWERKE
GEOTECHNISCHE GUTACHTEN
BERATUNG
PLANUNG
LABOR- UND FELDVERSUCHE
ERDSTATISCHE BERECHNUNGEN
GEOTECHNISCHE MESSUNGEN
GRUNDBAU**

DI Werner Tiwald ZT-Ges.m.b.H.

Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Werner Tiwald

staatl. befugter u. besiederter Ing.-Kons. für Forst- u. Holzwirtschaft, Wildbach- u. Lawinenverbauung

allg. beed. u. gerichtlich zertifiz. Sachverständiger

A-3223 Annaberg bei Mariazell, Langseitenrotte 19

A-6020 Innsbruck, Saurweinweg 5

Tel. +43 2728 20404

Fax +43 2728 20408

Mobil +43 664 2047240

E-Mail: buero@tiwald.at

Web: www.tiwald.at

alpin.consulting

Planung – GZPs – Simulation – Ausschreibung – Bauleitung – Gutachten – Sicherheitsanalysen

SANDRA MELZNER, ALEXANDER PREH

Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis

Runout Models for Rockfalls and Rock Avalanches and its Use for Decision Making Issues

Zusammenfassung:

In der Praxis stellt die Abgrenzung potentieller Wirkungsbereiche von Sturzprozessen mittels Reichweitenmodellen einen sehr wichtigen Teil einer Gefährdungsanalyse dar. Für die Simulation der Reichweite und/oder der Sturzbahnen (Trajektorien) potentieller Sturzprozesse stehen unterschiedlichste Methoden zur Verfügung, die von einfachen empirischen Ansätzen bis hin zu komplexen Berechnungsansätzen reichen. Zu dem derzeitigen Stand der Forschung hat sich noch kein Sturzmodell herauskristallisiert, welches ohne Einschränkungen universell für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden kann. Erfahrungen in der Anwendung mehrerer Modelle, sowie Modellierungserfahrung in unterschiedlichen Landschaftsräumen und die Entwicklung quantitativer Validierungsmethoden sind notwendig, um realistischere Aussagen über die Anwendbarkeit eines Modells auf unterschiedliche Fragestellungen treffen zu können.

Stichwörter:

Sturzprozesse, Steinschlag, Massensturz, Sturzmodelle, Gefahrenbewertung

Abstract:

To identify potentially hazardous rockfall areas, it is not only necessary to evaluate unstable rockblocks/rock masses, but also to estimate the trajectories of possible future rockfall events. Various approaches exist to simulate rockfall runout distances and/or rockfall kinematics, ranging from simple empirical models to complex process-based models. On the current status of research, no model can be used without limitations for different applications. Thus, experiences with different models but as well experiences in various landscapes and the development of quantitative validation methods are essential, when it comes to the implementation of those techniques into land planning decision making issues.

Keywords:

rockfall, rock avalanche, runout modell, hazard assessment

Einleitung

In vielen gebirgigen Regionen weltweit sind Sturzprozesse eine sehr häufig auftretende Prozessgruppe, die Siedlungsräume, Verkehrswege und andere Infrastrukturen gefährden (Abb. 1). Sturzprozesse lassen sich in Einzelabstürze (Steinschlag/Blockschlag) und Massenstürze (Felssturz/Bergsturz) untergliedern. Das wesentliche Unterscheidungskriterium zwischen einem Einzelabsturz und einem Massensturz ist, dass sich beim Massensturz eine zusammenhängende Felsmasse



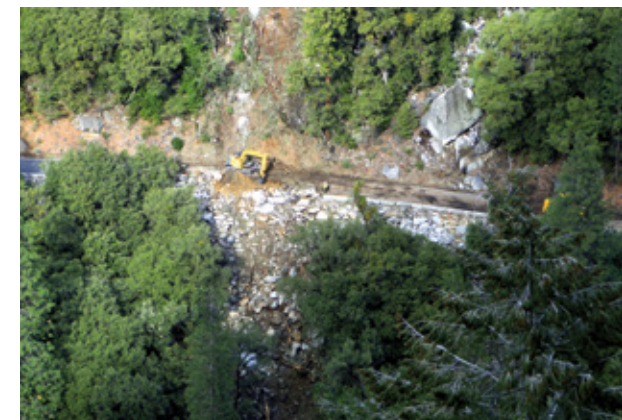
Abb. 1: Straßenschaden aufgrund eines einzelnen Sturzblockes (6m^3) eines kleinen Felssturzereignisses (1a) am 5. März 2012; Schäden infolge des Einzelabsturzes eines kompetenten Blocks von 250m^3 am 22.1. 2012 (Melzner, 2012) (1b).

Fig. 1: Boulder (6m^3) of large volume rockfall damaged road (1a) on March, 5th 2012; rockfall boulder (250m^3) destroyed road (1b) on January 22nd 2012.

abfällt, die im Laufe des Ablöse- und Sturzprozesses in zahlreiche Blöcke desintegriert wird. Bei größeren Felsstürzen und Bergstürzen beeinflusst dabei die Interaktion der Blöcke sowie das Zerbrechen der Blöcke infolge eines Aufschlages maßgeblich die Bewegung der Sturzmasse hinsichtlich ihrer Ausbreitung.

Ein wesentlicher Teil einer Gefährdungsanalyse von Sturzprozessen stellt – neben der ingenieurgeologischen Analyse der Disposition der Felswände (für Details vgl.: Melzner et al., 2008; Melzner et al., 2012; Poisel, Preh & Hofmann, 2011) – die Abgrenzung potentieller Wirkungsbereiche mittels Reichweitenmodellen dar (Abb. 2).

Für die Simulation der Reichweite und/oder der Sturzbahnen (Trajektorien) potentieller Sturzprozesse stehen unterschiedlichste Methoden zur Verfügung, die von einfachen empirischen Ansätzen bis hin zu dreidimensionalen Prozessmodellen reichen. Bedeutende Unterschiede zwischen den Modellen resultieren vorwiegend aus der Verwendung voneinander abweichender Berechnungsansätzen, die zwangsläufig in einer sehr unterschiedlichen Anzahl/Art von Eingangsparametern und Anzahl/Art von Simulationsergebnissen resultiert.



Methoden für die Bestimmung des Wirkungsbereichs von Sturzprozessen

Die Sturzbahn und die Ablagerungsposition eines/ einer Sturzblockes/-masse sind weitestgehend abhängig von der Position des Ablösebereichs, der Versagensmechanismen und der Geometrie und mechanischen Eigenschaften vom Hang aber auch von dem/der Sturzblock/-masse (Abb. 2).

Nach dem derzeitigen Stand der Forschung gibt es kein Modell, das sowohl die Versagensmechanismen von Talflanken und Felswänden als auch den danach potentiell auftretenden

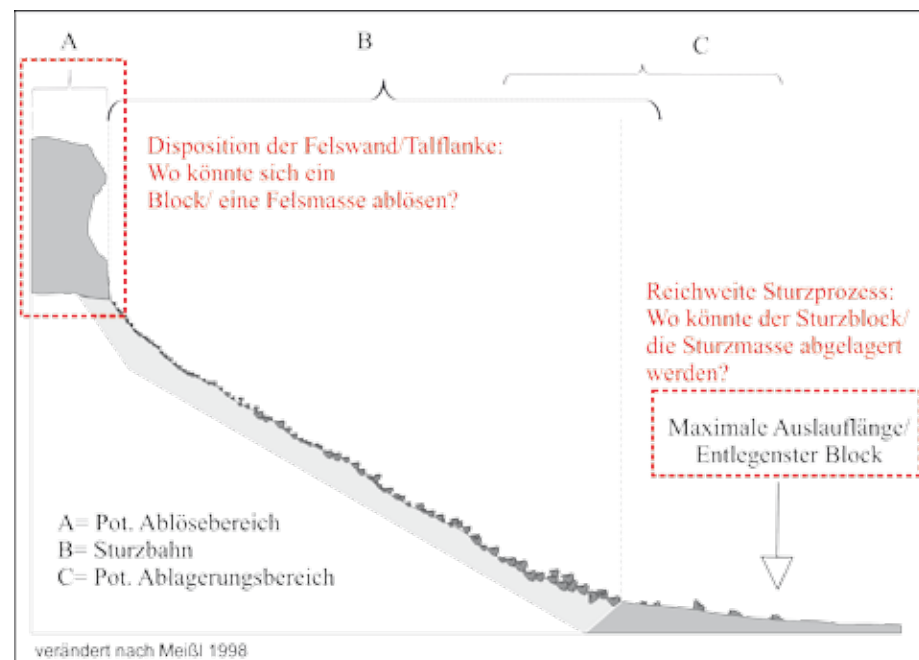


Abb. 2: Die Verknüpfung der Dispositionsanalyse der Felswände mit der Simulation der Kinematik und Reichweite des Sturzprozesses ist ein wichtiges Element der Gefahrenbewertung von Sturzprozessen. (Melzner, 2012).

Fig. 2: The combination of onset susceptibility with runout susceptibility analysis is a very important part of a rockfall hazard assessment.

Sturzprozess in einem Rechengang simulieren kann. Die meisten der Modelle berücksichtigen lediglich die Position des Ablösebereichs und die Kubatur/Form des Sturzblockes/-masse.

Empirische Ansätze oder **analytischen Modelle** stellen einfache und zeitextensive Methoden für die Ausweisung relativer maximaler Reichweiten von Sturzprozessen dar (Abb. 3) (vgl. dazu Heim, 1932; Hungr & Evans, 1988; Meißl, 1998; Sassa, 1988; Scheidegger, 1973; Dorren, 2003; Volkwein et al., 2011; Melzner et al., 2012). Diese Methoden beruhen auf einfachen geometrischen Annahmen bzw. Algorithmen, sodass der Anwender bei den meisten dieser Ansätze sehr wenig Eingangsparameter benötigt.

Mit Hilfe **komplexer Prozessmodelle** kann im Gegensatz zu den empirischen Ansätzen die Kinematik eines Sturzprozesses/einer Sturzmasse (z.B. Energien, Sprunghöhen etc.) berechnet werden. Bei Modellen für Massenstürze hat

die interne Deformation der Sturzmasse während des Prozesses einen maßgeblich Einfluss auf ihre Ausbreitung. Die seitliche Ausbreitung und der Energieverlust infolge der internen Deformation der Masse können mit komplexen numerischen Modellen abgeschätzt werden. Bei den Modellen für Einzelabstürze werden die Sturzblöcke zu meist als starrer Körper betrachtet und die Sturzbahn analytisch berechnet.

Modelle für die Simulation von Einzelabstürzen (Stein-/Blockschlag)

Die **analytischen Prozessmodelle** für Einzelabstürze werden in 2D- und 3D-Modellen unterschieden. Mittels **2D-Modellen** kann entlang eines Hangprofils (Bemessungsprofils) die Kinematik eines Sturzblockes berechnet werden. Die Simulationsergebnisse (z.B. Energien und Sprunghöhen) werden meistens für die Planung und Di-

mensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (Netze, Dämme) auf der Hangskala verwendet. 2D-Modelle können jedoch auch für die Ausweisung von Gefahrenzonen für größere Hangabschnitte (lokale Hangskala) eingesetzt werden, indem mehrere repräsentative Hangprofile ausgewählt werden und die Simulationsergebnisse (z.B. Energien) von diesen Hangquerschnitten mittels Expertenwissen interpoliert werden. Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Modelltyps ergeben sich vorwiegend bei der Festlegung des repräsentativen Hangprofils bzw. des adäquaten Abstands von mehreren Hangprofilen zueinander. Hingegen erweist sich die zeitextensive Datenerhebung und Datenaufbereitung der relevanten Modellparameter und Durchführung der Simulationen mittels übersichtlicher Benutzeroberflächen bei 2D-Modellen als sehr anwenderfreundlich.

Mit **3D-Modellen** werden die Trajekturen von Sturzprozessen räumlich berechnet. Flächendeckende Aussagen über potentielle Wirkungsbereiche von Sturzereignissen sind daher möglich und die Interpolation von Simulationsergebnissen auf Basis von Expertenwissen ist hinfällig. Somit ist der große Vorteil in der Anwendung dieser Methodik gegenüber den 2D-Ansätzen die Fähigkeit, die Komplexität des Sturzprozesses besonders im Hinblick auf 3D-Effekte der Topographie (z.B. seitliche Ablenkung zum steilsten Gefälle) bei der Abgrenzung potentieller gefährdeter Bereiche miteinzubeziehen. Nachteilig bei der Anwendung von 3D-Modellen ist zum einen der erhöhte Aufwand für die flächendeckende Datenerhebung und -aufbereitung und zum anderen die Berechnungsdauer, die je nach Modellauflösung bzw. dem Modell zugrunde gelegten Algorithmen sehr hoch sein kann. Die Anwender dieser Modelle benötigen fundierte Kenntnisse von GIS-Systemen, um die erforderlichen Eingabedaten des Modells für die Simulation vorbereiten zu können. Erschwerend kommt hinzu, dass im Gegen-

satz zu den 2D-Modellen nur wenige 3D-Modelle bisher auf dem Markt erhältlich sind (z.B. PIR 3D, Rockfall Analyst, Rockyfor3D), sodass auf Grund deren Komplexität die Simulation oftmals an den Softwarehersteller vergeben werden muss.

Ein weiteres signifikantes Unterscheidungskriterium zwischen den unterschiedlichen Prozessmodellen ist der Berechnungsansatz (Implementierung des Blocks, Art der Dämpfung und des Rollwiderstands). Bei einigen Modellen wird der Block als form- und dimensionsloser Massenpunkt („lumped mass approach“) dargestellt; im Gegensatz dazu wird bei einer anderen Modellgruppe der Block als unverformbarer Körper („rigid body approach“) betrachtet. Eine Mischform zwischen diesen beiden Ansätzen stellt der sogenannte „hybrid approach“ dar, bei dem ein dimensionsloser Block für die Simulation des freien Falls/ der Flugbahn, für den Aufprall und Rückprall jedoch ein starrer Block mit geometrischer Form angenommen wird. Weitere wesentliche Unterschiede ergeben sich bei den Modellen beispielsweise in der Art, wie wichtige Hangparameter (z.B. Rauigkeit, Dämpfungseigenschaften) in das Modell integriert werden, ob und wie der Effekt von Bäumen und sekundärer Schutzmaßnahmen auf den Sturzprozess berücksichtigt wird. Einige Modelle verwenden einen probabilistischen Ansatz, um die Unsicherheiten in der Qualität der Eingangsparameter besser zu berücksichtigen.

Tabellarische Auflistungen über existierende Software für die Modellierung des Steinschlagprozesses finden sich beispielsweise in den Publikationen von Guzzetti et al. (2002) und Volkwein et al. (2011).

Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsansätze unterscheiden sich die Prozessmodelle stark in der Art aber auch Anzahl der benötigten Eingangsparameter (Tabelle 1). So benötigen empirische Ansätze aufgrund der ein-

fachen geometrischen Beziehung sehr wenige Eingangsdaten, die Prozessmodelle hingegen aufgrund der komplexeren mathematischen Funktionen mehr Eingangsvariablen.

Die in Tabelle 1 beispielhaft aufgeführten Modelle unterscheiden sich auch deutlich

hinsichtlich der Anzahl und Art von Ausgabeparameter (Tabelle 2). Demnach können lediglich die Modellausgabe „maximale Reichweite“ (Geometrisches Gefälle) mit der Modellausgabe „Anzahl der Blockdurchgänge pro Rasterzelle“ (STONE & Rockyfor3D) verglichen werden. Für einen Ver-

	Geometrisches Gefälle	STONE (Guzzetti et al., 2002)	Rockyfor3D v. 4.0 (bèta) (Dorren, 2011)	Rockfall 7.1 (Dr. Spang GmbH)
DHM	JA	JA	JA	NEIN
Hangprofil	NEIN	NEIN	NEIN	JA
Abbruchbereich	JA	JA Startmatrix- Datei mit der Anzahl der Simulationen pro Zelle	JA Jede Startzelle mit Angabe zur Felsdichte (kg/m ³)	JA x/y- Koordinate +/- gewählte Bandbreite
Blockgröße	NEIN	NEIN „lumped mass approach“	JA „hybrid- approach“ Angaben über die Längen der 3 Blockachsen, zufällige Variation des Volumens ist möglich	JA „rigid body approach“ wird bestimmt aus Radius einer Kugel oder Radius und Höhe eines Zylinders, zufällige Variation des Volumens ist in Grenzen möglich.
Blockform	NEIN	NEIN „lumped mass approach“	JA „hybrid- approach“ (4 Blockformen)	JA „hybrid- approach“ (4 Blockformen)
Dämpfung	NEIN	JA Datei mit vertikaler Elastizitätsmatrix (Rn)	JA Untergrund-/ Bodentypen (7 Klassen)	JA Tangentiale Dämpfung die Rotation beeinflussend: Dt=0,75-1,0 Normale Dämpfung die Abprallhöhe beeinflussend: Dn=0,01-0,08%
Rauigkeit	NEIN	JA Datei mit horizontaler Elastizitätsmatrix (Rt)	JA Mittlere Höhe eines potentiellen Hindernisses normal zur Hangoberfläche (MOH)	JA Beschreibung über Wellenlängen - Amplitudenbeziehung

Tab. 1: Benötigten Eingangsparameter in Steinschlagmodellen (Auswahl) (Melzner et al., 2011)

Tab. 1: Required input parameters for a selection of rockfall models.

gleich von Rockyfor3D und Rockfall 7.1 müsste man das „50% Perzentil der maximalen Energie“ von Rockfall 7.1 mit den „mittleren Energie“ von

Rockyfor3D vergleichen. Desweiteren könnte die Modellausgabe „maximale Sprunghöhe“ für den Modellvergleich verwendet werden.

Geometrisches Gefälle (Heim 1932, Meißl 1998)	STONE (Guzzetti et al., 2002)	Rockyfor3D v. 4.0 (bèta) (Dorren, 2011)	Rockfall 7.1 (Dr. Spang GmbH)
Maximale Auslauflänge für jeden definierten geometrischen Winkel	Anzahl von Blockdurchgängen je Rasterzelle	Anzahl von Blockdurchgängen pro Rasterzelle	Anzahl von Blockdurchgängen über den Profilverlauf
	Maximal simulierte Geschwindigkeit je Rasterzelle (m/s)	Maximal simulierte Geschwindigkeit je Rasterzelle (m/s)	Statistische Geschwindigkeitsverteilung aller modellierten Blöcke an definierten Profilmittelpunkten (Kontrollquerschnitt und Bauwerk)
		Mittelwert der maximalen Energie (trans + rot, in kJ) aller Blöcke je Rasterzelle	Hüllkurve der maximalen Energie (Darstellung von frei wählbaren Perzentilen) → für jeden Abschnitt des Profils und in der Achse jeder Schutzmaßnahme die statistische Verteilung
		Das 95 % Vertrauensintervallniveau der maximalen kinetischen Energie je Rasterzelle	
	Maximale Sprunghöhe/Flughöhe je Rasterzelle (in m)	Maximale Sprunghöhe (in m; gemessen normal zur Neigung des Hanges) je Rasterzelle	Hüllkurve der maximalen Sprunghöhe (Darstellung von frei wählbaren Perzentilen) → für jeden Abschnitt des Profils und in der Achse jeder Schutzmaßnahme die statistische Verteilung
		Das 95% Vertrauensintervallniveau der Sprunghöhe (in m; gemessen in normaler Richtung) je Rasterzelle	
		Anzahl der abgelagerten Blöcke je Rasterzelle	Lage von Blöcken entlang des Profils und/oder Ablagerung der Blöcke
			Statistische Verteilung der Trefferwinkel aller modellierten Blöcke auf ein Bauwerk
		Wahrscheinlichkeit, dass ein Block eine Rasterzelle durchqueren wird (in %)	
		Maximale Volumen der abgelagerten Blöcke je Rasterzelle (in m ³)	
		Kleinsten Energielinienwinkel je Rasterzelle (in Grad)	
		Minimale Zeitspanne, die benötigt wird von dem Ablösepixel (in s)	
		Maximale Einschlaghöhe am Baum(in m) je Rasterzelle	
		Anzahl der Baumeinschläge je Rasterzelle	

Tab. 2: Mögliche Ausgabeparameter einer Auswahl von Steinschlagmodellen (Melzner et al., 2011)

Tab. 2: Available output parameters of a selection of rockfall models.

Die meisten auf dem Markt erhältlichen Prozessmodelle haben anwenderfreundliche Eingabemasken, bei denen je nach Modell mehr oder weniger viele Möglichkeiten gegeben werden, die Startbedingungen der Simulation bzw. kontrollierenden Faktoren zu verändern.

Modelle für die Simulation von Massenstürzen (Felssturz und Bergsturz)

Zur Bestimmung der Reichweite von Massenstürzen stehen – neben den bereits erwähnten empirischen Verfahren und analytischen Modellen – numerische Prozessmodelle zur Verfügung.

Die **numerischen Prozessmodelle** können in kontinuumsmechanische und diskontinuumsmechanische Modelle unterschieden werden.

Kontinuumsmechanische Modelle basieren auf Berechnungsansätzen, welche für die Analyse von Strömungen in offenen Kanälen entwickelt wurden. Bei diesem Modellansatz wird die Sturzmasse als äquivalente Flüssigkeit betrachtet (Hung, 1995). Um eine komplette, dreidimensionale Berechnung zu ermöglichen wird bei diesen Modellen eine konstante Geschwindigkeitsverteilung (Mittelwert) über die Höhe vorausgesetzt (Savage & Hutter, 1989). Dieser Umstand stellt eine grobe Vereinfachung der Natur dar, ist aber zulässig, solange die Höhe des Sturzstroms (Heim, 1932) klein gegenüber seiner flächigen Ausbreitung ist. Dass komplexe Materialverhalten wird mit Hilfe von rheologischen Modellen zur Beschreibung der internen Deformation und des basalen Scherwiderstands abgebildet. Die in der Praxis am häufigsten eingesetzten Materialmodelle sind das „Mohr-Coulombsche Reibungsmodell“ und das „Materialmodell nach Voellmy“, welches reibungsabhängiges und turbulentes Verhalten kombiniert. Tabelle 3 zeigt die für eine DAN-Berechnung (Hung, 1995; McDougall, 2006) notwendigen Eingabeparameter.

Mittlerweile stehen mehrere kontinuumsmechanische Codes zur Verfügung, wobei jedoch die meisten nicht kommerziell vertrieben werden. Eine Auflistung der verfügbaren numerischen Prozessmodelle kann der 2007 beim International Forum on Landslide Disaster Management (HongKong) veröffentlichten Benchmark-Exercise (Hung, Morgenstern & Wong, 2007) entnommen werden.

Bei den **diskontinuumsmechanischen Modellen** wird die Sturzmasse als Ensemble von diskreten (distinkten) Elementen modelliert (Cundall, 1971). Will & Konietzky (1988) nutzten den Partikel Flow Code (PFC) der Itasca Consulting Group erstmals für die Modellierung von Felsstürzen. Bei diesem Ansatz wird die Sturzmasse durch eine Ansammlung starrer, kugelförmiger Partikel modelliert und der feste Untergrund (Sturzbahn) mit Hilfe von starren Wandelementen dargestellt. Der Sturzprozess wird dabei über das Kontaktverhalten der Partikel untereinander und mit der Sturzbahn kontrolliert (Preh & Poisel, 2007).

Die für eine PFC-Berechnung erforderlichen Eingabeparameter sind in Tabelle 3 aufgelistet. Dazu ist anzumerken, dass das PFC-Modell (und somit die erforderlichen Eingabeparameter) eher mit den Prozessmodellen für Stein-/Blockschlag (Tabelle 1) als mit den kontinuumsmechanischen Modellen zu vergleichen ist.

Die Tabelle 4 zeigt einer Zusammenstellung der möglichen Ausgaben der unterschiedlichen Methoden. Dabei ist die Qualität der Ausgaben sehr unterschiedlich. Während der DAN-Code die Ablagerungen z.B. in Form von digitalen Höhenmodellen ausgibt, die als Konturplot über das Geländemodell gelegt werden, gibt PFC auch die Blockverteilung des abgelagerten Materials wieder. Daher können mit PFC auch Sedimentationseffekte wie das Aufschwimmen von großen Blöcken (inverse grading) abgebildet werden.

Ein weiterer Vorteil des diskontinuumsmechanischen Ansatzes mittels PFC ist darin

begründet, dass auch die Dynamik von Massenstürzen (Abbildung von Flugphasen, Springen einzelner Blöcke, Krafteinwirkung auf den Untergrund) abgebildet werden kann. Dies ist bei der

Modellierung von kleineren Sturzmassen (Felsstürze) als auch bei der Simulation des Auflaufens der Masse auf Barrieren (z.B. Dämme) als Vorteil zu bewerten. DAN empfiehlt sich aufgrund der

	Empirische Verfahren	Analytische Modelle	DAN2D (Hung, 1995)	DAN3D (McDougall, 2006)	PFC (Itasca Consulting Group)
DHM	NEIN	NEIN	Pseudo-3D Lösung	JA, moderat geglättet	JA
Hangprofil	JA	JA	JA	NEIN	NEIN
Rheologische Modelle	NEIN	Reibungsmodell & Voellmy	Reibungsmodell (mit konstantem Porendruck-Verhältnis), plastisch, laminar, turbulent, Bingham, Potenzgesetz und Voellmy	Reibungsmodell (mit konstantem Porendruck-Verhältnis), Bingham, und Voellmy	
Interne Verformung	NEIN	NEIN, unverformbarer Block	Mohr-Coulombsche Versagenshypothese	Mohr-Coulombsche Versagenshypothese	JA, intrinsisches (innewohnendes) Merkmal des Particle Flow Codes (PFC)
Blockgröße	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA
Blockform	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA, durch die Vereinigung einzelner Partikel (clumps)
Dämpfung (Interaktion Block-Untergrund)					viskose Dämpfung in Normal- und Scherrichtung
Scherwiderstand (Interaktion Block-Untergrund)					Reibungsmodell
Rollwiderstand (Interaktion Block-Untergrund)					Funktion des Einsinken des Blocks in den Untergrund
Dämpfung (Block Interaktion)					viskose Dämpfung in Normal- und Scherrichtung
Scherwiderstand (Block Interaktion)					Reibungsmodell (Mohr-Coulomb)
Rollwiderstand (Block Interaktion)					proportional zur Winkelgeschwindigkeit
Erosion	NEIN	NEIN	JA	JA	NEIN

Tab. 3: Benötigte Eingangsparameter für eine Auswahl von Massensturzmodellen (zusammengestellt von Preh)

Tab. 3: Required input parameters for a selection of large volume rockfalls and rock avalanche models (Compilation by Preh)

großen Anzahl an durchgeführten Rückrechnungen und der einfachen rheologischen Modelle für Prognoseberechnungen. Zusätzlich kann bei DAN die Erosion von Material während des Sturzprozesses als auch der Einfluss einer wassergesättigten oder schneebedeckten Sturzbahn einfach berücksichtigt werden.

Simulationsergebnisse und ihre Relevanz für die Praxis

Zu Beginn einer Steinschlagstudie muss zunächst genau festgelegt werden, was für ein Ziel verfolgt

wird. Je nachdem, ob das Ziel die Untersuchung eines großen Gebiets (Regionalstudie), die Abgrenzung von Gefahrenzonen auf Gemeindeebene, Planung/Dimensionierung von Schutzmaßnahmen auf der Hangskala, Rückrechnung von Ereignissen oder Sensibilitätsanalysen sind, muss eine dem Ziel und Projektbudget angepasste Bearbeitungsstrategie mit entsprechender Auswahl an Methoden erfolgen.

Im Folgenden soll anhand von drei Fallbeispielen aufgezeigt werden, wofür unterschiedliche Modelle verwendet werden können und welche Limitierungen und Rahmenbedingungen

	Empirische Verfahren	Analytische Modelle	DAN2D (Hungar, 1995)	DAN3D (McDougall, 2006)	DAN3D (McDougall, 2006)
Reichweite	Fahrböschung, Pauschalgefälle	Pauschalgefälle	Fahrböschung, Pauschalgefälle, Maximum (Front & Ende)	Fahrböschung, Pauschalgefälle, Maximum (Front & Ende)	Fahrböschung, Pauschalgefälle, maximale Auslauflänge Schwerpunkt und Auslauflänge jedes einzelnen Blocks
Verteilung der Ablagerungen	NEIN	NEIN	Profil	Ablagerungshöhen der sich bewegenden Masse und Höhe der Ablagerung	Blockverteilung der bewegten und ruhenden Masse
Geschwindigkeit	NEIN	für den Schwerpunkt	Verlauf der Front-, End-, min. und max. Geschwindigkeit über die Zeit	Bereiche mit gleicher maximaler Geschwindigkeit je Zeitschritt	Verlauf der min., max. und mittleren Geschwindigkeit über die Zeit
Energie	NEIN	für den Schwerpunkt	Verlauf der kinetischen Energie über die Zeit	NEIN	kinetische Energie über die Zeit (Rotation, Translation und gesamte kinetische Energie)
Prozessdauer	NEIN	NEIN	JA	JA	JA
Erosion	NEIN	NEIN	Erosionsprofil	Erosionstiefe (digitales Höhenmodell)	NEIN
Krafteinwirkung auf den Untergrund	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA, intrinsisches Merkmal des Particle Flow Codes

Tab. 4: Mögliche Ausgabeparameter einer Auswahl von Massensturzmodellen (zusammengestellt von Preh)

Tab. 4: Available output parameters of a selection of large volume rockfalls and rock avalanche models (compilation by Preh).

bei der Bearbeitung, Simulation aber auch bei der Bewertung der Güte der Simulationsergebnisse auftreten können. Dies ist vor dem Hintergrund des Einfließens der Simulationsergebnisse in Gefahren- und Risikoanalysen von hoher Bedeutung.

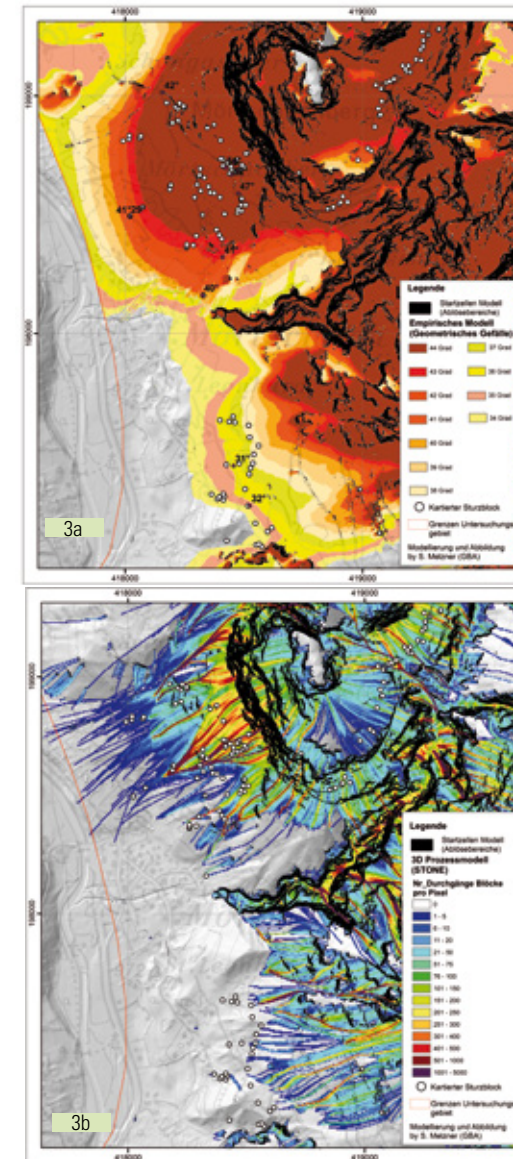


Abb. 3: Vergleich der simulierten Reichweiten mittels des Ansatzes „Geometrisches Gefälle“ (3a) sowie der Modelle STONE (3b) und Rockyfor3D v. 4.0 (3c) mit kartierten Stummen Zeugen (weiße Punkte); Durchführung der beiden linken Simulation von Melzner; rechte Simulation von Dorren (Melzner et al., 2011; Melzner, 2012).

Fig. 3: Comparison of rockfall runouts generated with the reach-angle approach (3a) and the models STONE (3b) and Rockyfor3D (3c). Reach-angle and STONE simulation by Melzner; Rockyfor3D-Simulation by Dorren (Melzner et al., 2011; Melzner, 2012).

Beispiel 1: Anwendung von unterschiedlichen Steinschlagmodellen innerhalb von Regionalstudien

Für große Gebiete (Regionalstudien) ist zu Beginn einer Bearbeitung der Kenntnisstand über die gebietspezifischen, Steinschlag bedingenden Faktoren und Ereignisse in der Regel sehr gering bzw. meist nur in kleinen Bereichen der Untersuchungsregion vorhanden. Demensprechend müssen Parameterkarten aus existierenden Basisdaten (z.B. Geologische Karten, DKM etc.) generiert werden, um sie als Grundlage für die Zuordnung der relevanten Eingangsparameter für eine 3D-Modellierung verwenden zu können.

In Abbildung 3 sind die Simulationsergebnisse von zwei 3D-Prozessmodellen und einem empirischen Ansatz dargestellt: im Falle des Ansatzes des Geometrischen Gefälles sind die maximalen Reichweiten für mehrere geometrische Winkel, beim STONE- und Rockyfor3D v.

4.0-Modell die Anzahl der Blockdurchgänge pro Fläche dargestellt. Alle Modellierungen wurden mit der gleichen Anzahl von Startzellen (schwarze Bereiche in Abb. 3 & 4) und mit einer Auflösung von 5m gerechnet (vgl. für Details über die Bearbeitung und Berechnungen: Dorren et al., 2011; Melzner et al., 2012).

Das empirische Modell (Geometrisches Gefälle) generiert aufgrund der einfach geometrischen Winkelbeziehung keine Trajektorien, sondern lediglich generalisierte Reichweiten, die in Abhängigkeit vom gewählten Winkel variable Erstreckung haben können. Die Berechnungsergebnisse der beiden 3D-Modelle fallen recht unterschiedlich aus (vgl. Abb. 3 und Abb. 4): das STONE-Modell generiert tendenziell recht lange Trajektorien, die ein fächerförmiges Erscheinungsbild haben. Die räumliche Erstreckung der Trajektorien des Rockyfor3D-Modells hingegen variiert bedeutend stärker innerhalb des Untersuchungsgebiets und zeigen Konzentrationen von Blockdurchgängen vornehmlich in den Tiefenlinien. Im Gegensatz zu STONE, das einen „lumped mass“-Ansatz unterliegt (vgl. Guzzetti et al., 2002), können die Rockyfor3D-Trajektorien sich in Abhängigkeit von der gewählten Sturzblockgröße in ihrer Auslauflänge signifikant unterscheiden. So zeigen Simulationen mit kleineren Blockgrößen bedeutend kürzere, größere Sturzblockgrößen längere Reichweiten als das Ergebnisse für 1m³ Sturzblöcke in Abbildung 3 & 4. Neben der Blockgröße berücksichtigt das Rockyfor3D-Modell auch die Form von Sturzblöcken, was zu unterschiedlichen Modellausgaben führen kann (Dorren, 2011).

Der Vergleich der maximalen Reichweiten vergangener Steinschlagereignisse (weiße Punkte in Abb. 3 & 4) mit den simulierten Trajektorien der beiden 3D-Modelle zeigt, dass in einigen Bereichen eine gute, in anderen Bereichen eine weniger gute Übereinstimmung mit den Stum-

men Zeugen vorliegt (Abb. 4). Interpoliert man die Endpunkte der simulierten Trajektorien, haben die so ausgewiesenen maximalen Reichweiten in vielen Bereichen eine ähnliche Ausdehnung wie der einfache empirische Ansatz. In anderen Bereichen liefert der empirische Ansatz in Bezug auf die Stummen Zeugen sogar bessere Ergebnisse.

Die Ausführungen zeigen, dass die Vergleichbarkeit und nachvollziehbare Bewertung der Güte der beiden 3D-Berechnungen in dieser Form nicht möglich ist. Dies ist darin begründet, dass für die Simulationen stark generalisierte Parameterkarten verwendet wurden, die aus dem Verschnitt unterschiedlichster, vorwiegend großmaßstäblicher Datengrundlagen (z.B. Geologische Karte im Maßstab 1:50.000) erstellt wurden. Diese wurden hinsichtlich der relevanten Modellparameter klassifiziert und die benötigten Modellparameter auf Basis punktueller Erhebun-

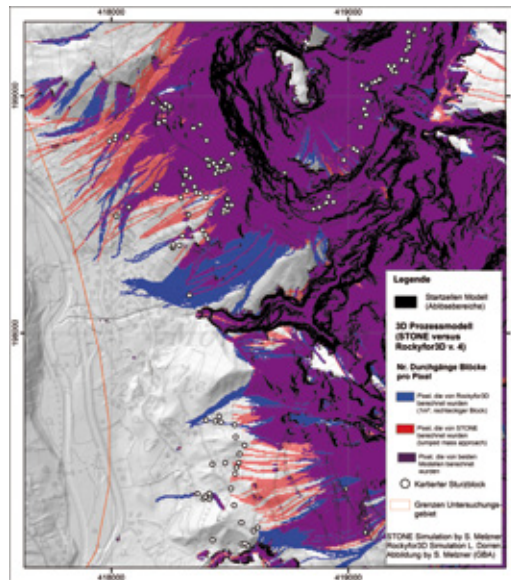


Abb. 4: Vergleich der simulierten Reichweiten von STONE und Rockyfor3D (1m³ Sturzblock-szenario) : rot= STONE; blau= Rockyfor3D; lila= beide Modelle (Melzner et al., 2011; Melzner, 2012).

Fig. 4: Comparison of the trajectories calculated with STONE and Rockyfor3D (block size 1m³): red= STONE; blue= Rockyfor3D; purple= both models.

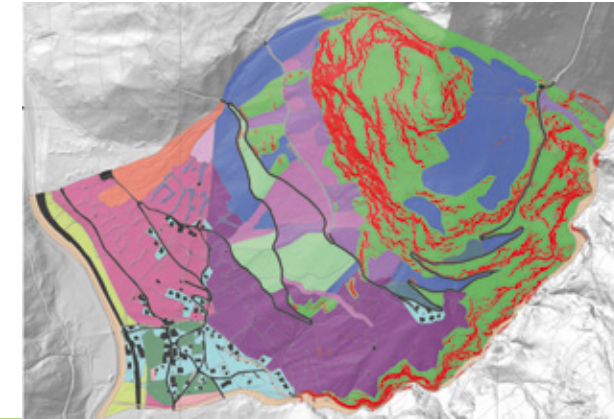
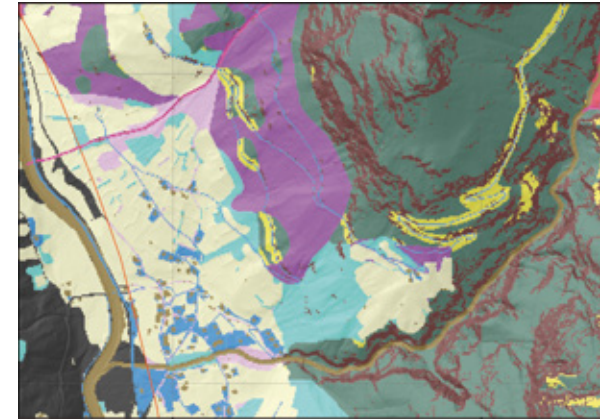


Abb. 5: Vergleich stark generalisierter Eingangsdaten einer regionalen Simulation (5a) mit detaillierteren Eingangsdaten für Fragestellungen auf der lokalen Raumskala (5b) (Melzner et al., 2011; Melzner, 2012).

Fig. 5: Highly generalized input parameter maps generated for 3D-Simulations at regional scale (5a). Assessments at local or slope scale should involve more detailed parameter maps, which were generated with good field knowledge (Melzner et al., 2011; Melzner, 2012).

gen bzw. Erfahrungswerten des Bearbeiters zugewiesen (Abb. 5a).

Seitens der Autoren wird die Meinung vertreten, dass es nicht sinnvoll sein kann, Prozessmodelle für sehr große Untersuchungsgebiete zu verwenden, da die Datenlage zu schlecht ist, um den komplexen Algorithmen der 3D-Modelle gerecht zu werden. Zudem suggerieren die Trajektorien im Gegensatz zu dem groben maximalen Reichweiten des empirischen Ansatzes eine Genauigkeit,

die faktisch nicht gegeben ist (vgl. dazu im Detail: Melzner et al., 2011; Melzner et al., 2012).

Für Untersuchungen auf Gemeindeebene (Lokale Raumskala) bzw. Hangskala ist es somit unabdingbar, dass ein hoher Kenntnisstand über die gebietspezifischen Eigenschaften eines Gebiet vorliegt, damit die benötigten Modelleingangsdaten mit einem höheren Detaillierungsgrad für die Berechnungen einfließen können (vgl. Abb. 5b).

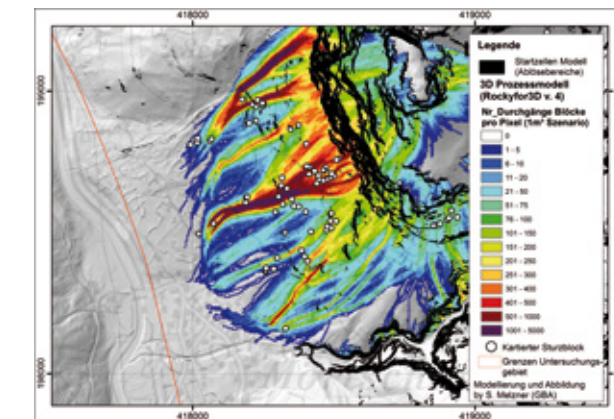
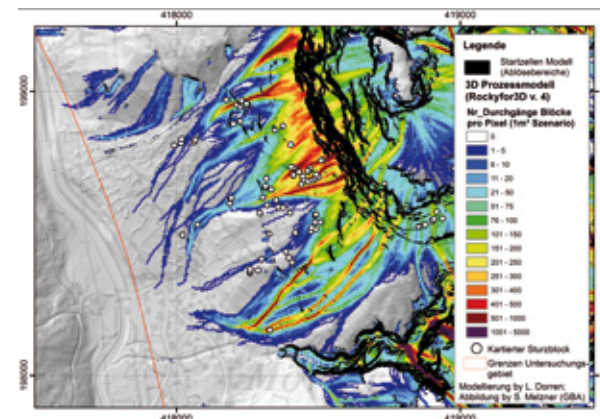


Abb. 6: Vergleich der berechneten mittleren Energien von Rockyfor3D einer regionalen Simulation (6a) und einer Simulation auf lokaler Raumskala (6b). Regionale Simulation von Dorren; Lokale Simulation von Melzner (Dorren et al. 2011, Melzner et al., 2011; Melzner, 2012).

Fig. 6: Comparison of mean energies calculated with Rockyfor3D at regional Scale (6a) and local Scale (6b) (Melzner et al., 2011; Melzner, 2012).

In Abbildungen 6 ist ein Ausschnitt der zuvor beschriebenen regionalen Modellierung (Abb. 6a) den Ergebnissen einer Modellierung mit detaillierteren Eingangsdaten für einen Teilbereich gegenüber gestellt. Um die Ergebnisse der Rockyfor3D-Simulationen vergleichen zu können, wurde die detaillierten Simulationen ebenfalls in 5m Auflösung durchgeführt und gleichen Simulationsbedingungen (z.B. Blockgröße und -form) durchgeführt.

Anhand des Simulationsvergleichs wird ersichtlich, dass durch die detaillierte Simulation einige Bereiche potentiell durch Steinschlag betroffen werden könnten, die durch die regionale Simulation als potentiell „sicher“ ausgewiesen wurden.

Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, dass regionale Simulationen lediglich als erster Hinweis für eine potentielle Gefährdung verwendet werden sollten. Für die Abgrenzung von Gefahrenzonen und/oder Planung von Schutzmaßnahmen sollten die relevanten Modellparameter im Detail flächendeckend im Gelände erhoben werden. Viel Erfahrung in der Anwendung eines Modells in unterschiedlichen Landschaftsräumen ist notwendig, um den benötigten Detaillierungsgrad der Datenerhebung in Bezug auf eine gewisse Fragestellung einschätzen zu können.

Beispiel 2: Vergleich von 2D- und 3D-Steinschlagsmodellen auf der Hangskala

Für einzelne Hänge bzw. Hangabschnitte können mit vertretbarem Aufwand detaillierte Daten für die Bewertung der Steinschlaggefährdung erhoben werden. Die Ergebnisse solcher Detailstudien werden vorwiegend für die Planung und Dimensionierung von Schutzmaßnahmen und Abgrenzung von Gefahrenzonen verwendet. In Österreich wird seitens des Forsttechnischen Dienstes der Wildbach und Lawinenverbauung (WLV) vor-

wiegend das 2D-Prozessmodell Rockfall 7.1 (Dr. Spang GmbH) für die Planung und Dimensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (z.B. Netze, Dämme) verwendet. In Abbildung 7 a ist beispielhaft ein Profil dargestellt, entlang dem eine 2D-Modellierung seitens der WLV durchgeführt wurde. Auf Basis der Modellergebnisse „statistische Verteilung der Sprunghöhe an einer definierten Position des Bemessungsprofils“, „verschiedenen Perzentilen der Energie“ und „Blockdurchgänge“ kann mittels einer Gefahren- und Risikoanalyse entschieden werden, ob eine Schutzmaßnahme erforderlich ist und welcher Standort den effektivsten Schutz bieten würde (Mölk, 2008). Wie in Abbildung 7 b ersichtlich wird, können mittels einer Sequenz von repräsentativen 2D-Profilen auch größere Hangbereiche hinsichtlich einer potentiellen Gefährdung untersucht werden und ein Brauner Gefahrenhinweisbereich abgegrenzt werden (Details hierzu in: Mölk, 2008).

Seitens der Fachabteilung Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt (GBA) wurde für das gleiche Untersuchungsgebiet eine 3D-Simulation mittels Rockyfor3D v. 4.0 durchgeführt. Hierfür wurden alle relevanten Modellparameter (Tabelle 1) flächendeckend in einem Maßstab von 1:5.000 kartiert und in einem GIS entsprechend aufbereitet. Um die Modellergebnisse von Rockyfor3D mit den Ergebnissen von Rockfall 7.1 besser vergleichen zu können, wurden nur jene Bereiche vom DHM als Startbereich für die Sturzrechnungen für die 3D-Simulation verwendet, die auch von dem Profil der 2D-Simulation geschnitten wurden. In Abbildung 7b sind die Ergebnisse der Rockyfor3D Berechnungen und die Lage der Bemessungsprofile der 2D Modelle dargestellt. Damit lässt sich gut erkennen, dass im Falle des 3D-Modells der 3D-Effekt der Topographie in die Modellrechnungen eingeht und dadurch die seitlichen Ablenkungen der Sturzblöcke berücksichtigt werden.

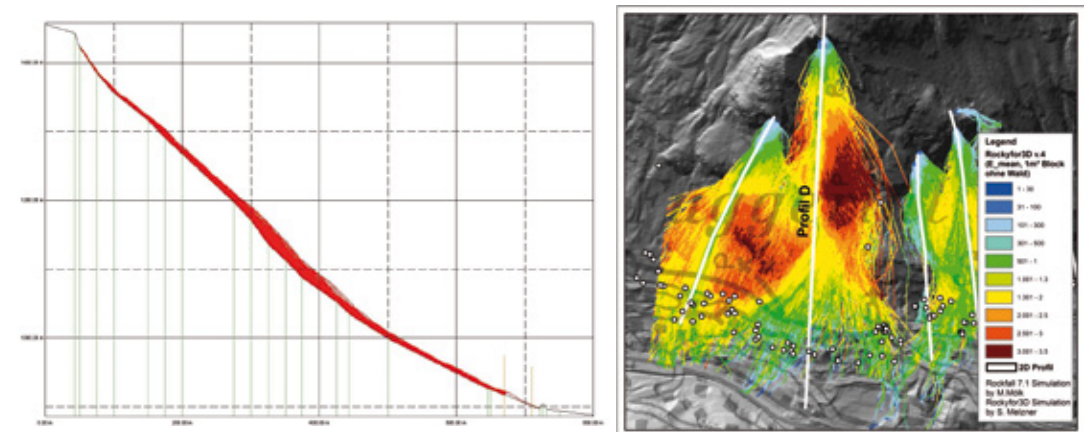


Abb. 7: Rockfall 7.1- Trajektorien (7a) und Rockyfor3D-Trajektorien (7b). Weiße Linien = Lage der Bemessungsprofilen für die 2D Modellierung; Rockfall 7.1 Simulation von Mölk, Rockyfor3D Simulation von Melzner (Mölk, 2008; Melzner et al., 2011).

Fig. 7: Rockfall 7.1 trajectories (7a) and Rockyfor3D trajectories (7b). White lines = Position of Rockfall 7.1 profiles (Mölk, 2008; Melzner et al., 2011).

Wie in Tabelle 2 aufgezeigt wird, kommen nur wenige Parameter für den direkten Modellvergleich von Rockyfor3D und Rockfall 7.1 in Frage. Um die mittleren Energien von Rockyfor3D mit der maximalen Energie von Rockfall 7.1 vergleichen zu können, wurde das 50% Perzentil der Energie der modellierten Blöcke über den Profilverlauf von Rockfall 7.1 dargestellt. Interessanterweise zeigen beide Modelle recht ähnliche Werte im Bereich des gewählten 2D-Profiles (Abb. 8a und 8b). Die Rockyfor3D Berechnungen zeigen jedoch auch sehr deutlich, dass bedeutend höhere Energien in anderen Bereichen auftreten können, als es entlang des gewählten

Obwohl die flächendeckende Datenerhebung und Durchführung einer 3D-Modellierung mit einem größeren Aufwand verbunden ist, lässt sich die Komplexität des Sturzprozesses bedeutend besser darstellen. Problematisch gestaltet sich jedoch die Tatsache, dass bei einigen 3D-Prozessmodellen (z.B. STONE und Rockyfor3D) keine

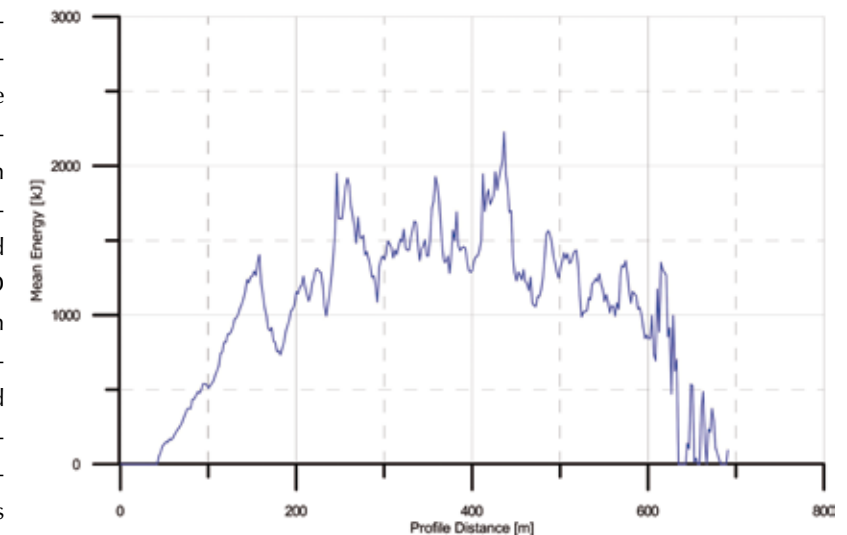


Abb. 8a: Rockyfor3D Ausgabe „mittleren Energie“ entlang des Bemessungsprofils „D“ in Abb. 7 (Melzner et al., 2011).

Fig. 8a: Rockyfor3D output „mean energy“ along profile „D“ in Fig. 7 (Melzner et al., 2011).

entlang des gewählten Hangquerschnitts für die 2D-Modellierung der Fall ist (Abb. 7).

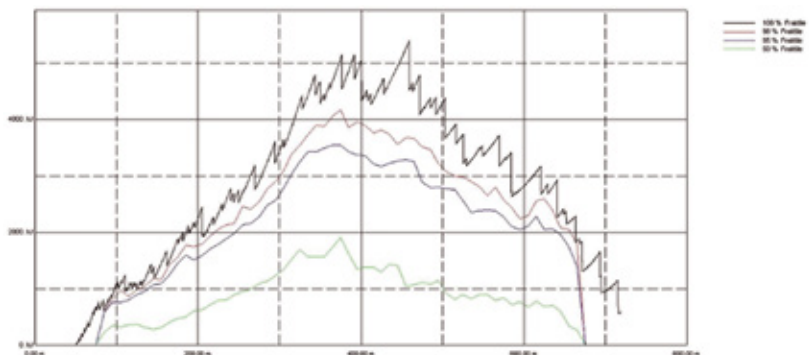


Abb. 8b: Rockfall 7.1 Ausgabe „50 % Perzentil der maximalen Energie“ (grüne Linie) entlang des Bemessungsprofils „D“ in Abb. 7 (Mölk 2008).

Fig. 8b: Rockfall 7.1 output „50% percentile of maximum energy“ along profile „D“ in Fig. 7 (Mölk 2008).

bzw. lediglich mittlere Energiewerte standardmäßig ausgegeben werden, was häufig ein wichtiger Parameter für die Dimensionierung von Schutzmaßnahmen darstellt. So wird in Österreich in Zukunft gemäß ONR 24810 als charakteristische Energieeinwirkung das 99% Perzentil verwendet werden.

Beispiel 3: Numerische Analyse von Fels- und Bergstürzen mittels PFC3D und DAN3D

Wie im Kapitel 2 beschrieben stehen zur numerischen Analyse von Fels- und Bergstürzen kontinu-



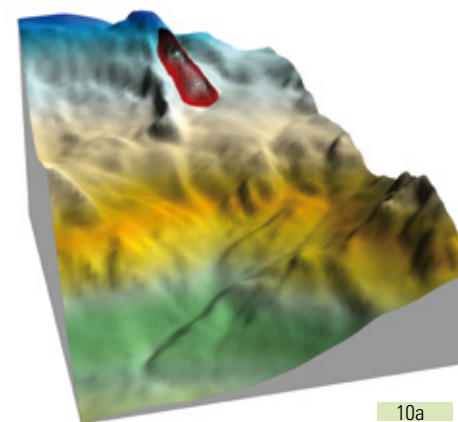
Abb. 9: Modellierung eines Felssturzes mit einem Abbruchvolumen von ca. 2600 m³; Sturzmasse und Geländeoberfläche (9a), Sturzmasse repräsentiert durch eine irreguläre Partikelanordnung (9b) (Preh, 2010).

Fig. 9: Modelling of a rock avalanche with a detached volume of ca. 2600 m³; detachment and terrain surface (9a), detached rock volume modelled by an irregular assembly of particles (9b) (Preh, 2010).

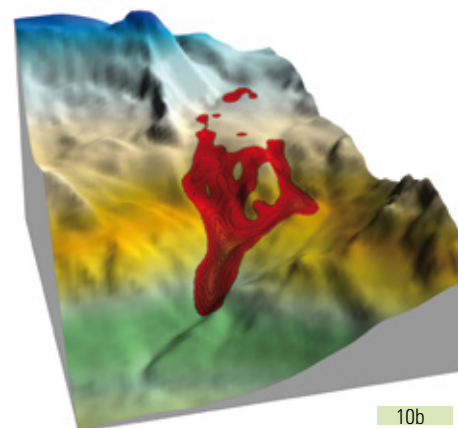
umsmechanische und diskontinuumsmechanische Prozessmodelle (Tabelle 4) zur Verfügung. Anhand des kontinuumsmechanischen Codes DAN3D (McDougal, 2006) und des diskontinuumsmechanischen Codes PFC3D (Itasca Consulting Group) werden die beiden grundlegenden Berechnungsansätze

einander gegenübergestellt.

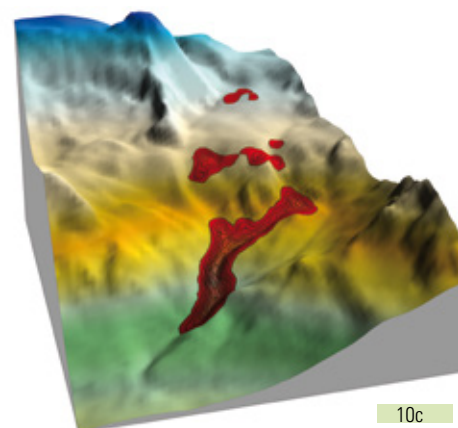
Bei beiden Ansätzen ist die initiale Versagensfläche und das daraus resultierende Abbruchvolumen ein wesentlicher Eingangsparameter der Berechnung (Abb. 9a). Diese muss mittels einer ingenieurgeologischen Kartierung und einer felsmechanischen Analyse des Versagensmechanismus festgelegt werden. Beim PFC-Modell wird die Sturzmasse als vollkommen desintegriert angenommen und durch eine irreguläre Anordnung (Packung) von kugelförmigen Partikeln modelliert (Abb. 9b). Die Partikelgenerierung erfolgte dabei unter Berücksichtigung einer abgeschätzten Po-



10a



10b



10c

Abb. 10: Verlauf des Bergsturzes Punta Thurwieser modelliert mit DAN3D, Ausgangssituation (10a), Aufteilung der Sturzmasse in mehrere Pfade (10b), Endlage (10c) (Poisel et al., 2008)

Fig. 10: Evolution of the Punta Thurwieser rock avalanche modelled by DAN3D, detached rock mass (10a), fragmentation of the detached rock mass (10b), final position (10c) (Poisel et al., 2008)

rosität (Preh, 2004) innerhalb des durch die Geländeoberfläche und der Ablösefläche begrenzten Volumens.

Beim DAN-Modell wird die Sturzmasse als äquivalente Flüssigkeit betrachtet (Hungr, 1995) und dem Abbruchvolumen gleichgesetzt. Dabei obliegt es dem Anwender die Auflockerung der Sturzmasse infolge des Zerbrechens während des Abbruchs abzuschätzen und durch eine Erhöhung des Abbruchvolumens zu berücksichtigen. Beide Berechnungsansätze benötigen zum Aufbau des Geländes ein digitales Höhenmodell mit regelmäßigem Punktraster (Gitter-DHM).

Die Kalibrierung der Modelle erfolgt in der Regel mittels Rückrechnung von vergleichbaren und ausreichend dokumentierten Ereignissen. Für den kontinuumsmechanischen Code DAN konnten mittels Rückrechnung zahlreicher, gut dokumentierter Massenstürze grundlegende Parameter für Prognoseberechnungen abgeleitet werden (Hungr & Evans, 1996; Sosio et al., 2008). Die von Hunger & Evans (1996) empfohlenen Prognoseparameter liefern bei ca. 75% der 23 der Untersuchung zugrundeliegenden Ereignissen brauchbare Vorhersagen. Bei PFC können bei kleineren Felsstürzen die erforderlichen Dämpfungsparameter (vgl. Tabelle 3b) auch durch die Rückrechnungen von Einzelabstürzen gewonnen werden.

Am Beispiel der Modellierung des Bergsturzes Punta Thurwieser mittels DAN3D (Abb. 10a, 10b & 10c) und PFC^{3D} (Abb. 11) lassen sich die Möglichkeiten der beiden Berechnungsansätze gut darlegen. Der Bergsturz Punta Thurwieser (Abbildung 2) ereignete sich am 18. September 2004 an der Südflanke der Puntha Thurwieser (3.658 m.ü.A) nahe dem Zembrü Tal in den italienischen Alpen (Ortler). Dabei stürzte eine hauptsächlich aus Dolomit bestehende Felsmasse mit einer Kubatur von ca. 2,2 Millionen m³ in das Marè Tal und legte dabei eine Strecke von rund 2,9 km zu-

rück. Aufgrund der Morphologie und der Beschaffenheit der Sturzbahn (blanker Fels, Gletscher und Moränenmaterial) zeigte der Sturzprozess ein sehr turbulentes Verhalten. Die Sturzmasse teilte sich phasenweise in mehrere Pfade auf und auch der mittels Videoanalyse ermittelte Geschwindigkeitsverlauf der Sturzfront zeigt mehrere Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen.

Mit beiden Berechnungsansätzen konnte der beobachtete turbulente Verlauf als auch die kartierten Ablagerungen des Bergsturzes (Abb. 10 & 11) gut abgebildet werden. Auch der kontinuumsmechanische DAN-Code ist aufgrund seiner Formulierung (Smoothed Particle Hydrodynamics) in der Lage das Aufspalten der Sturzmasse in mehrere Pfade als auch die Vereinigung kleinerer Teile der Sturzmasse zu modellieren (Abb. 10a, 10b & 10c).

Die Gegenüberstellung der kartierten mit den berechneten Ablagerungen (Abb. 12) zeigt, dass beiden Modelle die Reichweite des Massensturzes gut wiedergeben. Bei der Verteilung der Ablagerungen zeigt das DAN-Modell jedoch eine größere Übereinstimmung mit der Kartierung.

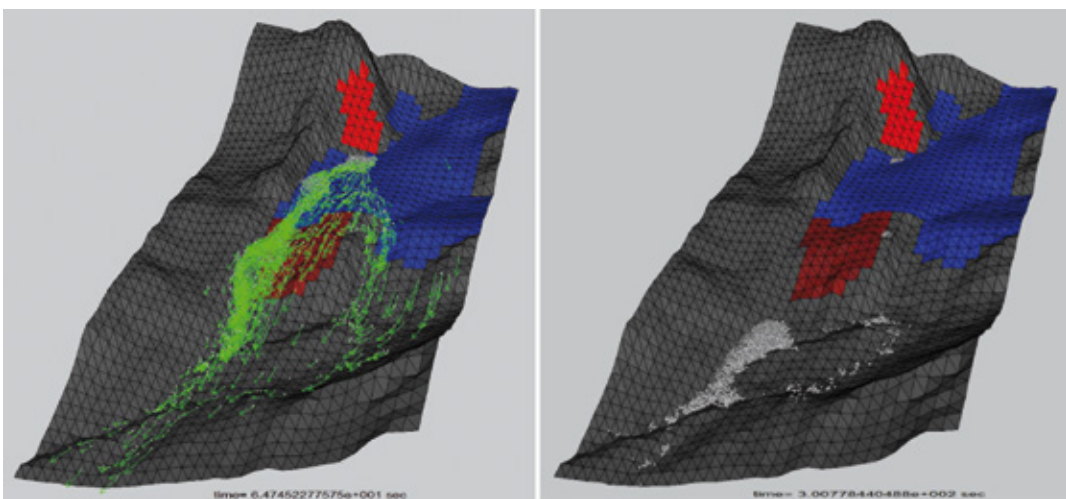


Abb. 11: Verlauf des Bergsturzes Punta Thurwieser modelliert mit PFC; rot - Abbruch, blau - Gletscher, braun - Fels, grau - Moräne (Poisel et al., 2007)

Fig. 11: Evolution of the Punta Thurwieser rock avalanche modelled by PFC; red - detachment area, blue - glacier, brown - outcropping rock, grey - glacial deposits (Poisel et al., 2007)

Das DAN-Modell besitzt zusätzlich den Vorteil, dass die abgelagerte Masse direkt als Höhenmodell ausgelesen werden kann, während die Ablagerungshöhen beim PFC mit Hilfe der Partikelpositionen (Textdateien) berechnet werden müssen.

Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die für den Sturzprozess relevanten Widerstandsparameter abhängig von der Art der Bewegung sind. Bei turbulenten Massenstürzen ist Rollwiderstand und die Dämpfung der Block-Block-Kontakte bedeutend, während bei kohärenten Bewegungen (z.B. Frank Slide) der Reibungswiderstand ausschlaggebend ist. Im Vergleich zu DAN benötigen PFC-Modelle einen wesentlich höheren Modellierungsaufwand und auch lange Rechenzeiten (bei komplexen Modellen oft mehrere Stunden).

Numerische Modelle werden zu dem derzeitigen Stand der Technik vorwiegend für die Rückrechnung einzelner Massensturzereignisse bzw. Prognose einzelner instabiler Talflanken verwendet.

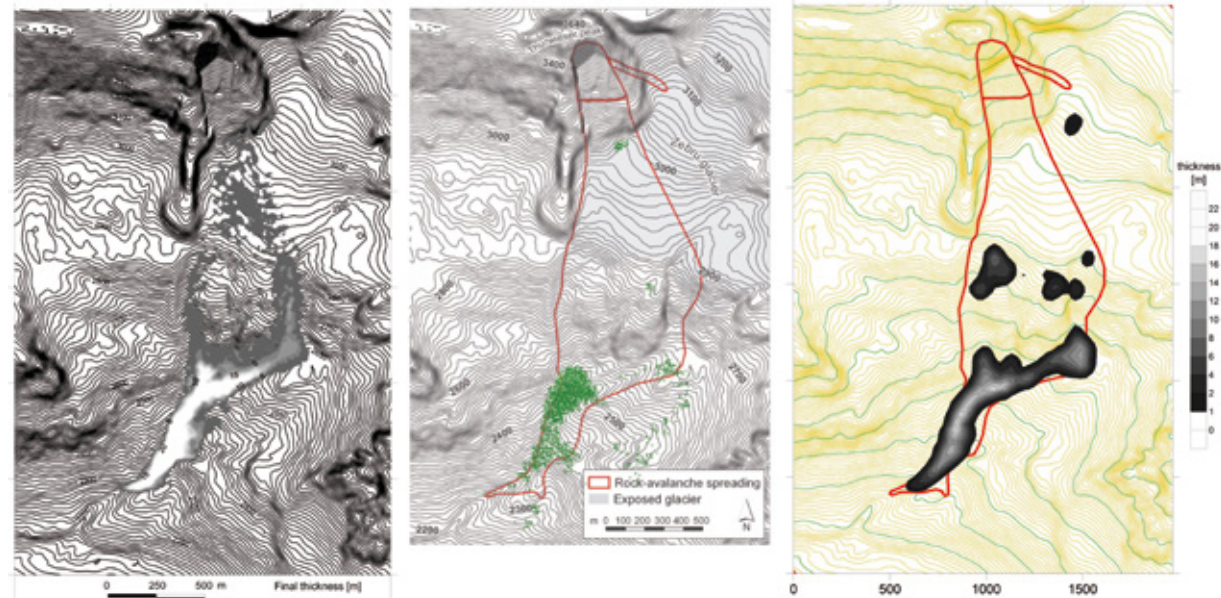


Abb. 12: Gegenüberstellung der kartierten Ablagerungen (Abb.12a) mit den Ergebnissen des PFC- (12b) und des DAN-Modells (12c) (Poisel et al., 2008).

Fig. 12: Comparison of the accumulation zone: thickness of deposit in reality (12a), final distribution of PFC-particles (12b) and deposit distribution modelled by DAN (12c).

Schlussfolgerungen

Auch wenn sich in Zukunft auf Länderebene bzw. transnational mit der Entwicklung von Mindeststandards und Richtlinien verstärkt beschäftigt wird, sollte berücksichtigt werden, dass die Einschätzung des Gefahrenpotentials durch Sturzprozesse nur bedingt möglich ist.

Modellrechnungen sind ein wichtiges und oft das einzige Hilfsmittel zur Einschätzung des Gefahrenpotentials durch Sturzprozesse. Jedoch sollte den Anwendern klar sein, dass jedes Modell auf einfachen Modellvorstellungen (Berechnungsansätzen) beruht und die Komplexität der Natur nur annäherungsweise wiedergeben kann. Modelle liefern bei ähnlicher Datenlage/-güte immer unterschiedliche Ergebnisse, jedes Modell muss daher für sich kalibriert werden. Erkenntnisse, die mit einem Modell gesammelt wur-

den, können nicht eins zu eins auf ein anderes Modell übertragen werden. Zu dem derzeitigen Stand der Forschung hat sich noch kein Sturzmodell herauskristallisiert, welches ohne Einschränkungen universell für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden kann.

Viele Sturzmodelle können nicht käuflich erworben werden, sondern sind an die Expertise der Softwareentwickler gebunden. Den Anwendern von extern ausgeführten Modellierungen muss bewusst sein, dass mit jedem Modell auf ein gewünschtes Berechnungsergebnis „hingerechnet“ werden kann. Detaillierte Beschreibungen der Modelle und der Modelldurchführung sowie der Eingangsdaten und Modellergebnisse sind somit die einzige Möglichkeit, die Simulationsergebnisse hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit im Hinblick einer Gefahrenzonierung und/oder Planung von Schutzmaßnahmen prüfen zu können.

Das initiale Versagen (Versagensmecha-

nismus, Abbruchsvolumen) ist ein wesentlicher Parameter bei der Analyse von Sturzprozessen. Diese Anfangsbedingungen (Position des potentiellen Herkunftsbereichs, Volumen und initiale Geschwindigkeit) bestimmen den daraus resultierenden Sturzprozess maßgeblich und müssen im Rahmen detaillierter ingenieurgeologischer Kartierungen und Analysen erhoben und bei der Gefahrenbewertung mit einfließen. Zu dem derzeitigen Stand der Forschung werden solche Dispositionsanalysen der Felswände von der Sturzsimulation getrennt betrachtet, da es bislang noch kein Modell gibt, das sowohl die Versagensmechanismen als auch den danach potentiell auftretenden Sturzprozess simulieren kann.

Im Rahmen einer Gefahrenanalyse im klassischen Sinne werden auch Informationen über die Wiederkehrwahrscheinlichkeit benötigt. Im Falle von fluviatilen Prozessen gestaltet sich dies bedeutend einfacher, da sie sich in einen definierten Raum (Gerinnebett/ Talaue) abspielen, gebietsintegrale Betrachtungen ausreichen und oft direkt mit dem Auslöser (Niederschlagsereignis) verknüpfbar sind, was überhaupt erst Zeitreihenanalysen ermöglicht. Die Einschätzung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit bei Sturzprozessen ist nahezu unmöglich, da sehr viele Faktoren für die Auslösung eines Sturzprozesses zusammenspielen, flächendetaillierte Betrachtungen erforderlich sind und zudem die Regenerierbarkeit der Materialherkunftsbereiche hinsichtlich zukünftiger Ereignisse meistens nicht gegeben ist oder nur schwer abschätzbar ist.

Wenn ein reproduzierbares und extrapolierbares Modellergebnis geschaffen werden soll, ist es nicht empfehlenswert die Modellberechnungen anhand von kartierten stummen Zeugen willkürlich (ohne Kenntnis des Abbruchbereichs und des Sturzpades) zu kalibrieren, sondern gute prozessorientierte Basisdaten zu

erheben und in die Analyse einfließen zu lassen. Erfahrungen in der Anwendung unterschiedlicher Modelle sowie Modellierungserfahrung in unterschiedlichen Landschaftsräumen und sehr gute Gebietskenntnisse sind notwendig, um realistischere Aussagen über die Fähigkeit eines Modells in Bezug auf die unterschiedlichen Fragestellungen treffen zu können.

Solange es nicht quantitative Validierungsmethoden gibt, ist es schwierig, einen Standard zu definieren, in Bezug auf die Methode aber auch den relevanten Kriterien für eine Gefahrenbeurteilung.

Danksagung

Die Rockyfor3D Simulation auf der Regionalen Raumskala (Dorren) und die Berechnung des Geometrischen Gefälles (Melzner) wurden im Rahmen des INTERREG IV Projekts „Massmove“ (www.massmove.at) erhoben/generiert. Die ALS-Daten der beiden Untersuchungsgebiete „Oberes Mölltal“ und „Bad Bleiberg“ sind Eigentum der Kärntner Landesregierung.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Dipl. Sandra Melzner
Geologische Bundesanstalt Österreich
Fachabteilung für Ingenieurgeologie
Neulinggasse 38, A-1030 Wien
sandra.melzner@geologie.ac.at

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh
TU Wien- Institut für Geotechnik,
Forschungsbereich Ingenieurgeologie
Karlsplatz 13/220-1, A-1040 Wien
alexander.preh@tuwien.ac.at

Literatur / References:

- BOZZOLO, D. (1987).
Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Steinschlag. PhD Dissertation, ETH Zürich 1987.
- CUNDALL, P. (1971).
A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Vol.1. Nancy, France.
- DORREN, L.K.A. (2003).
A review of rockfall mechanics and modelling approaches. Progress in Physical Geography 27: 69-87.
- DORREN, L.K.A. (2011).
Rockyfor3D (v4.1) revealed- transparent description of the complete 3D-rockfall model. ecorisQ paper, www.ecorisq.org: 30 S.
- DORREN, L.K.A., LIENER, S., HÖSLE, B. (2011).
Producing susceptibility maps using 3D-rockfall simulations and shallow landslide modelling in the Moelltal and Aental (Carinthia, Austria). Mass-move report 2011: 39 S.
- GUZZETTI, F., CROSTA, G., DETTI, R., AGLIARDI, F. (2002).
STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rockfalls. Computers & Geosciences 28: 1079-1093
- HEIM, A. (1932).
Bergsturz und Menschenleben. Zürich: Fretz und Wassermuth
- HUNGR, O. (1995).
A model for the run out analysis of rapid fluid slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal 32: 610-623.
- HUNGR, MORGENSTERN & WONG (2007).
Review of Benchmarking Exercise on Landslide Debris Runout and Mobility Modelling. in: "Proceedings of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management", K. Ho et al. (Hrsg.); 2 (2008), ISBN: 978-962-7619-30-7: 755 - 812.
- HUNGR, O. and EVANS, S.G. (1996).
Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. In Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim. Edited by K. Senneker. A.A. Balkema, Rotterdam: 233-238.
- MEISSL, G. (1998).
Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geographische Studien Band 28.
- MELZNER, S., LOTTER, M., KOCIU, A., TILCH, N. (2008).
Erstellung einer detaillierten Gefahrenhinweiskarte und ingenieurgeologische Ausarbeitung relativer Gefahrenklassen für ausgewählte Gebiete Kärntens im Maßstab 1:10.000. Testgebiet Bad Bleiberg- Prozessgruppe Fallen/Stürzen. Unveröffentl. GBA Endbericht, 153 S.
- MELZNER, S., MÖLK, M., DORREN, L., RECIHENBACH, P., GUZZETTI, F. (2011).
Rockfall runout modelling for susceptibility evaluation: a multi-scale comparison at different sites. Vortrag und extended abstract bei dem "Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection 2011, www.rocexs2011.at.
- MELZNER, S. (2012).
Simulation of rockfall trajectories using process-based models. Vortrag und extended abstract beim "Yosemite Forum" des United States Department of the Interior, National Park Service am 14.2.2012 in Kalifornien.
- MELZNER, S., LOTTER, M., TILCH, N., KOCIU, A. (2012).
Rockfall susceptibility assessment at the regional and local scales as a basis for planning site-specific studies in the Upper Moelltal (Carinthia, Austria) INTERREG IV, Proj 1381-277. Berichte der Geologischen Bundesanstalt Band 91, www.geologie.ac.at: 107 S.
- MCDUGALL, S. (2006).
A New Continuum Dynamic Model for the Analysis of Extremely Rapid Landslide Motion across Complex 3D Terrain. Ph.D. Thesis, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, 2006.

MÖLK, M. (2008).
Steinschlagschutz Bad Bleiberg. Steinschlagssimulation als Basis für die Dimensionierung von Schutzmaßnahmen. Bericht des Forsttechnischen Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung. Geologische Stelle, Innsbruck.

ONR 24810.
Technischer Steinschlagschutz: Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung. Entwurf. Austrian Standards Institute.

PREH, A. (2004).
Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes. PhD Dissertation, Inst. for Eng. Geology, Vienna University of Technology.

PREH, A. AND POISEL, R. (2007).
3D modelling of rock mass falls using the Particle Flow Code PFC3D. Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, July 9-13, 2007. Specialized Session S01 – Rockfall – Mechanism and Hazard Assessment.

POISEL, R. PREH, A. KOC, O. (2008).
Punta Thurwieser rock avalanche and Frank slide: A comparison based on PFC3D runout models.; Vortrag: 2007 International Forum on Landslide Disaster Management, Hong Kong, China (eingeladen); 10.12.2007 - 12.12.2007; in: "Proceedings of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management", K. Ho et al. (Hrsg.); 2 (2008), ISBN: 978-962-7619-30-7: 1059 - 1078.

POISEL, R. PREH, A. HOFMANN, R. (2011).
Slope failure process recognition based on mass-movement induced structures Hauptvortrag: 2nd Conference on Slope Tectonics, Vienna (eingeladen); 06.09.2011 - 10.09.2011; in: "2nd Conference on Slope Tectonics", I. Baron, M. Jaboyedoff (Hrsg.); 6 S.

POISEL R., A. PREH, O. HUNGR (2008).
Run Out of Landslides - Continuum Mechanics versus Discontinuum Mechanics Models. Geomechanik und Tunnelbau, 1 (2008), 5: 358 - 366.
Sassa, K. (1988). Geotechnical model for the motion of landslides. In Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne. Edited by C. Bonnard. A.A. Balkema, Rotterdam: 37-56.

SCHIEDEGGER, A. E. (1973).
On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. Rock Mechanics 5: 231-236.

SOSIO, CROSTA & HUNGR, O. (2008):
Complete dynamic modelling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps). Engineering Geology 100 (2008): 11–26.

VOLKWEIN, A., SCHELLENBERG, K., LABIOUSE, V., AGLIARDI, F., BERGER, F., BOURRIER, F., DORREN, L.K.A., GERBER, W., JABOYEDOFF, M. (2011):
Rockfall characterisation and structural protection- a review. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 11: 2617-2651.

WILL, J., and KONIETZKY, H. (1998).
Neue Techniken der Numerik zur Berechnung von Felsböschungen. Felsbau 16: 155-167.

CHRISTOPH SKOLAUT

Anwendung von Modellen in der Gefahrenzonenplanung der Wildbach- und Lawinenverbauung

Application of process models in the hazard zone mapping of the Austrian Torrent and Avalanche Control Service

Zusammenfassung

Prozessmodelle stellen eine wichtige Grundlage der Gefahrenzonenpläne in Österreich dar. Der Beitrag gibt einen Überblick über den Anwendungsbereich in der Praxis der Gefahrenzonenplanung, die normativen Grundlagen sowie den Stand der in Ausarbeitung befindlichen Qualitätsstandards für diesen Bereich.

Stichwörter

Prozessmodelle, Gefahrenzonenplanung, Qualitätsstandards, Richtlinien

Abstract

Process models represent a major basis for hazard zone maps in Austria. This paper provides an overview of the scope of application in the practice of hazard zone mapping, of the normative regulations and the status of development of the new quality standards in this field.

Keywords

process models, hazard zone mapping, quality standards, guideline

Rechtliche Grundlagen

In den Gefahrenzonenplänen der Wildbach- und Lawinenverbauung werden die durch Wildbäche und Lawinen gefährdeten Bereiche und deren Intensität (Rote und Gelbe Gefahrenzone) dargestellt. Weiters werden Vorbehaltsbereiche (für Schutzmaßnahmen und besondere Schutzfunktion) und Hinweisbereiche (Erhaltung der Beschaffenheit des Geländes sowie Hinweise auf andere Gefahren) kartiert.

Die Grundlage der Gefahrenzonenplanung bildet § 11 des Forstgesetzes 1975 i.d.g.F. Darin ist das Prozedere der Genehmigung eines Gefahrenzonenplanes (kurz: GZP) festgehalten. Die Verordnung des BM f. Land- und Forstwirtschaft vom 30.07.1976, BGBl. Nr. 436/1976 (kurz: GZP-VO), regelt den genauen Inhalt und die Arbeiten zur Erstellung der Gefahrenzonenpläne sowie den Anwendungsbereich, der aus Sicht der WLV interne und externe Wirkung entfaltet.

Abgrenzung von Gefahrenzonen

Die Abgrenzung von Wildbach- und Lawinengefahrenzonen erfolgt gemäß den Kriterien der derzeit gültigen Gefahrenzonenplanrichtlinie des BMLFUW (Fassung vom 04.02.2011). Die dargestellten Gefahrenzonen stellen eine gutachtliche Feststellung der Summenlinie aller möglichen Ereignisszenarien in den Grenzen eines zirka 150-jährlichen Bemessungsereignisses dar. Wirkungen von über das Bemessungsereignis hinausgehenden („selteneren“) Ereignissen werden nicht dargestellt.

Die Abgrenzung von Gefahrenzonen erfolgt gem. ONR 24800 unter Anwendung nachstehender Methoden:

1. Historische Methode: Methode, die sich auf die Auswertung von Berichten, Zeugenaussagen und Chroniken stützt.
2. Morphologische Methode: Die Morphologie bzw. „Stumme Zeugen“ geben Aufschluss über den Prozesstyp und die räumliche Prozessabgrenzung.
3. Empirisch-statistische Methode: Methode, die auf Daten basiert, die direkt aus Messungen, aber auch indirekt durch Auswertung von „Stummen Zeugen“ erfolgen können.
4. Numerisch-mathematische Methode: Methode, bei der der Prozess auf Basis eines numerischen Modells abgebildet wird.
5. Physikalische Methode: Methode basierend auf hydraulischen Modellversuchen.

Die Auswahl der Methoden erfolgt durch den Gefahrenzonenplanverfasser. Dieser hat die Ergebnisse der verwendeten Methoden in Abstimmung mit den tatsächlichen naturräumlichen Gegebenheiten und den beim Bemessungsereignis ablaufenden Prozessen zu gewichten und zu bewerten. Die gutachtliche Bewertung des Planverfassers durch die Zusammenschau sämtlicher Methodenergebnisse führt schließlich zur Ausweisung der Gefahrenzonen.

Anwendung von Modellen

Im letzten Jahrzehnt hat die Anwendung von numerisch-mathematischen Methoden bei der Erstellung von Gefahrenzonenplänen deutlich an Bedeutung gewonnen. Während bei Lawinen die Verwendung von statistischen sowie 2- und 3-dimensionalen Verfahren heute als Stand der Technik anerkannt ist, stehen wir im Wildbachbereich, speziell bei fluviailem und murartigem Feststofftransport (aber auch bei Murgängen), bei der Anwendung mehrdimensionaler Modelle noch am

Anfang. Jedoch ist das fachliche Know-how bei der Anwendung derartiger Modelle durch die Einrichtung des Fachbereiches Wildbachprozesse bei der WLV im Jahr 2011 seither sprunghaft angestiegen. Empfehlungen für die Anwendung von Modellen bei den unterschiedlichen Prozessen samt deren Anwendungsgrenzen wurden ausgegeben, an Leitfäden für die einzelnen Modelle wird gearbeitet.

Von den insgesamt 7 maßgeblichen Kriterien für die Ausweisung von Wildbachgefahrenzonen sind jedoch derzeit nur 2 der Kriterien, nämlich „Stehendes Wasser“ und „Fließendes Wasser“, mit den gängigen Modellen abbildbar. Im Lawinenbereich kann das einzige Abgrenzungskriterium – der Druck – mit den vorhandenen mehrdimensionalen Modellen für Fließ- und Staublawinen ermittelt werden.

Das Fachwissen des Gefahrenzonenplanverfassers ist aber – oder gerade deshalb – nach wie vor gefragt, ja für die Ausweisung der Gefahrenzonen maßgeblich. Dies auch deshalb, da sämtliche Berechnungsergebnisse (einfache Berechnungen wie Simulationen) immer durch den Gefahrenzonenplanverfasser vor Ort und anhand von Chronikaufzeichnungen und Befra-

gungen auf Plausibilität geprüft werden müssen. Jene Prozesse, die nicht modellierbar sind, sind gutachtlich durch den Gefahrenzonenplanverfasser zu beurteilen.

Ausarbeitung von Qualitätsstandards

Im Rahmen der Strategie 2015 der Wildbach- und Lawinenverbauung wurde der Gruppe der österreichweiten Gefahrenzonenplanreferenten (Gruppe G) der Auftrag erteilt, Qualitätsstandards für die Gefahrenzonenplanung auszuarbeiten. Diese umfassen auch die Anwendung von Modellen. Ziel ist es, einen Mindeststandard für den Einsatz von Modellen bei der Ausweisung von Gefahrenzonen festzulegen.

Im vorläufigen Entwurf dieser Ausarbeitung ist die nachstehende Tabelle 1 enthalten. Diese sieht je nach Schadenspotenzial und maßgeblichem Prozess den Einsatz unterschiedlicher Modelle (nach den Vorgaben des Fachbereichs Wildbachprozesse sowie der Stabstelle Schnee und Lawinen) vor.

Die Modellanwendung gem. Tab. 1 ist als Mindeststandard zu verstehen und soll eine einheitliche Betrachtung in ganz Österreich im

Zuge der Ausarbeitung von Gefahrenzonenplänen sicherstellen. In begründeten Einzelfällen kann jedoch sehr wohl von diesem Mindeststandard nach „oben“ hin abgewichen werden, d.h. es können – in der Regel – mehrdimensionale Modelle angewandt werden.

Ein wesentliches Kriterium bei der Anwendung derartiger Modelle ist jedoch, dass keine „Standardsimulationen“ durchgeführt werden. Darunter sind Simulationen entlang des natürlichen Gewässerverlaufes ohne Einbeziehung von Szenarien (z.B. Verkläusung durch Wildholz, Geschiebeanlandungen o.ä.) zu verstehen. Derartige Berechnungen bringen keine Mehraussage für den Gefahrenzonenplaner und sind daher aus fachlicher Sicht abzulehnen.

Der sachverständigen Einschätzung des Gefahrenzonenplaners bei der Definition von beim Bemessungsereignis relevanten Szenarien kommt daher bei der Anwendung von Simulationen entscheidende Bedeutung zu. Derartige Szenarien und die bei Modellanwendung erhaltenen Ergebnisse sind vom Gefahrenzonenplaner vor Ort und anhand von Chronikaufzeichnungen und Befragungen auf Plausibilität zu prüfen.

Anschrift des Verfassers / Author's address:

DI Christoph Skolaut
Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Salzburg
Bergheimerstraße 57, 5020 Salzburg
Tel. +43 662 878153 – 300
E-Mail: christoph.skolaut@die-wildbach.at

Notiz des Schriftleiters:

Christoph Skolaut hat als mein Vorgänger in der Funktion des Technischen Referenten die Zeitschrift „Wildbach- und Lawinenverbau“ zu einer professionell gestalteten und international für ihre Qualität anerkannten Fachpublikation entwickelt. Für diese Leistung gebührt im großer Respekt und Anerkennung. Ich hoffe, diesen Standard im Sinne der Leserinnen und Leser sowie der eng verbundenen Autorenschaft halten und weiterentwickeln zu können.
Lieber Christoph, ich freue mich auf diese Herausforderung und danke dir in kollegialer Verbundenheit.

PROZESS	WILDBACH				LAWINE
	SITUATION	Hochwasser	fluviatiler Feststofftransport	murartiger Feststofftransport	
Einzelobjekte, Siedlung	profilweiser Nachweis	profilweiser Nachweis	profilweiser Nachweis	profilweiser Nachweis	stat. Verf. ggf. 2D
Ortszentrum	1D ggf. 2D	1D ggf. 2D	profilweiser Nachweis	profilweiser Nachweis	stat. Verf. 2D ggf. 3D
Sonstige Infrastruktur	profilweiser Nachweis	profilweiser Nachweis	profilweiser Nachweis	profilweiser Nachweis	stat. Verf. ggf. 2D

Tab. 1: Anwendung von Modellen in Abhängigkeit vom Schadenspotenzial und vom maßgeblichen Prozess

Tab. 1: Application of numerical models depending on the damage potential and the relevant process

WASSER- UND GRUNDBAU, STATIK, BAULEITUNG UND PLANUNG

STAATLICH BEFUGTER UND BEEIDETER
ZIVILINGENIEUR FÜR DAS BAUWESEN

INGENIEURBÜRO TSCHERNUTTER

Univ.-Prof. DI Dr. Peter Tschernutter

FABRIKSTEIG 10/11, 9500 VILLACH
TEL. 04242-23113, FAX. 23113-3, e-Mail: office@zt-tschernutter.at

Rückhaltebecken Buchbachl
Dosiersperr Vordeberg

PETER ANDRECS, KARL HAGEN

Methodik zur Bewertung von Naturgefahrenprozessen

Methodology for assessment of natural hazard processes

Zusammenfassung

Naturgefahrenprozesse sind aufgrund ihres komplexen Wirkungsgefüges schwer zu beurteilen. Eine Möglichkeit zu einem nachvollziehbaren Bewertungsschema zu kommen, besteht in einer vereinfachten, strukturierten Bewertung der einzelnen Einflussgrößen und -parameter des zu beurteilenden Naturgefahrenprozesses. Mit der Entwicklung eines entsprechenden Ansatzes wurde am BFW bereits 2009 begonnen. Im Zuge der Weiterentwicklung des Ansatzes (im Rahmen verschiedener Alpine Space Projekte) wurde im Sommer 2011 eine online-Expertenbefragung durchgeführt, die die Prozessstypen Hochwasser in Wildbacheinzugsgebieten, Muren, spontane Lockersedimentrutschungen, Steinschlag und Lawinen umfasste. Das wichtigste Ergebnis dieser Befragung war die Bewertung der Relevanz maßgeblicher Prozessparameter auf den Gesamtprozess. Dabei zeigte sich, dass klimatische Faktoren bei fast allen untersuchten Prozessstypen höher als einzugsgebiets- oder prozessspezifische Faktoren bewertet wurden. Dies lässt die grundsätzliche Bedeutung des Klimawandels auf Naturgefahrenprozesse erkennen. Die Temperatur (als derzeit einzige, sich nachweislich ändernde Größe des Klimawandels) ist aber nur beim Prozessstyp Lawine bedeutsam, bei den meisten anderen Prozessstypen wurde der Niederschlag am höchsten gewichtet.

Stichwörter:

Naturgefahrenprozesse, Bewertungsmethode, Prozessparameter, Expertenbefragung

Abstract:

Natural hazard processes are very complex and therefore difficult to assess. A methodological approach to get a comprehensible evaluation scheme is based on the determination of the relevance of single factors and subfactors (parameters) for specific natural hazard processes. Based on the results achieved in the previous Alpine Space project AdaptAlp, the BFW performed an online-Expert-Survey in summer 2011 which included questions on flood events in torrents, debris flows, spontaneous landslides in loose material, rockfall and avalanches. The assessment of the parameters shows that for most processes climatic factors are rated higher than catchment-specific or process-specific factors. This suggests a considerable role of climate change in natural hazard processes. However, presently temperature is the only provable parameter in relation to climate change and this parameter only influences the process type "avalanche" significantly, whereas precipitation is rated highest for the other natural hazard processes.

Keywords

natural hazard processes, assessment method, process criteria, expert poll

Einleitung

Der Klimawandel als öffentliches Dauerthema führt auch im Bereich des Naturgefahrenmanagements zu heftigen Diskussionen. Politische Entscheidungsträger erwarten dabei von Fachleuten Hilfestellungen und klare Aussagen über mögliche Auswirkungen geänderter klimatischer Rahmenbedingungen auf das Gefährdungspotenzial durch Naturgefahren. Diese Prozesse sind als komplexe Systeme bezüglich ihrer Zusammenhänge von Ursache und Wirkung aber schwer zu beschreiben.

Es war daher das Ziel der Autoren, zunächst einmal die Vielfalt an Einflussparametern, die in ihrem Zusammenwirken die Naturgefahrenprozesse bestimmen, strukturiert darzustellen. Darauf aufbauend sollte eine Methodik zur Quantifizierung dieser Parameter entwickelt werden. Ausgangspunkt war die Überlegung, dass sich mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Parameter einfacher erklären lassen, als

Auswirkungen des Klimawandels auf gesamte Naturgefahrenprozesse. Transparente Bewertungen der einzelnen Parameter sollen schlussendlich zu einer nachvollziehbaren Gesamtbeurteilung des Naturgefahrenprozesses führen. Über die Relevanz der einzelnen Parameter und die (vermuteten) Änderungen durch den Klimawandel lassen sich Rückschlüsse auf die Sensitivität des jeweiligen Naturgefahrenprozesses in Hinblick auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels ziehen.

Diese nachvollziehbare Darstellung bietet die Möglichkeit zu entscheiden, ob die Auswirkungen des Klimawandels auf den Prozess wesentlich und daher bei der prozessspezifischen Gefahrenbeurteilung zu berücksichtigen sind, wobei selbstverständlich regionale bzw. lokale Besonderheiten beachtet werden müssen. Daher steht in diesem Beitrag die Darstellung der Methodenentwicklung selbst im Vordergrund. Zunächst wurde die Struktur für die Parameterdarstellung der Naturgefahrenprozesse entworfen und darauf aufbauend die Parameter im Rahmen einer online-Expertenbefragung bewertet. Aufgrund

dieser Ergebnisse wurde die Struktur in einem zweiten Entwicklungsschritt weiter verbessert und eine neuerliche Expertenbefragung durchgeführt. Beispielhaft werden nachstehend auch einige der bislang erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Methodik – Entwicklungsphase 1

Im Projekt AdaptEvent („Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel“) wurde am BFW 2009 erstmalig eine solche Methodik entwickelt. AdaptEvent selbst war Bestandteil des Workpackages 5 (Hazard Mapping) des EU AlpineSpace-Projekts AdaptAlp („Adaptation to Climate Change in the Alpine Space“). Für die Prozesse Hochwasser in Wildbacheinzugsgebieten, Muren, Rutschungen und Lawinen wurden die Parameter hinsichtlich ihrer Relevanz für den jeweiligen Prozess, ihren Informationsgehalt, Qualität und Unsicherheiten sowie auf ihre mögliche Beeinflussung durch den Klimawandel bewertet (Andreca et al., 2010).

Relevanz	Definition/Beschreibung
0	keine Relevanz
1	geringe Relevanz (Einfluss grundsätzlich gegeben, aber im Vergleich zur dominierenden Wirkungsgröße vernachlässigbar)
2	Relevanz gering bis mittel
3	mittlere Relevanz (eine Nichtbeachtung des Parameters führt zu deutlichen Fehlern bei der Kenngrößenbeurteilung)
4	starke Relevanz
5	größte Relevanz - wichtigste(r) Parameter

Tab. 1: Definition der Relevanz einzelner Parameter innerhalb der jeweiligen Einflussgröße auf den jeweiligen Prozess („relative“ Bedeutung)

Tab. 1: Definition of the relevance of a single parameter within its influencing value of a different process („relative“ relevance)

Die untersuchten Parameter deckten dabei folgende Bereiche (Einflussgrößen) ab: Niederschlag, Landnutzung, Topografie, Vegetation, Geologie und Boden, Temperatur, Wind und Globalstrahlung. Jeder Parameter (z.B. Niederschlagsintensität) wurde zunächst definiert und Aufwand und Methoden, mit der er bestimmt bzw. gemessen werden kann, dargestellt. Die Qualität der für diese Parameter zur Verfügung stehenden Datengrundlagen wurde bewertet und die Bedeutung des Parameters für den Prozess beschrieben. Abschließend erfolgte eine qualitative Bewertung der Relevanz dieses Parameters für den jeweiligen Prozess mittels des in Tabelle 1 dargestellten Bewertungsschlüssels. Die Festlegung der Relevanz innerhalb der jeweiligen Einflussgröße (z.B. welche Relevanz hat der Parameter Niederschlagsintensität innerhalb der Einflussgröße Niederschlag) wurde dabei als „relative“ Bedeutung bezeichnet.

Im Rahmen der Ende 2009 durchgeführten online-Expertenbefragung wurde daraufhin die Relevanz der Einflussgrößen nach dem gleichen Bewertungsschlüssel abgefragt. Aufgrund von über 100 Rückmeldungen konnte durch die

Einflussgröße	A Bedeutung	Einflussparameter	Bedeutung	
			B relativ	C absolut
Niederschlag	4,5	Niederschlagssumme	4,5	20
		Niederschlagsintensität	5,0	23
		Niederschlagsverteilung - räumlich	3,0	14
		Niederschlagsverteilung - zeitlich	3,0	14
		Niederschlagsart (fest/flüssig)	1,5	7
Geologie, Boden	4,0	Lockersubstrateigenschaften	5,0	20
		Infiltration	5,0	20
		Wasserspeicherkapazität	5,0	20
		Lockersubstratmächtigkeit	4,0	16
		Grundsubstrat (Festgestein)	3,0	12
Temperatur	1,75	Lufttemperatur	4,0	7
		Temperatur - Untergrund	3,0	5

Tab. 2: Beispiel für die Bedeutung von Einflussgrößen (Ergebnis der online-Expertenbefragung 2009) und der Relevanz einzelner Parameter innerhalb der jeweiligen Einflussgröße („relative“ Bedeutung) und deren „absolute“ Bedeutung C (=AxB) für den Prozesstyp Muren

Tab. 2: Example for the relevance of influencing factors (results of the online-Expert-Survey 2009) and the relevance of single parameters within its influencing factor („relative“ relevance) and their „absolute“ relevance C (=AxB) for debris flows

Multiplikation der Relevanz der Einflussgröße (z.B. Niederschlag) mit der „relativen“ Bedeutung des Parameters (z.B. Niederschlagsintensität) die „absolute“ Bedeutung dieses Parameters bestimmt werden. Tabelle 2 zeigt als Beispiel die Bewertung einzelner Parameter der Einflussgröße Niederschlag, Geologie und Boden bzw. Temperatur für den Prozesstyp Mure, wobei dem Einflussparameter Niederschlagsintensität in diesem Fall die größte Bedeutung zugemessen wurde. Diese Expertenmeinung stimmt mit Ergebnissen der Auswertungen von über 3.000 Schadensereignissen in Wildbacheinzugsgebieten (Andreca, 1996) überein, die zeigten, dass kurze Starkregen für die Auslösung von Murenereignissen hauptverantwortlich sind.

Was bedeutet dies in Hinblick auf die Beurteilung möglicher Veränderungen durch den Klimawandel für den Naturgefahrenprozess Mure? Die Temperatur ist die einzige Einflussgröße zu der es (überregional) gesicherte Erkenntnisse über die Veränderung im Zuge des Klimawandels gibt. Der direkte Einfluss der Temperatur auf Muren wurde jedoch von den Experten als gering eingestuft. Allerdings hat die Temperatur auch indirekte Effekte. Einer ist die mögliche Wirkung des Temperaturanstieges auf die Vegetation (Waldgesellschaften etc.) im alpinen Raum. Von Vegetationsaufbau und -zusammensetzung werden der Bodenwasserhaushalt, Konzentrationszeiten aber auch die Erosionsanfälligkeit (Geschiebehauhalt)

beeinflusst. Der Anstieg der Permafrostgrenze durch die Temperaturerhöhung kann sich lokal erheblich auf das Geschiebepotenzial auswirken.

Für die indirekten Auswirkungen können derzeit, geeignete Datengrundlagen vorausge-

setzt, nur ausgewählte (regionale) Entwicklungsszenarien erstellt werden. Tabelle 3 gibt die für die Einflussgrößen Niederschlagsintensität und Lufttemperatur verfügbare Datenbasis sowie deren Qualität an.

Einflussparameter	verfügbare Datenbasis	Bestimmungsaufwand und -methode	Qualität der Datengrundlagen	Bedeutung für Prozess
Niederschlagsintensität [mm/h]	Standardfunktionen: Empfehlungen Bemessungsereignis BMLFUW, ÖKOSTRA, Lorenz/Skoda (Hydr. Atlas)	Berechnung, nieder	2-3	Bodenfeuchte, Spitzendurchfluss, Hochwasserfracht, Ereignisganglinie, Erosion/Geschiebemobilisierung
	Dokumentationen, Zeugenaussagen, Austro Control, ZAMG	Metainformationen nieder	3-5	
		Nachrechnungen mittel	2-4	
		Wetterradar/INCA hoch/mittel	2-4	
	Messreihen (HD, ZAMG, Kraftwerksbetreiber, privat. Messstellenbetreiber)	Ombrometer mittel	3-5	
Ombrographen hoch		1-2		
Lufttemperatur [°C]	ZAMG, automatische Wetterstationen der Lawinenwarndienste	Messung Aufwand nieder bei digitaler Aufzeichnung Aufwand hoch bei analoger Aufzeichnung	2	Phasenzustand des Wassers Wasserdampfsättigung der Luft, die Entstehung von Niederschlag durch Abkühlung von Luftmassen Retention von Niederschlag in Form von Schnee, Schneeschmelze, Hochwasserauslösung und -verlauf Einfluss auf Abfluss durch Wirkung auf Vegetation (Waldzustand, Baumart, Vegetationsdecke) Speichervermögen des Bodens über Evapotranspiration der Vegetation

Legende: Qualität der abgeleiteten Kenngrößen: 1...gesichert, 2...mit nur geringen Unsicherheiten, 3...mit Unsicherheiten, 4... mit großen Unsicherheiten, 5... mit sehr großen Unsicherheiten

Legend: Quality of derived key factors: 1...secure, 2...with slight uncertainties, 3...with uncertainties, 4...with large uncertainties, 5...with very large uncertainties

Tab. 3: Datenbasis, Bestimmungsmethode und –aufwand, Qualität der Datengrundlagen sowie die Bedeutung der Einflussparameter Niederschlagsintensität und Lufttemperatur für den Naturgefahrenprozess Mure

Tab. 3: Database, method and maintenance of assignment, quality of database and relevance of the parameters precipitation intensity and air temperature for debris flows

Die höchste Qualität der Datengrundlagen für die Ermittlung von Niederschlagsintensitäten liefern nach Tabelle 3 Ombrographen. Das derzeitige Niederschlagsmessnetz ist für die Erfassung der für Muren häufig maßgeblichen, kleinräumigen Niederschlagszellen besonders im topografisch stark gegliederten Raum jedoch nicht ausreichend. Für die Ermittlung von Niederschlagsintensitäten muss daher oft auf Datengrundlagen zurückgegriffen werden, die auf Basis gebietsübergreifender Messwertinterpretationen und/oder Modellierungen abgeleitet wurden (z.B. ÖKOSTRA).

Hinsichtlich der möglichen Entwicklungen des Niederschlagsgeschehens (Intensität, Dauer, Summe) im Zuge des Klimawandels in Bezug auf mögliche Reaktionen naturräumlicher Systeme sind folgende Fragen zu klären:

- Für welchen Prozesstyp sind welche Niederschlagsparameter entscheidend?
- Wie entwickeln sich diese Niederschlagsparameter?
- Welche Auswirkungen haben diese Entwicklungen regional/lokal auf die unterschiedlichen Prozesstypen?

Im Alpenraum kann nicht generell von einem Gefahrenanstieg durch klimainduzierte Naturgefahrenprozesse ausgegangen werden. Auswirkungen auf Prozesse sind vielmehr nach Prozesstypen getrennt und regional gegliedert zu beurteilen, wobei selbst innerhalb eines Prozesstyps Veränderungen unterschiedliche Auswirkungen haben können.

Methodik – Entwicklungsphase 2

Im Rahmen der Auswertungen der Ergebnisse von AdaptEvent zeigte sich, dass hinsichtlich der Methodik Verbesserungspotenzial bestand. Dies betraf die Struktur der Parameterdarstellung und die Bewertung der Parameter nach bestimmten Klassen (Schulnotenprinzip). Bei dieser Art der Be-

wertung kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein mit 5 bewerteter (wichtigster) Parameter 5mal wichtiger als ein mit 1 bewerteter Parameter (geringe Relevanz) ist. Ebenso gab es keine Möglichkeit, Parameter, die bei mehreren Einflussgrößen vorkommen (z.B. der Parameter Infiltration, der sowohl bei den Einflussgrößen Vegetation, als auch Landnutzung sowie Boden bzw. Geologie angeführt war) in ihrer Gesamtwirkung auf den jeweiligen Prozess zu bewerten. Daher wurde im Rahmen des EU finanzierten Alpine Space Projektes PARAMount (imProved Accessibility: Reliability and security of Alpine transport infrastructure related to mountainous hazards in a changing climate) im Jahr 2011 die Methode weiterentwickelt und auf dieser Grundlage eine neuerliche online-Expertenbefragung gestartet.

In einem ersten Schritt wurde die Struktur, in der alle Einflussparameter die für die verschiedenen Prozesstypen relevant sind, überarbeitet. Dafür mussten verschiedene Modellansätze der einzelnen Prozesstypen analysiert, die zur Anwendung kommenden Inputparameter aufgelistet, mit Experten diskutiert und Ergebnisse vorangegangener Arbeiten ausgewertet werden. Als nächster Verbesserungsschritt erfolgte die Zuordnung der Parameter zu einem dem Prozessverlauf folgenden Schema. Diese ging von möglichen Auslösefaktoren von Naturgefahrenprozessen (klimatisch/hydrologischen Einflussfaktoren), gebietspezifischen Grundvoraussetzungen und prozessrelevanten Einflussfaktoren aus.

Im Bewertungsschema wurde von der Übersicht hin zum Detail gearbeitet. Zunächst erfolgte die Bewertung von thematisch zusammengefassten Bereichen [Übersicht Level 1 – Einflussfaktoren, z.B. einzugsgebietspezifische Faktoren, danach Level 2 – (Einflussgrößen, z.B. N (=Niederschlag) und schließlich die Details (Level 3 – Einflussparameter, z.B. N-Int (=Niederschlagsintensität)]. Die Summe der Gewichtungen jeder

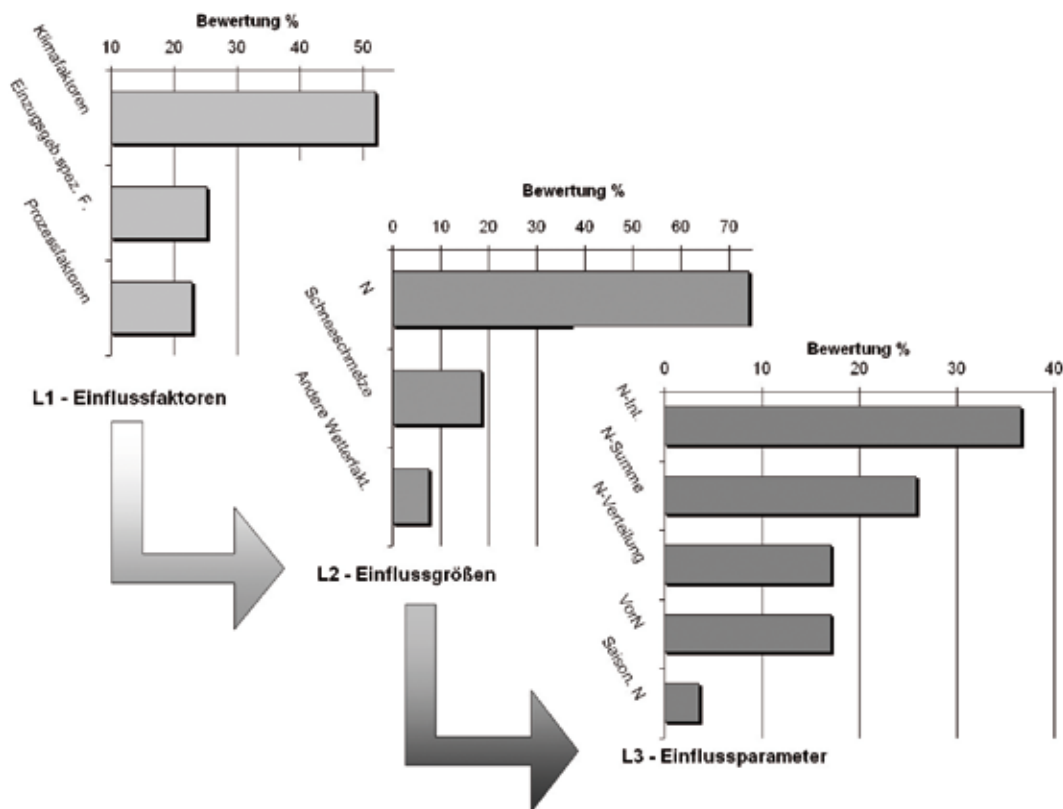


Abb. 1: Schema für die Bewertung von Einflussfaktoren, -größen und -parameter

Fig. 1: Scheme for the rating of influencing factors, values and parameters

Ebene musste jeweils 100% ergeben. Über die Multiplikation der Gewichtungen von Einflussfaktoren, -größen und -parametern ließ sich somit die Bedeutung jedes einzelnen Parameters errechnen. Anhand eines Beispiels für die Bewertung eines einzelnen Einflussparameters des Prozessstyps „Hochwasser in Wildbacheinzugsgebieten“ wird die Ableitung der Gewichtung der Parameter in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Durch die prozentuelle Bewertung wird jeder Einflussparameter quantifizierbar – d.h. ein Parameter, der mit 40% bewertet wurde, kann als ca. doppelt so wichtig wie ein Parameter der mit 20% gewichtet wurde angesehen werden. Einzelne Parameter, die bei mehreren Einflussgrößen vorkommen (wie z.B. der Parameter Landnutzung

bei den Einflussgrößen Infiltration, Vegetation, Abflusseigenschaften des Geländes etc.) können durch Aufsummieren der jeweils erzielten Gewichtungen in ihrer Gesamtbedeutung für den Prozess dargestellt werden. Dies war nach einer Gewichtung auf Basis des in Tabelle 1 dargestellten Schemas aus dem Projekt AdaptEvent noch nicht möglich.

Erste Ergebnisse der weiterentwickelten Methodik

Einzelparameter eine möglichst breite Datenbasis zu Grunde legen zu können, wurden rund 300 Experten aus dem Alpenraum per Email eingeladen im Rahmen einer online-Befragung ihre Bewertungen vorzunehmen. Diese online-Experten-

befragung wurde im Sommer 2011 gestartet und war 4 Wochen lang im Internet aufrufbar.

Die Befragung bezog sich auf folgende 5 Naturgefahrenprozesse:

- Hochwasser in Wildbacheinzugsgebieten
- Muren
- Spontane Lockersedimentrutschungen
- Steinschlag
- Lawinen

Den Teilnehmern war es freigestellt, welche und wie viele der Prozesse sie bewerten. Schlussendlich gaben beinahe 100 Experten für insgesamt 138 Prozesse vollständige Beurteilungen ab, wobei sie sich durchschnittlich 26 Minuten Zeit pro Prozess nahmen. Abbildung 2 zeigt, aus welchen Ländern die Teilnehmer stammten.

Am Beispiel des Naturgefahrenprozesses Mure wird in der Folge die Bewertung der einzelnen Parameter gezeigt. Bei der Umfrage wurden

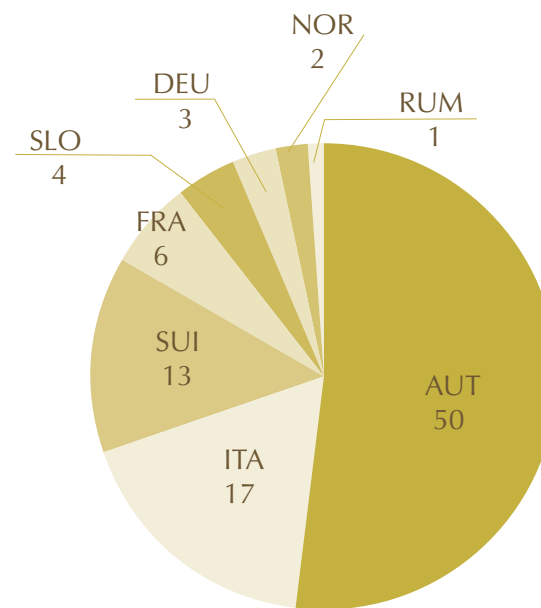


Abb. 2: Anzahl der Teilnehmer geordnet nach dem Land ihres Dienortes - BFW-online-Expertenbefragung 2011

Fig. 2: Number of participants by country of duty station - BFW-online-Expert-Survey 2011

unter dem Begriff Muren sowohl "klassische" Muren im Gerinnebereich (inklusive "hyperconcentrated flow") als auch durch Rutschungen ausgelöste Hangmuren zusammengefasst. Aus Abbildung 3 wird die Gewichtung der Einflussfaktoren ersichtlich.

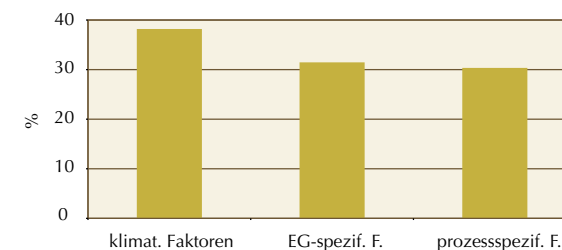


Abb. 3: Level 1: Gewichtung der Einflussfaktoren für Muren – BFW-online-Expertenbefragung 2011

Fig. 3: Level 1: Rating of influencing factors in debris flow – BFW-online-Expert-Survey 2011

Wie bei Hochwasserereignissen in Wildbächen wurden auch bei Muren im Level 1 die klimatischen Faktoren am höchsten gewichtet. Die beiden anderen Einflussfaktoren (einzugsgebietsspezifische bzw. prozessspezifische Faktoren) wurden mit jeweils knapp über 30% deutlich höher gewichtet als bei Hochwasserereignissen in Wildbächen. Die Bewertungen des Levels 2 zeigen die Abbildungen 4 bis 6.

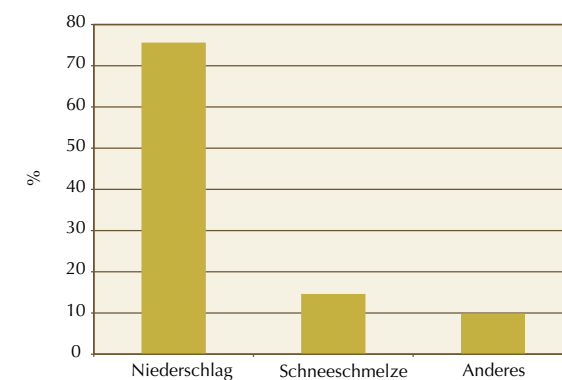


Abb. 4: Level 2: Gewichtung der klimatischen Einflussgrößen für Muren - BFW-online-Expertenbefragung 2011

Fig. 4: Level 2: Rating of climatic influencing values in debris flow – BFW-online-Expert-Survey 2011

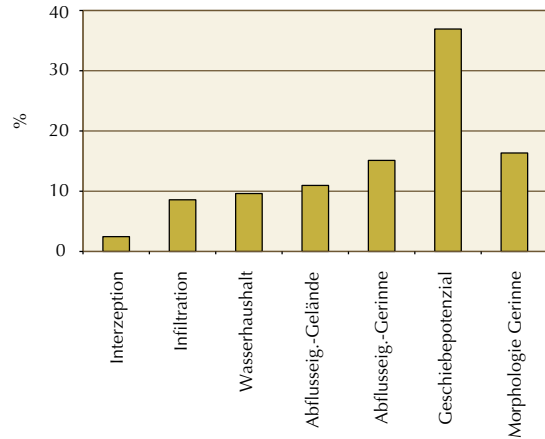


Abb. 5: Level 2: Gewichtung der einzugsgebietspezifischen Einflussgrößen für Muren - BFW-online-Expertenbefragung 2011

Fig. 5: Level 2: Rating of catchment-relevant influencing values in debris flow - BFW-online-Expert-Survey 2011

Bei der Gewichtung der klimatischen Einflussgrößen zeigte sich der Niederschlag als die maßgebliche Größe (Abbildung 4). Bei den einzugsgebietspezifischen Einflussgrößen lag das Geschiebepotenzial mit über 35% weit höher als die anderen Einflussgrößen (Abbildung 5). Bei den prozessspezifischen Einflussgrößen wurde der Einfluss der Gelände- bzw. Gerinnemorphologie auf den Prozess typ höher als das Materialverhalten bewertet (Abbildung 6).

Anschließend wurden auf Level 3 die einzelnen Parameter bewertet. Über die Multipli-

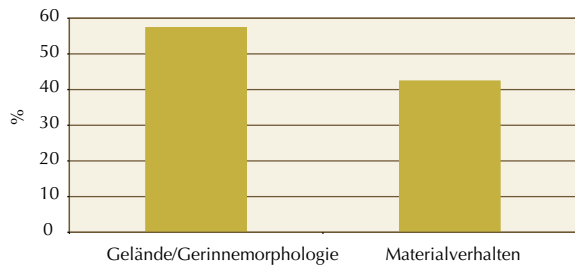
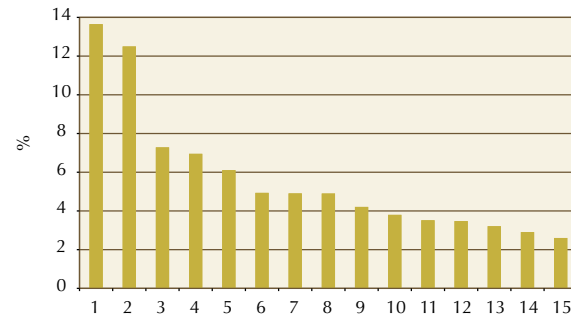


Abb. 6: Level 2: Gewichtung der prozessspezifischen Einflussgrößen für Muren - BFW-online-Expertenbefragung 2011

Fig. 6: Level 2: Rating of process-specific influencing values in debris flow - BFW-online-Expert-Survey 2011



Nr	Parameter
1	Niederschlagsintensität
2	Gerinne- und Geländegeometrie (Längs- und Querprofile,...)
3	Materialeigenschaften
4	Niederschlagssumme
5	Oberflächenrauigkeit (Fließwiderstand,...)
6	Lockermaterial - Mobilisierbarkeit im Transportbereich
7	Verkläusungsmöglichkeiten
8	Lage und Volumen des Geschiebes im Gelände
9	Lage und Volumen des Geschiebes im Gerinne
10	Landnutzung - Vegetation (LW, FW)
11	Abschmelzgeschwindigkeit
12	Niederschlagsverteilung
13	Vorniederschläge
14	Bodentemperatur (Frost)
15	Lufttemperatur (Schneefallgrenze,...)

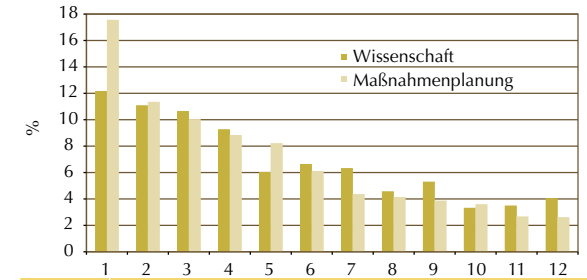
Abb. 7: Level 3: Gewichtung der Einflussparameter für Muren – BFW-online-Expertenbefragung 2011

Fig. 7: Level 3: Rating of influencing parameters in debris flows – BFW-online-Expert-Survey 2011

kation der Gewichtungen der drei verschiedenen Levels wurde schlussendlich die Bedeutung jedes einzelnen Einflussparameters ermittelt. Mit 13,7% wurde der Einflussparameter Niederschlagsintensität am höchsten bewertet. Knapp dahinter wurden die Gerinne- und Geländegeometrie (12,5 %) gereiht. Abbildung 7 stellt die Gewichtung der 15, von den Experten als am wichtigsten angesehenen Parameter für Muren dar. Alle anderen Parameter wurden unter 2% gewichtet, wobei deren Reihung von der Schneemenge (Wasseräquivalent), Lithologie (Lockermaterial inkl. Auflage), Neigungsverhältnisse, Querprofile (Breite, Retentionsmöglichkeiten, etc.), saisonale Niederschläge, Geländemorphologie (Geländeneigung, -form,...), Geologie, Einzugsgebietsform bzw. -größe, Interflow, Standortseigenschaften/Wuchspotenzial bis hin zum Wind (im Ereignisfall) als unbedeutendster Einflussparameter erfolgte.

Im Rahmen von Fachveranstaltungen zum Themenkreis „Naturgefahren und Klimawandel“ wird häufig die Frage diskutiert, in wie weit die Sichtweisen von Wissenschaft und Maßnahmenplanung in diesem Bereich übereinstimmen bzw. ob Experten dieser beiden Gruppen „die gleiche Sprache sprechen“. Auf Basis der Antworten der online-Expertenbefragung konnte auch dieser Aspekt näher untersucht werden. Insgesamt kamen 85% aller Teilnehmer aus den Bereichen „Wissenschaft und Forschung“ sowie der „Maßnahmenplanung und Umsetzung“. Da von diesen Expertengruppen ungefähr gleich viele Antworten vorlagen, lassen sich die Ergebnisse gut vergleichen.

Unabhängig von der Prozessart stellte sich dabei heraus, dass die Beurteilungen der beiden Expertengruppen größtenteils sehr ähnlich waren. Als Beispiel dafür sind in Abbildung 8 die Bewertungen der Einflussparameter von Hochwasserereignissen in Wildbächen dargestellt. Dabei sind die Bewertungen der beiden Expertengruppen für die 12 als am wichtigsten eingestuf-



Nr	Parameter
1	Niederschlagsintensität
2	Landnutzung - Vegetation (LW, FW)
3	Niederschlagssumme
4	Landnutzung - bebautes Gebiet (Infrastruktur, Schipisten,...)
5	Niederschlagsverteilung
6	Vorniederschläge
7	Lithologie (Lockermaterial inkl. Auflage)
8	Schneesmelze
9	Abschmelzgeschwindigkeit
10	Gerinnegeometrie (Längs- und Querprofile,...)
11	Geländemorphologie
12	Temperatur

Abb. 8: Vergleich der Gewichtung von Einflussparametern von Hochwasserereignissen in Wildbächen durch Experten aus dem Bereich der Maßnahmenplanung sowie der Wissenschaft - BFW-online-Expertenbefragung 2011

Fig. 8: Comparison of ratings of parameters of flood events by practitioners and researchers - BFW-online-Expert-Survey 2011

ten Einflussparameter einander gegenübergestellt (alle anderen Einflussparameter wurden von beiden Gruppen mit max. 2% gewichtet).

Aus Abbildung 9 kann die grundsätzlich hohe Relevanz von sich ändernden, klimatischen Einflussfaktoren auf die Naturgefahrenprozesse (insbesondere bei „Hochwasser in Wildbacheinzugsgebieten“ und „Lawinen“) abgeleitet werden.

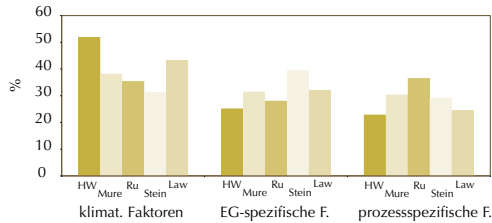


Abb. 9: Bedeutung der Einflussfaktoren in verschiedenen Naturgefahrenprozessen - BFW-online-Expertenbefragung 2011.

Fig. 9: Relevance of influencing factors in different natural hazard processes - BFW-online-Expert-Survey 2011

Bei den verschiedenen Prozesstypen sind aber unterschiedliche Einflussparameter oder auch -kombinationen bedeutsam. Nicht alle davon werden nach momentaner Einschätzung größeren Veränderungen unterworfen sein bzw. bedeuten Veränderungen nicht automatisch eine Erhöhung von Gefahrenpotenzialen.

Ein auffälliger Unterschied zeigte sich allerdings bei der Beurteilung der Niederschlagsintensität. Diese wurde seitens der Maßnahmenplanung mit 18% deutlich höher bewertet als von der Wissenschaft und Forschung (12%). Von beiden Gruppen wurde die Niederschlagsintensität aber als maßgeblichster Einflussparameter angesehen. Darüber hinaus erfolgten die Gewichtungen der einzelnen Einflussparameter von beiden Expertengruppen jedoch sehr ähnlich, wodurch auch die Reihung der Parameter nach deren Wichtigkeit ein weitgehend einheitliches Bild ergab.

Zusammenfassung

Die im Rahmen von AdaptEvent erzielten Ergebnisse lassen sich aufgrund der Weiterentwicklung der Bewertungsmethodik nicht direkt mit jenen der Expertenbefragung in Paramount vergleichen. Auch die Parameterstruktur wurde durch Veränderungen in ein von der Methodik her besser abgrenzbares Schema übergeführt. Trotzdem kann von einer weitgehenden Bestätigung der Ergebnisse der ersten Befragung durch die Bewertun-

gen der Experten im Rahmen der Befragung 2011 gesprochen werden. Die bei AdaptEvent als am bedeutsamsten bewerteten Parameter der einzelnen Naturgefahrenprozesse finden sich auch bei den Auswertungen im Rahmen von Paramount als jene mit der höchsten Gewichtung wieder.

Die auf Basis der online-Expertenbefragung gewonnenen Ergebnisse sind Durchschnittswerte von Meinungen, die auf dem Wissen vieler Experten beruhen. Sie können dadurch als grundsätzlich „objektiver“ als Einzelmeinungen angesehen werden und als Grundlage für eine sachorientierte und strukturierte Diskussion dienen.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Dr. Peter Andrecs
BFW, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Hauptstraße 7, 1140 Wien
peter.andrecs@bfw.gv.at

DI Karl Hagen
BFW, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Hauptstraße 7, 1140 Wien
karl.hagen@bfw.gv.at

Literatur / References:

ANDRECS P., HAGEN K., FROMM R., GAUER P., HÖLLER P., KLEBINDER K., KOHL B., LANG E., MARKART G., PERZL F., STARY U., ZEIDLER A. (2010): AdaptEvent. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Endbericht des BFW im Auftrag des BMLFUW im Rahmen des EU Projekts AdaptAlp ("Adaptation to Climate Change in the Alpine Space"), Wien: S. 321 <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=8601>

ANDRECS P., 1996: Analyse und statistische Auswertung von Hochwassermeldungen 1972-1993. Grundlage für die Bewertung von Gefährdung durch Wildbäche, Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, Wien, (170): S 143



Gerade im Bereich Schutz vor Naturgefahren ist neben dem technischen Schutz das Vorausdenken für die nächsten Generationen ein wesentliches Thema.

Hochlagenaufforstungen, die erst in zwanzig Jahren wirksam sein werden, brauchen heute die notwendigen Flächen und das bedarf oft einer intensiven vorausschauenden Kommunikation. SVWP begleitet und betreut die.wildbach seit 15 Jahren in der vorausschauenden Kommunikation zum Schutz vor Naturgefahren.

Kommunikation ist immer und überall. »Man kann nicht nicht kommunizieren«, hat das Paul Watzlawick einmal pointiert ausgedrückt. Die entscheidende Frage ist vielmehr, ob und wie Kommunikation wirkt.

SVWP befasst sich mit unterschiedlichen Formen der Kommunikation. Dabei gilt es immer zu beachten: die »richtigen« Menschen und Gruppen zur rechten Zeit anzusprechen, das Gesagte so zu formulieren, dass es verstanden wird, und dabei die geeigneten Kanäle zu bespielen, um die angestrebten Ziele zu erreichen.

SVWP bietet seit 15 Jahren Beratung und Training im Bereich Kommunikationsmanagement und gestaltet interne und externe Kommunikation. SVWP Kommunikationsmanagement GmbH ist seit 1997 in Tirol tätig, seit 2001 österreichweit mit einem Standort in Wien und betreibt seit 2012 ein Büro in Graz.

www.svwp.at
Innsbruck – Wien – Graz

**KLAUS KLEBINDER, BERNADETTE SOTIER, ALEXANDER EDER, PETER STRAUS,
GERHARD MARKART, HELMUT AIGNER, GERHARD HOLZINGER, CHRISTIAN KRAMMER**

Hydrologische Bodenkennwerte und Abflussreaktionstypen für Niederösterreich

Hydrological soil properties and runoff reaction types for Lower Austria

Zusammenfassung

Neben den Niederschlagsverhältnissen, der Vegetation / Landnutzung und der Geologie stellt der Boden die wichtigste naturräumliche Komponente im Abflussgeschehen dar. Bis jetzt liegen in Österreich nur für landwirtschaftlich genutzte Einheiten homogene flächige Bodeninformationen vor. Im Projekt HYDROBOD-NÖ wurden für das gesamte Bundesland Niederösterreich flächenhafte Bodendaten generiert und mit bodenhydrologischen Kennwerten belegt. In einem neu entwickelten Modell konnten die Informationen klassifiziert werden, indem für unterschiedliche Niederschlagsszenarien und Systemzustände die dominante Abflussreaktion und Abflussbeiwerte ermittelt wurden. Die Ergebnisse stellen eine wertvolle Basis zur künftigen Abschätzung von Hochwasserabflüssen dar.

Stichwörter

Bodenkennwerte, Bodenbewertung, dominante Abflussprozesse, Abflussbeiwerte, Niederösterreich

Abstract

Aside from precipitation, land cover, land use and geology, soil is the most important component influencing runoff behaviour. In Austria, homogenous soil maps are only available for agricultural areas. Spatial soil data were generated for the entire province of Lower Austria within the HYDROBOD-NÖ project and assigned with pedo-hydrological parameters. A new simple model was developed to classify these data and ascertain both the dominant run-off process and run-off coefficients. Different rain events and system conditions were used in this assessment. The results of the project form a valuable basis for future flood flow estimations.

Keywords

Soil properties, soil evaluation, dominant run-off processes, run-off coefficients, Lower Austria

Einleitung

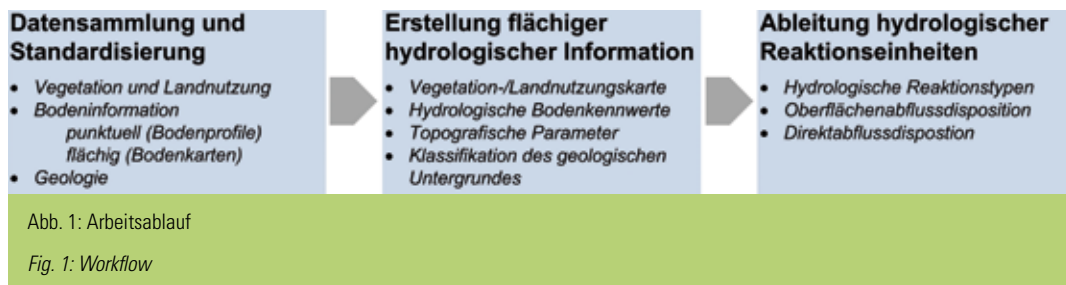
Die Entstehung von Hochwasserabflüssen wird, neben den meteorologischen Rahmenbedingungen, wesentlich durch die räumliche Verteilung landschaftsbildender Faktoren beeinflusst. Geologisches Substrat, Art und Zustand der Böden, Vegetation sowie Art und Intensität der Landnutzung bestimmen die Prozesse der Abflussbildung in einem hohen Ausmaß, wobei den einzelnen Komponenten des naturräumlichen Inventars in Abhängigkeit vom Niederschlagstyp (konvektiv, advektiv oder kombiniert), Systemzustand (z.B. Vorfeuchte) und Einzugsgebietsgröße unterschiedliche Gewichtung beizumessen ist.

Die Komplexität der Abflussbildungsprozesse sowie die hohe zeitliche Variabilität einiger Einflussgrößen resultieren in einer Vielzahl von Ansätzen zur Bewertung oder Klassifikation der naturräumlichen Ausstattung in mehr oder weniger einfachen Schemata (USDA, 1985; Boorman et al., 1995; Peschke et al., 1999; Schmocker-Fackel et al., 2007; Markart et al., 2004). Das Ziel dieser Ansätze liegt darin, die Abflussdisposition durch quantitative (z.B. Abflussbeiwerte) oder qualitative (z.B. dominante Abflussprozessstypen) Merkmale zu subsumieren.

Zur quantitativen Berechnung des Abflussgeschehens bzw. zur Abschätzung von Bemessungsgrößen existiert ebenso eine breite Palette von Modellansätzen, die von einfachen konzeptuellen Ansätzen bis hin zu komplexen, quasi physikalisch basierten Prozessmodellen reicht (einen Überblick bietet: Beven, 2001). Die Ergebnisse der Bewertungs- oder Klassifikationskonzepte stellen dabei oftmals die Eingangsgröße(n) der hydrologischen Modelle dar (z.B. Curve Numbers als mögliche Eingangsgröße in HEC-HMS). Sowohl Bewertungskonzepte als auch hydrologische (Niederschlags-/Abfluss-, Wasserhaushalts-, Hochwasserprognose-)Modelle greifen dabei direkt oder indirekt auf hydrologische Kenngrößen des Bodens, wie beispielsweise die gesättigte Leitfähigkeit, nutzbare Feldkapazität oder das Porenvolumen, zurück.

Problemstellung und Ziele

In Österreich stehen bis jetzt keine flächendeckenden Datengrundlagen zu den wesentlichen Einflussfaktoren des Abflussgeschehens zur Verfügung. Dieses Manko betrifft im Besonderen die Pedosphäre, die durch äußerst unterschiedliche Datenqualität für die Nutzungsbereiche Landwirtschaft sowie Wald und waldfreie Hochlagen ge-



kennzeichnet ist. Während für landwirtschaftlich genutzte Einheiten detaillierte und flächig kartierte Informationen vorliegen, stehen in den restlichen Gebieten nur partiell flächige (nicht standardisiert aufgenommene) Daten zur Verfügung. Homogene Informationen in forstwirtschaftlichen Nutzungsbereichen beschränken sich auf punktuelle Standortaufnahmen unterschiedlicher Programme (Österreichische Waldinventur, Waldboden-Zustandsinventur). Zudem existiert keinerlei hydrologische Bewertung der Bodeninformationen, da sich Kartierungen bzw. Datenerhebungen in der Regel auf genetische Bodenmerkmale konzentrieren.

Im Projekt **Hydrologische Bodenkenn-**daten **Niederösterreich** (HydroBod-NÖ) konnten erstmalig in Österreich diese wichtigen Grundlegendaten für ein gesamtes Bundesland (Niederösterreich inkl. 1 km Buffer der Nachbarbundesländer sowie Tschechien, Fläche 20.400 km²) aus bestehenden Bodeninformationen abgeleitet werden. HydroBod-NÖ weist zwei primäre Ziele auf:

- i. Entwicklung und Ableitung homogener und flächendeckender hydrologischer Bodenkennwerte (vertikale gesättigte Leitfähigkeit, nutzbare Feldkapazität, Gesamtporenvolumen, Bodenmächtigkeit, Bodenspeicher).
- ii. Flächenhafte Klassifikation der hydrologischen Reaktion des Landnutzungs-/Bodenkomplexes bei Starkregenereignissen (hydrologische Reaktionstypen, Abflussbeiwerte).

Der Bearbeitungsmaßstab liegt bei 1:50.000. Aufgrund der Größe des Bearbeitungsgebietes basiert die Arbeit ausschließlich auf bestehenden Datengrundlagen ohne ergänzende Kartierarbeiten.

Methodik und Arbeitsablauf

Der Projektablauf lässt sich grundsätzlich in drei Arbeitspakete gliedern (Abbildung 1), die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf den zweiten und dritten Abschnitt.

Im ersten Arbeitspaket wurde versucht einen möglichst vollständigen Datenpool zu den abflusssteuernden Faktoren der Bio-, Pedo-, Hydro- und Geosphäre zu schaffen. Dabei wurde sowohl auf allgemein verfügbare Informationen (z.B. digitale Katastralmappe) als auch auf individuelle Daten (z.B. Standortinformationen von Forstbetrieben) zurückgegriffen. Aufgrund der Heterogenität der Daten (z.B. Horizontmächtigkeit vs. Tiefenstufen bei unterschiedlichen Bodeninformationen) mussten diese auf ein einheitliches Niveau standardisiert werden.

Erstellung flächiger hydrologischer Information

Im zweiten Arbeitspaket wurde versucht, möglichst aktuelle und detaillierte Information zu den hydrologisch relevanten Faktoren flächenhaft für das gesamte Projektgebiet zu generieren.

Als oberste Ebene wurde eine im hydrologischen Kontext optimierte Landnutzungskarte erstellt, welche neben einem hohen räumlichen

Detaillierungsgrad den bestmöglichen Stand an Aktualität bieten sollte. Um die räumlich stark differenzierte Datengrundlage der digitalen Katastralmappe Österreichs (DKM) im Hinblick auf eine hydrologische Bewertung zu verbessern, wurde sie mit aktuellen Daten des INVEKOS (INtegriertes VERwaltungs- und KONtrollSystem der EU), sowie mit Waldinformationen der österreichischen Waldkarte (ÖWK), kombiniert. Dadurch konnte für die DKM-Sammelklasse „landwirtschaftlich genutzt“ eine beinahe flächendeckende Zuordnung der aktuellen Nutzung auf Feldstückebene erreicht werden. Die Klasse „Wald“ konnte mit fünf Waldtypen belegt werden (Sotier et al., 2010).

Das geologische Ausgangsmaterial ist einer der entscheidenden bodenbildenden Faktoren. In der digitalen geologischen Karte Niederösterreichs (1:200.000) werden für das Projektgebiet 329 verschiedene lithostratigraphische Einheiten (Formationen) ausgewiesen. Diese Formationen wurden mittels einer Clusteranalyse, basierend auf Texturinformationen aus Bodenprofilen und Expertenbewertungen, zu einer überschaubaren Anzahl an Substratklassen zusammengefasst. Fünf der elf extrahierten Substratklassen sind hinsichtlich ihrer Korngrößenzusammensetzung gut differenzierbar und bestimmten Gesteinsarten zuordenbar. Daneben wurden mehrere Mischklassen mit einer sehr großen Streuung im Bodenartenspektrum ausgeschieden. Diese fassen verschiedene Ausprägungen tertiärer und quartärer Sedimente zusammen und lassen sich im Wesentlichen über ihre geologische Durchlässigkeit abgrenzen (Sotier et al., 2011).

Die Bodenmächtigkeit wird in der vorliegenden Arbeit als abflussspeichernde Bodenmächtigkeit (asBM) spezifiziert. Damit ist die Mächtigkeit des Solums bis i) zum Ausgangsgestein (der Cv-Horizont wird noch zum Solum dazugerechnet), ii) zu einem gering durchlässigen Horizont (Stauer, definiert über einen Grenzwert

der vertikalen gesättigten Leitfähigkeit) oder iii) zum Grundwasserspiegel definiert. Die asBM wird auf maximal 100 cm begrenzt, da Abflüsse in größerer Tiefe für schnelle Hochwasserprozesse kaum mehr relevant sind. In kartierten Bereichen wurde die Bodenmächtigkeit aus der Horizontansprache abgeleitet, nicht kartierte Bereiche wurden über eine Regressionsfunktion beschrieben. Der potenzielle Bodenspeicher ergibt sich aus einer einfachen Multiplikation der asBM mit dem Porenvolumen. Als Porenvolumen wird dabei nicht das Gesamtporenvolumen, sondern der um den Totwasseranteil reduzierte Porenraum verwendet. Der potenzielle Bodenspeicher beschreibt somit jenes Volumen, das der Boden im günstigsten Fall speichern kann.

Um aus den im Rahmen von üblichen Bodenkartierungen aufgenommenen Größen Bodenart, Grobanteil, Lagerungsdichte und organische Substanz bodenhydrologische Kennwerte abzuleiten, werden Rechenmodelle, sogenannte Pedotransferfunktionen (PTF), eingesetzt. Die in der vorliegenden Studie verwendete PTF wurde ursprünglich für das Simulationsmodell SIMWASSER (Stenitzer, 1988) entwickelt. Dieses Modell bietet sich an, da das zugrunde liegende Datenkollektiv im Wesentlichen auf Daten und Analysen niederösterreichischer Böden basiert.

Die Regionalisierung der bodenhydrologischen Kennwerte „vertikale gesättigte Leitfähigkeit“ (ks), „Porenvolumen“ (GPV) und „nutzbare Feldkapazität“ (nFK) erfolgte entsprechend der unterschiedlichen Datenlage räumlich getrennt für Bereiche mit und Bereiche ohne flächenhafte Bodeninformation (Sotier et al., 2012).

In Bereichen mit vorliegender flächenhafter Bodenformation (vorwiegend landwirtschaftlich genutzte Flächen, Abbildung 2 links) wurden mittels PTF die hydrologischen Kennwerte horizontweise für die einzelnen Bodenprofile der landwirtschaftlichen Bodenkartierung berech-

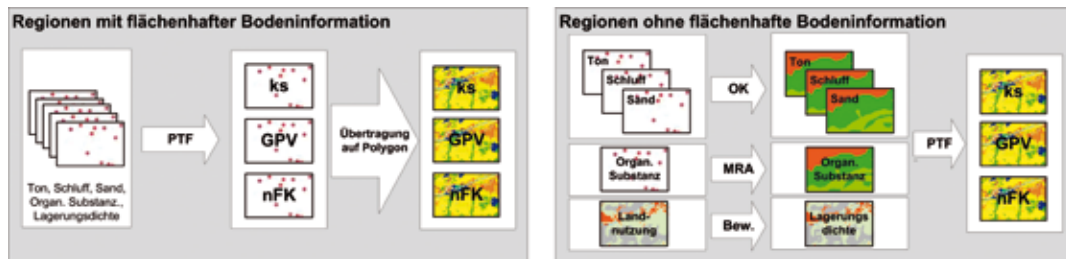


Abb. 2: Regionalisierung der bodenhydrologischen Kennwerte.

Fig. 2: Regionalisation of the hydrological soil properties

net. Anschließend wurden die Kennwerte auf die dem Profil zugeordneten Polygone der Bodenkarte übertragen.

In Bereichen ohne flächenhafte Bodeninformation (Wald, waldfreie Hochlagen, nicht kartierte landwirtschaftliche Bereiche, Siedlungsgebiete, Abbildung 2 rechts) musste über statistische und geostatistische Verfahren (Kriging, Regressionsanalyse) flächenhafte Information für drei definierte Tiefenstufen (0 – 20, 20 – 50, 50 – 100 cm) erzeugt werden. Dabei wurden über Ordinary Kriging (OK) Basiskarten der Korngrößenfraktionen Ton, Schluff und Sand erzeugt. Die organische Substanz wurde über eine multiple Regressionsanalyse (MRA) mit den Variablen „mittlerer Jahresniederschlag“ und „Hangneigung“ regionalisiert. Die Lagerungsdichte konnte über eine statistische Auswertung von Waldbodenprofilen und eine anschließende Bewertung (Bew.) der Landnutzungskarte bewerkstelligt werden. Weder über geo- noch über regressionsstatistische Verfahren konnte der Grobanteil beschrieben werden, dieser musste daher mit einer einheitlichen Klasse (g_0 ; < 2 Vol.%) angenommen werden.

Um die Effekte der Landnutzung auf die hydrologischen Eigenschaften des Bodens zu berücksichtigen, wurden Modifikatoren (Faktoren zur Anpassung des ks -Wertes) für den obersten Horizont (ks_1) ermittelt, welche die Infiltrationsleistung (INF) in den Untergrund beeinflussen (Gl. (1)). So wurde für Ackerstandorte in Abhängigkeit von der

Bodenart die Verschlammungsneigung ($msch$) in vier Klassen eingeteilt und die Leitfähigkeit des Oberbodens in einem Worst-Case-Szenario entsprechend herabgesetzt. Der Einfluss von Bodenverdichtung in Folge von Beweidung (mbw) wurde durch eine Erhöhung der Lagerungsdichte für die Landnutzungseinheiten „Weide“ und „Hutweide“ berücksichtigt. Dies führt, in Abhängigkeit von der Bodenart, zu verringerten Leitfähigkeiten und Porenvolumina. Um die Effekte der Flächenversiegelung (mvs) zu berücksichtigen, wurde für jede Gemeinde im Projektgebiet ein mittlerer Befestigungsgrad bestimmt. Dieser Wert wurde in Kombination mit der Hangneigung in einen Abflussbeiwert umgelegt, der den entsprechenden Landnutzungseinheiten jeder Gemeinde zugewiesen wurde. Eine Erhöhung der Infiltrationsleistung stellt sich auch durch die Ausbildung von Makroporen und Schrumpfrissen ein ($minf$). Aus zahlreichen Starkregenexperimenten im Ostalpenraum ist bekannt, dass die hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens nicht direkt in eine Infiltrationsrate übertragbar ist. Ein Faktor für die Erhöhung der Infiltrationsleistung konnte aus Beregnungsversuchen des BFW im Raum Bucklige Welt/Wechsel sowie Waidhofen/Ybbs errechnet werden (Eder et al., 2012). Die Infiltrationsgeschwindigkeit für den unteren Bodenhorizont (ks_2) wird der vertikalen gesättigten Leitfähigkeit gleichgesetzt.

$$INF = m_{inf} \cdot m_{sch} \cdot m_{bw} \cdot m_{vs} \cdot ks_1 \quad \text{Gl. (1)}$$

Für die Modellierung der hydrologischen Reaktionstypen wird das Speichervermögen der beiden Bodenlayer eingeschränkt, indem als Ausgangszustand die Feldkapazität des Bodens definiert wird. Dadurch bleibt als verfügbarer Speicher die Luftkapazität (LK1 und LK2) erhalten.

Modellierung hydrologischer Reaktionstypen

Im dritten Arbeitspakt wurden aus den generierten Basisdaten hydrologische Reaktionstypen abgeleitet. Dabei wurde eine integrale Bewertung des Vegetations-/Landnutzung-Boden-Geologie-Komplexes bei unterschiedlichen Szenarien (unterschiedliche (Stark-)Niederschlagsszenarien mit/ ohne verschlammte Oberfläche) vorgenommen. Als Ergebnis konnte für jedes Szenario eine Karte der dominanten Abflussreaktionstypen sowie Karten der Oberflächen- und Direktabflussbeiwerte (= Oberflächenabfluss + Zwischenabfluss) erstellt werden.

Die Ableitung der Reaktionstypen erfolgt über ein neu entwickeltes GIS-basiertes Modell, welches eine stark vereinfachte Abbildung des

Wasserflusses im Untergrund darstellt (Abbildung 3). Das HydroBod-Modell weist vier vertikal geschichtete Layer (Tabelle 1) auf, die durch Kennwerte für das Speichervermögen und die hydraulische Leitfähigkeit charakterisiert sind. An den Grenzschichten zwischen den Layern erfolgt eine Aufteilung der Fließwege entsprechend der Leitfähigkeit, die Infiltration nach unten wird dabei immer maximal genutzt. Nicht weiter nach unten infiltrierendes Wasser füllt, in Abhängigkeit der Neigung, im jeweiligen Layer die verfügbaren Speicher und tritt erst nach vollständiger Nutzung der Speicherräume als Abfluss auf. Durch die Definition der Feldkapazität als Ausgangszustand für die Modellierung erfolgt der Zwischenabfluss bei geneigten Flächen (> 10 %) ohne weitere Speicherung im Boden.

In Abhängigkeit von der Hangneigung erfolgt anschließend eine Klassifikation der Abflusstypen, wobei die drei Grundtypen a) Oberflächenabfluss (OA), b) Zwischenabfluss (ZA) sowie c) Speicherung und Tiefensickerung (S) unterschieden werden.

Layer	Begrenzende Leitfähigkeit	Speichervermögen	Anmerkung
Vegetation/ Landnutzung	Infiltrationsleistung (INF) in den oberen Bodenlayer	Interzeption (INT)/ Landoberfläche (S_{OF})	INF siehe Gl. (1); S_{OF} max. 50 mm, beschränkt auf Zonen mit einer Hangneigung $\leq 2\%$; INT max. 5 mm (landnutzungsabhängig)
Oberer Bodenlayer	Gesättigte Leitfähigkeit des unteren Bodenlayers (Ks_2)	Speicher oberer Bodenlayer (LK1)	
Unterer Bodenlayer	Leitfähigkeit des geologischen Untergrundes (Ks_{geo})	Speicher unterer Bodenlayer (LK2)	Ks_{geo} wird als Faktor des unteren Bodenlayers definiert
Geologischer Untergrund		Speicher hat keine Limitierung	

Tab. 1: Layer des HydroBod-Modells.

Tab. 1: Layers of the HydroBod-model

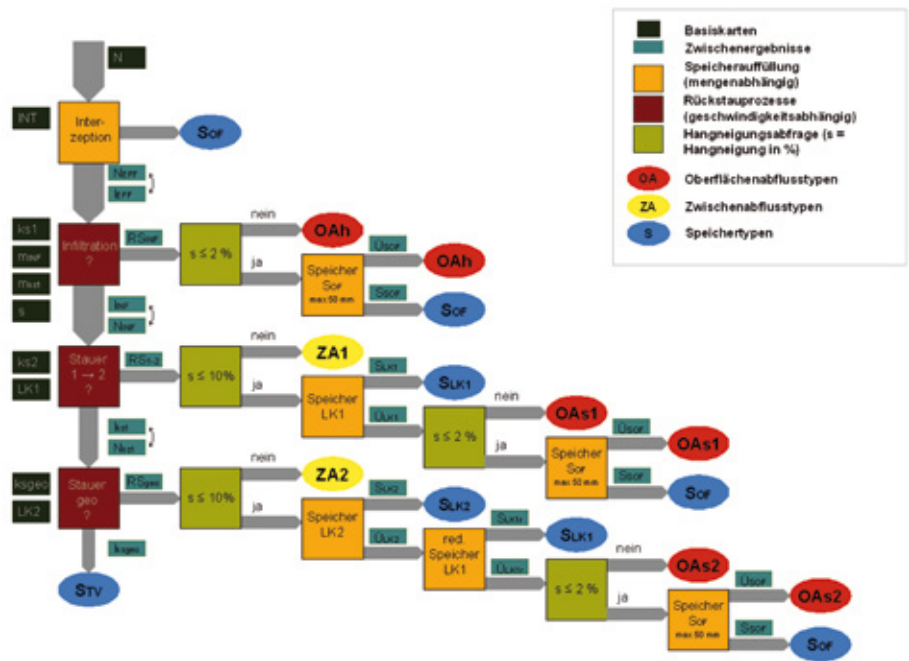


Abb. 3: Schematische Darstellung des HydroBod-Modells.

Fig. 3: Schematic diagram of the HydroBod-model

Der Grenzwert für die Hangneigung zur Bildung von Zwischenabfluss wurde mit 10 % fixiert und ist höher als an der Oberfläche (2 %), da ein größerer Gradient zur Überwindung des durch die Bodenmatrix bedingten Fließwiderstandes erforderlich ist. Die Werte beruhen auf Angaben aus der Literatur (Naef et al., 2007).

Zur Bildung von Hortonschem Oberflächenabfluss (OA_h) ist eine Geländeneigung von $> 2\%$ notwendig. In Bereichen mit geringerer Neigung verbleibt das Wasser am Ort der Entstehung und steht für eine spätere Infiltration zur Verfügung. Diese temporäre Speicherung an der Oberfläche (S_{OF}) ist auf 50 mm beschränkt, darüber hinausgehende Werte werden ebenfalls dem Oberflächenabfluss (OA_h) zugeschrieben.

Innerhalb des Bodenkörpers entsteht bei stärker geneigten Flächen ($> 10\%$) rascher (ZA_1) oder verzögerter Zwischenabfluss (ZA_2). Weisen die Einheiten Neigungen $\leq 10\%$ auf, so tritt nach der Füllung der Bodenspeicher (S_{LK1} bzw. S_{LK2}) rascher (OA_{s1}) oder verzögerter Sättigungsflächenabfluss (OA_{s2}) auf.

In den geologischen Untergrund perkolierendes Wasser bildet den Speichertyp Tiefensickerung (STV).

Die Klassifikation der Abflussreaktionstypen erfolgt nach einem neu entwickelten Schema (Abbildung 4), in welchem die Abflussanteile der drei Grundtypen OA, ZA und S in Beziehung gesetzt werden. Als dominante Reaktionstypen



Abb.4: Schema zur Klassifizierung der Abflussprozesse.

Fig. 4: Run-off classification scheme.

Flächig kartierte landwirtschaftl. Einh.			Nicht flächig kartierte Einheiten (v.a. Wald)			Tschechisches Staatsgebiet		
GPV	nFK	ks	GPV	nFK	ks	GPV	nFK	ks
4	6	19	12	10	80	2	7	36

Tab. 2: Mediane der relativen Fehler.

Tab. 2: Expected relative errors, median values

werden jene Prozesse klassifiziert, die während eines Niederschlagsereignisses einen Anteil von mehr als 50% der Niederschlagsfracht aufweisen. Die Klassifizierung des Abflussgeschehens erfolgt in einem ersten Schritt durch Zuordnung in die drei Grundprozesse. Innerhalb der Grundprozesse erfolgt in einem zweiten Schritt eine detaillierte Differenzierung in Teilprozesse.

Ergebnisse

Zur Validierung der Ergebnisse der Regionalisierung wurden die Standortinformationen der Bodenzustandsinventur (BZI) sowie Einzelstandortaufnahmen aus dem Raum der Buckligen Welt/Wechsel und Waidhofen/Ybbs herangezogen. Für die kartierten Flächen der landwirtschaftlich genutzten Einheiten wurden die möglichen Abweichungen der Bodenform vom repräsentativen

Bodenprofil aus den textlichen Beschreibungen extrahiert und analysiert (Sotier et al., 2012; Eder et al., 2012).

Die größten relativen Fehler (Betrag der prozentuellen Abweichung des ermittelten Wertes vom Sollwert) für jeden der bodenhydrologischen Kennwerte sind in den nicht kartierten Zonen (vor allem Wald und waldfreie Hochlagen) zu erwarten. Hier schwanken sie zwischen $\pm 10\%$ für nFK und $\pm 80\%$ beim ks-Wert. Kartierte Bereiche zeigen erwartungsgemäß deutlich kleinere Fehler. Bei den einzelnen Kennwerten wurden die größten Unsicherheiten bei den ks-Werten festgestellt, für das GPV und die nFK sind die Fehler vergleichsweise gering (Tabelle 2). Als Maß für die Unsicherheit wird der Median des relativen Fehlers angeführt.

Das Modell für die Berechnung der Abflussreaktionstypen wurde durch unterschiedliche

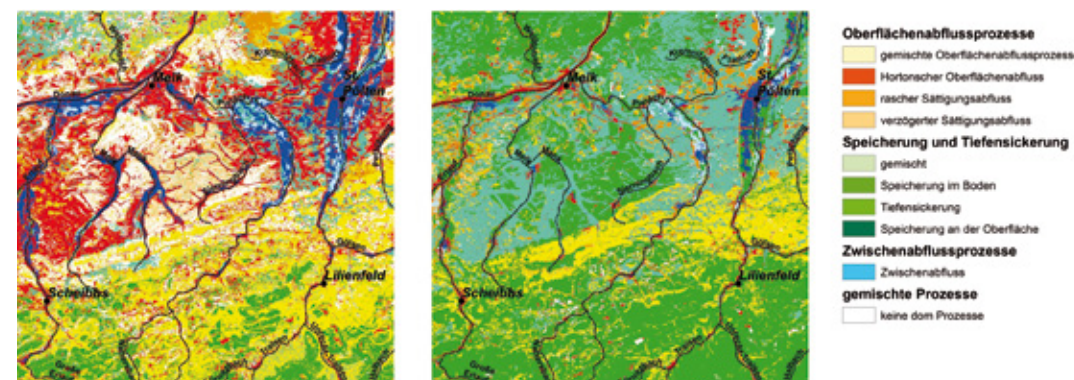


Abb. 5: Dominante Abflussreaktionstypen, 60 Minuten N-Ereignis (links), 12 Stunden N-Ereignis rechts.

Fig. 5: Dominant run-off reaction, 60-minute rain event (left), 12-hour rain event (right)

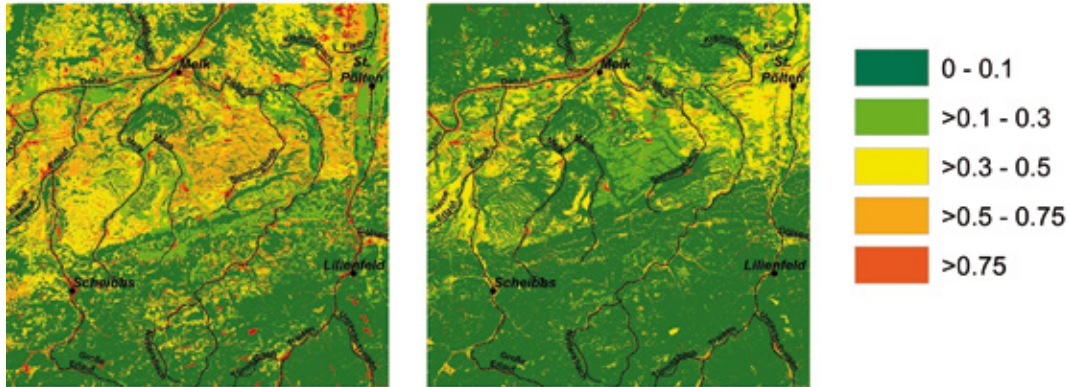


Abb. 6: Anteil der Oberflächenabflusskomponenten, 60 Minuten N-Ereignis (links), 12 Stunden N-Ereignis rechts.

Fig. 6: Value of the surface runoff, 60-minute rain event (left), 12-hour rain event (right)

Niederschlagsszenarien angetrieben. Als Szenarien wurden drei verschiedene Dauerstufen (15 Minuten, 60 Minuten und 12 Stunden) mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren gewählt. Zum einen erfolgte die Beaufschlagung über einen definierten und räumlich über das gesamte Bearbeitungsgebiet konstanten Niederschlagswert, zum anderen wurde der Wert entsprechend der räumlichen Verteilung der Bemessungsniederschläge verwendet. Alle Niederschlagsszenarien wurden mit und ohne Verschlammung des Oberbodens berechnet, der Ausgangswassergehalt im Boden entsprach an jedem Ort und in jeder Tiefenstufe der Feldkapazität. Als Beispiel sind in Abbildung 5 die dominanten Abflussreaktionstypen bei konstanter N-Verteilung (75 mm in 60 Minuten, 150 mm in 12 Stunden) ohne verschlammte Oberfläche dargestellt.

Als Teilergebnis der Modellierung konnten bei jedem Szenario volumetrische Oberflächen- (Abbildung 6) und Direktabflussbeiwerte ausgewiesen werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Projekt HYDROBOD-NÖ wurden erstmals in Österreich flächendeckend für ein gesamtes

Bundesland hydrologische Bodenkennwerte geschaffen. Vor allem in Wildbacheinzugsgebieten, in denen generell ein Informationsmangel zur Bodenausstattung vorherrscht, stellen die Ergebnisse eine wertvolle Basis zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen dar. Die Daten bieten Potenzial zur Einbindung in kontinuierliche N/A-Modelle. Dadurch könnte eine flächendeckende Hochwasserprognose, auch für kleinere Einzugsgebiete, für das gesamte Bundesland Niederösterreich erreicht werden.

Prinzipiell stellt die Regionalisierung von Bodenparametern in unkartierten Einheiten ein schwieriges und mit hohen Unsicherheiten behaftetes Verfahren dar. Oftmals in Lehrbüchern abgebildete idealisierte (und somit fast immer theoretische) Konzepte des Bodenaufbaues bzw. der Bodenentwicklung an einem Hangprofil konnten auf Basis der vorliegenden Profildaten nicht bestätigt werden. Auch die Einbeziehung des geologischen Ausgangsmaterials zeigte keine Verbesserung der statistischen Zusammenhänge.

Die Validierung der Regionalisierungsergebnisse bodenhydrologischer Kenngrößen, vor allem des hydrologisch bedeutenden Parameters der gesättigten vertikalen Leitfähigkeit (k_s), zeigt eine beträchtliche Unsicherheit. Vor allem in

bewaldeten Gebieten relativiert sich infolge der meist hohen Leitfähigkeit des Bodens der Fehler, da Waldböden durch deren meist lockere Lagerung, den hohen Makroporenanteil und Humusgehalt Infiltrationskapazitäten aufweisen, welche die Niederschlagsintensität von Ereignissen in den meisten Fällen überschreitet.

Das HydroBod-Modell ist optimal an den vorliegenden Datenbestand angepasst und kann im Prinzip an allen Standorten mit vergleichbarem Datenstand angewandt werden. Gegenüber bestehenden Ansätzen hat die Methode den Vorteil, dass sowohl qualitative (dominante Abflusstypen) als auch quantitative (Abflussbeiwerte) Aussagen zum Abflussgeschehen getroffen werden können. Während Schmocker-Fackel (2007) dominante Prozesse im Allgemeinen ableitet, können im HydroBod-Modell unterschiedliche Niederschlagsszenarien, welche zwangsläufig zu unterschiedlichen Klassifizierungen führen, berücksichtigt werden. Das SCS-CN-Verfahren (USDA, 1985) unterteilt lediglich in vier verschiedene Bodentypen, die detaillierte Bodeninformation des landwirtschaftlichen Bereiches würde bei der Anwendung dieses Verfahrens verloren gehen. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem CN-Verfahren liegt darin, dass nicht nur Niederschlagssummen, sondern auch Niederschlagsintensitäten in die Berechnung eingehen.

Die Ergebnisse der Modellierung wurden bisher nur in ersten Ansätzen an gemessenen Abflussereignissen validiert und zeigen tendenziell etwas zu hohe Abflussbeiwerte. Inwieweit dies mit den sehr konservativen Annahmen im Modell (Ausgangszustand der Bodenfeuchte, hohe Jährlichkeit des Ereignisses) zu erklären ist, muss durch die Berechnung weiterer Szenarien oder durch die Implementierung der Grundlagendaten in ein kontinuierliches N/A-Modell eruiert werden.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Mag. Klaus Klebinder
 Bundesforschungszentrum für Wald (BFW)
 Rennweg 1, 6020 Innsbruck
 Klaus.klebinder@uibk.ac.at

Literatur / References:

BEVEN K. (2001):
 Rainfall-Runoff Modelling. J. Wiley & Sons Ltd., Chichester.

BOORMAN D.B., HOLLIS J.M., LILLY A. (1995):
 Hydrology of Soil Types: A hydrologically-based classification of the soils of the United Kingdom. IH Report No. 126.

EDER A., SOTIER B., KLEBINDER K., STURMLECHNER R., DORNER J., MARKART G., SCHMID G., STRAUSS P. (2012):
 Hydrologische Bodenkenndaten Niederösterreichs (HydroBodNÖ) – Endbericht. Unveröffentlichter Bericht des BAW und BFW im Auftrag der NÖ Landesregierung und des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung.

MARKART G., KOHL B., SOTIER B., SCHAUER T., BUNZA G., STERN R. (2004):
 Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW Dokumentation, Nr.3.

NAEF F., MARGRETH M., SCHMOCKER-FACKEL P., SCHERRER S. (2007):
 Automatische hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Wasser Energie Luft, Heft 3.

PESCHKE G., ETZENBERG C., MÜLLER G., TÖPFER J., ZIMMERMANN S. (1999):
 Das wissenschaftsbasierte System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflußbildung. IHI-Schriften, Heft 10. Internationales Hochschul Institut. Zittau.

SCHMOCKER-FACKEL P., NAEF F., SCHERRER S. (2007):
 Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 891–906.

SOTIER B., EDER A., KLEBINDER K., STRAUSS P., MARKART G., DORNER J. (2010):
 Erstellung einer Landnutzungskarte als Grundlage hydrologischer Bewertung. In: Strobl J., Blaschke T., Griesebner G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2010. Beiträge zum 22. AGIT-Symposium, 7.-9. Juli 2010, Salzburg: 316-324.

SOTIER B., KLEBINDER K., EDER A. (2011):
 Abteilung von Bodensubstratklassen aus der Geologischen Karte von Niederösterreich. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Wien (78): 7-14

SOTIER B., KLEBINDER K., EDER A. (2012):
 Hydrologische Bodenkenndaten für Niederösterreich. In: Strobl J., Blaschke T., Griesebner G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2012. Beiträge zum 24. AGIT-Symposium, Salzburg, in Druck.

STENITZER E. (1988):
 SIMWASSER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Nr. 31, Petzenkirchen.

USDA - U.S. Department of Agriculture (1985):
 National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Washington D.C..

**MICHAEL BOTTHOF, GERHARD HOLZINGER, STEFAN JANU, GERALD JÄGER,
DANIEL KURZ, SUSANNE MEHLHORN, MARKUS MOSER, CHRISTIAN PÜRSTINGER**

Modellanwendung für die Planungspraxis der WLW: Konzept für einen Leitfaden des Fachbereichs Wildbachprozesse

Application of models for practical planning purposes for the Austrian Service for Torrent and Avalanche Control: Conceptual guidelines for torrent processes

Zusammenfassung:

Für die Planung von Schutzmaßnahmen stehen heutzutage sogenannte moderne Hilfsmittel in Form von Softwareprogrammen (Modelle) zur Verfügung. In diesen Modellen stecken meistens bereits bekannte Formelansätze zur Berechnung von Abflusskapazitäten, Fließgeschwindigkeiten und dergleichen. Die rasante Entwicklung bringt aber auch neue Ansätze der Berechnung, die vor allem in Kombination mit genauen Grundlagendaten (Geländemodelle) und Variantenstudien neue Einblicke in die Beurteilung von Naturgefahrenprozessen geben. Zahlreiche Modelle sind bereits auf dem Markt – einige davon sogar als „Freeware“. Mit einem Leitfaden soll die direkte Praxisanwendung im Dienstbetrieb der Wildbach- und Lawinverbauung erleichtert werden. Dabei wird bewusst auf eine umfassende allgemeine Beschreibung der Modelle verzichtet. Die Nutzer können sich mit diesem Behelf einen Überblick über die Möglichkeiten der Berechnung verschaffen und diese dann in der täglichen Arbeit anwenden.

Stichwörter:

Modellierung, Planungspraxis der WLW, 1D- und 2D-Modelle, Geschiebetransport, Murgang

Abstract:

The planning of protection measures against natural hazards is highly aided today by modern software programs (models). Such models usually incorporate known empirical formulae used to estimate potential discharge capacities, flow velocities and similar parameters. Especially in combination with precise fundamental data (digital elevation models) and variant studies, the rapid development in this field also enables new insight to be gained in the field of natural hazard process assessment. Numerous models are currently available, including a number of freeware products. Guidelines developed for the practical application of such tools should assist the Austrian Service for Torrent and Avalanche Control in this practice-based field of work. A comprehensive, general description of the models has been avoided intentionally. The user may use this to obtain an overview of all of the various calculation possibilities and then apply them in day-to-day work.

Keywords:

1D and 2D simulation, bedload transport, debris flow, guideline

Einleitung

In der Planung von Schutzmaßnahmen kann man auf eine Vielzahl von Hilfsmitteln hinsichtlich Grundlagendaten und Programmen zur Aufbereitung sowie zur Berechnung in den verschiedensten Fachbereichen zurückgreifen. Die rasante Entwicklung in der elektronischen Datenverarbeitung führt aber dazu, dass der Anwender schnell den Überblick verliert, welche Programme für gewisse Fragestellungen interessant sind. Besonders im Wildbachbereich hat man vorwiegend mit Abflussprozessen zu tun, die nur schwer durch Modelle zu beschreiben sind. Trotzdem versucht man in der Forschung und Entwicklung diese komplexen Prozesse nachzubilden und eine Verbesserung in der Berechnung von Naturgefahrenprozessen zu erzielen. Im Fachbereich der Lawinenmodellierung ist die Wildbach schon seit vielen Jahren mit der Entwicklung und Umsetzung geeigneter Modelle befasst. Im Bereich der Naturgefahr

„Hochwasser“ kann der Nutzer aus einer Vielzahl von Programmen ein „geeignetes“ wählen. Prozesse mit Geschiebe und Murgang sind wesentlich schwieriger zu modellieren. Aber auch für diese Prozesse sind schon einige Modelle auf dem Markt, welche auch seriös in der Praxis einsetzbar sind. Man könnte sagen: „Wer die Wahl hat, hat die Qual“, sodass im Rahmen des neu gegründeten Fachbereichs Wildbachprozesse versucht wird, eine Zusammenstellung der derzeit gebräuchlichen Modelle vorzunehmen und Einsatzmöglichkeiten für die Praxis daraus abzuleiten.

Bereits vorliegende Arbeitsbehelfe, Leitfäden, ON-Regeln

Die für das Fachgebiet Modellierung schon zahlreich vorhandenen Arbeitsbehelfe, Leitfäden und ON-Regeln werden für die Bedürfnisse im Wildbachbereich zusammengefasst. Als Grundlage für den Leitfaden sowie als Nachschlagewerke für Details wird auf folgende Literatur zurückgegriffen:

- I. ETAlp – Erosion, Transport in Alpinen Systemen (2004): Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten (Lebensministerium und WLW), Geschiebetransport V2.2: Ansätze zur Abschätzung des Geschiebetransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen; D. Rickenmann und M. Brauner; In: Kompendium zu ETAlp Gerinnettransport und Ablagerung
- II. ONR 24800 – Schutzbauwerke der Wildbachverbauung, Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung, Erarbeitet von der Arbeitsgruppe „Schutzbauwerke der Wildbachverbauung“ im Rahmen des ON-Komitees 256 „Schutz vor Naturgefahren“ (2009)
- III. ONR 24802 – Schutzbauwerke der Wildbachverbauung, Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Erarbeitet von der Arbeitsgruppe „Schutzbauwerke der Wildbachverbauung“ im Rahmen des ON-Komitees 256 „Schutz vor Naturgefahren“ (Teil 3 2011)
- IV. OPTIMETH – Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden zur Beschreibung von Wildbachprozessen, Initiative aus dem Kreis der Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt (A), in Druck
- V. ÖWAV: Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik – Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis; BMLFUW –, Wien, Habersack, H. et al. (2008)
- VI. ÖWAV Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie; BMLFUW Habersack, H., Sattler, S., Badura, H., Gabriel, H., Hengl, M., Huber, B. et al. (2011)

Ziel des Leitfadens

Der Praxisleitfaden bietet eine Zusammenstellung für die Arbeit der Wildbach- und Lawinenverbauung mit dem Focus auf die direkte Praxisanwendung im Dienstbetrieb. In diesem Leitfaden wird daher bewusst auf eine umfassende allgemeine Beschreibung der Modelle verzichtet. Die Nutzer können sich mit diesem Behelf einen Überblick über die Möglichkeiten der Berechnungen verschaffen und diese dann in der täglichen Arbeit anwenden. Außerdem soll der Leitfaden dem Anwender, je nach Fragestellung, als Entscheidungshilfe für die passende Modellwahl dienen. Im Anhang dieses Leitfadens sind Beschreibungen der Modelle mit Beispielen aus der Praxis sowie detaillierte Modellbeschreibungen angefügt. Aufgrund der laufenden Weiterentwicklung der Modelle ist dieser Leitfaden als Momentaufnahme zu sehen.

Berechnungsmethoden und Modelle nach charakteristischen Verlagerungsprozessen gemäß ONR 24800

Die Berechnungsmethoden und die Modellwahl stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit den charakteristischen Verlagerungsprozessen. Lt. ONR 24800 wird nach der Verlagerungsart fluvial und murartig unterschieden.

Unter fluvialer Verlagerungsart versteht man Hochwasser (Reinwasserabfluss) und fluvialer Feststofftransport (schwacher Feststofftransport). In diesem Bandbereich der Wildbachprozesse gelten die Gesetze der newtonschen Flüssigkeiten, weshalb hier auch eine ausreichende Zahl an erprobten Modellen und Berechnungsmethoden zur Verfügung steht.

Als murartige Verlagerungsart kann zwischen murartigem Feststofftransport (starker Feststofftransport) und Murgang unterschieden werden. Hier können die Gesetze für newtonsche

Flüssigkeiten nicht mehr angewandt werden, sodass Berechnungen bei diesen Verlagerungsarten entweder sehr stark vereinfacht (z.B.: durch Anwendung des Intensitätsfaktors IF) oder durch sehr komplexe Modelle erfolgen können. Je nach Prozesstyp gibt es ein charakteristisches Fließverhalten, eine volumetrische Feststoffkonzentration, ein Größtkorn, eine Dichte, maßgeblich wirkende Kräfte, Ablagerungsform und dergleichen.

Die Definition des maßgeblichen Verlagerungsprozesses ist eine Grundvoraussetzung für die Wahl eines Modells bzw. einer Berechnungsmethode. Stellt man die derzeit gängigen und gebräuchlichen Modelle im Wildbachbereich den Verlagerungsprozessen lt. ONR 24800 gegenüber (auch unter Berücksichtigung der Anwendungsgrenzen hinsichtlich Sohlneigung und Berechnungsformeln), so ergibt sich ein klares Bild hinsichtlich der Einsetzbarkeit und deren Anwendungsgrenzen.

Prozesstyp Reinwasserabfluss (Sedimentanteil sehr gering)

Die Berechnung der Abflusskapazität mit Prozesstyp Reinwasserabfluss ist vor allem in gesicherten Wildbachunterläufen oder schon flussähnlichen Wildbächen notwendig. Zur Abschätzung von Gerinnkapazitäten an Brückenquerschnitten oder nur für einzelne Regelprofile sind aufwendige Modellierungen nicht notwendig. In diesem Fall kann man sich mit dem ingenieurmäßigen profilweisen Ansatz (Rechteckprofil oder Trapezprofil) helfen. Für die Beurteilung eines gesamten Gewässerabschnittes oder des Unterlaufes eines Wildbaches findet man mit einer profilweisen Ansprache oft nicht mehr das Auslangen. Wird das Vorland nicht überflutet, so kann in diesem Fall eine 1-dimensionale Modellierung eingesetzt werden. Sind Fließwege im Vorland zu erwarten, so kann aufgrund der Vereinfachungen eines 1D-Modells (Geschwindigkeit und Impuls nur in

Hauptströmrichtung berücksichtigt, Geschwindigkeit in Hauptströmrichtung über den Querschnitt gemittelt) dieses nicht mehr angewendet werden. Die in einem solchen Fall auftretenden lateralen Strömungsgeschwindigkeiten und die, im Gegensatz zum Hauptgerinne, im überfluteten Bereich vorherrschenden, kleinen Abflusstiefen, führen zu einem beträchtlichen Unterschied zwischen tatsächlich auftretender Geschwindigkeit und gemittelter Geschwindigkeit.

Anwendung im Wildbachbereich: gesicherte und ungesicherte Unterlaufgerinne, Dimensionierung von Brückenquerschnitten und Durchlässen, Druckabfluss aus Dolen, Simulation von Dammbrechszszenarien

Berechnung je Querprofil nach dem ingenieurmäßigen Ansatz

Als Minimalanforderung ist eine profilweise Aufnahme des Bachquerschnittes mit der Information zur Sohlneigung und der Festlegung der Fließrauigkeiten notwendig. Die Aufnahme der Querschnittsgeometrie kann sowohl terrestrisch mittels Vermessungsgerät als auch nur mit Maßband oder Distanzmesser erfolgen (vereinfachte Aufnahme). Die notwendigen Eingangsdaten sind leicht im Feld zu bestimmen oder mittels einfacher Berechnung zu ermitteln

- A = Durchflussfläche in m^2
- U = Benetzter Umfang (Länge der Böschung bis zur Wasserspiegellage und Sohlbreite in m)
- R = Hydraulischer Radius (= Durchflussfläche A / benetzter Umfang U)
- I = Sohlgefälle in %
- K_{st} = Fließrauigkeiten nach Strickler (Mittelwert für den Querschnitt)

Gültigkeitsbereich: Sohlgefälle je nach Formelansatz bis 15–20% berechenbar (Meyer-Peter & Müller bis 2,5 %, Strickler bis 4%, Rickenmann, Smart & Jäggi sowie Palt Bis 20%)

1D-Berechnung

Für den Reinwasserbereich gibt es eine Vielzahl von Modellen, die teilweise von den Entwicklern gratis zur Verfügung gestellt werden. Gängige 1D-Modelle sind HEC-RAS, WASPI oder WSPWin. Als praktisches Modell in der Praxis hat sich HEC-RAS etabliert.

Gültigkeitsbereich: Sohlgefälle je nach Formelansatz bis 15–20% berechenbar (Meyer-Peter & Müller bis 2,5 %, Strickler Bis 4%, Rickenmann, Smart & Jäggi sowie Palt Bis 20%)

Kurzsteckbrief HEC-RAS

HEC-RAS 4.1 ist ein eindimensionales Programm zur Berechnung stationärer und instationärer Abflüsse mit vielfältigen Möglichkeiten der Berechnung von Brücken sowie Quer- und Längswerken. Die Raumdiskretisierung erfolgt über Profile, welche über eine ArcGis Extension (GeoRAS) aus Ge-

ländedaten oder über AutoCAD Civil-3D mit dem HEC-RAS-Export generiert werden können. Die Grundlagen dazu werden entweder durch terrestrische Vermessung mit profilweiser Aufnahme und Längenschnitt oder alternativ dazu aus Laserscandaten erstellt. Die Bestimmung der Fließwiderstände ist gutachterlich festzulegen und muss für jedes Querprofil bzw. jeden Homogenabschnitt definiert werden. Kosten: Freeware

2D-Berechnung

Der große Vorteil in der 2-dimensionalen Berechnung liegt darin, dass die Fließwege – im Gegensatz zu den 1-dimensionalen Modellen – im Zuge der Berechnung vom Modell aufgrund des Geländes automatisch erkannt und berechnet werden. Die notwendige Grundlage dafür sind möglichst detaillierte Geländemodelle. In den letzten Jahren wurden solche Modelle vorwiegend für die

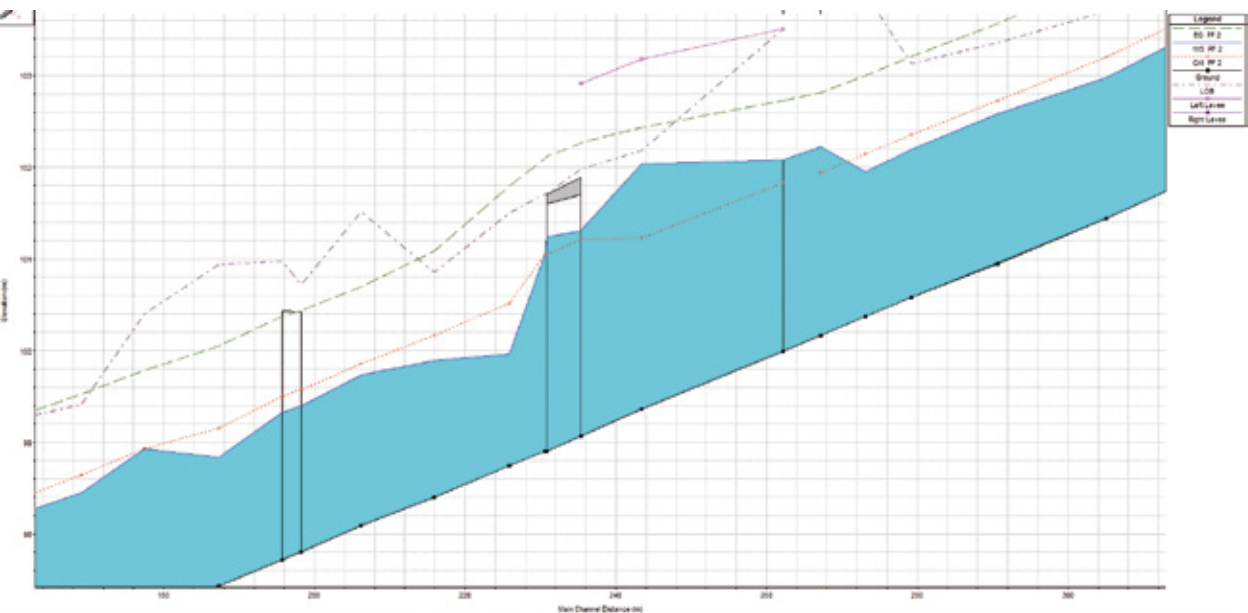


Abb. 1: Längenschnittdarstellung mit HEC-RAS

Fig. 1: Profile plot with HEC-RAS

Berechnung von Überflutungsflächen eingesetzt. Auch in Wildbächen, in denen der Reinwasserabfluss überwiegt und der Geschiebetransport vernachlässigbar ist (besonders im Vorland oft der Fall) können solche Modelle gut eingesetzt werden. Die schwierige Beurteilung der Fließwege und Überflutungsflächen kann somit – unterstützt durch die Berechnung von Szenarien – mithilfe von Modellierungen besser bestimmt werden. Als gängige Modelle können die 2D-Modelle HydroAS 2D und FLO-2D genannt werden.

Anwendung im Wildbachbereich: Abflussuntersuchungen im Gerinne und im Vorland, Bestimmung von Wasserspiegellagen, Strömungsgeschwindigkeiten, Wassertiefen, Überflutungsdauer, Retentionswirkung, Sohlschubspannungen – alles für stationäre und instationäre Abflüsse.

Gültigkeitsbereich: Die meisten Modelle haben die Manning-Strickler-Formel mit einer Gültigkeit bis 3–5% Sohlneigung integriert, für steilere Bereiche ist eine entsprechende Interpretation der Ergebnisse notwendig.

Kurzsteckbrief FLO-2D

Finite Differenzen-Methode mit regulärer, strukturierter Netzstruktur (Berechnung in 8 Richtungen möglich), Diskretisierung nach der Zeit mittels explizitem Verfahren mit Stabilitätskriterium. Als Ergebnis bekommt der Anwender Wassertiefen je regulärem, strukturiertem Netz (GRID), ebenso Strömungsgeschwindigkeiten, Überflutungsdauer, Retentionswirkung, Sohlschubspannungen – alles für stationäre und instationäre Abflüsse.

Kombinierte hydrologische und hydro-

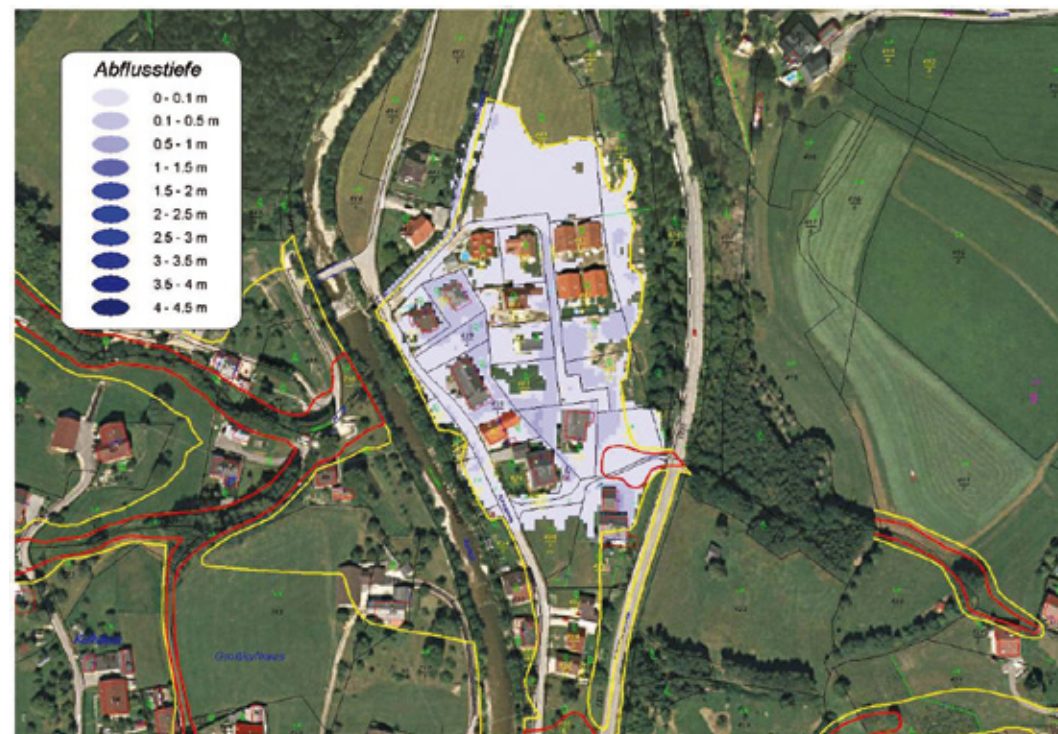


Abb. 2: Abflusstiefen als Ergebnis einer FLO-2D-Berechnung

Fig. 2: Flow depth as a result with FLO-2D

lische Berechnungen sind möglich. Die Multiprozessorfähigkeit hat die langen Rechenzeiten von sehr kleinen Netzstrukturen sehr stark verkürzt. Es gibt aber keine Möglichkeit der Berechnung von unstrukturierten Netzen.

Kurzsteckbrief HYDRO AS-2D

Das tiefengemittelte instationäre Modell nach der Finite-Volumen-Diskretisierung ist bei großer Genauigkeit gleichzeitig in der Anwendung relativ einfach und sehr robust. Als grafische Benutzeroberfläche dient die US-amerikanische Software SMS (Surface-Water Modeling System). Durch

Multiprozessorfähigkeit ist eine Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit sowie der Integration steuerbarer Bauwerke (Wehre, Drosseln) möglich. Zur Aufbereitung von digitalen Geländemodellen aus Laser-Scan-Messungen für die 2D-Modellierung wurde das Programm LASER_AS-2D entwickelt. Ergebnis: Wasserspiegellagen, Strömungsgeschwindigkeiten, Wassertiefen, Überflutungsdauer, Abflussaufteilung auf Fluss-schlauch und Vorländer, Retentionswirkung, Sohl-schubspannungen, für stationäre und instationäre Abflüsse. Bezugsquelle: Dr.-Ing. M. Nujic

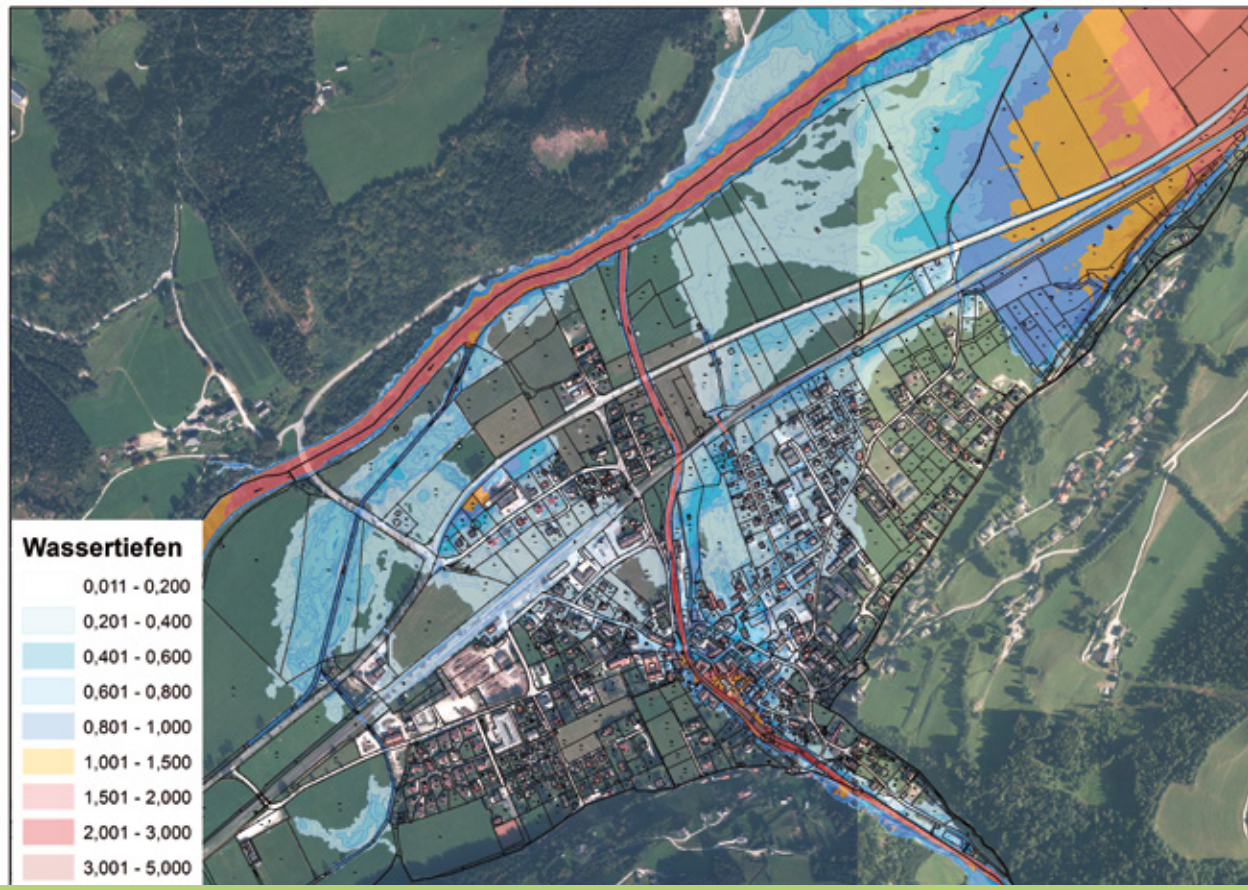


Abb. 3: Überflutungstiefen am Walchenbach

Fig. 3: Depth of water at the Walchenbach torrent

Prozesstyp Feststofftransport schwach

Dieser Prozesstyp ist lt. ONR 24800 durch ein newtonisches Fließverhalten geprägt, der Dichtebereich bewegt sich jedoch schon bis zu 1300kg/m³. Die volumetrische Feststoffkonzentration liegt zwischen 0 und 20 % und das Größtkorn bewegt sich bereits bis in den dm-Bereich. Lt. ONR 24802 besteht hier die Möglichkeit, das mitgeführte Geschiebe durch den Intensitätsfaktor zu berücksichtigen. Dieser prozessspezifische Zuschlag zum Reinwasserabfluss liegt gemäß ONR 24800 für den fluvialen Feststofftransport im Bereich zwischen 1,05 und 1,40, wobei für den schwachen Feststofftransport der Zuschlag zwischen 1,05 und 1,20 festgelegt wurde. Mit diesem „erhöhten Reinwasserabfluss“ kann die Berechnung dann in gleicher Weise wie für den „Prozesstyp Reinwasser“ erfolgen.

Anwendung im Wildbachbereich: gesicherte und ungesicherte Unterlaufgerinne sowie Überflutungsflächen infolge von Mitberücksichtigung von Geschiebe durch eine Abschätzung mittels Intensitätsfaktor, Dimensionierung von Brückenquerschnitten und Durchlässen

Prozesstyp Feststofftransport stark

Dieser Prozesstyp (Terminus „murartiger Feststofftransport“) ist lt. ONR 24800 durch ein annähernd newtonisches Fließverhalten geprägt, der Dichtebereich bewegt sich jedoch schon bei bis zu 1700kg/m³, die volumetrische Feststoffkonzentration liegt zwischen 20 und 40 % und das Größtkorn bewegt sich bereits bis in den m-Bereich.

Lt. ONR 24802 besteht hier wieder die Möglichkeit, das mitgeführte Geschiebe durch den Intensitätsfaktor IF zu berücksichtigen. Dieser prozessspezifische Zuschlag zum Reinwasserabfluss kann gemäß ONR 24800 für den stark

fluvialen Feststofftransport im Bereich zwischen 1,20 und 1,40 für murartigen Feststofftransport von 1,40 bis 3,50 liegen. An dem großen Wertebereich ist klar erkennbar, dass dieses Verfahren als eine grobe Annäherung zu sehen ist. Da der starke Feststofftransport keine statische Eigenschaft hat, sondern hinsichtlich Geschiebemobilisierung und Transportkapazität sowie Form der Abflussganglinie Schwankungen unterliegt, sollte dieser Prozess mithilfe von Geschiebetransportberechnungen berücksichtigt werden. In diesem Fall stehen dem Anwender mehrere 1-dimensionale Modelle zur Verfügung, die den Geschiebetransport berücksichtigen können.

Die Anwendbarkeit der Modelle richtet sich nach den eingesetzten Formelansätzen. Das Modell HEC-RAS hat eine Sohlneigungsbeschränkung aufgrund der Berechnung mit der Meyer-Peter-und-Müller-Formel bis ca. 2,5 % Sohlneigung. Im Modell Tom^{SED} liegt die sohlneigungsbedingte Anwendbarkeit zwischen 3 und 20%. Findet man mit einer profilweisen Berechnung nach dem ingenieurmäßigen Ansatz das Auslangen, kann ein Gefällsbereich zwischen 0 und 20% berechnet werden.

Für die Feststofftransportberechnungen ist neben einer Abflussganglinie auch eine Geschiebeganglinie oder eine Geschiebefracht festzulegen. Dazu sind noch die charakteristischen Korngrößen zu bestimmen und die geeigneten Formelansätze zu definieren. Da die Bestimmung der Geschiebefracht oder die Festlegung einer Geschiebeganglinie eher gutachterlich bestimmt wird, wird empfohlen eine obere und untere Grenze zu definieren und mit diesen Eingangsdaten verschiedene Szenarien zu rechnen. Dabei kann der Vorteil der Modellanwendung genutzt werden, da die Berechnung von Szenarien vom Zeitaufwand gesehen eher gering ist.

Anwendung im Wildbachbereich: gesi-

cherte und ungesicherte Unterlaufgerinne sowie Überflutungsflächen infolge Geschiebeanlagen und -erosionen, Dimensionierung von Brückenquerschnitten und Durchlässen, Optimierung von Abflussquerschnitten mit Berücksichtigung des Geschiebetransportes.

Kurzsteckbrief HEC-RAS 4.1

Berücksichtigung von Feststofftransport in flachen Gerinnestrecken bis 2,5 % (Formel nach Meyer-Peter & Müller). Für die Geschiebeberechnung sind eine Geschiebeganglinie und die charakteristischen Korngrößen (d30, dm, d50, d90) festzulegen. Da das Modell eine bewegliche Sohle und Böschung rechnen kann, sind maximale Erosionstiefen je Querprofil oder für einzelne Homogenabschnitte ebenfalls vom Anwender zu bestimmen.

Kurzsteckbrief Tom^{SED}

Tom^{SED} („Torrential Model for Sediment Transport“) wurde speziell für die Berechnung des Geschiebetransports in steilen Gerinnen entwickelt. Mögliche Anwendungsgebiete sind somit Wildbacheinzugsgebiete und Gebirgsflüsse zwischen 2,5 und 20% Sohlgefälle. Die Abflussganglinien werden als kinematische Welle durch ein Gerinnesystem geleitet. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Fließwiderstands stehen dem Anwender zur Auswahl. Zusätzlich kann der Einfluss der Makrorauigkeit (Formrauigkeit) auf den Geschiebetransport berücksichtigt werden. Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports (Rickenmann 1990, 1991; Smart & Jäggi, 1983) stehen zur Verfügung. In Tom^{SED} können auch Änderungen der Gerinnegeometrie durch Auflandungen bzw. Erosion berücksichtigt werden, wobei jedem Gerinneabschnitt eine mögliche Erosionstiefe zugewiesen wird. Bezugsquelle: www.bedload.at; Freeware

2D-Modelle

Die 2-dimensionale Berechnung des Geschiebetransportes ist für die Praxis derzeit noch zu wenig erprobt. Es gibt einige Studien und Projekte mit Langzeitsimulationen an Flüssen. Einige Modelle bieten ein Geschiebemodul an: FLO-2D, Hydro AS 2D, Flumen.

Prozesstyp Murgang

Dieser Prozesstyp ist lt. ONR 24800 durch ein nicht-newtonsches Fließverhalten geprägt, der Dichtebereich bewegt sich jedoch schon über 1700kg/m³. Die volumetrische Feststoffkonzentration liegt bei über 40 % und das Größtkorn bewegt sich bereits bis in den m-Bereich.

Lt. ONR 24802 besteht hier wieder die Möglichkeit, das mitgeführte Geschiebe durch den Intensitätsfaktor zu berücksichtigen. Dieser prozessspezifische Zuschlag zum Reinwasserabfluss kann gemäß ONR 24800 für den Murgang im Bereich über 3,50 liegen. An dem großen Wertebereich ist klar erkennbar, dass dieses Verfahren als eine grobe Annäherung zu sehen ist.

Kurzsteckbrief FLO-2D

Eine Möglichkeit zur Berechnung von schlammartigen Murgängen ist die 2-dimensionale Berechnung mittels FLO-2D. Der Murgang wird in diesem Modell als homogene Flüssigkeit (Ansatz nach Bingham mit turbulenter Reibungsterm) betrachtet und die rheologischen Parameter werden im Labor für verschiedene Wasseranteile ermittelt. Vom Anwender ist als Eingangswert eine definierte Wasser-Murgang-Ganglinie festzulegen. Die Berechnung erfolgt 2-dimensional ohne bewegliche Sohle. Als Ergebnis wird je Rasterelement die Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit sowie der dynamische Druck je Zeitschritt berechnet.

Schlussfolgerungen

In der Planungspraxis der WLW sind aufgrund verbesserter Grundlagendaten in Form von flächigen Geländemodellen mit hoher Genauigkeit, Abflussganglinien aus Niederschlag-Abflussmodellen und Expertenwissen mithilfe der zur Verfügung gestellten Softwarepakete (ACAD CIVIL 3D, Arc-GIS) modernste Berechnungen und Modellierungen möglich. Der richtige Einsatz und die Modellwahl stellen neben den Grundlagendaten einen wichtigen und entscheidenden Punkt dar. Die aus den Simulationen erhaltenen Ergebnisse sollten von den Anwendern jederzeit auf Plausibilität überprüft und gegebenenfalls kritisch hinterfragt werden können. Die Fachkenntnis ist nicht nur für die Modellierung selbst wichtig, sondern auch für die Beurteilung von Fachgutachten sowie die Erstellung von Leistungsverzeichnissen für die Vergabe von Modellierungen an Dritte. Durch die rasante Weiterentwicklung – unterstützt von Naturmessungen wie z.B. durch die Geschiebemessungen an der Ursula – werden die Ergebnisse laufend verbessert und geben Hoffnung auf noch mehr Realitätsnähe in der Abschätzung/Berechnung von Wildbachprozessen. Die in diesem Leitfaden vorgestellten Programme sind nur ein Auszug aus möglichen Softwareprodukten, die aufgrund des praktischen Einsatzes im Wildbachbereich hier vorgestellt wurden. Die rasante Weiterentwicklung auf diesem Fachgebiet gibt Hoffnung, dass sich die Produkte laufend verbessern und somit dem Anwender als wertvolles unterstützendes Hilfsmittel dienen können.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Michael Botthof
Fachbereich Wildbachprozesse
Wildbach und Lawinenverbauung
GBL Liesertal und Ossiacher Seebecken
Meister Friedrich Straße 2
9500 Villach
michael.botthof@die-wildbach.at

DI Gerhard Holzinger
Fachbereich Wildbachprozesse
Wildbach und Lawinenverbauung
Neukirchnerstr. 125
2700 Wr. Neustadt
gerhard.holzinger@die-wildbach.at

DI Stefan Janu
Fachbereich Wildbachprozesse
Wildbach und Lawinenverbauung
GBL Ennstal und Salzatal
Schönaustraße 50
8940 Liezen
stefan.janu@die-wildbach.at

DI Gerald Jäger
Fachbereich Wildbachprozesse
Wildbach und Lawinenverbauung
GBL Bregenz
Rheinstraße 32/5
A 6900 Bregenz
gerald.jaeger@die-wildbach.at

DI Daniel Kurz
Fachbereich Wildbachprozesse
Wildbach und Lawinenverbauung
GBL Außerfern
Lechtalerstraße 21
6600 Lechaschau
daniel.kurz@die-wildbach.at

Dipl.Geogr. Susanne Mehlhorn
 Fachbereich Wildbachprozesse
 BMLFUW Abt. IV/5
 Marxergasse 2
 1030 Wien
 susanne.mehlhorn@die-wildbach.at

DI Markus Moser
 Fachbereich Wildbachprozesse
 Wildbach und Lawinenverbauung
 GBL Lungau
 Johann Löcker Str. 3
 5580 Tamsweg
 markus.moser@die-wildbach.at

DI Christian Pürstinger
 Fachbereich Wildbachprozesse
 Wildbach und Lawinenverbauung
 GBL Salzkammergut
 Traunreiterweg 5
 4820 Bad Ischl
 christian.puerstinger@die-wildbach.at

Literatur / References:

BERGMEISTER, K. SUDA, J. HÜBL, J. RUDOLF-MIKLAU, F. (2008):
 Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren; Sonderdruck BetonKalender,
 Ernst&Sohn, Berlin

CHIARI, M., RICKENMANN, D. (2009):
 Modellierung des Geschiebetransportes mit dem Modell SETRAC für das
 Hochwasser im August 2005 in Schweizer Gebirgsflüssen Wasser Energie
 Luft – 101. Jahrgang, 2009, Heft 4, CH-5401 Baden

CHIARI, M., FRIEDL, K., RICKENMANN, D. (2010):
 A one dimensional bedload transport model for steep slopes. Journal of
 Hydraulic Research, 48(2), pp. 152-160.

RICKENMANN, D., BRAUNER, M. (2004):
 Ansätze zur Abschätzung des Geschiebetransportes in Wildbächen und
 Gebirgsflüssen; In: Kompendium für das Projekt ETAlp: Gesamtheitliche
 Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wild-
 bacheinzugsgebieten (Lebensministerium und WLW), Geschiebetransport
 V2.2

HABERSACK, H. et al. (2008):
 Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik – Grundlagen,
 Anwendung und Modelle für die Praxis; BMLFUW – ÖWAV, Wien

HABERSACK, H., BADURA, H., GABRIEL, H., HENGL, M., HUBER, B.
 ET AL. (2011):
 ÖWAV Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und
 Gewässermorphologie; BMLFUW

KATINKA, K. (2002):
 Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen; Disser-
 tation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Universität Fridericiana
 zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2002

MOSER M., JÄGER G. (2008):
 Abschätzung des Geschiebetransportes in der Ausleitungsstrecke von Kraft-
 werksanlagen; Anwendung der ETAlp-Studie 2004 am Beispiel Ursiau/
 Handlgraben/Gde. Maria Alm; Wildbach- und Lawinenverbau 72. Jg.,
 Heft Nr. 158

MOSER M., JÄGER G. (2009):
 Hydrologische und Hydraulische Modellierung in der Gefahrenzonen-
 planung des forsttechnischen Dienstes; Wildbach- und Lawinenverbau 73.
 Jhg., Juni 2009, Heft Nr. 163

ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSMINISTERIUM (ONR 24800, ONR 24802):
<http://www.as-search.at/>

Wenn der Boden Hilfe braucht.

Der komplette Geokunststoff Erste-Hilfe-Koffer von NAUE
Geotechnik mit Geokunststoffen



Geokunststoffe von NAUE

Bentofix® Carbofol® Combigrid® Secudrain® Secugrid® Secumat® Secutex® Terrafix®
 Deponiebau - Straßenbau - Wasserbau - Tunnelbau - Umweltschutz
 Bewehren Dränen Dichten Erosionsschutz Filtern Schützen Trennen Verpacken



NAUE GmbH & Co. KG
 Gewerbestraße 2
 D 32339 Espelkamp-Fiestel
 Telefon +49 5743 41-0
 Fax +49 5743 41-240
 info@naue.com
 www.naue.com

STEFAN JANU, SUSANNE MEHLHORN

Sensitivitätsanalyse und Vergleich 2-dimensionaler Hochwasserabflussmodelle

Sensitivity Analysis and Comparison of 2-Dimensional Hydrodynamic Models

Zusammenfassung:

Die Verwendung von Hochwasserabflussmodellen ist für die Gefahrenbeurteilung bei speziellen Fragestellungen auch für Wildbäche, mittlerweile zum Standard geworden. Dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung stehen für 2-dimensionale Abflussuntersuchungen die Programme FLO-2D und HYDRO AS-2D zur Verfügung. Im Zuge der Revision der Gefahrenzonen des Toberbaches (Steiermark) wurden für die Beurteilung der Gefahrenbereiche Simulationen mit beiden Programmen durchgeführt. Dies ermöglichte einen direkten Vergleich der Programme hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (Handhabung, zeitlicher Aufwand) und ihrer Ergebnisse. Aufgrund der guten Eignung des Geländes wurde ebenfalls eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um herauszustellen, wie sich Veränderungen der Genauigkeit des Geländemodells auf die Ergebnisse auswirken können.

Stichwörter:

2D-Modelle, FLO-2D, HYDRO AS-2D, Geländemodelle

Abstract:

The application of hydrodynamic runoff models has already become a standard tool to support the elaboration of special questions such as torrent hazard zones. The Austrian Service for Torrent and Avalanche Control is currently using the 2-dimensional models FLO-2D and HYDRO AS-2D. On occasion of the revision of the hazard zones of the torrent "Toberbach" (Styria) simulations with both programs were made. Thereby the opportunity was provided to compare both programs directly regarding handling, time and results of the simulations. Because of the good appropriateness of the terrain it was possible to analyse the sensitivity of the models applied as well as, how different grades of accuracy of the terrain models would affect the simulation's results.

Keywords:

2D-simulation, FLO-2D; HYDRO AS-2D, terrain models

Einleitung

Seit einigen Jahren werden seitens des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) 2-dimensionale Abflussimulationen (Hochwasserabfluss und Murgänge) für spezielle Fragestellungen in der Planung und als Hilfsmittel für die Beurteilung in der Gefahrenzonenplanung, mit dem SoftwareProgrammpaket FLO-2D durchgeführt. Seit kurzer Zeit steht der WLV ein weiteres SoftwareProgrammpaket HYDRO AS-2D für 2-dimensionale Reinwasserabflussberechnungen zur Verfügung. Im Zuge der Revision des Gefahrenzonenplans der Gemeinde Passail und Fladnitz an der Teichalm (Steiermark) wurden als Hilfestellung für die Beurteilung der Gefahrenbereiche des Toberbaches Simulationen mit diesen zwei Programmen durchgeführt. Dies ermöglichte einen direkten Vergleich der Programme hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (Handhabung, zeitlicher Aufwand) und vor allem ihrer Ergebnisse. Bei dieser Gelegenheit wurde von beiden Simulationsprogrammen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die untersuchte wie sich die Veränderung der Genauigkeit des Gelände-

modells (aus Airborn Laserscan Daten, kurz ALS, berechnet) auf die Ergebnisse des jeweiligen Modells auswirken.

Allgemeine Eckdaten	
Toberbach	
Lage	Grazer Bergland, Passailer Becken, Grenzbach Gemeinde Passail und Gemeinde Fladnitz an der Teichalm, geologisch Oberostalpin (Gesteine des Grazer Paläozoikums, im Norden Osseer Kalk und Süden Schwarzkogel Sandstein und Dolomit Sandstein)
Einzugsgebiet	Fläche bis Mündung Moderbach 13,53 km ² , Form Einzugsgebiet langgezogen ca. 9 km und schmal ca. 1,5 km
Bachcharakteristik	Gefälle Oberlauf 30 %, Talboden 5 % - ~ 2,5 %, Zubringer Eggertsgraben und Hopferhansgraben. Der Schwemmkegel des Toberbaches ist aufgrund von quartären Talverfüllungen leicht kubiert.
Bemessungswerte	HQ ₁₀₀ = 42 m ³ /s, BE ₁₅₀ = 48 m ³ /s, Intensitätsfaktor Schwemmkegel (Simulationsstrecke) IF= 1,15, Geschiebefracht GF ₁₅₀ = 12.000 m ³
Siedlungsstruktur	Vorwiegend offene Bebauung und Siedlungssplitter, wenig Einfriedungen und geringer Anteil an Bodenversiegelungen

Allgemeine Eckdaten	
FLO-2D	
Methode	Finite Differenzen Methode mit regulärer, strukturierter Netzstruktur (Berechnung in 8 Richtungen möglich), Diskretisierung nach der Zeit mittels explizitem Verfahren mit Stabilitätskriterium, Multiprozessorfähigkeit
Ergebnisse	Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Überflutungsdauer, Retentionswirkung Retentionswirkung und Sohlschubspannungen- alles für stationäre und instationäre Abflüsse
HYDRO AS-2D, LASER AS	
Methode	Finite Volumen Diskretisierung, nach den Flachwassergleichungen tiefenge-mitteltes Modell, mit unstrukturierten Vierecks- und Dreieckselementen, Benutzeroberfläche SMS-Software, Multiprozessorfähigkeit
Ergebnisse	Wasserspiegellagen, Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Überflutungsdauer, Abflussaufteilung auf Flussschlauch und Vorländer, Retentionswirkung, Sohlschubspannungen, für stationäre und instationäre Abflüsse
Laser AS	Zur Aufbereitung von Digitalen Geländemodellen aus Laser-Scan-Messungen, voll automatische Ausdünnung und Netzerstellung, hohe Ausdünnungsraten, Bruchkanten werden automatisch generiert, ausgeprägte Strukturen wie Wege und Straßenverläufe, Gebäudeumrisse können mit integriert werden und werden dadurch insbesondere genau erfasst.

Fragestellung und Zielsetzung

Trotz gut dokumentierter Chronikereignisse (sogar mit Hochwassermarken an Objekten) konnten für die Revision der Gefahrenzonen am Toberbach gewisse Fragestellungen, wie die folgende, nach „besten Expertenwissen“ nicht restlos, „objektiv“

geklärt werden. Welchen quantitativen Einfluss haben Brückenverklausungen auf den Vorlandabfluss und vor allem wie verläuft der Vorlandabfluss quantitativ auf dem leicht kubierte (geringe Erhebungen und seichte Mulden), breiten Schwemmkegel?

Aus diesem Grund wurden „nach dem Stand der Technik“ 2- dimensionale Abflusssimulationen als Hilfestellung für die Gefahrenbeurteilung des Vorlandbereiches herangezogen.

Vergleich der Programme FLO-2D und HYDRO AS-2D

Grundlegender Unterschied der beiden Programme ist die Diskretisierungsmethode und in der Folge vor allem die Darstellung des Geländemodells. Das Programm FLO-2D rechnet mit der Methode der finiten Differenzen und geht von der Differenzialform der Gleichung aus, die Reihe der Differenzialquotienten werden approximiert. Das Geländemodell kann im Programm daher nur als regelmäßiger Raster über die gesamte Fläche eingehen. Eine Differenzierung des Geländemodells von inhomogenen Bereichen mit größerem Genauigkeitsanspruch zu sehr homogenen Bereichen mit geringerem Genauigkeitsanspruch ist nicht möglich.

Das Programm HYDRO AS-2D rechnet mit finiten Volumen unter der Verwendung der Integralform, also der unbedingten Erhaltung von Masse, Impuls und Energie. Der große Vorteil des Programms ist, dass mit der finiten Volumen-Methode eine sehr flexible geometrische Differenzierung des Geländemodells möglich ist. Da der Schwemmkegel des Toberbaches kleinräumig nur leicht kubierte Formen aufweist, die Gebäude im Siedlungsbereich sehr aufgelockert situiert sind und sich nur wenige Einfriedungen (Mauern, Zäune, etc.) finden, ist dieses Plangebiet bestens für eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Simulationen geeignet.

Sensitivitätsanalyse über die Auswirkung der Geländemodellgenauigkeit auf die Ergebnisse

Durch die Verwendung von Airborne Laserscan-Daten (ALS) wird die Geländeoberfläche großflächig, als gefiltertes Gelände, das heißt ohne Bewuchs und Bauwerke, homogen (normalerweise 1 m-Raster) vermessen. Laut Herstellerangaben betragen die Abweichungen in der Höhe maximal 15 cm und in der Lage maximal 30 cm. Die Abweichungen sind aber vor allem vom Bewuchsgrad (Dichte), Bewuchsart (Reflexion) und von der Geländeneigung (je steiler desto ungenauer) abhängig. Aufgrund der großflächigen homogenen Vermessung (1 x 1 m-Raster) erhält man eine sehr gute Abbildung der Geländeoberfläche. Diese zieht aber eine enorme Dichte an Punkten und in weiterer Folge eine große Datenmenge nach sich. In ungefilterter Form mit normalen Rechnerleistungen (Multiprozessoren mittlerweile Standard) sind großflächige, längere Abflusssimulationen kaum bis gar nicht bewältigbar. Aufgrund dessen müssen die ALS Daten für Simulationen ausgedünnt werden. Für das Programm FLO-2D kann eine Ausdünnung nur durch Verwendung eines gröberen Rasters erfolgen. Für die vorliegende Arbeit wurde zum Vergleich auch eine sehr zeitaufwendige Simulation (Rechenzeit ca. 1Woche) ohne Ausdünnung durchgeführt. Für das Programm HYDRO AS-2D erfolgt die Ausdünnung mittels Dreiecks- und Rechtecknetz. Mit Hilfe des Zusatzprogramms LASER AS können große Datenmengen bearbeitet werden. Die Ausdünnung erfolgt insbesondere in der Beibehaltung der für die hydraulische Modellierung wichtigen Geländeinformationen. Bruchkanten werden automatisch generiert oder können zusätzlich eingegeben werden. Der Flussschlauch wurde terrestrisch vermessen und für die Modellierung mit dem Programm HYDRO AS-2D direkt in das Geländemodell eingebaut. Für die Modellierung

mit dem Programm FLO-2D wurde der vermessene Flussschlauch auf das jeweilige Rastermodell umgerechnet. Mit Hilfe der durchgeführten Sensitivitätsanalyse soll geprüft werden, ob und in welchem Maße verschiedene Geländemodellqualitäten die Abflussergebnisse beeinflussen. Allgemein ist bekannt, dass bei verstärkter Ausdünnung Erhebungen gekappt und Mulden aufgefüllt werden. Daher wird versucht darzustellen, ab welcher Ausdünnung der Punktdichte wesentliche Unterschiede im Abflussverhalten sowohl in Bezug auf die Überflutungsflächen als auch in Bezug zu Unterschieden in den einzelnen Klassen der Wassertiefen auftreten.

Methodik und Analyse

Sensitivitätsanalyse der Geländemodellgenauigkeit

Für die Analysen wurden – außer den Gebäuden – bewusst keine weiteren Details (Brücken, zusätzliche Bruchkanten, etc.) in die Geländemodelle aufgenommen, damit ein möglichst homogener Vergleich der einzelnen Berechnungsvarianten garantiert ist.

Mit dem Programm FLO-2D wurden drei Varianten simuliert. Als „non plus Ultra“-Variante erfolgte die Simulation ohne Ausdünnung der ALS-Daten (1m Raster). Als weitere Varianten erfolgte eine Ausdünnung auf Basis eines 3 m- und 5 m Rasters. Die sich für die jeweilige Simulation ergebende Punktzahl und der prozentmäßiger Anteil der Ausdünnung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Mit dem Programm HYDRO AS-2D wurden insgesamt 5 Simulationsvarianten mit unterschiedlichem Ausdünnungsgrad gerechnet (Tabelle 1). Im Folgenden wird jedoch nur auf drei Varianten eingegangen: Variante „genau“ mit einem hoch aufgelösten Geländemodellnetz, Variante „Standard“ mit dem vom Hersteller vorge-

FLO-2D	1m Raster	3m Raster	%	5 m Raster	%						
Punktzahl	650782	72830	88,81	26382	95,95						
HYDRO AS-2D	gesamt	genau	%	~	%	~/-	%	Standard	%	unge-nau	%
Punktzahl	646649	86142	86,68	48846	92,45	38985	93,97	27076	95,81	25465	96,06

Tab. 1: Geländemodellvarianten mit unterschiedlichen Ausdünnungen der ALS-Punkte, % = Ausdünnungsgrad

Tab. 1: Variants of the digital terrain models with different ALS reduction factors, % = reduction factor

gegebenen Standardeinstellungen und Variante „ungenau“ mit bewusst gewählten Einstellungen, die eine geringe Netzauflösung ergeben.

In Abbildung 1 sind die Abweichungen der jeweils ausgedünnten Geländemodelle zu dem ALS- Geländemodell als Differenzmodelle dargestellt. Die Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der ausgedünnten Punkte zu den ALS Punkten werden in den dazugehörigen Histogrammen dargestellt. Betrachtet man die Fläche als Ganzes, ist ersichtlich, dass die Abweichungen bei den FLO-2D Geländemodellen viel geringer sind als bei den HYDRO AS-2d Geländemodellen, dies spiegelt sich auch deutlich in den Häufigkeitsverteilungen der Punktabweichungen wieder. Aufgrund der fast gleichen Ausdünnungsraten kann das 3 m-Rastermodell (89% Ausdünnung) mit dem Geländemodell „genau“ (87% Ausdünnung) und das 5 m-Rastermodell (96%) mit dem „Standard“-Modell direkt verglichen werden. Aus den Histogrammen geht hervor, dass auf die Gesamtfläche gesehen bei den FLO-2D Modellen 64% (3m- Raster) bzw. 46 % (5 m-Raster) der Punkte keine bzw. nur geringste Abweichungen von den ALS-Punkten haben. Bei den HYDRO AS-2D Modellen weichen dagegen nur 44 % (Modell „genau“ bzw. 23 % (Modell „Standard“) der Punkte nicht oder nur geringfügig von den ALS-Daten ab.

Im Detail betrachtet wird deutlich, dass im FLO-2D Modell kurze, große Neigungsunterschiede (wie Straßenböschungen, kleine Gräben, etc.) viel schlechter als im HYDRO AS-2D Modell abgebildet werden. Prinzipiell gibt es im Programmpaket FLO-2D die Möglichkeit Levees, Gullies und Straßen nachträglich einzuarbeiten, ob dies jedoch in der Praxis angewendet wird, ist fraglich.

Als nächster Schritt wurden von den einzelnen Geländemodellvarianten Abflusssimulationen mit der maßgeblichen Abflussganglinie für das BE150 durchgeführt und die Ergebnisse gegenübergestellt.

Abflussuntersuchung als Hilfestellung für die Gefahrenzonenauausscheidung

Als Hilfestellung bei der Gefahrenzonenplanung wurde das Programm HYDRO AS-2D verwendet. Das Geländemodell wurde mit großer Genauigkeit berechnet. Bruchkanten (wie Straßen, zusätzlich terrestrische Bruchkanten, Einfriedungen, etc.) wurden in das Modell eingearbeitet, ebenso wurden sämtliche Brücken in das Modell integriert. Für die Beurteilung der Gefahrenbereiche wurden folgende Varianten berechnet: BE₁₅₀ Brücken nicht verklaut, BE₁₅₀ Brücken verklaut bzw. teilverklaut, BE₃₀ Brücken nicht verklaut.

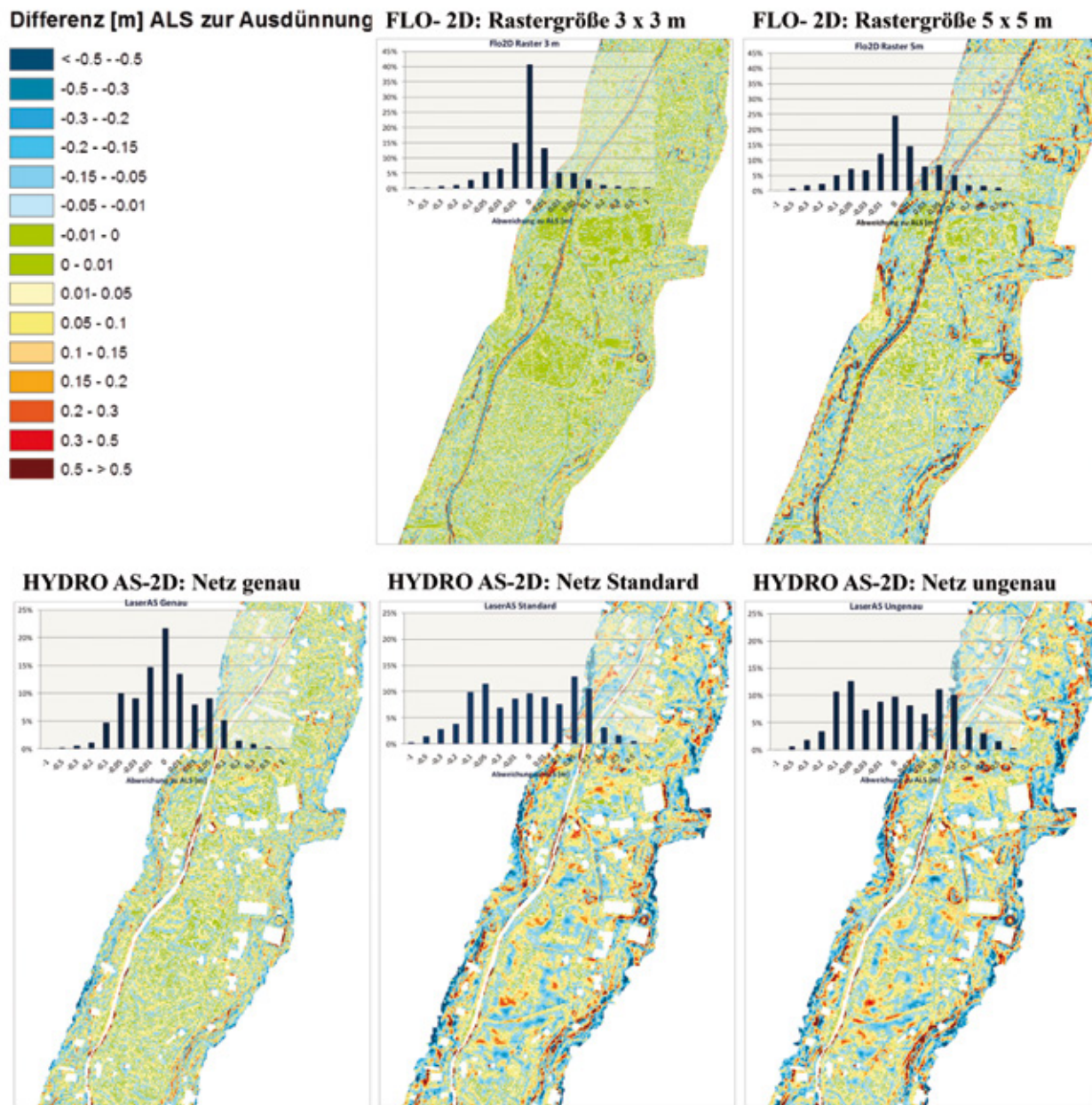


Abb. 1: Differenzmodelle: Abweichungen der ausgedünnten Modelle zum ALS Modell und Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der ausgedünnten Punkte zu den ALS Punkten

Fig. 1: Difference models: deviations of the reduced models to the ALS model and distibution of the deviations of the reduced raster points to ASL points

Ergebnisse

Ergebnisse der Abflusssimulationen der verschiedenen Geländemodellgenauigkeiten

Die Ergebnisse der maximalen Wassertiefen von sechs Simulationsvarianten sind in Abbildung 2 dargestellt. Insgesamt wurden drei FLO-2D- und fünf HYDRO AS-2D-Simulationen mit unterschiedlichen Geländemodellgenauigkeiten gerechnet. Alle Simulationen wurden mit den gleichen Eingangsdaten (Abflussganglinie BE_{150}) und Parametern (Rauhigkeitsbeiwerten) gerechnet. Einbauten wie Brücken, Einfriedungen und zusätzliche Bruchkanten wurden, damit eine einheitliche, objektive Betrachtungsweise möglich ist, nicht gemacht. Für die Interpretation der Ergebnisse wurden die Resultate der Fließtiefen bzw. Wassertiefen, die Fließgeschwindigkeiten und die Differenzenmodelle der Geländemodellvarianten betrachtet. In Tabelle 2 sind die Überflutungsflächen der einzelnen simulierten Varianten in Wassertiefenklassen aufgeteilt und für jede Wassertiefenklasse die Abweichungen der ausgedünnten Geländeflächen zu dem ALS-Geländemodell als Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Weiters wurde unterschieden nach Gesamtfläche je Klasse, Flächen mit positiver Höhenabweichung vom ALS-Geländemodell je Klasse und Flächen mit negativer Höhenabweichung vom ALS- Geländemodell je Klasse.

Vergleich der Simulationsergebnisse FLO-2D mit HYDRO AS-2D

Grundsätzlich wird deutlich (Abbildung 2), dass die Gesamtüberflutungsflächen der FLO-2D-Simulationsvarianten deutlich größer sind als die der HYDRO AS-2d-Simulationen. Auch im Vergleich der Fließgeschwindigkeiten zeigt sich, dass die Fließgeschwindigkeiten bei den

FLO-2D-Varianten im Flussschlauch im Durchschnitt um 0,5 m/s höher sind als die HYDRO AS-2D-Varianten. Beim Vorlandabfluss sind die Fließgeschwindigkeiten grundsätzlich identisch.

Im Folgenden wird die Variante 1, Raster 3 m (FLO-2D) mit Variante 3 „genau“ (HYDRO AS-2D) der Variante 2, Raster 5 m (FLO-2D) mit Variante 4 „Standard“ gegenübergestellt, da diese annähernd gleiche Ausdünnungsgrade aufweisen.

Der Vergleich der Gesamtflächen (Tabelle 2) zeigt, dass die Flächen der FLO-2D-Simulationen um 19 % (Variante 1 zu Variante 3) bzw. 21 % (Variante 2 zu Variante 4) größer sind als die HYDRO AS-2D-Berechnungen. Betrachtet man die Unterschiede der Flächen „Gesamt“, „Abweichung positiv“ (meist Kuppen und Erhöhungen) und „Abweichung negativ“ (meist Senken und Mulden) in den einzelnen Wassertiefenklassen, dann zeigt sich, dass in den zwei untersten Wassertiefenklassen (0,01 m; 0,01-0,2 m) die Flächen der HYDRO AS-2D-Simulationen deutlich größer sind. Vergleicht man die mittleren Fehler der Höhendifferenzmodelle je Wassertiefenklasse dann wird ersichtlich, dass die mittleren Fehler der Geländemodellhöhenabweichungen (Tabelle 2, Spalten „Abweichung- positiv und negativ“) der FLO-2D-Varianten bis zu der Wassertiefenklasse 1 – 1,5 m deutlich mit bis zu 100% geringer sind. Dasselbe gilt für die Wassertiefenklassen ab 1,5 m der HYDRO AS-2D-Varianten. Daraus folgt, dass die Vorländer im FLO-2D und die Gerinnebereiche mit dem HYDRO AS-2D-Geländemodell der Wirklichkeit entsprechend getreuer abgebildet werden.

Aufgrund der ungenaueren Wiedergabe des Geländemodells im Gerinnebereich mittels FLO-2D (bis zu 70 % größerer Fehler gegenüber HYDRO AS-2D-Modellen) wird bei den FLO-2D Modellen mehr Abflussfracht auf die Vorlandbereiche verteilt, durch die geringfügig höheren Fließgeschwindigkeiten (ca. 0,5 m/s) wird dies

nicht kompensiert. Mit dem Programm FLO-2D hat man zwar die Möglichkeit einen Channel 1-dimensional zusätzlich einzubauen, erfahrungsgemäß erhält man aber bei kleinen Gerinnebreiten (wie im vorliegenden Fall ca. 3 -5 m) keine plausiblen Ergebnisse. In den Vorlandberei-

chen werden speziell sehr kleine, flache Kuppen und Mulden in den FLO-2D-Modellen wirklickeitsgetreuer angepasst, dadurch können sich vor allem in den Randbereichen der Überflutungen (sehr geringe Wassertiefen) unterschiedlichste Überflutungsbilder gegenüber dem HYDRO AS

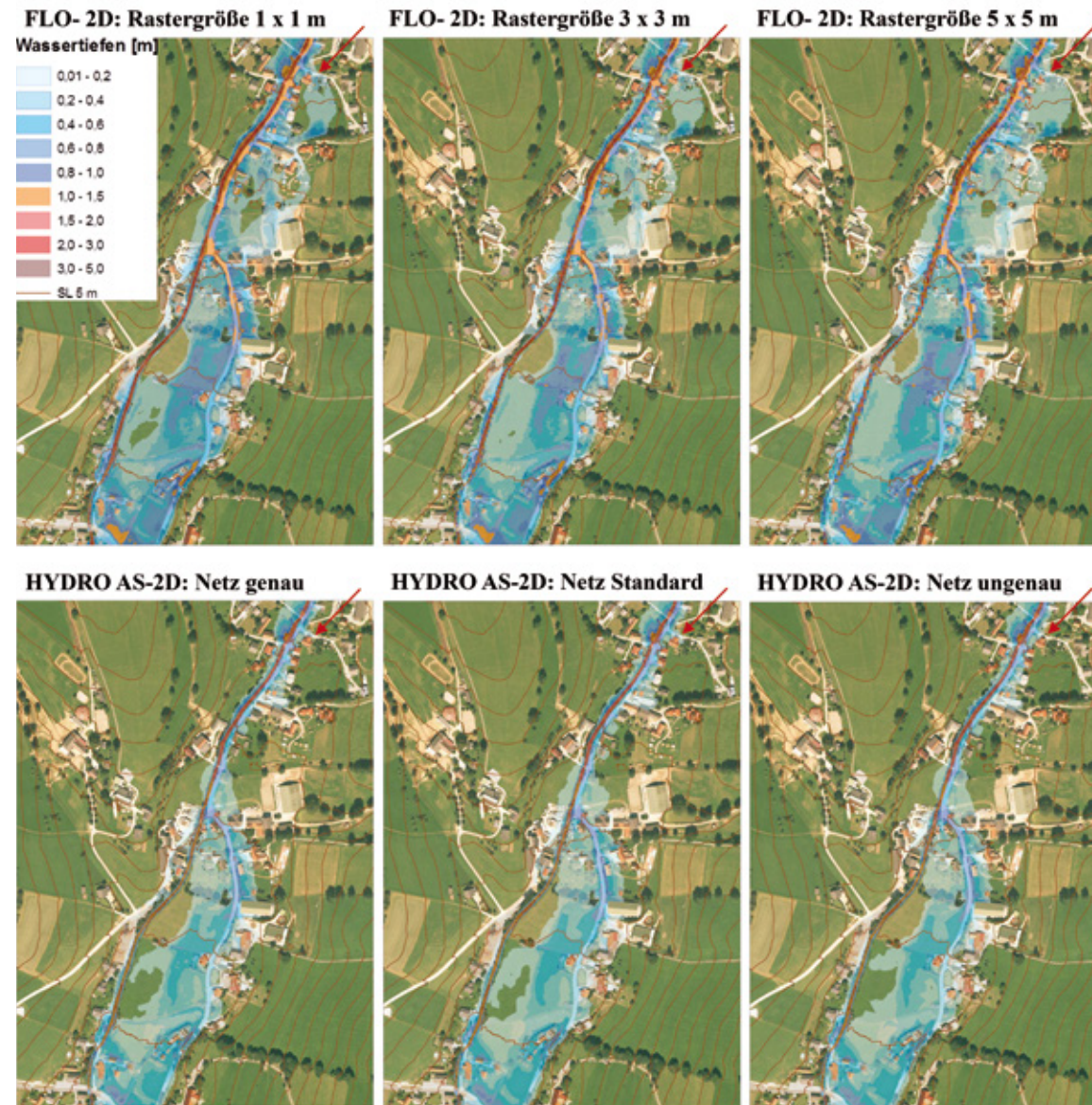


Abb. 2: Wassertiefen der Simulationsvarianten mit verschiedenen Geländemodellgenauigkeiten, mit den Simulationsprogrammen FLO-2D und HYDRO AS-2D

Fig. 2: Water Depths for 6 simulation variants with different grades of accuracy of the terrain models

FLO-2D									
Wassertiefen [m]	Raster 3 m (Variante 1)								
	Abweichung gesamt			Abweichung positiv			Abweichung negativ		
	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std
0,01	1863	0,002	0,048	784	0,033	0,048	868	-0,026	0,035
0,01 - 0,2	94389	0,003	0,045	42477	0,028	0,047	41082	-0,023	0,034
0,2 - 0,4	70497	0,003	0,048	30785	0,029	0,053	31596	-0,023	0,033
0,4 - 0,6	54804	0,001	0,055	22605	0,032	0,059	25881	-0,026	0,041
0,6 - 0,8	36828	0,001	0,064	14842	0,037	0,070	17758	-0,029	0,049
0,8 - 1,0	16548	0,001	0,098	6648	0,060	0,099	8003	-0,048	0,080
1,0 - 1,5	14016	-0,004	0,157	5718	0,108	0,130	6706	-0,101	0,129
1,5 - 2,0	5802	-0,056	0,207	1780	0,157	0,160	3374	-0,180	0,143
2,0 - 3,0	6432	-0,121	0,177	994	0,118	0,143	4711	-0,191	0,138
gesamt	301179	-0,002	0,076	126633	0,038	0,071	139979	-0,039	0,072
Wassertiefen [m]	Raster 5 m (Variante 2)								
	Abweichung gesamt			Abweichung positiv			Abweichung negativ		
	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std
0,01	2210	0,005	0,065	1201	0,041	0,046	891	-0,042	0,061
0,01 - 0,2	98225	-0,004	0,071	45277	0,037	0,053	47779	-0,044	0,068
0,2 - 0,4	71180	-0,004	0,076	34731	0,037	0,054	32705	-0,047	0,076
0,4 - 0,6	60655	-0,002	0,094	30476	0,044	0,069	26967	-0,054	0,097
0,6 - 0,8	40595	-0,002	0,108	21396	0,049	0,085	17094	-0,065	0,108
0,8 - 1,0	17605	0,000	0,147	9708	0,075	0,108	7044	-0,104	0,138
1,0 - 1,5	15575	-0,002	0,241	7860	0,160	0,180	7023	-0,184	0,172
1,5 - 2,0	7140	0,218	0,328	5035	0,370	0,257	1808	-0,169	0,145
2,0 - 3,0	4505	0,366	0,321	3817	0,451	0,264	496	-0,149	0,168
gesamt	317690	0,007	0,130	159501	0,069	0,130	141807	-0,061	0,100

Tab. 2: Gegenüberstellung der Simulationsvarianten (FLO-2D und HYDRO AS-2D); Überflutungsflächen aufgeteilt in Wassertiefenklassen mit den jeweiligen Geländemodellabweichungen (ALS-Geländemodell – ausgedünntes Geländemodell), aufgegliedert in Höhenabweichung gesamt, Höhenabweichung der positiven und negativen Flächenanteile; Mean = Mittelwert, Std = Standardabweichung

HYDRO_AS-2D									
Wassertiefen [m]	genau (Variante 3)								
	Abweichung gesamt			Abweichung positiv			Abweichung negativ		
	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std
0,01	19808	0,003	0,077	9669	0,046	0,077	9885	-0,040	0,049
0,01 - 0,2	114569	0,003	0,058	59479	0,038	0,052	53460	-0,035	0,039
0,2 - 0,4	61410	0,004	0,058	32054	0,036	0,054	28275	-0,032	0,039
0,4 - 0,6	32865	0,009	0,078	17502	0,045	0,084	14865	-0,032	0,042
0,6 - 0,8	14032	0,025	0,120	7985	0,073	0,134	5841	-0,040	0,054
0,8 - 1,0	4688	0,054	0,165	3043	0,117	0,161	1606	-0,066	0,089
1,0 - 1,5	5435	0,036	0,186	3011	0,140	0,177	2383	-0,095	0,092
1,5 - 2,0	1300	0,082	0,178	1097	0,108	0,179	189	-0,066	0,079
2,0 - 3,0	15	0,015	0,061	12	0,036	0,038	3	-0,067	0,067
gesamt	254122	0,007	0,077	133852	0,046	0,080	116514	-0,036	0,045
Wassertiefen [m]	Standard (Variante 4)								
	Abweichung gesamt			Abweichung positiv			Abweichung negativ		
	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std	Fläche [m ²]	Mean	Std
0,01	12495	0,011	0,113	6402	0,081	0,096	6023	-0,063	0,079
0,01 - 0,2	118991	0,006	0,102	62223	0,075	0,075	56071	-0,070	0,070
0,2 - 0,4	66843	-0,002	0,098	33305	0,066	0,072	33090	-0,070	0,069
0,4 - 0,6	36552	0,010	0,106	20029	0,070	0,091	16248	-0,063	0,072
0,6 - 0,8	14578	0,024	0,150	8281	0,093	0,147	6175	-0,070	0,092
0,8 - 1,0	5055	0,051	0,194	3256	0,137	0,169	1769	-0,107	0,127
1,0 - 1,5	4208	0,048	0,245	2336	0,203	0,202	1860	-0,148	0,128
1,5 - 2,0	2714	0,115	0,213	2034	0,201	0,162	677	-0,144	0,117
2,0 - 3,0	4	0,041	0,163	3	0,107	0,135	1	-0,156	0,000
gesamt	261440	0,009	0,114	137856	0,079	0,095	121920	-0,071	0,075

Tab. 2: Comparison of 4 simulation variants; means and standard deviations of flood plain areas grouped by classes of water depth with the certain deviation of the terrain model

2D-Modellen ergeben. Ein Beispiel ist in Abbildung 2 mit „Pfeil“ markiert. Dieser zeigt jenen Bereich, in dem in den FLO-2D-Modellen der Vorlandabfluss die kleine Kuppe gerade noch benetzt und in weiterer Folge der Abfluss über die darunterliegenden Mulden weiterverläuft. Beim HYDRO AS-2D-Geländemodell wird genau dieser Bereich mit einem größeren „positiven Fehler“ wiedergegeben. In der Folge fällt der komplette darunterliegende Überflutungsast beim HYDRO AS-2D-Modell weg.

Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Geländemodellvarianten innerhalb der Simulationsprogramme

Generell kann festgestellt werden: je ungenauer das Geländemodell ist, desto größer ist der mittlere Fehler der Abweichungen der ALS-Höhen zu den ausgedünnten Geländehöhen für die Überflutungsbereiche. Auffällig ist, dass die größten Abweichungen beim FLO-2D-Modell in allen Wassertiefenklassen bei den „positiven Abweichungen“ (z. B.: Kuppen) auftreten, ein Trend innerhalb der Wassertiefenklassen kann hingegen nicht gesehen werden. Beim HYDRO AS-2D-Modell nehmen die Abweichungen im positiven als auch im negativen Bereich (z.B. Kuppen und Mulden) eher gleichmäßig zu. Die Differenzen treten in den sehr kleinen Wassertiefenklassen (0,01m) und in den extrem hohen ab 1,5 m auf.

Auf die Simulationsergebnisse wirken sich die unterschiedlichen Geländemodellvarianten wie folgt aus: je ungenauer das Geländemodell ist, desto größer fallen im Schnitt die Gesamtüberflutungsflächen aus. Höhere Geländebereiche wie Kuppen etc. werden bei einem ungenaueren Geländemodell leichter überströmt, während Mulden und Gräben im Vorlandbereich geringere Überflutungstiefen gegenüber einem genaueren Geländemodell aufweisen.

Ergebnis der für die Gefahrenzonenausscheidung verwendeten Abflussimulation

Für die Gefahrenzonenausscheidung wurden die Abflussuntersuchung mit dem Simulationsprogramm HYDRO AS-2D durchgeführt. In Abbildung 3 sind die maximalen Wassertiefen der Überflutungsflächen für das Bemessungsereignis $BE_{150} = 48 \text{ m}^3/\text{s}$ (links: Brücken unverklast, rechts: Brücken verklast) dargestellt. Ebenfalls sind die jetzt revidierten ausgewiesenen Gefahrenzonen (rote-, gelbe Gefahrenzone, violetter Hinweisbereich) als Linien dargestellt. Ganz deutlich sind die Unterschiede (Brücken unverklast/ verklast) der Überflutungsflächen bzw. Wassertiefen im Bereich der Pfeile erkennbar. Beim oberen Pfeil kommt es durch die Verklausung linksufrig zu einer verstärkten Abflusskonzentration entlang der Straße und in weiterer Folge zu einer Überflutung der darunterliegenden schwach ausgeprägten Mulde. Beim unteren Pfeil ist ersichtlich, dass es durch die Brückenverklausung linksufrig zu viel größeren Wassertiefen entlang der Straße und der darunterliegenden Flächen kommt.

Schlussfolgerungen

Die Analyse und die Vergleiche zeigen, dass große Unterschiede in den Ergebnissen in der Anwendung der beiden Modelle entstehen können. Diese liegen zum einem im verwendeten Simulationsprogramm selbst und zum anderen in der Genauigkeit des verwendeten Geländemodells. Eine Festlegung, welches Programm die „besseren“ (wirklichkeitsgetreueren) Ergebnisse liefert, kann nicht getroffen werden, da jedes Programm die Realität in gewissen Bereichen besser bzw. schlechter gegenüber dem anderen widerspiegelt.

Bezüglich des zeitlichen Aufwands und der Anwenderfreundlichkeit unterscheiden sich

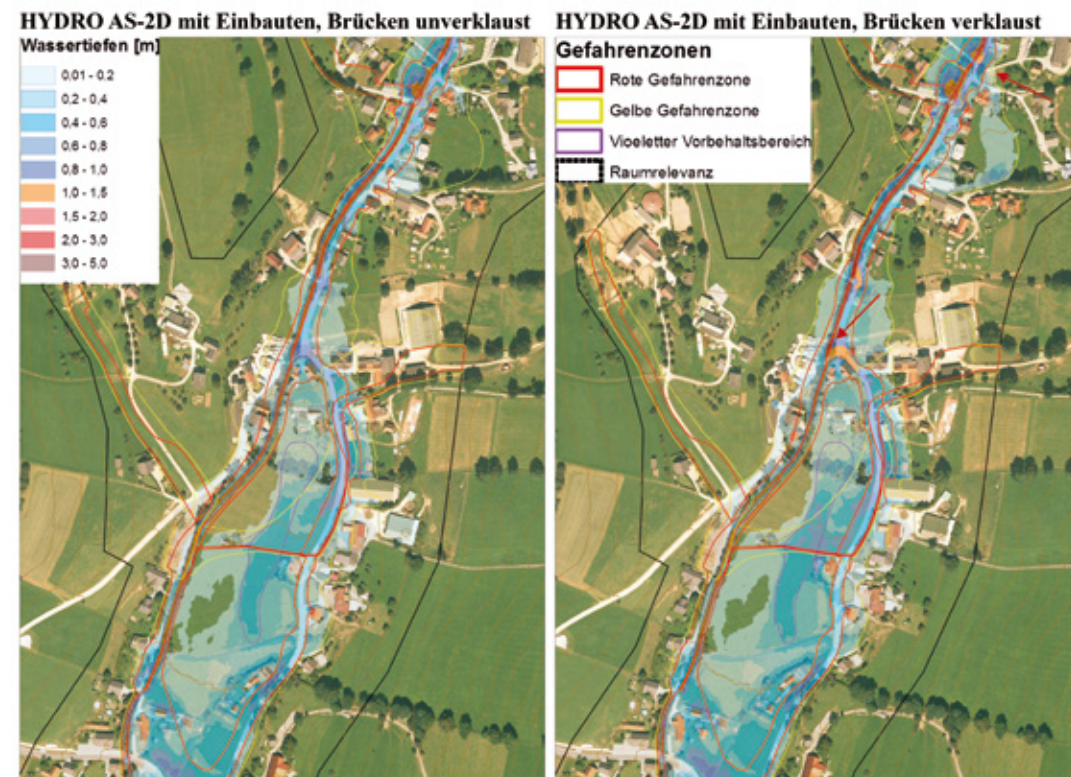


Abb. 3: Wassertiefen der Abflussuntersuchung als Hilfestellung für die Gefahrenzonenplanung, links Brücken unverklast, rechts Brücken verklast

Fig. 3: Water depths of run off analysis; left: scenario with log jam of the bridges; right: scenario without log jams

die beiden Programme erheblich. FLO-2D ist insgesamt sehr anwenderfreundlich konzipiert und bietet eine sehr gute Eingabeoberfläche. Das Simulationsmodell mit allen Eingaben lässt sich in relativ kurzer Zeit aufsetzen. Gravierender Nachteil des Programms sind allerdings die Rechenzeiten. Diese sind für eine Berechnung bis 100.000 Rasterelemente noch moderat und belaufen sich etwa auf eine Stunde. Bis 250.000 Rasterelemente müssen zwei bis acht Stunden und darüber hinaus sogar mehrere Tage kalkuliert werden. Für die durchgeführten Analysen betragen die Rechenzeiten beispielsweise für den 5 m Raster einige Minuten, für 3 m Raster 2 Stunden und für die Berechnung des 1 m Raster mehrere Tage.

Der Aufbau des Simulationsmodells für HYDRO AS-2D kann sich sehr zeit- und arbeitsaufwendig werden.

Als Eingabeoberfläche dient das Programm SMS, das im Bereich Anwenderfreundlichkeit noch einigen Verbesserungsbedarf aufweist. Die Rechenzeiten sind hingegen sehr schnell und betragen für die durchgeführten Analysen – je nach Genauigkeit des Geländemodells - mehrere Minuten bis wenige Stunden.

Prinzipiell sind alle Fließgewässermodelle (so auch FLO-2 und HYDRO AS-2D) für den Flussbau entwickelt worden. Die bei Wildbacheignissen ablaufenden Prozesse (Geschiebetrieb, Erosion, etc.) können von den meisten Modellen

nur unzureichend oder gar nicht simuliert werden. Dem Anwender muss es daher bewusst sein, für welche Fragestellung welches Programm geeignet ist. Der Genauigkeitsanspruch der Geländemodelle kann an den Genauigkeitsgrad der zu tätigen Aussagen angepasst werden. Als Hilfsmittel in der Gefahrenzonenplanung, bei der eine parzellenscharfe Abgrenzung der Gefahrenzonen gefordert ist, ist daher ein größter Genauigkeitsanspruch für die Eingangsdaten (Geländemodell, etc.) erforderlich. In jedem Fall können 2-dimensionale Abflussmodelle für die Simulation von Wildbächen aufgrund der verschiedenen Prozesse, die bei einem Ereignis stattfinden, nur als Hilfsmittel angesehen werden. Die Ergebnisse einer Abflusssimulation müssen immer vom Experten interpretiert und die Ergebnisse plausibilisiert werden.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Stefan Janu
Fachbereich Wildbachprozesse
GBL Ennstal und Salzatal
Schönaustraße 50
8940 Liezen

Dipl.Geogr. Susanne Mehlhorn
Fachbereich Wildbachprozesse
BMLFUW, Abt. IV/5
Marxergasse 2
1030 Wien

Literatur / References:

HABERSACK, H. et al. (2008):
Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik – Grundlagen,
Anwendung und Modelle für die Praxis; BMLFUW – ÖWAV, Wien

O'BRIEN J. S. et.al. (2009):
FLO-2D, Diverse Schulungsunterlagen, FLO-2D Software, Inc. / P.O. Box
66 Nutrisio, AZ 85932. USA, (<http://www.flo-2d.com>)

NUJIC M. (2006):
HYDRO AS-2D; Handbücher und Schulungsunterlagen; Wallbergstr. 8,
83026 Rosenheim / Deutschland, (office@ib-nujic.de)



Hydrotec
Ingenieurgesellschaft für
Wasser und Umwelt mbH



Arbeitsbereiche

- Hydraulik / Hydrologie
- Hochwasserschutz
- Gewässerentwicklung
- Umweltinformatik / GIS

Software-Produkte

- HYDRO_AS-2D
- NASIM
- Jabron
- Delft-FEWS

www.hydrotec.de



dienesch | laner | prax
Ziviltechniker für Kulturtechnik u. Wasserwirtschaft,
Forst- und Holzwirtschaft

Ziegeleistraße 34
5020 Salzburg
salzburg@dlp.at

www.dlp.at

Bahnhofstraße 83
4800 Attnang-Puchheim
attnang@dlp.at

- Wildbachschutz u. Lawinensicherheit
- Hochwasserschutz
- Gefahrenzonenplanung
- Lawinenverbauung
- Wildbachverbauung
- Gutachten und Bauleitung



die leistungsstarken planer

WERNER HELLER

Praxisbeispiel – EDV-gestützte Revision von Gefahrenzonenplänen mit Flo-2D

Practice example – IT-supported revision of hazard zone maps with Flo-2D

Zusammenfassung:

Der Beitrag beschreibt ein Fallbeispiel für den Einsatz des hydraulischen Simulationsmodells Flo-2D für die Revision eines Gefahrenzonenplans und zeigt die Möglichkeiten der Objektivierung und Effizienzsteigerung bei komplexer Geländetopographie.

Stichwörter:

Modell Flo-2D, Gefahrenzonenplanung, Planungsprozess

Abstract:

The article describes a case study for the application of the hydraulic simulation model Flo-2D for the revision of a hazard zone map and outlines the possibilities for more objective and efficient mapping procedures over complex topography.

Keywords:

Model Flo-2D, hazard zone mapping, planning process

Anwendung des Modells Flo-2D

Für die Ausarbeitung von Gefahrenzonenplänen oder die Revision dieser können zweidimensionale Simulationsprogramme unterstützend wirken und den Arbeitsaufwand reduzieren.

Sehr praktikabel ist Flo-2D. Dieses Programm ist ein zweidimensionales Finite-Differenzen-Modell, das hydrologische Berechnungen und hydraulische Berechnungen gleichzeitig durchführt. Es simuliert die Beregnung eines Einzugsgebietes und als Folge das Fortschreiten einer Hochwasserwelle über ein System von quadratischen Gelände-Elementen (Raster-DGM) bei exakter Einhaltung des Volumens der Hochwasserwelle.

Vorteile in der Anwendung

Für die Praxis bietet dieses Programm den Vorteil, dass bereits ausschließlich mit Laserscan-Daten und Niederschlagsdaten eine sehr hohe Aussagekraft erzielt werden kann, weil der über das Gelände zunehmende Abfluss sehr exakt abgebildet wird. Die neuralgischen Punkte im Gelände werden mit sehr hoher Qualität abgebildet. Auch Sturzflut-Bereiche werden sichtbar.

Auch die Einzugsgebietsgrenzen werden exakt erfasst; Ungenauigkeiten in der Einzugsgebietsgröße, die bei manchen Projekten zu Fehldimensionierungen führen könnten, werden vermieden.

Für das Geländemodell können folgende Vereinfachungen getroffen werden:

- Quadratraster (z.B. 2 m bei 1 km², 5 m bei 10 km²) auf Basis des 1-m-Laserscans
- einfach strukturierte Geländerauigkeit
- keine Bachprofile
- keine Brücken, keine Durchlässe (im Laserscan als Erhebungen)
- keine Gebäude

Diese Reduktionen sind zulässig, da bei größeren Hochwässern in vielen Fällen der Abfluss im Bachprofil in den Hintergrund tritt, Brücken und Durchlässe als verkleinert angenommen werden, was aber bei HQ100 / HQ150 in den meisten Fällen zu plausiblen Ergebnissen führt. Eine Ver-

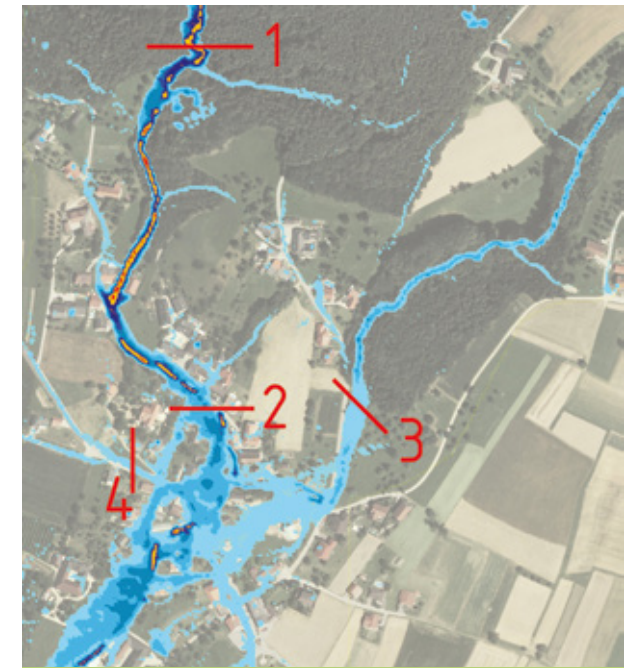


Abb. 1: Festgelegte Auswertungsquerschnitte

Fig. 1: Defined evaluation cross sections

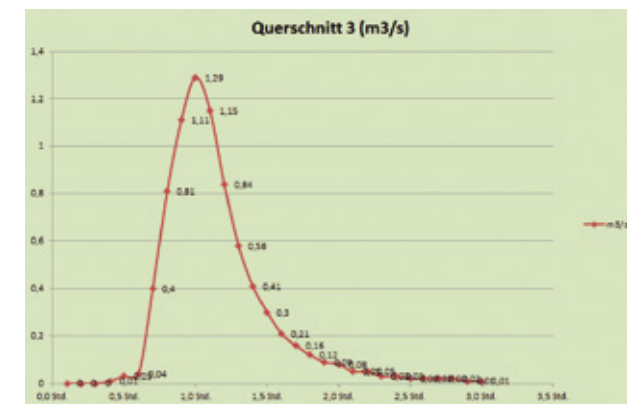


Abb. 2: Ganglinie des Auswertungsquerschnittes 3

Fig. 2: Hydrograph for the evaluation cross section 3

feinerung des Berechnungsmodells (allerdings zu Lasten der Arbeitszeit und der Rechenzeit) ist jederzeit möglich.

Abflussganglinien-Erzeugung mit Flo-2D

Flo-2D bietet die Möglichkeit, den Niederschlag über die Topographie in eine an das Einzugsgebiet angepasste Abflussganglinie zu übersetzen. Es lassen sich dadurch beispielsweise Brücken und Durchlässe sehr gut dimensionieren, da die Zunahme der Abflussmengen entlang eines größeren Hochwasserabflussgebietes sehr genau erfasst wird.

Bei gängigen 2D-Simulationsmodellen wird als oberer Zufluss zumeist eine Standardwelle (z.B. Kreps-Welle) gewählt, die seitlichen Zu-

flüsse werden sehr vereinfacht und nur punktuell berücksichtigt.

Mit Flo-2D können die Wassermengen-zunahmen durch den Niederschlag mathematisch exakt errechnet werden und an beliebigen Stellen des Einzugsgebietes mithilfe von Auswertungsquerschnitten als Ganglinien der durchfließenden Wassermengen abgerufen werden (Abbildung 2).

Gefahrenzonenplan Hainzingerbach

Das Beispiel der Revision des analog vorliegenden Gefahrenzonenplans des Hainzingerbaches, der Gemeinde Arnreit, Oberösterreich, aus dem Jahre 1995 soll weitere Anwendungsmöglichkeiten verdeutlichen.

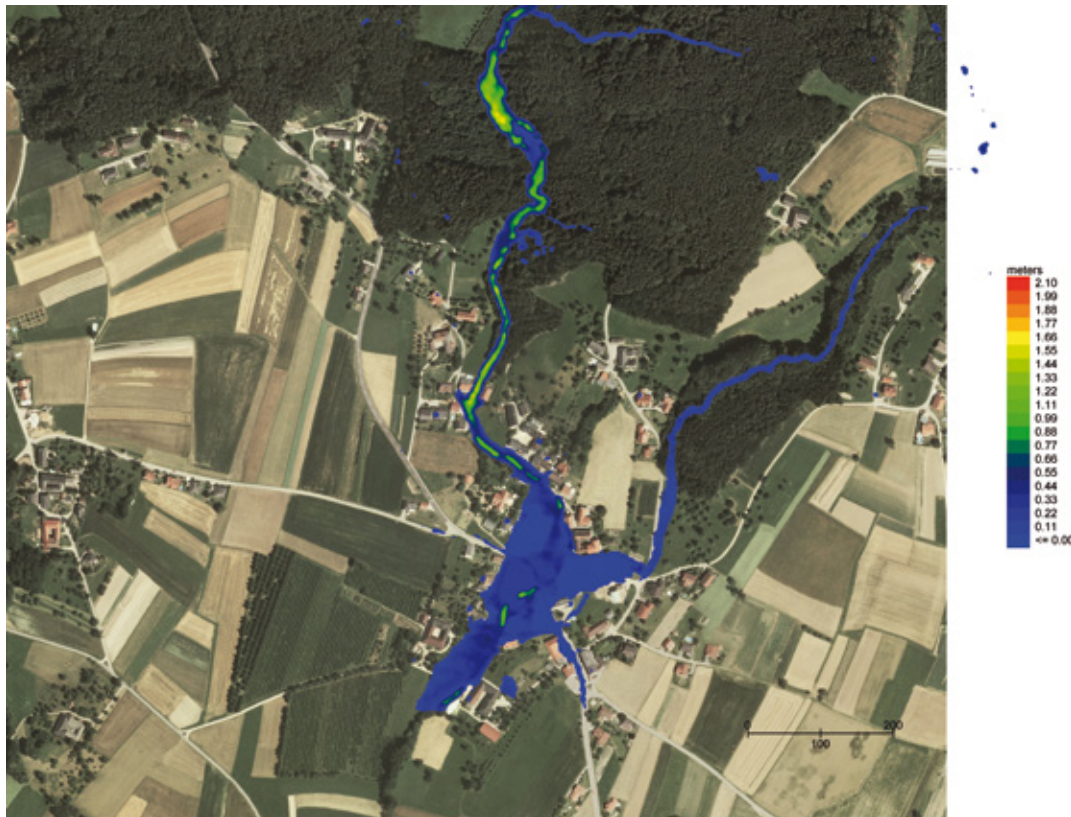


Abb. 3: Simulationsergebnis Hainzingerbach

Fig. 3: Simulation results for the Hainzingerbach



Abb. 4: Überarbeiteter Gefahrenzonenplan; NEU: durchgezogene Linien, ALT: strichlierte Linien

Fig. 4: Reworked hazard zone diagram; NEW: solid lines, OLD: dashed lines.

Für die Revision wurde durch Begehung im Gelände eine Erstversion des Gefahrenzonenplanes erhoben. Zur Absicherung und Verfeinerung der im Gelände getroffenen Festlegungen wurde Flo-2D verwendet. Der aktuelle 1-m-Laserscan wurde importiert und in einen 3-m-Raster zerlegt, um die Rechenzeit zu reduzieren.

Als Bemessungsregen wurde passend zu der Einzugsgebietsgröße von 1,61 km² ein 60-min-Regen gewählt (Regensumme gemäß eHYD, Regenverlauf endbetont) sowie ein Abflussbeiwert von 0,3 festgelegt.

Ein Auswertungsquerschnitt am Gebietsauslass diente zur Kalibrierung über den Abflussbeiwert. Die Simulation wurde über 3 Std. Modellzeit durchgeführt. Nach entsprechender

Kalibrierung führte die Flo-2D-Berechnung für das Bemessungsereignis zu dem folgenden Ergebnis (max. Überflutungsfläche > 3cm) (Abbildung 3).

Dieses Ergebnis wurde zur Ermittlung der gelben Zonen für fließendes und stehendes Wasser herangezogen. Als Unterstützung für die Ermittlung der roten Zonen kann zusätzlich zum Bemessungsereignis ein häufiges Ereignis simuliert werden. Anschließend wurde auf Basis des Flo-2D-Ergebnisses der Gefahrenzonenplan erneut überarbeitet und in bestimmten Bereichen der Verlauf der Gelben Zone auf Basis der Simulationsergebnisse geändert (Abbildung 4).

Dies verdeutlicht den Mehrwert derartiger Programme, da durch die Simulation Verhältnisse schneller und deutlicher erkennbar werden, die auch ein geschultes Auge im Gelände vielleicht nicht ohne größeren Aufwand erkennen oder anders einschätzen würde.

Anschrift des Verfassers / Author's address:

Werner Heller
 Balderichgasse 1/19
 1170 Wien
 Tel. 01-489 21 66
 office@zt-heller.at
 www.zt-heller.at

**DIETHART PETERS-WALKER, KARL-HEINZ KRAUSE, TOM STRELLEN,
HANNES KLEINDIENST, FREDERIC PETRINI-MONTEFERRI, VOLKER WICHMANN**

Modellierung von Abfluss und Geschiebetransport in alpinen Wildbacheinzugsgebieten mit SimAlp / HQsim

SimAlp / HQsim: Runoff and bedload transport modelling in alpine catchment areas

Zusammenfassung:

SimAlp / HQsim ist ein hydrologisches Modell für die Simulation von Niederschlag und Abfluss in Wildbacheinzugsgebieten. Für die Abschätzung des Abflusses werden Basis-, Zwischen- und Oberflächenabfluss eines Einzugsgebiets anhand variabler abflussrelevanter Flächen gerechnet. In das Modell integriert ist ein 1D-Geschiebetransportmodul, das für die Anwendung in Wildbacheinzugsgebieten und an Gebirgsflüssen entwickelt wurde und mit einem reduzierten Transportvermögen infolge von Formverlusten rechnet. Durch Verändern der Input-Daten Niederschlag, Boden, Vegetation oder durch Einpflegen von geplanten Maßnahmen in das DGM (z.B. Auflassen oder Bau/Dimensionierung von Bauwerken) können Szenarien modelliert und so Gefahrensituationen mit und ohne Maßnahmen dargestellt werden.

Stichwörter:

Niederschlag, Abfluss, Geschiebetransport, Modellierung, GIS

Abstract:

The hydrological model SimAlp / HQsim was developed for modelling precipitation and runoff in alpine catchment areas. Runoff is calculated by base-, inter- and surfaceflow on the basis of hydrological homogenous runoff-relevant subareas. Bedload transport can be calculated by a additional module, considering losses of transport capacity due to formresistance losses. By variation of input data (e.g. precipitation, soil/underground, vegetation or by changing DEM surface), sceneries can be modelled enabling different flood hazard assessments.

Keywords:

precipitation, run-off, bed load transport, modelling, GIS

Einleitung

Nutzung der Laserscandaten für die Erstellung hochauflösender digitaler Geländemodelle (DGM), Bearbeitung der Daten in effizienten Programmen und Integration in ein hoch leistungsfähiges GIS, Übernahme der Daten in ein leistungsfähiges, bereits angewandtes und bewährtes Niederschlag-Abfluss-Modell mit der Möglichkeit der Geschiebetransportberechnung und eine komfortable Szenarienerstellung sind die Voraussetzungen für praxisnahe Modellierungen.

Für die Umsetzung unserer Vorstellungen und die Verwirklichung des Projektes konnte **alps** – Zentrum für Naturgefahren Management GmbH mit den Partnerbüros **LASERDATA** GmbH und **Grid-IT** Gesellschaft für angewandte Geoinformatik mbH in Innsbruck gewonnen werden. Das von LASERDATA entwickelte LIS (Laserdaten-Informationssystem) sowie das von LASERDATA mitentwickelte SAGA GIS sind in der Lage, sehr große Mengen Lidar-Daten bzw. GIS-Daten zu verarbeiten. Das von **Grid-IT** und **alps** entwickelte HQsim (Niederschlag-Abfluss-Modell) wurde von **Grid-IT** mit dem neuen Modelling-Modul SimAlp für die direkte Übernahme der im LIS und SAGA generierten Daten für die Modellierung erweitert.

Rohdatenverarbeitung und Datenaufbereitung

Die Erstellung eines hochauflösenden Geländemodells im 1x1 m Raster aus den Rohdaten einer Laserscan-Befliegung erfolgt im LIS - Laserdaten-Informationssystem (LASERDATA, 2009), die Datenprozessierung in SAGA GIS (*System zur Automatischen Geoökologischen Analyse*). Die für die Modellierung notwendigen Daten (Vegetationsinformationen, Boden-/Untergrundinformationen, Geologie, Niederschlag usw.) werden als GRID-ASCII für die direkte Übernahme in SimAlp/HQsim gespeichert. Ferner erfolgt in SAGA die Aufbereitung des DGM für die Ableitung des vollständigen Gerinnenetzes, die Definition des/der Einzugsgebiete, die Ableitung des Gerinnenetzes und der Gerinneabschnitte und die Berechnung der Fließzeiten.

SimAlp und HQsim

Die weitere Modellierung erfolgt in SimAlp bzw. in HQsim. Das Modul PARAM im HQsim stellt Funktionen zur Verfügung, mit denen die generierten Daten eingelesen werden können. Die Parameterdatei bzw. das entsprechende XML-Dokument werden automatisch generiert.

HQsim ist eine Java-Bibliothek für hydrologische Modellierungen. Die Idee für diese Entwicklung ist 2003 im Rahmen verschiedener Projekte bei alpS Zentrum für Naturgefahren- und Risikomanagement entstanden. Das Grundlegende Konzept basiert darauf, hydrologisch homogene Teilflächen zu generieren, die jeweils gleich auf Niederschlag reagieren. Ein hydrologisches Einzugsgebiet kann aus vielen Teilflächen bestehen, die sich z.B. in den Bodeneigenschaften (Geologie), der Vegetation, Topographie oder anderer hydrologisch relevanter Aspekte unterscheiden.

Das HQsim besteht aus drei Teilmodellen:

- Die Abflussbildung als erstes Teilmodell kann auf vielfältige Weise erfolgen. Hier unterscheiden sich die speziellen Implementierungen, die für unterschiedliche Fragestellungen und Komplexitäten entwickelt wurden. Jede Implementierung benutzt eigene Modelle für die Berechnung der Abflusskomponenten. Dabei kann es sich um vollständige Modelle einer Wasserbilanzberechnung oder um vereinfachte Ansätze anhand variabler Abflussbeiwerte handeln.
- Die Abflusskonzentration bestimmt als zweites Teilmodell die Fließzeit der Abflusskomponenten in den nächsten Gerinneabschnitt.
- Der Gerinneabfluss simuliert dann den Abfluss des Wassers im offenen Gerinne.

Abflussbildung mit SimAlp

Das Modell SimAlp ist für die Hochwasserabschätzung in Wildbacheinzugsgebieten und Gebirgsflüssen entwickelt worden. Der Oberflächenabfluss wird anhand variabler abflussbeitragender Flächen mittels einer ArcTan-Kurve in Abhängigkeit des Bodenwassergehalts gerechnet. Zwischenabfluss und Basisabfluss sind als einfache

Linearspeicher implementiert. Für die Parametereableitung muss ein Raster für die Kategorien (mit hydrologisch relevanten Eigenschaften) geladen werden. Dieses XML-File definiert die räumliche Verteilung der Teilflächen-Kategorien. Die Teilflächen stellen somit den Kern der hydrologischen Modellierung dar.

Folgende Parameter müssen für jede Teilfläche definiert werden:

Parameter	Beschreibung
psi/min	Anteil versiegelte Fläche in der Teilfläche (z.B. Fels, Bebauung)
psi/steep	Steilheit der Zunahme von psi mit größer werdender Bodenfeuchte
psi/shift	Verschiebung der Zunahme von psi mit größer werdender Bodenfeuchte
soil/capacity	Speicherkapazität des Bodenspeichers (maximaler Füllzustand)
soil/ks	Hydraulische Leitfähigkeit des Bodens im gesättigten Zustand (Ausfluss des Bodenspeichers)
soil/drainage	Anteil der vertikalen Versickerung des Bodenwasserausflusses (Grundwasserneubildung)
gw/alpha	Speicherkoeffizient für Grundwasser, d.h. Abfluss Grundwasser pro Tag in das Gerinne

Tab. 1: Parameter für die Abflussbildung in SimAlp.

Tab. 1: Parameters needed for runoff modelling in SimAlp.

Sind die oben aufgeführten Werte für Teilflächen nicht erioierbar, kann für diese Flächen der psi/min mit dem Teilflächenmodul HQsim „rational“ gerechnet werden. Dieses rechnet den Oberflächenabfluss über einen konstanten Oberflächenabflussbeiwert 1 bis 5, z.B. nach Markert et al. (2004). Für komplett versiegelte Gebiete kann dieser Ansatz ebenfalls verwendet werden.

Abflusskonzentration

Der XML-Knoten 'Abflusskonzentration' definiert für jede Teilfläche ein Mengen-Zeit-Diagramm (Unit Hydrograph), das vorgibt, welche Fläche einer Subarea mit welcher Verzögerung in welchen Gerinneabschnitt entwässert.

Simulationsergebnisse

Für SimAlp sind die folgenden Modellergebnisse nach Tabelle 2 verfügbar.

Flächendaten	
Surfaceflow	Oberflächenabfluss (mm)
Interflow	Zwischenabfluss (mm)
Baseflow	Basisabfluss (mm)
Psi	Abflussbeiwert
S_gw	Speicher Grundwasser (m ³)
S_soil	Speicher Boden/Untergrund (m ³)
Runoff	Abfluss (m ³)
precip	Niederschlag pro Zeitschritt (mm)
Gerinneedaten	
q	Abfluss (m ³ /s)
z	Abflusstiefe (m)
v	Fließgeschwindigkeit (m/s)
q in	Zufluss in den Gerinneabschnitt (lateral u. von oberhalb liegenden Abschnitten) (m ³ /s)
inflow	lateraler Zufluss als Wasserfracht (m ³)
outflow	Ausfluss als Wasserfracht (m ³)
s	Speicherzustand (m ³)

Tab. 2: Simulationsergebnisse für SimAlp.

Tab. 2: Simulation results.

Gerinnemodelle

Der Gerinneabfluss wird in einer Schleife über alle Zeitschritte gerechnet, jeder Zeitschritt wird

nochmals adaptiv in Teilzeitschnitte unterteilt. Die Länge der Teilzeitschritte berechnet sich dynamisch in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit, die für jeden Gerinneabschnitt separat bestimmt wird. Um die Stabilität der implementierten Differenzialgleichungen zu gewährleisten, ist die Länge der Teilzeitschritte wie folgt definiert: Wasser, das aus einem Gerinneabschnitt ausfließt, kann maximal in den nächst unteren Gerinneabschnitt einfließen, diesen aber niemals durchfließen. Damit ergibt sich für jeden Gerinneabschnitt die maximale Teilzeitschrittlänge als

$$dt_i = \frac{l_{i+1}}{v_i} \quad \text{Gl. (1)}$$

mit:

dt_i	Zeitdifferenz aktueller Abschnitt
l_{i+1}	Länge unterhalb liegender Gerinneabschnitt
v_i	Geschwindigkeit aktueller Abschnitt

Aus diesem Konzept ergibt sich, dass der kürzeste Gerinneabschnitt jeweils die maximale Länge der Teilzeitschritte definiert.

SimAlp/HQsim modelliert mit der empirischen Geschwindigkeitsgleichung nach Rickenmann (1996) (Gl. 2), die für Gefällebereiche 0,8 bis 63 % gültig ist und sich für offene Wildbachgerinne in steilem Gelände außerhalb des Gültigkeitsbereichs der „Stricklergleichung“ (Strickler, 1923) anbietet. Für regulierte Abflussquerschnitte kann für die Berechnung der Fließgeschwindigkeit die Fließgleichung nach Strickler (1923) verwendet werden.

$$v = \frac{0,37 \cdot g^{0,33} \cdot I^{0,2} \cdot Q^{0,34}}{d_{90}^{0,35}} \quad \text{Gl. (2)}$$

mit:

g	Erdbeschleunigung (m/s ²)
Q	Abfluss (m ³ /s)
I	Gefälle (%)
d_{90}	90% Quantil der Korndurchmesser im Gerinne (m)

Aus- und Einleitungen

In der Tabelle der Gerinnedefinitionen können Aus- und Einleitungen definiert werden. Für die Ausleitung müssen die Restwassermenge, die im Gerinne verbleiben muss (m³/s), die maximale Kapazität der Ausleitung (m³/s) und der kritische Abfluss, ab dem die Ausleitung nicht mehr wirksam ist (m³/s), definiert werden.

Retentionsbecken

Über den Zufluss wird der jeweilige Volumenzuwachs berechnet, über das neue Volumen der geänderte Wasserstand. In das Retentionsbecken eingetragenes Geschiebe wird ebenfalls als Volumen berücksichtigt mit der Vorgabe, dass dieses Volumen nicht mehr für den Wasserrückhalt zur Verfügung steht, d.h. das Geschiebevolumen wird permanent vom Gesamtvolumen abgezogen. Gleichzeitig kann die Ablagerungshöhe des eingetragenen Geschiebes berechnet und damit bestimmt werden, ob ein eventuell vorhandener Grundablass oder Überlauf funktionstüchtig oder zusedimentiert ist.

Der Ausfluss wird in Abhängigkeit des Wasserstands ermittelt, der Wasserstand wiederum über eine Volumen-Wasserstand-Beziehung in Abhängigkeit des gespeicherten Wasservolumens. Hierfür stehen für Überfall bzw. Durchlass hydraulische Formeln im HQsim zur Verfügung.

Geschiebetransport

Für die Modellierung des Geschiebetriebs müssen die Breite der Sohle und das Sedimentpotenzial der Sohle sowie das laterale Sedimentpotenzial aus den anschließenden Geschiebebänken und den bachnahen Einhangböschungen für jeden Gerinneabschnitt im Gelände bestimmt werden. Für den Sedimenttransport sind die Modelle nach

Rickenmann, Whittaker und Meyer-Peter und Müller im HQsim implementiert. Es sind eindimensionale Programme zur Berechnung des Geschiebetransportes in Wildbächen und steilen Gebirgsflüssen.

Geschiebetransport setzt in einem Gerinne nach Überschreiten einer kritischen Schubspannung ein. SimAlp / HQsim berechnet diese während der laufenden Abflusssimulation i.d.R. nach einer Formel von Bathurst et al (1987), die von Rickenmann (1990) modifiziert wurde.

$$q_c = 0,065 \cdot (s - 1)^{1,67} \cdot g^{0,5} \cdot d_{50}^{1,5} \cdot S^{-1,12} \quad \text{Gl. (3)}$$

mit:

q_c	kritische, dimensionslose Schubspannung für den Beginn der Geschiebebewegung pro Einheitsbreite
s	Verhältnis der Flüssigkeits- und Feststoffdichte
g	Erdbeschleunigung (m/s²)
d_{50}	50% Quantil der Korndurchmesser im Gerinne (m)
S	Gerinnegefälle ($\tan \beta$) (%)

Herrschen raue Gerinnebetten und Gefälle > 5 % (0,05) vor, kann auch für diese Gerinneabschnitte eine Formel nach Whittaker und Jäggi (1986) für die Berechnung der kritischen Schubspannung verwendet werden (Gl 4).

$$q_c = 0,143 \cdot (s - 1)^{1,67} \cdot g^{0,5} \cdot d_{65}^{1,5} \cdot S^{-1,67} \quad \text{Gl. (4)}$$

Die Bestimmung der Korndurchmesser bzw. die Bestimmung der Quantile d_{30} , d_{50} , d_{65} und d_{90} erfolgt über eine Linienzahlanalyse nach Fehr (1987).

Nach Überschreiten der kritischen Schubspannung rechnet SimAlp / HQsim den Geschiebetransport nach einer von Rickenmann (1990) für steile Gefälle entwickelten Formel:

$$q_b = \frac{12,6}{(s - 1)^{1,6}} \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \cdot (q - q_c) \cdot S^{2,0} \quad \text{Gl. (5)}$$

mit:

q_b	spezifische Geschiebetransportrate (m³ s⁻¹ m⁻¹)
q	spezifischer Abfluss (m³/s m)
q_c	kritische Schubspannung bei Transportbeginn (m³/s m)
d_{90} , d_{30}	90%, 50% Quantil der Korndurchmesser im Gerinne (m)
S	Gerinnegefälle ($\tan \beta$) (%)

Reine Murgänge lassen sich wegen des zum fluvialen Feststofftransport unterschiedlichen Fließverhaltens von Muren durch die oben genannte Formel nicht abbilden.

Für die Berechnung der Transportkapazität unter Berücksichtigung der Formwiderstände (Rickenmann 2005) muss die Gerinneneigung S in der Transportgleichung von Rickenmann (1990) durch das reduzierte Energieliniengefälle S_{red} ersetzt werden (Rickenmann, 2005; Chiari und Rickemann, 2009).

Der Anteil des Energieliniengefälles S_{red} bezogen auf die Kornrauigkeit wird wie folgt gerechnet:

$$S_{red} = S \cdot \left(\frac{n_r}{n_{tot}} \right)^a \quad \text{mit } 1 \leq a \leq 2 \quad \text{Gl. (6)}$$

$$\text{wobei} \quad \left(\frac{n_r}{n_{tot}} \right) = \frac{0,083 \cdot \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{0,33}}{S^{0,35}} \quad \text{Gl. (7)}$$

mit:

S	Gerinneneigung (%)
S_{red}	Gerinneneigung reduziert (%)
n_r	Manning Beiwert für die Kornrauigkeit (s/m ^{1/3})
n_{tot}	Manning Beiwert für die Gesamtrauigkeit (s/m ^{1/3})
h	Abflusstiefe (m)
d_{90}	90% Quantil der Korndurchmesser im Gerinne (m)

Basierend auf der Manning-Strickler Gleichung (1923) ergibt sich für S_{red} ein Exponent $a = 2$. Meier-Peter und Müller (1948) konnten in Laborversuchen einen Exponenten $a = 1,5$ und mit einer theoretischen Herleitung auch einen Wert von $a = 1,33$ bestimmen (Meier-Peter und Müller, 1948). Rickenmann (2006) und Chiari und Rickenmann (2007) ermittelten durch Rekonstruktion zahlreicher Geschiebetransportereignisse in österreichischen Wildbächen gute Ergebnisse mit einem Exponenten $a = 1$.

In S_{red} können daher Exponenten zwischen $1 \leq a \leq 2$ eingesetzt werden und so zur "Kalibrierung" des S_{red} für ein Einzugsgebiet bzw. einen Wildbach genutzt werden.

Die 3-dimensionale Darstellung von Ablagerungen oder die Ausbildung eines veränderten Gerinneverlaufs in Ablagerungsbereichen kann extern mit Modulen aus dem SAGA GIS gerechnet werden. Die Berechnung kann an jedem beliebigen Punkt eines Gerinnes ansetzen. Material wird in Abhängigkeit seiner Eigenschaften, der Geländeneigung und der Fließgeschwindigkeit auf der Geländeoberfläche nach einem "random-walk-Ansatz" abgelagert. Die veränderten Fließwege und Veränderungen der Geländeoberfläche im DEM können für weitere Simulationen nach SimAlp / HQsim übernommen werden.

Modellierung mit SimAlp am Bareislgraben

Im Zuge einer integralen Einzugsgebietsstudie am Bareislgraben (Gmd. Tutzing) konnte eine Modellierung mit SimAlp in diesem Einzugsgebiet durchgeführt werden.

Der Bareislgraben liegt im Gemeindegebiet Tutzing (Starnberger See) und wird dort als Gewässer III. Ordnung mit typischen Wildbachcharakter geführt.

Das betrachtete Einzugsgebiet ist 0,66 km² groß und reicht von ca. 708 mNN bis 611

mNN (Bahnlinie). Die Länge des Hauptbaches beträgt 1680 m, hinzukommen weitere 759 m kleine Nebenbäche sowie ca. 1325 m offene Drainage. Das mittlere Gefälle des Hauptbaches liegt bei 22 %, die meisten Bachabschnitte zeigen jedoch Gefälle zwischen 10 und 18 %.

Das Einzugsgebiet zeigt oberhalb 670 mNN Wiesen und Waldbedeckung mit geringen Gefällen. Ab 670 mNN hat sich der Bareislgraben stark in eiszeitliche Moränenablagerungen eingetieft und so steile, zum Teil offene, durch Rutschungen und Uferabbrüche gekennzeichnete, instabile Einhänge geschaffen, deren natürlicher Gleichgewichtszustand noch nicht erreicht ist. In diesem mittleren Abschnitt treten die größten Gefälle auf.

Im Einzugsgebiet des Bareislgrabens überwiegen sowohl an der Oberfläche als auch im Untergrund bindige, wasserstauende Sedimen-

te mit geringer Versickerungsfähigkeit. Es handelt sich um Grundmoräne aus tonig-schluffiger Matrix mit wechselndem Geröllanteil (Fein- und Grobkies, wenige Blöcke). Kiesreiche Deck- und Wallmoräne tritt über der Grundmoräne bis zu den Einhangkanten auf. Die Aufnahmefähigkeit für Niederschläge ist gering, Starkniederschläge fließen deshalb größtenteils an der Oberfläche ab. Im Ober- und Mittellauf des Gewässers findet Erosion und Geschiebetrieb statt, im Unterlauf Geschiebetrieb und mäßige Erosion und Ablagerung. Private Gewässerausbaumaßnahmen haben die Gefälleverhältnisse und den Hochwasserablauf im Siedlungsgebiet an mehreren Stellen ungünstig verändert. Dies verursacht bei Hochwasser Geschiebeauflandungen und Bachaustritte, die wiederholt zu Überflutungen des Kellers eines Anwesens geführt haben.

Reinwasserganglinien am Gebietsauslass Bareislgraben / Niederschlag nach KOSTRA

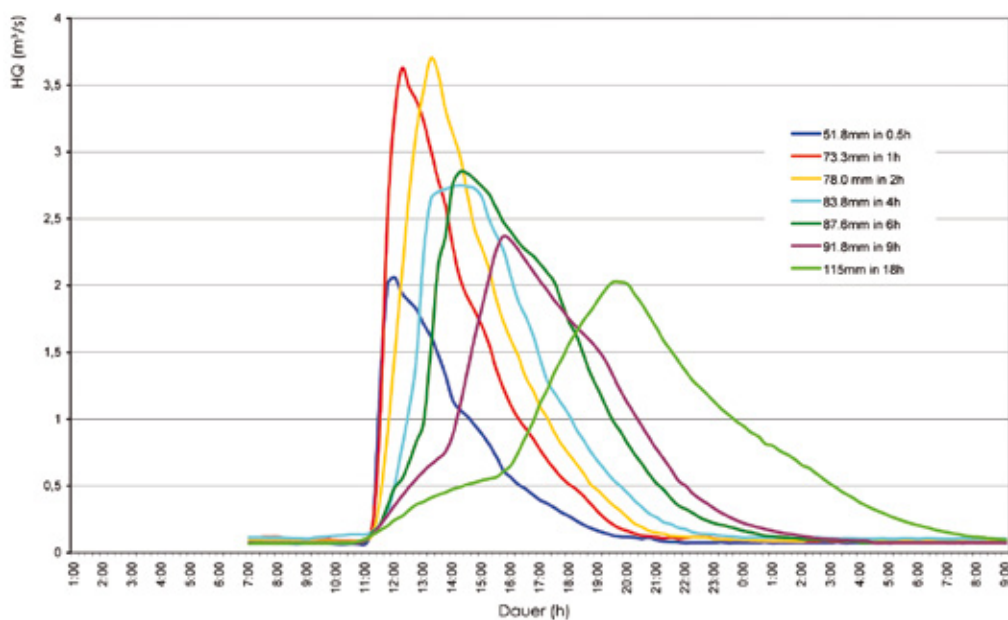


Abb. 1: Reinwasserganglinien Bareislgraben am Gebietsauslass nach KOSTRA (Deutscher Wetterdienst, 2000) für eine hundertjährige Wiederkehrzeit.

Fig. 1: Simulated discharge hydrographs at the end of Bareislgraben for different ranks of rainfall duration.

Niederschlag-Abfluss-Geschiebe

Für das Einzugsgebiet des Bareislgrabens stehen keine Niederschlagsmessungen zur Verfügung. Abflussmessungen sowie Daten zu Geschiebeablagerungen bzw. -entnahmen sind in der Gemeinde nicht bekannt. Wegen fehlender Zufahrtmöglichkeiten zum Gewässer wurde in den 90-iger Jahren Geschiebe mit hohem Aufwand abgesaugt. Eine Volumenbestimmung erfolgte nach Auskunft der Gemeinde nicht.

Wegen fehlender Niederschlags- und Abflussdaten wurden für die Abflussmodellierung Starkregenauswertungen unterschiedlicher Intensität des Deutschen Wetterdienstes (2000) mit einer hundertjährigen Wiederkehrzeit als Bemessungsniederschlag gerechnet. Diese wurden flächenreduziert als mittenbetonter Niederschlag mit vollen Speichern gerechnet (Abb. 1).

Es zeigt sich, dass der maximale Schei-

teldurchfluss mit einem Niederschlag von 78,0 mm in 2 Stunden erreicht wird. Der Spitzenabfluss liegt bei 3,7 m³/s. Der Bemessungsniederschlag für die Modellierung wurde deshalb mit 78,0 mm bei einer Niederschlagsdauer von 2 Stunden festgelegt.

Für die Modellierung wurden 16 Gerinneabschnitte generiert. Channel 1, 5, 6, 9, 12, 13, 15 und 16 bilden das Hauptgerinne. Channel 3, 7, 10 und 11 sind kleine Nebenbäche mit geringer Lauflänge. Channel 4 ist ein offener Drainagegraben.

Abb. 2 zeigt die Abflussganglinien am Ausgang der einzelnen Gerinneabschnitte für den Bemessungsniederschlag von 78 mm in 2 Stunden bei gefüllten Bodenspeichern. Die Infiltration ist auf Grund der Untergrundverhältnisse gering, die Einzugsgebietsfläche mit 0,66 km² sehr klein. Das Niederschlagswasser erreicht deshalb sehr schnell als Oberflächenabfluss das Gerinne.

Niederschlag und Abfluss in den Gerinneabschnitten des Bareislgrabens

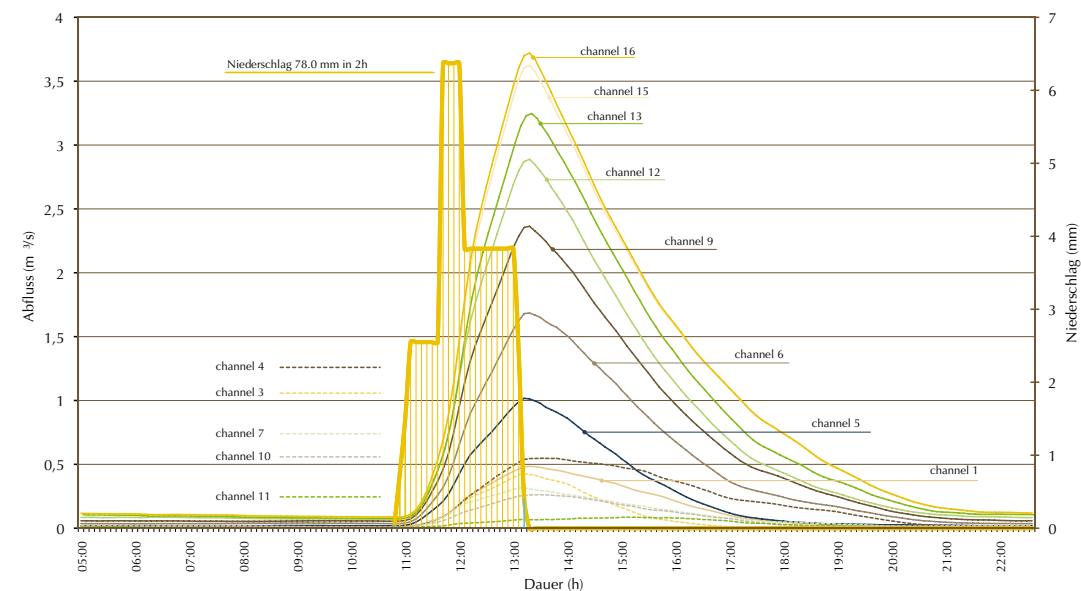


Abb. 2: Abflussganglinien am Ende der Gerinneabschnitte bei gefüllten Bodenspeichern. Die gestrichelten Linien zeigen die Ganglinien der Nebenbäche.

Fig. 2: Simulated discharge hydrographs at the end of the channel segments for different ranks of rainfall duration.

Der Spitzenabfluss am Gebietsauslass (Ende channel 16) liegt bei $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei einer Simulation unter gleichen Niederschlagsbedingungen, jedoch mit zu Beginn des Niederschlags nicht gefüllten Bodenspeichern liegt der Spitzenabfluss am Gebietsauslass um $1 \text{ m}^3/\text{s}$ niedriger bei $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Das kleine Einzugsgebiet weist im oberen Bereich geringe Hangneigungen auf. Im unteren, versiegelten Einzugsgebiet wurde mit 100 % Oberflächenabfluss gerechnet. Daraus ergibt sich ein relativ enges Zeitfenster für die Spitzenabflüsse der einzelnen channel. Die Hochwasserspitze läuft innerhalb von 15 min zwischen dem channel 5 und dem Gebietsauslass am channel 16 ab.

Aus der vom Modell errechneten Fließgeschwindigkeit von $2,16 \text{ m/s}$ und dem Abfluss von $3,625 \text{ m}^3/\text{s}$ in Höhe des von Überflutungen betroffenen Anwesens ergibt sich nach Rückrechnung aus $Q = v A q$ eine durchflossene Querschnittsfläche Aq von $1,678 \text{ m}^2$ zum Zeitpunkt q_{max} für den Reinwasserabfluss.

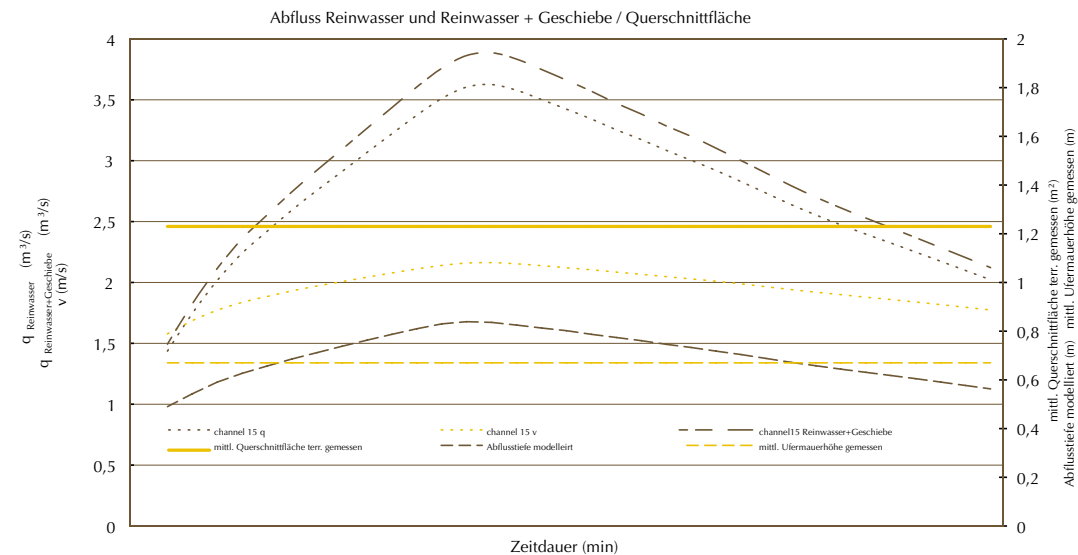


Abb. 3: Mittlere Querschnittsfläche, Abfluss, mittlere Ufermauerhöhe, modellierte Abflusstiefe und Dauer der Überflutung des Anwesens.

Fig. 3: Mean cross-sectional area, discharge, mean bank height, modelled discharge height and duration of flooding.

Die tatsächliche, terrestrisch gemessene Querschnittsfläche in Höhe dieses Anwesens betrug zum Zeitpunkt der Messung im Durchschnitt von 3 Messprofilen $1,23 \text{ m}^2$ entlang des Anwesens. Die durchflossene Querschnittsfläche ist demnach zum Zeitpunkt q_{max} um $0,448 \text{ m}^2$ zu klein.

Abb. 3 zeigt die Hochwasserganglinien für Reinwasser und den geschiebebelasteten Abfluss (Exponent $a=1,5$) in Höhe des betroffenen Anwesens. Ab $q = 2,42 \text{ m}^3/\text{s}$ für Reinwasser bzw. $2,55 \text{ m}^3/\text{s}$ für den geschiebebelasteten Abfluss tritt der Bareislgraben über die rechte Ufermauer, ab $q = 2,47 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $2,449 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Feststoffbelastung fließt das ablaufende Hochwasser wieder vollständig in seinem Bachbett. Die Flutungsdauer liegt für dieses hundertjährige Ereignis bei 2 Stunden und 18 Minuten für den Reinwasserabfluss und bei 2 Stunden und 32 Minuten für den geschiebebelasteten Abfluss.

Beginn und Ende der Überflutung korrelieren sehr gut mit dem Beginn und dem Ende des Überflutens der rechtsseitigen Ufermauer mit

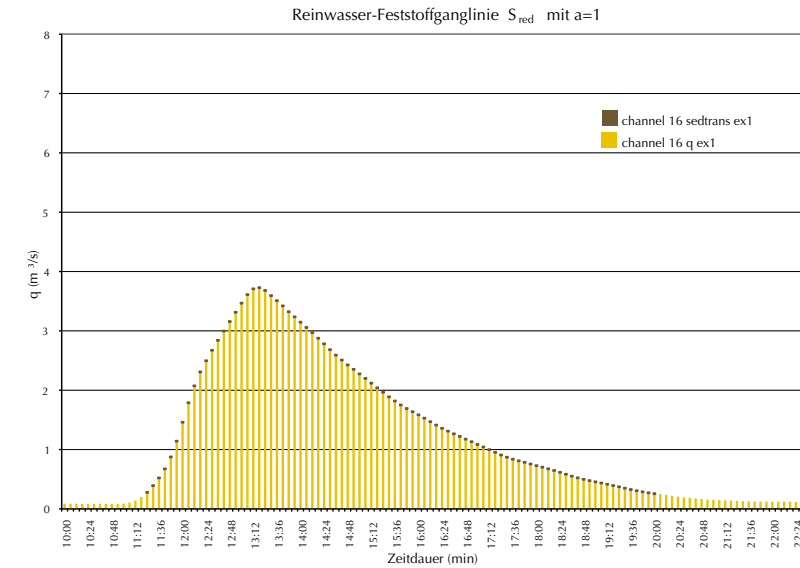


Abb. 4: Reinwasser (braun)-Feststoffganglinie (gelb) am Gebietsauslass für den Exponentena=1

Fig. 4: Runoff and sediment volume at the end of Bareislgraben, exponent $a=1$

einer gemessenen, gemittelten Höhe von $0,677 \text{ m}$ ab Sohle und der modellierten Abflusstiefe. Die minimalen zeitlichen Differenzen zum Ende der Überflutung basieren auf dem gemittelten Wert für den Querschnitt und die Ufermauerhöhe.

Um die Formverluste für den Geschiebetransport zu berücksichtigen, wurde mit einem nach der Formel (6) und (7) reduzierten Energieliniengefälle S_{red} modelliert. Für den Exponent a in S_{red} wurde $a = 1, 1,5$ und 2 gewählt. Die sehr unterschiedlichen Ergebnisse zeigen die Bedeutung dieses Exponenten als "Kalibrierungsparameter" (Chiari und Rickenmann, 2009).

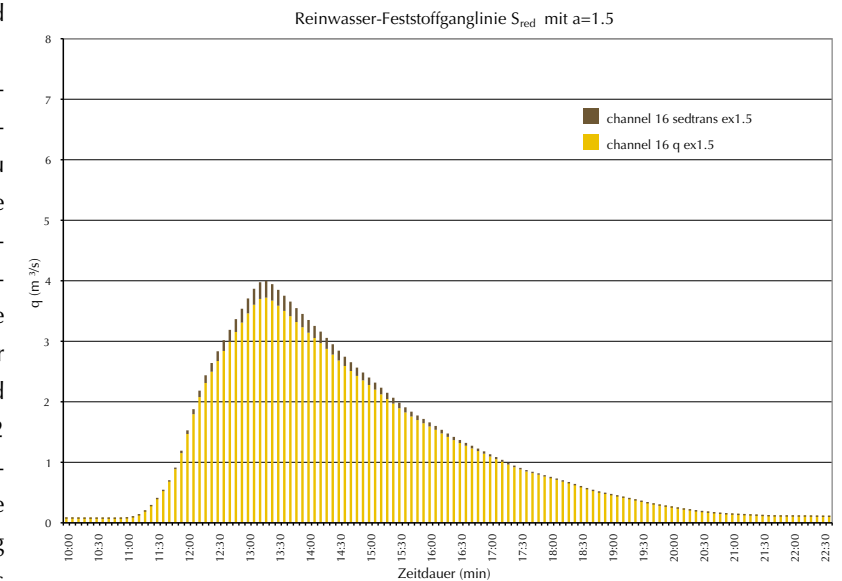


Abb. 5: Reinwasser (braun)-Feststoffganglinie (gelb) am Gebietsauslass für den Exponentena=1,5

Fig. 5: Runoff and sediment volume at the end of Bareislgraben, exponent $a=1.5$

Die Abb. 4, 5 und 6 zeigen die Reinwasser-Feststoffganglinien am Gebietsauslass für die Exponenten 1, 1.5 und 2. Die Feststoffbelastung in der Modellierung mit dem Exponenten $a = 1$ ist sehr gering und in diesem Maßstab kaum darstellbar. Für den Exponenten $a = 1.5$ ist die Feststoffbelastung realistisch, während die Feststoffbelastung für den Exponenten $a = 2$ unrealistisch hoch

ist. Sie liegt für diesen Exponenten bei 47,9 % und weist annähernd den Charakter eines Murganges auf. Ein Murgang ist in diesem Bereich nicht möglich.

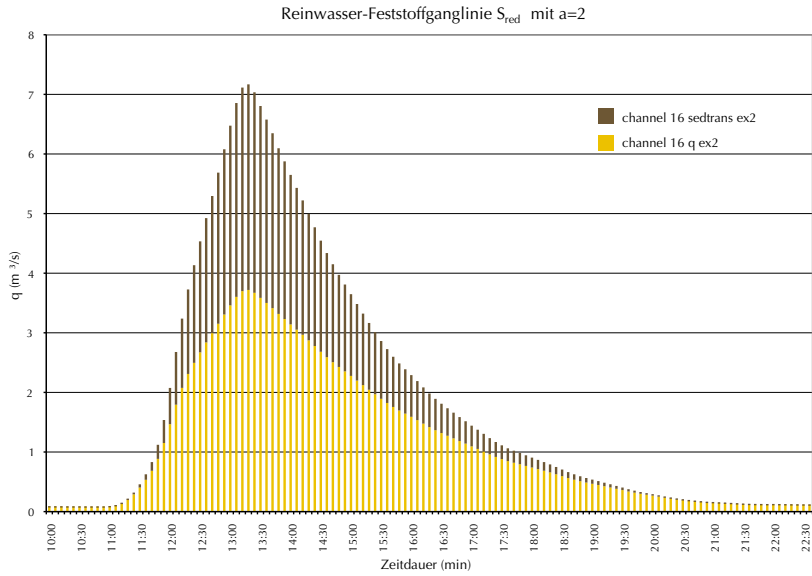


Abb. 6: Reinwasser (braun)-Feststoffganglinie (gelb) am Gebietsauslass für den Exponenten a = 2

Fig. 6: Runoff and sediment volume at the end of Bareislgraben, exponent a = 2

a = 2 einen für dieses Gerinne sehr hohen Geschiebetrieb (Abb. 7, 8). Möglicherweise etwas zu niedrig, aber am wahrscheinlichsten, weil am besten mit den Geländegegebenheiten übereinstimmend, werden die Geschiebefrachten mit dem Exponenten a = 1.5 dargestellt.

Für den Exponenten a = 1 stimmen Erosion und Ablagerung für die Gewässerabschnitte 5-15 mit den Geländebeobachtungen überein, im Abschnitt 16 wird entgegen der Beobachtung am Ende des Bachabschnitts abgelagert. Der Exponent a = 1.5 führt im Gewässerabschnitt 13 und 16 zu geringer Erosion, wobei im Abschnitt 13

Ein Vergleich von Geschiebefracht, Erosion und Ablagerung für die einzelnen Gerinneabschnitte macht die Unsicherheiten bei der Wahl des Exponenten für die richtige Abschätzung der Formverluste deutlich (Abb. 7, 8). Da keine gemessenen Vergleichswerte zur Verfügung stehen, werden die modellierten Ergebnisse mit den gerechneten Gefällewerten und der wildbachmorphologischen Situation im Gelände bewertet.

Während die Formverluste für den Exponenten a = 1 zu hochgerechnet werden und kaum Geschiebetrieb stattfindet, zeigen sie für den Exponenten

ein, im Abschnitt 16 wird entgegen der Beobachtung am Ende des Bachabschnitts abgelagert. Der Exponent a = 1.5 führt im Gewässerabschnitt 13 und 16 zu geringer Erosion, wobei im Abschnitt 13

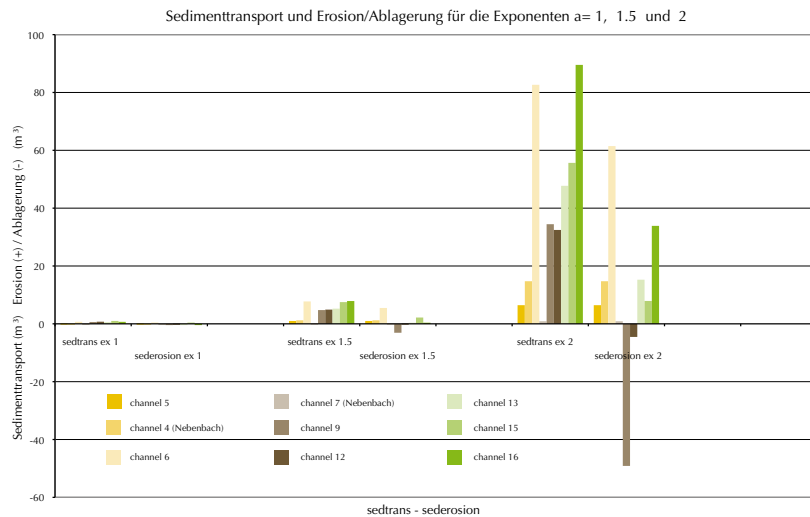


Abb. 7: Vergleich Sedimenttransport, Erosion und Ablagerung am Gebietsauslass für Exponenten 1, 1.5, 2.

Fig. 7: Comparison between sediment transport, erosion and sedimentation at the end of Bareislgraben.

Sedimenttransport und Erosion/Ablagerung für die Exponenten a= 1 und 1.5

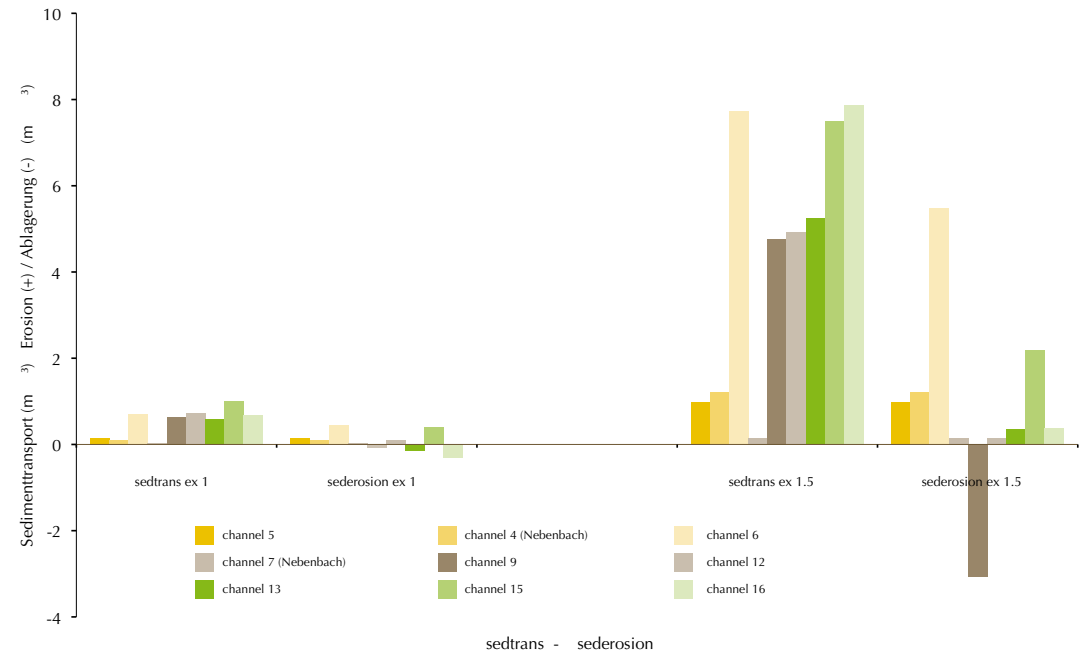


Abb. 8: Vergleich Sedimenttransport, Erosion und Ablagerung am Gebietsauslass für Exponenten 1.5, 2 in einem größeren Maßstab.

Fig. 8: Comparison between sediment transport, erosion and sedimentation at the end of Bareislgraben in a larger scale.

eher Ablagerungsbedingungen herrschen. Die Modellierung mit a = 2 zeigt im Abschnitt 12 entgegen der Geländegephänomene Ablagerung und in den Abschnitten 13, 15 und 16 zu hohe Erosion. Für alle Exponenten gleich wird im Abschnitt 9 dem Gelände entsprechend Ablagerung abgebildet.

Für die Darstellung im Modell trifft die Berechnung der Geschiebefracht mit dem Exponenten a = 1.5 in S_{red} am ehesten zu.

Schlussbemerkung

Niederschlag und Abfluss lassen sich mit SimAlp/HQsim realistisch darstellen. Die gerechneten Werte für das Bemessungsereignis korrelieren mit den Angaben, die wir von der Gemeindeverwaltung erhalten bzw. durch eine ausgiebige Geländebegehung für eine Integralbeurteilung des Einzugsgebiets erarbeitet haben.

Realistische Werte für die Geschiebmodellierung lassen sich nur durch die Berücksichtigung von Formverlusten rechnen. Hierbei ist die Wahl des Exponenten in der Formel für S_{red} gleichzeitig Fehlerquelle und Kalibrierungsfaktor. Erosion und Ablagerung werden in den unteren Gerinneabschnitten für a=1 unterschiedlich zu a=1.5 und a=2 dargestellt.

In der Modellierung wurde für das gesamte Einzugsgebiet ein einheitlicher formresistance angle und ein einheitlicher Exponent für alle Gerinneabschnitte verwendet. Mit dieser Pauschalierung unterliegen die Ergebnisse für die einzelnen Gerinneabschnitte einer Anpassung an einen Mittelwert. Um den unterschiedlichen Gefällen und Sohlrauigkeiten der einzelnen Gerinneabschnitte für die Berechnung der Formverluste besser zu berücksichtigen, wird im kommenden Upgrade des Modells die Eingabe der Werte für

die Berechnung der Formverluste aus den allgemeinen Einstellungen herausgenommen und jedem Bachabschnitt im Gerinnequerschnitt direkt zugeordnet. Dadurch können Formverluste individuell für jeden Bachabschnitt gerechnet werden.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Diethart Peters-Walker
Dr. Karl-Heinz Krause
GeoAlp
Juifenstraße 19
D-83661 Lenggring
d.pw@geoalp.de

Tom Strellen
LandMark GmbH
Am Rothang 4
D-82399 Raisting
thomas.strellen@photogeo.de

Dr. Hannes Kleindienst
GRID-IT
Technikerstraße 21a
A-6020 Innsbruck
kleindienst@grit-it.at

Frederic Petrini-Monteferrri
Volker Wichmann
Laserdata GmbH
Technikerstraße 21a
A-6020 Innsbruck
petrini@laserdate.at
wichmann@laserdate.at

Literatur / References:

BATHURST, J.C., GRAF, W.H. (1987):
Bed load discharge equations for steep mountain rivers. THORNE, C.R.,
BATHURST, J.C., HEY, R.D. (eds): Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers.
New York, p. 453-477

CHIARI, M., RICKENMANN, D. (2009):
Modellierung des Geschiebetransportes mit dem Modell SETRAC für das
Hochwasser im August 2005 in Schweizer Gebirgsflüssen. Wasser Energie
Luft, 101, H. 4, p. 319-327

DEUTSCHER WETTERDIENST (2000):
KOSTRA-DWD 2000

FEHR, R. (1987):
Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für
Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bd. 92, Zürich

LASERDATA (2009):
LIS – Laserdaten-Informationssystem. LASERDATA GmbH, Innsbruck

MARKART, G., B. KOHL, B. SOTIER, T. SCHAUER, G. BUNZA, R. STERN
(2004):
Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenbeiwerts
auf alpinen Boden-/ Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen.
BFW-Dokumentation; Schriftenreihe des Bundesamtes und Forschungszentrums
für Wald, Wien, 2004, Nr. 3, 88 S.

MEIER-PETER, E., MÜLLER, R. (1948):
Formulas for bed load transport. Proc. 2nd Meeting Int.Assoc. Hydraulic
Structures Research, Stockholm, Sweden, Appendix 2, p. 39-64

RICKENMANN, D et al (2006):
SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In: R. Ferreira,
E.A. J. Leal and Cardoso, A. (eds): RiverFlow 2006, Vol. 1, London,
p. 843-853

RICKENMANN, D. (1990):
Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilungen
der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH
Zürich, Bd. 103

RICKENMANN, D. (1996):
Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. In: Wasser Energie
Luft, 88 (11/12), p. 268-304

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

RICKENMANN, D. (2005):
Geschiebetransport bei steilen Gefällen. Mitteilungen der Versuchsanstalt
für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bd. 190,
Zürich, p. 107-119

RICKENMANN, D., CHIARI, M. (2007):
The influence of form roughness on modelling of sediment transport at
steep slopes. In: Proceedings of the International Conference Erosion and
Torrent Control as a Factor in Sustainable River basin Management, Belgrad,
p. 25-38

STRICKLER, A. (1923):
Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahl für
Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilungen des Eidgenössischen
Amtes für Wasserversorgung, Bern 16, Bern

WHITTACKER, J. G., und JÄGGI, N.M.R. (1986):
Blockschwellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie
und Glaziologie der ETH Zürich, Bd. 91, Zürich

ezb Besuchen Sie uns im Web:
www.ezb-fluss.at

TB Eberstaller GmbH

**Technisches Büro
für Angewandte
Gewässerökologie,
Fischereiwirtschaft,
Kulturtechnik und
Wasserwirtschaft**



**A - 1180 Wien, Schopenhauerstraße 82/12
Tel.: 01/9291410**



**Wildbach- und
Lawinerverbauung**

**Hochwasserschutz
Renaturierungen**

**Schlipistenbau
Speicherteiche**

**Ziviltechnikerbüro
Dipl.-Ing. Rainer Russ**
Ing.Konsulent für Holz- und Forstwirtschaft, Wildbach- und Lawinerverbauung

A-4863 Seewalchen / Attersee, Julius-Wimmer-Str. 9
A-1050 Wien, Obere Amtshausgasse 45/10
Tel.: 0664 – 3929827; Web: www.russ-zt.at

**Geolith
Consult**

Geologie & Geotechnik

BAUGEOLGIE GEOTECHNIK HYDROGEOLOGIE ROHSTOFFGEOLOGIE UMWELTGEOLGIE
BAUPLATZEIGNUNG BODENGUTACHTEN HANGRUTSCHUNGEN GRÜNDUNGEN VERSICKERUNGEN

www.geolith.at

GRGZ:
W.-Goldschmidt-G. 35/5
A-8042 Graz
Tel.: 0316 890 327

Deutschlandsberg:
Limberg 1, Schloss Limberg
A-8541 Schwanberg
Tel.: 03467 8291 20




JULIA EISL, STEFAN FIEGER, JOHANNES HÜBL

Vom Ereignis zur Projektierung - Evaluierung von Methoden zur Gefahrenabschätzung anhand eines dokumentierten Ereignisses (Beispiel Oberwölz)

From Event to Design - Evaluation of Methods for Hazard Assessment on Basis of a Documented Event

Zusammenfassung:

Das Hochwasserereignis vom 7. Juli 2011 im steirischen Wölzertal führte zu großräumigen Überflutungen. Für das Gesamteinzugsgebiet wurden für die Wildbach- und Lawinenverbauung und die Bundeswasserbauverwaltung gemeinsam eine Ereignisdokumentation und eine Ereignisanalyse durchgeführt. Die Ereignisanalyse umfasst die Auswertung von Niederschlagsdaten, Niederschlag-Abfluss Simulationen sowie hydraulische Simulationen mit jeweils unterschiedlichen Ansätzen. Aufbauend auf die Ergebnisse der Ereignisanalyse wird derzeit ein Verbauungsprojekt für den im Kompetenzbereich der WLW liegenden Schöttlbach von der Gebietsbauleitung Oberes Murtal ausgearbeitet. Herausforderung ist die Schaffung einer funktionierenden, auf den Unterlauf abgestimmten Geschiebewardirtschaftung. Die Projektierung erfolgt unter Einsatz des Geschiebetransportmodells TOM^{SED} sowie von physikalischen Modellversuchen. Ziel ist eine Optimierung der konstruktiven Ausführung einer Geschiebesortiersperre.

Stichwörter:

Ereignisdokumentation, Ereignisanalyse, Gefahrenabschätzung, Bemessung, Projektierung

Abstract:

On 7th July 2011 a flood event occurred in the Wölzer-Valley in Styria. For the whole catchment of the "Wölzerbach" an event documentation was done in a first step. Further on the flood event was analysed. The event analysis included the interpretation of weather surveillance radar, rainfall-runoff modelling as well as hydraulic simulations using different approaches. For the "Schöttlbach" which is a tributary of the Wölzerbach in scope of the the Austrian Torrent and Avalanche Control Service protection measures are being planned using the results of the event analysis. The focus lies on sorting the bedload to be manageable for the lower reaches. By using the bedload transport model TOM^{SED} and in a further step doing physical modelling a check dam should be optimized.

Keywords:

Event documentation, event analysis, hazard assessment, design of protection measures

Einleitung

Die Dokumentation von extremen Naturereignissen bildet als Bestandteil eines integralen Risikomanagements die Basis für die Analyse und Bewertung von Naturrisiken und der darauf folgenden Planung von präventiven Maßnahmen zur Vermeidung zukünftiger Schäden. Die Methoden zur Gefahrenanalyse sind jedoch vielfältig und lassen einigen Spielraum. Das sehr seltene und lokale Auftreten solcher Ereignisse sowie die meist fehlenden Messeinrichtungen in Wildbacheinzugsgebieten erlauben daher oftmals keine Evaluierung der verwendeten Methoden, wodurch es zu sehr großen Unsicherheiten in den Ergebnissen kommt. Diese Unsicherheiten ziehen sich durch den gesamten Planungsprozess, angefangen bei der Niederschlagsituation, welche die Grundlage für die Niederschlag-Abfluss-Simulation bildet, bis hin zur Erstellung von Eingangshydrographen für die hydraulische Simulation. Kann man auf ein dokumentiertes Ereignis zurückgreifen, bietet sich die Möglichkeit vorhandene Modelle zu testen und anhand von Sensitivitätsanalysen festzustel-

len, welchen Einfluss die Parameter auf das Ergebnis haben. Diese Erkenntnisse können schließlich in den Planungsprozess miteinbezogen werden.

In einem ersten Schritt ist daher eine sorgfältige Dokumentation des Ereignisses wesentlich (Hübl et al., 2011). Diese erfordert gute Vorbereitung aber auch schnelle Einsatzbereitschaft, da die Spuren im Gelände rasch wieder verschwinden, sei es durch Aufräumarbeiten oder nachfolgende Hochwässer. Für die Ereignisanalyse bestimmt die Qualität der Dokumentation aber auch der Daten die Qualität der Ergebnisse. Vor allem fehlende oder nicht verfügbare Gebietsdaten stellen hierbei ein Problem dar, da diese Informationen für die Rekonstruktion des Abflussgeschehens ausschlaggebend sind.

Anhand des Hochwasserereignisses vom 7. Juli 2011 im steirischen Wölzertal (Bezirk Murau) wurde versucht die dokumentierten Phänomene mit gängigen Modellen, sowie in der Praxis verfügbaren Datengrundlagen nachzubilden und die Ergebnisse der verschiedenen Modelle zu vergleichen (Hübl et al., 2012).

Da eine Hochwasserwelle naturgemäß vor Kompetenzgrenzen keinen Halt macht und

das Einzugsgebiet des Wölzerbaches mit seinen Zubringern sowohl die Wildbach- und Lawinerverbauung als auch die Bundeswasserbauverwaltung betrifft, wurde unter Zusammenarbeit der beiden Dienststellen eine Ereignisanalyse durchgeführt und die unterschiedlichen Herangehensweisen im Zuge eines Workshops diskutiert.

Die Ereignisanalyse bildet die Basis für die Projektierung von Schutzmaßnahmen im Einzugsgebiet des Schöttlbaches, welche von der Gebietsbauleitung Oberes Murtal der Wildbach- und Lawinerverbauung durchgeführt wird.

Ereignisdokumentation

Starke Niederschläge lösten am Nachmittag des 7. Juli 2011 zahlreiche Hochwässer im Einzugsgebiet des Wölzerbaches aus, die Schäden in den Gemeinden Niederwölz, Oberwölz Stadt, Oberwölz Umgebung und Winklern bei Oberwölz verursachten. Das Niederschlagszentrum befand sich in den Mittelläufen der im Kompetenzbereich der Wildbach- und Lawinerverbauung liegenden Teileinzugsgebiete Schöttlbach und Hintereggerbach. Im Bereich der Gewitterzelle wurden durch Rutschungen als auch durch Tiefen- und Seitenerosion der Zubringerbäche große Mengen an Feststoffen mobilisiert und abtransportiert. Hinter den vorhandenen Geschiebeablagerungs- und Dosiersperren wurde das Geschiebe nur zum Teil abgelagert, das weitertransportierte Geschiebe führte anschließend in den Unterläufen sowie im Vorfluter zu Auflandungen. Das mittransportierte Wildholz und Rundholz, welches von Holzlagerplätzen im Überflutungsbereich stammte, verklebte mehrere Brückenquerschnitte. Die daraus resultierende Kombination aus Verklauung und Auflandung führte zu großflächigen Überflutungen und lokal zu Überschotterungen im Siedlungsraum.

Niederschlagsanalyse

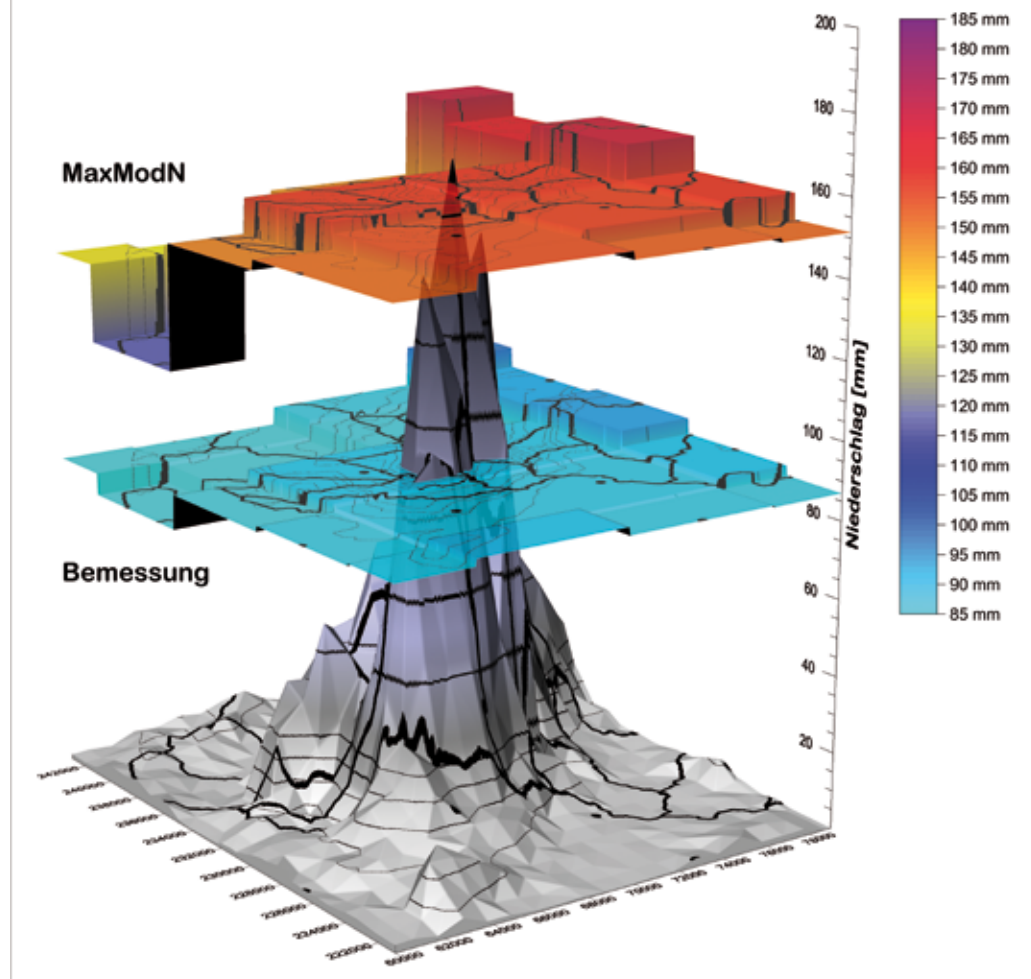
Das Ziel der Analyse des Ereignisniederschlags war die Darstellung des räumlich-zeitlichen Belastungsmusters sowie die Ableitung von Hinweisen für Bemessungsaufgaben. Um die räumlich-zeitliche Verteilung zu veranschaulichen wurden von der AustroControl erworbene Wetterradardaten herangezogen. Diese liegen üblicherweise als Klassenmittelwerte der Radar-Intensitätsklassen vor. Bei diesen Daten, die auch von der ZAMG für die INCA-Analyse verwendet werden, wird allerdings die oberste Klasse nur mit dem unteren Grenzwert der Klasse abgebildet, sie ist also nach oben hin „offen“. Dadurch werden sehr hohe Intensitäten, die vor allem für die Analyse von Starkregen interessant sind, nicht mehr dargestellt.

Aus diesem Grund wurden zu den Klassenmittelwerten die Rohdaten der Radar-Reflektivität angefordert, die ein anderes Bild bezüglich der Intensitäten und der Niederschlagsverteilung zeigten. Der Vergleich mit den Interviews zur Niederschlagsverteilung aus der Dokumentation lässt darauf schließen, dass die Werte aus den Rohdaten das Ereignis besser abbilden als die Klassenmittelwerte, weshalb für die weitere Ereignisanalyse ebendiese Rohdaten herangezogen wurden.

Die Auswertung ergab eine Niederschlagssumme von 25,6 mm auf das gesamte Einzugsgebiet des Wölzerbaches (Fläche ~226 km²), einzelne Teileinzugsgebiete (Schöttlbach Mittellauf und Mittellauf Hintereggerbach) werden mit einem Gebietsniederschlag bis zu 93 mm beaufschlagt. Die maximalen Intensitäten pro Quadratkilometer betragen bis zu 25 mm/5 min.

Der Versuch eine Jährlichkeit für dieses Niederschlagsereignis festzulegen erfolgte durch den Vergleich der Ergebnisse der Auswertung der Radar-Rohdaten mit den Bemessungswerten bzw. den maximierten Modellniederschlägen (Max-

**Einzugsgebiet Wölzerbach, Bez. Murau
7. Juli 2011 13:00 - 16:00 MEZ**



Vergleich von Bemessungsniederschlägen des Hydrographischen Dienstes Österreichs (eHYD) mit der Niederschlagsauswertung, basierend auf den Rohdaten der Radar-Reflektivität des untersten Scans der Station Zirbitzkogel (~2.400 m üA)

Dauerstufe 180 Minuten

Projektion GK M31

**Datenquellen:
Austrocontrol und Lebensministerium**



Abb.1: Vergleich der Bemessungsniederschläge mit der Niederschlagsauswertung der Rohdaten der Radar-Reflektivität

Fig. 1: Comparison of design precipitation with precipitation analysis from the weather surveillance radar's raw data

ModN) des Hydrographischen Dienstes. Für eine Dauerstufe von 3 Stunden und einer Jährlichkeit von 100 zeigt sich, dass die MaxModN-Werte den punktuellen Maximalniederschlag gut abbilden, die Bemessungswerte werden weit überschritten (Abbildung 1). Die Flächenabminderung der Punktniederschläge für dieses Ereignis zeigt eine wesentlich stärkere Abminderung als die aus der Literatur bekannten (z.B. Skoda et al., 2007; Blöschl, 2009). Mit dieser für das Ereignis ermittelten flächigen Abminderung des Punktniederschlags errechnet sich für die am stärksten beaufschlagten Teileinzugsgebiete eine Frequenz von 30 Jahren. Die gleiche Jährlichkeit wurde auch aufgrund von statistischen Analysen für den Abfluss am Pegel Niederwölz ermittelt.

Niederschlag-Abfluss Simulation

Die Niederschlag-Abfluss Simulation erfolgte mit drei unterschiedlichen Ansätzen um einerseits die Ereignisabflüsse möglichst gut nachzubilden und andererseits die Modelle auf ihre Anwendbarkeit für die Praxis zu testen und die erforderlichen Eingangsparameter für realitätsnahe Ergebnisse darzulegen. Die Rekonstruktion der Abflüsse erfolgte mit den Modellen NASIM, HEC-HMS und ZEMOKOST.

Die für den Schöttlbach rückgerechnete Abflussspitze von $\sim 90 \text{ m}^3/\text{s}$ um etwa 16:25 Uhr MEZ wurde mit dem Modell NASIM sehr gut abgebildet. Durch die Auswertung von Foto- und Videomaterial mit Zeitstempel an einem Brückenquerschnitt konnte die simulierte Ganglinie plausibilisiert werden. Das Modell NASIM erfordert allerdings eine Langzeitsimulation zur Kalibrierung, weshalb Niederschlagsdaten und Pegeldaten benötigt werden. Des Weiteren sind neben Landnutzungsinformationen hydrologische Eigenschaften des Einzugsgebietes wie Be-

deckungsgrad, Interzeption, Durchwurzelung und Schichtdicken der Bodenarten anzugeben. Im Einzugsgebiet des Wölzerbaches befindet sich ein Ombrograph in Oberwölz Stadt sowie ein Pegel am Wölzerbach am Gebietsauslass in Niederwölz, an dem die Kalibrierung durchgeführt wurde. Die Gebietsdaten stammen aus Landnutzungsdaten, Bodenkarten und geologischen Karten. Da einerseits in Wildbacheinzugsgebieten kaum Pegel- und Niederschlagsdaten vorhanden sind und auch Gebietsdaten nur spärlich vorliegen ist die Verwendung des Modells NASIM für die Praxis nur bedingt geeignet. Bei Vorhandensein qualitativ hochwertiger Daten ist das Modell jedoch durchaus zu empfehlen.

Das Modell HEC-HMS liefert bei der Verwendung der empfohlenen CN-Werte, die mit Landnutzungs- und Bodendaten ermittelt wurden gute Ergebnisse was Höhe und Zeitpunkt der Abflussspitze betrifft. Bei Verwendung des SCS Unit Hydrographs wird die Abflussfracht allerdings weit unterschätzt. Daher ist das Modell vor allem in Hinblick auf die Bemessung von Retentionsvolumina problematisch.

Beim Modell ZEMOKOST ist es im Gegensatz zu den vorher genannten nicht möglich einen Ereignisniederschlag direkt einzugeben, da das Modell auf die Berechnung von Abflussspitzen und -frachten für Bemessungsereignisse ausgerichtet ist. Trotzdem wurde versucht anhand der an das Ereignis angenäherten Bemessungsniederschläge den Abfluss nachzubilden. Ein plausibles Ergebnis liefert die Verwendung von maximierten Modellniederschlägen und einer starken Abminderung nach Blöschl (2009). Die Abflussspitze beträgt hier rund $90 \text{ m}^3/\text{s}$, allerdings wird die Fracht des Ereignisses überschätzt. Bei der Berechnung von Bemessungsabflüssen mit denselben Gebietsdaten scheint ZEMOKOST die Abflussspitzen zu unterschätzen.

Hydraulische Simulation

Die hydraulische Simulation für den Schöttlbach wurde mit den Modellen FLUMEN und HYDRO-AS_2D durchgeführt. Mit beiden Modellen sollte das Ereignis nachvollzogen und die Resultate verglichen werden um Hinweise für die Gefahrenanalyse zu finden.

Ein großer Unterschied in der Verwendung der Modelle lag in der Berücksichtigung von Geschiebe. Die Simulation mit FLUMEN erfolgte unter Einbeziehung von Geschiebetransport, mit HYDRO-AS_2D wurde nur der Reinwasserabfluss simuliert. Des Weiteren wurde mit unterschiedlichen Verkläusungsszenarien gerechnet. Beim Ereignis waren verschiedene Brücken zwar nur teilverkläust, im Bemessungsfall ist aber durchaus auch mit Vollverkläusungen zu rechnen. Deshalb

wurden auch die Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien gegenübergestellt. Als Eingangshydrograph wurde die mit NASIM ermittelte Ganglinie verwendet, das Eingangsgeschiebe stammt aus der Geschiebefracht, welche im Zuge der Dokumentation ermittelt wurde und fließt als vereinfachte Geschiebeganglinie in das Modell ein.

Die mit FLUMEN und unter Berücksichtigung von Geschiebetransport simulierten Überflutungsflächen des Szenarios „Teilverkläusung“ stimmen gut mit der dokumentierten Ausbreitung überein, die Simulation mit HYDRO-AS_2D zeigt für das gleiche Szenario eine deutlich geringere Ausbreitung. Vom Büro Hydroconsult, Graz wurde zudem eine Simulation mit HYDRO-AS_2D für den Wölzerbaches im Kompetenzbereich der Bundeswasserbauverwaltung sowie den Schöttlbach durchgeführt. Um die Überflutungsflächen

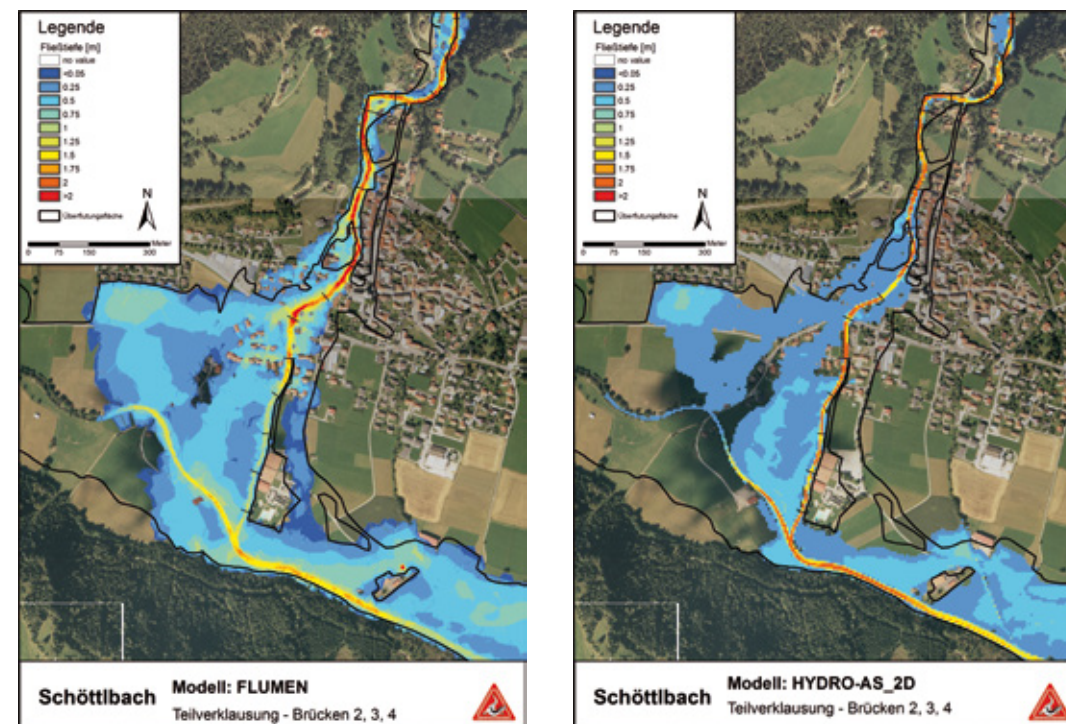


Abb. 2: Ergebnisse der Simulation mit den Modellen FLUMEN und HYDRO-AS_2D mit Annahme von teilverkläusten Brückenquerschnitten

Fig. 2: Simulation Results from FLUMEN and HYDRO-AS_2D assuming a part driftwood jam

hydraulisch nachbilden zu können, wurde bei Abschnitten mit geringem bis mittlerem Geschiebeanteil der Eingangshydrograph um 10% erhöht. Bei der Simulation des Schöttlbaches wurden die Überflutungsflächen mittels Änderung des Rauigkeitsbeiwertes angepasst.

Geschiebemodellierung

Der mit FLUMEN simulierte Geschiebetransport im Schöttlbach wurde mit dem Geschiebetransportmodell TOM^{SED} simuliert, wobei die Verwendung des 1-dimensionalen Modells TOM^{SED} bei Ausuferungen nicht unbedingt zielführend ist. Trotzdem stimmen die Ablagerungsmuster der beiden Modelle sehr gut überein. Der Einsatzbereich von TOM^{SED} liegt daher eher in den Oberläufen von Wildbächen zur Abschätzung der Geschiebefracht. Bei bordvollem Abfluss kann das Modell die Auflandungen im Gerinne aber gut nachbilden.

Zusammenfassung der Ereignisanalyse

Aus der Ereignisanalyse für den Wölzerbach und im Speziellen für den Schöttlbach ergeben sich einige Diskussionspunkte bezüglich der Gefahrenanalyse für Bemessungsaufgaben.

Die Niederschlagsauswertung bildet die Grundlage für jede weitere Analyse. Wie sich bei diesem Ereignis gezeigt hat, erfasst aber die Messstation nur einen geringen Teil des Gebietsniederschlags, der Ereignisniederschlag wird nur unzureichend dargestellt. Die Auswertung von Wetterradar-Daten stellt eine brauchbare Alternative dar, da die räumliche Ausdehnung und zeitliche Verlagerung der Schauerzelle abgebildet werden kann. Diese Daten sind für Bemessungsaufgaben normalerweise nicht verfügbar und somit stellt sich die Frage nach der Verwendung von geeigneten

Bemessungsniederschlägen. Da in Wildbacheinzugsgebieten vor allem konvektive Starkniederschläge von Bedeutung sind, darf bei größeren Einzugsgebieten nicht von einer Überregnung des gesamten Einzugsgebietes ausgegangen werden. Es sollten daher in der Niederschlag-Abfluss Simulation unterschiedliche Szenarien für räumliche Niederschlagsverteilungen betrachtet werden. Dies ist bereits bei der Erstellung der Flussgebietsmodelle entsprechend zu berücksichtigen.

Die hydraulische Simulation hat gezeigt, dass in Wildbächen mit Geschiebetransport das im Ereignisfall mobilisierbare Geschiebe in die Simulation miteinzubeziehen ist. Des Weiteren ist die Darstellung der verschiedenen Verklausungsszenarien als Umhüllende für den gesamten Gefahrenraum anzustreben.

Projektierung von Schutzmaßnahmen

Die Kompetenz am Schöttlbach war bis zum 01.01.2012 bei hm 14,7, unmittelbar bachaufwärts der Stadt Oberwölz durch eine Tätigkeitsgrenze zwischen Bundeswasserbauverwaltung und Wildbach- und Lawinenverbauung geteilt. Zwischenzeitlich wurde für eine Vereinfachung der Projektierung bzw. der Umsetzung von Maßnahmen diese Tätigkeitsgrenze aufgehoben und die Kompetenz an die Wildbach- und Lawinenverbauung übertragen. Entsprechend der ehemaligen Zuständigkeiten wurden von beiden Dienststellen bisher Teilverbauungen am Gerinne ausgeführt. So ist das Unterlaufgerinne durchgehend von der ehemaligen Tätigkeitsgrenze bachabwärts reguliert. Die Regulierungsabschnitte sind aufgrund von variierenden Platzverhältnissen unterschiedlich ausgeführt. So besteht an den engsten Stellen eine ca. 150 lfm lange harte Regulierungsstrecke mit beidseitigen Ufermauern. Kardinalpunkte sind mehrere Brückenbauwerke, die den Schöttlbach bei der Landstraße und mehreren Gemein-



Abb. 3: Völlige Verfüllung der bestehenden Dolensperre in hm 24,5 beim Ereignis am 07. Juli 2011 – geplanter Umbau zu einem Wildholzrechen

Fig. 3: Complete filling of the existing barrier at the event at 07 July 2011 - scheduled modification to a bar rack

destraßen queren. Für die Geschiebepflichtung ist in hm 24,5 eine Dolensperre mit einem Rückhaltevolumen von ca. 30.000m³ im geräumten Zustand, errichtet.

Das Ereignis vom 07.07.2011 zeigte die eingeschränkte Funktionsfähigkeit der bisherigen Maßnahmen. Da es bereits bei kleineren Ereignissen, bzw. durch den laufenden Geschiebetrieb zur Verlandung des Rückhalterumes der Geschiebesperre bei hm 24,5 kommt, kann hier bei großen Ereignissen nur ein geringer Teil der Geschiebefracht rückgehalten werden. Bachabwärts der Geschiebesperre besteht ein ca. 1 km langer ungesicherter Gerinneabschnitt, bei dem es im Ereignisfall zu massivem Geschiebeeintrag durch Seiten- und Tiefenerosionen und durch Einstöße

von mehreren kleineren Zubringern kommt. Problematisch für den Unterlauf ist ebenso das Fehlen eines funktionierenden Unholzrückhalts. Somit kommt es beim Ereignis zum Eintrag von mehreren zehntausend Kubikmetern Geschiebe, vermengt mit Unholz in den regulierten Unterlauf. Besonders bei (Teil-)Verklausungen von Brücken führt dies zu Anlandungen im Gerinne und zu damit verbundenen Bachaustritten im Stadtgebiet von Oberwölz.

Aufbauend auf die Ereignisanalyse ist es nunmehr Aufgabe der Gebietsbauleitung Oberes Murtal ein Verbauungsprojekt für den Schöttlbach zu erarbeiten. Verbauungsziel ist der Schutz der Stadt Oberwölz, mitsamt Infrastruktur bis zu einem Bemessungsereignis gem. Gefahrenzonenplan-VO 1976.



Abb. 4: 07. Juli 2011- Teilverkläuserung der Landstraßenbrücke und damit verbundene Geschiebeanlandung im Unterlaufgerinne

Fig. 4: 07 July 2011 - partial blockage of the bridge and related accumulation of debris downstream

Bemessungsereignis

Im Gefahrenzonenplan aus dem Jahr 1991 sind für den Schöttlbach ein HQ_{150} von $165 \text{ m}^3/\text{s}$ und eine 150-jährliche Geschiebefracht von 50.000 m^3 ausgewiesen.

Aufgrund der nunmehr vorliegenden Analyse des Ereignisses vom 07. Juli 2011 und unter Verwendung von zeitgemäßen Grundlagendaten erfolgt für die Projektierung eine neuerliche Festlegung des Bemessungsereignisses. Hierzu wurde der Bemessungsniederschlag mit schwacher Abminderung gemäß eHYD für das Gesamteinzugsgebiet des Schöttlbaches mit einer Dauer von zwei Stunden gewählt. Unter Verwendung des kalibrierten NASIM-Modells wurde ein HQ_{100} mit

$\sim 130 \text{ m}^3/\text{s}$ ermittelt. Mit gleichen Parametern lässt sich das Ereignis vom 7. Juli 2011 am Schöttlbach als rund 30-jährliches Ereignis quantifizieren. Weiters wurden mit dem NA-Modell HEC-HMS unterschiedliche Überregnungsszenarien für das Einzugsgebiet des Schöttlbaches nachgebildet, wobei sich eine maximale Hochwasserspitze von $\sim 120 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt. Ein hydrologisches Gutachten vom Amt der steiermärkischen Landesregierung, FA 19A vom 20.07.1995 weist für das Gesamteinzugsgebiet des Schöttlbaches ein HQ_{100} von $128 \text{ m}^3/\text{s}$ aus.

Aufgrund der guten Übereinstimmung der Ergebnisse beider NA-Modelle und dem hydrologischen Gutachten wird ein Basis HQ_{100} von $128 \text{ m}^3/\text{s}$ für den Schöttlbach festgelegt. Zur Dimensionierung des Unterlaufgerinnes wird ein In-

tensitätsfaktor von 1,05 berücksichtigt, womit sich ein Bemessungsabfluss von $135 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt. Die Bemessungs-Geschiebefracht wird mit 120.000 m^3 festgelegt, da dies ca. der geräumten Menge des Ereignisses vom 07. Juli 2012 entspricht.

Verbauungskonzept

Die Problematik am Schöttlbach liegt einerseits in einer, auf die Transportkapazität des Unterlaufes abgestimmten Geschiebebewirtschaftung und in

der ausreichenden Dimensionierung des Unterlaufgerinnes selbst.

Zur Schaffung von ausreichendem Geschieberückhalt wird unmittelbar bachaufwärts des Siedlungsbereiches, ca. bei hm 15 eine Filtersperre geplant. Der Standort wird so gewählt, dass einerseits eine möglichst kurze Ausbaustrecke am Unterlauf erforderlich ist und andererseits die vorhandenen Zubringer bachaufwärts der Sperre einmünden.

Die Filterfunktion soll mit einem mehrfach geknickten Stahlschrägrechen erzielt werden. Die Rechenabstände werden so gewählt, dass nur jener Teil an Geschiebe durchgängig bleibt, der vom Unterlaufgerinne transportiert werden kann, sodass es zu keinen Anlandungen und damit verbundenen Querschnittsverengungen kommt. Hierzu ist am Institut für Alpine Naturgefahren eine Diplomarbeit vergeben, die einerseits die Transportkapazität am Unterlaufgerinne mit dem 1-dimensionalen Modell TOM^{SED} bestimmt und in Abhängigkeit davon die konstruktive Ausführung des Sortierrechens auf Basis eines physikalischen Modellversuchs im Labor ermittelt. Um einer laufenden



Abb. 5: 07 July 2011 - Geschiebeanlandungen im Unterlaufgerinne beim historischen West-Tor der Stadtmauer von Oberwölz

Fig. 5: 07 July 2011 - Accumulation of debris load at the lower channel near the western historic city gate of Oberwölz

Vorverfüllung entgegenzuwirken und die Funktion für den Geschieberückhalt und insbesondere zur Ausfilterung von Unholz bei der bestehenden Dolensperre in hm 24,5 zu gewährleisten, wird diese in eine kronenoffene Sperre umgebaut. Dies erfolgt durch die Öffnung des Sperrenmittelteiles, in dem ein senkrechter Grobrechen eingebracht wird. Im Verbund mit der Filtersperre bei hm 15 entsteht somit eine Funktionskette zur Wildholz- und Geschiebebewirtschaftung.

Am Unterlaufgerinne sind teilweise Maßnahmen zur Vergrößerung des Durchflussquerschnittes erforderlich. Eine technische Herausforderung besteht hier insbesondere bei den vorhandenen Engstellen in Verbindung mit den historischen Ansichten der Altstadt von Oberwölz.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Julia Eisl
Institut für Alpine Naturgefahren, Department
Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur Wien
Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien
julia.eisl@boku.ac.at

DI Stefan Fieger
Gebietsbauleitung Oberes Murtal
Murauer Straße 8
8811 Scheifling
stefan.fieger@die-wildbach.at

Univ. Prof. DI Dr. Johannes Hübl
Institut für Alpine Naturgefahren, Department
Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur Wien
Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien
johannes.huebl@boku.ac.at

Literatur / References:

BLÖSCHL, G. (2009):
Skriptum Ingenieurhydrologie (VO 223.027), www.hydro.tuwien.ac.at/lehre/LVA/downloads.html

HÜBL J., EISL J., HOHL D., KOEGLNIG B., MÜHLBÖCK F. (2011):
Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach; IAN Report 143,
Band 1: Ereignisdokumentation, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur - Wien

HÜBL J., EISL J., KUNDELA G., HOHL D., KARAGIORGOS K., HOFER B.,
TSCHARNER S., WAGNER M. SAVORA U. (2012):
IAN Report 143: Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach;
Band 2: Ereignisanalyse; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur - Wien

SKODA, G., WEILGUNI V., HAIDEN, T. (2007):
Konvektive Starkniederschläge – Niederschlag in 15, 60 und 180 Minuten;
in: BMLFUW (2007): HAÖ – Hydrologischer Atlas Österreich, 3. Lieferung

You better ask our experts for the best approach



software
maps
geostatistics
reporting
data

"That's it."

Gregor Ortner, CTO UNIDATA

UNIDATA GEODESIGN GMBH
Gärtnergasse 3 Top 6, 1030 Vienna
t +43(1) 96 901 78
office@unidata.at
www.unidata.at

unidata
geo
design

PERZ
LAN



Ingenieurkonsulent • Ingenieurbüro
Forst- und Holzwirtschaft
Wildbach- und Lawinenschutz
Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

DIPL. ING. THOMAS PERZ www.perzplan.at

2630 Ternitz Franz Dinohoblstraße 41 Tel: +43 2630 35105
8600 Bruck/Mur Roseggerstraße 24 Tel: +43 3862 52818
3100 St. Pölten Bahnhofplatz 17 Tel: +43 2742 37726

patscheiderpartner
ENGINEERS

Unabhängig, interdisziplinär, kompetent. Ingenieurleistungen aus einer Hand

ingenieure patscheider & partner gmbh



i-39024 mals (bz)
glumserstraße 5/k

i-39100 bozen
avogadrostraße 2

a-6130 schwaz
mindelheimerstraße 6

Hoch- und Industriebau
Infrastrukturen
Statik und Tragwerke
Geotechnik
Wasserbau
Verkehrswege

tel. +39 0473 83 05 05 - fax +39 0473 83 53 01
info@ipp.bz.it - www.patscheiderpartner.it

ANDREA KREISLER, HELMUT HABERSACK

Erste Ergebnisse der Geschiebemessungen an der Urslau

First Results of Bedload Transport Monitoring at the Urslau Torrent

Zusammenfassung:

Geschiebemonitoring dient der Ermittlung von Geschiebetransportraten, der Textur des Materials und einer Erweiterung des Prozessverständnisses. Diese Ergebnisse sind für die Wildbachverbauung entscheidend, um optimierte Planungen und nachhaltige Maßnahmen tätigen zu können. Weiter dienen Naturmessdaten des Feststofftransportes als Grundlage zur Auswahl, Anwendung und Kalibrierung von Transportformeln und numerischen Modellen.

In diesem Artikel wird die im Jahr 2011 an einem Wildbachunterlauf (Urslau, Salzburg/Pinzgau) errichtete Geschiebemesstelle vorgestellt. Die Kombination aus direkten (mobiler Geschiebefänger, stationäre Geschiebefalle) und indirekten (Geophonanlage) Messmethoden ermöglicht eine integrative Erfassung des Geschiebetransportprozesses. Die ersten Ergebnisse über ermittelte Geschiebetransportraten, zeitliche und räumliche Variabilität des Transportprozesses und charakteristische Korngrößen werden dargelegt.

Stichwörter:

Geschiebetransport, Geschiebemonitoring, direkte / indirekte Messmethoden

Abstract:

Bedload monitoring allows the determination of bedload transport rates, bedload texture and enables a better understanding of the transport process. The results are important for torrent control to implement improved management strategies and sustainable measures. Data of bedload measurements form the basis to select apply and calibrate transport formulas and numerical models.

This article presents the bedload monitoring station at the downstream section of a torrent (Urslau, Salzburg/Pinzgau) which was built in 2011. The combination of direct and indirect bedload transport measurement methods allows an integrative monitoring of the bedload transport process. First results of determined bedload transport rates, temporal and spatial variability of the transport process and characteristic grain sizes are shown.

Keywords:

Bedload transport, bedload monitoring, direct / indirect measurement methods

Einleitung

Geschiebemonitoring ist im Bereich der Wildbach- und Lawinenverbauung für das Prozessverständnis, die Ermittlung von Geschiebefrachten und in weiterer Folge für die Planung und Ausführung von Verbauungsmaßnahmen und die Analyse und Bewertung von Hochwasserereignissen mit Geschiebetransport von großer Bedeutung.

In Salzburg/Pinzgau wurde im Jahr 2011 im Zuge des Projektes „Messung und Berechnung des Geschiebetransportes in Wildbachunterläufen am Beispiel der Urslau“ von der Wildbach- und Lawinenverbauung und der Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau eine Geschiebemesstation errichtet. Das Geschiebemonitoring umfasst direkte und indirekte Messmethoden, mit welchen der Transportprozess integrativ erfasst werden kann.

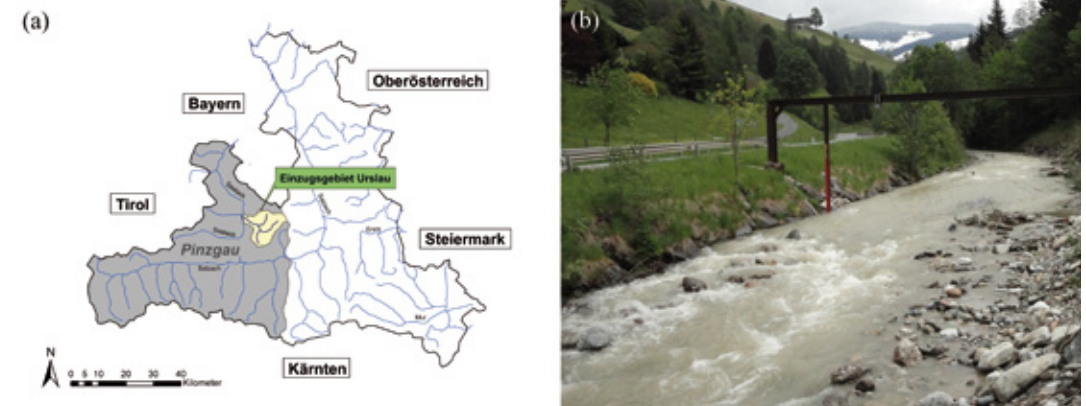


Abb. 1: Lage Einzugsgebiet Urslau (a), Urslau am Schattmühlwehr (b)

Fig. 1: Situation of catchment area Urslau (a), Urslau at Schattmühlwehr (b)

Untersuchungsgebiet

Die Urslau befindet sich in Salzburg/Pinzgau (Abbildung 1). Sie entspringt zwischen Hochkönig und dem Steinernen Meer und mündet nach 18,8 Laufkilometern und einem mittleren Gefälle von 11,3 % bei Uttenhofen rechtsufrig in die Saalach. Das gesamte Einzugsgebiet weist eine Größe von 121,8 km² auf (Neumayr, 2004). Der Mittelwasserabfluss am Pegel Saalfelden beträgt 4,41 m³/s (Reihe 1951-2008, Hydrografisches Jahrbuch 2009). Die Geschiebemesstation wurde 2011 im Gemeindegebiet Maria Alm am Schattmühlwehr errichtet. Das Gefälle im Bereich der Messstation beträgt 2,4 %, die Größe des Einzugsgebietes weist hier eine Größe von 55 km² auf.

Methodik

Das Geschiebemonitoring am Schattmühlwehr umfasst direkte (mobiler Geschiebefänger, stationäre Geschiebefalle) und indirekte (Geophonanlage) Messmethoden. Die direkten Geschiebemessungen werden stichprobenartig ausgeführt und geben Aufschluss über den vorherrschenden Geschiebetrieb und die Textur des Materials. Die Geophonanlage zeichnet über den gesamten Messquerschnitt

und das ganze Jahr hindurch die Intensität des Geschiebetransportes auf. Durch eine Kombination der Messgeräte erfolgt eine integrative Erfassung des Geschiebetransportprozesses.

Mit mobilen Geschiebefängern wird das Geschiebe an der Flusssohle aufgefangen. Abbildung 2 zeigt den an der Urslau zum Einsatz kommenden Geschiebefänger, sowie dessen wichtigste Abmessungen. Die Geschiebemessung mit dem mobilen Fänger erfolgt an der Messstation Schattmühlwehr von einem Kranwagen aus.

Bei der Messmethodik wird zwischen Profilmessungen und Dauermessungen unterschieden. Im Zuge einer Profilmessung wird der Geschiebefänger an drei (orografisch rechts, Mitte, links) definierten Lotrechten im Flussprofil abgesenkt und nach einer vom Geschiebetrieb abhängigen Messdauer wieder an das Ufer zurückgeschwenkt und zur weiteren Analyse entleert. Um die zeitliche Variabilität des Geschiebetransportprozesses zu berücksichtigen, werden die Messungen an einer Lotrechte dreimal wiederholt und zur Berechnung der Transportrate der Mittelwert der drei Messungen herangezogen. Die Entnahme von mehreren Geschiebeproben im Fließquerschnitt ermöglicht die Ermittlung des Geschiebetransportes [kg/s]. Bei Dauermessun-

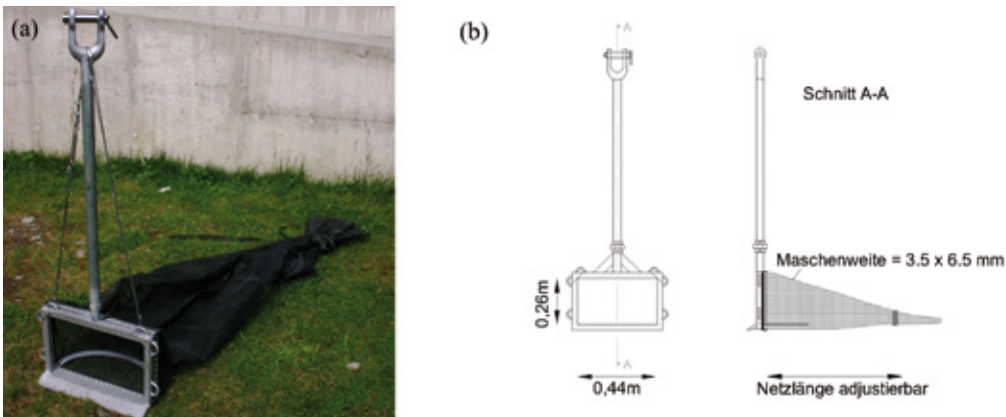


Abb. 2: Mobiler Geschiebefänger (a), Skizze Geschiebefänger (b)

Fig. 2: Mobile bedload sampler (a), sketch mobile bedload sampler (b)

gen wird die Fangkorbmessung an einer Lotrechte wiederholt hintereinander ausgeführt um zeitliche Änderungen im Geschiebetransport beobachten zu können.

Die Messung mit dem mobilen Geschiebefangkorb ist auf niedere bis mittlerer Wasserstände beschränkt, da bei höheren Abflüssen der Strömungsdruck des Wassers den Absenkvorgang auf die Flusssohle erschwert. Zusätzlich kann im Hochwasserfall Treibholz den Messvorgang einschränken. Die Erfassung des Korngrößenspektrums ist durch die Breite des Einlaufbereiches und die Maschenweite des Fangnetzes begrenzt.

Die stationäre Geschiebefalle ist flussaufwärts des Schattmühlwehres in der Mitte des Flussprofils eingebaut. Im Ereignisfall kann ein Messschlitz (Abmessungen: 0,5 m x 1,6 m) über einen Hydraulikmechanismus geöffnet werden und das Geschiebe fällt in einen als Falle konzipierten Sammelbehälter (1,8 m x 0,7 m x 0,9 m), der auf Wägezellen gelagert ist. Über die automatisch aufgezeichnete Massenzunahme wird der Geschiebetrieb erfasst. Habersack, et al. (2001) zeigten, dass die Geschiebefalle bis zu einem Füllungsgrad von etwa 80% keine hydraulische Beeinflussung aufweist. Die Entnahme der Geschiebeprobe nach einer Messung kann

nur bei Niederwasser erfolgen. Hierzu wurde an der Messstation eine Wasserhaltung entwickelt, die die Strömung von der Falle abhält. Nach Entfernen der Fallenabdeckung, kann der Sammelbehälter für die Probenanalyse entnommen und danach für den weiteren Messeinsatz wieder eingebaut werden. Fotos und eine Prinzipskizze der Geschiebefalle sind in Abbildung 3 dargestellt.

Im Gegensatz zum mobilen Geschiebefänger ist die Messung mit der stationären Geschiebefalle nur an einem Punkt im Flussprofil möglich. Die Geschiebefalle ist bei jedem Abfluss einsetzbar, wird jedoch vor allem angewendet, wenn eine Messung mit dem Fangkorb nicht mehr möglich ist. Das gesamte Korngrößenspektrum wird erfasst.

Die direkte Entnahme von Geschiebematerial ermöglicht eine qualitative Analyse der Textur. Die Geschiebeproben (mobiler Geschiebefänger, Geschiebefalle) werden getrocknet und anschließend gesiebt. Sieblinien und charakteristische Korngrößen des Probenmaterials können ermittelt werden. Die Proben des Geschiebefängers werden vollständig gesiebt – somit ist auch eine Bestimmung des Trockengewichtes möglich. Bei der Geschiebefalle werden systematisch Proben entnommen und analysiert.

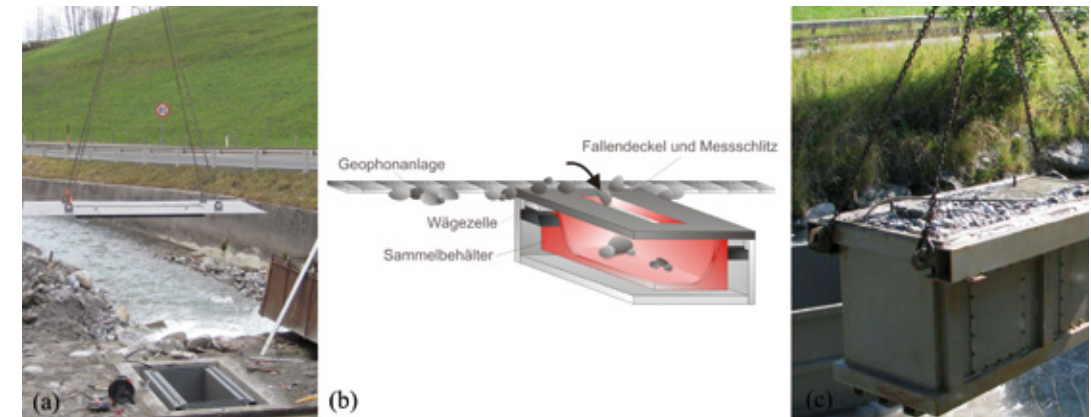


Abb. 3: Sammelbehälter, Fallendeckel (a), Skizze Geschiebefalle (b), Sammelbehälter mit Probe (c)

Fig. 3: sampling box, trap lid (a), sketch bedload trap (b), sampling box with bedload sample (c)

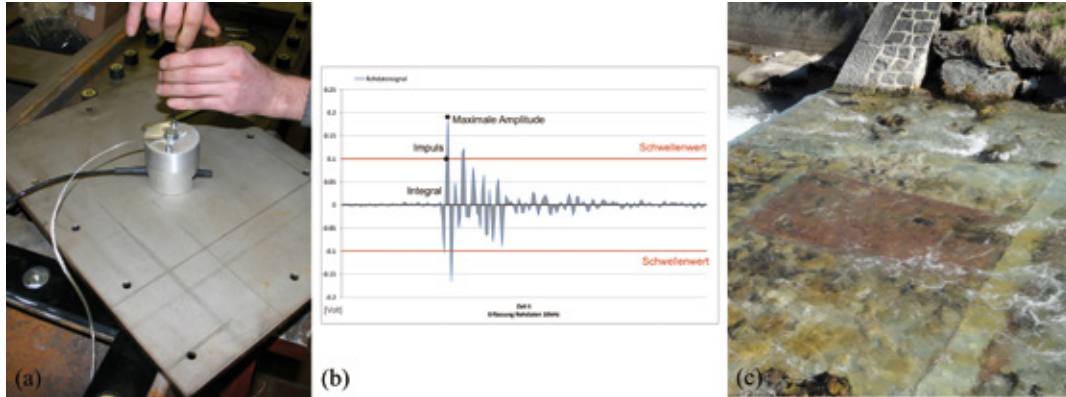


Abb. 4: Geophon (a), Darstellung des Rohsignals (b), Geophonanlage mit Geschiebefalle (c)

Fig. 4: Geophone (a), illustration of raw signal (b), geophone device and bedload trap (c)

Einen zentralen Bestandteil der Messstation bildet die Geophonanlage (indirekte Geschiebemessmethode). Flussauf der Geschiebefalle sind sieben Geophone, die an Stahlplatten montiert sind, gleichmäßig über den Querschnitt verteilt eingebaut (Abbildung 4a und 4c). Geschiebe, das über die Platte transportiert wird, erzeugt Vibrationen, die vom Geophon registriert werden. Dieses Signal wird in ein elektrisches Spannungssignal transformiert und von einem Computersystem weiterverarbeitet. Bei der Verarbeitung des Rohdatensignals werden über eine Software jede Minute die Anzahl der Impulse (Überschreiten eines Schwellenwertes von 0,1 Volt), die maximale Amplitude und das Integral der quadrierten Mittelwerte aufgezeichnet (Abbildung 4b).

Durch diese automatisierte Messmethode wird der Geschiebetransport sowohl über den gesamten Querschnitt als auch zeitlich kontinuierlich (Minutenwerte) aufgezeichnet. Die Geophonanlage ermöglicht daher hoch auflösende Angaben über die Querverteilung des transportierten Materials und den zeitlichen Verlauf des Geschiebetransportes. Die durchgehende Erfassung erlaubt eine Ermittlung des Bewegungsbeginns des transportierten Materials. Die Textur des Geschiebematerials und die Masse des Geschie-

betransportes in Kilogramm kann über die indirekte Messmethode nicht erfasst werden. Hierzu müssen die Geophonaufzeichnungen mit den direkten Messmethoden korreliert werden.

Erste Ergebnisse

Das Geschiebemonitoring an der Ursrau wird seit 2011 betrieben. Direkte Geschiebemessungen mit dem mobilen Geschiebefänger und der Geschiebefalle wurden seitdem wiederholt durchgeführt. Die Geophonanlage liefert seit Anfang des Jahres 2011 kontinuierlich Daten. Ziel dieses Artikels ist es, Teilergebnisse aus der ersten Messsaison vorzustellen.

In der Messsaison 2011 wurden drei Messungen mit dem mobilen Fangkorb durchgeführt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über den gemessenen Geschiebetrieb an drei Messlotrechten, den berechneten Geschiebetransport im Flussquerschnitt, den maßgebenden Korndurchmesser des Geschiebematerials und die Höhe des Durchflusses am Pegel Saalfelden. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis einer Profilmessung. Der größte Geschiebetrieb und der größte maßgebende Korndurchmesser wurden bei dieser Fangkorbmessung in Flussmitte gemessen. Bei den Ergebnissen der

Messgerät	Datum	Geschiebetrieb [kg/ms]			Geschiebe-transport [kg/s]	Maßgebender Korndurchmesser [mm]	Abfluss (Pegel Saalfelden) [m³/s]
		oro-grafisch links	Mitte	oro-grafisch rechts			
Geschiebefänger	24.06.2011	-	0,01	-	-	13,4	6,90
	21.07.2011	0,00	0,08	0,14	0,51	19,9	13,00
	09.08.2011	0,21	2,83	0,96	9,19	30,1	13,40

Tab. 1: Ergebnisse Fangkorb (Profilmessung)

Tab. 1: Results of bedload sampler measurements (section-wise measurement)

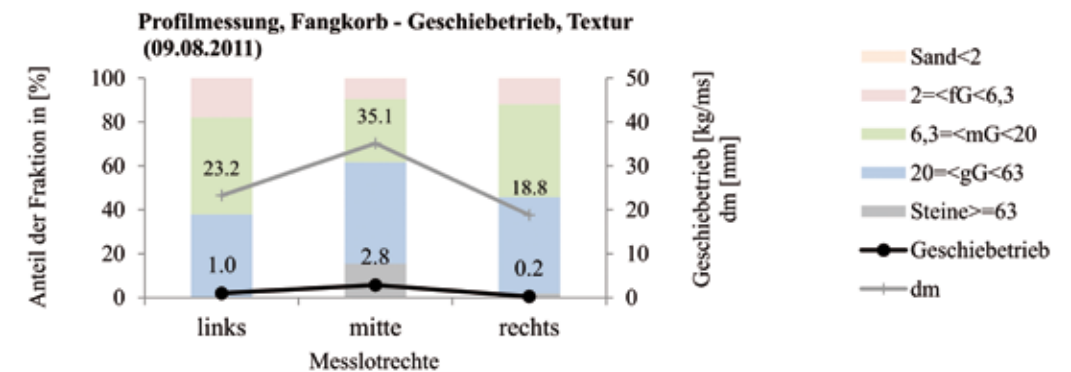


Abb. 5: Ergebnis Profilmessung, mobiler Fangkorb (09.08.2011)

Fig. 5: Result of a section-wise measurement, mobile bedload sampler (09.08.2011)

Fangkorbmessungen ist zu beachten, dass der Feinanteil des Geschiebematerials bedingt durch die Maschenweite des Fangnetzes nicht gänzlich erfasst wird.

Die Geschiebefalle wurde im Jahr 2011 dreimal eingesetzt. Es war möglich bei den höchsten Abflussereignissen zu messen. Eine vierte Messung wurde bei der Schneeschmelze 2012 durchge-

Messgerät	Datum	Geschiebetrieb [kg/ms]	Maßgebender Korndurchmesser [mm]	Abfluss (Pegel Saalfelden) [m³/s]
Geschiebefalle	20.07.2011	1,6	27,98	18,2
	09.08.2011	7,5	25,91	13,5
	10.10.2011	3,7	-	29,8
	29.04.2012	2,1	-	-

Tab. 2: Vorläufige Ergebnisse Geschiebefalle

Tab. 2: Preliminary results of bedload trap measurements

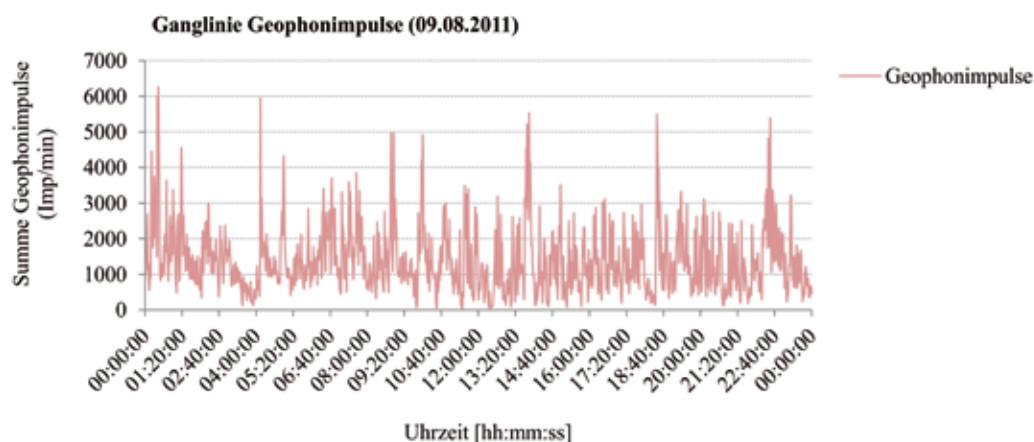


Abb. 6: Zeitliche Variabilität des Geschiebetransportes, Geophonaufzeichnung

Fig. 6: Temporal variability of bedload transport, recording of geophones

führt. Die ersten Teilergebnisse der Fallenmessungen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Die kontinuierliche Datenaufzeichnung der Geophonanlage ermöglicht die gesamte Erfassung und Analyse des Geschiebetransportprozesses.

Abbildung 6 zeigt den Tagesgang der Minutensummenwerte der Geophonimpulse. Die Geschiebetransportintensität ist im Verlauf des Tages nicht konstant, sondern unterliegt starken zeitlichen Schwankungen. Räumlich ist die Verteilung

des Geschiebetransportes im Flussquerschnitt auch variabel. In der Messsaison 2011 wurden an der Messstation rund 35% der Geophonimpulse am Geophon in Flussmitte (Geophon 4) aufgezeichnet. Auf der orografisch rechten Flussseite wurden an den Geophonen 1 bis 3 summiert etwa 50% der Impulse registriert. (Habersack et al., 2011).

Die zeitliche und räumliche Verteilung der registrierten Geophonimpulse an der Urslau

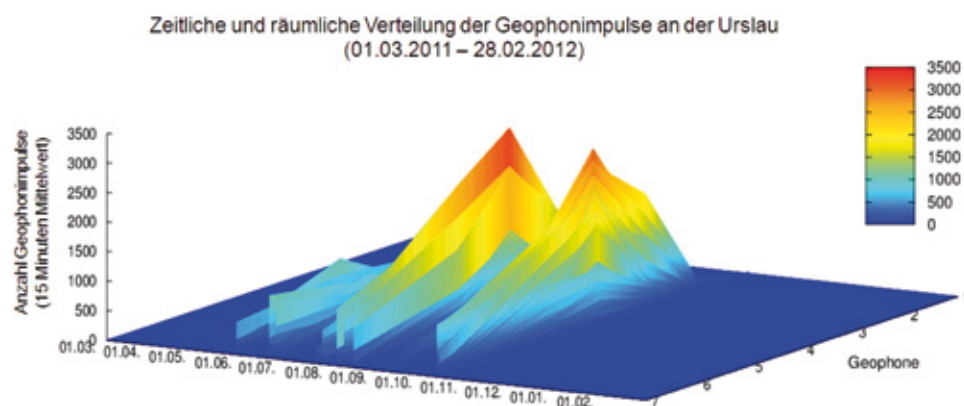


Abb. 7: Zeitliche und räumliche Verteilung der Geophonimpulse

Fig. 7: Temporal and spatial distribution of geophone impulses

im Jahr 2011 ist in Abbildung 7 dargestellt. Die einzelnen Geschiebeereignisse und die Zentrierung des Geschiebetransportes in der Flussmitte sind gut ersichtlich.

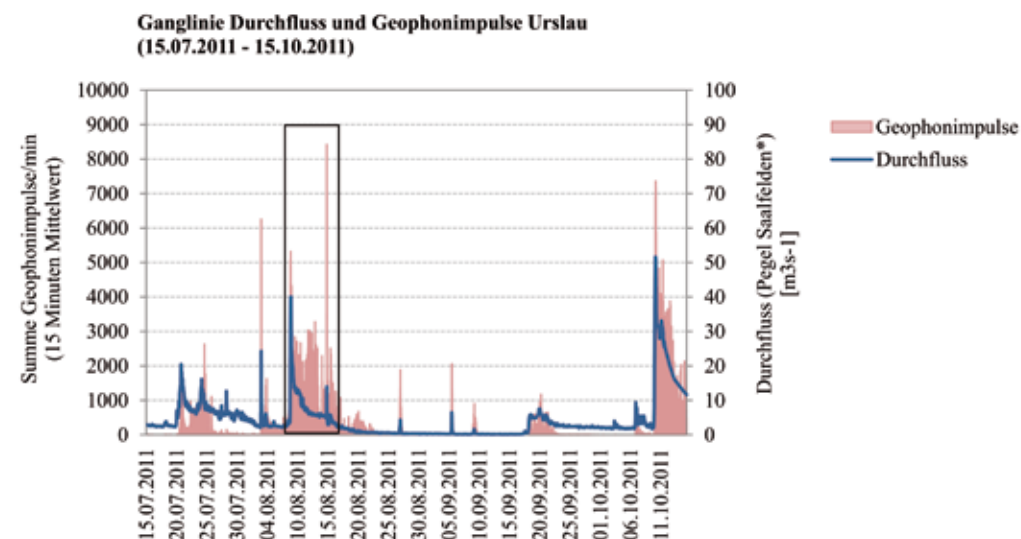
Die Kenntnis der zeitlichen und räumlichen Verteilung ist neben einem erweiterten Prozessverständnis für die Berechnung von Geschiebetransportraten und in weiterer Folge Geschiebefrachten essenziell.

Mit der Geophonanlage wird die Geschiebetransportintensität im gesamten Abflussspektrum bestimmt.

Abbildung 8 zeigt die Abflussganglinie und den Verlauf der Intensität des Geschiebetransportes im Zeitraum 15.07.2011 bis 15.10.2011. Die Abflussdaten wurden vom Pegel Saalfelden des Hydrografischen Dienst Salzburg bezogen. Im Zuge des Projektes wurde auch eine Pegelmessstelle am Schattmühlwehr errichtet. Für zukünftige Auswertungen werden diese Daten herangezogen.

Tendenziell wird bei höheren Abflüssen eine höhere Anzahl an Geophonimpulsen registriert. Jedoch zeigen die Aufzeichnung der zweiten August Woche (in Abbildung 8 markierter Bereich), dass auch nach Abklingen der Hochwasserspitze die Intensität des Geschiebetransportes auf hohem Niveau verbleiben kann.

Ein Vergleich von Monatsabflussfrachten und Monatssummen von Geophonimpulsen zeigt, dass an der Messstation Schattmühlwehr 45 Prozent der im gesamten Jahr aufgezeichneten Geophonimpulse im August registriert wurden. Im gleichen Zeitraum wurden nur etwa 9 Prozent der Jahresabflussfracht am Pegel Saalfelden gemessen. Die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Geschiebemessung ist an diesem Beispiel ersichtlich, da die Geschiebetransport – Abflussbeziehung bei unterschiedlichen Ereignissen nicht konstant ist. Faktoren wie Geschiebeverfügbarkeit und Abflussgeschichte stellen hier entscheidende Einflussgrößen dar.



* Rohdaten des Hydrografischen Dienst Salzburg

Abb. 8: Ganglinie Durchfluss und Geophonimpulse

Fig. 8: Hydrograph of discharge and geophone impulses

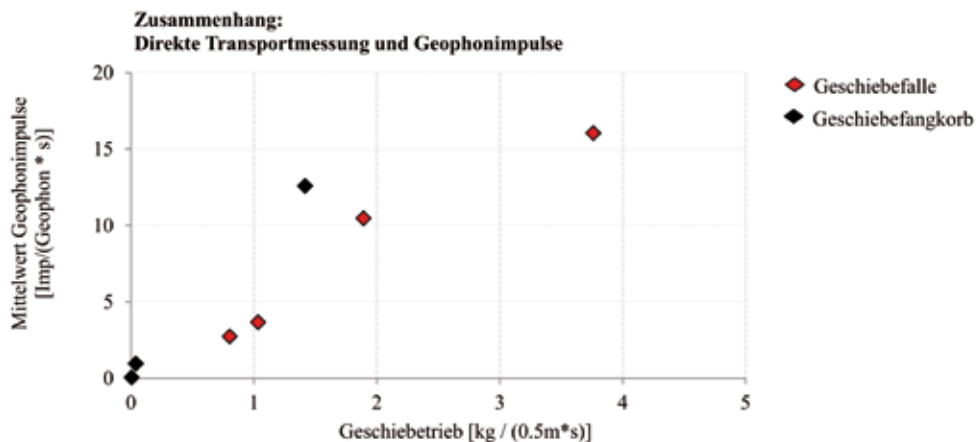


Abb. 9: Zusammenhang: Direkte Geschiebetransportmessung und Geophonimpulse.

Fig. 9: Correlation of direct bedload transport measurement and geophone impulses

Um aus den zeitlich und räumlich kontinuierlich registrierten Geophonaufzeichnungen Massen beziehungsweise Kubaturen für Geschiebetransportraten und Geschiebefrachten ermitteln zu können, müssen die Ergebnisse der direkten Geschiebemessungen herangezogen werden. Hierzu werden die gemessenen Geschiebetransportraten den Geophondaten im gleichen Zeitraum gegenübergestellt. Die Messungen mit dem mobilen Fangkorb und der Geschiebefälle erfolgen jeweils direkt hinter der Geophonanlage, wodurch ein Vergleich der beiden Messmethoden möglich ist. Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang der direkten und indirekten Messungen von den bisher durchgeführten Messungen an der Urslau. Die roten Punkte wurden durch die Fallenmessungen ermittelt, die schwarzen durch Fangkorbmessungen. Bei dieser vorläufigen Gegenüberstellung der direkten und indirekten Messungen ist zu beachten, dass bei den Messungen mit der Geschiebefälle das gesamte Korngrößenspektrum des transportierten Materials erfasst wird, bei den Fangkorbmessungen jedoch das Spektrum durch die Maschenweite des Fangnetzes begrenzt ist. Dieser Unterschied wird bei der Darstellung der Endergebnisse berücksichtigt.

Ziel der kommenden Messsaisonen ist es, das Diagramm um weitere Punkte zu ergänzen und somit die Korrelation zwischen Geophondaten und direkt gemessenen Transportraten zu verbessern. Dieser Zusammenhang ermöglicht die Berechnung von Geschiebetransportraten und Geschiebefrachten zu beliebigen Zeitpunkten der Abflussganglinie.

Ausblick

Das Geschiebemonitoring mit den direkten und indirekten Messmethoden an der Messstation Schattmühlwehr wird vorerst bis 2014 fortgesetzt. Ein Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer für Wildbachunterläufe geeigneten Methode zur Erfassung des Geschiebetransportes.

Die gewonnenen Naturmessdaten werden zur Überprüfung bestehender Ansätze zur Geschiebetransportberechnung herangezogen. Auch werden Möglichkeiten zur Kalibrierung und Anpassung von Geschiebetransportformeln erarbeitet werden. Ein Vorschlag zur generellen Vorgehensweise für die Ermittlung des Geschiebetransportes in Wildbachunterläufen wird erarbeitet.

Danksagung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wildbachverbauung Abteilung IV/5 und der Wildbach und Lawinenverbauung Sektion Salzburg finanziert.

Der Dank der Autoren gilt dem Hydrografischen Dienst Salzburg. Weiter danken die Autoren Johann Aigner Bakk. techn., DI Dr. Michael Tritthart (Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau) und DI Markus Moser (Wildbach- und Lawinenverbauung / Gebietsbauleitung Lungau) für die tatkräftige Unterstützung. Ein weiterer Dank gilt dem Bautrupps der Wildbach- und Lawinenverbauung / Gebietsbauleitung Pinzgau und dem Transportunternehmen Ferdinand Haider.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Andrea Kreisler
 Christian Doppler Labors für Innovative Methoden in Fließgewässermonitoring, Modellierung und Flussbau
 Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
 Muthgasse 107, 1190 Wien
 andrea.kreisler@boku.ac.at

Univ. Prof. DI Dr. Helmut Habersack
 Christian Doppler Labors für Innovative Methoden in Fließgewässermonitoring, Modellierung und Flussbau
 Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
 Muthgasse 107, 1190 Wien
 helmut.habersack@boku.ac.at

Literatur / References:

DigHAÖ. (2009). Digitaler Hydrologischer Atlas Österreich, Version 3.0.2. Erstellt von: Fürst J., Hörhan T., Freudensprung T.

HABERSACK H., NACHTNEBEL H.P., LARONNE J.B. (2001). The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river. *Journal of Hydraulic Research* 39. 125-133.

HABERSACK H., KREISLER A., AIGNER J., TRITTHART M. (2011). Messung und Berechnung des Geschiebetransportes in Wildbachunterläufen am Beispiel der Urslau. Jahresbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Wildbach und Lawinenverbauung, Sektion IV, Abt. IV/5 und Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Salzburg.

NEUMAYR G. (2004). Generelles Projekt Urslau. Technischer Bericht. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Salzburg, Gebietsbauleitung Pinzgau, Zell am See. (unveröffentlicht).

MARKUS MOSER, GERALD JÄGER

Ingenieurmäßige profilweise Methode zur Berechnung des Geschiebetransportes – Spezialsachverständigen-gutachten im Zusammenhang mit Kleinkraftwerken

Engineer-profile-wise method for bed-load transport - expert opinions in regard to hydro power plants

Zusammenfassung:

Bis 2020 soll gemäß Energierichtlinie der Anteil der erneuerbaren Energie gesteigert werden. Im Falle der Wasserkraftnutzung ist dies jedoch mit dem Verschlechterungsverbot laut Wasserrahmenrichtlinie nur eingeschränkt vereinbar. Trotzdem gibt es eine hohe Nachfrage in den letzten Jahren für den Bau von Kleinwasserkraftwerken in sensiblen Wildbachabschnitten. Der Sachverständige der Wildbach- und Lawinenverbauung ist in diesen Fällen gefordert, die Auswirkungen aus wildbachtechnischer Sicht aufzuzeigen und gegebenenfalls Auflagen zu definieren, sodass es zu keiner Verschlechterung des Hochwasserschutzes kommt. Dieser Beitrag beinhaltet eine mögliche Vorgehensweise (Berechnungsverfahren) für eine derartige Beurteilung.

Stichwörter:

Geschiebetransport, Wasserkraftnutzung, Sachverständigentätigkeit

Abstract:

The Energy Directives call for the proportion that renewable sources contribute to the total energy budget to be increased by the year 2020. However in the case of hydropower, this can only be reconciled to a limited extent with the degradation interdict of the Water Framework Directive. Despite this, over the past few years there has been an increasing demand for the construction of small hydroelectric plants in sensitive torrent stretches. The approval of the Austrian Service for Torrent and Avalanche Control must be obtained in such cases, the effects that such constructions may have from the perspective of torrent processes and management are elucidated and, if necessary, constraints are defined with the aim of preventing a deterioration of the existing flood water protection. This contribution contains a possible procedure (methods of calculation) for such an assessment.

Keywords:

Bed-load transport, hydropower utilisation, expert opinion

Einleitung

Durch die erhöhte Nachfrage der Kleinwasserkraftwerksbauten ist der Sachverständige der Wildbach- und Lawinenverbauung vermehrt mit der Beurteilung der Auswirkungen von Wehranlagen, Ausleitungsstrecken und Krafthausstandorten in Wildbacheinzugsgebieten befasst. Kleinwasserkraftwerke sind in der Regel sogenannte Ausleitungs-kraftwerke, wobei mittels Einlaufbauwerk (meist in Form eines Tirolerwehrs oder Klappenwehrs) das Wasser in einer Rohrleitung über eine Ausleitungsstrecke der Turbine im Krafthaus zugefügt wird.

Fakten

Der Betrieb eines Kleinwasserkraftwerkes mit Ausleitungsstrecke führt einerseits mit dem Querbauwerk zu einer Beeinflussung des natürlichen Wildbachregimes und andererseits durch die Ausleitung des Nutzwassers in der gesamten Ausleitungsstrecke zu einer Verminderung des jährlichen Gesamtabflusses. Aus ökologischen Gründen ist eine Restwassermenge entweder als fixer Wert

oder dynamisch mit 20% des Abflusses in der Regel eine Dauervorschreibung. Aus wildbachtechnischer Sicht sind im Zuge der Errichtung einerseits die Standorte des Einlaufbauwerkes sowie des Krafthauses und andererseits die Druckrohrleitung im Bereich der Ausleitungsstrecke relevant. In diesem Fall ist der Sachverständige gefordert, sämtliche Auflagen für den Bau und den Betrieb der Anlage aus wildbachtechnischer Sicht zu definieren.

Schwierig ist die Beurteilung hinsichtlich der Auswirkungen des Wasserentzugs auf den Geschiebehaushalt und mögliche langfristige Auswirkungen auf das gesamte Bachregime bis zum Vorfluter. Wird eine Ausleitungsstrecke in einem besonders sensiblen Bachabschnitt (Siedlungsgebiete, wichtige Verkehrsverbindungen, ...) geplant, so ist der Sachverständige besonders gefordert, sämtliche, die Hochwassersicherheit betreffenden Auswirkungen des Kraftwerksbaus und -betriebes aufzuzeigen und gegebenenfalls Auflagen zur Hintanhaltung einer Verschlechterung des Hochwasserschutzes festzulegen.

Die Auswirkung des Wasserentzugs kann – über längere Zeiträume gesehen – auch eine Gesamtänderung des Systemzustandes her-

vorrufen. Ein geringeres Mittelwasser [MHQ] im Sommer führt zu mehr Vegetation im Gerinne und damit zu einer Rauigkeitserhöhung, mehr Sedimentation und einer Verfestigung der Sohle (Stabilisierung der Sedimente). Diese Stabilisierung führt zu einer geringeren Morphodynamik und zu hydromorphologischen Konsequenzen und kann bei großen und extremen Abflüssen eine Veränderung des Geschiebetransportverhaltens hervorrufen (Habersack, 2009).

Notwendige Unterlagen und Nachweise des Einschreiters

Zur Beurteilung der Auswirkungen eines Kleinwasserkraftwerkes sind sehr viele Grundlagendaten notwendig, die vom Einschreiter im Einreichplan vorzulegen sind. Viele Daten wie Geländemorphologie (Längenschnitt, Lagepläne, Querprofile) sowie die Darstellung möglicher Naturgefahrenprozesse (Rutschungen, seitliche Geschiebeeinträge bzw. Murgänge durch Zubringer, ...), Abflussmengen (jährliche Abflussganglinie, MHQ, HQ150, ...) sowie Angaben zum Kraftwerkstyp sind meistens im Technischen Bericht enthalten.

Liegt die Ausleitungsstrecke in einem sensiblen Wildbachabschnitt, in dem keine Verschlechterung infolge Anlandungen oder über längere Zeit sogar unterhalb der Ausleitungsstrecke infolge fehlendem Geschiebe eine Eintiefung der Sohle eintreten darf, sind Nachweise mit einer Beurteilung des Geschiebetransportes zu erbringen. Für eine derartige Beurteilung hat sich der Grundansatz aus der ETAlp-Studie 2004 bewährt und wurde für die geschieberelevanten Fragestellungen im Zusammenhang mit Ausleitungsstrecken modifiziert. Als Ergebnis hat sich der sogenannte „ingenieurmäßige profilweise Ansatz“ entwickelt, der Aussagen über die Geschiebetransportkapazitäten je Querprofil sowie mithilfe einer Jahresganglinie bzw. monatlichen Abflüssen

auch Aussagen über eine Jahresgeschiebetransportganglinie ermöglicht.

Beurteilung der wildbachtechnischen Auswirkungen einer Ausleitungsstrecke

Zur Beurteilung der wildbachtechnischen Auswirkungen sind zuerst einige allgemeine Grundsatzfeststellungen zu treffen:

1. Welcher Bachcharakter kann unterstellt werden? Gibt es im Oberlauf ausreichend Geschiebeherde? Können solche Einträge über eine intakte Deckschicht auch schon bei kleineren Abflussmengen abtransportiert werden?
2. Kann es durch die Verringerung der sommerlichen Mittelwasserführung $[HQ_{\text{SOMMER}} - Q_{\text{Nutzung}}]$ zu einer anderen Vegetationsentwicklung und einer Verfestigung der Sohle sowie langfristig einer erhöhten Rauigkeit (Vegetationsentwicklung) kommen? Ist es möglich, dass es im Hochwasserfall (bordvoller Abfluss) zu einer Änderung des Sediment-/Geschiebetransportverhaltens kommt?
3. Gibt es Einstöße von geschiebe- und murfähigen Zubringern in der Ausleitungsstrecke? Durch die Reduzierung der Abflussmenge in der Ausleitungsstrecke können unter Umständen diese Einträge nunmehr bedingt abtransportiert werden und führen langfristig zu einer Reduzierung des Abflussquerschnittes.

Im Falle ausreichender Geschiebeherde bzw. auch von maßgeblichen Einstößen aus den Zubringern in der Ausleitungsstrecke ist durch die Entnahme von Nutzwasser $[Q_N]$ eine Änderung der Geschiebetransportkapazität gegeben.

In diesem Fall ist zu prüfen, ob über einen Jahresgang durch die Entnahme von Nutzwasser $[Q_N]$ und durch eine Reduzierung des natürlichen

Gesamtgeschiebetriebes negative Auswirkungen auf die Hochwasserabflusskapazität zu erwarten sind.

Da diese Feststellung nicht leicht zu treffen sein wird, sind folgende Möglichkeiten der Beurteilung denkbar:

- Auflagen im Zuge der Projekterstellung:
 - Abschätzung der Geschiebetransport-(potenzial)differenz mittels Berechnung nach dem ingenieurmäßigen Ansatz
 - Naturmessungen (z. B.: mittels mobilem Geschiebefänger) zur Kalibrierung und Überprüfung der Berechnungen (Aussagen zu Bewegungsbeginn, Kornverteilungen und generellem Geschiebetransport)
- Dauerauflagen:
 - Geschiebemonitoring mit periodischer Messung (ca. alle 2 Jahre bzw. nach Hochwasserereignissen), Abschätzung der Tendenzen an charakteristischen Querprofilen (Oberlauf, Ausleitungsstrecke, Unterlauf sowie geschieberelevante Zubringer) oder terrestrischer Laserscan zur Abschätzung von Volumenbilanzen

Ingenieurmäßiger profilweiser Ansatz zur Berechnung des Geschiebetransportes mit Bewegungsbeginn

Ein mögliches Konzept zur Berechnung der Abflusskapazität, der Geschiebetransportkapazität, des Beginns des Geschiebetransportes bis zum generellen Geschiebetransport wurde in ETAlp 2004 vorgestellt, wo auch Ansätze zur Berechnung aufgelistet wurden. Am Bizauerbach/Vorarlberg erfolgten durch Jäger (2005) in enger Zusammenarbeit mit Prof. Rickenmann erste Berechnungen. Die zufriedenstellenden Ergebnisse führten in weiterer Folge zu mehreren Anwendungen im Bereich von Wild-

bachprojekten. Der in diesem Ansatz berechnete Beginn des Geschiebetransportes wurde für diverse Gutachten im Zusammenhang mit der Planung von Kleinwasserkraftwerken verwendet (Moser & Jäger, 2008). Ein Gutachten von Prof. Habersack 2009 bestätigte den gewählten Ansatz als ingenieurmäßige profilweise Methode im Wildbachbereich.

Die ingenieurmäßige profilweise Methode berechnet die Transportkapazität mit ausgewählten Geschiebetransportformeln. Der Ermittlung des Geschiebetriebes (oberes und unteres Grenzkriterium für die beginnende Mobilisierung ohne Deckschicht, von Feinmaterial und oberes Grenzkriterium für die generelle Mobilisierung des Geschiebes) kommt dabei große Bedeutung zu. Die Berechnung erfolgt quasi-stationär (gleichförmiger Abfluss, Wasserspiegellage und Sohlage sind parallel) und für einen Rechteck- oder Trapezquerschnitt.

Die für die Berechnung des Geschiebetransportes verwendeten Formeln sind grundsätzlich für den Einsatzbereich gut geeignet. Prinzipiell ist für nahezu alle im Labor abgeleiteten Geschiebetransportformeln festzustellen, dass sie unter Gleichgewichtsbedingungen und unter vollem Geschiebeinput ermittelt wurden. Das Ergebnis stellt den potenziellen Geschiebetransport dar (Habersack, 2009).

In der Realität handelt es sich bei Wildbächen in alpinen Gebieten mit hohem Waldanteil oder generell Vegetationsbedeckung um sogenannte „supply limited systems“, bei denen die Verfügbarkeit von Geschiebe bei einem bestimmten Abfluss entscheidend für den aktuellen Geschiebetransport ist. Das bedeutet nicht, dass es nicht bei extremen Hochwässern oder Mureneinstößen einen Überschuss an Material bis hin zu einem Aufstau geben kann.

Die aus Laborversuchen hergeleiteten Geschiebetransportformeln überschätzen den tatsächlichen Geschiebetransport in Wildbächen oft

erheblich (Chiari & Rickenmann, 2009). Das kann einerseits durch die limitierte Geschiebeverfügbarkeit erklärt werden, andererseits durch die raue Struktur der Gerinnesohle. Ein Teil der zum Transport zur Verfügung stehenden Energie wird zur Überwindung dieser Formrauigkeit verbraucht und steht nicht mehr für den Geschiebetransport zur Verfügung. Zur Berechnung der Formverluste kann der Anteil der Kornrauigkeit an der Gesamtrauigkeit als Funktion des Gefälles und der relativen Abflusstiefe ausgedrückt werden. Zur Berücksichtigung solcher Ansätze in einer Geschiebetransportformel wird ein reduziertes Energieliniengefälle I_{red} bestimmt (Ansätze dazu finden sich in Meyer-Peter & Müller (1948), Palt (2001), Rickenmann (2006) und Chiari et al. (2010))

Die Geschiebetransportformeln haben bestimmte Gültigkeitsbereiche in Bezug auf

- Sohl- oder Energieliniengefälle
- Korngrößenverteilung
- Gewässertyp, Morphologie, Sohlformen etc.

Für die Berechnung des Transportbeginns je Querprofil gibt es eine Vielzahl von Formelansätzen. Alle Formeln berechnen den Transportbeginn q_c [$m^3/s.m$] pro Meterstreifen. Als Eingangsgrößen sind die Sohlneigung I in %, die Schwerebeschleunigung g in m/s^2 , die Dichte des Wassers $[\rho_w$ in kg/m^3] und die Dichte des Sohlmaterials $[\rho_s$ in kg/m^3] sowie je nach Formelansatz die charakteristische Korngröße $[d_{30}, d_{50}, d_{65}, d_m]$ anzugeben.

Folgende Formelansätze sind derzeit für den Bewegungsbeginn gebräuchlich:

1. Mobilisierung von Feinmaterial

$[q_c$ pro Meterstreifen des Profils]

Palt (2001)

$$q_{c\text{ Feinmaterial}[m^3/s.m]} = 0,039 * I^{-1,16} * \sqrt{g * \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) * d_{65}^3} \quad \text{Gl. (1)}$$

2. Mobilisierung untere Grenze $[q_c$ pro Meterstreifen des Profils]

Bathurst (1987)

Gl. (2)

$$q_{c\text{ min}[m^3/s.m]} = 0,15 * I^{-1,12} * \sqrt{g * d_{50}^3}$$

Rickenmann (1990) modifiziert von

Bathurst (1987)

Gl. (3)

$$q_{c\text{ min}[m^3/s.m]} = 0,065 * \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)^{1,67} * g^{0,5} * d_{50}^{1,5} * I^{-1,12}$$

3. Mobilisierung der Deckschicht

Palt (2001)

Gl. (4)

$$q_{c\text{ max}[m^3/s.m]} = 0,093 * I^{-1,25} * \sqrt{g * \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) * d_{65}^3}$$

Whittaker/Jäggi (1986)

Gl. (5)

$$q_{c\text{ max}[m^3/s.m]} = 0,143 * \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)^{1,67} * g^{0,5} * d_{90}^{1,5} * I^{-1,16}$$

Berücksichtigung des Einflusses der Formrauigkeit auf den Geschiebetransport (Formverluste):

1. Ansatz nach Meyer-Peter & Müller (1949)

$$I_{red} = I_E \left[\frac{k_{ST}}{k_R} \right]^a \quad \text{Gl. (6)}$$

I_{red} Kornreibungsgefälle, I_E Energielinienneigung, k_{ST} Strickler Beiwert, k_R Strickler Beiwert auf das Korn bezogen ($k_R = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}}$), d_{90} in [m], Exponent a mit 1,5)

2. Rickenmann (2006), Chiari et al. (2010) gehen davon aus, dass plausible Werte für a im Bereich von $1 \leq a \leq 2$ liegen. Der variable Exponent a kann somit in einem gewissen Sinne als Kalibrierungsparameter zur Anpassung an verschiedene Sohlformen betrachtet werden

$$\frac{k_{ST}}{k_R} = 0,092 * I^{-0,35} * \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{0,33} \quad \text{Gl. (7)}$$

oder

$$\frac{k_{ST}}{k_R} = 0,185 * I^{-0,22} * \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{0,55} \quad \text{Gl. (8)}$$

Berechnung von $\frac{k_{ST}}{k_R}$ nach dem Ansatz von Palt (2001)

$$\frac{k_{ST}}{k_R} = 0,13 * I^{-0,28} * \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{0,21} \quad \text{Gl. (9)}$$

h Fließtiefe in [m], d_{90} in [m], I Sohlneigung in [%]

Geschiebetransport

Alle Formeln berechnen den Geschiebetransport q_b [$m^3/s.m$] pro Meterstreifen.

Als Eingangsgrößen werden je nach Formelansatz folgende Eingangsparameter benötigt:

- charakteristische Korngrößen $[d_{30}, d_{50}, d_{65}, d_{90}]$
- Sohlneigung I in [%]
- Schwerebeschleunigung g in m/s^2 mit 9,81]
- Dichte des Wassers $[\rho_w$ in kg/m^3]
- Dichte des Sohlmaterials $[\rho_s$ in kg/m^3]
- kritische Sohlschubspannung nach Günter (1971) $[\tau_{crit}$ N/m²]
- kritische Sohlschubspannung nach Schields Ansatz $[\tau_m^*, \tau_c^*$ N/m²]
- Grenztiefe $[h_m$ in m]
- spezifischer Abfluss $[q$ $m^3/s.m$]
- kritische spez. Abfluss $[q_c$ $m^3/s.m$]

1. Rickenmann (2001)

Gl. (11)

$$q_{b[m^3/s.m]} = 3,1 * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} * (q - q_c) * I^{1,5} * \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)^{-1,5}$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 20$ %; $(d_{90}/d_{30}) < 20$,

$$\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) = 1 - 1,29$$

2. Rickenmann (2006)

Gl. (12)

$$q_{b[m^3/s.m]} = 12,6 * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} * (q - q_c) * I^2 * \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)^{-1,6}$$

Gültigkeitsbereich: $5 < I < 20$ %;

$$(d_{90}/d_{30})^{0,2} = 1,05; \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) = 1 - 1,29$$

3. Smart & Jäggi (1983)

Gl. (13)

$$q_{b[m^3/s.m]} = \frac{4}{(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)} * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} * g * I^{1,6} * \left(1 - \frac{\theta_c * (\frac{\rho_s - \rho}{\rho}) * d_m}{h * I}\right)$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 20$ %, $(d_{90}/d_{30}) < 8,5$;

$\theta_c = 0,05$; $d_m > 0,4$ mm

4. Smart & Jäggi (1983)

Gl. (14)

$$q_{b[m^3/s.m]} = 2,5 * q * I^{0,6} * \left(I - \frac{d_m}{12,1 * h_m}\right)$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 20$ %,

$(d_{90}/d_{30}) < 10$; $\theta_c = 0,05$

5. Meyer-Peter & Müller (1949)

Gl. (15)

$$q_{b[m^3/s.m]} = 8 * (\tau_c^* * \left(\frac{k_{ST}}{k_R}\right)^{1,5} - \tau_{crit})^{1,5} * \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) * g * d_m^3}$$

Gültigkeitsbereich: $0,04 < I < 2,5$ %,

Korngrößen 0,04 bis 30 mm

6. Palt (2001)

Gl. (16)

$$q_{b[m^3/s.m]} = 10041 * (\tau_m^* * \left(\frac{k_{ST}}{k_R}\right)^{2,5} - \tau_c^*)^{1,5} * \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) * g * d_m^3}$$

$$\tau_m^* * \left(\frac{k_{ST}}{k_R}\right)^2 = < 0,22$$

Gültigkeitsbereich: $0,2 < I < 12,4$ %

$$q_{b[m^3/s.m]} = 29,57 * (\tau_m^* * \left(\frac{k_{ST}}{k_R}\right)^2)^{1,42} * \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) * g * d_m^3}$$

$$\tau_m^* * \left(\frac{k_{ST}}{k_R}\right)^2 = < 0,22$$

Gültigkeitsbereich: $5 < I < 20$ %

Konzept zur Berechnung der Geschiebebilanz in der Ausleitungsstrecke

Aufgrund der Notwendigkeit der Beurteilung der Auswirkungen einer Ausleitungsstrecke auf den Geschiebetransport eines Wildbaches wird nachfolgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Ermittlung der notwendigen Eingangsdaten je Querprofil (hydraulische und geschieberelevante Daten [Kornzusammensetzung des Grundmaterials])
2. Ermittlung der Grenzbedingungen für die Mobilisierung des Grundmaterials (Mobilisierung Deckschicht, untere Grenze und oberer Grenze)
3. Ermittlung der Feststofftransportraten für eine Jahresganglinie oder monatliche Abflüsse (Angabe einer oberen und unteren Grenze und Wahl von geeigneten Formelansätzen)
4. Ermittlung der Feststofftransportraten infolge Wasserentzug durch den Kraftwerksbetrieb
5. Vergleich der Feststofftransportraten mit und ohne Wasserentzug (Geschiebetransportpotenzialdifferenz)
6. Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich Geschiebeverfügbarkeit
7. Beurteilung von geschieberelevanten Seitenzubringern in der Ausleitungsstrecke, Abschätzung von Geschiebeeinträgen
8. Beurteilung der Transportkapazität saisonaler Hochwasserereignisse (häufige oder weniger häufige Ereignisse zur (Wieder-)Herstellung eines ausgeglichenen Jahresgeschiebehaushaltes)
9. Geschiebebilanz für die Ausleitungsstrecke (Festlegung einer oberen und unteren Grenze)

Schlussfolgerungen

Kleinkraftwerke mit Ausleitungsstrecken in wildbachtechnisch sensiblen Gewässerabschnitten von geschiebeführenden Wildbächen führen mit der Ausleitung des Nutzwassers zu einer Veränderung der natürlichen Geschiebetransportkapazität. Welche Auswirkungen diese Änderung hat, kann im Vorfeld durch einfache Berechnungen grob abgeschätzt werden.

Diese notwendigen Berechnungen im Vorfeld führen jedoch dazu, dass sich die Kraftwerksbetreiber (Einschreiter) intensiv mit dem Grundmaterial, den zu erwartenden Jahresabflussmengen (Jahresganglinien Wasser und Geschiebe) und dem Geschiebetransportbeginn sowie den Transportraten auseinandersetzen müssen. Einige Punkte, wie z. B. die Jahresganglinien, sind für die Kraftwerksbetreiber auch für die Optimierung der Anlage von Bedeutung und deshalb nicht unbedingt als Mehraufwand zu sehen.

Da der beschriebene ingenieurmäßige Ansatz mit sehr vielen Unsicherheiten hinsichtlich Eingangsdaten und Formelansätzen beinhaltet, kann eine Verbesserung mittels Naturmessungen (z. B.: mittels mobilem Geschiebefänger) zur Kalibrierung und Überprüfung der Berechnungen erreicht werden. Dazu ist jedoch eine längere Vorlaufzeit einzuplanen, sodass zumindest eine Vegetationsperiode mit verschiedenen Abflüssen erfasst wird.

Generell ist ein Geschiebemonitoring mit periodischer Messung (ca. alle 2 Jahre bzw. nach Hochwasserereignissen) zur Abschätzung der Tendenzen an charakteristischen Querprofilen (Oberlauf, Ausleitungsstrecke, Unterlauf sowie geschieberelevante Zubringer) in diesen sensiblen Bachabschnitten unbedingt zu empfehlen. Diese Maßnahme ist jedoch als sogenannte Dauervorschreibung zu sehen, sodass in periodischen Abständen auch eine Anpassung der Auflagen möglich sein soll.

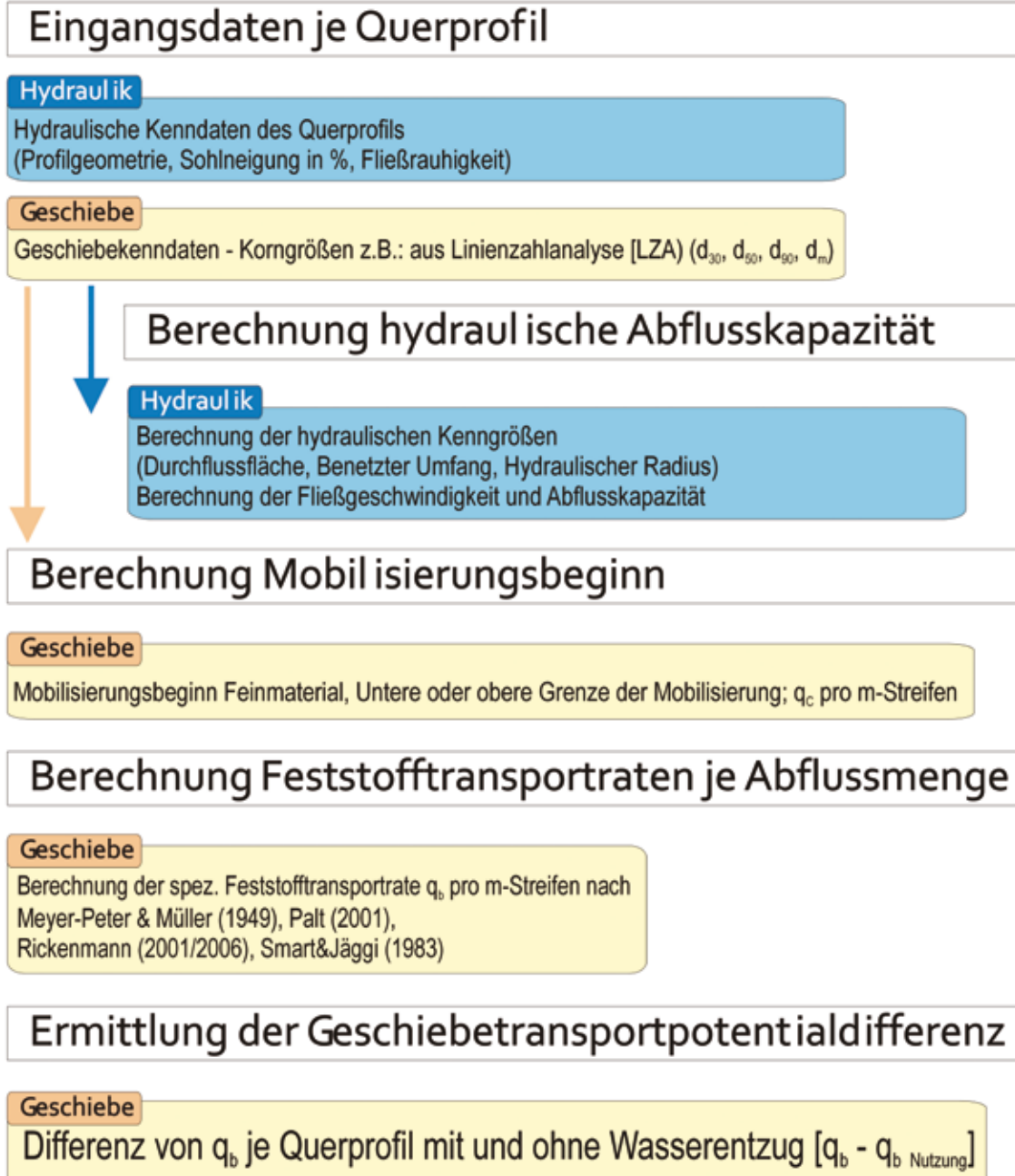


Abb. 1: Ingenieurmäßiger profilweiser Ansatz für Geschiebetransport mit Mobilisierungsbeginn

Fig. 1: Engineer profile-wise method for bed-load transport with initiation of sediment movement

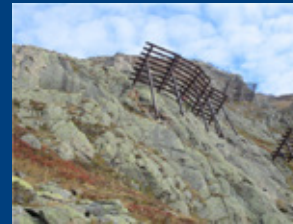
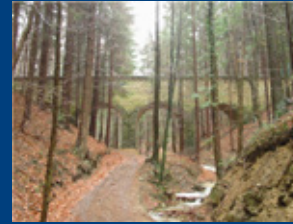
Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Markus Moser
 Fachbereich Wildbachprozesse
 Wildbach- und Lawinerverbauung
 GBL Lungau
 Johann Löcker Str. 3
 5580 Tamsweg
 markus.moser@die-wildbach.at

DI Gerald Jäger
 Fachbereich Wildbachprozesse
 Wildbach- und Lawinerverbauung
 GBL Bregenz
 Rheinstraße 32/5
 A 6900 Bregenz
 gerald.jaeger@die-wildbach.at

Literatur / References:

- BATHURST, J.C., GRAF, W.H., CAO, H.H. (1987):
 Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In: Sediment transport in gravel bed rivers, Hrsg: THORNE, C.R., BATHURST, J.C., & HEY, R.D., p. 453-477. Wiley, Chichester
- CHIARI, M., RICKENMANN, D. 2009:
 Modellierung des Geschiebetransportes mit dem Modell SETRAC für das Hochwasser im August 2005 in Schweizer Gebirgsflüssen Wasser Energie Luft – 101. Jahrgang, 2009, Heft 4, CH-5401 Baden
- CHIARI, M., FRIEDL, K., RICKENMANN, D. (2010):
 A one dimensional bedload transport model for steep slopes. Journal of Hydraulic Research, 48(2), pp. 152-160.
- RICKENMANN D., BRAUNER M. (2004):
 Ansätze zur Abschätzung des Geschiebetransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen; In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.): Kompendium für das Projekt ETALp: Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten, Geschiebetransport V2.2
- HABERSACK, H. (2009).
 Geschiebetransport in Ausleitungsstrecken, Hainersdorf Juni 2009 (unveröffentlicht)
- HABERSACK, H. et al. (2011):
 Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie; BMLFUW – ÖWAV, Wien
- JÄGER, G. (2005):
 Generelles Projekt Bizauerbach; Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung, GBL Bregenz
- KATINKA, K. (2002):
 Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen; Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2002
- MEYER-PETER, E. & MÜLLER, R. (1949):
 Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs, Schweizerische Bauzeitung, Jhg. 67, p. 29-32
- MOSER M., JÄGER G. (2008):
 Abschätzung des Geschiebetriebs in der Ausleitungsstrecke von Kraftwerk-Anlagen; Anwendung der ETALp-Studie 2004 am Beispiel Uslau/Handlgraben/Gde. Maria Alm; Wildbach- und Lawinerverbau, 72. Jhg., Heft Nr. 158
- PALT, S. M. (2001):
 Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen; Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2001
- RICKENMANN, D., 2001:
 Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. Water Resources Research, 37(12), p. 3295-3305.
- RICKENMANN, D., CHIARI, M., FRIEDL, K. (2006):
 SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In: FERREIRA R., ALVES E., LEAL J., CARDOSO A. (eds), River Flow 2006, Taylor & Francis, London, p. 843-852.
- SMART, G. M. & JÄGGI, M. N. R. (1983):
 Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 64, p. 9-188.
- STRICKLER, A. (1923):
 Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen; Mitteilungen Nr. 16 des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern
- WHITTAKER, J.G & JÄGGI, M. (1986):
 Blockschwellen, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 91

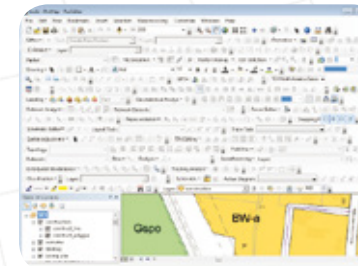


CORE3 **ms.gis**
 TECHNOLOGY

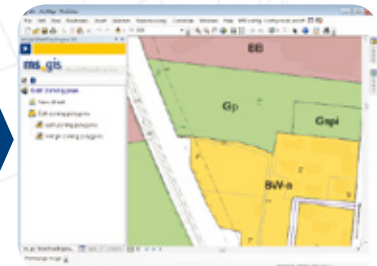
informationssysteme
 gesellschaft m.b.h.

APPLICATION ENGINE **neu**

Mit der ms.GIS Application Engine Extension machen Sie aus Ihrem komplexen Desktop GIS (ESRI ArcMap) eine einfache, prozessorientierte Anwendung entsprechend den Anforderungen Ihres Fachgebietes.



ArcMap - für GIS Experten



ms.GIS.AE - für Fachanwender



GIS Dienstleistungen:

Enterprise GIS Lösungen

Consulting

Projektmanagement

Software Design

Software Entwicklung

Daten Management

ms.GIS informationssysteme
 gesellschaft m.b.h.

bahnhofplatz 1a, 2340 mödling, austria
 t +43.2236.45501.0 f +43.2236.45501.555



www.msgis.com
 msgis@msgis.com



DANIEL KURZ, HELMUT KULISCH

Theoretische Bemessung und Optimierung eines Entnahmebauwerks mit hydraulischen Modellversuchen

Theoretical Design and Optimization of a Discharge Extraction Measure Based on Hydraulic Model Experiments

Zusammenfassung:

Für die Umsetzung von Schutzmaßnahmen in der Gemeinde Lermoos (Tirol), die bei den Pfingsthochwässern 1999 schwer betroffen war, wurde auf Basis eines Flussgebietsmodells ein Schutzkonzept ausgearbeitet, das umfangreiche Retentionsmaßnahmen mit einem Entnahmebauwerk in Form eines Tiroler Wehrs im größten Teileinzugsgebiet und Überleitung in ein Retentionsbecken vorsieht. Da die hydraulische Dimensionierung dieses Schlüsselbauwerks, das neben der Ableitung der Retentionswassermenge auch eine Restwasserdotations vorsieht, analytisch nicht einwandfrei bewerkstelligt werden konnte, wurde ein Modellversuch im Maßstab 1:12 im Labor durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die vorgesehene Aufteilung der Abflüsse nicht zur Gänze erreicht werden kann. Durch mehrere geringfügige Verbesserungen konnte das Bauwerk jedoch so weit optimiert werden, dass die gewünschte Aufteilung der Abflüsse bewerkstelligt werden kann.

Stichwörter:

Lussbach, hydraulischer Modellversuch, Entnahmebauwerk, Tiroler Wehr

Abstract:

For the implementation of protection measures in the community of Lermoos (Tyrol), which was strongly affected by the 1999 flood, a protection concept based on a river basin model was developed. This concept includes a wide range of retention measures with a discharge extracting measure in form of a "Tyrol Weir" in the major subbasin and diversion into a flood retention basin. As the hydraulic design of this important measure, which supplies residual water besides the diversion, could not be analytically solved in a totally sound way. Thus the measure was tested in a hydraulic model experiment in a scale of 1:12. In this experiment it was shown that the intended diversion of discharge could not be attained. By means of several marginal improvements the design of the measure was optimized until attaining the projected extraction and diversion of discharge.

Keywords:

Lussbach, hydraulic model experiment, discharge extraction measure, Tyrol Weir

Einleitung

Im Jahr 1999 war das gesamte Außerfern (Tirol) von den „Pfingsthochwässern“ von 20. – 23. Mai stark betroffen. Eine der hauptbetroffenen Gemeinden war die Gemeinde Lermoos. Hier verursachte der Lussbach, der in einem gemauerten Trapezgerinne durch den Siedlungsbereich fließt, massive Schäden. In einer Schätzung der Landesschadenskommission wurde der damalige Schaden in der Gemeinde auf eine Höhe von ca. 1,2 Millionen Euro geschätzt.

Ursache für die Vermurung und Überschwemmung des Siedlungsbereiches war vorwiegend die Auflandung von Geschiebe im Ortsgerinne und damit die Verringerung der Durchflusskapazität, sodass ein großer Teil des Abflusses über das Vorland stattfand. Das bestehende Gerinne war jedoch auch insgesamt für die abfließenden Wassermassen unterdimensioniert, sodass auch ohne Auflandungen Überbordungen stattgefunden hätten, wenngleich die Schäden in diesem Fall geringer ausgefallen wären.

Aufgrund der massiven Schäden wurde von der Wildbach- und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Außerfern ein umfassendes Generelles Projekt ausgearbeitet, das ein Maßnahmenkonzept in der Größenordnung von 13 Millionen Euro vorsieht. Dieses Konzept sieht in erster Linie die Bindung des Geschiebes in den verschiedenen Teileinzugsgebieten vor bzw. einen Geschieberückhalt vor Beginn des Ortsgerinnes um die Auflandungsproblematik, wie sie 1999 aufgetreten ist, zu unterbinden. Da die Ortskünette jedoch auch für ein Bemessungshochwasser unterdimensioniert ist, sah das Generelle Projekt einen Ausbau des Ortsgerinnes vor. Im Zuge der Detailprojektierung, die einen kompletten Neubau des Ortsgerinnes mit einer Tieferlegung des Gerinnes in dicht besiedeltem Gebiet vorsah, zeigte sich jedoch, dass ein Neubau vor allem vom Bauablauf, den Sicherungsarbeiten im Siedlungsgebiet, dem Verlegen von verschiedensten Versorgungsleitungen sowie aus ökologischen Gründen schwer umsetzbar und kostenintensiv gewesen wäre. Aus diesem Grund wurde nach

Alternativen zum vorgesehenen Ausbau der Ortsregulierung gesucht.

Dabei wurde nun nach einer Lösung gesucht, bei der man vom möglichen Ausbaugrad des Ortsgerinnes ausging. Hier wurde ein Ausbau auf 50 m³/s mit einer einfachen Gerinneerhöhung ohne Neubau des gesamten Ortsgerinnes als möglich erachtet. Damit musste jener Anteil des Hochwasserabflusses über 50m³/s im Einzugsgebiet zurückgehalten werden. Aufgrund der Größe des Einzugsgebietes (19,6 km²) und den zahlreichen Teileinzugsgebieten musste zuerst ein hydrologisches Modell des Einzugsgebietes erstellt werden, um eine Retentionsberechnung überhaupt durchführen zu können.

In diesem Beitrag werden die Erstellung des Flussgebietsmodells, das die Basis für die Retentionsberechnungen darstellt, die darauf aufbauende hydraulische Dimensionierung der Maßnahmen und die Gründe für die Entscheidung, einen Modellversuch im Wasserbaulabor durchzuführen, erläutert. Anschließend werden der Modellversuch, die Erkenntnisse daraus und die daraus abgeleiteten Änderungen am geplanten Bauwerk beschrieben.

Hydrologische Berechnung des Einzugsgebietes

Am Beginn der Arbeiten stand für den Lussbach nur ein Bemessungsabfluss HQ₁₅₀ von 80 m³/s, der im Zuge des Generellen Projekts ermittelt wurde, zur Verfügung. Für die Retentionsberechnungen musste jedoch eine Ganglinie generiert werden. Aufgrund der großen Anzahl an Teileinzugsgebieten und der komplexen Fragestellung im Zuge der Retentionsberechnung (zwei hintereinandergeschaltete Becken, Überleitung aus einem Teileinzugsgebiet mit Restwasserdotation, Einmündung unretendierter Zuflüsse zwischen Retentionsbecken und Beginn des Ortsgerinnes) musste ein de-

tailliertes Flussgebietsmodell erstellt werden. Für die Erstellung des Flussgebietsmodells wurde die Software HEC-HMS 3.5 gewählt. Als hydrologisches Verfahren wurde das SCS-Verfahren gewählt und jedes Teileinzugsgebiet mit den Einheitskurven nach der SCS-Anleitung belegt.

Um den für das Generelle Projekt ermittelten Abflusswert zu überprüfen und die Werte aus dem Flussgebietsmodell vergleichen zu können, wurde das gesamte Einzugsgebiet bis zum Ortsgerinne zusätzlich mittels ZEMOKOST unter Verwendung der Landnutzungsdaten nach SEGER (2001) berechnet. In beiden Modellen wurden dieselben Teileinzugsgebiete herangezogen.

Am Lussbach liegt ein großer Vorteil darin, dass gemessene Niederschläge aus umliegenden Stationen mit verhältnismäßig gut rückgerechneten Ereignissen aus der Geometrie des Ortsgerinnes und bekannten bordvollen Abflüssen für die Jahre 1999, 2002 und 2005 vorhanden sind und daher das Flussgebietsmodell über die Anpassung der CN-Werte geeicht werden konnte.

Mit den beiden Modellen konnten in der Folge verschiedene Abflussszenarien mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und verschiedenen Niederschlagsszenarien berechnet werden. Für einen HQ₁₀₀-Abfluss, als maßgebliche Bemessungsgröße, ergaben sich aus beiden Modellen Werte zwischen 70 – 80 m³/s. Mit dem geeichten und mit einem zweiten Modell abgesicherten Flussgebietsmodell konnten nun die Retentionsberechnungen durchgeführt werden.

Retentionsberechnungen

Bei den Retentionsberechnungen stellte sich heraus, dass der einzige Retentionsstandort, der eine Reduktion des Spitzenabflusses um 30 m³/s gewährleistet, ein Standort oberhalb der Gemeinde Lermoos ist, der jedoch aufgrund der

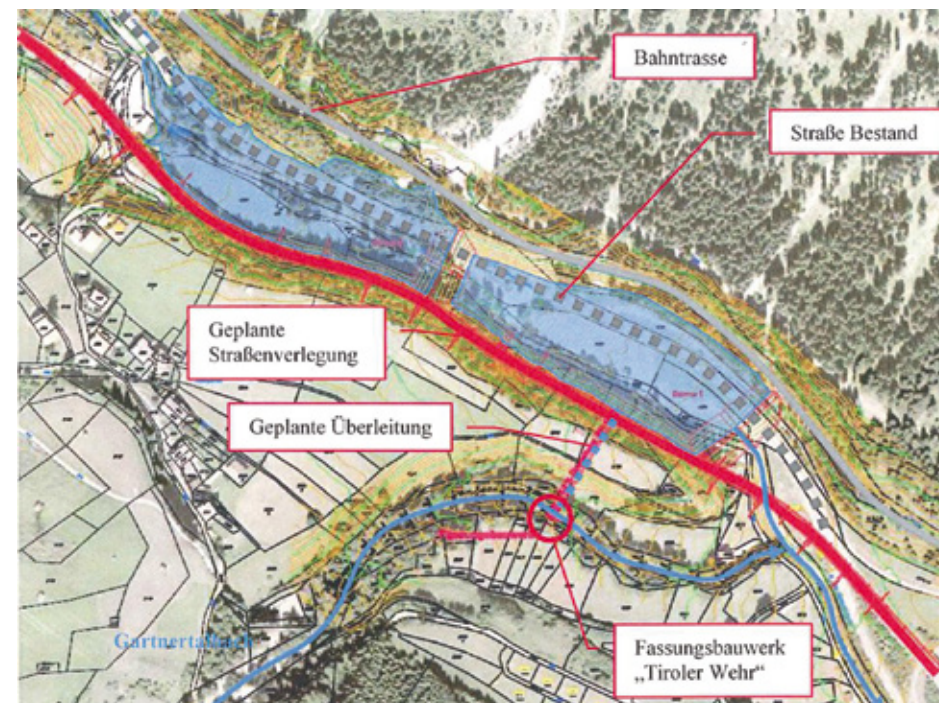


Abb. 1: Übersicht über die geplanten Maßnahmen im Bereich der Einmündung des Gartneralbaches in den Lussbach.

Fig. 1: Overview of planned measures at the junction of Gartneralbach and Lussbach.

Lage der beiden einzigen Verkehrsachsen (B 179 Fernpasstraße und Mittenwaldbahn) vom Zentralraum Tirols ins Außerfern genau in diesem Bereich in seiner Ausdehnung und Höhe begrenzt ist bzw. bereits eine Verlegung der B 179 erfordert. Trotz dieser Einschränkungen war es möglich, mit zwei hintereinander geschalteten Rückhaltebecken ein Retentionsvolumen von ca. 350.000 m³ zu erreichen.

Es galt jedoch ein weiteres Problem für die Umsetzung der Retentionsvariante zu lösen. Unterhalb des Retentionsstandortes mündet rechtsufrig der Gartneralbach ein, dessen Teileinzugsgebiet mit einer Fläche von 5,38 km² mehr als ein Viertel des gesamten Einzugsgebietes ausmacht. Dementsprechend trägt der Gartneralbach auch mit ca. 25 m³/s zum HQ₁₀₀ des Lussbaches bei. Es musste daher eine Möglichkeit gefunden werden, einen Großteil des Abflusses beim Bemessungsereignis in den Retentionsraum abzuführen. Dies soll mit einem entsprechenden

Einlaufbauwerk und einer anschließenden Rohrleitung, die direkt durch einen Moränenrücken in den Rückhalteraum vorgepresst werden soll, erreicht werden. Diese Rohrleitung soll im Retentionsbecken über der Wasserspiegellage des Bemessungshochwassers einmünden und als Freispiegelleitung ausgeführt werden, um sich Bauwerke zur Druckreduktion zu ersparen.

All diese Randbedingungen, wie die Höhen der Bahn und der Straße und damit die begrenzte Höhe des Wasserspiegels im Bemessungsfall auf der einen Seite und die Erfüllung der Bedingung einer Freispiegelleitung, die bei gegebenen Werten von Neigung und Durchflussquerschnitt den abzuleitenden Durchfluss bewältigen kann, auf der anderen Seite, führen zu einem ganz engen Korridor im Gerinne des Gartneralbaches, in dem die Ableitung möglich ist. Aufgrund der sich daraus ergebenden Lage im Gerinne muss die Ableitung im rechten Winkel zur Bachachse erfolgen (Abbildung 1).

Das Entnahmebauwerk im Gartnertalbach, das als absolutes Schlüsselbauwerk zu bezeichnen ist, muss daher folgende Kriterien erfüllen:

- Entnahme von 16 m³/s aus dem Gerinne des Gartnertalbaches im Bemessungsfall
- rechtwinkelige Ableitung
- Sicherstellung einer Restwassermenge von 5 m³/s
- Bestandsicherheit des Bauwerks und des Gerinnes bei einem HQ₁₅₀ im Gartnertalbach

Konzeption des Bauwerks

Um diese 4 Bedingungen erfüllen zu können, wurde ein Bauwerk konstruiert, das dem Prinzip

eines „Tiroler Wehrs“ folgt, jedoch zwei Entnahmestellen, eine für die Restwassermenge und eine für die ins Retentionsbecken abzuleitende Wassermenge, aufweist und daher als „doppeltes Tiroler Wehr“ bezeichnet werden kann. Situiert wird das Bauwerk unmittelbar unterhalb an eine Konsolidierungssperre anschließend, sodass die Überfallsektion der Sperre auch gleichzeitig die erste Wehrschwelle darstellt (Abbildung 2).

Bei Abflüssen im Gerinne bis 5 m³/s fällt das Wasser über die erste Schwelle in den Wehrkanal und wird seitlich durch eine Öffnung, die den Abfluss auf 5 m³/s begrenzt, abgeführt (Fall A). Das Restwasser wird dann weiter seitlich in einem Rechteckkanal bis zum Ende des Bauwerks geführt und unmittelbar unterhalb des Tiroler

Wehrs wieder ins Gerinne eingeleitet (im Modell als Bypass bezeichnet). Übersteigt der Abfluss im Gerinne 5 m³/s, ist das erste Wehr überlastet und das zweite deutlich größere Wehr springt an, in dem bis zu 16 m³/s über eine Rohrleitung in den geplanten Retentionsraum abgeführt werden (Fall B, im Modell als Entlastung bezeichnet). Steigt der Abfluss weiter an, so tritt der Überlastfall ein und das Wehr wird von jenem Anteil des Abflusses, der über 21 m³/s beträgt, überströmt (Fall C) (siehe Abbildung 2). Im Gartnertalbach liegt der HQ₁₅₀ bei etwa 30 m³/s, sodass in diesem Fall 9 m³/s das Bauwerk vollständig überströmen.

Hydraulische Bemessung des Tiroler Wehrs

Bei der Bemessung des Bauwerks sind folgende Bauteile bzw. Öffnungen zu definieren:

- Neigung und Länge der beiden Schrägwehren, damit die vorgesehene Wassermenge eingezogen werden kann.
- Tiefe und Abmessung des Wehrkanals, damit die Wassermenge eingezogen und abgeleitet werden kann.
- Größe der seitlichen Kontrollöffnungen, um die Restwassermenge bzw. die in den Retentionsraum übergeleitete Wassermenge auf die vorgegebenen Werte begrenzen zu können.
- Abmessungen des seitlichen Rechteckkanals für die Dotation des Restwassers.

die Anfangswasserhöhe am Beginn des Rechens errechnet werden. Wird nun näherungsweise angenommen, dass der Wasserspiegellinienverlauf einer elliptischen Form folgt, so entspricht die Anfangswasserhöhe der kurzen Halbachse einer Ellipse und die Rechenlänge der langen Halbachse (Abbildung 3a). Mit dieser Näherung kann die erforderliche Rechenlänge bestimmt werden, wobei noch ein Beiwert für die Form der Rechenstäbe und das Verhältnis von gesamter Rechenfläche zur Durchflussfläche berücksichtigt wird.

Als problematisch zeigt sich in diesem Fall die Annahme der Grenzwassertiefe an der oberen Wehrschwelle. Im Bereich der Energiewirtschaft ist es üblich, oberhalb der Schwelle ein Vorbecken vorzusehen, sodass hier die Annahme der Grenzwassertiefe zumeist zutrifft. Im vorliegenden Fall jedoch ist das Bauwerk direkt im Wildbachgerinne ohne Vorbecken situiert, sodass die Annahme der Grenzwassertiefe hier nicht mehr ganz zutreffend ist, da im Gerinne durchwegs schießender Abfluss herrscht und daher an der Wehrschwelle kein Fließwechsel auftritt. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, wurde die gewählte Rechenlänge mit der 1,5-fachen berechneten Rechenlänge gewählt. Diese Sicherheit wurde auch aufgrund des Geschiebetriebes in Wildbachgerinnen angesetzt, der ebenfalls eine Verlängerung der berechneten Rechenlänge bedingt, da ja die theoretische Berechnung von Reinwasserabflüssen ausgeht. Da sich ca. 200 m oberhalb ein Geschieberückhaltebecken befindet, wurde die 1,5-fache Länge als ausreichend erachtet.

Als weitere Bemessungsgröße wurde die Höhe der unteren Wehrschwelle berechnet, die für die Menge der eingezogenen Wassermenge entscheidend ist, sofern der Rechen ausreichend dimensioniert ist. Auch hier wird wieder an der oberen Wehrschwelle die Grenztiefe angenommen und als minimale Energiehöhe in der Bernoulli-Gleichung angesetzt, wobei der Verlauf der

Die Bemessung der Rechenlänge folgt den Ansätzen von FRANK (1956) in DROBIR (1981). Dabei wird angenommen, dass sich an der oberwasserseitigen Wehrschwelle die Grenzwassertiefe einstellt. Aus der Rechenbreite und der vorgesehenen Einzugswassermenge kann diese Grenztiefe berechnet werden. Aus der Grenztiefe und einem von der Rechenneigung abhängigen Beiwert kann

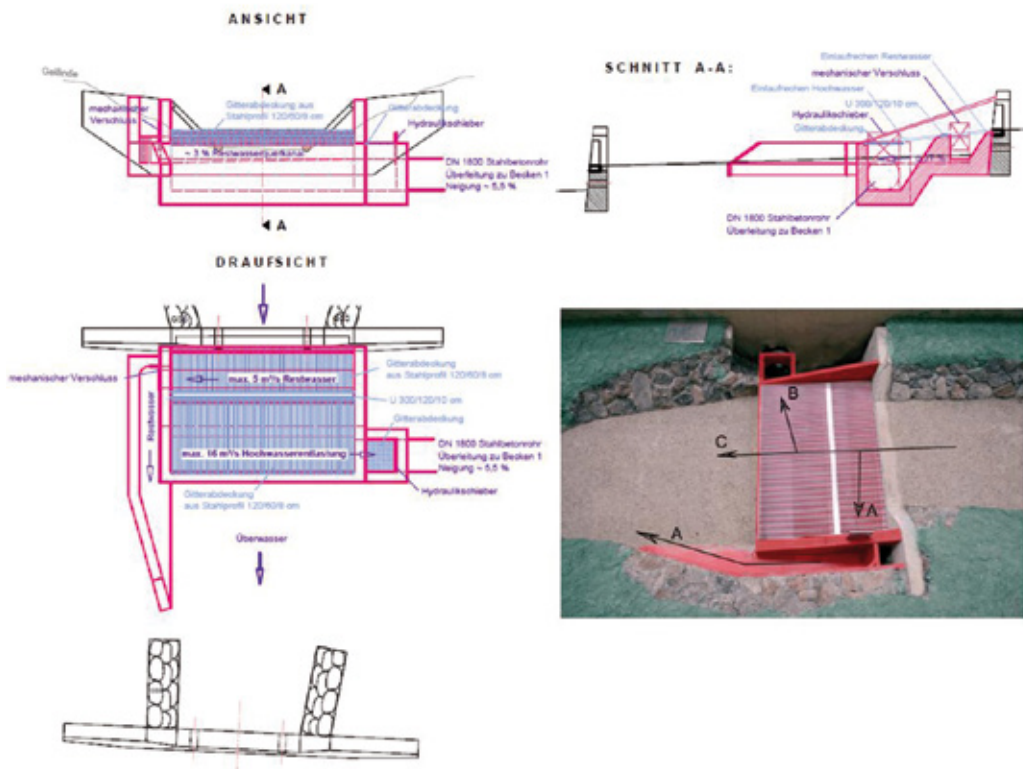


Abb. 2: Detailplanung des Tiroler Wehrs vor dem Modellversuch und das Ausleitungsbauwerk im Modell. Fließweg A: Restwasserdotation bis 5 m³/s, Fließweg B: Ausleitung von 16 m³/s, Fließweg C: Überwasser.
 Fig. 2: The discharge extraction measure as a model; flow path A: residual flow up to 5 m³/s, flow path B: discharge flume up to 16 m³/s, flow path C: surplus water.

Höhe der Energielinie so angenommen wird, dass dieser kurvenförmig abnimmt und die Oberkante der unteren Wehrschwelle am Ende des Rechens schneidet. Weiterhin wird aus der Stärke des Wasserstrahls an der Wehrkanalsole und der Höhe der Wehrschwelle eine Beziehungsgleichung über den Impulssatz hergestellt und auch so die erforderliche Höhe der Wehrschwelle berechnet (Abbildung 3b).

Auch bei der hydraulischen Bemessung der Wehrkanaltiefe ergibt sich wiederum aufgrund der Annahme der Grenztiefe an der oberen Wehrschwelle eine gewisse Unsicherheit. Aus diesem Grund muss auch hier eine gewisse Überdimensionierung vorgenommen werden, um auch sicher gehen zu können, dass die vorgesehene Einzugswassermenge auch tatsächlich durch die Wehrschwelle zurückgehalten wird. Im Gegenzug kann es durch die Überdimensionierung sowohl der Rechenlänge als auch der unteren Wehrschwelle dazu kommen, dass zu viel Wasser eingezogen wird. Aus diesem Grund müssen die Auslässe mit Kontrollöffnungen versehen werden, die den Durchfluss auf die gewünschten Wassermengen begrenzen. Auch diese Öffnungen müssen hydraulisch bemessen werden.

Die Öffnung für die Restwasserdotati-

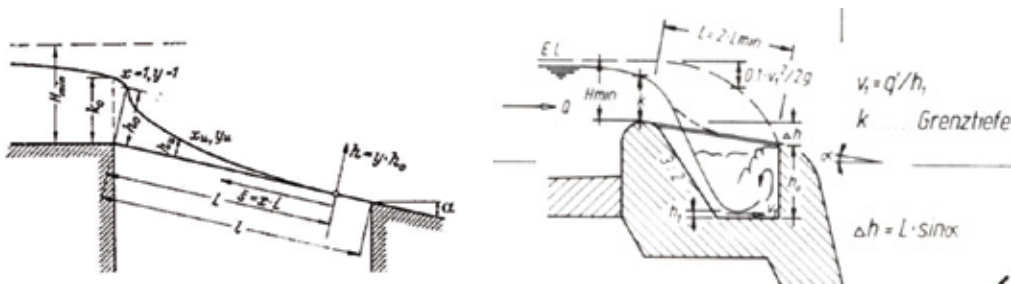


Abb. 3a, b: Bei der Bemessung der Rechenlänge wird an der Wehrschwelle die Grenztiefe k_0 angenommen und der weitere Verlauf des Wasserspiegels als Teil einer Ellipse angenommen. Bei der Bemessung der unteren Wehrschwelle wird der Verlauf der Energielinie bis zur unteren Wehrschwelle abnehmend angenommen (nach Frank (1956) und Drobir (1981)).

Fig. 3a, b: At the dimensioning of the rack the critical depth is assumed at the weir sill and the further form of the water table is assumed as a part of ellipse. At the dimensioning of the downstream weir sill the gradient of the energy line is assumed to decrease to the weir sill.

on wurde als Rechtecköffnung vorgesehen. Für die hydraulische Bemessung der Öffnung wurde ein Ausfluss unter Schütz angenommen, da auch bei der Errichtung des Bauwerks eine verstellbare Öffnung vorgesehen ist. Bei dieser Bemessung muss jedoch vorher klar sein, ob es sich um einen rückgestauten, teilweise rückgestauten oder freien Ausfluss handelt. Um diese Frage zu klären, muss die Abflusstiefe im Rechteckkanal für das Restwasser bekannt sein. Dabei stellt sich im vorliegenden Fall das Problem, dass unmittelbar nach der Kontrollöffnung der Rechteckkanal einen Knick von 90° aufweist und sich daher Rückstaueffekte mit völlig anderen Fließtiefen einstellen werden und daher nicht genau zu klären ist, welche Art des Ausflusses unter Schütz nun vorliegt.

Bei der Bemessung des Kontrollquerschnittes beim Auslass in die Rohrleitung besteht dieses Problem zwar nicht, da die Fließverhältnisse in der Rohrleitung über die Rohrhydraulik berechnet werden können, jedoch ist hier völlig unklar, wie sich die auftretenden Turbulenzen, die sich unweigerlich im Wehrkanal ergeben, auf die Einzugswassermenge auswirken.

In Summe ergeben sich sowohl bei der Ableitung in das Retentionsbecken als auch bei der Dotation der Restwassermenge derart viele

Unsicherheiten, dass die berechneten Werte zu hinterfragen sind. Außerdem müssen beim Berechnungsgang Annahmen getroffen werden, die aufgrund der Besonderheit des Bauwerks und der Lage im Wildbachgerinne nicht vollständig zutreffend sind. Aufgrund der Bedeutung des Bauwerks und der Forderung, dass die mit dem Flussgebietsmodell berechneten Werte für die Ableitung und die Restwassermenge unbedingt eingehalten werden müssen, da sonst die Wassermenge am Beginn des Ortsgerinnes zu groß würde, wurde beschlossen, das Bauwerk in einem physikalischen (hydraulischen) Modellversuch zu überprüfen um eventuell nötige Anpassungen vornehmen zu können.

Konzeption und Bau des Modells

Das physikalische Modell wurde im Labor für Hydromechanik und Wasserbau der Universität der Bundeswehr München errichtet und umfasst neben dem eigentlichen Lauf des Gartnertalbachs und seiner Sperren-Staffelung das geplante "Tiroler Wehr" mit Restwassereinlauf und Hochwasserentlastung.

Im Plan-konform gebauten Modell wurden vor und nach dem Bauwerk ausreichend lange Zu- und Ablaufstrecken (je ca. $3 \times$ Bachbreite) vorgesehen. Zudem wurde ein Teilstück der zunächst von einer Rohrleitung DN 1800 gebildeten Hochwasserentlastung realisiert. Ihre in der Natur orografisch links geplante Lage und die diesbezüglich ungünstige Situation im Labor erforderten einen seitlich gespiegelten Aufbau des Modells. Dieses wurde im Maßstab 1:12 erstellt, so dass seine Abmessungen in Länge und Breite etwa $10 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ und der Rohrleitungsdurchmesser der Entlastungsleitung 150 mm betragen. Den Modellumgriff zeigt Abbildung 4. Bachlauf und Gelände sind im Modell durch eine entsprechend versteinerte Betonschicht nachgebildet. Die Sperren wur-

den wie in der Natur mit Beton hergestellt, wozu eine entsprechend gebaute, maßstäblich reduzierte Schalung Verwendung fand. Die natürlichen Rauigkeiten des Bachbettes, seiner Böschungen und des Geländes wurden den Modellgesetzen der Hydromechanik entsprechend realisiert.

Das Modell des Tiroler Wehrs wurde separat vom Gelände mit roten PVC-Platten angefertigt, wobei die herstellungsbedingten Unge-nauigkeiten unter 1 mm liegen. Es enthält neben den funktionsfähigen Verschlüssen (Schütze) auch den maßstäblich reduzierten Rechen der beiden Einläufe. Das fertige Bauwerksmodell wurde in eine entsprechende Aussparung des Geländes eingesetzt und zu jenem hin abgedichtet.



Abb. 4: Modell des Gerinneabschnittes mit eingebautem Tiroler Wehrs.

Fig. 4: Model of the channel section with installed „Tiroler Wehr“

Schließlich wurde das Gesamtmodell über einen Zulaufkasten und ein Pipeline-Rohr DN 150 an den bestehenden Wasserkreislauf des Labors angeschlossen. Mittels eines darin eingebauten Schiebers kann es mit genau dem gewünschten Zufluss versorgt werden. Das am Modellende und über die Entlastungsleitung austretende Wasser wird zurück zum Sammelbecken des geschlossenen Wasserkreislaufs geführt.

Die Messung des Modellzuflusses erfolgt durch einen induktiven Durchflussmesser, der sich im Zulaufrohr des Modells befindet und eine Messunsicherheit von nur 0,5% des angezeigten Wertes aufweist. Dieselbe Messtechnik wurde zur Bestimmung des Volumenstroms im Entlastungsrohr verwendet. Demgegenüber wurde die Restwassermenge im Bypass des Bauwerks gemessen. Einerseits wurde dazu die dort maßgebliche messtechnisch bestimmte Q-h-Beziehung verwendet. Ergänzend wurde der Restwasser-Abfluss aber auch über die simultan zum Wasserstand gemessenen Geschwindigkeiten erfasst. Dazu diente eine induktive, im Messquerschnitt installierte v-Sonde.

Werden die gemessenen Volumenströme im Entlastungsrohr und in der Restwasserrinne vom Modellzufluss subtrahiert, so erhält man die Überwassermenge bzw. den das Bauwerk überströmenden Abfluss. An einigen signifikanten Positionen im Modell werden die dort maßgeblichen Wasserpegel mittels fest installierter Ultraschall-Sensoren (Typ Bero; Abbildung 4, Vordergrund, Bypass und Modellzulauf) gemessen. Mit diesen berührungsfrei arbeitenden Messwertgebern wird ein Wert für die Messunsicherheit von $\pm 0,5$ mm nicht überschritten. Die Erfassung aller Messwerte erfolgt über eine im Computer installierte Messkarte, die mit kommerzieller Software gesteuert wird.

Das realisierte Messprogramm umfasst die hydraulische Simulation stationärer Strömungszustände, die durch die eingestellte

Zufluss-Wassermenge charakterisiert sind. Die Letztere wird schrittweise variiert zwischen einem Niedrigwasser-Abfluss ($2,5 \text{ m}^3/\text{s}$) und dem größtmöglichen Abfluss (Q_{max}) unter dem im Entlastungsrohr noch ein (schießender) Freispiegelabfluss vorherrscht. Messtechnisch bestimmt werden unter jedem eingestellten Zufluss die Aufteilung des Volumenstroms und die Wasserstände an den genannten Fix-Positionen.

Ergebnisse

Die nachfolgend dokumentierten Resultate wurden nicht geometrisch zurück gespiegelt, aber bereits auf die Naturgrößen umgerechnet, wobei die Modellähnlichkeit nach Froude Anwendung findet. Sie besagt, dass die Froude-Zahl an einander entsprechenden Orten und zu einander entsprechenden Zeitpunkten im Modell (Index M) und in der Natur (Index N) gleich groß ist. Also gilt:

$$Fr_M = \left(\frac{v}{\sqrt{g h}} \right)_M = \left(\frac{v}{\sqrt{g h}} \right)_N = Fr_N \quad \text{Gl. 1}$$

Aus dieser Beziehung können die Übertragungsmaßstäbe für die Messgrößen berechnet werden. Eine Zusammenstellung dazu enthält die Tabelle 1.

Maßstab	Berechnung	Wert
H	h_M / h_N	1:12
V	$v_M / v_N = (h_M / h_N)^{1/2}$	1:3,464
Q	$Q_M / Q_N = (h_M / h_N)^{3/2}$	1:498,8

Tab. 1: Umrechnung der Messgrößen auf Naturwerte
Tab. 1: Transfer of measured to natural values

Dokumentiert werden zunächst die Messergebnisse, die am Modell des geplanten Bauwerks in seinem Urzustand aufgezeichnet wurden. Sie dienen als Grundlage für die Entwicklung der unten im Text genannten Umbaumaßnahmen zur Verbesserung der Entlastung.

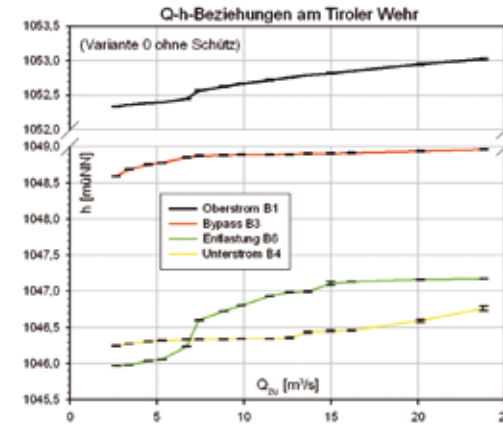


Abb. 5: Q-h-Beziehungen, für Bauwerksvariante 0

Fig. 5: Q-h-Relation, for Version 0 of the construction

Die Wasserstände, die sich unter den simulierten Abflüssen einstellen, werden durch die gemessenen Q-h-Beziehungen quantifiziert. Diese sind abhängig vom Ort und von der untersuchten Bauwerksvariante. Umgerechnet auf die Naturwerte zeigt das Diagramm in der Abbildung 5 die für den Ausgangszustand (Variante 0) des Bauwerks maßgeblichen Zusammenhänge an den fest installierten Wasserstands-Messstellen.

Wichtige aus dem Diagramm der Abbildung 5 ablesbare Charakteristika sind:

- die im Bypass und im Entlastungsrohr bei hohen Zuflüssen fast konstanten Wasserstände
- die gleichzeitig vor und nach dem Tiroler Wehr mit dem Zufluss stetig zunehmenden Pegel, wobei die diesbezüglichen Gradienten nur bei hohen Zuflüssen, respektive im Bereich mit konstanter Entlastungswassermenge ungefähr gleich sind
- die erst ab einem Zufluss von etwa $4 \text{ m}^3/\text{s}$ beginnende Entlastung
- die geringe Abflusstiefen im Entlastungsrohr, die auch bei max. Entlastung nur ca. $1,2 \text{ m}$ beträgt

Die gemessene Abflussaufteilung am Tiroler Wehr im Ausgangszustand zeigt das Diagramm in Ab-

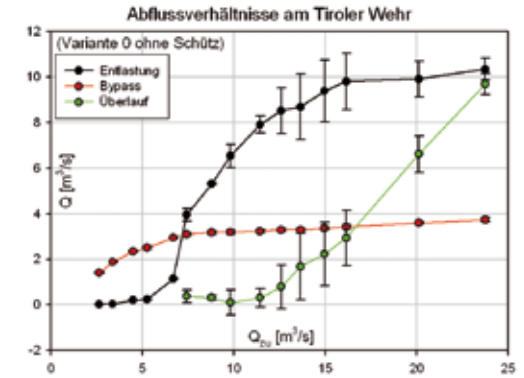


Abb. 6: Abflussaufteilung in der Bauwerksvariante 0

Fig. 6: Partition of the discharge inside version 0 of the construction

bildung 6. Dort eingetragen sind auch die aus den Einzelmessungen berechneten Standardabweichungen der Abflüsse. Demnach sind bei der Entlastungsmenge und folglich auch bei der daraus berechneten Überlaufmenge die festgestellten Standardabweichungen erheblich. Hauptursache dafür ist die große Luftmenge, die im Wehrbereich in den Wasserkörper eingetragen wird. Sie gelangt anschließend in das Entlastungsrohr und verursacht dort einen mit dem Luftaustrag pulsierenden Abfluss. Eine vollständige Vermeidung dieses störenden Einflusses war mit der gegebenen Größe und der erforderlichen Führung des Entlastungsrohres nicht möglich. Neben den Abfluss-Oszillationen zeigt das Diagramm in der Abbildung 6, dass

- die Entlastungsmenge den gewünschten Wert von $16 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht erreicht. Ihr Maximalwert beträgt nur ca. $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und stellt sich ab einem Zufluss von ca. $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ein.
- der Entlastungsbeginn bei einem Wehrzufluss von ca. $5 \text{ m}^3/\text{s}$ auftritt.
- eine Überströmung des Bauwerks bereits ab einer Zuflussmenge von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ beginnt.
- der Volumenstrom im Bypass das gewünschte Maß von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht erreicht. Auch er variiert bei hohen Zuflüssen nur wenig und beträgt zwischen 3 und $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Realisiert in mehreren Verbesserungsschritten wurde nun ein hydraulisch optimierter Endzustand des Bauwerks entwickelt, der die geforderte Entlastungs-Leistung von $16 \text{ m}^3/\text{s}$ und eine Restwasserdotations von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ erbringt. Die angestrebte Verbesserung der Wasserausleitung unter Beibehaltung des Bauwerkskonzeptes wurde durch eine Vergrößerung des Durchmessers des Entlastungsrohres von 150 mm auf 194 mm (Naturaße: 1800 mm und 2328 mm) in Verbindung mit dem Einbau von 4 Leitwänden erzielt. Gleichzeitig wurde das vertikale Fallrohr nun über zwei Rohrknien mit je 45° und ein kurzes Belüftungselement, an das Entlastungsrohr angeschlossen. Zudem wurden im Wasserabzug zur Entlastung eine etwa 75 mm lange Verziehung auf den kreisförmigen Querschnitt des Entlastungsrohres eingebaut und eine Schütztafel im Abstand von etwa 23 mm (276 mm in Natura) vor diesem Eintritts-

querschnitt montiert, die mit ihrer Unterkante nur etwa 7 mm (84 mm in Natura) unter den Rohrscheitel krägt. Die Schütztafel gewährleistet einerseits eine Be- und Entlüftung des Entlastungsrohres an dessen Beginn und verhindert andererseits ein Zuschlagen des Rohres, das in der Realität oft pulsierend auftritt. Wie erwähnt wurden in den Wasserabzug zum Entlastungsrohr auch 4 vertikale Leitwände eingesetzt, die um 45° in Stromrichtung gedreht sind und die Energieverluste, die bei der eng gestalteten Strömungsumlenkung auftreten, vermindern. In Längsrichtung erstrecken sie sich bis zum Ende der schrägen Seitenwand des Wasserabzugs (Abbildung 7). Ihr Abstand in Querrichtung beträgt 200 mm .

Den beschriebenen Maßnahmen folgten noch geometrische Verbesserungen des Wasserabzugs zur Restwasserrinne. Dieser erhielt zunächst eine Verbreiterung um 2 cm im Modell (24 cm



Abb. 7: Leitwände im Wasserabzug zum Entlastungsrohr

Fig. 7: Guide plates in the discharge channel

in Natura) indem seine vertikale Prallwand um das genannte Maß nach Unterstrom versetzt und sein Durchlass zur Restwasserrinne entsprechend erweitert wurde. In einem zweiten Schritt wurde dann die Wasserzufuhr zum Bypass-Gerinne, die über eine scharfkantig ausgeführte Ecke am Beginn der Restwasserrinne erfolgte, durch den Einbau eines großen Kurvenradius und durch Abschragung der Innenecke verbessert. Die ausgewerteten Messresultate, die am Bauwerk mit allen oben erläuterten Modifikationen aufgezeichnet wurden, sind im Folgenden zusammengefasst.

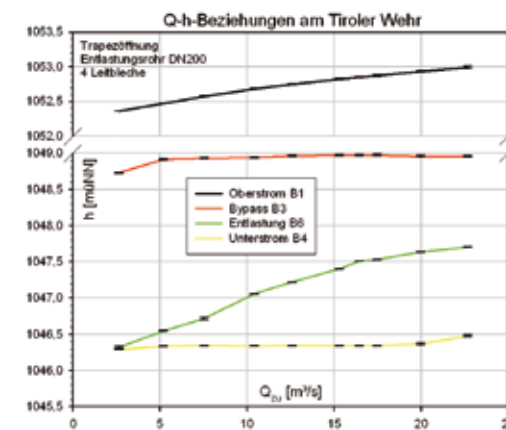


Abb. 8: Q-h-Beziehung gemessen mit optimiertem Bauwerk

Fig. 8: Q-h-Relation of the optimized version

Die Wasserstände an den Festpositionen die unter sukzessiv gesteigertem Zufluss gemessen wurden, zeigen die Q-h-Linien im Diagramm der Abbildung 8. Im direkten Vergleich mit der Abbildung 5 sind die erzielten Verbesserungen deutlich zu erkennen. So ist bis zu einem Bauwerkszufluss von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ am Unterstrom installierten Pegel B4 nun kein Anstieg mehr zu verzeichnen. Erst bei noch höheren Zuflüssen wird das Bauwerk überströmt und der Pegel B4 steigt. Beim Wasserstand im neuen Entlastungsrohr ergibt sich ein stetiger Anstieg über dem gesamten simulierten Zuflussmengenbereich. Die Entlastung erfolgt dabei auch unter der größten Zuflussmenge im Freispiegelab-

fluss, wobei schießende Strömung vorherrscht.

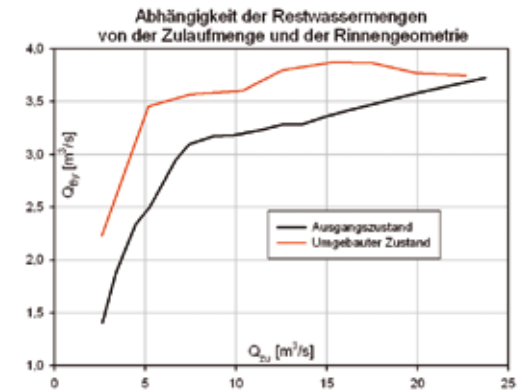


Abb. 9: Abflussaufteilung im optimierten Bauwerk

Fig. 9: Partition of the discharge inside the optimized construction

Die gemessene Abflussaufteilung, die sich im optimierten Bauwerk einstellt, zeigt das Diagramm in der Abbildung 9. Demnach wird nun die geforderte Entlastungswassermenge von $16 \text{ m}^3/\text{s}$ bereits ab einem Zufluss von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht und bei höheren Zuflüssen noch deutlich überschritten. In der Restwasserrinne (Bypass) stellt sich gleichzeitig ein nahezu konstanter Abfluss von ca. $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ein, so dass das Bauwerk bis zum genannten Zufluss von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht mehr überströmt wird.

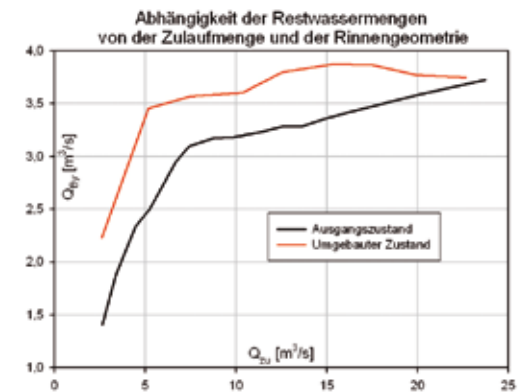


Abb. 10: Zuwachs der abführbaren Restwassermenge im optimierten Bauwerk

Fig. 10: Increase of the discharge remaining in the stream bed after the construction was optimized

Die Verbreiterung des Wasserabzugs und die Abrundung seines winkligen Anschlusses zur Restwasserrinne (Bypass-Rinne) wirken sich durch deutlich höhere Restwasserabflüsse aus. Die Zunahme ist gemäß dem dargestellten Vergleich in der Abbildung 10 abhängig vom Bauwerkszufluss und beträgt bei diesbezüglich geringen Werten bis zu 1000 l/s. Demnach verhindern die im Modell realisierten Umbaumaßnahmen insbesondere auch ein verfrühtes Anspringen der Entlastung. Der tatsächliche Entlastungsbeginn konnte aber aufgrund der relativ geringen Bauwerkszuflüsse und der dann sehr hohen Messunsicherheit nicht genau ermittelt werden. Bei höheren Bauwerkszuflüssen beträgt die infolge des Umbaus zusätzlich abgeführte Restwassermenge noch etwa 500 l/s bzw. 15%. Der Abfluss liegt dann bei etwa 4m³/s. Eine darüber hinausgehende Erhöhung des Abflusses erfordert voraussichtlich eine Verbreiterung der Restwasserrinne.

Als zusätzliches Ergebnis des Modellversuchs konnte zudem die Bestandsicherheit des Bauwerks und des Gerinnes bei Überlastfällen, die über dem Bemessungsabfluss liegen, nachgewiesen werden.

Schlussfolgerung

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass das Konzept und die Ausgestaltung des Entnahmebauwerks aufgrund der analytischen Berechnung im Wesentlichen recht gut waren. Es konnte das Bauwerk somit durch nur sehr geringe Änderungen so adaptiert werden, dass die gewünschte Aufteilung der Abflüsse genau bewerkstelligt werden kann. Es muss jedoch auch klargestellt werden, dass die Umsetzung des Bauwerks ohne Modellversuch nicht die für die Retentionswirkung nötige Aufteilung der Abflüsse gebracht hätte und daher beim Bemessungsfall das Ortsgerinne für den Abfluss nicht ausgereicht hätte. Es hätte daher das umfang-

reiche Gesamtprojekt nur aufgrund der nur teilweise zutreffenden theoretischen Ansätze für das Ausleitungsbauwerk zumindest teilweise versagt.

Es zeigt sich daher, dass in jenen Fällen, in denen die Dimensionierung von Schlüsselbauwerken mit zu vielen theoretischen Annahmen und Annäherungen verknüpft ist und die hydraulischen Verhältnisse nicht eindeutig bestimmt werden können, ein hydraulischer Modellversuch unverzichtbar ist. Die Kosten für einen Modellversuch und die daraus gewonnenen Erkenntnisse stellen dabei nur einen Bruchteil des dadurch erzielbaren Nutzens, wenn man diesen als Schadenssumme im Falle einer unzureichenden Dimensionierung und deren Folgen ansetzt, dar.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Daniel Kurz
Forsttechnischer Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Außerfern
Lechtalerstraße 21
A-6600 Lechaschau
daniel.kurz@die-wildbach.at

Dr.-Ing. Helmut Kulisch
Universität der Bundeswehr München
Labor für Hydromechanik und Wasserbau
Werner-Heisenberg-Weg 39
D-85577 Neubiberg, Bayern
helmut.kulisch@unibw.de

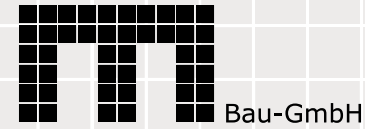
Literatur / References:

DROBIR H. (1981). Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge. Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 33, Heft 11/12: 223-253.

FRANK J. (1956). Hydraulische Untersuchungen für das Tiroler Wehr. Der Bauingenieur 31, Heft 3

SEGER L. (2001). Rauminformationssystem Österreich – ein digitaler thematischer Datensatz des Staatsgebietes, VGI: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, Jg. 89, Heft 2, S. 101 - 110

Wir bauen seit Generationen für Generationen...



Erich Moosbrugger

A-6866 Andelsbuch • Hof 364
Tel. 05512 / 23 16 • Fax: 05512 / 23 16-24
www.moosbrugger-bau.at



Gunz ZT GmbH

Ziviltechniker für Forst- und Holzwirtschaft,
Wildbach-, Lawinen- und Erosionsschutz,
allg. beid. und gerichtl. zert. Sachverständiger



4400 Steyr, Brucknerplatz 2

Tel.: 07252/42484 E-Mail: office@gunz.at Homepage: <http://www.gunz.at>

**ROHSTOFF
FÜR DIE ZUKUNFT**

Mineral Abbau GmbH
Jakoministeinbruch
Kreuth 333, 9531 Bleiberg Kreuth
Tel. +43 4244 2222



PHILIPP JÖRG, MATTHIAS GRANIG, YVES BÜHLER, PETER GAUER, HELMUT SCHREIBER

Vergleich von gemessenen und simulierten Lawinengeschwindigkeiten

Comparison of measured and simulated snow avalanche velocities

Zusammenfassung:

Mit Hilfe eines gepulsten Doppler-Radarsystems sowie videogrammetrischer Auswertung bzw. Videoanalyse wurden die Geschwindigkeiten von 3 Lawinen analysiert und mit Berechnungen der Lawinensimulationsmodelle SamosAT und Elba+ verglichen. Eine Lawine am Grimming/Multereck (Österreich) wurde von der Radar-Monitoringanlage des Landes Steiermark (entwickelt von der TU Graz) erfasst und lieferte kontinuierliche Geschwindigkeitsaufzeichnungen entlang der Lawinenbahn. Im Vallée de la Sionne (Schweiz) und in Ryggfonn (Norwegen) wurden die Frontlinien der Lawinen, anhand von Videoaufnahmen verortet und daraus die Geschwindigkeiten der Lawinen ermittelt. Bei der Analyse der Lawineneignisse waren die simulierten Geschwindigkeiten in der Sturzbahn zumeist niedriger, als die gemessenen Werte. Im Auslaufbereich der Lawinen hingegen hat sich eine bessere Übereinstimmung gezeigt. Bei den Berechnungen mit SamosAT und Elba+ wurden die aktuellen Standardeinstellungen verwendet, um die Übereinstimmung im Hinblick auf Lawinengeschwindigkeiten zu testen.

Stichwörter:

SamosAT, ELBA+, Lawinensimulation, gepulstes Doppler-Radar, Lawinengeschwindigkeiten, Geschwindigkeit

Abstract:

Velocity measurements by means of videogrammetry, video analysis and pulsed Doppler-radar of three selected snow avalanche events are analysed and compared with avalanche simulations. At the test site Vallée de la Sionne (Switzerland) and Ryggfonn (Norway) artificially triggered avalanches were filmed by video cameras to obtain the front velocity of the avalanche. At the monitoring site Grimming/Multereck (Austria) a spontaneous avalanche was measured by the radar system established by the Styrian government (developed by University of Technology of Graz), which provides valuable velocity records along the avalanche path. The analysis showed that the peak velocities of the simulations within the avalanche track were lower than observed. However, in the run out zone the measured and calculated values show good correspondence. For this study it was important to apply only the standard parameters to check the level of agreement with the practical application.

Keywords:

SamosAT, ELBA+, snow avalanche simulation, pulsed Doppler-radar, avalanche velocity

Einleitung

Die Zerstörungskraft von Lawinen leitet sich aus der Dichte und Geschwindigkeit des Fließregimes ab. Da die Strömungsdichte mit großer Unsicherheit behaftet ist, fällt der Messung der Geschwindigkeit eine besondere Bedeutung zu. Eine kurze Zusammenfassung der unterschiedlichen Messtechniken und deren Weiterentwicklung ist in Gauer et al. (2007) angeführt. Im Gegensatz zur Photo- oder Videogrammetrie funktioniert ein gepulstes Doppler-Radar auch bei Schlechtwetter (Nebel, Schneefall) sowie auch während der Nacht. Das Radarsystem sollte im Bereich des Talbodens positioniert sein, damit die Messachse möglichst in einer Linie mit der Bewegungsrichtung der Lawine liegt. Während ein gepulstes Doppler-Radar nur eine eindimensionale Geschwindigkeitsinformation entlang eines bestimmten Profils liefert, zeigt die Auswertung von Videoaufnahmen (georeferenzierte Frontlinien) auch die laterale Ausdehnung der Lawine.

Ein weiterer Vorteil ist der flexible Einsatz und die schnelle Aufstellung der Kameras an einem sicheren Ort am Gegenhang.

In den 1960er Jahren wurde High-speed-Stereophotogrammetrie verwendet, um die Geschwindigkeit von Fließlawinen zu bestimmen. Durch die Weiterentwicklung von digitalen Amateurkameras mit hoher Bildrate wurde diese Technik zunehmend in der Lawinenforschung verwendet. Die Messung der Frontgeschwindigkeit im Vallée de la Sionne (VdS, Schweiz) wurde unter Verwendung von zwei oder drei synchronisierten Photo- oder Videokameras durchgeführt.

Der erste Einsatz von gepulstem Doppler-Radar wurde im Jahr 1990 anhand von mehreren Lawinen getestet (Randeu et al, 1990). Seit diesem Zeitpunkt wurden die Messgeräte stetig optimiert und die räumliche Auflösung verbessert. Im Rahmen des EU-Projekts SAME (1996-1998) wurde eine zusätzliche Sendefrequenz verwendet, um eine Differenzierung von Fließ- und Staublawinengeschwindigkeit vornehmen zu können (Schreiber et. al, 2001; Gauer et. al, 2007;

Rammer et. al, 2007). Speziell für wissenschaftliche Zwecke wird dieses Zweifrequenz-Radar bis heute in verschiedenen Testgebieten eingesetzt.

Beschreibung der Messtechniken und Simulationsmodelle

Videogrammetrie

Im VdIS wurde die künstlich ausgelöste Lawine #917 mit Hilfe zweier synchronisierter Videokameras gefilmt. Die Position der Kameras am Gegenhang wurde auf der Basis von DGNS (Differential Global Navigation Satellite System) mit einer Genauigkeit von 5 cm gemessen. Nach der Sprengung wurde die Lawine mit einer Bildrate von 25 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Aus dem Filmmaterial wurden Bildpaare in einem Abstand von 5 Sekunden extrahiert und die jeweiligen Frontlinien per Hand eingezeichnet. Die daraus gewonnenen georeferenzierten Frontlinien (Abbildung 3) wurden von der Forschungsgruppe Lawindynamik des WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Schweiz) zur Verfügung gestellt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Messmethode und Auswertung ist in Vallet et al. (2004) und Bartelt et al. (2012) enthalten.

Videoanalyse

Im Testgelände Ryggfönn wurde die künstlich ausgelöste Lawine vom 27.3.1993 mit Hilfe einer analogen Videokamera, mit einer Bildrate von 25 Bildern pro Sekunde, aufgenommen. Im oberen Teil der Sturzbahn verhinderten schlechte Sichtverhältnisse (Schatten) eine Analyse des Filmmaterials. Im Auslaufbereich endet die Auswertung der Bilder im Bereich des Damms, weil die Lawine sozusagen aus dem Bild hinausgelaufen ist. Durch den steilen Blickwinkel vom Gegenhang waren allerdings eine Abgrenzung der Frontlinien

und die nachfolgende Verortung anhand von Fixpunkten in der Lawinenbahn möglich. Die georeferenzierten Frontlinien mit einem Intervall von 1 Sekunde (Abbildung 7) wurden vom Department Natural Hazards des NGI (Norwegen) zur Verfügung gestellt.

Gepulstes Doppler Radar

An der Monitoringanlage Grimming (Mutterecklawine, Steiermark) wird ein gepulstes Doppler-Radar mit einer Frequenz von 5.82 GHz betrieben, wobei zwei Antennen den oberen bzw. unteren Teil der Sturzbahn abdecken. Der Hauptanteil des Signals (mit einer Wellenlänge von 5.2 cm) wird vom Fließanteil der Lawine reflektiert. Das Radarsignal sendet kurze elektromagnetische Impulse mit einer konstanten Frequenz aus und tastet die Echos in bestimmten Zeitintervallen, bzw. dazugehörigen Distanzbereichen, sogenannten range gates, ab (Abbildung 1). Die auftretende Frequenzverschiebung, verursacht durch die Bewegung der Lawine relativ zum Radar, wird gemessen und liefert ein Geschwindigkeitsspektrum innerhalb eines range gate. Die gemessene Geschwindigkeit des einzelnen Objekts ist direkt proportional zur Frequenzverschiebung des Radarsignals. Eine ausführliche Beschreibung der Mess- und Auswertetechnik in Bezug auf Lawinen ist in Gauer et al. (2007) beschrieben.

Die Radaranlage am Grimming dient als Warnsystem, das heißt sobald eine Bewegung von Schneemassen im Anbruchbereich detektiert wird, erfolgt die Sperre der darunterliegenden Straße durch ein Ampelsignal. Als Nebenprodukt fallen Geschwindigkeitsmessdaten an, die Aufschluss über die räumliche und zeitliche Entwicklung einer Lawine geben, und so ein wertvolles Instrument für die Validierung der Simulationsmodelle darstellen. Die Geschwindigkeitsanalyse vom Lawinenereignis am 17.3.2010 wurde vom

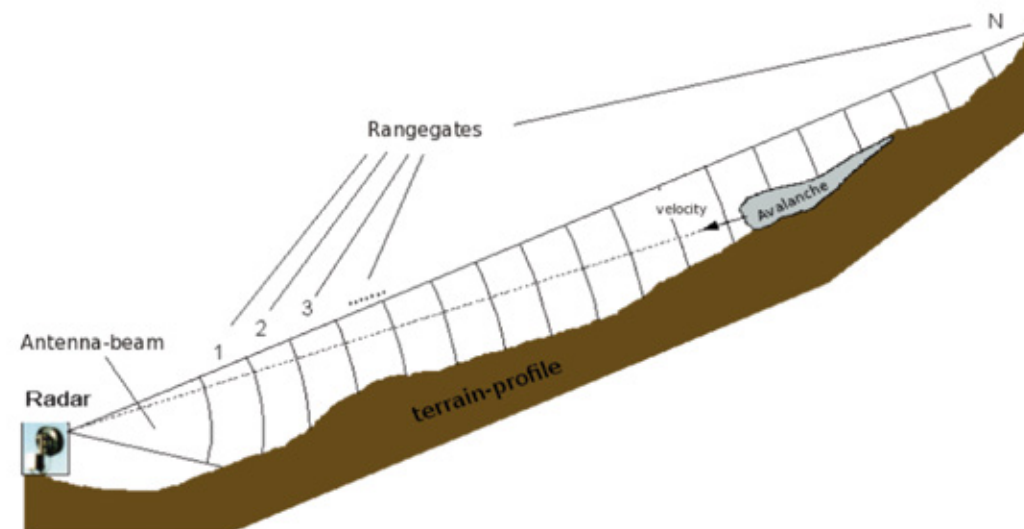


Abb. 1: Range gating (Auflösung = 50 m) eines gepulsten Doppler-Radars (© Schreiber).

Fig. 1: Range gating (resolution=50 m) of a pulsed Doppler-radar (© Schreiber).

Institut für Hochfrequenztechnik (Technische Universität Graz, Österreich) durchgeführt. Beginnend mit der Auswertung der Echo-Rohdaten (Dopplerspektren) wurden mit Hilfe der INW Avalanche Software (Schreiber, 2011) verschiedenste Darstellungen generiert. Abbildung 2 visualisiert den Lawinenabgang in Form eines time-range-Diagramms, wobei auf der Abszisse die Zeit [s] und auf der Ordinate die Distanz vom Radar [m] aufgetragen ist. Die Farben zeigen die Geschwindigkeit der Lawine [m/s] zur jeweiligen Zeit und Distanz (range gate). Vereinfacht gesprochen bewegt sich die Lawine von links oben nach rechts unten, wobei der grüne Bereich am Ende den Auslaufbereich markiert.

Simulationsmodelle

Als Vergleich zu den gemessenen Werten wurden die Geschwindigkeiten des Fließanteils der Simulationsmodelle SamosAT und Elba+ herangezogen. In beiden Modellen wird die Bewegung der Fließlawine als "shallow flow" über die Geländeoberfläche in zweidimensionaler Form

berechnet. Die Rheologie basiert auf einem sogenannten Voellmy-Fluid, d.h. einer Kombination aus Coulomb-Reibung und einem turbulenten Reibungsterm. Eine detaillierte Beschreibung ist den Handbüchern der Modelle ausgeführt (Volk, 2005; Sampl, 2007; Sampl und Granig, 2009).

Lawinenereignisse und Auswertungen

Vallée de la Sionne – Lawine #917
am 26. März 2008 (12:45)

Das Versuchsgelände im VdIS (Schweiz) ist seit dem Winter 1997/1998 im Einsatz, wobei spontane und künstlich ausgelöste Lawinen analysiert werden. Eine genauere Beschreibung der Testsite sowie verschiedener Messeinrichtungen ist in Ammann (1999) und Issler (1999) nachzulesen.

Die Witterung in der Woche vor dem gemessenen Lawinenereignis ist in Kern et al. (2010) genauer beschrieben. Weiters wurde in diesem Artikel von einer Anrisslänge mit ca. 400 m sowie von zwei aufeinanderfolgenden Anbruchmächtigkeiten mit 0.5 m berichtet. Anhand eines Fotos,

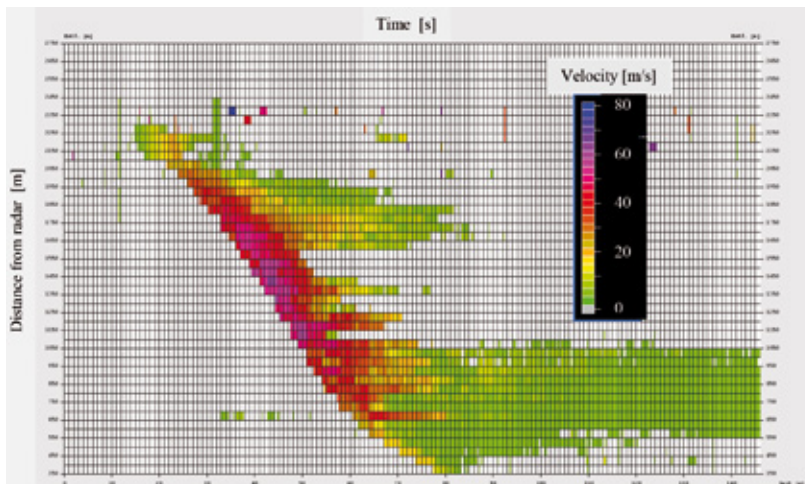


Abb. 2: Time-range-Diagramm der Grimming/Multreck-Lawine am 17. März 2010 (© Schreiber).

Fig. 2: Time-range-diagram of Grimming/Multreck-avalanche on 17 March 2010 (© Schreiber).

den Staubanteil der Lawine hervorgerufen, welcher den Fließanteil überholt.

Die Lawinsimulationen (SamosAT, Elba+) wurden mit einer Anbruchmächtigkeit von 1.0 m (Kern et. al., 2010) durchgeführt, was einer Anbruchkubatur von 85.000 m³ entspricht. Bei den Simulationen des Fließanteils wurde jeweils ohne bzw. mit Entrainment gerechnet. Die Schätzung der Entrainmenthöhe von 0.2 m wurde dem Artikel von Bartelt et al. (2012) entnommen, wo ebenfalls ein Vergleich von gemessenen Lawinengeschwindigkeiten gegenüber den Spitzengeschwindigkeiten im numerischen Simulationstool RAMMS (Christen et al.,

zur Verfügung gestellt von der Forschungsgruppe Lawindynamik des WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, wurden das Anbruchgebiet und der Ablagerungsbereich des Fließanteils abgegrenzt (Abbildung 3). Weiters ist die Lage der Frontlinien zum Zeitpunkt 15, 20, 25, 30, 35, 40,

45, 50, 55, 60, 64 s und das Profil A dargestellt. Entlang des Längsprofils wurde die dreidimensionale Distanz zwischen den Frontlinien berechnet und durch das dazugehörige Zeitintervall dividiert. Die daraus gewonnene Frontgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von +/- 5 m/s ist in Abbildung 4 ersichtlich. Die signifikante Beschleunigung im letzten Zeitintervall wird wahrscheinlich durch

zur Verfügung gestellt von der Forschungsgruppe Lawindynamik des WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, wurden das Anbruchgebiet und der Ablagerungsbereich des Fließanteils abgegrenzt (Abbildung 3). Weiters ist die Lage der Frontlinien zum Zeitpunkt 15, 20, 25, 30, 35, 40,

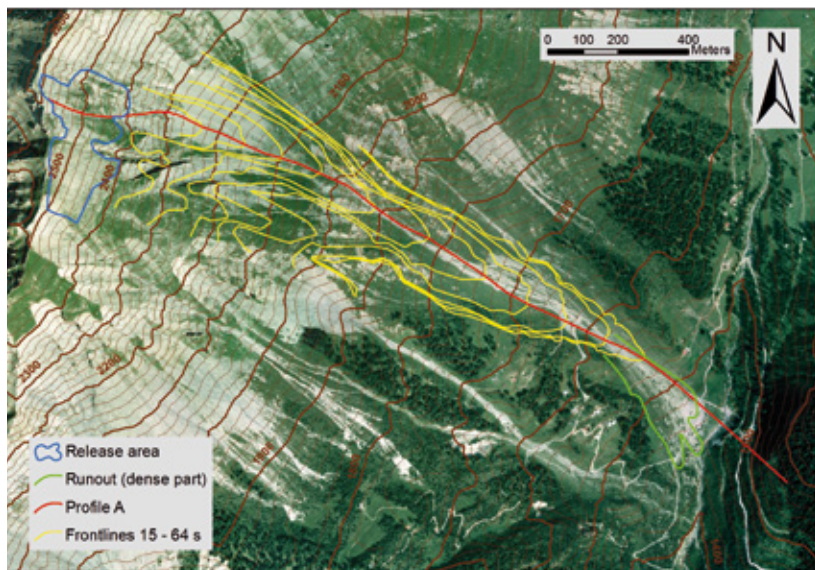


Abb. 3: Vallée de la Sionne - Lawine #917 – Übersicht vom Einzugsgebiet (Aerial imagery ©swisstopo - DV033492.2).

Fig. 3: Vallée de la Sionne – Avalanche #917 – Overview of catchment area (Aerial imagery ©swisstopo - DV033492.2).

Die signifikante Beschleunigung im letzten Zeitintervall wird wahrscheinlich durch

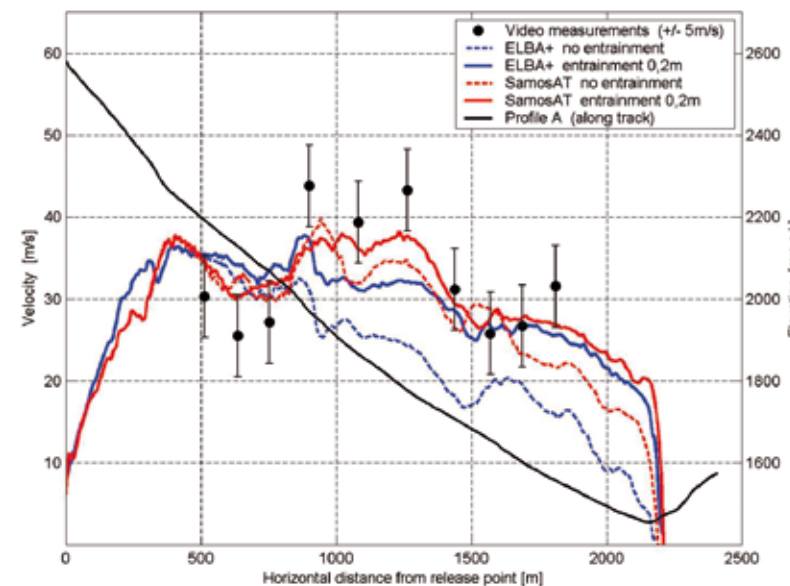


Abb. 4: VdIS –Lawine #917: Geschwindigkeit aus videogrammetrischen Auswertungen im Vergleich zu den Spitzengeschwindigkeiten in den Simulationsmodellen.

Fig. 4: VdIS –Avalanche #917: Front velocity of video measurements versus peak velocities in simulation models.

2010) angestellt wird. In Abbildung 4 sieht man, dass die Simulationen ohne Entrainment generell niedrigere Geschwindigkeitswerte aufweisen. Speziell beim Modell Elba+ ist die Verwendung von Entrainment ein wichtiger Punkt, um realistische Geschwindigkeiten entlang der Sturzbahn zu erhalten. Insgesamt zeigt die SamosAT-Berechnung mit Entrainment die beste Übereinstimmung mit der videogrammetrischen Auswertung, mit einer Abweichung von +/- 5 m/s.

Grimming/Multreck-Lawine am 17. März 2010 (07:13)

Während der letzten 5 Tage vor dem Lawinenereignis verzeichnete die nahegelegene Wetterstation Multreck (2159 m) einen Schneehöhenzuwachs von ca. 1.1m, begleitet von SW-Wind mit moderater Geschwindigkeit bis 12 m/s. Die Temperatur in dieser Periode bewegte sich im Bereich von -8 bis -4 °C an der Station Tauplitz (1762 m), wobei ein leichter Anstieg zu verzeichnen war (Daten zur

Verfügung gestellt von ZAMG, Österreich). Am Morgen des 17. März 2010 löste sich eine spontane Lawine im steilen nordostseitigen Anbruchbereich und wurde vom Radarsystem erfasst. Die Auswertung der Zeit-Diagramme hat gezeigt, dass das erste Bewegungssignal der Lawine aus einem Seehöhenbereich von 1740 - 1870 m stammt. Unter Zuhilfenahme eines Fotos und einer Neigungskartierung wurde die Breite der

Anbruchgebiete abgeschätzt. In Abbildung 5 sind die oberen Anbruchgebiete 1 und 2 dargestellt. Bei einer genaueren Analyse der Radardaten zeigte sich ein zweites Echo in einer Seehöhe zwischen 1570 und 1700 m, hervorgerufen durch ein sekundäres Anbruchgebiet; genauer gesagt wurden in diesem Bereich zwei deutlich verschiedene spektrale Komponenten, mit unterschiedlicher zeitlicher Entwicklung, detektiert. Das sekundäre Anbruchgebiet 3 wurde im orographisch linken Teil der Sturzbahn abgegrenzt (Abbildung 5). Bei diesem Szenario spaltet sich die Lawinenmasse im oberen Bereich auf und fließt in einer Engstelle (1200 m) wieder zusammen. Nach passieren der Runse breitet sich die Lawine über den Schwemmkegel aus. Die darunterliegende Salzkammergut-Bundesstraße wird zum Teil von einer Lawingalerie geschützt, weiter südlich davon befindet sich jedoch ein ungeschützter Brückenabschnitt. Um das Restrisiko zu minimieren wurde vom Institut für Hochfrequenztechnik (TU Graz) ein Warnsystem, bestehend aus

einem gepulsten Doppler Radar, entwickelt. Neben der automatischen Wetterstation Multreck dient diese Monitoringanlage als unterstützende Maßnahme für die örtliche Lawinenkommission.

Die Analyse der Frontgeschwindigkeit entlang von Profil B wird durch die Ankunftszeit der Lawine in jedem range gate festgesetzt. Innerhalb eines range gates (Länge = 50 m) wurde die Geschwindigkeit mit einer hohen Auflösung mit Hilfe der INW Avalanche Software (Schreiber, 2011) berechnet. Dabei wird die gemessene Geschwindigkeit durch die Abweichung des Geschwindigkeitsvektors entlang des Längsprofils zur Radarachse, korrigiert. Die Auswertung der Radarmessung startet unterhalb von Anbruchgebiet 1 in einer Seehöhe von 1734 m (Abbildung 6). Nach einer ausgeprägten Beschleunigung ist in 1450 m Seehöhe ein kleines Maximum sichtbar, welches durch einen kurzen Steilabsturz hervorgerufen wurde. Die höchste Radar-Geschwindigkeit tritt in einer Seehöhe von 1200 m auf, wo die orographisch rechte und linke Lawinenmasse wie in einem "Flaschenhals" zusammenströmt.

Für die Berechnungen mit SamosAT und Elba+ wurden die Anbruchgebiete 1, 2 und 3 mit einer Anbruchmächtigkeit von 1.0 m beaufschlagt, was einer Anbruchkubatur von 51.000 m³ entspricht. Die Simulationen des Fließanteils wurden einmal ohne und einmal mit Berücksichtigung von 0.2 m Entrainment durchgeführt. Während im Modell Elba+ nur ein synchrones Auslösen von Anbruchgebieten möglich ist, können in SamosAT auch sekundäre Anbruchgebiete definiert werden. Durch diesen verzögerten Auslösemechanismus bei SamosAT akkumuliert sich die Lawinenmasse im orographisch linken Lawinenarm und das gemessene Geschwindigkeitsmaximum wird besser repräsentiert. Bei Elba+ läuft hingegen die untere Anbruchmasse voraus, während die Schneemassen der oberen Anbruchgebiete 1 und 2 im Bereich der Engstelle (1200 m) kollidieren und zu einer starken Abbremsung der Lawine führen. Folglich kann bei dieser Lawine eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Geschwindigkeiten nur durch ein richtiges "Timing", also der Verwendung eines sekundären

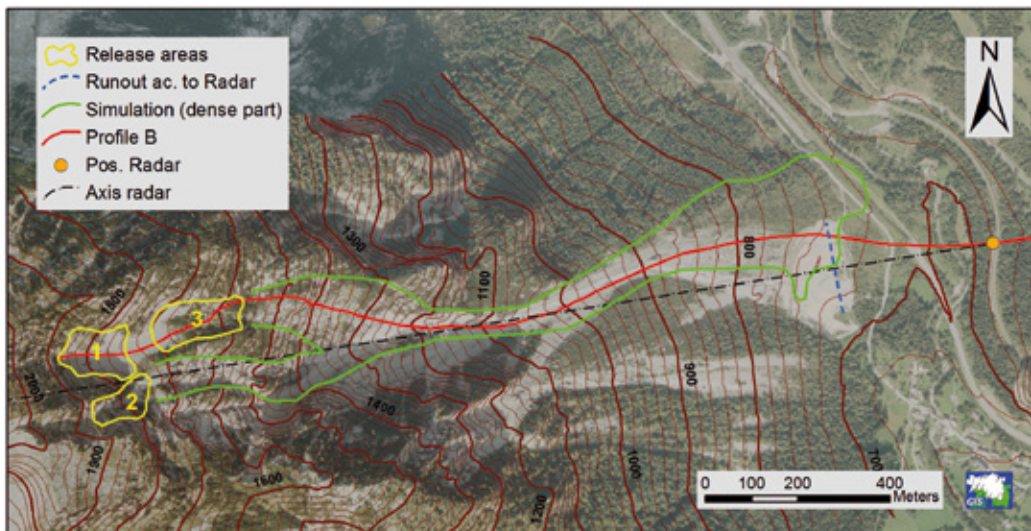


Abb. 5: Lawine am 17. März 2010 im Monitoringgebiet Grimming/Multreck (© GIS Steiermark).

Fig. 5: Avalanche on 17 March 2010 at the monitoring site Grimming/Multreck (© GIS Steiermark).

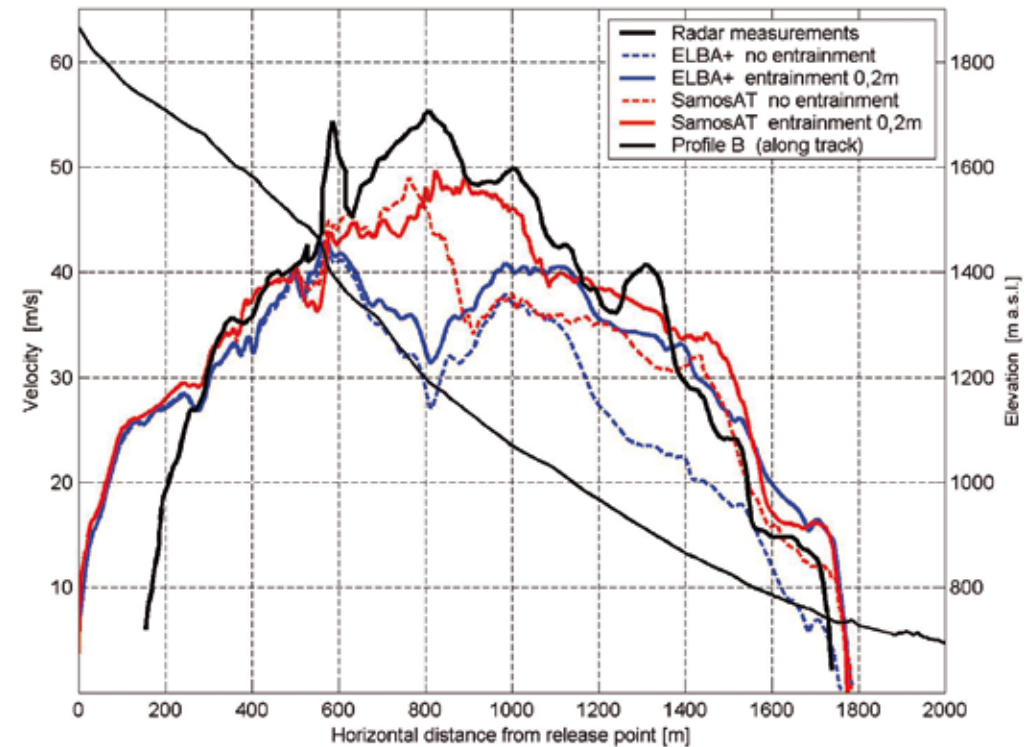


Abb. 6: Grimming/Multreck (17.3.2010): Lawinengeschwindigkeiten der Radarmessung gegenüber den Spitzengeschwindigkeiten in den Simulationsmodellen.

Fig. 6: Grimming/Multreck (17.3.2010): Lawinengeschwindigkeiten der Radarmessung gegenüber den Spitzengeschwindigkeiten in den Simulationsmodellen.

Anbruchgebiets, erreicht werden. Generell zeigt sich wiederum die Bedeutung von Entrainment entlang der Sturzbahn, die besonders bei Elba+ notwendig ist, um eine realistische Geschwindigkeitsverteilung zu erreichen. Die SamosAT-Berechnung mit Entrainment zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten, wobei das Hauptmaximum in einer Seehöhe von 1200 m um ca. 5 m/s unterschätzt wird.

Ryggfonn - Lawine am 27. März 1993 (14:30)

Folgende Informationen wurden auszugsweise aus einem Report des NGI (Kristensen, 1996) entnommen: „...Während der letzten zwei Wochen vor dem Lawinenereignis verzeichnete die nahegelegene Station Fonnbu (930 m) einen Nieder-

schlagszuwachs von ca. 150 mm. Die Windverhältnisse in dieser Periode waren moderat (max. 15 m/s) aus südwestlicher Richtung, während die Temperaturen von ca. -3 °C auf -10 °C absanken. Zur Zeit der Sprengung war der gesamte Lawinenpfad mit lockerem trockenem Schnee bedeckt, wodurch sich die Staubentwicklung bis zum Gegenhang erstreckte (Foto in Abbildung 7). Die Anbruchmächtigkeit wurde auf 2.1 m geschätzt, mit einem Volumen von ca. 37.000 m³, das Ablagerungsvolumen mit ca. 20.000 m³ fällt hingegen eher bescheiden aus...“

In Abbildung 7 sind das Anbruchgebiet, das Längsprofil sowie der Depositionsbereich des fluidisierten bzw. Fließanteils vom Lawinenereignis aufgetragen. Weiters ist die Lage der Frontlinien im Abstand von 1 Sekunde eingezeichnet,

wobei der obere Teil durch schlechte Sicht (Schatten) nicht ausgewertet werden konnte. Auch der Bereich des Talbodens ist abgeschnitten, weil er nicht mehr im Bild enthalten war. Entlang von Profil C wurde die 3-dimensionale Distanz zwischen den Frontlinien berechnet und durch das jeweilige Zeitintervall dividiert.

Die daraus resultierende Frontgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von ± 5 m/s ist in Abbildung 8 aufgetragen, wobei sich große Schwankungen zeigen. Beginnend mit Werten von 35 m/s erfolgt eine Beschleunigung bis auf eine Seehöhe von 850–1050 m, wo die größten Werte um 50 m/s erreicht werden. Danach erfolgt eine kontinuierliche Abnahme der Geschwindigkeit auf 35 m/s am Hangfuß bzw. ca. 25 m/s hinter dem Damm.

Die Simulationen des Fließanteils mit den Modellen SamosAT und Elba+ wurden jeweils ohne und mit Entrainment von 0,2 m durchgeführt. Zu Beginn erfolgt eine starke Beschleunigung der Schneemassen, gefolgt von einer gleichbleibenden bzw. leicht abnehmenden Geschwindigkeit im

flacheren Terrain des Kessels. Unterhalb von 1200 m Seehöhe hingegen divergieren die Simulationsmodelle, wobei die Simulationsvarianten mit Entrainment generell höhere Geschwindigkeiten aufweisen. Dies unterstreicht erneut die Berücksichtigung des Entrainments, besonders beim

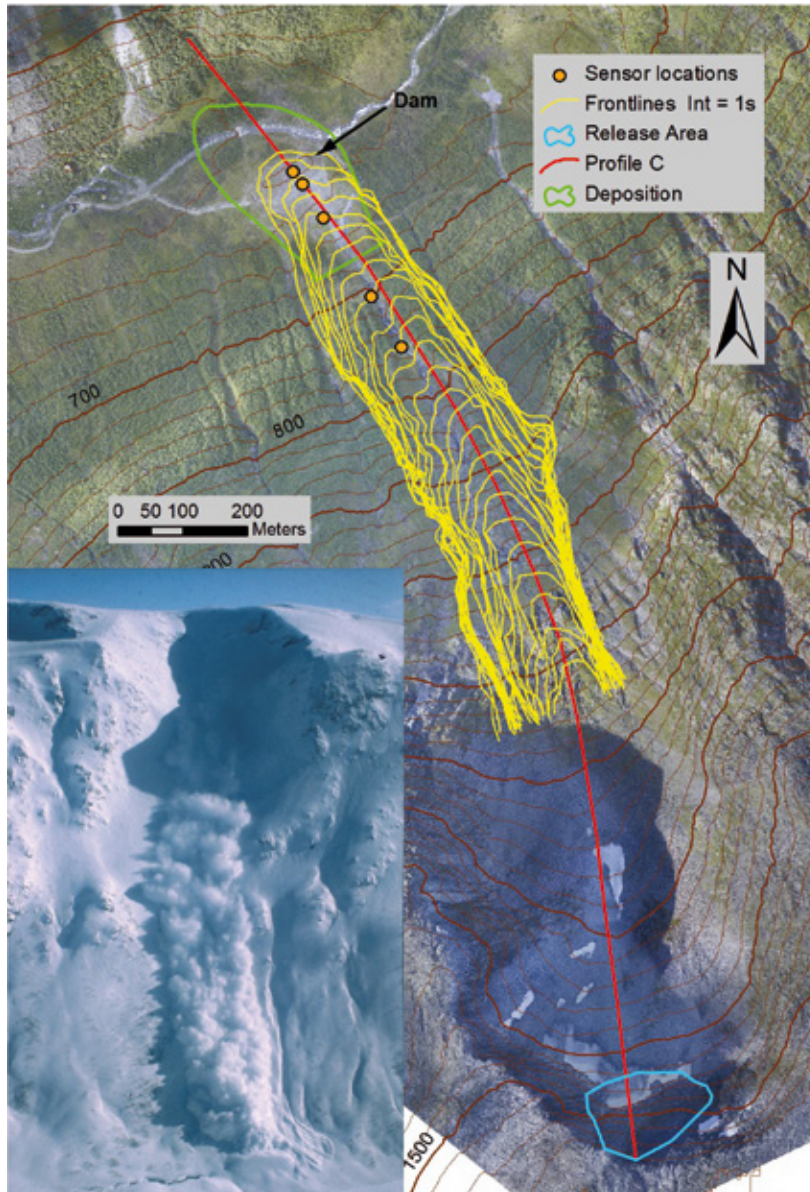


Abb. 7: Lawineneignis am 27.3.1993 im Testgebiet Ryggfonn (© NGI, Norwegen).

Fig. 7: Avalanche on 27 March 1993 at the test site Ryggfonn (© NGI, Norway).

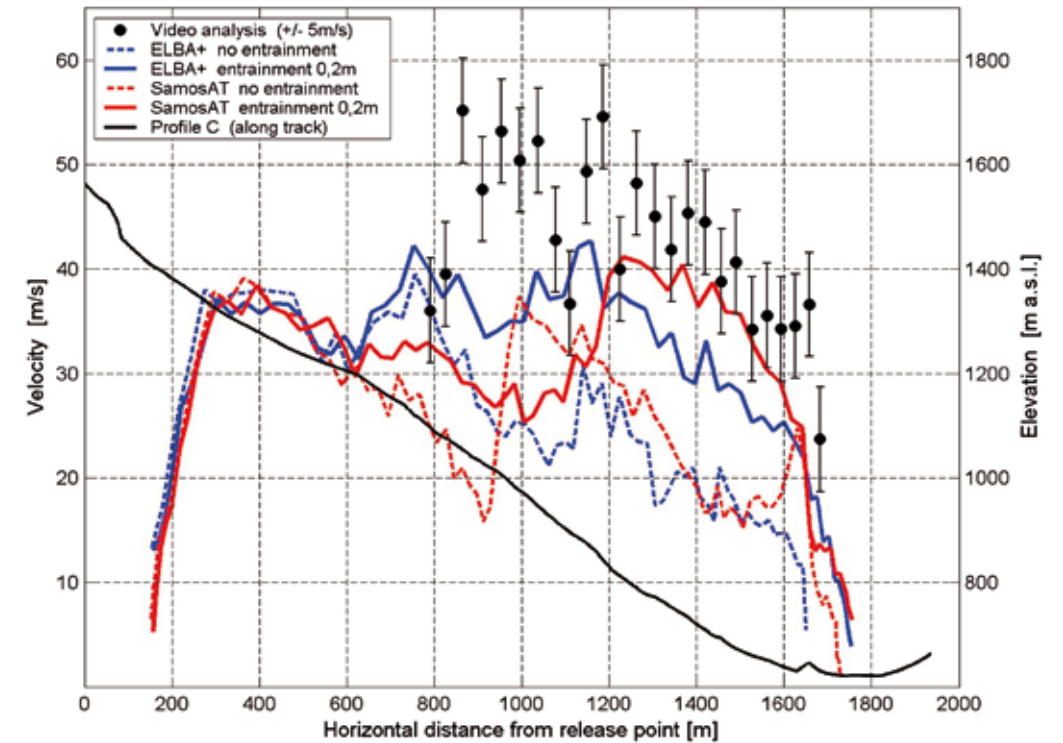


Abb. 8: Ryggfonn (27.3.1993): Geschwindigkeiten aus der Videoanalyse im Vergleich zu den Spitzengeschwindigkeiten der Simulationsmodelle.

Fig. 8: Ryggfonn (27.03.1993): Front velocity of video measurements versus peak velocities in simulation models.

Modell Elba+. Während die Simulation mit Elba+ inklusive Entrainment zwischen 850 und 1200 m höhere Werte aufweist, zeigt SamosAT unterhalb von 850 m eine bessere Übereinstimmung mit der Videoanalyse. Im Bereich des Damms bzw. im Talboden weisen beide Modelle wieder einen ähnlichen Geschwindigkeitsverlauf auf.

Im mittleren Bereich der Sturzbahn, wo die größten Werte der Videoanalyse auftreten, liegen die Geschwindigkeiten in den Simulationsmodellen um ca. 10–20 m/s niedriger. Erst im unteren Teil der Lawinenbahn zeigen sich wieder realistische Geschwindigkeiten mit einer Abweichung von ca. 5 m/s.

Resümee

Der Vergleich der gemessenen Lawinengeschwindigkeiten mit den Modellrechnungen ergibt essentielle Informationen über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Simulationen entlang eines Lawinenpfades. In der Gefahrenzonenplanung wird der Lawinendruck als Abgrenzungskriterium herangezogen. Der Druck setzt sich aus den beiden Faktoren der Lawinengeschwindigkeit, die zum Quadrat berücksichtigt wird, und der Dichte zusammen. Daher wurde als Schwerpunkt die Lawinengeschwindigkeit intensiv untersucht. Das Modell Elba+ wurde zum ersten Mal hinsichtlich der errechneten Lawinengeschwindigkeiten analysiert. Für Samos99 bzw. SamosAT wurden schon

erste Studien ausgeführt, dazu wird auf Sailer et al. (2002) und Gauer (2009) verwiesen.

Im Rahmen der Studie wurden die Simulationen (SamosAT und Elba+) mit den Standardeinstellungen gemäß den Anwenderrichtlinien (Volk, 2005; Sampl, 2007; Jörg und Granig, 2010) durchgeführt und mit den Geschwindigkeitsmessungen verglichen. Die Ausgangswerte der aufgenommenen Lawineneignisse wurden anhand der verfügbaren Dokumente, Berichte und lokalen Expertisen rekonstruiert. Die Bestimmung der Lawinenmasse ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, konnte jedoch durch die Verwendung von Schnee- bzw. Windinformation der nächstgelegenen Wetterstationen minimiert werden. Als Entrainmentmächtigkeit wurde bei SamosAT und Elba+ der in der Praxis übliche Wert von 0.2 m verwendet. Generell ist die Verwendung von Entrainment bei beiden Modellen notwendig, damit eine realistische Geschwindigkeitsverteilung entlang der Sturzbahn abgebildet werden kann.

Es wurden drei verschiedene Lawineneignisse im VdIS (Schweiz), in Grimming (Österreich) und in Ryggfonn (Norwegen) untersucht, um auch unterschiedliche topographische Ausprägungen der Lawineneinzugsgebiete zu berücksichtigen. Als Fehlerbandbreite für die Geschwindigkeitsmessungen aus der videogrammetrischen Auswertung bzw. Videoanalyse wird von den Autoren +/- 5m/s angegeben (Bartelt, 2012; mündliche Mitteilung Gauer, 2012). Im VdIS und in Grimming lagen die modellierten Geschwindigkeiten in der Regel innerhalb der Fehlerbandbreite der Messungen. Bei der Lawine Grimming/Multereck konnten durch Ausscheiden eines sekundären Anbruchgebiets in SamosAT die gemessenen Radargeschwindigkeiten besser rekonstruiert werden. Die gemessenen Lawinengeschwindigkeiten in Ryggfonn ergeben deutlich höhere Werte als die Simulationen. Als Gründe könnte einerseits

die Messung selbst angeführt werden, da hier nur eine Videokamera zum Einsatz gelangte, andererseits handelt es sich bei der untersuchten Lawine in Ryggfonn um eine ausgeprägte Mischlawine, die mit den Fließmodellen nur bedingt repräsentativ nachgerechnet werden kann. Der entscheidende Punkt ist auch die Rekonstruktion der tatsächlichen Lawinenmasse. Die Schneeaufnahme in der Sturzbahn ist wesentlich in der Genese von Lawinen, die Quantifizierung gestaltet sich besonders im Nachhinein jedoch als schwierig. Gemäß Sovilla (2006) kann im Mittel bis zum Vierfachen der Startmasse zusätzlicher Schnee in die Lawine eingepflügt werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass in der Modellrechnung mit globalen Entrainment von 0.2 m nicht ausreichend Lawinenmasse aufgenommen wurde. Die vorliegende Studie der Geschwindigkeiten verdeutlicht die Variabilität zwischen Elba+ und SamosAT je nach Lage der Monitoringpunkte in der Sturzbahn. Gegen Ende der Lawinenbahn pendeln sich die Geschwindigkeiten beider Modelle auf eine vergleichbare Größe ein und liegen zumeist innerhalb der Fehlerbandbreite der Messungen.

Anhand weiterer Auswertungen von Lawinengeschwindigkeiten soll gezeigt werden, inwiefern Entrainment in den Modellrechnungen möglicherweise systematisch unterschätzt wird. Eine Überarbeitung des Entrainmentprozesses in den Simulationsmodellen SamosAT und Elba+ erscheint daher sinnvoll. In diesem Zusammenhang wird auf die laufende Studie mit dem BFW in Innsbruck verwiesen, wo derzeit an einem „Mountain Snow Cover“ Ansatz gearbeitet wird. Abschließend wird festgehalten, dass im Auslaufbereich die Übereinstimmung der Simulationen mit den Messungen grundsätzlich besser ist, da im Rahmen der Kalibrierung zumeist Daten und Informationen von diesem Abschnitt eingesetzt wurden.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Mag. Philipp Jörg
 Universität für Bodenkultur
 Institut für alpine Naturgefahren
 Peter-Jordan-Str. 82
 A-1190 Wien
 philipp.joerg@die-wildbach.at

DI Matthias Granig
 Wildbach und Lawinenverbauung
 Stabstelle Schnee und Lawinen
 Swarovskistrasse 22
 A-6130 Schwaz
 matthias.granig@die-wildbach.at

Dr. Yves Bühler
 WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
 Flüelastrasse 11
 CH-7260 Davos Dorf
 buehler@slf.ch
 Dr. Peter Gauer
 Norwegian Geotechnical Institute (NGI)
 Department Natural Hazards
 Sognsveien 72
 N-0855 Oslo
 peter.gauer@ngi.no

Dr. Helmut Schreiber
 Technische Universität Graz
 Institut für Hochfrequenztechnik
 Inffeldgasse 12
 A-8010 Graz
 helmut@radar.tugraz.at

Literatur / References:

AMMANN W. (1999). A new Swiss test site for avalanche experiments in the Vallée de la Siagne/Valais. *Cold Regions Science and Technology*, 30, 3-11.

BARTELT P., BÜHLER Y., BUSER O., CHRISTEN M., MEIER L. (2012). Modelling mass dependent flow regime transitions to predict the stopping and depositional behaviour of snow avalanches. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 117.

CHRISTEN M., KOWALSKI J., BARTELT P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 63, 1 – 14

GAUER P., KERN M., KRISTENSEN K., LIED K., RAMMER L., SCHREIBER H. (2007). On pulsed Doppler radar measurements of avalanches and their implication to avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 50, 55–71.

GAUER P. (2009). Optimization of SamosAT - First Progress Report. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Innsbruck.

ISSLER D. (1999). European avalanche test sites. Overview and analysis in view of coordinated experiments. *Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung Mitteilungen Nr. 59*.

JÖRG P., GRANIG M. (2010). Rekalibrierung SamosAT - Suspensionsmodell 2010. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Stabstelle Schnee und Lawinen.

KERN M., P. BARTELT, B. SOVILLA (2010). Velocity profile inversion in dense avalanche flow. *Annals of Glaciology*, 51(54), 27-31.

KRISTENSEN K. (1996). The Ryggfonn Project: Avalanche data from the Winters 1991/1992, 1992/1993, and 1993/1994. Norwegian Geotechnical Institute, NGI-Report 581200-31.

RAMMER L., KERN M., GRUBER U., TIEFENBACHER R. (2007). Comparison of avalanche-velocity measurements by means of pulsed Doppler radar, continuous wave radar and optical methods. *Cold Regions Science and Technology*, 50(1-3), 35-54.

RANDEU W., OKORN R., RIEDLER W. (1990). A pulsed Doppler radar for acquisition of avalanche dynamics. *Proceeding of Conference CIV'90 Avalanches and Planning of Mountain Territory 9th-10th October 1990, Arabba (BL), Italy*, pp. 118–126.

SAILER R., RAMMER L., SAMPL P. (2002). Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2: 211-216.

SAMPL P. (2007). SamosAT – Modelltheorie und Numerik. AVL List GmbH, Graz.

SAMPL P., GRANIG M. (2009). Avalanche Simulation with Samos-AT. *International Snow Science Workshop, Proceedings, Davos, Switzerland*.

SCHREIBER H., RANDEU W., SCHAFFHAUSER, H., RAMMER (2001). Avalanche dynamics measurements by pulsed Doppler radar. *Annals of Glaciology*, 32, 275-280.

SCHREIBER H. (2011). INW Lawinenradar Benutzerhandbuch Teil 2 Version 1.20. Institute of microwave and photonic engineering, TU-Graz, Austria.

SOVILLA B., BURLANDO P., BARTELT P. (2006). Field experiments and numerical modelling of mass entrainment in snow avalanches. *Journal of Geophysical Research*, 111.

VALLET J., TURNBULL B., JOLY S., DUFOUR F. (2004). Observations on powder snow avalanches using videogrammetry. *Cold Regions Science and Technology*, 39, 153-159.

VOLK, G. (2005). Handbuch ELBA+. NiT Technisches Büro GmbH, Pressbaum.

JAN-THOMAS FISCHER, MATTHIAS GRANIG, UWE SCHLIFKOWITZ, NICK SCHUMACHER

Eine neue Auswertungsmethode der Lawinensimulationssoftware SamosAT

A new evaluation method for the avalanche simulation software SamosAT

Zusammenfassung:

Simulationssoftware wie SamosAT wird zur Gefahrenbeurteilung von Schneelawinen angewendet. Bei Lawinensimulationen im dreidimensionalen Gelände wird der Anwender mit einer Datenflut konfrontiert. Diese objektiv, mit praxisrelevanten Indikatoren zu analysieren ist das Ziel dieser Arbeit. Zu diesem Zweck wird eine Automatisierung für SamosAT sowie die Analysemethode AIMEC (Automated Indicator based Model Evaluation and Comparison) zur Auswertung in einem lawinenpfadabhängigen Koordinatensystem entwickelt. Anhand von Auslauflänge und dynamischem Verhalten entlang des Lawinenpfads wird die Variabilität einer Vielzahl (100-1000) von Simulationsergebnissen mit variierenden Inputbedingungen (Anbruchvolumen, Modellparameter) analysiert und übersichtlich dargestellt. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass AIMEC ein neues, leistungsstarkes Unterstützungswerkzeug mit breitem Anwendungsspektrum im Bereich Evaluation, Vergleich und wissenschaftliches Variantenstudium von Lawinensimulationen ist.

Stichwörter:

Dynamik, Lawinensimulation, Auswertung, AIMEC, Auslauflänge

Abstract:

Simulation software like SamosAT is used as a supporting tool in hazard mapping. When modelling avalanches in three dimensional terrains, the user is confronted with a considerable amount of data. The objective of this work is to provide a systematic analysis method for this data with respect to indicators of practical relevance. For this purpose the Automated Indicator based Model Evaluation and Comparison (AIMEC) method was introduced. It works on an avalanche path dependent coordinate system and with a new mechanism to perform a multitude of simulation runs automatically. Varying the input parameters (release volume, model parameters) the variability of run out and avalanche velocity along the path is investigated for multiple (100-1000) simulation runs. The results show that AIMEC is a new, powerful supporting tool for avalanche simulations with a broad applicability in model evaluation, comparison and examination of scenario variations.

Keywords:

Avalanche dynamics, avalanche simulation, analysis, AIMEC, run-out distance

Einleitung

Innerhalb der letzten Jahre sind Lawinensimulationen ein wichtiges Werkzeug in der Gefahrenbeurteilung von Naturgefahrenprozessen geworden. Variantenstudien, Vergleiche, Evaluation und Kalibrierung werden üblicherweise mit händischen Methoden vorgenommen.

Um dem immer höheren Standard gerecht zu werden, wird für den Umgang mit SamosAT eine neue Auswertungsmethode vorgestellt, die den automatisierten Vergleich und die Evaluation der Lawinensimulationssoftwareergebnisse erlaubt.

Im Vergleich zu in der Ingenieurpraxis üblichen Abschätzungsmethoden (Voellmy, 1955; Salm et al., 1990), einfachen numerischen Modellen (Christen et al., 2002) oder statistisch-topographischen Modellen (Lied und Bakkehoi, 1980; McClung und Lied, 1987), welche in der Vergangenheit und bis heute in der Gefahrenbeurteilung verwendet werden, steigt die Datenmenge, aber auch der Informationsgehalt bei den heutzutage gängigen 2- bzw. 3-dimensionalen Modellen

(Sampl und Granig, 2009; Christen et al., 2010) um ein Vielfaches.

Einerseits bilden die bei der Simulation erzeugten Daten, z.B. durch die Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Lawine im mehrdimensionalen Gelände, die Basis für eine qualitative Ergebnisinterpretation des Nutzers. Andererseits stellt der objektive Vergleich einer hohen Anzahl von Simulationsergebnissen eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Große Datenmengen auf essentielle Informationen herunterzubrechen und diese standardisiert miteinander zu vergleichen ist jedoch die Basis einer genauen Modelluntersuchung, für Beurteilungen wie Sensitivitätsanalysen, die Kalibrierung oder den Vergleich mit anderen Modellen.

Zu diesem Zweck wurde die Analysemethode AIMEC („Automated Indicator based Model Evaluation and Comparison“) entwickelt. Ziel der Methode ist es, eine sinnvolle Filterung und Verarbeitung der Ergebnisdaten vorzunehmen, welche die Vorteile der vollständigen Simulationssoftware nutzt (wie z.B. die Zweidimensionalität der Ergebnisdaten) und gleichzeitig die Ergebnisse prägnant darstellt.

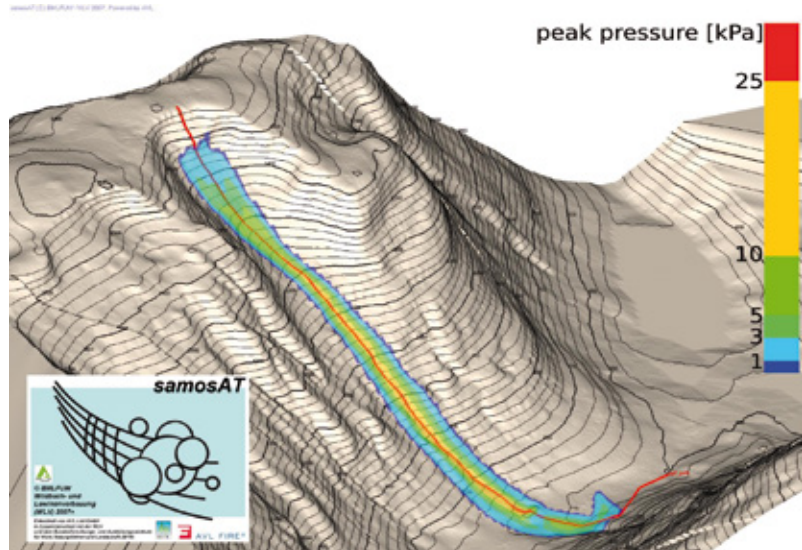


Abb. 1: Lawinensimulation Ryggfonn, Norwegen. Dargestellt sind die aus der zeitlichen Entwicklung von Fließhöhen und Geschwindigkeit ermittelten Spitzendrücke. Die zentrale Fließlinie eines lawinenpfadabhängigen Koordinatensystems ist durch die rote Linie markiert.

Fig. 1: Avalanche simulation Ryggfonn, Norway. Depiction of the avalanche peak pressure calculated from the temporal development of flow height and velocity. The centre line of a coordinate system related to the avalanche track is marked by a red line.

Das Lawinentestgelände in Ryggfonn Norwegen dient in dieser Arbeit als Beispiel. In Abbildung 1 ist das Spitzendruckfeld, welches den maximalen Aufpralldrücken über die Dauer der Lawinensimulation entspricht, dargestellt.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in eine Beschreibung der Analysemethodik, gefolgt von zwei Beispielen (Variation des Anbruchvolumens und Variation der Modellparameter). Zum Abschluss wird ein Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

Methodik

Die Simulationssoftware SamosAT (Sampl, 2006; Sampl und Granig, 2009) zur Berechnung von Trockenschneelawinen ist die Weiterentwicklung von Samos99 (Sampl, 1999; Zwinger, 2000; Zwinger et al., 2003; Sampl und Zwinger, 2004) und umfasst zwei Modelle: ein tiefengemittelt (zweidimensionales) Fließlawinen-(DFA-)Modell,

sowie ein dreidimensionales Staublawinen-(PSA-)Modell.

Die hier vorgestellte Methode nutzt SamosAT als zentralen Kern. Sie beinhaltet ein Verfahren, um eine große Anzahl von Simulationen automatisch durchzuführen und dabei jeweils nur die relevanten Ergebnisse zu exportieren. In einem Postprocessing-Schritt werden dann die Ergebnisse der verschiedenen Simulationsläufe innerhalb weniger Minuten mit der

neuen Auswertungsmethode AIMEC bearbeitet.

Im Zuge der Analyse werden sogenannte Indikatoren (praxisrelevante Größen) eingeführt, die aus den Simulationsergebnissen bestimmt werden. Die Analysemethode kann auf beide SamosAT-Modelle (DFA, PSA) angewendet werden, wurde hier allerdings exemplarisch für das Fließlawinenmodell ausgeführt.

Automatisierung

Ähnlich der in SamosAT verfügbaren Stapelverarbeitung wurde eine Möglichkeit geschaffen, eine beliebige Anzahl von Simulationen mit variierenden Inputbedingungen automatisch auszuführen. Somit ist es möglich eine Vielzahl von Simulationsläufen durchzuführen und nur die relevanten Ergebnisse zu exportieren. Welche Parameter (physikalische oder numerische Modellparameter, Randbedingungen wie Anbruchgebiete, Anbruchhöhe, etc.) und in welcher Form sie variiert wer-

den sollen, sowie welche Ergebnisse als relevant anzusehen sind, wird vom Nutzer bestimmt. Somit kann im Vergleich zur händischen Ausführung eine große Anzahl von Simulationen auf einheitliche Weise mit Zeit- und Speicherplatzersparnis durchgeführt werden.

Als exemplarische Beispiele dienen in dieser Arbeit zwei Automatisierungen:

1. 100 Fließlawinensimulationen mit Variation der Anbruchvolumina (0–250.000 m³)
2. 1000 Fließlawinensimulationen mit Variation der Modellparameter (Monte-Carlo-Simulationen)

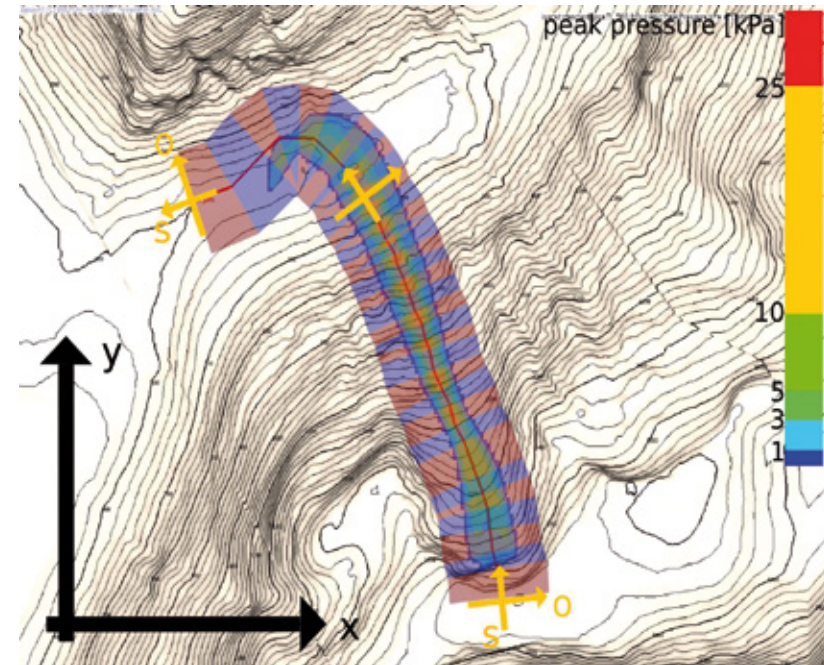


Abb. 2: Vom Lawinenpfad abhängiges Koordinatensystem entlang der zentralen Fließlinie (rot) mit longitudinaler Richtung s und lateraler Richtung o . Die Simulationsergebnisse, welche im globalen (x, y) Koordinatensystem gegeben sind, werden in ein pfadabhängiges (s, o) Koordinatensystem transformiert (hier beispielhaft dargestellt für das Spitzendruckfeld einer Lawinensimulation des Lawinenpfads Ryggfonn, Norwegen). Die roten und blauen Schattierungen markieren die unterschiedlichen Segmente des lawinenpfadabhängigen Koordinatensystems.

Fig. 2: Coordinate system related to the avalanche track along the central flow line (red) with longitudinal direction s and lateral direction o . The results of simulation, which are given in the global coordinate system (x, y) , are transformed into a coordinate system related to the avalanche track (see above). In this figure an example is presented for the field of peak pressure of a simulation of the avalanche track Ryggfonn (Norway). The red and blue shade marks the different segments of the coordinate system related to the avalanche track.

Es ist natürlich möglich die Automatisierung auf Szenarien mit Variation der Anbruchgebiete/ Staublawinensimulationen auszuweiten. Weiters kann der automatische Export von Simulationsergebnissen an die Fragestellung angepasst werden (z.B. Massenentwicklung bei Entrainmentanalysen). Der Zeitaufwand liegt bei Fließlawinensimulationen bei ca. 2–5 min pro Simulationslauf. Bei Staublawinensimulationen ist die Rechenzeit für eine sehr große Anzahl von Simulationsläufen natürlich ein limitierender Faktor.

AIMEC - Koordinatentransformation

Um praxisrelevante Größen für beliebige Lawinenzüge zu definieren, ist es notwendig die verfügbaren Informationen in einem lawinenpfad-spezifischen Rahmen darzustellen. Daher ist für die Anwendung von AIMEC ein wichtiger und grundlegender Schritt eine Koordinatentransformation der Simulationsergebnisse.

Die Ergebnisse von SamosAT sind in einem globalen (x, y) Koordinatensystem gegeben. Um die Ergebnisse spezifisch für einen Lawinenpfad auszuwerten und überhaupt die Indikatoren definieren zu können, sind die Ergebnisdaten (in diesem Fall Spitzendruckfeld

$P(x, y)$) in das von dem Lawinenpfad abhängige Koordinatensystem (s, o) zu übertragen.

$$P(x, y) \rightarrow P(s, o) \quad \text{Gl. (1)}$$

In Abbildung 2 sind die zwei Koordinatensysteme beispielhaft für den Lawinenpfad Ryggfönn dargestellt. Die zentrale Fließlinie, welche als Basis für das lawinenpfadabhängige Koordinatensystem dient, wird durch den Nutzer vordefiniert.

AIMEC-Indikatoren

Ein weiterer zentraler Punkt in der AIMEC-Analyse ist die Definition von lawinenrelevanten Indikatoren. Um einen einfachen, verständlichen Vergleich zu ermöglichen, sollten Indikatoren skalare Größen sein, welche praxisrelevante Lawinencharakteristika beschreiben. Weiters sollten Indikatoren Größen darstellen, welche aus beidem, der Beobachtung in der Natur sowie dem Modellergebnis bestimmt werden können.

Im vorliegenden Beispiel werden praxisrelevante Indikatoren definiert, welche auf der räumlichen Verteilung des Spitzendruckergebnisses basieren. Gründe für die Verwendung des Spitzendruckes liegen u.a. in der Vielseitigkeit (Interpretation als Auslauflänge, Rückschlüsse auf Geschwindigkeiten) sowie hohen praktischen Relevanz im Zusammenhang mit der Gefahrenzonenplanung (Johannesson et al., 2009).

Basierend auf dem Spitzendruckfeld werden die Größen $P_{lat}(s)$ (gemittelt Längsprofil des Spitzendruckes)

$$P_{lat}(s) = \frac{\int_{o_{left}}^{o_{right}} P(s, o) do}{|o_{left} - o_{right}|} \quad \text{Gl. (2)}$$

sowie \bar{P}_{max} (gemittelter maximaler Spitzendruck):

$$\bar{P}_{max} = \frac{\int_{s_{start}}^{s_{runout}} \max_o P(s, o) ds}{|s_{start} - s_{runout}|} \quad \text{Gl. (3)}$$

im pfadabhängigen Koordinatensystem (s, o) definiert. Somit können praxisrelevante Indikatoren geschaffen werden:

Runout

Als Runout wird im Folgenden eine druckbasierte Auslauflänge bezeichnet, welche durch einen Schwellwert des gemittelten Spitzendruck-Längsprofils (Gl. 2, 4) definiert wird. D.h. wenn der in lateraler Richtung gemittelte Spitzendruck einen Schwellwert (z.B. $P_{runout} = 1 \text{ kPa}$) unterschreitet, bezeichnen wir diesen Punkt im Lawinenkoordinatensystem als Auslauflänge (Runout).

$$P_{lat}(s) == P_{runout} \rightarrow s_{runout} = s. \quad \text{Gl. (4)}$$

rAMPP

Der rAMPP wird als eine Größe zur Evaluation der Druckverteilung entlang des Lawinenpfades eingeführt. Sie lässt Rückschlüsse auf die maximalen Lawinengeschwindigkeiten und damit auf die Dynamik der Lawine im Lawinenpfad zu. Zum Vergleich von verschiedenen Simulationsläufen ist weniger der absolute Wert dieser Größe entscheidend, als vielmehr der relative Unterschied zu einer Referenzsimulation. Das heißt, ein rAMPP-Wert von 4 entspricht etwa einer Verdoppelung der maximalen Geschwindigkeiten entlang des Pfades im Vergleich zur Referenzsimulation ($P = \rho v^2$, mit Dichte ρ und Geschwindigkeit v). Im Folgenden wird diese, die Dynamik im Lawinenpfad beschreibende Größe als rAMPP („relative averaged maximum peak pressure“) bezeichnet (vgl. Gl. 3, in Pfadrichtung gemittelter, in Querrichtung maximaler Spitzendruck).

In Abbildung 3 sind die verschiedenen

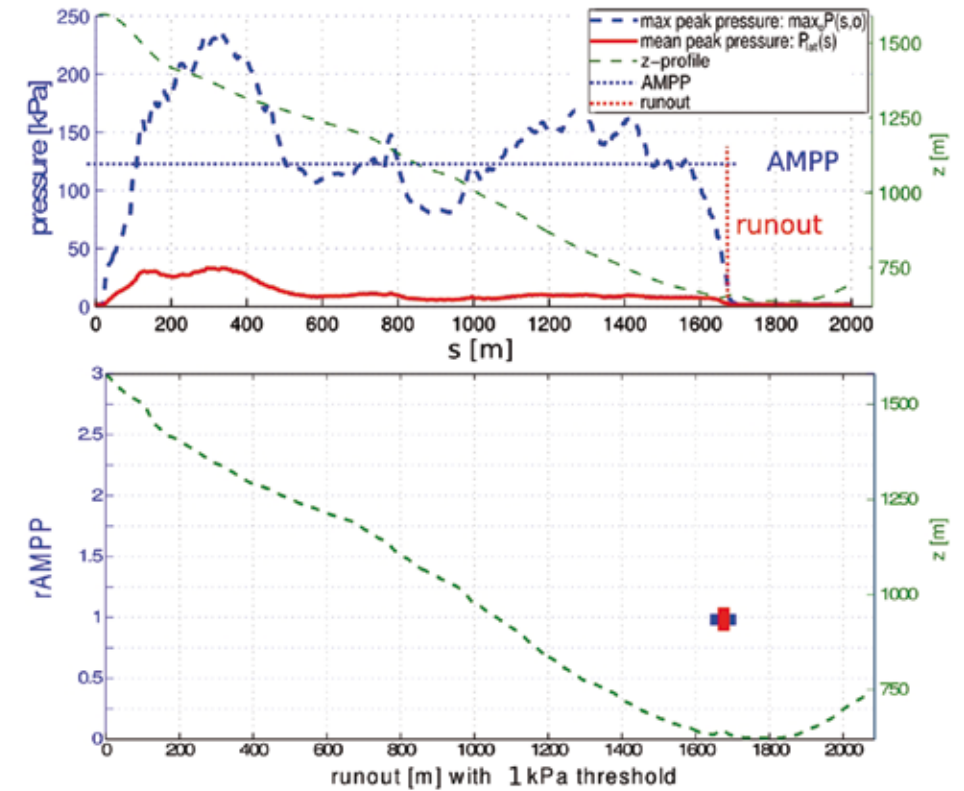


Abb. 3: Oben: Maximaler (blau) und mittlerer (rot) lateraler Spitzendruck im Längsprofil der Lawine, zusätzlich ist der gemittelte maximale Spitzendruck (averaged maximum peak pressure – AMPP) und die druckbasierte Auslauflänge (Runout) gezeigt; vgl. Gleichung (2, 3, 4). Unten: Ergebnis Diagramm, rAMPP vs. Runout, zur besseren Orientierung ist zusätzlich die zentrale Fließlinie (vgl. Abb. 2) im Profil dargestellt. Die gezeigten Daten stammen von einer Fließlawinensimulation mit Standardparametern.

Fig. 3: (Top) Maximum (blue) and medium (red) lateral peak pressure in the longitudinal profile of the avalanche, additionally the averaged maximum peak pressure (AMPP) and the pressure-related run-out distance are shown (cf. equation 2,3,4). (Bottom) Result diagram, rAMPP vs. Runout; for better orientation additionally the central flow line (cf. figure 2) is displayed in the profile. The presented data are derived from an avalanche simulation with standard parameters.

Spitzendruckprofile sowie das daraus gewonnene Ergebnisdiagramm für eine Lawinensimulation in Ryggfönn dargestellt. Wichtig ist, dass die hier erhaltenen Spitzendruckprofile keine einfachen Schnitte durch das Spitzendruckfeld darstellen, sondern die kompletten zweidimensionalen Informationen und Ergebnisdaten beinhalten.

AIMEC-Analyse

Ein Ziel der AIMEC-Analyse ist die übersichtliche Darstellung der Ergebnisvariation. Hierzu werden Ergebnisdiagramme (vgl. Abb. 3 unten rechts) ver-

wendet, in welchen der direkte Zusammenhang der Variation des Inputs sowie der Indikatorenvariabilität dargestellt wird. Als Eingangsparameter für die AIMEC-Analyse wird eine zentrale Linie sowie die Breite des Lawinenkoordinatensystems und ein Auslauf-Druck-Schwellwert (im vorliegenden Fall $P_{runout} = 1 \text{ kPa}$) benötigt. Die technische Umsetzung der AIMEC-Analyse wird mit MATLAB durchgeführt.

Variation des Anbruchvolumens

Für diese Analyse wurden 100 Simulationen mit

kontinuierlich ansteigendem Anbruchvolumen ($0 - 250 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, konstante Anbruchfläche mit variierender Schneemächtigkeit) automatisiert durchgeführt. Anschließend wurden die Spitzendruckfelder mit AIMEC ausgewertet. In Abbildung 4 ist das Ergebnisdiagramm mit den daraus gewonnenen Indikatoren (Runout und rAMPP) dargestellt.

Es ist zu beobachten, dass eine Zunahme im Anbruchvolumen zu einer Steigerung beider Indikatoren, der Auslauflänge sowie des rAMPP, führt. Eine Besonderheit des Ryggfonn-Lawinenzuges ist der Auffangdamm im Auslaufbereich der Lawine. Der Einfluss dieses Damms wird im Ergebnisdiagramm durch die Auslaufverteilung deutlich. Während für kleine Anbruchvolumina der rAMPP steigt, verhindert der Damm bis zu einem gewissen Abknickpunkt, das Über- oder Umfließen des Damms und somit Auslauflängen, welche den Damm übertreffen. Nachdem das Anbruchvolumen ausreicht, um Auslauflängen hinter

dem Damm zu erzeugen, ist eine stetige Zunahme von Auslauflänge und rAMPP zu beobachten, wobei die Änderungsrate mit zunehmendem Anbruchvolumen absinkt. Die Variabilität des rAMPP liegt im Bereich von 0,2–3,3 und die des Runout bei ca. –40m bis +270m projizierte Länge im Vergleich zum Referenzergebnis.

Weiters ist zu beobachten, dass kleine Schwankungen in den Anfangsbedingungen zu beachtlichen Unterschieden in den Ergebnissen führen können. In diesem Fall führt z.B. eine minimale Vergrößerung/Verkleinerung des Anbruchvolumens zum Überfließen des Damms.

Die Gründe für die zu beobachtenden Schwankungen könnten in der numerischen Modellimplementierung (Pseudo-Zufallsverteilung der numerischen Schneepartikel) liegen und bedürfen genauerer Untersuchung.

Hier kommt zum Tragen, dass mit AIMEC die Ergebnisse der kompletten Lawinensimulati-

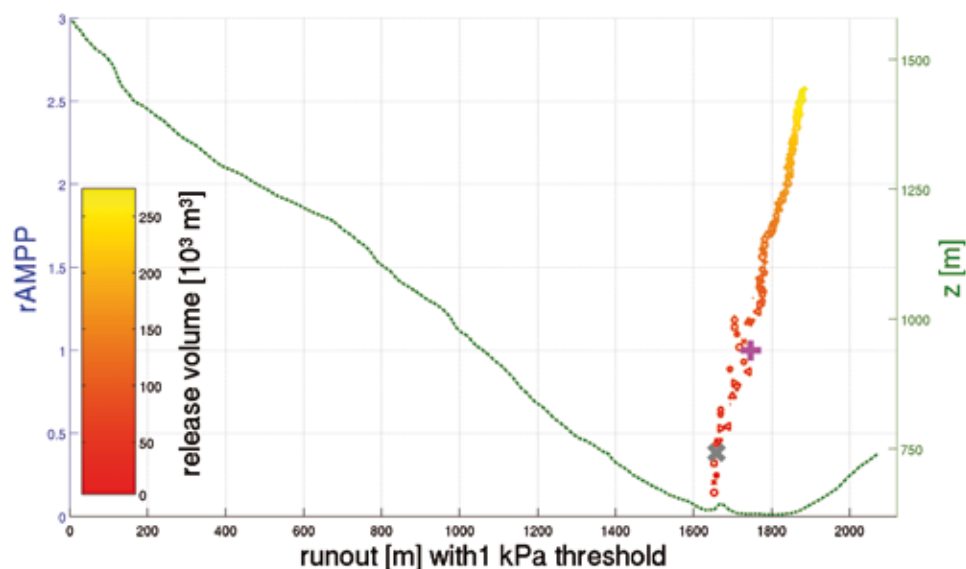


Abb. 4: Ergebnisse der AIMEC-Analyse. Dargestellt ist rAMPP vs. Runout. 100 Simulationen mit ansteigendem Anbruchvolumen. Referenzpunkt (rAMPP = 1) ist der Simulationslauf mit 55.000 m^3 (pink) Anbruchvolumen. Zusätzlich markiert ist das Ergebnis der Simulation mit 13.500 m^3 (grau) Anbruchvolumen.

Fig. 4: Results of the AIMEC analysis: Presented is rAMPP vs. runout. 100 sample simulations with increasing avalanche volume released. Point of reference (rAMPP=1) is the simulation sample with a released volume of $55,000 \text{ m}^3$ (pink). Additionally marked are the results of the simulation with a released volume of $13,500 \text{ m}^3$ (grey).

onssoftware (physikalisches Modell und numerische Implementierung) berücksichtigt, (was z.B. bei einfachen Untersuchungen der Rheologie oder vereinfachenden Analysen auf der Basis von Blockmodellen nicht der Fall ist).

Variation der Modellparameter (Monte Carlo Simulation)

Das Fließlawinenmodell von SamosAT beinhaltet sieben physikalische Modellparameter (Schneedichte ρ , Coulomb-Reibung μ , Turbulente Reibung (k, R, B), Mindestschubspannung τ_0 , Überhöhungsfaktor R_s^0). Im Folgenden werden diese Parameter in 1000 zufälligen Kombinationen variiert. Für jeden Parameter wurde eine Gleichverteilung innerhalb eines Intervalls verwendet, wel-

ches sich aus dem Standardwert der Kalibrierung (Sampl, 2006) $\pm 50 \%$ ergibt.

Diese Analyse hat zum Zweck die Bandbreite der Ergebnisspanne der Indikatoren, welche aus den Spitzendruckergebnissen von SamosAT gewonnen werden, abzuschätzen. In Abbildung 5 ist die Verteilungsdichte der Ergebnisse (rAMPP vs. Runout) für zwei solcher Monte-Carlo-Simulationen gezeigt. Die Anzahl der Ergebnisse nimmt von blau nach rot zu, im roten Bereich sind ca. 15 % der 1000 Simulationen zu finden. Es handelt sich hierbei wiederum um Ergebnisse des Lawinpfads Ryggfonn mit zwei unterschiedlichen Anbruchvolumina (13.500 und 55.000 m^3). Das Ergebnis der Referenzsimulation mit Standardparametern ist jeweils extra markiert.

Es zeigt sich innerhalb der Inputvariation

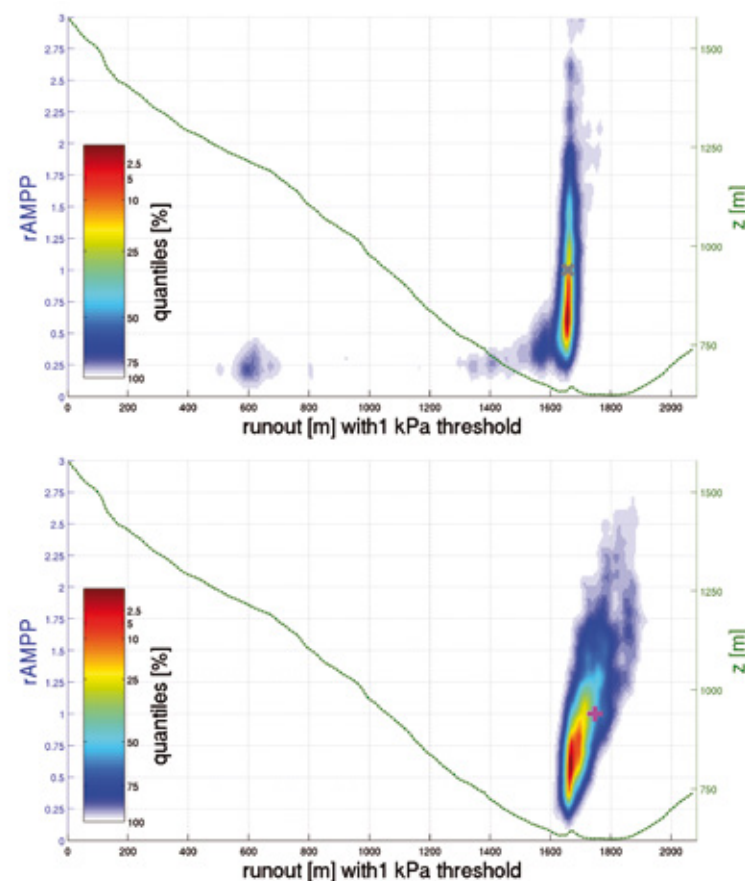


Abb. 5: AIMEC-Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen mit Anbruchvolumen 13.500 m^3 (oben) sowie 55.000 m^3 (unten). Gezeigt ist die Verteilungsdichte der 1000 Ergebnisse, welche von blau nach rot zunimmt. Der Anteil an Ergebnissen in gewissen Bereichen kann anhand der Quantile abgelesen werden; die Referenzsimulationen mit Standardparametern sind jeweils extra markiert (x, +).

Fig. 5: AIMEC results of the Monte-Carlo-simulation with avalanche volume released of $13,500 \text{ m}^3$ (top) and $55,000 \text{ m}^3$ (bottom). The figure shows the distribution density of the 1000 results, which increase from blue to red. The ratio of results in the various sections can be derived from the quantile. The reference simulation with standard parameters in each case is marked separately (x, +).

eine große Variabilität der Ergebnisse. Während für das kleinere Anbruchvolumen u.a. Auslauflängen (500 – 1750 m) im oberen Bereich des Lawinenpfads möglich sind, reichen die Auslauflängen bei hohem Anbruchvolumen bis auf den Gegenhang (1600 – 1950 m). Die Variabilität des rAMPP (und damit der Spielraum in modellierbaren Lawinengeschwindigkeiten) findet sich in beiden Fällen hauptsächlich im Bereich von 0,25–2,5 des Ergebnisses mit Standard-Parametern, wobei der Hauptteil der modellierbaren Ergebnisse unterhalb des rAMPP der Referenzsimulation liegt. Eine hohe Ergebnisdichte der Auslauflängen ist im Bereich des Damms zu beobachten. Dies ist als Charakteristikum des Lawinenpfads zu sehen und verdeutlicht den Einfluss der Topographie auf die Auslauflänge in SamosAT. Lawinen, die im oberen Bereich des Lawinenpfads „verhungern“ und so auch in der Natur beobachtet werden, können in kleiner Zahl mit gewissen Parameterkombinationen dargestellt werden, sind aber nur für kleine Anbruchvolumina möglich.

Zusätzlich ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse mit Standardparametern auch in der Analyse der Anbruchvolumina zu finden sind (vgl. Abb. 4).

Ausblick

Das Evaluationswerkzeug AIMEC bietet eine breite Anwendbarkeit und neue Möglichkeiten in den Bereichen Vergleich von Simulationsmodellen (z.B. SamosAT DFA und PSA), Vergleich und Evaluation von Modellen anhand von Felddaten oder als Werkzeug für wissenschaftliche Variantenstudien. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für eine neue Modellkalibrierung basierend auf einer Indikatoroptimierung. Zusätzlich kann AIMEC an verschiedene Fragestellungen durch die Erweiterung mit neuen Indikatoren (z.B. Ablagerungsform, Wachstumsindex bei Entrainment, etc.) angepasst werden. Die Ergebnisse bieten weiters die

Möglichkeit Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Lawinensimulationssoftware zu ziehen.

Somit stellt sich AIMEC als leistungsstarkes Unterstützungswerkzeug für den Umgang für die wissenschaftliche Analyse von mehrdimensionalen Ergebnisdaten von Lawinensimulationen dar.

Danksagung

Diese Arbeit wurde mit Geldern der Projekte OPTIMOS und SamosEV (BMLFUW, WLV) finanziert. Besonderer Dank gilt Peter Gauer (NGI) für die exemplarische Verwendung des Ryggfonn-Lawinenpfads, Philipp Jörg (SSL), Peter Sampl (AVL) sowie Antonia Zeidler und Karl Kleemayr (BFW) für ihre Unterstützung.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Dipl. Phys. Jan-Thomas Fischer
 BFW – Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren
 Hofburg/Rennweg 1, 6020 Innsbruck
 jt.fischer@uibk.ac.at

Literatur / References:

CHRISTEN, M., BARTELT, P., GRUBER, U. (2002). Aval-1d: An avalanche dynamics program for the practice. In International Congress Interpraevent, pages 715-725.

CHRISTEN, M., KOWALSKI, J., BARTELT, P. (2010). Ramms: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology, 63:1-14.

JOHANNESON, T., GAUER, P., ISSLER, D., LIED, K., editors (2009). The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments. European Commission. Directorate General for Research. M. Barbolini and U. Domaas, C. B. Harbitz and T. Johannesson and P. Gauer and D. Issler and K. Lied and T. Faug and M. Naaim and F. Naaim-Bouvet and K. M. Hakonardottir and L. Rammer.

LIED, K., BAKKEHOI, S. (1980). Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. Journal of Glaciology, 26:165-177.

MCCLUNG, D., LIED, K. (1987). Statistical and geometrical definition of snow avalanche runout. Cold Regions Science and Technology, 13(2):107-119.

OBERNDORFER, S., GRANIG, M. (2007). Modellkalibrierung des Lawinensimulationsprogramms SamosAT. Interner Bericht, WLV-Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL).

SALM, B., BURKHARD, A., GUBLER, H. U. (1990). Berechnung von Fliesslawinen: Eine Anleitung fuer Praktiker; mit Beispielen. Mitteilungen des Eidgenoessischen Instituts fuer Schnee- und Lawinenforschung, 47:1-37.

SAMPL, P. (1999). Samos-Handbuch. Technischer Bericht, BMLFUW.

SAMPL, P., ZWINGER, T. (2004). Avalanche simulation with SAMOS. Annals of Glaciology, 38:393-398.

SAMPL, P. (2006). SamosAT Modelltheorie und Numerik. Technischer Bericht, BMLFUW.

SAMPL, P., GRANIG, M. (2009). Avalanche simulation with SamosAT. In Proceedings of the International snow Science Workshop, Davos.

VOELLMY, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung, Sonderdruck aus dem 73. Jahrgang(12, 15, 17, 19 und 37):1-25.

ZWINGER, T. (2000). Dynamik einer Trockenschneelawine auf beliebig geformten Berghängen. Phd Thesis, Technische Universität Wien.

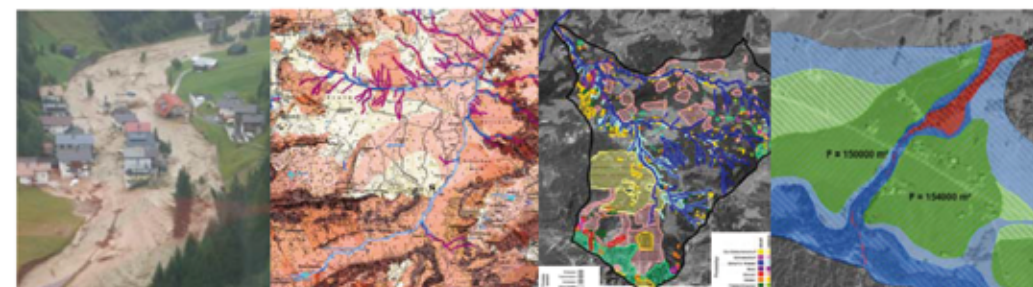
ZWINGER, T., KLUWICK, A., SAMPL, P. (2003). Numerical simulation of dry-snow avalanche flow over natural terrain. Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations, 11:161-194.

i.n.n. naturraum - management
 ingenieurgesellschaft
 geoinformatik
 geotechnik
 risk-management recht

i.n.n.
 ingenieurgesellschaft für
 naturraum - management mbH & Co KG
 tel (fax): 0043-512-342725 (11)
 mail: office@inn.co.at
 grabenweg 3a
 A-6020 innsbruck

Unsere Leistungen im Naturgefahren-Management:
 Regional- und Gefahrenzonenplanung Schutzkonzepte Gutachten
 Einreichplanung Ausschreibungen Umsetzungsbegleitung /-kontrolle

Weitere Bereiche: Umwelttechnik und Sportstättenplanung



ALEXANDER PROKOP, ANNA WIRBEL, BERNHARD PAYER, CHRISTINA DELANEY

Schneeverfrachtungsmodellierung – Stand der Technik

Snow Drift Simulation – State of the art

Zusammenfassung:

Mit der Erforschung des terrestrischen Laserscannens von Schneeoberflächen konnten erstmals im Winter 2004/05 durch die Schneeverfrachtung hervorgerufene Schneeablagerungen in Lawinenanbruchgebieten hochauflösend vermessen werden. Mit einem Schlag konnte plötzlich das Ergebnis von Schneeverfrachtungsereignissen mit einer Zentimetergenauigkeit festgestellt werden und somit konnten Schneeverfrachtungsmodellierungsergebnisse auf Ihre Plausibilität überprüft werden. Diesen Umstand machen sich seitdem unzählige internationale Forschungsprojekte zu Nutze, um stetig Modellansätze zu verbessern. Im Folgenden werden nun beispielhaft die Modelle Alpine-3D, SnowDrift3D sowie der Geländeparameter nach Winstral besprochen, die anhand der Daten eines Versuchsgebietes in Lech am Arlberg evaluiert wurden. Das Potenzial und die Grenzen der Schneeverfrachtungsmodellierung wurden anhand von Anwendungen in der Praxis nach heutigem Stand diskutiert.

Stichwörter:

Schneeverfrachtung, Modellierung, Simulation, Laserscannen

Abstract:

Using the first high resolution terrestrial laser scan measurements (Winter 2004/05) it was possible to measure spatially the snow depth distribution of avalanche release areas and, accordingly, the size of snow drift accumulations. Since then it has been possible to evaluate the result of snow drift events as well as of snow drift models by the laser measurements and several international research initiatives did so to improve the models. In this paper we present as examples the models Alpine-3D, SnowDrift3D and Winstral's terrain based parameters, which were evaluated at a test area in Lech am Arlberg. The potential as well as the limitation in applying the models in practice are discussed.

Keywords:

snow drift, modelling, simulation, laser scanning

Einleitung

Dank einer Initiative der Wildbach- und Lawinerverbauung, Sektion Vorarlberg, und des Instituts für Alpine Naturgefahren der BOKU-Wien kam 2004 Schwung in die seinerzeit eingeschlafene wissenschaftliche Diskussion über die Schneeverfrachtungsmodellierung. Der Grund für die fachlich festgefahrene Situation war damals, dass weder gesicherte Eingangsbedingungen für ein Modell, sprich dreidimensionale Windströmungen im komplexen alpinen Gelände, zur Verfügung standen, noch der Prozess der Schneeverfrachtung selbst physikalisch ausformuliert werden konnte. Zudem konnten Ergebnisse der Simulationen nicht überprüft werden, da Daten zur Schneehöhenverteilung in nur eindimensionalem Umfang existierten. Mit der Erforschung des terrestrischen Laserscannens von Schneeoberflächen (Prokop, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009) konnten erstmals im Winter 2004/05 durch die Schneeverfrachtung hervorgerufene Schneeablagerungen in Lawinenanbruchgebieten hochauflösend vermessen werden. Mit einem Schlag konnte plötzlich das Ergebnis von Schneeverfrachtungs-

ereignissen mit einer Zentimetergenauigkeit festgestellt werden und somit konnten Schneeverfrachtungsmodellierungsergebnisse auf Ihre Plausibilität überprüft werden. Diesen Umstand machen sich seitdem unzählige internationale Forschungsprojekte zu Nutze, um stetig Modellansätze zu verbessern. Im Folgenden werden nun diese Ansätze besprochen sowie das Potenzial und die Grenzen der Schneeverfrachtungsmodellierung nach heutigem Stand diskutiert.

Versuchsgebiet

Zum besseren Verständnis werden die Ergebnisse anhand eines Versuchsgebietes dargestellt. Das Gebiet befindet sich im Skigebiet Lech am Arlberg, ein Hang unterhalb des Mohnenflufs auf ca. 2300 m Seehöhe. Es eignet sich ausgezeichnet zur Überprüfung von Schneeverfrachtungsereignissen, da ein dominanter Grat eine typische Schneeverfrachtungssituation mit Wechtenbildung und dahinter abgelagertem Schnee im Leebereich hervorruft (Abbildung 1A). Von diesem Hang gibt es unzählige terrestrische Laserscanvermessungen und somit ist die Datengrundlage vorhanden, um verschiedene Schnee-

verfrachtungsmodelle zu überprüfen. Alleine die gemessenen Schneehöhendaten erbringen wichtige Erkenntnisse: 1) Es kann festgestellt werden, dass sich an einem Hang mit einer dominanten Windrichtung die Schneeablagerungsverteilung vom Winterhöchststand von Jahr zu Jahr kaum unterscheidet, lediglich die Schneehöhe differiert, je nachdem wie schneereich der Winter war (Abbildung 1 C,D,E,F). 2: Einzelereignisse korrelieren mit der Schneeverteilung vom Winterhöchststand, unterscheiden sich allerdings doch erheblich untereinander (Abbildung 1B).

Grundsätzlich dienen als Eingangswerte für die Modelle zur Windströmung und zur Schnee- verfrachtung Messdaten von meteorologischen Messstationen (hauptsächlich Wind-, Temperatur-,

und Schneehöhendaten), die im Versuchsgebiet stationiert sind. Alternativ wurden auch Eingangswerte von geringer aufgelösten meteorologischen Modellen übernommen (z.B. ALADIN).

ARPS-Alpine-3D

In Zusammenarbeit mit dem SLF Davos wurde das damals bereits vorhandene Modell anhand der Mohnenfluhdaten evaluiert. Dieses Modell wurde am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung Davos (WSL, SLF) speziell entwickelt, um den komplexen Wechselwirkungen zwischen Schnee und Atmosphäre gerecht zu werden. Für die Anforderungen dieser Arbeit wurden im Modell drei wesentliche Module, das

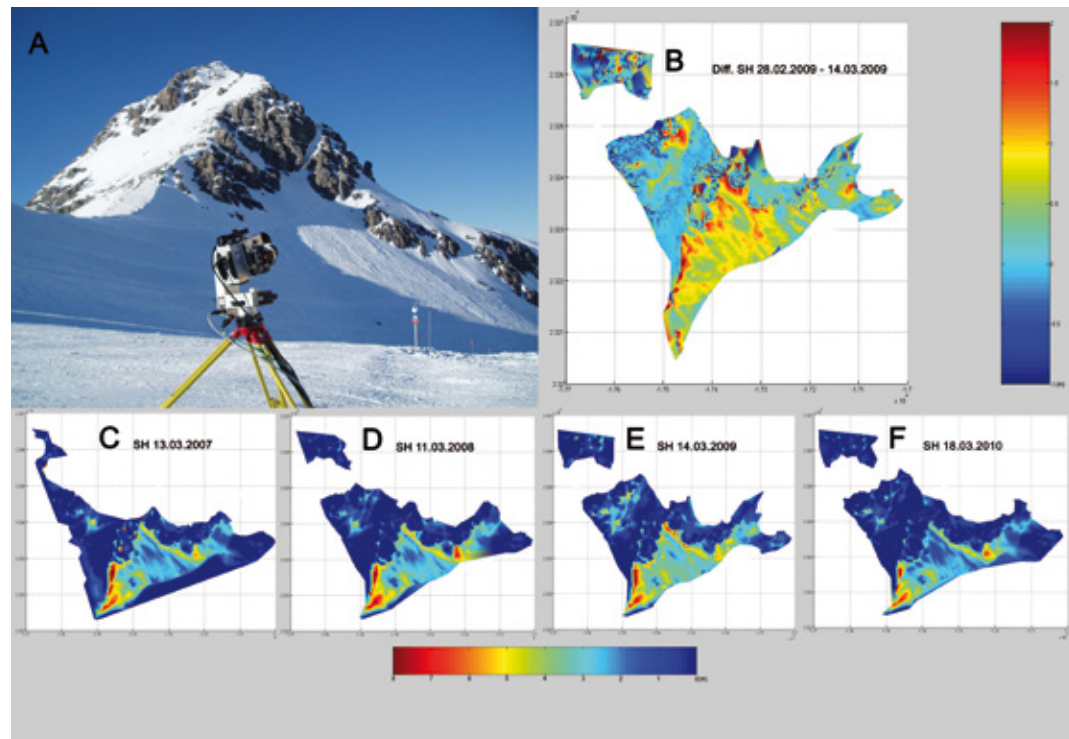


Abb. 1: Flächige Schneehöhenverteilung am Mohnenfluh, A: Testgebiet, B: Schneehöhenänderung zwischen dem 28.02.2009 und dem 14.03.2009. C: Schneehöhe am 13.03.2007, D: Schneehöhe am 11.03.2008, E: Schneehöhe am 14.03.2009, F: Schneehöhe am 18.03.2010.

Fig. 1: Spatial snow depth distribution at Mohnenfluh, A: Picture of test site, B: Snow height changes between 28 February 2009 and 14 March 2009, C: Absolute snow heights on 13 March 2007, D: Absolute snow heights on 11 March 2008, E: Absolute snow heights on 14 March 2009, F: Absolute snow heights on 18 March 2010.

Schneedeckenmodell, die Energiebilanzmodell und das Verfrachtungsmodell, gekoppelt. Das gekoppelte Modell erhält den Input aus dem Strömungsmodell ARPS. Dabei werden dynamisch und thermisch induzierte Strömungen in einer sehr hohen Auflösung mittels eines meteorologischen Modells ARPS (Advanced Regional Prediction System) berechnet. Das Modell ermöglicht es, durch die Topographie bedingte mikroskalige Strömungsmuster nachzubilden und thermisch bedingte synoptiskalige Strömungsmuster, beeinflusst durch die Großwetterlage, zu simulieren. Als Output erhält man für jede Gitterzelle einen dreidimensionalen Windgeschwindigkeitsvektor, der die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung beinhaltet. Zusätzlich erhält man Informationen über den Grad der Turbulenz für jeden Gitterpunkt.

Das Schneedeckenmodell stellt beim Modellaufbau ein weiteres Herzstück dar. In vielen anderen Verfrachtungsmodellen vergleichbarer Komplexität werden die Schneedeckeneigenschaften nur ungenügend berücksichtigt. Für die korrekte Berechnung der Verfrachtung, aber auch zur Abschätzung der Lawinengefahr ist eine Behandlung des Schneedeckenaufbaus und der Schneedeckeneigenschaften unerlässlich. Das Untersuchungsgebiet stellt ein komplexes Gelände dar. Mit zunehmender Komplexität des Geländes nimmt der Einfluss der Topographie auf die Strahlungsbilanz zu. In Abhängigkeit der Inklination und Exposition wird über ein dreidimensi-

onales Energiebilanzmodell für jede Gitterzelle eine eigene Energie- und Strahlungsbilanz berechnet. Die Schneedeckeneigenschaften bestimmen die Erodibilität der Schneedecke an jedem Punkt und beeinflusst damit wesentlich den Massentransport. Weiterhin bestimmen die Schneedeckeneigenschaften, insbesondere Kornform und Korngröße, die kritische Schubspannung der Strömung. Aus diesem Grund ist es notwendig den Schneedeckenaufbau sowie dessen Entwicklung in einem gesonderten Modul zu berechnen. Das Schneedeckenmodell SNOWPACK ist ein eigenständiges, physikalisch basiertes, eindimensionales, numerisches Energie- und Massenbilanzmodell. Die Parametrisierung der Schneeeigenschaften erfolgt dabei über die Berechnung der Schneemikrostruktur und näher durch die Berechnung der Metamorphoseprozesse.

Die Schnee- verfrachtung selbst wird über ein Driftmodul berechnet. Für jeden Zeitschritt wird die Schneedecke initialisiert und in Abhängigkeit von der berechneten Schneedeckeneigenschaften wird eine kritische Schubspannungsgeschwindigkeit berechnet, ab welcher der Saltationsprozess einsetzen kann. Dieser Wert

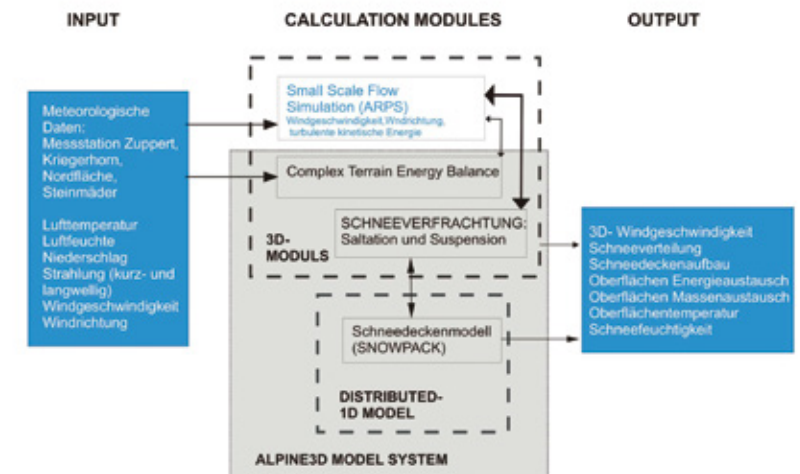


Abb. 2: Modellaufbau und Modelkopplung von Alpine-3D

Fig. 2: Model set-up of Alpine-3D

wird an das Verfrachtungsmodell übergeben. Wird dieser Schwellenwert überschritten, kann die Verfrachtung einsetzen. Je nach dem Grad der Turbulenz findet die Verfrachtung in Form von Saltation und Suspension statt. Das Verfrachtungsmodell, bestehend aus einem Saltations- und einem Suspensionsmodul, berechnet die Umverteilung des bereits abgelagerten Schnees durch das Saltations- und Suspensionsmodul sowie die räumliche Verteilung des fallenden Niederschlags durch das Suspensionsmodell.

Ergebnisse

Die Rechenzeit der Modelkette von Alpine-3D ist naturgemäß vergleichsweise aufwendig und nimmt einige Zeit in Anspruch, je nach Größe der zu modellierenden Fläche. Die gewählte horizontale Auflösung beträgt 5 m. Die Ergebnisse des Vergleiches zwischen modellierter und gemessener Schneehöhe zeigen, dass die Wechtenbildung hinter dem Grat sowie Teile der im Lee abgelagerten Schneemengen gut abgebildet werden konnten (Abbildung 3).

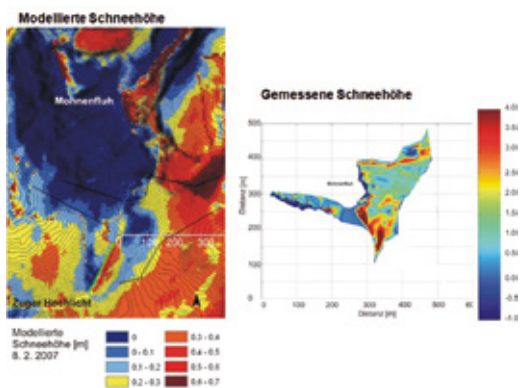


Abb. 3: Modellierter Schneehöhe mittels ALPINE-3D (links) sowie gemessene Schneehöhe (rechts) für ein Schneeverfrachtungereignis am 8.2.2007 (Prokop et al., 2007).

Fig. 3: Modelled snow heights using Alpine-3D (left) and measured snow heights (right) for a snow drift event from 8 February 2007.

SnowDrift3D

In Zusammenarbeit mit dem Christian-Doppler Laboratory on Particulate Flow Modelling der Johannes Kepler University, Linz, und der ZAMG Steiermark wurde das Schneeverfrachtungsmodell SnowDrift3D evaluiert (Schneiderbauer und Prokop, 2011). Das Modell ist ein atmosphärisches Schneetransportmodell, das im Gegensatz zu den meisten anderen Schneeverfrachtungsmodellen wie auch ALPINE-3D, den atmosphärischen Partikeltransport (Saltation und Suspension) in einer Phase mit einer passiven Transportgleichung berechnet. Das Modell benützt instationäre Windfelder in einer horizontalen Auflösung von bis zu 2 m, der Prozess selbst wird bis dato mit einem fluiddynamischen Löser (FLUENT) berechnet und ist direkt mit dem numerischen Wettervorhersagemodell ALADIN gekoppelt. Das Modell erlaubt es zudem, die Veränderung der Schneehöhe während eines Schneeverfrachtungereignisses zu berücksichtigen. Derzeit berücksichtigt das Modell die Schneedeckeneigenschaften nicht, daher kann es nur zur Modellierung einzelner Schneeverfrachtungereignisse verwendet werden.

Ergebnisse

Auch die Modellierung mit SnowDrift3D ist rechenzeitaufwendig, kann aber mittels handelsüblicher PCs vorgenommen werden. Das Modell ist kaum sensitiv für die Auflösung des Geländes und konnte ebenfalls die Wechtenbildung sowie die Ablagerungsformen im Lee des Hanges zufriedenstellend nachbilden (Abbildung 4). Für die Schneehöhenverteilung zum 24.03.2007 konnte eine gebietsweite Korrelation zwischen modellierter und gemessener Schneehöhe von $R=0,33$ erreicht werden. Das Modell wird derzeit aufgrund einer Initiative der ZAMG Steiermark weiterentwickelt.

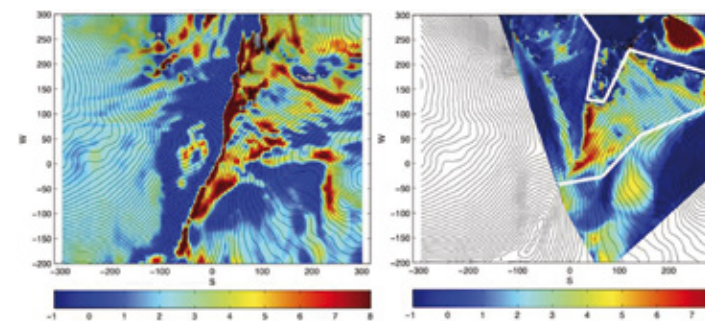


Abb. 4: Modellierter Schneehöhen berechnet mit SnowDrift3D (links) und gemessene Schneehöhen (rechts) am 24.03.2007 (Farbskala in Meter) (Schneiderbauer und Prokop, 2011)

Fig. 4: Computed snow drift pattern using SnowDrift3D (left) and measured absolute snow heights at 24 March 2007 (right) (colour bars in meters). The white lines indicate the confidence region of the measurement (Schneiderbauer and Prokop, 2011)

Einfache geometrische Modellierung mittels Geländeparameter

Da die zwei vorgestellten wie auch alle anderen numerischen Simulationsmodelle für die Schneeverfrachtung zeitaufwendig sind und lediglich nur von wahren Experten durchgeführt werden können, versucht man nun auch auf einfacherem Wege zum gewünschten Ergebnis (gegeben durch die mit dem Laserscanner gemessene Schneehöhenverteilung) zu gelangen. Ein Ansatz ist dabei der von Winstral et al. (2002) vorgestellte geländeabhängige Parameter. Dieser Parameter wird dadurch berechnet inwieweit eine Gridzelle eines

Geländemodells bezogen auf eine gewisse Windrichtung dieser ausgesetzt ist. Für diesen Modellansatz ist die Kenntnis der Windrichtung also ebenfalls von großer Bedeutung und kann durch eine Windmessstation zur Verfügung gestellt werden. Da der Wind ja nicht uniform aus genau einer Richtung kommt, kann in diesem Modell ein Zwickel, dessen Größe man selbst definiert, als Windrichtungseingangswert herangezogen werden. Ist die Windrichtung definiert, wird dann jede Gridzelle des Geländemodells ihrer Exposition dieser Windrichtung gegenüber analysiert.

Die Berechnung des geländeabhängigen Parameters ist verglichen zu numerischen Simulationsmodellen einfach und kaum zeitaufwendig.

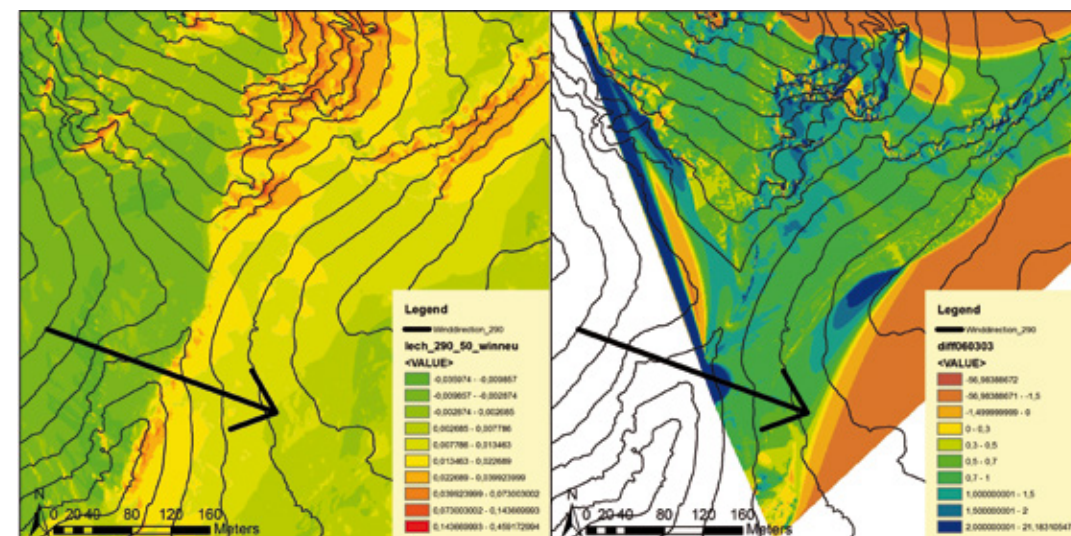


Abb. 6: Berechnung des Geländeparameters mit 290° Windrichtung (links) im Vergleich mit der gemessenen Schneehöhe (rechts).

Fig. 6: Calculation result of the terrain based parameter using a wind direction of 290° (left) and measured snow height (right).



Abb. 7:
Projekt-
gebiet
Burtscha-
kopf

Fig. 7:
Burtscha-
kopf test
area

dig. Ist die Windrichtung bekannt und herrscht eine eindeutige Windsituation vor, sind auch hier die Ergebnisse zufriedenstellend (Abbildung 6). Wechtenbildung und Schneeablagerungen im Lee konnten auch hier zufriedenstellend modelliert werden, es wurde eine Korrelation für bestimmte Gebiete zwischen gemessener und modellierter Schneehöhe von $R = 0,50$ erreicht. Natürlich können mit dem Geländeparameter lediglich Aussagen über die zu erwartende Schneehöhenverteilung getroffen werden, nicht aber über die Menge

an verfrachtetem Schnee, da ja Schneedeckenverhältnisse sowie die Menge an Schneepartikel in der Atmosphäre vernachlässigt werden.

Zusammenfassung und Einsatz in der Praxis

Alle vorgestellten und auch nicht vorgestellten Modelle zur Analyse von Schneeverfrachtungseignissen sind bis dato wie eigentlich die meisten numerischen Simulationsergebnisse mit den tatsächlich vorherrschenden Verhältnissen in der

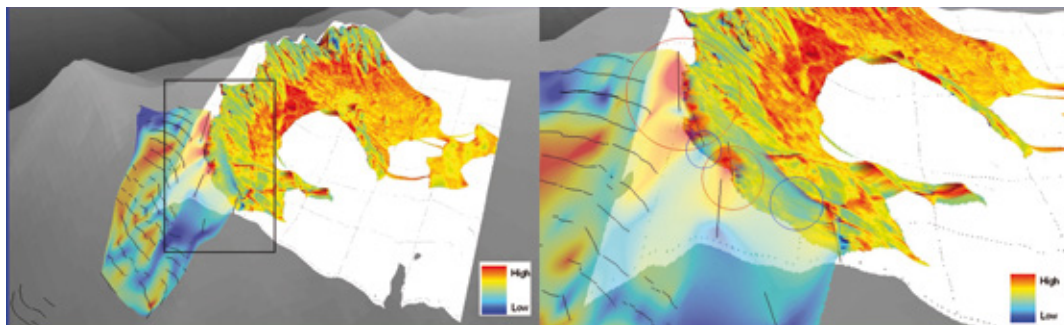


Abb. 8: Schneeablagerungsverhalten vor dem Umbau der Verwehungsverbauungen (rot: hohe Schneeablagerung, blau: kaum Schneeablagerungen). Schnee wird ins Anbruchgebiet verfrachtet.

Fig. 8: Snow accumulation behaviour before the snow fences were reconstructed (red: high snow height, blue: low snow height) as visible snow is transported in the avalanche release area.

Natur abzugleichen. Die flächige Schneehöhenmessung mittels Laserscanner bietet dazu eine ausgezeichnete Möglichkeit. Zudem muss der Anwender solcher Modelle eingearbeitet sein und ein Verständnis für Schneeverfrachtungsprozesse sowie für die numerische Simulation besitzen. Ist das gewährleistet, können Schneeverfrachtungsmodelle wichtige Erkenntnisse etwa für die Positionierung von Schutzverbauungen liefern. Das Institut für Alpine Naturgefahren wählt dabei einen kombinierten Ansatz aus Messung und Modellierung. So kann sichergestellt werden, dass sowohl Eingangswerte für die Modellierung als auch Ergebnisse vertrauenswürdig sind. Etwa wurde beim Sicherheitskonzept Thomasecklawine (Prokop et al., 2010) oder bei der Evaluierung der Verwehungsverbauung Burtschakopf (Prokop et al., 2009) das hochauflösende Windströmungsmodell ARPS mit der flächigen Schneehöhenmes-

sung mittels Laserscanner kombiniert, um genaue Aussagen über die Wirkungsweise der örtlichen Schutzverbauungen tätigen zu können. Bei beiden Projekten konnten Windeingangsdaten direkt einer Messstation, die am entscheidenden Grat positioniert war, entnommen werden. Durch die Analyse der Schneeverfrachtungssituation am Burtschakopf (Abbildung 7 und 8) konnten neue Verwehungsverbauungen positioniert und dimensioniert werden, die sich im vergangenen schneereichen Winter (2011/12) bereits bestens bewährt haben.

Ausblick

Das größte Manko der Schneeverfrachtungsmodellierung ist derzeit, dass die Menge an Schneepartikeln, die im Verfrachtungsprozess involviert sind und bei Schneefall aus der Atmosphäre zur



Abb. 9: Messgeräte am Col du Lac Blanc (verschiedene Windanemometer sowie Snow Particle Counter (SPC)).

Fig. 9: Measurement devices at Col du lac Blanc test area (different wind as well as snow particle counting (SPC) devices).

endgültigen Ablagerung beitragen, nicht bekannt ist. Daher befasst sich derzeit ein internationales Forschungsprojekt des Instituts für Alpine Naturgefahren mit der Meteofrance und IRSTEA (vormals CEMGREF) genau mit dieser Problemstellung. Am Col du Lac Blanc im Skigebiet von Alpe d'Huez gibt es ein Versuchsgebiet (Abbildung 9) in dem sämtliche benötigten Daten gemessen werden. Zum einen werden Windeingangsdaten in unterschiedlichen Höhen und Positionen gemessen, um dreidimensionale Eingangswerte für die Simulation zu erhalten, zum anderen werden die Menge und die Partikelgrößen der Schneekristalle, die im Verfrachtungsprozess involviert sind, ebenfalls in verschiedenen Höhen und Positionen gemessen. Natürlich werden auch die Schneehöhenablagerungen mittels Laserscanner untersucht. So kann man nun erkennen, wie sich die Auswirkungen unterschiedlicher Schneeverfrachtungsereignisse darstellen. Etwa kann der Einfluss eines zusätzlichen Schneefalls zur Schneeverfrachtung ohne Schneefall quantifiziert werden. Die Messergebnisse sollten somit zu einer weiteren Verbesserung der Schneeverfrachtungsmodelle beitragen.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Dr. Alexander Prokop
Mag. Anna Wirbel
Bernhard Payer
MSc. Christina Delaney

Institut für Alpine Naturgefahren,
Universität für Bodenkultur Wien
Peter Jordan Straße 82
1190 Wien
alexander.prokop@boku.ac.at

Literatur / References:

PROKOP, A.; RANA, L.; DELANEY, CH; SCHEKULIN, C; RACHOY, CH (2010): Sicherheitskonzept Thomasecklawine. Wildbach- und Lawinenverbau, 74. Jg, H. 165, 62-72.

PROKOP, A.; PROCTER, E; DELANEY, C (2009): Evaluierung der Verwehungsverbauung Burtshakopf-West; IAN Report 134. Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Vorarlberg, 82 S.

PROKOP, A (2009): Terrestrial laser scanning for snow depth observations: An update on technical developments and applications. In: Schweizer, J; Herwijnen, A. van (Eds.), ISSW 09 - International Snow Science Workshop: Proceedings, S. 192-196.

PROKOP, A (2008): Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. COLD REG SCI TECHNOL. 2008; 54(3): 155-163.

PROKOP, A., SCHIRMER, M., RUB, M., LEHNING, M. STOCKER, M. (2008): A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes. ANN GLACIOL, 49, 210-216.

PROKOP, A., TEUFELSBAUER, H. (2007): Die flächige Schneehöhenmessung mittels terrestrischer Laserscanner als Grundlage für Schneedeckenmodellierungen. In: Ernst & Sohn Verlag (Hrsg.), 1. Departmentkongress Bautechnik und Naturgefahren, 10. + 11. Mai 2007, Wien, 44-49.

PROKOP, A., MOTT, R. (2007): Snow Drift Simulation, Kriegerhorn. IAN Report 106/Part 3.B. Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Vorarlberg.

PROKOP, A. (2007): Terrestrisches Laserscanning zur Erkundung der Schneedecke. Forstzeitung, 5, 42-43; ISSN 1012-4667.

PROKOP, A. (2006): Hangbezogene Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung mittels Laserscannern. Wildbach- und Lawinenverbau, 154, 80-86.

PROKOP, A. (2005): Hangbezogene Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung mittels Laserscannern. www.riegl.com.

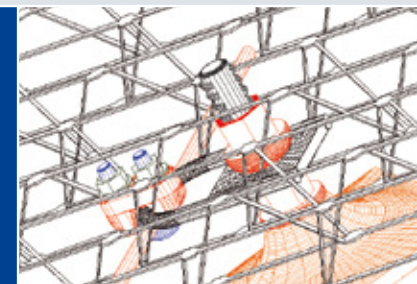
PROKOP, A., TEUFELSBAUER, H., MAYR, P., SCHEKULIN, C. (2005): Snow Drift Simulation Kriegerhorn. Zwischenbericht - IAN Report 106/Part 1: Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Vorarlberg.

SCHNEIDERBAUER, S; PROKOP, A (2011): The atmospheric snow-transport model: SnowDrift3D. J GLACIOL. 2011; 57(203): 526-542.

WINSTRAL, A., ELDER, K., & DAVIS, R. E. (2002). Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters. Journal of Hydrometeorology, S. 524-538.

Wir sichern und kultivieren die Erde

Steilwälle
Wasserbau
Entwässerung
Sonderkonstruktionen



Hang- u.
Böschungssicherung
Steinschlagschutz
Stützbauwerke



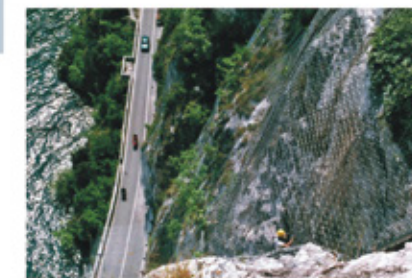
JK
KRISMER

J. Krismer | Bundesstraße 23
A - 6063 Innsbruck - Rum
www.krismer.at | office@krismer.at



TRUMER
Schutzbauten
GmbH

- Steinschlagschutz
- Lawinenschutz
- Fels- und Hangsicherung



SICHERHEIT DURCH KOMPETENZ

Weißbach 106 · A-5431 Kuchl · Tel.: +43 (0)6244-20325 · Fax: +43 (0)6244-20325-11
E-Mail: office@trumerschutzbauten.com · www.trumerschutzbauten.com

ENGELBERT GLEIRSCHER, JAN-THOMAS FISCHER, ROBERT WINKLER

Optimierung des Reflexionsdammes der Mühlauer-Klamm-Lawine

Optimizing the deflection dam of the Mühlauer Klamm avalanche

Zusammenfassung:

In der Mühlauer Klamm (Innsbruck) sind zwei Lawinenbremsbauwerke geplant, wobei eines schon errichtet ist. Der Bericht befasst sich mit dem zweiten Bauwerk, das oberhalb des schon bestehenden konstruiert werden soll. In skalierten Modellversuchen wird die optimale Lage und Höhe des Dammes bestimmt. Geschwindigkeitsauswertungen anhand von Videoanalysen liefern Geschwindigkeitsprofile entlang der Sturzbahn der Lawine. Durch den Vergleich dieser Profile aus verschiedenen Anordnungen kann die Effektivität des Bauwerks festgestellt werden. Es zeigt sich eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion infolge des Bremsbauwerks an einer bestimmten Position. Die Einhaltung von Ähnlichkeitsparametern soll einen Übertrag der Modellergebnisse in die Natur zulassen.

Stichwörter:

Lawinenbremsbauwerk, granulare Modellversuche, Mühlauer Klamm

Abstract:

Two mitigation measures are planned in the avalanche path of the Mühlauer Klamm (Innsbruck) avalanche, whereas one of them is already built. This report focusses on the second dam, which is planned above the existing construction. Granular scaled experiments determine the ideal position and height of the dam. Velocity evaluations based on videos supply velocity profiles along the avalanche path. The effectiveness of the planned dam is analysed by comparing different velocity profiles. The results show a significant reduction of velocities by placing the dam at a certain position. With compliance of similitude, the parameters results can be transferred from model to nature.

Keywords:

Avalanche-retarding structure, granular laboratory experiments, Mühlauer Klamm

Einleitung

Innsbruck ist von zahlreichen Lawinen bedroht (Gwercher & Blasch, 2006). In den Jahren zwischen 2002 und 2008 ist als permanente Schutzmaßnahme ein Lawinenbremsbauwerk in der Mühlauer Klamm errichtet worden, welches von Maschek et. al. (2011) untersucht wurde. Dieses Bauwerk soll den Fließwiderstand auf die ein-

kommende Lawine erhöhen und Turbulenzen induzieren, sodass die passierende Lawine eine Geschwindigkeitsreduktion erfährt.

Ein zweites Bremsbauwerk in der Form eines Keiles (Reflexionsdamm) ist noch nicht errichtet und wird im Rahmen von Modellversuchen auf seine Effektivität hinsichtlich der Bremswirkung untersucht. Das geplante Bauwerk hat zur Aufgabe, die Fließenergie im Bereich der Sturzbahn zu reduzieren, um Lawinen, welche poten-

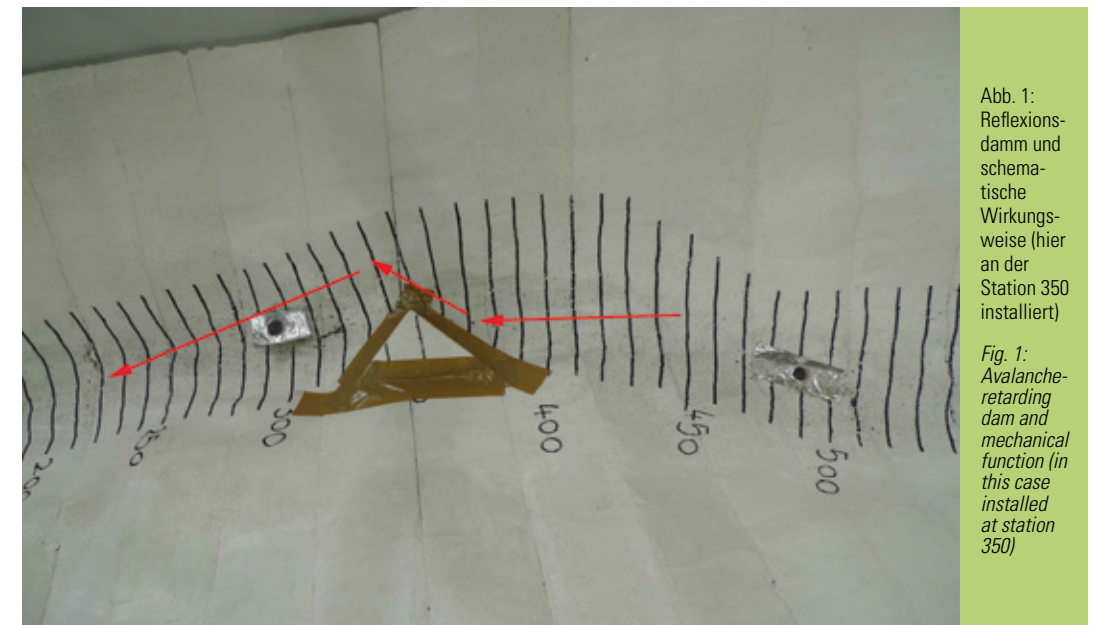


Abb. 1: Reflexionsdamm und schematische Wirkungsweise (hier an der Station 350 installiert)

Fig. 1: Avalanche-retarding dam and mechanical function (in this case installed at station 350)

ziell das bestehende Bauwerk erreichen in ihrer Wirkung auf dieses zu verkleinern um dadurch das Risiko für die Gemeinde Mühlau einzuschränken. Zudem sollen kleinere Lawinen durch den Reflexionsdamm zum Stillstand gebracht werden, sodass der Stauraum des bestehenden Damms für Großereignisse frei bleibt.

Ziel

Ziel ist es, die optimale Position und notwendige Höhe des Reflexionsdamms in Modellversuchen zu bestimmen. Neben der Effektivität des Bauwerks soll zusätzlich die Wirtschaftlichkeit und damit auch die Kubatur dieses Damms beachtet werden. Der Reflexionsdamm soll eine Höhe von 20 m nicht überschreiten, um einerseits das Landschaftsbild nicht zu sehr zu beeinträchtigen und andererseits Material- und Erdbewegungen einzuschränken. Das Bauwerk ist als Damm an einer Runsenflanke geplant, der den Querschnitt bis zur Hälfte verschließt. Die Wirkungsweise des

Bauwerks ist in Abbildung 1 dargestellt. Durch die zweimalige Ablenkung der Lawine soll die Geschwindigkeit und somit die Zerstörungskraft bzw. die Auslauflänge der Lawine verringert werden.

Versuchsaufbau und Messmethodik

Die Modellversuche werden in einer ca. 8 m langen Rutschbahn durchgeführt, welche im Wasserbaulabor der Universität Innsbruck errichtet ist. In dieser Rutsche wurde ein Geländemodell der Mühlauer Klamm mit dem Reflexionsdamm installiert. Durch eine Seilwinde kann die Rutschfläche und das Geländemodell in verschiedene Neigungen gebracht werden. Die Topografie ist aus Styropor im Maßstab 1:250 nachgebildet. So konnte ein Bereich von ca. 1000 m Naturlänge untersucht werden. In Abbildung 2 ist der Bereich um das bestehende untere Bremsbauwerk abgebildet.

Das bestehende Bauwerk ist in der Natur 23 m hoch, seine Höhe im Modell beträgt daher 9,2 cm. Der bergseitige Fußpunkt des Bremsbau-



Abb. 2: Die Topografie der Mühlauer Klamm im Bereich des bestehenden Bremsbauwerks (Blickrichtung vom Berg ins Tal)

Fig. 2: The topography of Mühlauer Klamm at the area of the avalanche-retarding structure (looking down-valley)

werks stellt den Nullpunkt dar (Stationen bergseitig erhalten positive Werte, talseitige Stationen werden mit negativen Werten gekennzeichnet). Die im Styropormodell eingetragenen Werte entsprechen dem Abstand vom Nullpunkt in Metern (in Naturmaße umgerechnet) und werden entlang der Falllinie gemessen.

Für die Feststellung der optimalen Lage wird der Reflexionsdamm an verschiedenen Positionen in der Sturzbahn installiert. Für jede Dammposition werden Experimente mit granularen Materialien durchgeführt. Verschiedene Größen, wie Geschwindigkeit und Fließmächtigkeit werden von diversen Messinstrumenten aufgezeichnet. Durch den Vergleich dieser Parameter soll die beste Lage und Höhe des geplanten Reflexionsdamms herausgefunden werden.

Die Geschwindigkeitsauswertung erfolgt anhand von Bilderserien, die aus Videos gewonnen werden. Durch den bekannten Zeitschritt zwischen den Bildern und der gemessenen zurückgelegten Strecke der Lawinenfront während dieser Zeit kann die Geschwindigkeit berechnet werden.

Für die Modellversuche wurde ein Reflexionsdamm verwendet, der ca. 45° zur Hauptstoßrichtung der Lawine liegt. Welchen Einfluss Ablenkungen größerer oder kleinerer Winkel haben, wurde in diesen Experimenten nicht untersucht.

Modellähnlichkeit

Um aus Modellversuchen Rückschlüsse auf natürliche Lawinen ziehen zu können, bedarf es der Einhaltung von Ähnlichkeiten. Hier ist zu unterscheiden zwischen:

- geometrischer Ähnlichkeit (geometrische Größen),
- dynamischer Ähnlichkeit (Kräfte und Kraftwirkungen) und
- kinematischer Ähnlichkeit (Geschwindigkeit und Beschleunigung).

Das in den Versuchen fließende Material, die Topografie mit den Bauwerken und die Kubaturen müssen die geometrische Ähnlichkeit erfüllen. Die Bewegung des Versuchsmaterials muss zudem der natürlichen Lawinenbewegung kinematisch ähnlich sein. Da in den Versuchen keine Kräfte gemessen wurden, kann die dynamische Ähnlichkeit nicht analysiert werden. Um den Ähnlichkeiten Rechnung zu tragen, werden sogenannte dimensionslose Kennzahlen definiert, welche in der Natur und im Modell gleich groß sein sollen. Durch die Anpassung dimensionsloser Kennzahlen ist eine Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur gewährleistet (Buckingham, 1914). In den Versuchen wurden dimensionslose Kennzahlen von natürlichen Lawinen (Baillifard, 2007) mit dimensionslosen Kennzahlen aus den Versuchen verglichen. Als eine der wichtigsten dimensionslosen Zahlen für gravitationsbestimmte Strömungen gilt die Froude-Zahl. Sie ist abhängig von der Geschwindigkeit und Fließmächtigkeit der Lawine. Für die Variation der Froude-Zahl im Modell wird die Neigung der Topografie verändert. Das heißt, dass die in den Versuchen verwendete Geländeneigung höher ist, als jene in der Natur. Infolgedessen werden höhere Geschwindigkeiten generiert, was zu größeren (angepassten) Froude-Zahlen führt (Pudasaini & Hutter, 2007). Versuche wurden mit Rutschenneigungen zwischen 24° und 28° gegen die Horizontale durchgeführt.

Die Rohdaten (je Variante 1 Versuch) sind einer Fast-Fourier-Transformations-Glättung (FFT-Glättung) unterzogen worden. Unrealistisch große Schwankungen im Geschwindigkeitsprofil können so durch das Vernachlässigen von Frequenzen geglättet werden. Für die Abschätzung der Abweichung wurde vor der Durchführung des Versuchsprogramms ein Versuch mit 24° Rutschenneigung 4-mal unter denselben Randbedingungen durchgeführt. Zwischen diesen 4 Versuchen wurden für Geschwindigkeiten über

1m/s Abweichungen zwischen 5% bis 8% vom Mittelwert festgestellt. Bei Geschwindigkeiten unter 1m/s lagen die Abweichungen zwischen 10% und 26% deutlich höher. Dies zeigt, dass lediglich Geschwindigkeiten über 1m/s beachtet werden sollten.

Bei den Modellversuchen wirken keine Bindungskräfte zwischen den Partikeln. Kohäsion verhindert eine rollende Verteilung der Schneemassen, wie sie bei granularen Modellversuchen beobachtet wird. Daher ist anzunehmen, dass Bewegungen nahe dem Lawinstillstand im Modell nicht, bzw. nicht naturgetreu wiedergegeben werden können.

Granulat

Zunächst war es notwendig, ein Granulat zu finden, welches den im oberen Absatz geschilderten Ähnlichkeiten Rechnung trägt. Es soll daher im Geländemodell mit ähnlicher Geschwindigkeit fließen wie die Naturlawine in der Mühlauer Klamm. Zwei verschiedene Granulate werden in den Versuchen als Substitutionsmaterialien für Schnee eingesetzt. Es sind dies graphitbeschichtetes Sty-

roporgranulat und Glaskugeln. In Vorversuchen mit Styroporgranulat wurden die Partikel aufgrund der Reibung im Geländemodell so stark verzögert, dass das Granulat zu geringe Geschwindigkeiten erreichte (<1m/s), wodurch Rückschlüsse auf natürliche Lawinen unzulässig waren. Mit Glaskugeln als einzigem Ersatzmaterial war die Geschwindigkeit der Lawine zwar größer, es bildete sich jedoch keine klare Lawinenfront, was eine Geschwindigkeitsanalyse unmöglich machte. So wurden Versuche mit einem Materialgemisch aus beiden Granulaten durchgeführt. Das Gemisch bewegt sich mit einer Frontgeschwindigkeit von bis zu 3m/s (entspricht ca. 33m/s in der Natur), wobei die an der Lawinenoberfläche strömenden Styroporpartikel eine geschlossene Lawinenfront erzeugen. In den Modellversuchen wird eine Granulatmenge von insgesamt 9 Litern verwendet. Das Mischungsverhältnis beträgt 1:1 (4,5 Liter graphitbeschichtetes Styroporgranulat, 4,5 Liter Glaskugeln). Die Menge von 9 Litern entspricht der Kubatur einer Lawine mit ca. 140.000 m³ in der Natur. Abbildung 3 zeigt die in den Versuchen verwendeten Substitutionsmaterialien.

Vor der Durchführung eines Experiments

wird das Granulatgemisch in eine Auslösevorrichtung geschüttet, welche mit einer vorgespannten Öffnungsklappe ausgerüstet ist. Durch das Ziehen eines Splints öffnet sich die Klappe schlagartig und das Granulat fließt in das Styropormodell. Wie bei natürlichen gravitativen Strömungen findet auch im Modell eine Segregation der Partikel statt.

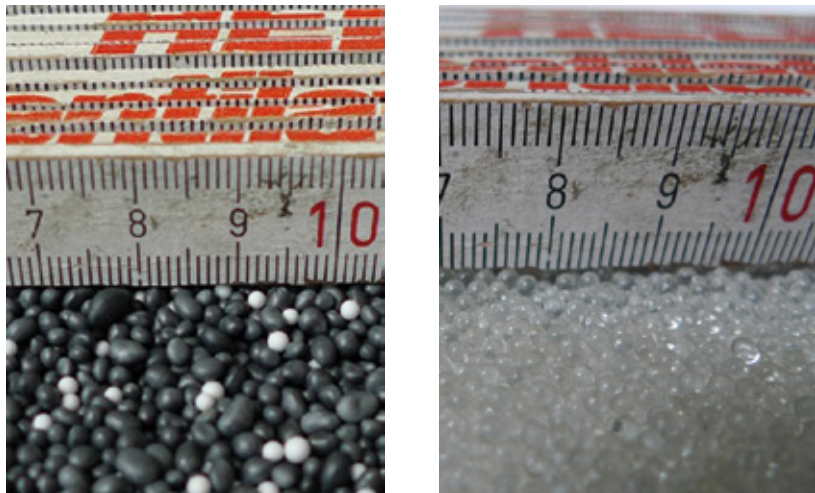


Abb. 3: Granulat: (links) graphitbeschichtete Styroporpartikel; (rechts) Glaskugeln

Fig. 3: Granules: (left) styrofoam globules; (left) glass globules

So finden sich die Glaskugeln (größere Dichte) im unteren Bereich des Runsenquerschnitts, während die leichteren Styroporpartikel an der Oberfläche und an der Front strömen.

Optimierung der Dammposition

Der Reflexionsdamm wurde in mehreren Versuchen an verschiedenen Positionen im Geländemodell installiert. Die Wahl der Positionen erfolgte aufgrund von Beobachtungen der Lawinenfront in Modellversuchen, bei denen kein Reflexionsdamm im Geländemodell installiert war (Nullvarianten). Diese Beobachtungen lassen erkennen, an welchen Stellen die Lawine durch die natürliche Topografie ihre Richtung ändert. Durch die Ausnutzung topografischer Gegebenheiten kristallisierten sich 3 Positionen heraus, die einer genaueren Analyse unterzogen werden (Abbildung 4):

1. Station 330: An dieser Station (330m oberhalb des bestehenden Bauwerks) wird der Reflexionsdamm orografisch rechts installiert. Der Damm befindet sich am Ende einer Linkskrümmung. Diese Krümmung soll derart ausgenutzt werden, dass die Lawinenfront direkt auf die bergseitige Fläche des Dammes auftrifft und durch die Erzeugung von Turbulenzen verzögert wird.
2. Station 350: Der Damm befindet sich an dieser Stelle in der Linkskrümmung. Die Lawinenfront soll am Reflexionsdamm

abgelenkt und am Gegenhang aufprallen. Ziel ist eine Geschwindigkeitsreduktion durch diese zweimalige Ablenkung. In diesem Bereich ist die Klamm von steilen Flanken begrenzt. Der Damm befindet sich orografisch links.

3. Station 400: Der Damm befindet sich hier am Beginn der Linkskrümmung und soll eine ähnliche Wirkung erzielen wie der Damm an Station 350. Der Reflexionsdamm ist bei dieser Station orografisch links installiert.

In Abbildung 5 sind die Frontgeschwindigkeitsverläufe aus 4 Versuchen gegenübergestellt. Alle abgebildeten Versuche wurden mit einer Rutscheneigung von 24° gegen die Horizontale durchgeführt. Zwischen den Versuchen mit dem Dammeinbau an Station 330 und 350 ist kein gravierender Geschwindigkeitsunterschied im Vergleich zur Nullvariante zu erkennen (Abbildung 5). Deutlich ist hingegen der Einfluss des Reflexionsdammes an der Station 400. Hier findet zunächst eine starke Geschwindigkeitsreduktion durch den Reflexionsdamm statt und infolge der niedrigen Geschwindigkeiten kommt es zu einem Lawinstillstand schon vor dem Erreichen des unteren Bauwerks (Station 0).

Um diese Auswirkung zu verdeutlichen, ist in den Abbildungen 5 bis 8 die Lage der Modelllawine bei den 4 Versuchen zu erkennen. Die Zeitdifferenz zwischen der Auslösung der Lawine

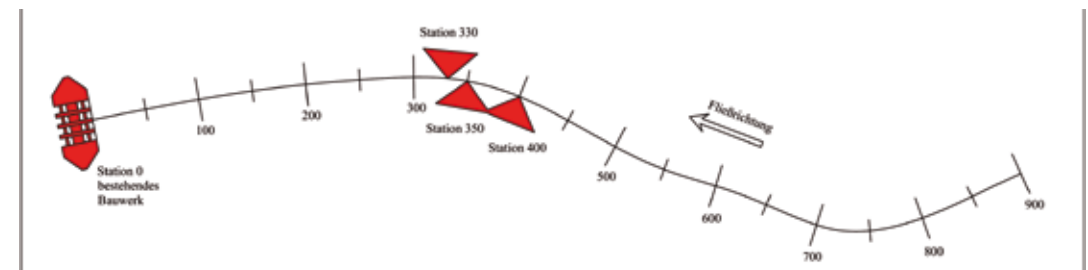


Abb. 4: Schematische Zeichnung der Dammpositionen

Fig. 4: Schematic sketch of the dam position

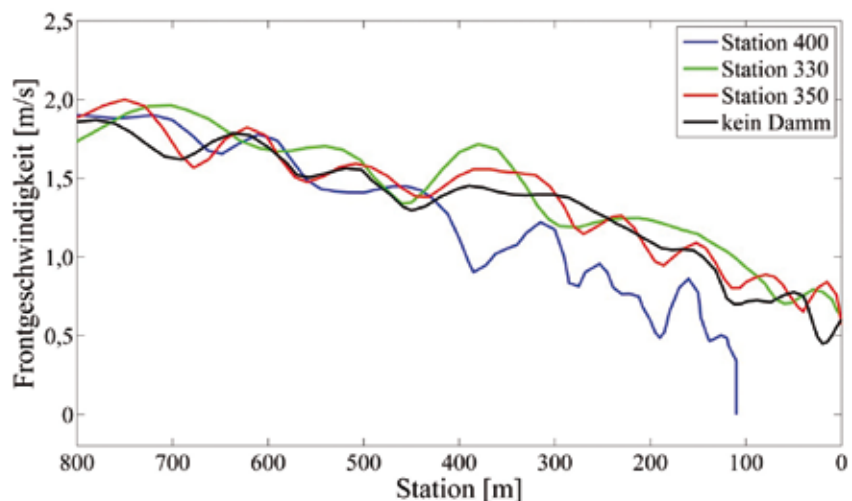


Abb. 5: Frontgeschwindigkeitsverläufe aus 4 verschiedenen Versuchen

Fig. 5: Progression of front velocity of four different samples

bis zum Zeitpunkt der Bildaufnahme beträgt in allen Fällen 5 Sekunden.

Der Vergleich der Abbildungen 6 und 7 bestätigt, dass der Damm an Position 330 nahezu keine Auswirkung auf die Lawine hat. Abbildung 8 zeigt einen leichten Aufstau beim Reflexionsdamm, während Abbildung 9 auf eine deutliche Verzögerung des Lawinenkörpers im Vergleich zur Nullvariante in Abbildung 6 hin-

weist. Dies dürfte in der Natur zu einer Lawinenablagerung beim Reflexionsdamm führen. Somit können kleinere Lawinen das Auffangbecken des bestehenden Dammes nicht erreichen. Das Auffangvolumen wäre daher für ein Großereignis reserviert, sofern es noch zu keiner Vorverfüllung gekommen ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Installation des Dammes bei Station 400 zu



Abb. 6: Nullvariante

Fig. 6: Zero alternative



Abb. 7: Station 330

Fig. 7: Station 330



Abb. 8: Station 350

Fig. 8: Station 350



Abb. 9: Station 400

Fig. 9: Station 400

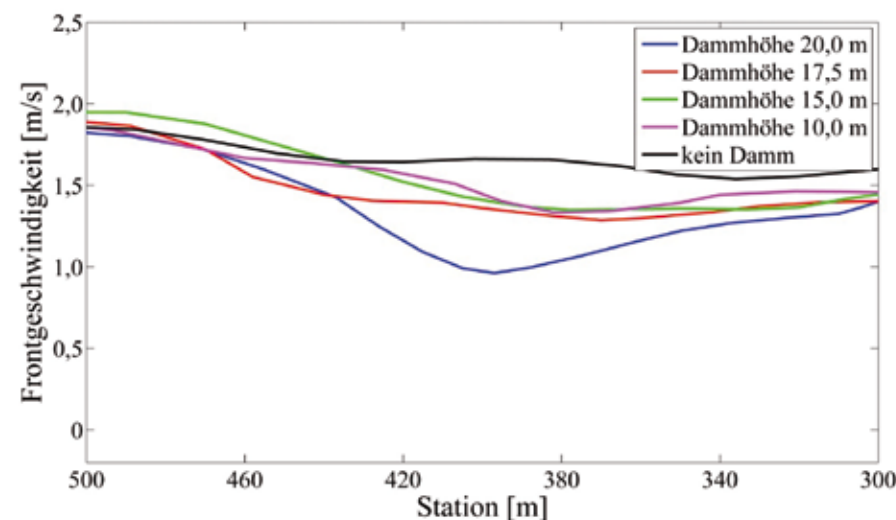


Abb. 10: Frontgeschwindigkeitsverläufe bei verschiedenen Reflexionsdammhöhen (27° Rutscheneigung)

Fig. 10: Progression of front velocity for different heights of reflexion dams (27-degree slope angle)

den deutlichsten Geschwindigkeitsreduktionen führt, auch zum größten Aufstau im Bereich des Reflexionsdammes und dadurch zu geringeren Geschwindigkeiten im weiteren Lawinenpfad. So wird auch die potenzielle Gefährdung des betroffenen Siedlungsbereiches in Mühlau geringer. Für eine detailliertere Analyse dieser Ergebnisse sei auf Gleirscher (2011) verwiesen.

Optimierung der Dammhöhe

Um die Wirkungsweise des geplanten Bauwerks bei verschiedenen Höhen vergleichen zu können, wurde der Reflexionsdamm schrittweise verkleinert. Folgende Bauwerkshöhen wurden untersucht:

1. 20,0m Höhe (8cm im Modell)
2. 17,5m Höhe (7cm im Modell)
3. 15,0m Höhe (6cm im Modell)
4. 10,0m Höhe (4cm im Modell)

Der Auswertungsvorgang ist derselbe wie für die Versuche der Lagebestimmung. Abbildung 10 zeigt die Frontgeschwindigkeit um die Station 400 bei einer Rutscheneigung von 26° gegen die Horizontale. Es ist zu erkennen, dass der Reflexionsdamm bei allen Versuchshöhen zu einer Geschwindigkeitsreduktion im Vergleich zur

Nullvariante führt. Die größte Auswirkung hat der Damm mit einer Höhe von 20m. Zwischen den Versuchen mit den Dammhöhen 17,5 m, 15 m, und 10 m ist ein nur geringer Unterschied auszumachen.

Auch für die Höhenbestimmung des Reflexionsdammes wurden Versuche mit verschiedenen Rutscheneigungen miteinander verglichen. Der Reflexionsdamm mit einer Höhe von 10 m führt im Modell zu Geschwindigkeitsreduktionen von bis zu 25%, verglichen mit der Aufprallgeschwindigkeit am Damm. Die Reflexionsdämme mit einer Höhe von 15 m bzw. 17,5 m verringern die Geschwindigkeiten um bis zu 43%. Die deutlichste Geschwindigkeitsreduktion liefern Versuche mit einer Dammhöhe von 20 m, wo sich die Frontgeschwindigkeiten um bis zu 52% verringern.

Alle Modellversuche wurden ohne eine vorherige Verfüllung der Dämme durchgeführt. Hier muss erwähnt werden, dass durch eine Vorverfüllung die Wirkung eines Dammes verschlechtert werden kann. Diese Tatsache spricht somit auch für die Errichtung eines größeren Dammes, da ein kleinerer Damm schneller verfüllt wird.

Zusammenfassung

In den Modellversuchen konnte gezeigt werden, dass die Lage des Reflexionsdammes in der Sturzbahn eine deutliche Auswirkung auf den weiteren Frontgeschwindigkeitsverlauf hat. Es konnte eine Position festgestellt werden, welche stets zu den geringsten Geschwindigkeiten im weiteren Verlauf führt und damit die beste Wahl für die Lage des Reflexionsdammes darstellt.

Zur Effektivität der Dammhöhe lässt sich feststellen, dass ein größerer Damm zu einer größeren Verzögerung führt.

Die Wirkung des Dammes konnte in den Modellversuchen einleuchtend dargestellt werden, jedoch geben Modellversuche nur annähernd die natürlichen Gegebenheiten wieder.

Da im skalierten Modell der Effekt der Kohäsion nicht abgebildet wird, sind Auslauflängen im Modell stets größer. So wird das bestehende Bauwerk von Lawinen im Modell erreicht und führt zu Vorverfüllungen, wobei diese zu hoch eingeschätzt werden. Die Werte am neu zu planenden Damm können jedoch als übertragbar angenommen werden. Weiters wird die Verdichtung von Schnee beim Aufprall auf Hindernissen im Modellversuch nicht abgebildet. Dieser Energieverlust infolge Verformung wird bei Lawinen in der Natur zu geringeren Geschwindigkeiten führen als im Modellversuch. Die Größenordnung kann jedoch nicht abgeschätzt werden. Die Geschwindigkeiten unterhalb des geplanten Dammes sind daher eher niedriger und das Ergebnis kann als konservativ betrachtet werden. Der Damm in der Natur würde so eine bessere Wirkung als im Modell haben.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

DI Engelbert Gleirscher
DI Jan-Thomas Fischer
BFW
Hofburg, Rennweg 1, 6020 Innsbruck
engelbert.gleirscher@uibk.ac.at
jt.fischer@uibk.ac.at

Dr. Robert Winkler
Raitis 18
6162 Mutters

Literatur / References:

BAILLIFARD M.-A. (2007):
Interaction between snow avalanches and catching dams, ETH Zurich, Diss.

BUCKINGHAM E. (1914):
On physically similar systems, illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review* 4, 345-376

GLEIRSCHER E. (2012):
Experimentelle Untersuchung von Lawinenbremsverbauten in der Mühlauer Klamm. Diplomarbeit

GWERCHER A., BLAASCH G. (2006):
Neuartiger Lawinenschutz in der Mühlauer Klamm bei Innsbruck, Tirol. In: *Tiefbau* 5 (2006) S. 259 – 263

MASCHEK A., KERN M., GAUER P. (2011):
Untersuchungen der Funktionalität des Lawinenbremsbauwerkes der Mühlauer Klamm Lawine mittels kleinskaligem Modell, Forschungsbericht, BFW

PUDASAINI S.P., HUTTER K. (2007):
Avalanche Dynamics – Dynamics of rapid flows of dense granular avalanches. Springer



GEOGNOS BERTLE
Technische Geologie ZT GmbH



Kronengasse 6 A-6780 Schruns office@geologie-bertle.at

Geländekartierungen - Beratung Gefahrenzonen - Stabilitätsberechnungen - 2D/3D Steinschlagsimulationen



GEOTECHNIK HENZINGER

Zivilingenieur für Bauwesen

A - 6095 Grinzens, Plattach 5

Tel.: 05234/65533, Fax.: DW 5

e-mail: j.henzinger@geotechnik-henzinger.at

www.geotechnik-henzinger.at

GRUNDBAU - DAMMBAU - GEOTECHNIK

moser – jaritz + partner

Moser-Jaritz+Partner Ziviltechniker GmbH
Ingenieurkonsulenten
Geologie und Geotechnik
Naturgefahren und Risikomanagement
Umwelt- und Ressourcenmanagement

Bachwinkl 126
A 5760 Saalfelden
T +43 6582 74 494
F +43 6582 74 494-33
E saalfelden@mjp-zt.at

Münzfeld 50
A 4810 Gmunden
T +43 7612 75 101
F +43 7612 75 101-33
E gmunden@mjp-zt.at



www.mjp-zt.at

LUUK DORREN, BERNARD LOUP, HUGO RAETZO

Einsatz von Modellen in der Schweizer Sturzgefahrenbeurteilung

Application of models in Swiss rockfall hazard analyses

Zusammenfassung:

In der Schweiz bilden numerische Modellierungen ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Beurteilung von Sturzgefahren. In diesem Artikel präsentieren wir, wie diese Gefährdung in der heutigen Praxis berücksichtigt wird und welche Rolle die Modelle einnehmen. Zu Beginn behandeln wir die Schweizer Anforderungen und den Arbeitsablauf bei der Beurteilung von Sturzgefahren. Dabei diskutieren wir Aspekte der Transparenz bei der Anwendung von Modellen, sowie Vorteile und Beschränkungen von verschiedenen 2D und 3D Modellen. Unser Fazit ist, dass die Durchführung der Sturzmodellierung der Aufgabenstellung angepasst werden muss. Die Rolle des Modellbenutzers ist entscheidend für die Gefahrenbeurteilung. Darum soll klarer und nachvollziehbarer festgehalten werden, welche Grundlagen, Annahmen und Überlegungen zur Sturzgefahrenbeurteilung geführt haben.

Stichwörter:

Steinschlag, Felssturz, Simulation, Gefahrenanalyse, Anforderungen

Abstract:

In Switzerland, numerical models are an indispensable tool in the evaluation of rockfall hazards. In this article we present how rockfall hazards are being assessed in today's practice in Switzerland as well as the role played by models in this process. Therefore we present the Swiss requirements for hazard assessment, as well as a work flow for rockfall modelling. We discuss aspects of transparency in the use of models and the advantages and limitations of various 2D and 3D models. Our conclusion is that the realisation of a rockfall modelling study needs to be adjusted to the scope of the hazard analysis. The role of the model user is crucial for the outcomes of the hazard assessment. Therefore, it needs to be declared on which assumptions, considerations and agreements a rockfall hazard assessment has been performed.

Keywords:

Rockfall, rock avalanche, simulation, hazard analysis, requirements

Einleitung

Sturzgefahren (z.B. Steinschlag, Felssturz) stellen in vielen Bereichen unterhalb von Felswänden Probleme dar. Um die Gefahren zu beurteilen, ist es nicht nur erforderlich die Eintretenswahrscheinlichkeit, sondern auch die Intensität sowie die Reichweite der möglichen Sturzereignisse festzulegen. Daher bilden numerische Modellierungen ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Beurteilung von Sturzgefahren. Sie gelangen primär zum Einsatz bei der Erstellung von Naturgefahrenkarten, wo sie eine wichtige Grundlage für das integrale Risikomanagement bilden. In dessen Vordergrund stehen einerseits raumplanerische Massnahmen im Siedlungsgebiet (Ausscheidung von Gefahrenzonen in der Zonenplanung, gegebenenfalls Spezifikationen im Baureglement). Andererseits sind Gefahren- und Risikoanalysen auch für Verkehrswege und Einzelobjekte notwendig. Zudem sind Modellierungen hilfreich bei der Dimensionierung neuer Schutzbauten und bei der Beurteilung der Wirksamkeit bestehender Schutzbauten (Rovina et al., 2011).

In diesem Artikel präsentieren wir, wie Sturzgefahren in der heutigen Praxis in der Schweiz beurteilt werden und welche Rolle die Modelle einnehmen. Der Rahmen für diese Gefahrenbeurteilungen wird seit 1997 durch die Bundesempfehlung "Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten" (BRP/BWW/BUWAL, 1997; Raetzo & Loup, 2011) gegeben. Diese Empfehlung wurde überarbeitet und wird demnächst in einer neuen Richtlinie (BAFU, im Druck) publiziert. Die Grundprinzipien werden beibehalten. Mit dieser neuen Richtlinie wird unter anderem eine einheitlichere Beurteilung von Sturzgefahren angestrebt. Sie präzisiert, wie das für Sturzgefahren relevante Waldgesetz umgesetzt werden soll. Sie dient deshalb allen Akteuren, die in der Prävention vor Sturzgefahren tätig sind. Einige Prinzipien dieser Richtlinie und die Anforderungen bei der Gefahrenbeurteilung werden in diesem Artikel präsentiert. Zusätzlich erläutern wir den Arbeitsablauf, die Geländearbeit, die Transparenz von Modellen, die Vorteile und mögliche Beschränkungen von verschiedenen 2D- und 3D-Modellen.

Definitionen der Sturzprozesse

Das Ablösen von Fest- und/oder Lockergestein in steilem Gelände wird als Sturzprozess bezeichnet. Das Material bewegt sich frei fallend, springend, rollend oder fliessend in die Tiefe. Sturzprozesse sind schnelle Massenbewegungen. In der Schweiz werden vier Kategorien (Tabelle 1) gegliedert nach Volumen und Komponentengrösse unterschieden:

1. Steinschlag
2. Blockschlag
3. Felssturz
4. Bergsturz

Prozess	Durchmesser der Komponente	Volumen	Bemerkung
Steinschlag	< 50 cm	-	I.d.R. Einzelsteine pro Ereignis
Blockschlag	≥ 50 cm	≤ 100 m ³	I.d.R. Einzelblöcke pro Ereignis
Felssturz	-	> 100 m ³ ≤ 1 Mio. m ³	Felssturzmasse, i.d.R. Sturz einer Vielzahl von Fels- und Gesteinsblöcken, anschliessend Fragmentierung
Bergsturz	-	> 1 Mio. m ³	Initialphase mit kompakter Bergsturzmasse

Tab. 1: Sturzprozesse gemäss Schweizer Definition.

Tab. 1: Swiss rockfall definitions.

Steinschlag ist in den Alpen ein häufiger Prozess. Da die Sturzbahnen (Trajektorien) und Energien von kleinen und grossen Gesteinskörpern sehr viel variieren, ist eine Unterscheidung der Grösse mit der Masse oder dem Durchmesser von Bedeutung. Beim Zerfall einer Felswand spricht man bei kleinen Gesteinsbruchstücken (Durchmesser < 50 cm) von Steinschlag, bei grossen Bruchstücken (Durchmesser > 50 cm) von Blockschlag. Die Gesteinsart, Exposition, Frostwirkung und Verwitterung sind wichtige Bedingungen für diese Prozesse. Die Sturzgeschwindigkeiten im Transitgebiet liegen in der Regel zwischen 5 und 30 m/s.

Bei Felssturz handelt es sich um ein grös-

seres, in sich mehr oder weniger stark fragmentiertes Gesteinspaket das sich aus dem Gebirge löst. Das Materialvolumen beschränkt sich im Allgemeinen auf 100 bis mehrere 100'000 m³ pro Ereignis. Die Transportgeschwindigkeiten in Transitgebiete liegen in der Regel zwischen 10 und 40 m/s. In den Schweizer Alpen ereignen sich jedes Jahr mehrere Felsstürze.

Bei einem Bergsturz brechen grossvolumige Gesteinsmassen im Verbund ("en bloc") aus dem Gebirge. Kennzeichnend sind grosse Materialvolumen bis mehrere Millionen Kubikmeter, sowie Sturzgeschwindigkeiten von über 40 m/s. Das

abgebrochene Gestein kann über weite Distanzen (manchmal mehrere Kilometer) transportiert werden bis es zur Ablagerung kommt. Hier spielen aussergewöhnliche Mobilisierungsphänomene eine Rolle die heutzutage mit unterschiedlichen Theorien erklärt werden. Bergstürze vermögen die Landschaft nachhaltig zu verändern, zum Beispiel indem sie Barrieren für Bäche und Flüsse aufschütten, was die Überflutung von grossen Gebieten zur Folge haben kann. Bergstürze sind relativ selten. In den letzten Jahrhunderten ereigneten sich Bergstürze in der Schweiz in Derborence (18. Jh.), Goldau (19. Jh.), Elm (19. Jh.) und Six des Eaux Froides (bei Sierre, 1946).

Bearbeitungsstufen

Drei Bearbeitungsstufen (M1 bis M3), mit unterschiedlichen Anforderungen, wurden für die Gefahrenbeurteilungen festgelegt (BAFU, im Druck):

M1: Stufe Gefahrenhinweiskarte (grober Massstab, i.d.R. 1:50'000 bis 1:10'000)

M2: Stufe Gefahrenkarte (mittlerer Massstab, i.d.R. 1:10'000 bis 1:5'000)

M3: Stufe Massnahmenstudie (detaillierter Massstab, i.d.R. 1:5'000 bis 1:1'000)

Die höchsten Anforderungen gelten für die Planung von Massnahmen, für Detailstudien und für Gutachten (M3). In diesem Fall sind Unsicherheiten in der Beurteilung möglichst klein zu halten. Im Rahmen der Raumplanung müssen amtlich verbindliche Gefahrenkarten erstellt werden (M2). Auch hier wird ein relativ hoher Standard verlangt, der in seiner räumlichen Genauigkeit bei zirka zehn Metern liegt ("parzellengenau" im Siedlungsbereich). Für Gefahrenhinweiskarten gelten hingegen keine Anforderungen (M1), weil diese vom Gesetz her nicht verbindlich sind und entsprechend der Zielsetzung unterschiedlich erstellt werden.

Gefahrenstufen

Die Gefahrenstufen, die in der Schweiz gehandhabt werden, sind in der Intensität-Wahrscheinlichkeitsmatrix (siehe Abb. 1) definiert. Gemäss dieser Matrix muss für eine Gefahrenkarte die Intensität für das Ereignis, oder Szenario, mit einer hohen, mittleren, geringen und sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeit definiert werden. Diese wurden erstmals in BFF/SLF (1984) definiert und beschreiben in der Schweiz:

1. das häufige Ereignis, das man statistisch gesehen mehrmals (bis ungefähr 3 mal) im Leben beobachten kann (Wiederkehrdauer bis ungefähr 30 Jahre),

2. das seltene Ereignis das man statistisch gesehen 1 mal im Leben beobachten kann (Wiederkehrdauer bis ungefähr 100 Jahre),
3. das sehr seltene Ereignis, das grob genommen 10 mal seltener ist als das häufige Ereignis (Wiederkehrdauer bis ungefähr 300 Jahre), und
4. das extrem seltene Ereignis (Extremereignis, Wiederkehrdauer grösser als 300 Jahre, z.B., 500 oder 1000 Jahre).

Das Extremereignis wurde in der Vergangenheit nicht systematisch betrachtet. Die letzten Unwetter haben aber gezeigt, dass der Überlastfall und Extremereignisse für die Risikoanalyse und für die Vorbereitung der Interventionskräfte relevant sind. Bei Hochwassergefahren wird das Extremereignis in der Regel betrachtet. Die statistische Herleitung von Szenarien wird mit zunehmender Wiederkehrdauer, bzw. abnehmender Eintretenswahrscheinlichkeit schwieriger. Sehr seltene Ereignisse und vor allem Extremereignisse sind eher als qualitative Beurteilung einer Wahrscheinlichkeit zu betrachten.

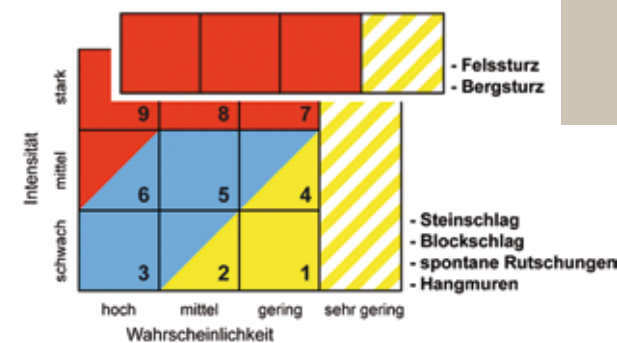


Abb. 1: Die Intensität-Wahrscheinlichkeitsmatrix mit den verwendeten Gefahrenstufen.

Fig. 1: The Swiss intensity-probability matrix with the used hazard classes.

Für Sturzgefahrenbeurteilungen werden oft zusätzlich ein jährliches und ein zehnjährliches Ereignis untersucht. Diese Szenarien sind für die Verkehrswege und die entsprechenden Risikoana-

lysen von Bedeutung. Für die Stufe M1 wird dagegen unabhängig der natürlichen Variationen nur ein einziges Szenario für grosse bis sehr grosse Gebiete definiert (z.B. für 40'000 km²).

Die Intensität wird auch in drei Klassen verteilt: schwach (0- 30kJ), mittel (30 – 300 kJ) und stark (> 300kJ). Diese Intensitätsklassen entsprechen in etwa denen von Mölk (2009) vorgeschlagenen Klassen bei der Ereignisdokumentation von Steinschlägen und Felsstürzen in Österreich. Für Gefahrenhinweiskarten werden in der Schweiz keine Intensitätskarten erstellt.

Transparenz

Die Modellierung alleine ist nicht ausreichend für eine verbindliche Sturzgefahrenbeurteilung auf den Stufen M2 und M3. Dies erfordert einen Arbeitsablauf mit sechs unterschiedlichen Phasen (Dorren et al., 2011, Mölk et al., 2011, Rovina et al., 2011). Die notwendige Darlegung von Annahmen und die Transparenz können nur dann gewährleistet werden, wenn im technischen Bericht für jede der sechs Phasen alles nachvollziehbar festgehalten wird. Die sechs Phasen des Arbeitsablaufes sind:

- A. Vorbereitungsphase
- B. Definition der Szenarien
- C. Sturzmodellierung
- D. Plausibilisierung der Modellergebnisse
- E. Festlegen der maximalen Reichweite
- F. Erstellen der Intensitäts- und Gefahrenkarten

Für eine Gefahrenhinweiskarte (M1) werden eher Rohdaten genutzt und die Phasen D, E und F meistens weggelassen.

Vorbereitungsphase

Während der Vorbereitungsphase müssen in erster Linie die historischen Ereignisse ausgewertet werden, weil diese einen ersten Überblick über das Ausmass und die Häufigkeit der Sturzereignisse vor Ort geben. Hierbei sind der Ereigniskataster, historische Karten (Siegfriedkarten, Dufourkarten), kantonale und kommunale Archive, sowie bestehende Sturzgefahrenbeurteilungen wichtige Grundlagen. Weitere Informationsquellen sind lokale Einwohner und Fachexperten im Gebiet, da sie meistens rezente und häufige Sturzereignisse gut kennen. Alle diese Aufzeichnungen sollen bewertet und auf ihre Plausibilität geprüft werden. Leider existieren kaum umfassende Aufzeichnungen. Wenn Daten vor Ort fehlen, können Informationen über benachbarte Hänge mit ähnlichen Eigenschaften (z.B. Geologie, Topographie und Oberflächenbeschaffenheit) hilfreich sein. Spezielle Kataster führen die Strassenämter (Tiefbauämter) und die Bahngesellschaften, weil deren Betrieb direkt mit den Ereignissen auf der Infrastruktur behindert wird (Rovina et al., 2011).

Weiter ist es extrem wichtig, das Studiengebiet zu beschreiben und zu kartieren. Das heisst, das Liefergebiet, das Transit- und Ablagerungsgebiet, sowie die bestehenden Schutzmassnahmen müssen lokalisiert und charakterisiert werden. Im Liefergebiet sind die strukturgeologischen Eigenschaften (Trennflächen, Felsstabilität etc.) zu analysieren und im Transit- und Ablagerungsgebiet muss die Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit, Dämpfung) aufgenommen werden. Die Eigenschaften des Waldes müssen aufgenommen werden, weil dessen Wirkung für Steinschlag relevant ist. Dazu gehört die Stammzahl, die Zusammensetzung der Baumarten, die Durchmesser- und die räumliche Verteilung der verschiedenen Waldbe-

stände und Schneisen im Wald. Laserscanningdaten ermöglichen eine automatische Erfassung von Wald und teilweise Stammdatens. (vgl. Persson, 2002; Dorren et al., 2006).

Der Gutachter erstellt auf den Stufen M2 und M3 eine Karte der Phänomene. Dabei müssen alle stummen Zeugen und notwendigen Daten aufgezeichnet werden (Abb. 2): Grösse, Form, Position der abgelagerten Steine, Steinschlagspuren, Einschläge am Boden und in der Höhe, z.B. mittels Erhebung von Steinschlagwunden an Baumstämmen (Schneuwly und Stoffel, 2008). Demnach müssen alle möglichen Schutzmassnahmen (Netze, Dämme, Verankerungen, Barrieren, Galerien, Betonmauer, Leitplanken entlang Strassen, usw.) aufgenommen werden. Hierbei sind die geografische Lage, der Werktyp und die geschätzte Energieaufnahmekapazität, sowie ihre Dimensionen zu beachten.

Die letzte Phase der Vorbereitung beschäftigt sich mit der Erstellung der Daten, die für die Modellierung benötigt werden. Dies beinhaltet die Generierung eines Hangprofils oder eines Digitalen Geländemodells (DGM). Genauigkeit und Qualität des DGMs müssen vorgängig geprüft werden. Weiter braucht es die Zuweisung der benötigten Modellparameter an Polygone oder Rasterzellen (für räumlich kontinuierliche Modelle) oder an Hangsegmenten (für Modelle basierend auf Hangprofilen). Die Auflösung des DGMs oder des Hangprofils hat einen grossen Einfluss auf die Modellergebnisse (Azzoni et al., 1995; Crosta und Agliardi, 2003). Für eine Hinweiskarte (M1) ist eine Auflösung von 10-20 m angepasst. Für die Stufen M2 und M3 sollten es 2-10 m sein.

Die Vorbereitungsphase und die Grundlagen müssen der Bearbeitungsstufe Rechnung tragen. Der Aufwand ist auf der Stufe M3 am grössten und entsprechend viel kleiner auf Stufe M1.



Abb. 2: Stumme Zeugen von Sturzereignisse im Schutzwald.

Fig. 2: Silent witnesses of rockfall events in a protection forest.

Definition der Szenarien

Mit den Szenarien beschäftigt wird festgelegt, welche Blockgrössen wo mit welcher Wahrscheinlichkeit abstürzen können. Bei der Bildung der Szenarien ist deshalb eine umfassende und sorgfältige Analyse der Trennflächenverhältnisse im Liefergebiet sowie eine Analyse der beobachteten Sturzkörper im Transit- und Ablagerungsgebiet von Bedeutung (Liniger 2006). Aus der Analyse im Liefergebiet ergeben sich die möglichen Bruchkörper, bzw. ihre Grösse und ihre Form. Die Analyse der Sturzkörper im Transit- und Ablagerungsgebiet gibt weitere Anhaltspunkte, mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Sturzkörpergrösse zu erwarten ist. Diese Annahme entspricht einer Extrapolation, die mögliche Veränderungen der Stabilitätsverhältnisse im Einzugsgebiet ausblendet. Veränderungen können beispielsweise klimatischer oder hydrogeologischer Art sein.

Die Ereignisdokumentation sowie die klare Unterscheidung zwischen jungen und alten Sturzkörpern bzw. aktiven und weniger aktiven Ausbruchgebieten bilden wichtige Grundlagen bei der Wahl der Szenarien (Rovina et al. 2011). Bei der Betrachtung abgelagerter Blöcke ist zu beachten, dass sie beim Sturzvorgang möglicherweise in kleinere Teilkörper zerbrochen sind.

Wenn eine komplette Dokumentation der historischen Ereignisse vorliegt, dann können darauf basierende Angaben über die Eintretenswahrscheinlichkeit gemacht werden. Die meisten dieser Aufzeichnungen sind unvollständig, weil dies mit Aufwand verbunden ist und weil man früher Ereignisse schlicht nicht dokumentierte. Eine statistische Herleitung über eine Zeitreihe von Jahrhunderten ist deshalb selten realistisch, weshalb für grosse, seltene, sehr seltene und extreme Sturzereignisse Annahmen der Experten notwendig sind. Dabei bildet die Analyse der Trennflächenverhältnisse und, wenn möglich, auch die Analyse der beobachteten Sturzkörper im Transit- und Ablagerungsgebiet, eine wichtige Grundlage.

Sturzmodelle

Im Bereich der Sturz-Modellierung werden verwendete Modelle häufig in zwei Gruppen aufgeteilt: zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) Modelle. Meistens sind 2D Modelle diejenigen, die ein Hangprofil verwenden. 3D steht für völlig unterschiedliche Modellarten. Für einige sind es Modelle, die Sturztrajektorien in einem 3D Raum (x, y, z) berechnen. Für andere sind es Modelle, die ein DGM verwenden. Es gibt leider keinen Konsens für diese Definition. Entscheidend sind die räumlichen Dimensionen, in denen das verwendete Modell die Berechnungen durchführt. Analog der gängigen Praxis verwenden wir hier die Begriffe 2D für die Methodik mit Hangprofilen und 3D für Modelle, die ein DGM verwenden.

Grundsätzlich werden in der Schweizer Praxis drei Modellarten eingesetzt:

1. Geometrische Modelle (2D oder 3D)
2. Trajektorienmodelle (2D oder 3D)
3. Prozessbasierte Felssturzmodelle (2D oder 3D)

Geometrische Modelle beschreiben eine statistische Beziehung zwischen der Fallhöhe und der Länge der Auslaufstrecke. Diese Modelle sind alle auf dem Prinzip des Pauschalgefälles (Heim, 1932) entwickelt worden. Die Grundsätze sowie ihre Möglichkeiten sind in der Literatur ausführlich beschrieben worden (z.B. Körner 1980, Jaboyedoff & Labiouse, 2011). Geometrische Modelle werden in der Praxis sowohl für Steinschläge als für Fels- und Bergstürze eingesetzt. Sie können für ein Hangprofil, oder flächig auf der Basis eines DGMs verwendet werden.

Das gleiche gilt für Trajektorienmodelle. Bei diesen Modellen werden die Sturzbahnen der einzelnen Blöcke (Trajektorien), sowie Energien, Durchgangsfrequenzen und Sprunghöhen auf einem Hangprofil oder einem DGM berechnet (Abb. 3). Volkwein et al. (2011) geben dazu eine detaillierte Übersicht. Für die Durchführung der Modellierung ist die Bestimmung von Liefergebieten, Blockgrößen und Geländeparametern erforderlich (Rovina et al., 2011). In der Schweiz gelangen verschiedene solche Modellierungsprogramme zum Einsatz. Die zur Zeit in der Praxis häufig verwendeten sind CRSP, EBOUL, RocFall, Rockfall V7.1, RockFall Analyst, Rockyfor3D und Zinggeler+Geotest. Sie wurden von Rovina et al. (2011) näher untersucht. Die Ergebnisse findet man unter http://www.sfig-gsgi.ch/Arbeitsgruppen/ProgrammVergleich_komplett_20120207_1.pdf.

Leider gibt es nur wenige Studien zur Beurteilung der Qualität. Für Energien, Geschwindigkeiten, Sprunghöhen und Auslaufdistanzen liegen nicht systematisch Messwerte und Modelldaten zum Vergleich vor, weshalb man nicht weiss, ob

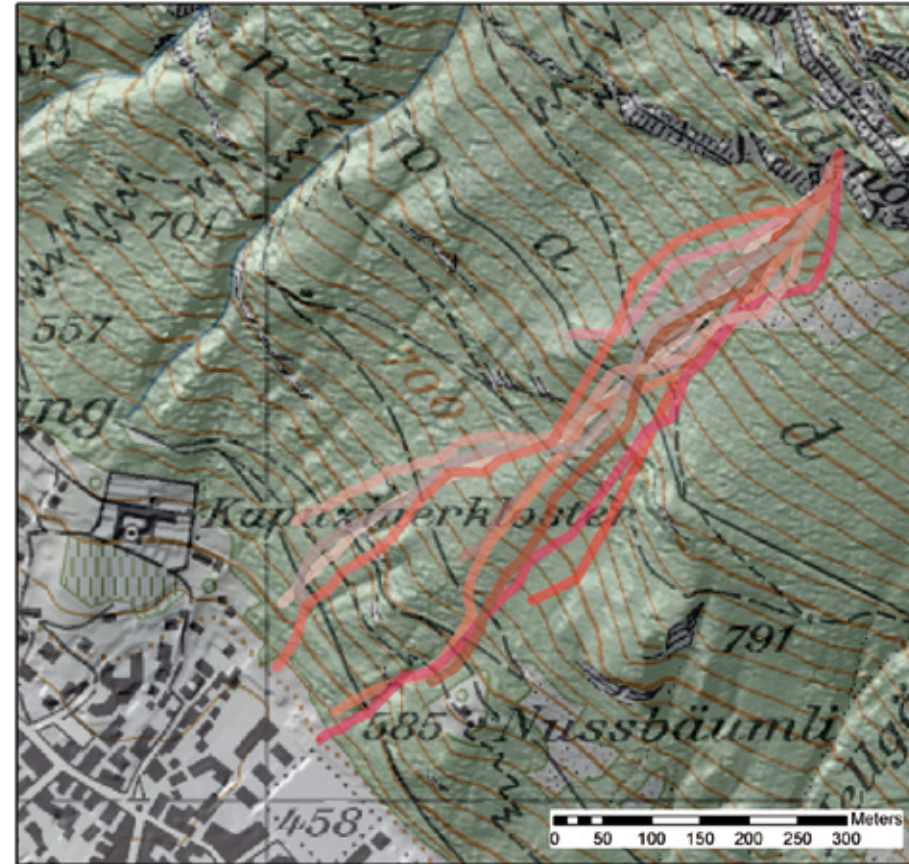


Abb. 3: 10 Sturzbahnen modelliert mit dem Trajektorienmodell Rockyfor3D.

Fig. 3: 10 rockfall paths modelled with the rockfall trajectory model Rockyfor3D.

alle Modellresultate der Realität entsprechen. Zwei solche Studien (Labiouse, 2004; Berger und Dorren, 2006) kommen zum Schluss, dass es grundsätzlich möglich ist, Energien, Sprunghöhen und Auslaufdistanzen für einen Grossteil von stürzenden Einzelblöcken vorherzusagen. Voraussetzung ist, dass die Modellparameter gut kalibriert sind. Die Streuung der Ergebnisse der verschiedenen Modelle war aber enorm und die Messwerte für Energien sowie Sprunghöhen wurden teils massiv, d.h. bis zum vierfachen Wert (=400%), überschätzt. In der Studie des Cemagref in Grenoble (Berger & Dorren, 2006) konnten die Gutachter keine Plausibilisierung vornehmen, was gewisse Fehler erklären kann. Es wurden neun verschiedene Modelle

komplexen Topographie eine kritische Aufgabe ist.

Für die Berechnung der Reichweiten von grossen Felsstürzen und Bergstürzen werden meistens geometrische Modelle eingesetzt (Meissl, 1998). In Ausnahmefällen werden prozessbasierte Simulationsmodelle verwendet: z.B. DAN (-W oder -3D; Hungr, 1995; Hungr und McDougall, 2009) oder AVAL (-1D oder -2D; Christen et al., 2002). Weil solche Ereignisse selten auftreten, ist es schwierig, diese Modelle für Spezialfälle zu kalibrieren. Sie erlauben aber die Darstellung von optimistischen und pessimistischen Szenarien.

Eine Zusammenfassung der Vorteile, der Beschränkungen und der Einsatzbereiche von verschiedenen Modellen gibt die Tabelle 2.

angewendet, wobei drei Modelle von mehreren Teilnehmern verwendet wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass zwei verschiedene Benutzer des gleichen Modells entweder völlig falsche oder sehr genaue Ergebnisse erzeugten. Dies zeigt auf, dass die Rolle des Modellbenutzers für die Gefahrenbeurteilung entscheidend ist. Beide Studien zeigen auch, dass es in der Modellierung einfacher ist, die Auslaufdistanzen zu bestimmen als Sprunghöhen und Energien genau zu berechnen. Eine andere Schlussfolgerung war, dass die Wahl der Hangprofile für 2D Modelle in einer

Bearbeitungsstufe	Prozess	Geeignetes Modell * (2D / 3D)	Vorteil	Beschränkung
M1	Stein- / Blockschlag	GM (3D)	Schnelle Methode, wenig Parameter.	Grobe Abschätzung der Reichweiten Überschätzung der laterale Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes.
	Stein- / Blockschlag	TM (3D)	Präzise Identifizierung von potentiellen Gefahrenbereichen.	Aufwändig für grosse Gebiete.
M2	Fels- /Bergsturz	GM (3D)	Schnelle Methode, wenige Parameter.	Aussergewöhnliche Mobilisierung-Phänomene die zu extremen Auslaufdistanzen führen werden nicht modelliert.
	Stein- / Blockschlag	TM (2D)	Gute Angaben zu Sprunghöhen und Energien.	Schwierig in komplexer Topographie. Keine Angaben zu der lateralen Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes.
	Stein- / Blockschlag	TM (3D)	Gute und räumlich kontinuierliche Angaben zu Sprunghöhen, Energien und Ablagerung. Realistische Waldwirkung.	Gutes DGM muss vorhanden sein. Bestehende Dämme müssen im DGM eingebaut werden.
	Fels- /Bergsturz	GM (2D/3D)	Schnelle Methode, wenige Parameter.	Grobe Abschätzung der Reichweiten. Überschätzung der laterale Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes (bei 3D). Aussergewöhnliche Mobilisierungsphänomene die zu extremen Auslaufdistanzen führen werden nicht modelliert.
	Fels- /Bergsturz	TM (2D)	Angaben zu Sprunghöhen und Energien von grossen Einzelblöcken.	Nur kleinere Felsstürze können modelliert werden. Schwierig in komplexer Topographie. Keine Angaben zu der lateralen Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes.
	Fels- /Bergsturz	TM (3D)	Angaben zu Sprunghöhen, Energien und Ablagerung von grossen Einzelblöcken.	Nur kleinere Felsstürze können modelliert werden.
M3	Fels- /Bergsturz	FM (2D)	Realistische Modellierung der Auslaufdistanz des Ereignisses.	Aufwändige Kalibrierung. Keine Angaben zu der lateralen Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes.
	Fels- /Bergsturz	FM (3D)	Realistische Modellierung des Ereignisses.	Aufwändige Kalibrierung.
	Stein- / Blockschlag	TM (2D)	Gute Angaben zu Sprunghöhen und Energien.	Schwierig in komplexer Topographie.
	Stein- / Blockschlag	TM (3D)	Gute und räumlich kontinuierliche Angaben zu Sprunghöhen, Energien und Ablagerung. Realistische Waldwirkung.	Gutes DGM muss vorhanden sein. Bestehende Dämme müssen im DGM eingebaut werden.
	Fels- /Bergsturz	FM (3D)	Realistische Modellierung des Ereignisses.	Aufwändige Kalibrierung.

* GM = geometrisches Modell, TM = Trajektorienmodell, FM = prozessbasiertes Felssturzmodell

Tab. 2: Einsatzbereich, Vorteile und Beschränkungen von Sturzmodellen.

Tab. 2: Range of application, advantages and limitations of rockfall models.

Erstellung der Gefahrenkarte

Zur Erstellung der Gefahrenkarte müssen nach den Modellierungen (Phase C) noch drei weitere Schritte durchgeführt werden:

1. Plausibilisierung der Modellergebnisse (Phase D)
 2. Festlegen der maximalen Reichweite (Phase E)
 3. Erstellung der Intensitätskarten (Phase F)
- Anschliessend wird die Gefahrenkarten erstellt.

Die Resultate der Modellierung sind immer zu plausibilisieren, mit dokumentierten Ereignissen, anhand der Feldbeobachtungen und/oder mit der Pauschalgefällemethode (Rovina et al., 2011). Abweichungen zwischen Modellergebnissen und Feldbeobachtungen können aus verschiedenen Gründen entstehen: zum Beispiel wegen der Wirkung von Schutzmassnahmen, Wanderwegen und Betonmauern. Eine Anpassung der Modellergebnisse oder eine neue angepasste Modellierung ist in diesem Fall notwendig (Dorren et al., 2011). Anschliessend kann die maximale Reichweite des modellierten Sturzzenarios festgelegt werden. Dies bedeutet, dass Ausreisser, falls vorhanden, aus den erzeugten Datensätzen entfernt und dokumentiert werden müssen. Solche Ausreisser sind zum Beispiel Einzelblöcke, die zu weit oder mit extremen Ablenkungen modelliert worden sind. So kann eine Zone definiert werden, die für das gegebene Szenario als Ablagerungsgebiet gilt. Innerhalb dieser Zone müssen dann mit Hilfe des Modells die Intensitäten festgelegt werden (schwache, mittlere und starke Intensitäten, siehe Abbildungen 1 und 4). Rovina et al. (2011) gehen davon aus, dass die massgebenden Werte bei Gefahrenbeurteilungen und für die Bemessung von Schutzbauten im Regelfall durch folgende Kurvenbereiche der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Energien (bzw. der Sprunghöhen) abgedeckt

werden: Mittelwert und doppelte Standardabweichung. Bei einer Normalverteilung entspricht dies einem Vertrauensintervall von ca. 95%. In der Praxis werden in der Regel Vertrauensintervalle von 90 bis 98% verwendet. Dieser Wert variiert, weil die Modelle unterschiedliche Berechnungsarten verwenden. Als mögliche Ausreisser oder extremes Szenario werden somit zwei bis zehn Prozent der Resultate betrachtet. Es ist Aufgabe der Experten, die relevanten Werte für die Gefahrenbeurteilung festzulegen. Bei der Ausarbeitung von Gefahrenkarten können sie allenfalls als Argument für die Ausscheidung eines Restgefährdungsbereichs herangezogen werden, vor allem wenn starke Sturzintensitäten vorliegen. Intensitätskarten werden für alle definierten Eintretenswahrscheinlichkeiten (bzw. Wiederkehrperioden) auf den Bearbeitungsstufen M2 und M3 erstellt. Für die Bearbeitungsstufe M1 werden keine Intensitätskarten erstellt (Raetzo & Loup, 2011).

Fazit

Für die Gefahrenbeurteilung werden verschiedene, teils sehr unterschiedliche 2D und 3D Modelle eingesetzt. Die Durchführung der Sturzmodellierung muss der Aufgabenstellung, der Bearbeitungsstufe bei der Gefahrenbeurteilung (M1, M2 oder M3) und den zeitlichen Ressourcen angepasst werden.

Eine Sturzmodellierung alleine reicht nicht aus, um eine Gefahrenbeurteilung auf den Stufen M2 und M3 durchzuführen. Alle Phasen (A bis F) des beschriebenen Arbeitsablaufs müssen durchgeführt werden. Feldbeobachtungen und -messungen haben ein grosses Gewicht in der Gefahrenbeurteilung.

Die Rolle des Modellbenutzers, sei es bei der Bestimmung der Eingangsdaten, oder bei der Plausibilisierung der Resultate, ist entscheidend für die Gefahrenbeurteilung.

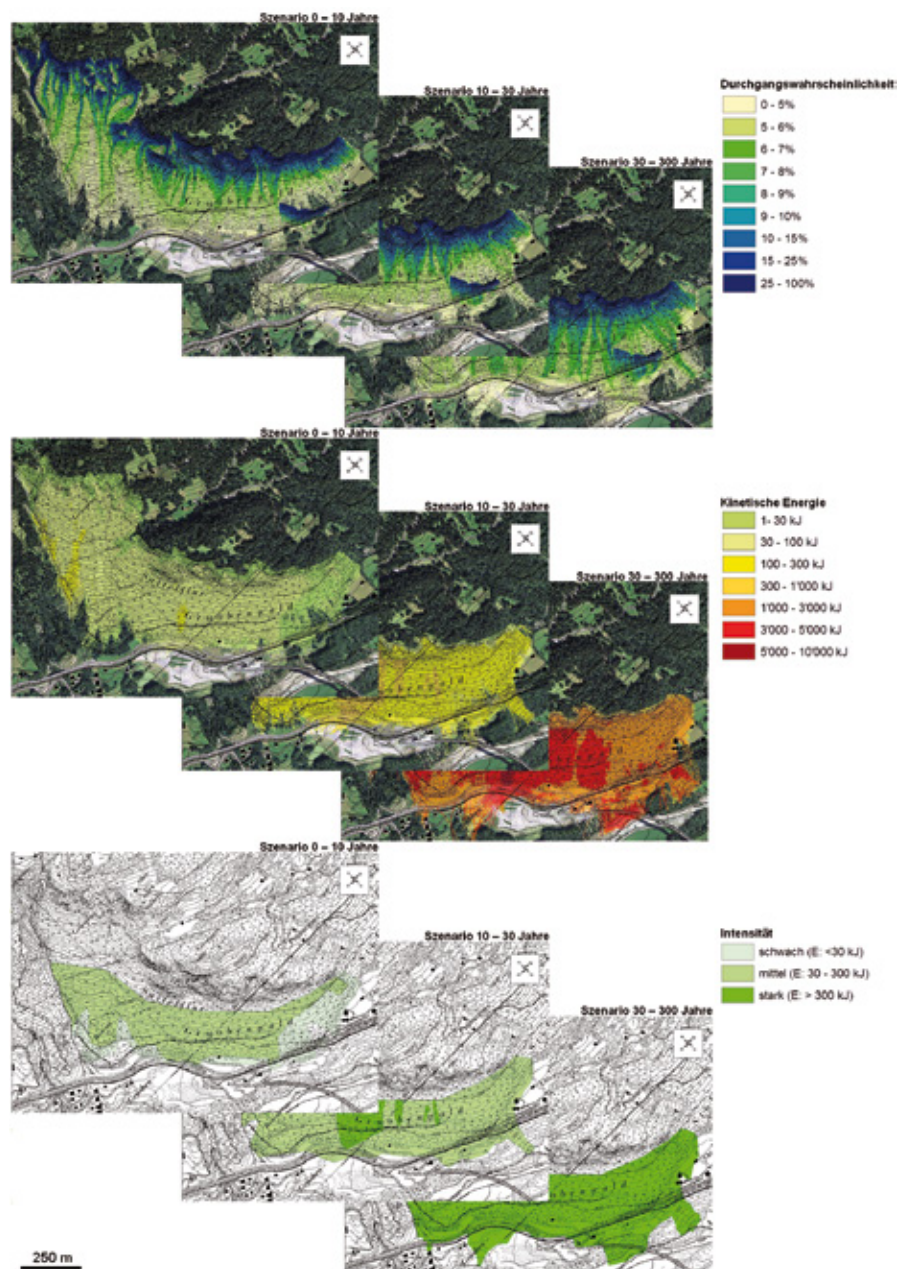


Abb. 4:
Von den
Simulationser-
gebnissen
bis zu den
Intensitäts-
karten (Kar-
ten: TUR
GmbH).

Fig. 4:
From the
simulation
results
towards
the intensi-
ty maps
(maps: TUR
GmbH).

Ziel ist, dass im technischen Bericht klarer festgehalten wird, welche Grundlagen und Annahmen zur Gefahrenbeurteilung geführt haben. Eine Zusammenfassung bestehender Studien, eine Liste der historischen Ereignisse, die Feldbeobachtungen, die definierten Szenarien, die zugrunde liegenden Annahmen, die Eingabeparameter, die

modellierten Ergebnisse, die Überlegungen bei deren Plausibilisierung sowie bei der Festlegung der Reichweiten und die Erstellung der Intensitätskarten sollen im technischen Bericht dokumentiert, erläutert und begründet sein. Nur so wird die Nachvollziehbarkeit der Sturzgefahrenbeurteilung gewährleistet.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Dr. Luuk Dorren
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Gefahrenprävention
3003 Bern, Schweiz
luuk.dorren@bafu.admin.ch

Dr. Bernard Loup
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Gefahrenprävention
3003 Bern, Schweiz
bernard.loup@bafu.admin.ch

Dr. Hugo Raetzo
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Gefahrenprävention
3003 Bern, Schweiz
hugo.raetzo@bafu.admin.ch

Literatur / References:

- ASTRA (2009). Risikokzept Nationalstrassen. Methodik für eine risikobasierte Beurteilung, Prävention und Bewältigung von gravitativen Naturgefahren auf Nationalstrassen. Dokumentation 89001, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern: 97 S.
- AZZONI A., LA BARBERA G., ZANINETTI A. (1995). Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 32(7): 709-724.
- BAFU (im Druck). Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe. Umwelt-Vollzug, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- BERGER F., DORREN L.K.A. (2006). Objective comparison of rockfall models using real size experimental data. Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides, Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan: 245-252.
- BFF/SLF (1984). Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Forstwesen BFF / Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bern: 21 S.
- BRP/BWW/BUWAL (1997). Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Raumplanung BRP/Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW/Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern: 42 S.
- CHRISTEN M., BARTELT P., GRUBER U. (2002). AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. Proceedings of the International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim, 14-18 October 2002, Matsumoto, Japan. Vol. 2: 715-72.
- CROSTA G.B., AGLIARDI F. (2003). A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3: 407-422.
- DORREN L.K.A., MAIER B., BERGER F. (2006). Assessing protection forest structure with airborne laser scanning in steep mountainous terrain. *Proc. Int. Workshop 3D Remote Sensing in Forestry, EARSeL, Vienna*: 238-242.
- DORREN L.K.A., DOMAAS U., KRONHOLM K., LABIOUSE V. (2011). Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones. In: S. Lambert & F. Nicot (eds.). *Rockfall engineering*. ISTE Ltd. and John Wiley & Sons Inc.: 143 - 173.
- HEIM A. (1932). *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth, Zurich: 218 S.
- HUNGR O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal* 32(4): 610-623.
- HUNGR O., MCDUGALL S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. *Computers and Geosciences* 35: 978-992.
- JABOYEDOFF M., LABIOUSE V. (2011). Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 819-828.
- KÖRNER H.J. (1980). Modelle zur Berechnung der Bergsturz und Lawinenbewegung. *Proc. Interpraevent Symposium 1980*. Bad Ischl. Band 2: 15-55.
- LABIOUSE V. (2004). Fragmental rockfall paths: comparison of simulations on alpine sites and experimental investigation of boulder impacts. 9th International Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, Balkema: 457-466.
- LINIGER M. (2006). Die Herausforderung der Gefahrenprognose bei Massenbewegungen: Rutsch- und Sturzprozesse. *Bull. angew. Geol.* (11/2): 75-88.
- MEISSL G. (1998). Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. *Innsbrucker Geographische Studien Band 28*. Innsbruck: 249 S.
- MÖLK M. (2009). Ereignisdokumentation Prozesse: Steinschlag, Felssturz. Universitätskurs Ereignis-Dokumentation, Hrsg. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- MÖLK M., SAUSGRUBERT T., BÄK R., KOCIU A. (2011). Standards and methods of hazard assessment for rapid mass movements (rock fall and landslide) in Austria. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz* 74/166: 88-99.
- PERSSON A., HOLMGREN J., SODERMAN U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (68): 925-932.
- RAETZO H., LOUP B. (2011). Geological hazard assessment in Switzerland. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen- Erosions- und Steinschlagschutz* 74/166: 100-107.
- ROVINA H., LINIGER M., JORDAN P., GRUNER U., BOLLINGER D. (2011). Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen. *Swiss Bull. Angew. Geologie* (16/1): 57-79.
- SCHNEUWLY D.M., STOFFEL M. (2008). Changes in spatio-temporal patterns of rockfall activity on a forested slope - a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 102: 522-531.
- VOLKWEIN A., SCHELLENBERG K., LABIOUSE V., AGLIARDI F., BERGER F., BOURRIER F., DORREN L.K.A., GERBER W., JABOYEDOFF M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - a review. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11: 2617-2651.

THOMAS ZWACK

Vergleich zweier kommerziell erhältlicher Programme zur numerischen 2D-Steinschlagsimulation anhand eines Fallbeispiels

Comparison of two commercially available programs for numerical 2D-rockfall simulation on the basis of a case study

Zusammenfassung:

Im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München in Kooperation mit dem Ziviltechnikerbüro Moser/Jaritz ZT-GmbH wurden entlang eines 1 km langen Streckenabschnitts am Gesäuseeingang (Steiermark) Sturzprozesse untersucht, die eine potenzielle Gefährdung für eine Infrastruktureinrichtung darstellen. Aufgabe war es, die ablaufenden Sturzprozesse zu beschreiben und zu analysieren um mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse eine numerische 2D-Steinschlagmodellierung an einem ausgewählten Profil durchzuführen. Damit sollten einerseits die Modellansätze der verwendeten Simulationsprogramme untersucht und andererseits deren Anwendungsgrenzen aufgezeigt werden. Hierzu wurden die kommerziell erhältlichen Programme Rockfall 6.1 (Dr. Spang) und Rofmod 4.1 (Geotest AG) verwendet und anhand unterschiedlicher Szenarien miteinander verglichen.

Stichwörter:

2D-Steinschlagsimulation, Rockfall 6.1 (Dr. Spang), Rofmod 4.1 (Geotest AG), Anwendungsgrenzen 2D-Modelle

Abstract:

In the context of a diploma thesis at the Chair of Engineering Geology at the Technical University of Munich in cooperation with the engineering consultants Moser/Jaritz ZT-GmbH, ongoing rock fall processes alongside a 1 km long track section at Gesäuseeingang (Styria) were examined. These rock fall processes pose a potential threat to a local infrastructure facility. This study describes the on-going rock fall processes in detail and uses the results for a numerical 2D-rockfall simulation for one explicit section. Using the simulation results as a basis, the different modelling approaches were evaluated and their specific limitations identified. In order to compare the numerical simulation programs Rockfall 6.1 (Dr. Spang) to Rofmod 4.1 (Geotest AG) different scenarios were created and simulated in each program.

Keywords:

2D rockfall simulation, Rockfall 6.1 (Dr. Spang), Rofmod 4.1 (Geotest AG), limits of application of 2D models

Untersuchungsgebiet

Das bearbeitete Gebiet liegt in der Steiermark, circa 7 km östlich der Stadt Admont, am Eingang zum Gesäuse-Nationalpark, auf der orographisch linken (nördlichen) Talseite der Ennsschlucht.

Morphologisch wird die untersuchte Talflanke von bis zu 500 m steil aufragenden und schroffen Felswänden aus dickbankigen Dachsteinkalken dominiert, deren höchste Erhebung mit 1.222 m der Himbeerstein bildet (Abb. 1). In diese Felswände haben sich, entlang von in etwa NS-Richtung verlaufenden Störungszonen, tiefe Rinnen eingeschnitten, in denen die Sturzprozesse kanalisiert werden. Unterhalb der Felswände vermitteln steinschlagdominierte Hangschutt- bzw. Hangumlagerungssedimente, die mit 30° bis 35° geböschet sind, zur breiten Schwemmebene der Enns auf circa 590 m. Oberhalb des Talbodens verläuft entlang der Talflanke die von Steinschlag gefährdete Infrastruktureinrichtung auf einem 10 m bis 20 m hohen Damm.

Im Gelände konnte neben historisch dokumentierten Sturzereignissen mit Einzelblöcken

im Ausmaß von einigen Kubikmetern auch eine rezente Aktivität anhand von stummen Zeugen nachgewiesen werden.

Methodik

Um das Prozessgeschehen zu verstehen und die modellrelevanten Eingangsdaten für die Simulationen zu erheben, wurden zunächst intensive Geländeuntersuchungen (u.a. Kartierung stummer Zeugen, Gefügemessungen und Kluftkörperanalysen) durchgeführt. Zur weiteren Bearbeitung der im Gelände gewonnenen Informationen wurden diese in ein GIS-Projekt überführt und eine ergänzende Auswertung komplementärer Datenquellen (Orthofoto, DGM) durchgeführt. Die Eingangsparmeter für die Simulationen wurden aus den Aufnahmen der Homogenbereiche (Oberflächenbeschaffenheit, Untergrundzusammensetzung) oder anhand von Herstellerangaben und Literaturwerten (Dorren et al., 2005; Kuhn, 2004; Rickli et al., 2004) bestimmt.

Zum besseren Modellverständnis und um den Einfluss der unterschiedlichen Eingangsparameter auf das Simulationsergebnis abzuschätzen,

wurden zunächst Vorabstudien an stark vereinfachten Modellen durchgeführt. Für die Modellkalibrierung wurden die im Gelände ermittelten Sprunghöhen und ein rekonstruierter Sturzbahnverlauf sowie anhand einer Literaturrecherche ermittelte Kennwerte aus In-situ-Fallversuchen, verwendet. Vom Hersteller voreingestellte Steuerungsgrößen blieben unverändert.

Nach erfolgreicher Kalibrierung konnten diverse Szenarien simuliert werden, bei denen unter anderem der Einfluss der Blockgröße und die

Auswirkung eines Waldbestandes untersucht wurden. Hiermit sollte einerseits die Funktionsweise der Waldmodule getestet und andererseits die Fähigkeit der Programme, das größenabhängige Bewegungsverhalten der Sturzkörper abzubilden, untersucht werden.

Mittels Detailauswertungen einzelner Sturzbahnen sowie der Geschwindigkeiten, Energien, Sprunghöhen und der Reichweitenverteilung wurden die Modelle schließlich miteinander verglichen.

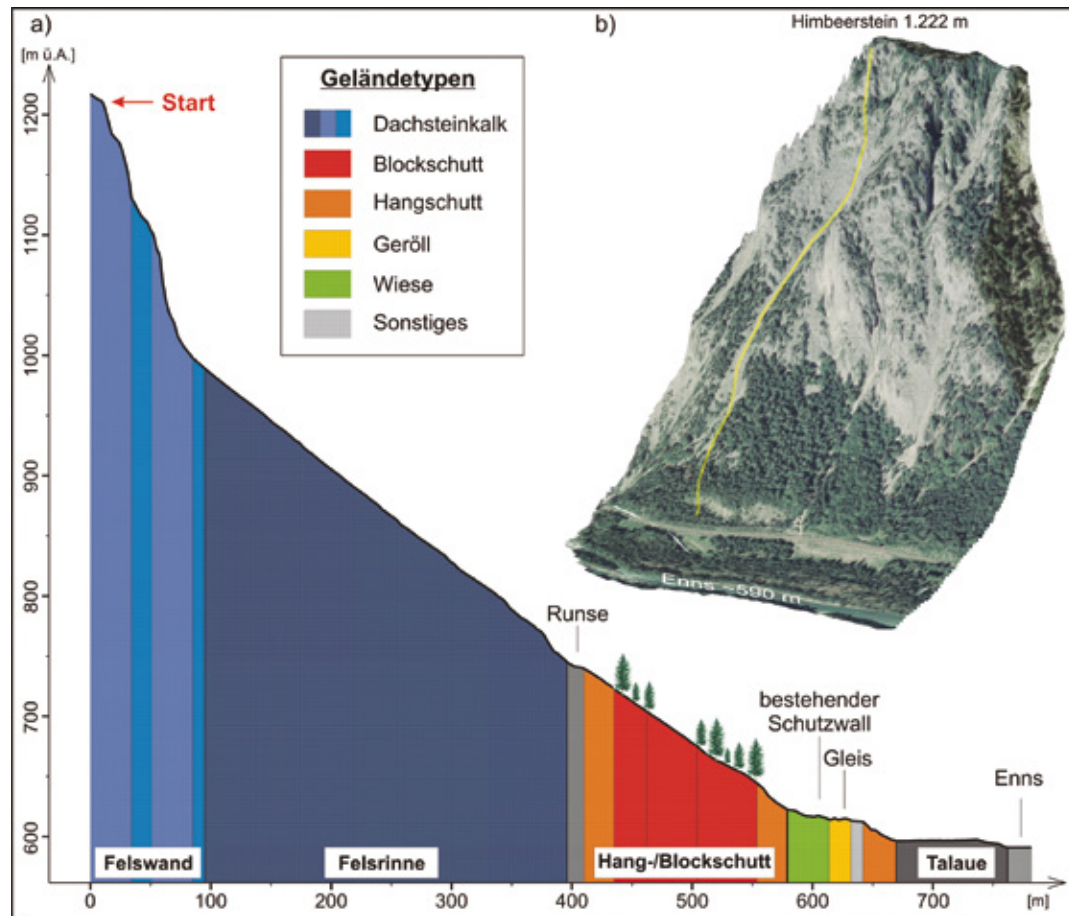


Abb. 1: Profil und Übersicht des Untersuchungsgebietes. a) Simulationsprofil mit den verschiedenen Untergrundtypen. b) Übersicht des Untersuchungsgebietes mit dem simulierten Sturzbahnverlauf (gelbe Linie).

Fig. 1: Section and overview of the study area. a) Simulated section showing the different types of underground. b) Overview of the study area with the simulated rock fall trajectory (yellow line).

Untersuchungsprofil

Für die Simulationen wurde eine Sturzbahn ausgewählt, entlang der ein junges Sturzereignis mit einem Einzelblock von 1,6 m³ anhand stummer Zeugen im Transit- und Ablagerungsbereich rekonstruiert werden konnte (Abb. 1). Vom vermuteten Ausbruchsort an der Abbruchkante der Steilwand bis zum Ablagerungsort sind ein Höhenunterschied von knapp 600 m und eine Horizontalabstand von ca. 700 m zu überwinden. Die Topographie sowie die Untergrundeigenschaften entlang der Sturzbahn können dem Profil in Abb. 1 entnommen werden.

Den Startbereich der Simulation bildet die Abbruchkante der Steilwand zwischen 1210 m und 1180 m. Daran anschließend folgt unterhalb der Felswände eine mit rund 38° geneigte, teilweise in den Fels eingetiefe Rinne im Dachsteinkalk. Am Ausgang der Felsrinne leitet eine circa 25 m hohe Steilstufe zum blockdomi-

nierten Hangschuttbereich über. Innerhalb des 35° geneigten Hangschuttbereiches ist eine circa 2 m tief eingeschnittene Runse zu überwinden. Nach unten hin verflacht der größtenteils mit Bäumen bestockte Blockschutt auf 27°. Schließlich folgt ein künstlich hergestellter, bis zu 60° steiler Böschungsanschnitt in blockreichem Hangschutt, der zu einem Auffangraum mit Schutzwällen überleitet.

Verwendete Modelltypen

Die kommerziell erhältlichen Programme Rockfall 6.1 (RF, Dr. Spang) und Rofmod 4.1 (RM, Geotest AG) verfolgen prozessbasierte, 2-dimensionale Simulationsansätze und beruhen auf der Grundlage physikalischer Gesetze sowie empirischer Ansätze. In den Starrkörpermodellen werden die Sturzblöcke in RF als sphärische oder zylindrische und in RM als sphärisch bis quaderförmige Körper betrachtet, wobei alle Bewegungs-

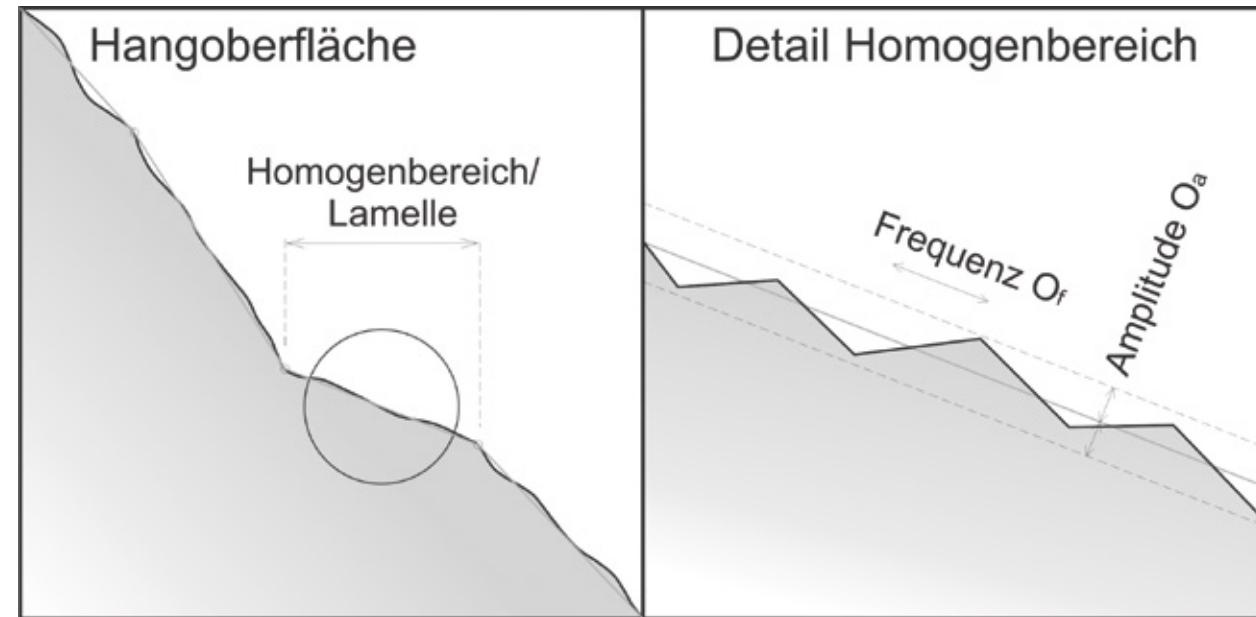


Abb. 2: Konzept der Oberflächenrauigkeit in Rockfall 6.1 anhand eines schematischen Hangprofils (verändert nach Spang, 2008)

Fig. 2: Concept of surface roughness in Rockfall 6.1 illustrated by a schematic slope profile (modified from Spang, 2008)

formen, einschließlich der Rotation, berücksichtigt werden.

Wie bei jedem Modell werden auch in den verwendeten Programmen vereinfachende Annahmen getroffen, die ein Zugeständnis an die Komplexität der zu beschreibenden Kontaktreaktion zwischen Sturzblock und Hangoberfläche sind. So werden die Sturzblöcke als vollkommen elastische Starrkörper betrachtet. RF vernachlässigt außerdem die plastische Untergrunddeformation bei Zusammenstößen. Die Modelle verlangen auch eine real nicht vorhandene, scharfe Trennung zwischen den Bewegungsarten Springen und Rollen. Diese wird über statische Grenzwerte erreicht, die von den Herstellern üblicherweise vorgegeben sind. Zudem gelten die Modelle nur bis zu einem bestimmten Maximalvolumen von Einzelblöcken, da sich mit zunehmender Sturzenergie auch das Prozessverhalten ändert und die überwiegend empirischen Beschreibungen der Kontaktreaktionen keine Gültigkeit mehr besitzen. Das verwen-

dete Programm RM ist beispielsweise in der Lage, dass Prozessverhalten von Einzelblöcken bis zu einer Größe von circa 10 m^3 zu modellieren (mündliche Mitteilung Krummenacher, 2010).

Zusätzlich werden mit der Reduzierung des räumlichen Problems auf zwei Dimensionen „3D-Effekte“ vernachlässigt. Agliardi & Crosta (2003) werten dies als ebenso bedeutend wie den Einfluss der Blockgeometrie auf die Festkörperdynamik des Sturzblockes. So werden seitliche Ablenkungen vom Hauptsturzweg, die in der Realität durch Kontaktreaktionen mit Bäumen oder dem Untergrund, markanten Änderungen in der Topographie oder aufgrund der Blockform auftreten (Dorren et al., 2006), nicht berücksichtigt.

Funktionsumfang und Eingangsparameter

Je nach verwendetem Programm müssen unterschiedliche Eingangsparameter und Startbedingungen festgelegt werden (Tab. 1). In RM erfolgt

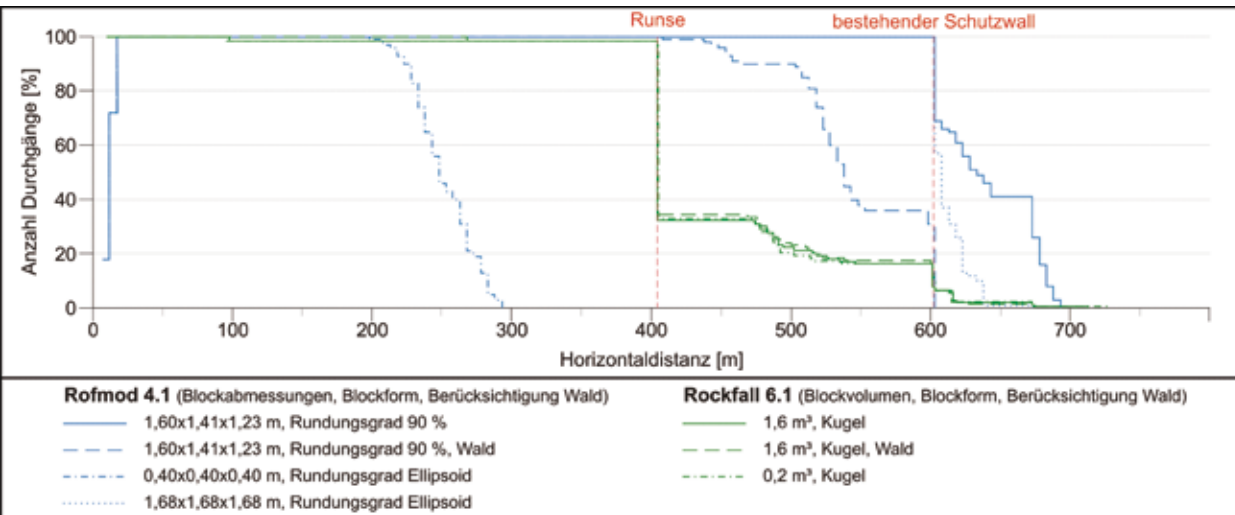


Abb.3: Ein Vergleich der Simulationsresultate von Rockfall 6.1 (RF) und Rofmod 4.1 (RM) anhand der Reichweitenverteilung zeigt deutliche Differenzen. Zudem weichen die Ergebnisse in RF kaum voneinander ab, wohingegen in RM eindeutige Unterschiede in Abhängigkeit vom simulierten Szenario zu erkennen sind.

Fig. 3: A Comparison of the simulation results of Rockfall 6.1 and Rofmod 4.1 on the basis of the range distribution shows notable differences. Furthermore the results of RF diverge only little, whereas the results of RM diverge considerably depending on the simulated scenario.

die Charakterisierung des Untergrundes und der Hangoberfläche mit zwei Parametern. In RF sind hierfür sieben Parameter erforderlich. Eine objek-

tive Bestimmung der Parameter im Gelände ist oft schwierig, weshalb häufig auf Herstellerangaben oder Literaturwerte zurückgegriffen wird. Neben

Simulationsprogramm		Rockfall 6.1 (Dr. Spang)	Rofmod 4.1 (Geotest AG)	
Eingangsparameter	Geländegeometrie	Profilkoordinaten	✓	✓
		Profilrauigkeit	✓ (O_a, O_r)	✓
		Rollwiderstand	✓	-
	Untergrundeigenschaften	Dämpfung	✓ (D_p, D_n)	✓
		Haftreibungswinkel	✓	-
		Gleitreibungswinkel	✓	-
Startbedingungen	Startpunktbestimmung	Startpunktbestimmung	X-Ko./ (Y-Ko.)	X-Ko.
		Startbewegung	✓	-
		Anzahl d. Steine	max. 10.000	max. 500
	Initialgeschwindigkeit	Tangentialgeschwindigkeit	✓	-
		Rotationsgeschwindigkeit	(✓)	-
	Sturzblock	Dichte	✓	✓
		Form	Kugel (Radius, r) Zylinder (r+ Länge)	x,y,z-Achse + Rundungsgrad
		Abbruch- beziehungsweise Grenztgeschwindigkeit	v_n, v_t	v (Rollen) v (Bodenkontakt)
	Zusatztools	Wald	✓	✓
		Barrierefunktion	✓	-
Ausgabewerte	Hüllkurven	Sprunghöhen	✓ (max.)	✓ (100/80/50 %)
		totale kinetische Energie	✓ (max.)	✓ (100/80/50 %)
		Translationsgeschwindigkeit	-	✓ (100/80/50 %)
	Reichweiten	✓	✓	
	statistische Auswertung	✓	(✓)	

Tab. 1: Vergleich der Parameter und Funktionen von Rockfall 6.1 und Rofmod 4.1

Tab. 1: Comparison of the parameters and functions of Rockfall 6.1 and Rofmod 4.1

(semi-)quantitativ im Gelände zu bestimmenden Parametern wie der Oberflächenrauigkeit existieren einige Kenngrößen, zu deren Bestimmung keine allgemein gültigen Verfahren oder Wertebereiche existieren (Spang & Söner, 1995). Hierzu zählen in RF neben den Reibungswinkeln und dem Rollwiderstand insbesondere die Dämpfungsfaktoren, die das Simulationsergebnis jedoch maßgeblich beeinflussen. Beispielhaft hierfür ist der Rollwiderstand, der anhand von einigen Tabellenwerten, die aus Versuchen mit Stahlkugeln stammen, abgeschätzt werden soll. Für den Benutzer wird eine objektive Ermittlung der Eingangparameter unmöglich, was zwangsläufig zu Unsicherheiten führt.

Abhilfe schaffen hier die in RM vordefinierten und stark verallgemeinerten Untergrundtypen wie „Fels“ oder „Blockschuttfächen“, denen vom Hersteller bestimmte Wertebereiche für den Dämpfungskoeffizienten zugewiesen sind. Die Rauigkeitszahl kann anhand des Durchmessers und des Abstands der Rauigkeitskomponenten quantitativ im Gelände erhoben werden. Mit den Waldmodulen sind beide Programme in der Lage, einen Waldbestand zu berücksichtigen.

Modellansätze

In RM ist im Gegensatz zu RF keine zufällige Variation der eingegebenen Parameter innerhalb festgelegter Grenzen möglich. Eine statistische Verteilung wird primär durch unterschiedliche Startpunkte der Blöcke oder mittels einer Variation der Startbedingungen erreicht. In RF kann zudem eine Neuberechnung der Oberflächenrauigkeit nach jedem simulierten Sturzblock erfolgen. Damit wird den inhomogenen Verhältnissen in der Natur Rechnung getragen und eine statistische Betrachtung des Steinschlagproblems ermöglicht.

Maßgebliche Steuerungsgrößen: Obwohl in RF zur Charakterisierung des Untergrun-

des und der Beschaffenheit der Hangoberfläche deutlich mehr Parameter angegeben werden müssen, wird das Simulationsergebnis, wie in RM, im Wesentlichen über die Dämpfungsparameter und die Oberflächenrauigkeit gesteuert.

Untergrunddeformation und Sprungverhalten: Der Hauptunterschied von RM zu RF besteht darin, dass RM quaderförmige Blockgeometrien simulieren kann und einen speziellen Algorithmus zur Berechnung eines Aufpralltrichters, beim Kontakt zwischen Sturzkörper und Hangoberfläche, beinhaltet. Die plastische Untergrunddeformation wird dabei entscheidend von der Dämpfung beeinflusst, die im Vergleich zu RF nur über einen Koeffizienten definiert wird. Die von Pfeiffer & Bowen (1989) geforderte Anpassung des Dämpfungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Masse des Sturzkörpers und der Impaktgeschwindigkeit wird in RM durch den Eingang der Aufprallgeschwindigkeit, der Masse und der Blockgröße bei der Berechnung des Aufpralltrichters, berücksichtigt.

Der Einfluss der Blockgeometrie kommt in RM besonders bei Sprungbewegungen zum Tragen. Bei der Berechnung des Absprungwinkels nach einem Impakt wird die wirkende Hebelkraft des rotierenden Blockes berücksichtigt (Zinggeler & Pfeifer, 2009). Dies gilt ebenso für Rollbewegungen, bei denen nach jeder Umdrehung die Geländeneigung abgefragt und untersucht wird, ob aus der aktuellen Rotationsenergie in Verbindung mit der Hebelwirkung ein Sprung berechnet werden kann (Zinggeler & Pfeifer, 2009). Die eingegebene Blockform beeinflusst somit das Sprungverhalten und kann einen deutlichen Einfluss auf die maximalen Reichweiten der Sturzkörper haben.

Im Gegensatz dazu, werden die Dämpfungskoeffizienten bei der massenunabhängigen Simulation in RF als Materialkonstanten betrachtet, obwohl Chau, Wong & Wu (2002) Skalierungsfunktionen für die Restitutionskoeffizienten

als grundlegend ansehen, da sie die entscheidenden Eingangsparameter bei der Simulation von Sturzprozessen sind. Der Einfluss der normalen Dämpfung D_n ist in RF aufgrund der Herstellerangaben zu verwendenden Wertebereichen kaum von Bedeutung. Demgegenüber können schon kleine Änderungen der tangentialen Dämpfung erhebliche Auswirkungen auf das Sprungverhalten beziehungsweise auf die Ablagerung von Blöcken haben.

Rauigkeitskonzept: Grob betrachtet wird ein Geländeschnitt von der übergeordneten Topographie der Hangoberfläche definiert. Im Detail wird die Hangoberfläche von einer Mikrorauigkeit überlagert, die von Rauigkeitserhebungen (abgelagerte Blöcke, umgestürzte Bäume, etc.) hervorgerufen wird. Diese Mikrorauigkeit wird in den beiden Simulationsprogrammen durch die Parameter „Oberflächenrauigkeit“ (RF) und „Rauigkeitszahl“ (RM) berücksichtigt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, anhand von hochauflösenden Geländemodellen erstellte Profilschnitte vor der Simulation zu glätten. Darüber hinaus führt eine große Anzahl von mehreren hundert Datenpunkten bei langen Profilen zu erheblichen Rechenzeiten und kann Programminstabilitäten hervorrufen. In RF ist es aufgrund des Algorithmus zur Berechnung der Oberflächenrauigkeit für jede einzelne Lamelle des eingegebenen Profils unabdingbar, eine Ausdünnung der Profilkordinaten vorzunehmen.

Die Mikrorauigkeit wird in RF durch die Generierung von Rauigkeitserhebungen in Form von Spitzen (Abb. 2) nachgebildet (Spang & Romunde, 2008). Zu Problemen führt die Tatsache, dass die Oberflächenrauigkeit zusätzlich die Aufgabe hat, die reale Blockform abzubilden. Hierdurch sollen rollende Kugeln bzw. Zylinder zu Kollisionen mit der Hangoberfläche und infolgedessen zum Springen gezwungen werden (Spang & Söner, 1995).

Wie in der Natur stellen die generierten Spitzen, in Abhängigkeit von der Sturzkörpergröße unterschiedlich schwer zu überwindende Hindernisse dar. Damit wird versucht den Sortierungs- bzw. „Eierkartoneffekt“ auf Schutthalden abzubilden, wonach die Reichweite von Sturzkörpern primär von deren Blockgröße und dem Verhältnis zur Oberflächenrauigkeit bestimmt wird (Spang et al., 2008). Die Rauigkeit bei reinen Rollbewegungen wird dagegen über den Rollwiderstand eingestellt.

Die in RM enthaltene Rauigkeitszahl bewirkt bei jedem Bodenkontakt in Abhängigkeit von den Größenverhältnissen zwischen Sturzblock und Rauigkeitskomponenten einen empirisch berechneten Energieverlust, der für kleinere Blöcke zunimmt (Zinggeler & Pfeifer, 2009). Hierdurch soll das Sprungverhalten, entsprechend dem Verhältnis der Blockgröße zur Profilrauigkeit, angepasst werden.

Simulationsresultate

Unsicherheiten: Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Impaktenergien von über 50 % der simulierten Blöcke am Fuß der rd. 180 m hohen Steilwand zwischen 3 und 12 MJ liegen. Bei einem Aufprall auf harten Felsuntergrund würde dies in der Realität häufig zu Rissbildungen in den Blöcken und somit zu Energieverlusten oder sogar zu deren Zerschlagen führen. Diese Unsicherheiten am Beginn der Simulation sind deshalb so problematisch, weil sie sich nach unten hin fortplanzen.

Einen weiteren Unsicherheitsfaktor bildet die an den Aufprallbereich anschließende Felsrinne, die in der Natur deutlich ausgeprägte Richtungsänderungen aufweist. In der Realität führt dies zu Stoßreaktionen mit den steilen Rinnenflanken und folglich zu einer Ablenkung quer zur Falllinie („Flipperereffekt“), verbunden mit erheblichen Energieverlusten. Gerade im Bereich

der Felsrinne waren die simulierten Sprünge sehr groß, was im Hangschuttbereich zu unrealistischen Sturzbahnverläufen und enormen Reichweiten führte.

Um realistischere Ergebnisse zu erhalten wurde daraufhin in beiden Programmen versucht, die Energieverluste beim Aufprall sowie den 3D-Effekt in der Felsrinne mithilfe höherer Dämpfungen und/oder Oberflächenrauigkeiten abzubilden.

An dem betrachteten Profil wurden trotz aufwendiger Simulationen keine befriedigenden Resultate erzielt. Davon unabhängig liefern die zwei unterschiedlichen Modellansätze mitunter deutlich voneinander abweichende Ergebnisse (Abb. 3). Vor dem Hintergrund, dass die Simulationsergebnisse mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, dürfen die folgenden Aussagen nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden.

Rockfall: Grundsätzlich kann RF die im Gelände beobachtete Situation unter der Verwendung gerade noch realistischer Untergrundparameter nur unbefriedigend darstellen. In Bezug

auf die Sturzbahnverläufe, Ablagerungsbereiche sowie die auftretenden Energien und Geschwindigkeiten scheinen die Simulationsergebnisse für den Großteil der simulierten Trajektorien durchaus realistisch. Dennoch ist der Anteil unwirklicher Sturzbahnen (extreme Sprunghöhen bis zu 20 m und Sprungweiten über 100 m) mit circa 20 % unbefriedigend hoch.

Insgesamt besitzen die modellierten Trajektorien eine große Variationsbreite. Neben rollenden treten auch springende Blöcke auf, wobei entlang des Profils anhand der Histogramme der Sprunghöhen und Geschwindigkeiten eine strikte Trennung zwischen den unterschiedlichen Bewegungsformen zu erkennen war (Abb. 4). Dies dürfte mit den stetigen Energieverlusten infolge der zahlreichen Bodenkontakte beim „springenden Rollen“ zusammenhängen und ist ursächlich auf die künstlichen Grenzgeschwindigkeiten zurückzuführen.

In einer Simulation mit kleinen Sturzkörpern ($r = 20$ cm), waren die Resultate mit Aus-

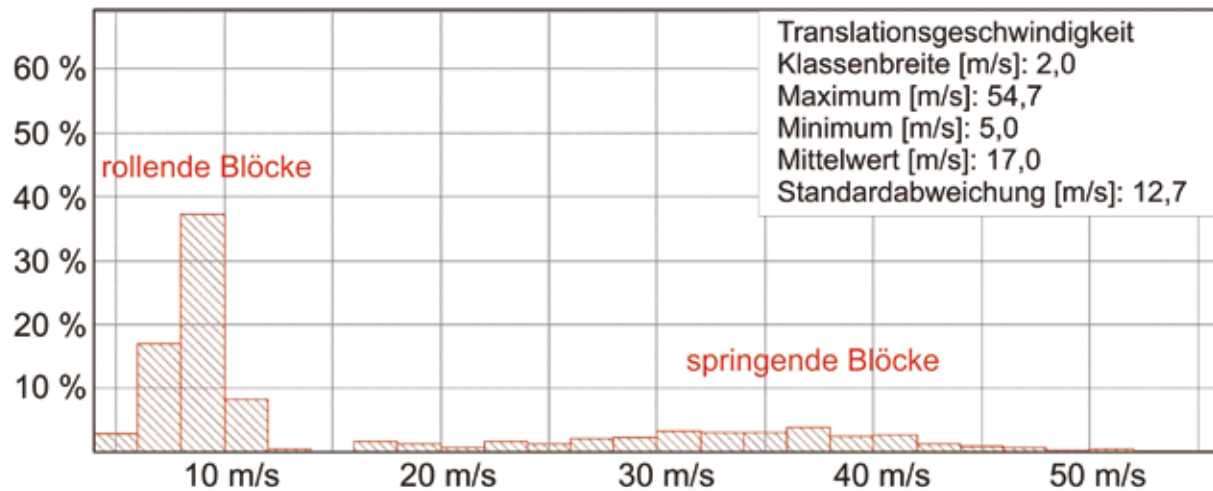


Abb.4: Klassenhistogramm der Translationsgeschwindigkeiten aus Rockfall 6.1 bei $X = 350$ m (1498 von 1500 Steinen). Deutlich zu erkennen ist jeweils ein markantes Maximum bei niedrigen Werten sowie eine große Streubreite der höheren Werte um ein flaches Maximum. Die zwei Maxima sind auf die Trennung zwischen den unterschiedlichen Bewegungsformen zurückzuführen.

Fig. 4: Class histogram of the translation velocities in Rockfall 6.1 at $X = 350$ m (1498 of 1500 stones). Clearly visible are a distinctive peak at low velocities and a wide maximum at higher ones. The two maxima are due to the separation between the different forms of motion.

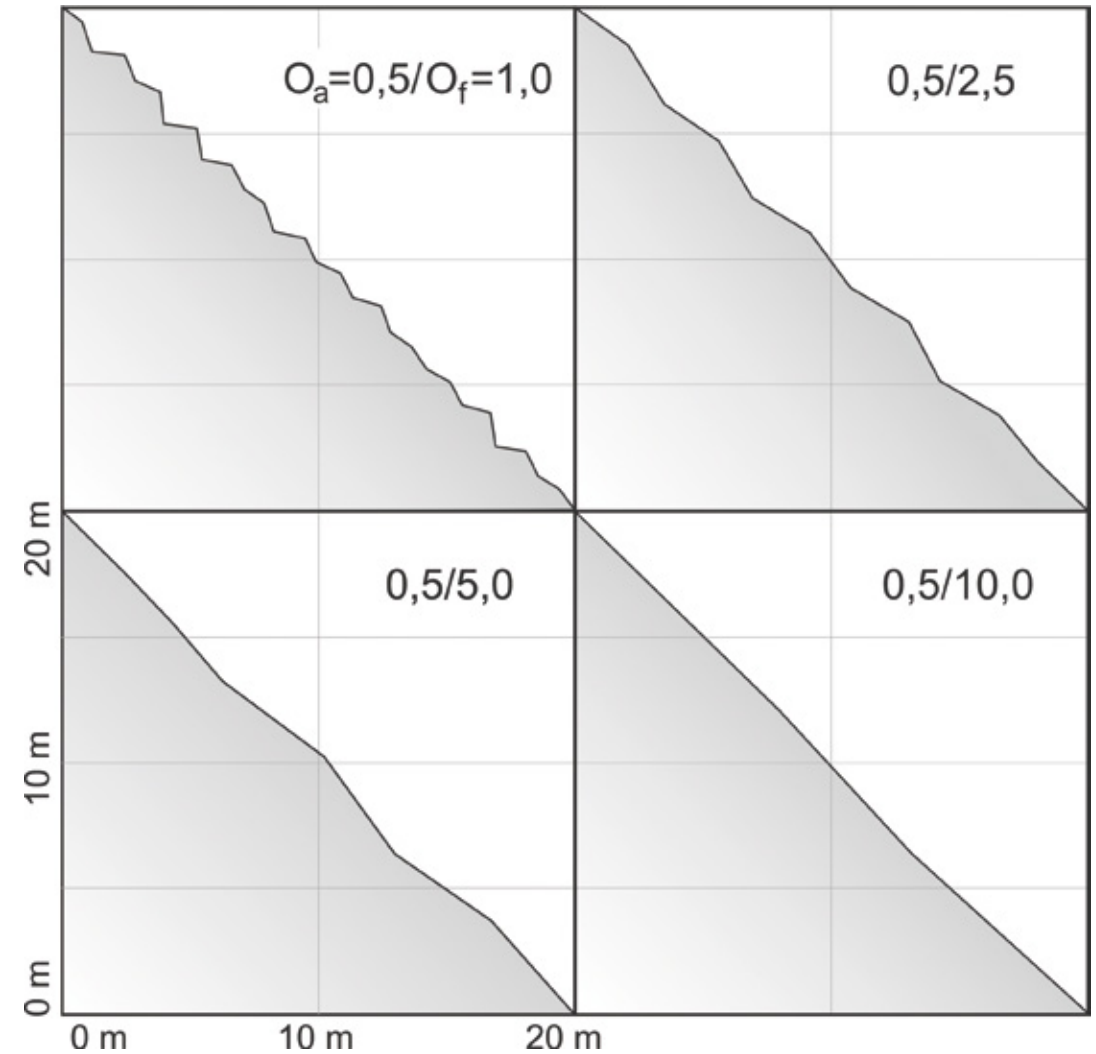


Abb. 5: Darstellung der Oberflächenrauigkeit in Rockfall 6.1 bei gleichbleibender Amplitude O_a und unterschiedlicher Frequenz O_f . Deutlich zu erkennen ist die glatte Hangoberfläche bei großen Frequenzen. Vereinzelt Hindernisse im Ausmaß des Sturzkörpers können somit nicht abgebildet werden.

Fig. 5: Illustration of the surface roughness in Rockfall 6.1 with constant amplitude O_a and varying frequency O_f . Clearly visible is the smooth slope surface at high frequencies. Consequently obstacles in the dimension of the falling bloc cannot be reproduced.

nahme der von der Masse abhängigen kinetischen Energien annähernd identisch (Abb. 3). Demnach ist RF nicht in der Lage, die blockgrößenabhängige Prozessdynamik abzubilden. Eine Ursache sind womöglich die hohen Geschwindigkeiten, die an dem simulierten Geländeschnitt auftreten. Wahrscheinlicher scheint jedoch die bereits geäußerte Vermutung, wonach die Untergrund-

parameter Oberflächenrauigkeit, Rollwiderstand und Dämpfung an die simulierte Blockgröße angepasst werden müssen.

Rofmod: Zusammenfassend ist RM nicht in der Lage, die im Gelände beobachtete Situation unter Verwendung gerade noch realistischer Untergrundparameter befriedigend abzubilden, obwohl die maximalen Reichweiten annähernd

richtig wiedergegeben werden konnten. Lediglich die Hälfte aller simulierten Blöcke im Transitbereich liegen mit Sprunghöhen von bis zu 8 m und Geschwindigkeiten von maximal 35 m/s innerhalb üblicher Literaturwerte. Unterschiedliche Ablagerungsbereiche entlang des Hanges konnten in RM selbst mit unrealistisch hohen Dämpfungen („nasser, tiefer Boden“) beziehungsweise Rauigkeitszahlen (RZ = 15) nicht simuliert werden.

Das Spektrum der simulierten Bahnkurven ist äußerst gering, da lediglich die Startposition variabel ist und lokale Hangunebenheiten vernachlässigt werden. Mit der Berücksichtigung eines Waldbestandes und der implizierten Zufallsfaktoren bei der Berechnung der Kontaktraktionen zwischen Baumstamm und Sturzblock kann dem jedoch entgegengewirkt werden.

Am augenscheinlichsten sind die gleichförmig verlaufenden Sturzbahnen sowie die nicht plausible Größenordnung der Sprünge (Sprungweiten ~100 m, Sprunghöhen ~8 m). Entsprechend der vorherrschenden Hangneigung sollten im Bereich der Felsrinne und des Schutthanges rollende Bewegungen gegenüber dem Springen dominieren. Dagegen konnte RM im Transitbereich ausschließlich springende Blöcke simulieren. Auch die Verwendung unrealistisch hoher Dämpfungswerte und Rauigkeitszahlen konnte keine wesentliche Veränderung bewirken. Als Ursache wird das anhand von Testmodellierungen validierte Spring-Roll-Kriterium vermutet, das nach Herstellerangaben wenn möglich nicht verändert werden sollte (Geotest AG, 2006). Bereits Kuhn (2004) vermutete anhand dokumentierter Sturzereignisse und vergleichenden Simulationen mit Rofmod (V3), dass der voreingestellte Rollreibungswinkel zu gering gewählt ist.

Die blockgrößenabhängige Reichweite („Sortierungseffekt“) sowie das unterschiedliche Bewegungsverhalten kleinerer Blöcke kann RM

dank seines Rauigkeitskonzeptes sehr gut abbilden. Der Einfluss der von RM berechneten, blockgrößenabhängigen Verformung des Untergrundes scheint eher gering zu sein. Inwieweit der erzeugte Blockgrößeneffekt realistisch ist, wurde jedoch nicht untersucht.

Waldmodule

Die Berücksichtigung zweier Waldbestände im Transitbereich mit Längen von 33 m bzw. 60 m führte in beiden Modellen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während in RF keine merkliche Beeinflussung der Simulationsergebnisse erkennbar war, hatte der simulierte Waldbestand in RM einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse (Abb. 3). Welcher der beiden Berechnungsansätze plausibler ist, konnte nicht beurteilt werden.

Die Auswertungen legen allerdings die Vermutung nahe, dass RM die Waldwirkung überschätzt. Besonders unrealistisch erscheint die Tatsache, dass bei der Passage der Waldabschnitte alle 500 simulierten Blöcke mit einem Baum kollidierten. Dies widerspricht zum einen der von Kalberer (2006) beschriebenen Filterwirkung des Waldes, wonach die Waldwirkung starken Streuungen unterliegt und somit lediglich als Filter für einen Teil der Sturzkörper wirksam ist. Zum anderen wird im Benutzerhandbuch (Geotest AG, 2006) empfohlen, bei relativ kurzen Waldabschnitten (> 100–200 m) eine Simulation ohne Waldbestand durchzuführen, da einzelne Blöcke diesen ohne Treffer passieren können.

Die geringe Waldwirkung in RF steht vermutlich im Zusammenhang mit dem veralteten Kenntnisstand, auf dem das Waldmodul Rocktree beruht. So werden im Benutzerhandbuch zur neuesten Programmversion beispielsweise die Bruchschlagarbeiten nach Sell aus dem Jahre 1987 angegeben. Bei mittleren Sturzenergien der Blöcke zwischen 2,5 MJ und 4,0 MJ – gegenüber

einem maximalen Energieverlust von 0,2 MJ bei einem Volltreffer – sollte ein Waldbestand auf derart kurzen Passagen jedoch auch keinen allzu großen Einfluss ausüben.

Erkenntnisse

Rockfall: In RF sind keine Skalierungsfunktionen für die Restitutionskoeffizienten enthalten, wodurch der Einfluss aus der Kinematik des Sturzblockes unberücksichtigt bleibt. Im Umkehrschluss sollten die Koeffizienten daher der Blockgröße angepasst werden. Diesbezüglich finden sich weder in der Literatur noch seitens des Herstellers Angaben.

Ähnliche Aussagen können für die auf den ersten Blick einfach zu bestimmende Oberflächenrauigkeit getroffen werden, da diese in RF gleich mehrere Aufgaben erfüllt und sowohl von den Rauigkeitserhebungen auf der Hangoberfläche als auch von der Größe und Form des Sturzkörpers abhängt. Aus dieser Doppelfunktion darf die in das Programm eingegebene Oberflächenrauigkeit nur in Ausnahmefällen mit den Beobachtungen im Gelände gleichgesetzt werden. Des Weiteren ist bei der Angabe der Frequenz und der Amplitude zu berücksichtigen, dass vereinzelte Hindernisse im Ausmaß des Sturzkörpers nicht abgebildet werden können, da RF bei weiten Rauigkeitsabständen eine nahezu glatte Hangoberfläche generiert (Abb. 5). Mit einer feineren Untergliederung des Homogenbereiches in mehrere Lamellen kann dem entgegengewirkt werden. Allerdings sind die Positionen der Spitzen dann nicht mehr variabel. Zusammenfassend hat die Oberflächenrauigkeit in RF einen entscheidenden Einfluss auf das Simulationsergebnis, da sie maßgeblich das Bewegungsverhalten der Sturzkörper steuert. Dabei sind vor allem Hindernisse im Ausmaß des Designblocks oder darüber von Relevanz.

Ein systematischer „Programmfehler“,

der möglicherweise mit den hohen Sturzenergien in Verbindung steht, scheinen die beobachteten „Ausreißer“ zu sein. Sie entstehen, wenn hochenergetische Blöcke annähernd hangparallel auf markante Spitzen der Oberflächenrauigkeit prallen. Diese konnten auch mit unrealistisch hohen Dämpfungen sowie einer Verringerung der Variationsbreite der Eingangswerte von 15% auf 5% Prozent nicht verringert werden.

Rofmod: RM ist mangels einer Variation der Eingangsparameter nicht in der Lage, die natürliche Vielfalt der Sturzprozesse darzustellen, was sich in der geringen Streubreite der simulierten Trajektorien widerspiegelt.

Eine höhere Variabilität der Sturzbahnen ist erst im Auslaufbereich anzutreffen, da infolge der Hangverflachung und der engräumigen Topographieänderungen (Schutzwälle, etc.) stark wechselnde Aufprallbedingungen existieren, die jedoch in der Natur auch entlang des Transitbereiches auftreten. Die Mikrorauigkeit wird aufgrund des Rauigkeitskonzeptes allerdings vernachlässigt. RM kann somit Zusammenstöße mit Hindernissen auf der Hangoberfläche nicht simulieren. In der Realität üben diese jedoch einen großen Einfluss auf das Bewegungsverhalten und die Ablagerung von Sturzkörpern aus. Ein Beispiel ist das Phänomen, dass ein springender Block mit hoher Geschwindigkeit auf einen ähnlich großen Hangschuttblock trifft und unmittelbar zum Stehen kommt (Azzoni et al., 1992). Dies kann, wie in den Simulationen beobachtet, dazu führen, dass im groben Blockschuttbereich trotz hoher Rauigkeitszahlen (RZ = 15) keine Blöcke abgelagert werden. Darüber hinaus bleibt der Absprungwinkel, im Gegensatz zu einer Kollision mit einem realen Hindernis nahezu unbeeinflusst, worin eine weitere Ursache für die geringe Variabilität der Simulationsergebnisse liegt.

Dass keine rollenden Blöcke simuliert werden konnten, hängt wahrscheinlich mit dem

vordefinierten und zu gering gewählten Rollwiderstand zusammen.

Modellgrenzen und Lösungsansätze:

Durch die Simulationen an dem ausgewählten Geländeprofil konnten die Anwendungsgrenzen der verwendeten Steinschlagsimulationsprogramme deutlich aufgezeigt werden. Insbesondere die vernachlässigten 3D-Effekte im Bereich der Felsrinne sind als limitierender Faktor zu nennen. Darüber hinaus erwies sich auch die Modellannahme vollkommen elastischer Starrkörper als problematisch.

Eine Simulation mit einem 3D-Modell scheint daher als sinnvolle Alternative, um die komplexen topographischen Randbedingungen angemessen abzubilden. Auch hier muss jedoch eingeschränkt werden, dass gängige Programme wie Rofmod3D oder Rockyfor3D nicht in der Lage sind, Bruchprozesse von Sturzblöcken zu simulieren.

Resümee

Im Fall topographisch komplexer und langer Geländeschnitte, scheinen die verwendeten Programme aufgrund der modellspezifischen Vereinfachungen und programmexterner Unsicherheitsfaktoren (z.B. Wahl der Ausbruchsorte) nicht in der Lage, verlässliche Resultate zu liefern.

Stehen keine rekonstruierbaren Sturzergebnisse für Rückrechnungen zur Verfügung, muss die Modellkalibrierung anhand von Richtwerten aus Sturzversuchen, Geländebeobachtungen und allgemeinen Kriterien, wie der in Abhängigkeit von der Hangneigung dominierenden Fortbewegungsart, erfolgen. Die Simulationsergebnisse sind in einem derartigen Fall jedoch unter großem Vorbehalt zu betrachten. Das belegen die ungenügenden Ergebnisse der durchgeführten Simulationen. Zwar können die maximalen Reichweiten in beiden Modellen durch entsprechende Anpassung

der Untergrundparameter gut eingestellt werden, das entscheidende Plausibilitätskriterium muss jedoch die Kinematik der modellierten Sturzblöcke sein. Allgemeine Kriterien wie die Hangneigung und das aus Geländeuntersuchungen (Stumme Zeugen, etc.) abgeleitete Prozessverhalten können hierfür herangezogen werden. Erst darauf aufbauend dürfen die Reichweiten justiert werden.

Zusammenfassend können auf den ersten Blick sehr einfach zu handhabende Simulationsprogramme, die Erfahrung und das spezielle Wissen von Steinschlagexperten nicht ersetzen. Facheinschlägiges Expertenwissen ist, neben einer ausführlichen Geländestudie und der Kenntnis des Prozessgeschehens, die Grundvoraussetzung für eine sachgemäße Beurteilung von Steinschlagprozessen.

Anschrift des Verfassers / Author's address:

Diplom-Geologe Thomas Zwack
 Moser/Jaritz Ziviltechniker GmbH
 Bachwinkl 32, 5760 Saalfelden
 t.zwack@moser-jaritz.at

Literatur / References:

AGLIARDI, F. & CROSTA, G.B. (2003): High resolution three-dimensional numerical modeling of rockfalls. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40/4: 455-471.

AZZONI, A., ROSSI, P.P., DRIGO, E., GIANI, G.P. & ZANINETTI, A. (1992): In situ observations of rockfalls analysis parameters. In: Bell, D. (Eds.). Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides. Balkema, Rotterdam, The Netherlands: 307-314.

CHAU, K.T., WONG, R.H.C. & WU, J.J. (2002): Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39/1: 69-77.

DORREN, L.K.A., BERGER, F., LE HIR, C., MERMIN, E., TARDIF, P. (2005): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. For. Ecol. Manage. 215: 183-195.

DORREN, L.K.A., BERGER, F., PUTTERS, U.S. (2006): Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. Natural Hazards and Earth System Sciences 6: 145-153.

DR. SPANG (2008): Rockfall 7 - Rockfall Simulation Program Rockfall 7 - Users Manual, Demoversion. 49 p. Witten.

GEOTEST AG (2006): Benutzerhandbuch Steinschlag-Modellierung Rofmod 4.1. Zollikofen (Geotest AG).

KALBERER, M. (2006): Quantifizierung und Optimierung der Schutzwaldleistung gegenüber Steinschlag. Unveröff. Diss. Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg im Breisgau.

KUHN, Ch. (2004): Felsstürze - Beiträge zu ihrer Simulation. Unveröff. Dipl.-Arb. BOKU Wien. Wien.

PFEIFFER, T.J. & BOWEN, T.D. (1989): Computer simulations of rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists 26: 135-146.

RICKLI, C., F. GRAF, W. GERBER, M. FREI AND A. BÖLL (2004). Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs. Schutzwald und Naturgefahren. Forum für Wissen 2004. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Birmensdorf: 27-34.

SPANG, CH. & ROMUNDE, B. (2008): Preprocessing and smoothing of surface models for rockfall simulation. in: Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection. 23-25 June. Morschach. Switzerland:108-110.

SPANG, CH., ROMUNDE, B., WALDECKER, J., GANSER, H. (2008): Entwurf und Bemessung von Steinschlagschutzzäunen mit Rockfall 7.1 - Fels- und Hangsicherung Müden II. Computerorientierte Geologie der ÖGG Universität Salzburg. 02.07.2008. Salzburg.

SPANG, R.M. & SOENSER, T. (1995) Optimized rockfall protection by "ROCKFALL". in: Fujii, T. (Eds.). Proceedings of the 8th International Conference on Rock Mechanics. 25-30 September 1995. Tokyo. Japan. comptes rendus 3: 1233-1242.

STATHAM, I. (1979): A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and field experiments. Int. Colloquium on Physical and Geomechanical Models. ISMES Bergamo: 237-258.

ZINGGELER, A. & PFEIFER, R. (2009): Steinschlagmodellierung GEOTEST + Zinggeler, Modellbeschreibung. 21 S. Zollikofen.

ZWACK, T. (2011): GIS-gestützte, ingenieurgeologische Studien zu Sturzprozessen am Himbeereisen (Gesäuse-Nationalpark, Steiermark) mit einer vergleichenden Steinschlagmodellierung unter der Verwendung der Programme Rockfall 6.1 und Rofmod 4.1. Unveröff. Dipl.-Arb.. Lst. f. Ingenieurgeologie TU München. München.

Alles im grünen Bereich.

Schwarzenberger
 Samen & Gartenbedarf 



Hang zur Sicherheit!

**Für jede Lage
 das richtige Saatgut!**

Samen Schwarzenberger, Bahnhofstraße 32, A-6176 Völs / Tirol
 Tel. +43 (0)512 303 333, office@samen-schwarzenberger.com

**MARC CHRISTEN, WERNER GERBER, CHRISTOPH GRAF, YVES BÜHLER,
PERRY BARTELT, JAMES GLOVER, BRIAN W. MCARDELL, THOMAS FEISTL, WALTER STEINKOGLER**

Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit RAMMS (Rapid Mass Movements)

Numerical simulation of gravitational natural hazards with RAMMS (Rapid Mass MovementS)

Zusammenfassung:

Der Beitrag beschreibt das physikalisch basierte Prozess-Simulationsmodell RAMMS, welches verschiedene gravitative Naturgefahren (Lawinen, Murgänge und Steinschlag) in einer gemeinsamen Benutzeroberfläche darstellt. Es werden die Grundlagen, der Entwicklungsstand der Module und die Anwendungsmöglichkeiten sowie die Vorteile eines einheitlichen Modells für den Anwender gezeigt.

Stichwörter:

Simulationsmodell, RAMMS, Lawine, Mure, Hangmure, Steinschlag

Abstract:

The article presents the physical-based process simulation model RAMMS, which combines various gravitational natural hazards (avalanches, debris flow, rock fall) in one single user interface. An overview of the fundamentals, the state of development of the modules and the potential applications as well as the advantages of a unified model for the user are shown.

Keywords:

Process simulation model, RAMMS, avalanche, debris flow, hill slope debris flow, rock fall

Einleitung

Im Bereich der gravitativen Naturgefahren ist ein starkes Bedürfnis nach Prozessmodellen vorhanden, welche die Reichweite von Lawinen, Murgängen und Steinschlägen simulieren. Solche Modelle werden oft angewendet, um die Interaktion eines bestimmten Prozesses mit Schutzmaßnahmen wie Wäldern oder Ablenkdammen zu bewerten oder Gefahrenkarten zu erstellen. Traditionellerweise werden für jeden Prozess verschiedene Software-Modelle verwendet.

In diesem Beitrag beschreiben wir ein einheitliches Software-Paket zur Simulation von Lawinen (Abb. 2), Muren (Abb. 3), Hangmuren (Abb. 4) und Steinschlag (Abb. 5). Das Software-Paket RAMMS (Rapid Mass MovementS) vereint diese vier Prozess-Module (Abb. 1) mit einer benutzerfreundlichen grafischen Oberfläche. Im Folgenden diskutieren wir die Software-Entwicklung, die Herausforderungen, unterschiedliche Berechnungsansätze zu einem einzigen Modell zusammenzufassen. Die Modelle wurden mithilfe der Resultate aus verschiedenen WSL-Testanlagen (Ammann, 1999; Gerber, 2001; McArdeLL et al., 2007; Glover et al., 2010; Bugnion et al., 2011) und den Daten von genau dokumentierten Fallstudien (z.B. Bartelt et al., 2012; Christen et al., 2010a) getestet und kalibriert. Durch die Integration der verschiedenen physikalischen Modelle in einem Software-Paket ist es möglich, sowohl für Ingenieurbüros als auch für die Forschung ein umfassendes Werkzeug zur Verfügung zu stellen. Es wird die Arbeit im Umgang mit dem integrierten Risikomanagement wesentlich vereinfachen.

Einheitliche Modellierung von Naturgefahren

Die einheitliche Modellierung verschiedener Naturgefahren ist eine nützliche, aber schwierige Software-Entwicklungs-Aufgabe. Die Entwickler

sind mit verschiedensten Herausforderungen der Naturgefahren-Forschung konfrontiert.

Digitales Höhenmodell DEM

Eine Voraussetzung für eine korrekte numerische Berechnung ist ein genaues digitales Höhenmodell (Abb. 1). Die Auflösung der digitalen Geländemodelle wird oft von den Behörden (Kartierungsstellen) vorgeschrieben. Eine hohe Genauigkeit der Höhenmodelle (in der Größenordnung von 0,5 m) kann aus Airborne-Laserscanning-Systemen oder der digitalen Photogrammetrie (Bühler et al., 2012) gewonnen werden; solche Modelle werden vor allem in den meisten europäischen Ländern eingesetzt. Bühler et al. (2011) haben gezeigt, dass bei Höhenmodellen mit einer schlechten räumlichen Auflösung (in der Größenordnung von 25 m und mehr) wichtige Gelände-merkmale verloren gehen, während eine zu große Genauigkeit der Höhenmodelle (in der Größenordnung von 1 m oder weniger) zu umfangreichen Rechenzeiten führen und sogar falsche Simulationsergebnisse produziert werden können. Die optimale räumliche Auflösung des Höhenmodells ist sowohl prozess- wie auch massenabhängig. Zum Beispiel ist in einer Lawinen-Simulation eine Auflösung von 5 m genügend (auch wenn das Höhenmodell genauer ist), da die Schneedecke glättet und hochfrequente Unebenheiten im Gelände überwindet (Bartelt et al., 2012). Das Software-System muss daher die Eigenschaft haben, dass die vorhandenen digitalen Höhenmodelle auf eine frei wählbare (prozess-spezifische) Auflösung neu gerechnet werden können.

Anfangsbedingungen

Eine flexible und genaue Spezifikation der Anfangsbedingungen ist notwendig, um unterschied-

liche Gefahrenszenarien zu untersuchen. Jeder Prozess hat einzigartige Startbedingungen und abweichende Verhaltensweisen bei der Bewegung. Beispielsweise sind bei den Lawinen die Lage und die Abmessungen des Startvolumens oder mehrerer Startvolumina (Fläche und Mächtigkeit des Anrisses) erforderlich, bei Murgängen ist die Durchflussmenge an einer an einer definierten Stelle im Wildbach hilfreicher als ein Startvolumen. Um Steinschlag-Flugbahnen berechnen zu können, sind Angaben über die Position, die Orientierung und die erste potenzielle oder kinetische Energie (Fallhöhen oder anfängliche Rotations- bzw. Translationsgeschwindigkeit) des Steines oder Blockes notwendig. Oft ist die Spezifikation der Anfangsbedingungen durch Berechnung oder Abschätzung möglich oder sie sind in länderspezifischen und Gefahren-Richtlinien vorgeschrieben. Daher muss das Software-System für verschiedene Naturgefahren eine breite Palette von verschiedenen Eingabemöglichkeiten ausweisen, je nach den jeweiligen Prozess- und Problemstellungen (Abb. 1).

Parameter

Die Auswahl der Modellparameter bleibt eine der wesentlichen Herausforderungen für numerische

Berechnungen von Naturgefahren. Jedes Prozess-Modell erfordert wohlherprobte Parameter-Sets, damit die Ereignisse mit statistischen Sicherheiten simuliert werden können. Physikalisch basierte Prozessmodelle, die zum Beispiel direkt die Terrain-Eigenschaften und die Materialeigenschaften verbinden, sind von großem Nutzen. Es ist offensichtlich, dass ein numerisches Modell nicht zu viele Parameter berücksichtigen kann, da dies das Vertrauen der Nutzer einschränkt und die Möglichkeit von falschen Annahmewerten erhöht. Die Kontinuität der Modelle ist ein weiterer wichtiger Faktor in der Technik, sonst müssen alte Simulationen neu berechnet werden, was zu Unsicherheiten und vielleicht auch zu rechtlichen Problemen führen kann (Jörg et al., 2012).

Numerik

Die heutigen Rechnerkapazitäten und Fortschritte in der Software-Entwicklung ändern sich schneller, als die Naturgefahren-Probleme rechnerisch gelöst werden. Trotzdem erfordern die Berechnungen viel Zeit und Ressourcen, um effizient ein brauchbares Resultat zu erhalten. Qualitativ schlecht ausgeführte Simulationen ohne entsprechende Sensitivitätsanalysen und Parameterstudi-

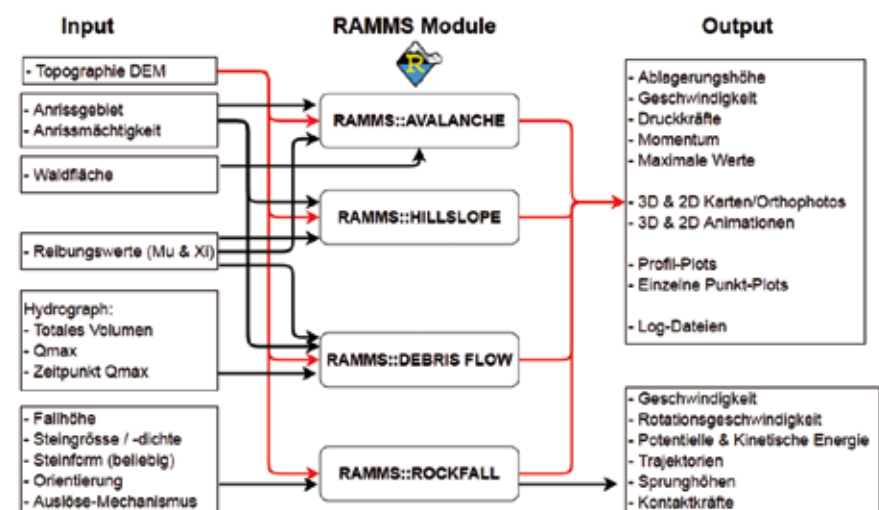


Abb. 1: RAMMS Workflow – zeigt die spezifischen und einheitlichen Eingabe- (Input-) und Ausgabe-Funktionen (Output) der RAMMS-Module.

Fig. 1: RAMMS workflow - showing both the specific and unified input and output features for the unified RAMMS modules.

en sind in der Praxis nicht selten anzutreffen. Ein Grund dafür kann sein, dass die vielen Programme und Teilschritte nacheinander ausgeführt werden müssen, um eine effiziente Analyse durchführen zu können. Wenn es möglich ist, das gleiche Software-Paket für verschiedene Naturgefahren zu verwenden, könnte dieser Aufwand minimiert werden und – noch wichtiger – das Risiko von Fehlern infolge unzureichender Kenntnis der verschiedenen Software-Produkte könnte ebenfalls reduziert werden.

Visualisierung

Ingenieure verwenden eine Vielzahl von Visualisierungsmethoden, um die verschiedenen Naturgefahren-Beurteilungen darzustellen; Beispiele sind Karten, Fotos, 2D- und 3D-Simulations-Ergebnisse, XY-Plots, Gelände-Profile und -Animationen (Abb. 1). Die Simulations-Software muss in der Lage sein, externe Informationen zu importieren und Resultate mit georeferenzierten Informationen zu exportieren (z.B. GIS-Formate). Dies ist wichtig für die Berichterstattung und die Präsentation der Ergebnisse an die Behörden sowie für die Interpretation der Simulationsergebnisse durch die Experten. Die Visualisierung der Rechenergebnisse macht die numerischen Berechnungen für Sachverständige und Laien transparenter und leichter verständlich.

RAMMS::AVALANCHE

Im RAMMS::AVALANCHE-Modul werden die zweidimensionalen tiefengemittelten Massen- und Bewegungsgleichungen im dreidimensionalen Gelände mittels Finite-Volumen-Verfahren erster und zweiter Ordnung gelöst (Christen et al. 2010b). Das Modell erlaubt damit die Berechnung von Geschwindigkeiten und Fließhöhen der Lawine. Die Anfangsbedingungen der Lawine werden mit

einer Anrissfläche und -mächtigkeit definiert (Abb. 2). Um verschiedene Bedingungen im Anrissgebiet bestmöglich zu erfassen, zum Beispiel windverfrachteter Schnee in Kammnähe, besteht die Möglichkeit, mehrere individuelle Anrissgebiete mit unterschiedlichen Anrissmächtigkeiten zu definieren.

In seiner ursprünglichen Form wird in RAMMS::AVALANCHE das gut kalibrierte Voellmy-Reibungsmodell (Voellmy, 1955) verwendet, welches 2 Parameter beinhaltet: die coulombische Reibung (μ) und die turbulente Reibung (ξ), welche von der Geschwindigkeit im Quadrat abhängt. Diese Parameter können für das gesamte Untersuchungsgebiet konstant gewählt werden oder räumlich variieren, um sie den topographischen Charakteristiken, der Rauigkeit oder Vegetation anzupassen (Gruber & Bartelt, 2007). Die Berechnungen werden automatisch gestoppt, sobald der gesamte Massenfluss unter einen festgelegten Schwellenwert, definiert als Anteil des maximalen Massenflusses, sinkt.

Zusätzliche Informationen und Empfehlungen für die Wahl der Reibungsparameter (basierend auf umfangreicher Modell-Kalibrierung) kann man den Schweizer Richtlinien (Salm, 1990) entnehmen. Diese Werte sind repräsentativ für extreme, schnell fließende und trockene Lawinen, welche üblicherweise von einer Staubwolke umhüllt sind. Diese Parameter berücksichtigen die Lawinengröße implizit und zusätzlich aufgenommene Masse während des Lawinenabgangs („entrainment“) muss daher in den Modellberechnungen nicht explizit eingefügt werden. (Stau-)Drücke werden mittels der Dichte der kinetischen Energie, unter der Annahme einer konstanten Fließdichte, berechnet. Da trockene Lawinen die größten Geschwindigkeiten und längsten Auslaufdistanzen aufweisen, eignet sich dieses Modell gut für praktische Anwendungen, in etwa zur Gefahrenzonenplanung (Christen et al., 2010a).

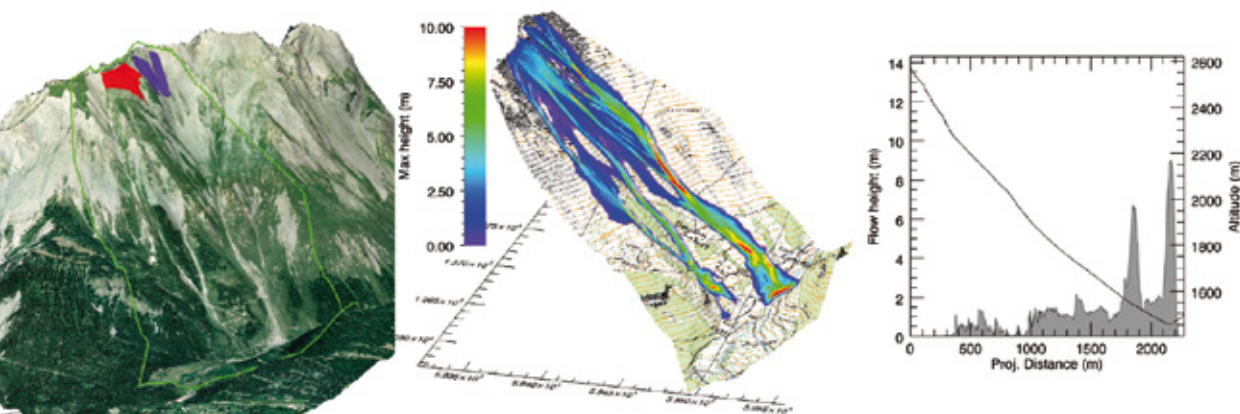


Abb. 2: RAMMS::AVALANCHE – Anrissgebiet und Überblick über die Situation (links), Simulationsresultate in 3D (Mitte) sowie entlang einer Lawinenbahn (rechts) im Vallée de la Sionne (VS), Schweiz. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

Fig. 2: RAMMS::AVALANCHE – release zone and overview of the topography (left); results of simulation in 3D (center) and along the avalanche track (right) in Vallée de la Sionne (VS), Switzerland. Reproduction with permission of swisstopo (JA100118).

Trotzdem wird das RAMMS::AVALANCHE-Modul ständig weiterentwickelt, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse implementieren zu können. Zurzeit werden neue Funktionen entwickelt, welche eine bessere Berücksichtigung verschiedener Lawinengrößen, Initialbedingungen und Fließregime erlauben.

Ein wesentlicher Fortschritt wurde durch die Implementierung der Beschreibung der Fluktuationsenergie der Schneegranulate erreicht (Bartelt et al., 2012), welche einen großen Einfluss auf die Reibung und damit auf die Übergänge zwischen verschiedenen Fließregimen hat (Fließanteil am Lawinenschwanz und fluidisierte Lawinenfront). Um Lawinendrucke noch besser berechnen zu können, wird zurzeit ein Modell getestet, welches die Variabilität der Dichte in der Lawine berücksichtigt. Weiter werden in zukünftigen Modellaktualisierungen Entrainment-Prozesse berücksichtigt, da die Produktion von Fluktuationsenergie massenabhängig ist.

Da viele Benutzer mit der Problematik von Nassschneelawinen konfrontiert sind, sollte

ein spezielles Nassschneelawinen-Modul Ende 2012 für erste Testläufe bereit stehen. Dieses Modul wird Schneetemperaturen berücksichtigen und den freien Wassergehalt in der Lawine berechnen. Dies wiederum liefert die grundlegenden Zustandsgrößen, um Schneegleiten und die Bildung von Levees zu modellieren. Da viele Anwender auch Interesse an der präzisen Modellierung von kleinen, häufig auftretenden Lawinen zeigen, wird an einer genaueren Spezifizierung der Anfangsbedingungen (Struktur und Kollaps der Schneedecke) sowie an der notwendigen Genauigkeit von digitalen Geländemodellen geforscht. Um all dies zu erreichen, werden momentan zahlreiche kleinere Lawinen zur Kalibrierung verwendet.

Um in naher Zukunft gemischte Fließ- und Staublawinen berechnen zu können, wird momentan an einer Formulierung der notwendigen physikalischen Randbedingungen für Luftaustöße aus dem Lawinenkern geforscht. Dies wird die Kopplung von RAMMS::AVALANCHE mit einem neuen Staublawinen-Modell ermöglichen.

RAMMS::DEBRIS FLOW

Das RAMMS::DEBRIS-FLOW-Modul wurde für die Auslaufsimulation von Murgängen in komplexem Gelände entwickelt (Graf & McArdell, 2008; Graf & McArdell, 2011). Mit dem Modul können auch Aufpralldrücke und Fließhöhen für die Bemessung von Schutzbauwerken berechnet werden. Der Kern des Programms bildet eine numerische Lösung zweiter Ordnung der tiefengemittelten Gleichungen für granulares Strömen. Wie beim Lawinen-Modul werden die Modellresultate auf einer dreidimensionalen Geländemodelloberfläche visualisiert. Die Benutzer haben

die Möglichkeit, entweder mit einem oder mehreren individuellen Anrissgebieten zu starten oder mit einem Hydrographen, für welchen Abfluss und Geschwindigkeit in Funktion der Zeit definiert werden können (s. unten). RAMMS::DEBRIS FLOW berücksichtigt im Moment Erosion und Materialaufnahme noch nicht (Berger et al., 2011; Schürch et al., 2011). Ein „Bulking“-Algorithmus (= Volumenvergrößerung) ist jedoch bereits in Entwicklung. Anwendungsbeispiele von RAMMS::DEBRIS FLOW finden sich in Scheuner et al. (2011) und Berger et al. (2012).

Wie im Lawinen-Modul wird der klassische Voellmy-Ansatz verwendet. Zahlreiche

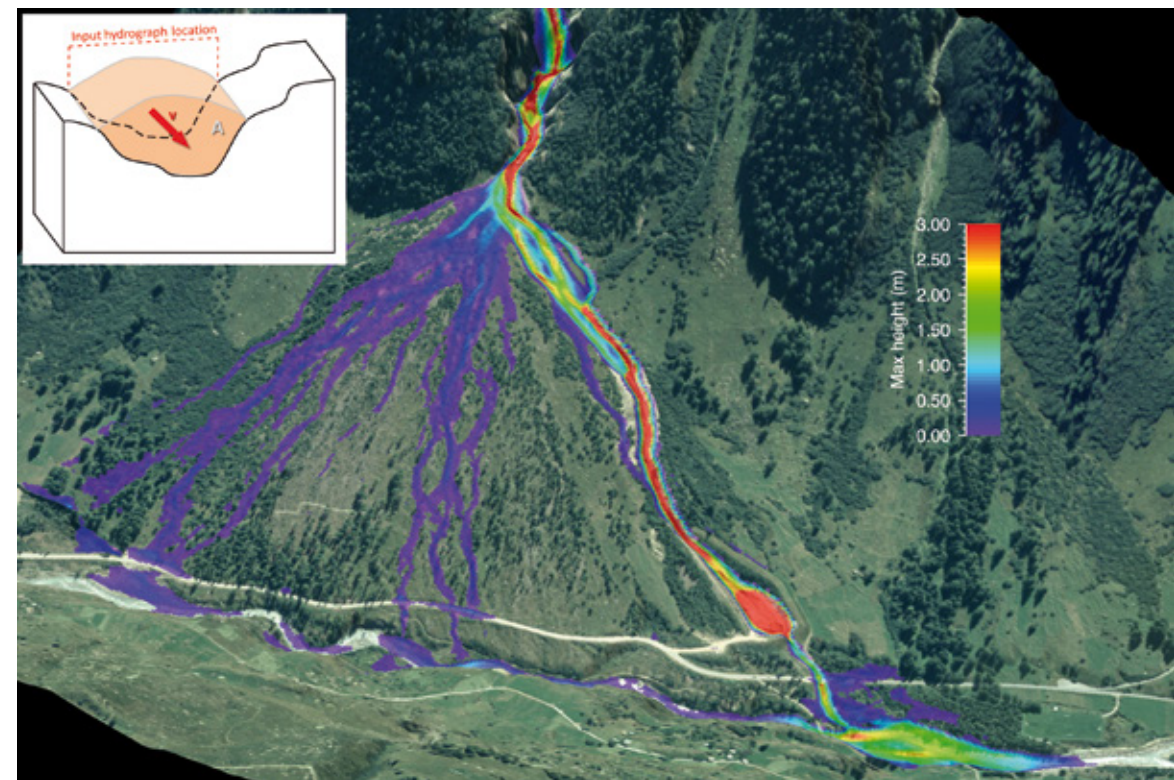


Abb. 3: RAMMS::DEBRIS-FLOW-Simulation Stampbach (VS), Schweiz. Hydrograph (oben links): Abfluss $Q = A \cdot v$ (m^3/s); A (m^2) ist die Querschnittsfläche des Murgangs und v (m/s) ist die Einfließgeschwindigkeit. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

Fig. 3: RAMMS::DEBRIS FLOW simulation of Stampbach (VS), Switzerland. Hydrograph (top left): discharge $Q = A \cdot v$ (m^3/s); A (m^2) is the cross section area of the debris flow and v (m/s) is the flow velocity. Reproduction with permission of swisstopo (JA100118).

Studien haben gezeigt, dass dieser Ansatz für die Modellierung des Murgang-Auslaufes erfolgreich angewendet werden kann (Huerlimann et al., 2003; McDougall & Hungr, 2005; Naef et al., 2006; Rickenmann, 2006; Medina et al., 2008). Um das Voellmy-Modell zu kalibrieren, werden typischerweise gut dokumentierte historische Ereignisse nachgerechnet und die gefundenen Best-fit-Parameter (d.h. die passenden Parameter) werden für darauffolgende Studien verwendet. Mit der Möglichkeit, die Topographie mit Ablagerungen vorgängig modellierter Murgangschübe zu modifizieren, kann der Einfluss von mehreren Schüben auf den Auslauf und die Fließwege von Murgängen evaluiert werden.

Mit einem Input-Hydrographen (Abb. 3), mit dem eine Abflussganglinie basierend auf Messungen oder Abschätzungen definiert wird, kann der Benutzer die Berechnungszeit deutlich reduzieren (da das Berechnungsgebiet eingegrenzt werden kann) oder die Zellgrößen nochmals verfeinern und die Berechnung damit Gerinneabwärts deutlich unterhalb der Anrisszone starten, z.B. am Kegelhals (Abb. 3).

RAMMS::HILLSLOPE

Rutschungen bewegen sich auf sehr verschiedene Arten talwärts (Varnes, 1978). Neben kleinen Rutschbewegungen können sich Rutschungen an Hängen ohne ausgeprägte Rinnen in fließende, murgangähnliche Massen verwandeln. Diese sogenannten Hangmuren stellen in vielen Ländern ein großes Problem dar. Aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften wurde eigens ein optimiertes Modul für Hangmuren auf der Basis des Murgang-Moduls entwickelt.

Die geomorphologische Vielfalt von schnellen flachgründigen Rutschungen, wozu auch Hangmuren gezählt werden können, ist noch größer als dies bei kanalisierten Gerinnemurgängen beobachtet werden kann. Dennoch können zahlreiche Formen mit dem Ansatz eines Voellmy-Fluids erfolgreich nachmodelliert werden. Dabei wird die Masse als Block gestartet. Bedingt durch das typischerweise eher geringe Gesamtvolumen (einige Hundert bis wenige Tausend Kubikmeter) und die kürzeren Reichweiten sind dafür höher aufgelöste Geländemodelle als Berechnungsgitter erforderlich (Abb. 4). Im Weiteren ist es noch wichtiger als bei Lawinen oder Murgängen, die Anrissstelle möglichst genau zu

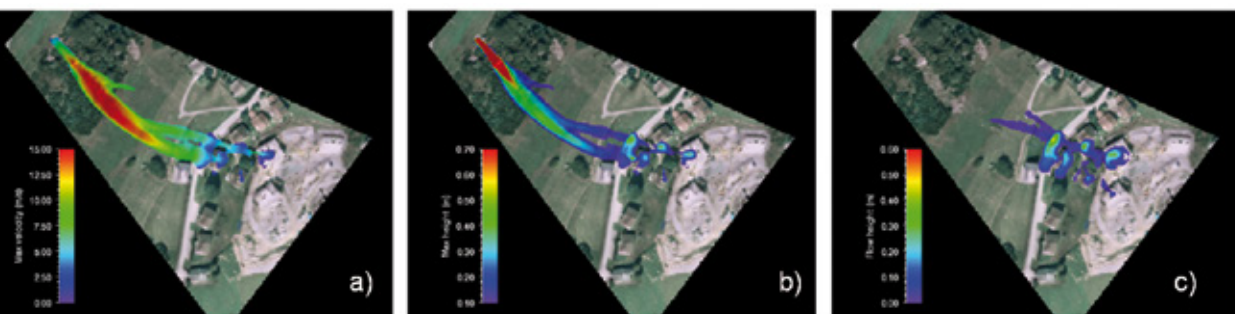


Abb.4: Die RAMMS::HILLSLOPE-Simulation (Acletta (GR), Schweiz) zeigt maximale Fließgeschwindigkeiten a), maximale Fließhöhen b) und Ablagerungshöhen c). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

Fig. 4: RAMMS::HILLSLOPE simulation (Acletta (GR), Switzerland) shows the maximum flow velocity a), maximum flow depth b) and deposition depth c). Reproduction with permission of swisstopo (JA100118).

wählen, da die Fließrichtung sehr stark durch die lokale Mikrotopographie, wie etwa Rinnen oder Engstellen, gesteuert wird.

Oft liegen die Fließspuren – im Gegensatz zu Gerinnemurgängen – auf Weiden oder anderweitig landwirtschaftlich genutztem Land. Entsprechend unterscheiden sich die Reibungsparameter in RAMMS::HILLSLOPE deutlich von denjenigen bei Gerinnemurgängen. Das Modul RAMMS::HILLSLOPE nutzt momentan sämtliche Möglichkeiten des Moduls RAMMS::DEBRIS FLOW, jedoch ohne Input-Hydrographen (Abb. 3). Zusätzlich wird dagegen eine modifizierte Version des Voellmy-Reibungsmodells für Reibungsverminderung durch die Präsenz von granularer

Fluktuation (weiter oben beschrieben) angeboten. Dies führt in gewissen Fällen zu realistischeren Simulationsergebnissen, insbesondere bei Ablagerungen im Hangbereich. Das Modell befindet sich zurzeit in einer Beta-Test-Phase (Loup et al., 2012), in die zahlreiche Ingenieurbüros (aus der Schweiz) mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) involviert sind.

RAMMS::Rockfall – Starrkörpersimulation mit „harten“ Kontakten

Neben allen zuvor genannten Prozessen ist Steinerschlag das einzige Verfahren, das nicht durch Strömungssimulation beschrieben werden kann.

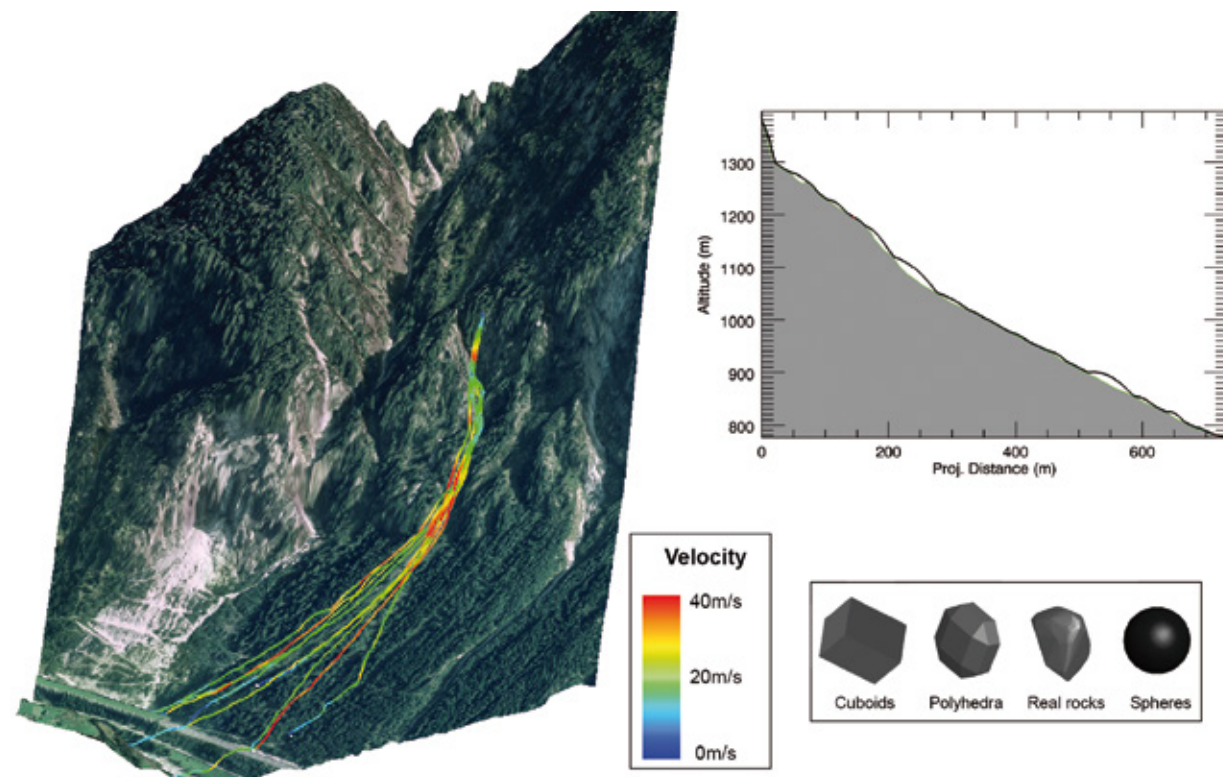


Abb. 5: RAMMS::ROCKFALL-Simulation mit verschiedenen Steinformen (unten rechts) in Gurtellen (UR) Schweiz. Ergebnisse der Geschwindigkeiten (links) und einer Flugbahn mit Sprunghöhen (oben rechts). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118).

Fig. 5: IRAMMS::ROCKFALL simulation using different rock shapes (bottom right) in Gurtellen (UR) Switzerland. Results of velocities (left) and a trajectory profile plot showing rock jump heights (top right). Reproduction with permission of swisstopo (JA100118).

Stattdessen beinhaltet Steinschlag eine Reihe von verschiedenen Kontakten zwischen der Geländeoberfläche und dem Steinkörper, wie Gleiten, Rollen und Springen mit Bodenkontakten. Um dieses Verhalten zu modellieren, erfordert es verschiedene Ansätze. Einerseits muss die Form des Steines und andererseits müssen die Eigenschaften der Geländeoberfläche berücksichtigt werden. Um die Dynamik von einzelnen Kontakten im dreidimensionalen Geländemodell zu beschreiben wird im RAMMS::ROCKFALL-Modul die Starrkörpertheorie verwendet. Diese Theorie und die Einbettung ins Rechenmodell wurde im Zentrum für Mechanik (Institut für Mechanische Systeme, ETH Zürich) in enger Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut WSL/SLF entwickelt. Bei der Starrkörpertheorie wird der Stein als dreidimensionaler, unzerstörbarer, polyedrischer und starrer Körper modelliert, der mit einer schachbrettartigen Oberfläche in Reibungskontakt kommen kann. Konzepte aus dem Bereich der nicht-glaten Dynamik (Glocker, 2001; Leine & Nijmeijer, 2004) werden verwendet, um diesen „Starrkörperansatz“ mit einer „harten“ Modellierung der Kontakte zu kombinieren.

Die Form des Steines wird als dreidimensionales, konvexes Polytop (Dreiecksgitter) in das Modell eingegeben. Mit dieser Vereinfachung können willkürliche Formen wie Quader, Polyeder, Kugeln und selbstverständlich auch Natursteinformen generiert werden (Abb. 5). Echte Steine werden oft auch mit Laser-Scanning-Techniken vermessen und die Resultate werden für den Einsatz im Simulationsmodell als konvexes Polytop dargestellt.

Die vollständige dreidimensionale Simulation von Steinschlag mit RAMMS::ROCKFALL ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der Form der Steine auf die Reichweite, die Ge-

schwindigkeit, die Rotation, die Sprunghöhe und seitliche Ausbreitung der Steinschlagbahnen. Die Höheninformationen der Karte werden bilinear interpoliert, um eine glatte Oberfläche für die berührungslose Erkennung zwischen Stein und Oberfläche zu generieren. Die Kontaktstellen werden durch ein spezielles Verfahren (Ray-Casting) gefunden, sodass klar ist, welcher Eckpunkt des Steines die Oberfläche zuerst berührt. Das Kontakt-Modell ist eine Kombination von verschiedenen physikalischen Gesetzen (Signorini-Gesetz, Coulomb-Reibung und Newton) und damit kann der Geschwindigkeitsverlust, die Flugbahnrichtung und die Rotation nach dem Kontakt berechnet werden.

Das Kontakt-Problem wird in jedem Zeitschritt als eine Reihe von impliziten Gleichungen formuliert und durch ein Iterationsverfahren gelöst. Dies ist ein wichtiger Schritt in der Steinschlag-Modellierung, da es eine echte Beschreibung der Interaktion zwischen dem Stein und dem Boden erlaubt, und die Variabilität der Stein-Flugbahn muss nicht mit einer zusätzlichen und zufälligen Variation der Oberfläche im Geländemodell erzwungen werden (Volkwein et al., 2011). Stattdessen wird eine Variation bei den Startbedingungen eingegeben und dies erzeugt die Variabilität der Steinschlagflugbahnen, welche ihrerseits in der Herstellung von Gefahrenkarten verwendet werden kann. Als Beispiel der Variabilität der Startbedingungen können auch Informationen über die Eigenschaften des Gesteines in der Simulation berücksichtigt werden (natürliche Variabilität der Orientierung von Diskontinuitäten). Diese sind neben der Partikelgröße und -form verantwortlich für die Ablösung von Steinen aus den absturzgefährdeten Gebieten. Die Interaktionen zwischen Steinen und Baumstämmen oder Vegetation sind noch nicht entwickelt, werden aber derzeit bearbeitet.

Schlussfolgerungen

RAMMS wurde entwickelt, um den praktischen Anwender in seiner Arbeit mit Naturgefahren zu unterstützen. Es sollte als ergänzendes Instrument mit dem Potenzial zur Verbesserung der Qualität von Gefahreneinschätzungen betrachtet werden und es sollte aber auch die Zeit, die zur Gefahrengewertung benötigt wird, verringern. Derartige Arbeit verlangt Untersuchungen einer erfahrenen Fachperson im Feld, um die Plausibilität von Modellergebnissen aus Projekten, die die öffentliche Sicherheit betreffen, nachzuprüfen.

RAMMS bietet ein physikalisch basiertes Prozess-Simulationsmodell, das den Bedürfnissen von Praktikern gerecht wird. Wie bei allen Gefahrensimulationsprogrammen müssen die Resultate jedes entsprechenden Moduls von einem Experten genau überprüft werden und die Ergebnisse mit unabhängigen Methoden (z.B. empirische Zusammenhänge) und wenn möglich mit Feldbegehungen auf Plausibilität getestet werden. Die Kombination verschiedener Prozesse (z.B. Lawinen, Murgänge und Steinschlag) in einer Benutzeroberfläche bietet einen entscheidenden Vorteil für die Anwender: Sie müssen nur ein Programm erlernen, anstatt viele unterschiedliche. Damit wird die Einarbeitungszeit und die Möglichkeit, Fehler zu machen, reduziert.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Marc Christen
Yves Bühler
Perry Bartelt
James Glover
Thomas Feistl
Walter Steinkogler
WSL-Institut für Schnee- und
Lawinenforschung SLF
Flüelastr. 11, 7260 Davos Dorf
Schweiz
E-Mail: christen@slf.ch

Werner Gerber
Christoph Graf
Brian W. McArdeall
Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstr. 111
8903 Birmensdorf
Schweiz

Literatur / References:

- AMMANN W. (1999).
A new Swiss test-site for avalanche experiments in the Vallée de la Sionne / Valais, *Cold Regions Science and Technology* 30, 3–11.
- BARTELT P., BÜHLER Y., BUSER O., CHRISTEN M. and MEIER L. (2012).
Modeling mass-dependent flow regime transitions to predict the stopping and depositional behavior of snow avalanches. *J. Geophys. Res.*, 117, doi: 10.1029/2010JF001957.
- BERGER, C. MCARDRELL, B.W. and SCHLUNEGGER, F. (2011).
Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland. *J. Geophys. Res.*, 116.
- BERGER C., MCARDRELL B. AND LAUBER G. (2012).
Murgangmodellierung im Illgraben, Schweiz, mit dem numerischen 2D-Modell RAMMS. Murgangmodellierung in der Praxis. 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 – Grenoble / France, Conference Proceedings.
- BUGNION L., MCARDRELL B., BARTELT P. and WENDELER C. (2011).
Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides*, DOI 10.1007/s10346-011-0294-4.
- BÜHLER Y., CHRISTEN M., KOWALSKI J. and BARTELT P. (2011).
Sensitivity of snow avalanche simulations to digital elevation model quality and resolution. *Ann. Glaciol.*, 52(58), 72–80.
- BÜHLER, Y., MARTY, M. and GINZLER, Ch. (2012).
High resolution DEM generation in high-alpine terrain using airborne remote sensing techniques. *Transactions in GIS* (in press).

CHRISTEN, M., P. BARTELT and J. KOWALSKI. (2010a). Back calculation of the In den Arelen avalanche with RAMMS: interpretation. Ann. Glaciol., 51(54), 161–168.

CHRISTEN, M., J. KOWALSKI and P. BARTELT. (2010b). RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Reg. Sci. Technol., 63(1–2), 1–14.

GERBER, W. (2001). Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern. 39 S.

GLOCKER CH. (2001). Set-Valued Force Laws, Dynamics of Non-Smooth Systems, vol. 1 of Lecture Notes in Applied Mechanics. Springer-Verlag, Berlin.

GLOVER, J., VOLKWEIN, A., DUFOUR, F., DENK, M., AND ROTH, A. (2010). Rockfall attenuator and hybrid drape systems – design and testing considerations, in: Third Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures, edited by: Darve, F., Doghri, I., El Fatmi, R., Hassis, H., and Zenzri, H., 379–384, Djerba.

GRAF CH. and MCARDELL B. (2008). Simulation of debris flow runoff before and after construction of mitigation measures: an example from the Swiss Alps. Proceedings of the International Conference on DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Pyatigorsk, Russia, 22–29 September 2008, 233–236.

GRAF, C. and B.W. MCARDELL (2011). Debris-flow monitoring and debris-flow runoff modelling before and after construction of mitigation measures: an example from an instable zone in the Southern Swiss Alps. In: Lambiel C.; Reynard E.; Scapozza, C. (eds) La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, 3–5 septembre 2009, Olivone. Géovisions no 36. Lausanne, Université de Lausanne Institut de Géographie. 245–258

GRUBER, U. and P. BARTELT. (2007). Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. Environ. Model. Softw., 22(10), 1472–1481.

HUERLIMANN, M., RICKENMANN, D., GRAF, C. (2003). Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal, 40:161–175.

JÖRG P., GRANIG M., BÜHLER Y. AND SCHREIBER H. (2012). Comparison of measured and simulated snow avalanche velocities. 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 – Grenoble / France, Conference Proceedings.

LEINE R.I., NIJMEIJER H. (2004). Dynamics and Bifurcations of Non-Smooth Mechanical Systems, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics Vol. 18, Berlin Heidelberg New-York, Springer-Verlag.

LOUP B., EGLI T., STUCKI M., BARTELT P., MCARDELL B. AND BAUMANN R. (2012). Impact pressures of hillslope debris flows. Back-calculation and simulation (RAMMS). 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 – Grenoble / France, Conference Proceedings.

MCARDELL B., BARTELT P. and KOWALSKI J. (2007). Field observations of basal forces and fluid pore pressure in a debris flow. Geophysical Research Letters, VOL. 34, L07406, doi:10.1029/2006GL029183.

MCDUGALL, S., HUNGR, O. (2005). Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides. Canadian Geotechnical Journal, 42(5):1437–1448.

MEDINA, V., HUERLIMANN, M., BATEMAN, A. (2008). Application of flatmodel, a 2d finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian peninsula. Landslides, 5:127–142.

NAEF, D., RICKENMANN, D., RUTSCHMANN, P., MCARDELL, B.W. (2006). Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6:155–165.

RICKENMANN, D., LAIGLE, D., MCARDELL, B.W., HUEBL, J. (2006). Comparison of 2d debris-flow simulation models with field events. Computational Geosciences, 10:241–264.

SALM, B., BURKARD, A., GUBLER, H., (1990). Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Mitteilung 47, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.

SCHEUNER, TH., SCHWAB, S., MCARDELL, B. (2011). Application of a two-dimensional numerical model in risk and hazard assessment in Switzerland. In 5th DFHM, Padua, Italy.

SCHÜRCH, P.; DENSMORE, A.; ROSSER, N. & MCARDELL, B. (2011). Dynamic controls on erosion and deposition on debris-flow fans. Geology, 39, 827–830

VARNES D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Schuster R. L. & Krizek R. J. Ed., Landslides, analysis and control. Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, Nat. Acad. of Sciences, pp. 11–33.

VOELLMY, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweiz. Bauztg., 73(12), 159–162.

VOLKWEIN, A., SCHELLENBERG, K., LABIOUSE, V., AGLIARDI, F., BERGER, F., BOURRIER, F., DORREN, L.K.A., GERBER, W. AND JABOYEDOFF, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - A review. Natural Hazards and Earth System Science, 11, 2617–2651.



INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR BAUWESEN, GEOLOGIE UND UMWELTECHNIK MBH

Felssicherung und Steinschlagschutz weltweit



Steinschlag Simulationsprogramm ROCKFALL 7.1

Programmfunktionen:

- Steinschlagsimulation für den Einzelstein und für bis zu 10.000 Steine**
- Physikalisch exakte Berechnung der Steinschlagbahnen.**
- Volle Berücksichtigung des Dralls.**
- Automatische Variation der Eingangsdaten für die einzelnen Lamellen und Steine.**
- Berechnung von Koordinaten, Energie und Impuls beim Aufschlag auf Schutzbauwerke.**
- Angabe der erforderlichen Bauwerkshöhe.**
- Ausgabe der Energie- und Sprunghöhenverteilung entlang des Profils.**
- weltweite Referenzen und international publiziert**



**Seit über 30 Jahren Ihr Partner bei Begutachtung,
Erkundung, Planung und Überwachung in der Geotechnik**

BETTINA NEUHÄUSER, JOACHIM SCHWEIGL, BODO DAMM, BIRGIT TERHORST

Rutschprozesse im Wienerwald in Niederösterreich und Wien

Statistically probable hazard modelling on the basis of historical sources and data from the building ground register

Zusammenfassung:

Der nördliche Wienerwald ist durch die Eigenschaften ton- und mergelreiche Flyschgesteine und das Vorkommen von mächtigen quartären Lockersedimentdecken disponiert für Rutschungen. Auf Grundlage von historischen Quellen und Daten des Baugrundkatasters der Niederösterreichischen Landesregierung sowie anderen Datenbeständen wurde die Gefährdung für Rutschungen im Flysch-Wienerwald näher untersucht. Ziel war es, neue Erkenntnisse über die Steuerungsfaktoren von Rutschungen zu gewinnen und eine regionale Gefährdungskarte für das Gebiet zu entwickeln. Die angewandte Methode der Evidenzgewichtung lieferte Informationen über kausale Zusammenhänge zwischen den bisher aufgetretenen Rutschungen und den untersuchten Steuerungsfaktoren. Die Untersuchung zeigt in diesem Zusammenhang, dass neben den tonreichen Schieferzonen auch die tektonischen und hydrologischen Bedingungen (beeinflusst durch Oberflächengewässer und Niederschlagsmenge) besonders für das Auftreten von Rutschungen bedeutend sind.

Stichwörter:

Rutschungen, Gefährdungsbeurteilung, GIS-gestützte Modellierung, Wienerwald

Abstract:

The northern Vienna Forest is predestined for landslides due to the properties of the clay and marl rich flysch bedrock and the massive superimposed quaternary sediments. Based on historical sources, data of the Building Ground Register of the Federal Government of Lower Austria and other data bases, the landslide susceptibility was assessed in the flysch regions of the Vienna Forest. The objective was to create new knowledge on the steering geofactors for landslides and to develop a regional hazard map. The applied method, referred to as weights-of-evidence, delivers information on the causal relationships between known landslide events and specific steering geofactors. The investigation showed that beside of the clay-shale zones, the tectonic properties and the hydrologic conditions (influenced by drainage lines and precipitation) are relevant dispositions for landslides.

Keywords:

Landslides, hazard assessment, GIS-based modeling, Vienna Forest

Einleitung

In Österreich sind verschiedenste Typen von Massenbewegungen häufig und weit verbreitet (Rudolf-Miklau, 2009; Schweigl und Hervas, 2009). Neben den alpinen Bereichen ist besonders die Rhenodanubische Flyschzone disponiert für Massenbewegungen (Götzinger, 1943; Wessely, 2006). Am nord-östlichen Rand der Flyschzone liegt das Gebiet des nördlichen Wienerwaldes (Niederösterreich und Wien), wo seit einigen Jahren eingehende geomorphologische und bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt werden (u.a. Damm et al., 2008; Terhorst et al., 2009; Damm und Terhorst, 2010). Auf diesen Arbeiten aufbauend erfolgte eine regionale Gefährdungsbeurteilung für Rutschprozesse (Neuhäuser et al. 2012), deren Datengrundlagen und Ergebnisse im Folgenden beschrieben werden. Ziel dieser Untersuchung war es, erweiterte Kenntnisse über

die Entstehungsbedingungen von Rutschungen in der östlichen Flyschzone zu gewinnen sowie eine regionale Gefährdungskarte für den nördlichen Wienerwald zu entwickeln. Entsprechende Karten können als Entscheidungshilfe bei der örtlichen und regionalen Planung eingesetzt werden.

Bei der Gefährdungsbeurteilung wird davon ausgegangen, dass Hangrutschungen auch in Zukunft von gleichen oder ähnlichen Steuerungsfaktoren bedingt werden wie bisher. Eine wichtige Grundlage für die Gefährdungsmodellierung sind daher Ereigniskataster, welche die zeitliche und räumliche Verteilung sowie die Ursachen von bekannten Rutschungen beinhalten (vgl. Wiczorek, 1984; Brabb, 1984). Die existierenden Datenquellen für solche Ereigniskataster haben daher besonderen Stellenwert. In der Gefährdungsbeurteilung wurde die Anwendbarkeit bestehender Datenbestände für die regionale Beurteilung der Hangrutschungsgefährdung (Maßstab < 1:25.000) überprüft.

Untersuchungsgebiet

Der nördliche Wienerwald repräsentiert eine sanft-wellige Mittelgebirgslandschaft (Oberhauser, 1980; Wessely, 2006). Zahlreiche Massenbewegungen verschiedenen Typs und unterschiedlichen Alters treten hier auf. In steileren Hanglagen dominieren Translations- und Rotationsrutschungen sowie Steinschlag, in flacheren Hangabschnitten vor allem Fließungen und Bodenkriechen (Götzinger, 1943). Die hier vorgenommene Gefährdungsbeurteilung konzentriert sich auf Rutschprozesse, die den dominierenden Typ von Massenbewegungen im Wienerwald darstellen (Schwenk et al., 1992; Wessely, 2006). Rutschungen führen im Wienerwald häufig zu Problemen bei Bauwerken und Verkehrswegen.

Die hohe Disposition zu Hangbewegungen ergibt sich aus den bodenmechanischen und bodenphysikalischen Eigenschaften des Flyschgesteins, welches sich aus Wechselfolgen von Sandsteinen, Kalksandsteinen, Mergelsteinen, Mergel- und Tonschiefern sowie Schiefertonen zusammensetzt. Die Wechsellagerung von schlecht permeablen tonigen Schichten mit gut durchlässigen Sandsteinen ergibt infolge von Wasserzufuhr Hangrutschungen und Feuchtstellen (Götzinger, 1943; Plöching und Prey, 1993; Wessely, 2006). Jüngere Untersuchungen (vgl. Damm et al., 2008; Terhorst et al., 2009; Damm und Terhorst, 2010) zeigen darüber hinaus, dass das Vorkommen von quartären Sedimenten und deren Eigenschaften die aktuelle Hangdynamik entscheidend mitbestimmen. Periglaziale Deckschichten, unter anderem auch mächtige Lössdecken, überlagern das Anstehende über weite Bereiche des Untersuchungsgebietes. Insbesondere periglaziale Lagen, welche während der Kaltzeiten unter Permafrostbedingungen durch Bodenfließen entstanden

sind, setzen sich in der Regel aus mehreren Lockergesteinsdecken zusammen. Die mineralogische Zusammensetzung, vor allem der Anteil an quellfähigen Tonen und die damit verbundenen wasserstauenden Eigenschaften der am tiefsten gelegenen Basislage, führen zur Ausbildung natürlicher Gleitflächen über den anstehenden Flyschgesteinen.

Datengrundlagen

Derzeit gibt es in Österreich kein landesweit einheitliches System zur Erfassung und Verwaltung von Daten über Massenbewegungen. Die Niederösterreichische Landesregierung unterhält mit ihrem Baugrundkataster den größten Datenbestand mit Massenbewegungen im Bundesland. Darüber hinaus verfügt der Forsttechnische Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung der Gebietsbauleitung Wien und Nördliches Niederösterreich über ein Archiv mit Massenbewegungen, die in den Gefahrenzonenplänen für Hochwasser als braune Hinweisbereiche ausgeschieden werden. Eine weitere wichtige Datenbank für Massenbewegungen im Wienerwald ist die Georios Datenbank der Geologischen Bundesanstalt in Wien (Kociu et al., 2007). Ein geringer Teil dieser Daten ist auch über die Internetdatenbank „Massenbewegungen“ der Geologischen Bundesanstalt abrufbar. Hierbei handelt es sich weitgehend um Massenbewegungen, die im Zuge der geologischen Landesaufnahme kartiert wurden.

Die genannten Daten stellen neben der analogen Rutschungskarte von Götzinger (1943) die Grundlage der vorliegenden Arbeit dar. Sämtliche Datenquellen wurden zu einer homogenen Datenbasis im Sinne eines Rutschungskatasters für den nördlichen Wienerwald zusammengeführt.

Baugrundkataster

Die umfangreichste Datenquelle für die Modellierung von geogenen Gefahrenhinweiskarten oder Gefährdungskarten für Rutschprozesse im Wienerwald stellt der Baugrundkataster des Landes Niederösterreich dar. Der Baugrundkataster enthält gut dokumentierte Massenbewegungen, die einen Katastrophenschaden verursacht haben (Schweigl und Hervas, 2009). Den Baugrundkata-

ster gibt es in Papierform seit 1953, seit dem Jahr 2000 wird er digital geführt. Der Baugrundkataster ist im Rahmen des Parteienverkehrs öffentlich zugänglich. Er enthält alle Arten von geologischen oder geotechnischen Gutachten zu Bauvorhaben, Flächenwidmungen, Bergbau oder Katastrophenschäden. Insgesamt gibt es 2000 Einträge zu Massenbewegungen aus Niederösterreich (Stand 2011), die monatlich aktualisiert werden. Ein Teil dieser Einträge kann für die Modellierung von Ge-

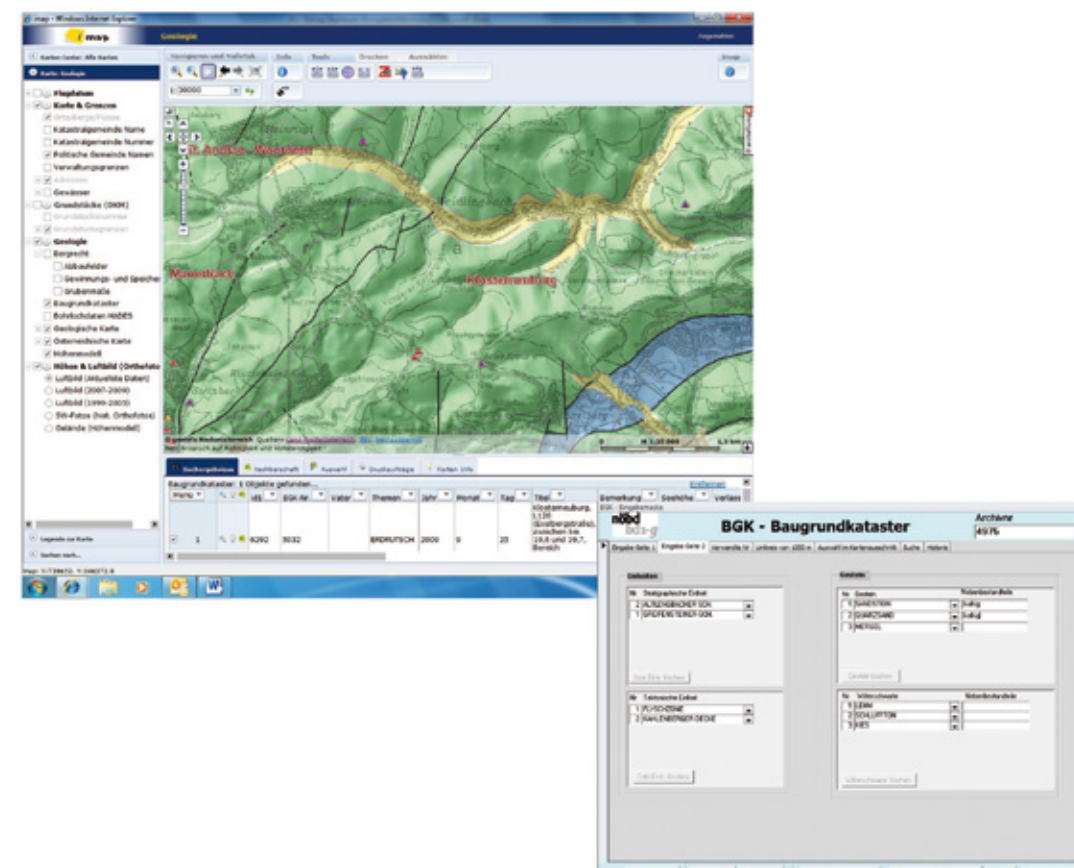


Abb. 1: Fenster oben: Kartenauszug des Baugrundkatasters vom Wienerwald. Die roten Dreiecke stellen im vorliegenden Fall aufgenommene Rutschungen dar, die einen Katastrophenschaden verursacht haben. Fenster unten: Auszug aus der Datenbank mit der geologischen Beschreibung einer Rutschung im Wienerwald.

Fig. 1: Top window: Example map of the building ground register in the Vienna Forest area. The red triangles represent registered landslides that have caused catastrophic damage. Bottom window: Database of the building ground register with the geological description of a landslide in the Vienna Forest.

fahrenhinweiskarten nicht verwendet werden, da es sich entweder um Anschüttungen handelt, die nicht standorttypisch sind, oder weil die Lage der Massenbewegung unzureichend genau dargestellt ist. Der Baugrundkataster ist eine MS-Access-Datenbank mit einer ESRI-ArcGIS-Anwendung, die i-map. Die Massenbewegungen sind als Punkte und nicht als Flächen auf den Karten dargestellt (Abb. 1, oben rechts). Die Punktdarstellung beruht auf der Tatsache, dass viele Massenbewegungen eine maximale Ausdehnung von 100 m haben und somit nicht mehr auf der amtlichen österreichischen, topographischen Karte, der ÖK, im Maßstab 1:25.000 darstellbar sind. Die Eintragung der Punkte erfolgte bis zum Jahr 2000 hauptsächlich auf der ÖK 1:50.000.

Im digitalen Baugrundkataster sind die Typen von Massenbewegungen, deren Lage, die Stratigraphie, die Tektonik, die Gesteinsart, die Bodenart, die geotechnischen Erkundungen usw. beschrieben. Weitere Informationen enthalten die geologischen Gutachten selbst, mit denen die Datenbank digital verknüpft ist. Neben dem Baugrundkataster ist seit dem Jahr 2000 beim geologischen Landesdienst auch eine digitale Bohrdatenbank vorhanden, in der zahlreiche Bohrungen, Baggerschürfe und Rammsondierungen, welche auch im Zusammenhang mit Massenbewegungen durchgeführt wurden, ersichtlich sind.

Natürlich existieren in Niederösterreich und im Wienerwald weit mehr Massenbewegungen als im Baugrundkataster und den anderen Datenbanken zusammengefasst sind. Diese unerkannten Massenbewegungen, vor allem die Rutschungen, lassen sich mithilfe des neuen digitalen Geländemodells des Landes Niederösterreich im Zuge der Luftbilddauswertung sehr gut kartieren.

GIS-basierte Gefährdungsmodellierung

Rutschungen entstehen nachweislich unter bestimmten Faktorenkonstellationen. Die Gefährdungsbeurteilung basiert auf dem statistisch quantifizierbaren Zusammenhang zwischen den Rutschungen, die im Rutschungskataster erfasst wurden, und bestimmten steuernden Faktoren. Diese sogenannten Steuerungsfaktoren repräsentieren Bedingungen, welche die Entstehung von Massenbewegungen begünstigen bzw. deren Voraussetzungen schaffen und über längere Zeit hinweg konstant bleiben. Relief, geologischer Untergrund, bodenmechanische Eigenschaften oder die Landnutzung können direkt oder indirekt die Hangstabilität beeinflussen (Knoblich, 1967; Wiczorek, 1984; Cruden und Varnes, 1996; Soeters und Van Westen, 1996; Thein 2000; Van Westen et al., 2003; Damm, 2005).

Auf Basis dieser Steuerungsfaktoren ist eine indirekte Bewertung der Gefährdung mithilfe von statistischen Methoden, die in einem Geographischen Informationssystem (GIS) eingebettet sind, möglich. In der vorliegenden Gefährdungsbeurteilung wurde die statistisch-probabilistische Methode der Evidenzgewichtung angewendet (Bonham-Carter et al., 1989; Agterberg et al., 1990; Bonham-Carter, 2002; Sawatzky et al., 2009).

Bei der Evidenzgewichtung wird bei der Überschneidung der Rutschungen mit jeweils einem Steuerungsfaktor (der sogenannten Evidenz) der räumliche Zusammenhang zwischen dessen Klassen (z.B. geologische Einheiten oder Landbedeckungsarten) und den Rutschungen quantifiziert. Anhand von statistischen Kennzahlen wird beurteilt, ob ein Faktor für das Auftreten von Rutschungen ausschlaggebend ist oder nicht. Dies geschieht auf Basis von Wahrscheinlichkeitsverhältnissen, aus denen sich eine Gewichtung der

Steuerungsfaktoren ableiten lässt. Eine Gesamtbewertung des Gebietes erfolgt anschließend durch Kombination aller gewichteten Steuerungsfaktoren nach den Regeln der Bayes-Wahrscheinlichkeitstheorie. Das Resultat liefert einen flächendeckenden Wahrscheinlichkeitsindex, welcher als Grad der Rutschanfälligkeit interpretiert wird (Wang et al., 2002; Neuhäuser und Terhorst, 2007). Diese Berechnung schließt auch Gebiete ein, die bisher noch nicht von Rutschungen betroffen waren.

Der Auswahl der Steuerungsfaktoren kommt daher besondere Bedeutung zu; allerdings ist deren Integration in die Modellierung oft durch die Verfügbarkeit von flächendeckenden Daten begrenzt. Für das vorliegende Modell wurden die existierenden geologischen Karten (Schnabel, 2002; Götzinger et al., 1952) und das Digitale Landschaftsmodell (DLM) des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen verwendet. Für die Relief- und Landbedeckungs-Informationen wurden Fernerkundungsdaten (ASTER Global Digital Elevation Model, CORINE Landcover 1990 Datensatz) herangezogen. Aus diesen Grundlagendaten wurden die Steuerungsfaktoren abgeleitet. Diese sind die geomorphometrischen Parameter (Hangneigung, Hangkrümmung, Exposition), lithologische Einheiten, tektonische Linien, die Landbedeckung, die Hangposition, sowie das Gewässernetz.

Ergebnisse

Gefährdungskarte: Die Gefährdungskarte gibt die berechneten Wahrscheinlichkeiten an, die in vier Gefährdungsgrade (von keine bis hohe) klassifiziert wurden (Abb. 1). Der Index beschreibt also die Disposition bzw. die Anfälligkeit für Rutschungen. Dadurch können Bereiche mit hoher Gefährdung identifiziert und abgegrenzt werden.

Aus der Karte geht hervor, dass die Gebiete innerhalb der Nordrandzone am stärksten gefährdet sind. In diesem Überschiebungsbereich zur Molassezone finden sich jene geologischen Einheiten mit der stärksten Rutschanfälligkeit. Die Wolfpassing-Formation und die kalkigen Klippen der Nordrandzone wurden als hoch rutsch anfällig eingestuft. Diese Schichten beginnen in Norden bei Sankt Andrä vor dem Hagenthale und ziehen sich in S-W-Richtung über den Tulbinger Kogel, Klosterberg, Frauenberg und Eichberg.

Im Bereich der Greifensteiner Decke, die südlich an die Nordrandzone anschließt, variiert die Gefährdung lokal sehr stark. Ausschlaggebend für die lokal erhöhte Gefährdung sind die Topographie (Hangneigung und Exposition), sowie die Nähe zu den zahlreichen Bächen und Flüssen. Auch die Nähe zu den zahlreichen tektonischen Störungen, erhöht die Gefährdung stark.

Die Gebiete der Kahlenberger Decke werden als moderat rutsch anfällig eingestuft, bis auf die Areale entlang des N-O-Randes von Wien und in Purkersdorf in Niederösterreich. Hier wird die Rutschanfälligkeit deutlich erhöht. Dies ist auf das Auftreten des Gaultflysches zurückzuführen, welcher als hoch rutsch anfällig eingestuft wurde. Diese geologische Schicht zieht sich als schmales Band entlang der Südflanke der Wiener „Hausberge“ (Cobenzl und Kahlenberg) weiter nach Penzing (Hochbruckenberg) und schließlich nach Niederösterreich durch die Gemeinde Purkersdorf bis hin zum Glaskogel.

Im Süden des Untersuchungsgebietes, im Bereich der Laaber Decke, treten die Hänge mit der geringsten Rutschgefährdung auf. In den hier vorliegenden geologischen Formationen konnte kein signifikanter Zusammenhang zum Auftreten der bekannten Rutschungen festgestellt werden. Diese Decke ist auch am wenigsten durch tektonische Störung beeinflusst.

massen, eine betonte direktionale Komponente besitzt (Thein, 2000; Dai und Lee, 2002). Im Untersuchungsgebiet herrscht eine westliche und nordwestliche Wetterströmung vor, welche feuchte, atlantische Luftmassen herantransportiert, die sich an der Hügellandschaft des Wienerwaldes abregnen. Die Exposition steuert so indirekt die Feuchtebedingungen am Hang.

- **Nähe zu Bächen, Flüssen und zeitweise wasserführenden Gerinnen mit Wildbachdynamik:** Die Entwässerung des Wienerwaldes erfolgt durch den Wienfluss und untergeordnete Wienerwaldbäche, wie den Mauerbach, Weidlingbach oder Hagenbach, sowie durch zahlreiche nur zeitweise wasserführende Gerinne und Tobel. Die Region des Flysch-Wienerwaldes ist stark vom oberflächennahen Abfluss geprägt. Durch die wasserstauenden Bedingungen von ton- und mergelreichem Flysch wird das Abflussverhalten stark beeinflusst. Bei starken Niederschlägen erfolgt rascher Abfluss, woraus häufig schnell ansteigende Hochwasser mit teilweiser Wildbachdynamik resultieren (Prey, 1993). Die Modellierung zeigte eine deutliche Abhängigkeit der Rutschungsverteilung vom Gewässernetz. Massenbewegungen treten signifikant dichter in der unmittelbaren Nähe (bis 75 m) zu Flüssen, Bächen oder zeitweise wasserführenden Gerinnen auf. Aufgrund des starken Oberflächenabflusses nach Regenfällen entwickeln diese Gerinne eine beträchtliche Erosionsenergie. Die Hangstabilität an den angrenzenden Hängen kann dabei sowohl durch die Abtragung des Hangfußes als auch durch Wassersättigung der Hangsedimente drastisch reduziert werden (Govi et al.; 1985; Thein, 2000; Damm et al., 2008).

- **Hangneigung von 26° bis 31°:** Die Morphologie gilt im Allgemeinen als einer der wichtigsten Steuerungsfaktoren in der Gefährdungsbeurteilung, da Massenbewegungen schwerkraftbedingte Prozesse sind und daher von der Hangneigung direkt gesteuert werden. Im Untersuchungsgebiet treten Rutschungen innerhalb eines Hangneigungsbereiches von 7° bis 31° auf. Die Gefährdungsanalyse zeigte, dass Hangneigungen zwischen 26° und 31° eine signifikant hohe Anfälligkeit für Rutschungen haben. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen von Schwenk et al. (1992). Daher sind die vorliegenden Ergebnisse aus der Modellierung in Einklang mit den beobachteten Werten.
- **Rutschungsfrequenz vor dem Hintergrund des Klimawandels:** Aus der Analyse der zeitlichen Verteilung der bisher erfassten Rutschungen kann kein ansteigender Trend in der Häufigkeit der Ereignisse im Wienerwald abgeleitet werden. Allerdings zeigen sich einzelne Jahre mit besonders hoher Rutschungsaktivität. Der erste Vergleich mit meteorologischen Daten deutet darauf hin, dass ein Zusammenhang zu besonders niederschlagsreichen Jahren oder Jahren mit intensiver Schneeschmelze möglich ist, wie im Jahr 2009. Dieses Jahr war durch schwere Unwetter, intensive Niederschlagsereignisse und starke Temperaturschwankungen gekennzeichnet, welche zu massiver Schneeschmelze geführt haben. Bekanntlich bewirkt lang-anhaltender Niederschlag eine Vorsättigung der Hänge. Starke Regenfälle und intensive Schneeschmelze gelten allgemein als Hauptauslöser für Rutschungen (Govi et al., 1985; Kraut, 1999; Schweigl und Hervas, 2009).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die bei der Gefährdungsbeurteilung gewonnenen Erkenntnisse hängen stark von der Verfügbarkeit und Genauigkeit der Grundlagendaten ab. Detaillierte geologische Karten mit Informationen über quartäre Deckschichten, sowie flächendeckende Bodenkarten mit bodenmechanischen Daten wären in Zukunft von großer Bedeutung für die Beurteilung von Georisiken. Weitere wesentliche Grundlagen sind genaue Rutschungskataster, die möglichst alle bekannten Rutschungen räumlich und zeitlich genau erfassen.

Durch das Fehlen an Informationen über quartäre Deckschichten konnte dem Einfluss dieser Sedimente nicht Rechnung getragen werden. Aktuell werden daher physikalisch-basierte Prozessmodelle in großem Maßstab erstellt, welche sowohl die hydrologischen Bedingungen als auch den Einfluss von periglazialen Decklagen und Lössdecken auf die Hangstabilität berücksichtigen. Die Verbreitung, Mächtigkeit und die bodenmechanischen Eigenschaften dieser Lockersedimente wurden durch Felduntersuchungen erfasst. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein der periglazialen Lagen die Anfälligkeit für flachgründige Rutschungen drastisch erhöht. Zudem wird der Einfluss von unterschiedlichen Feuchtebedingungen, auch durch klimawandelbedingte Änderung, an den ausgewählten Hängen untersucht. Es zeigt sich, dass der Einfluss von Extremniederschlägen, die laut regionaler Klimamodelle in Zukunft zunehmen sollten (Matulla, 2005; Formayer et al., 2008), von besonderer Bedeutung sind. Genauere Ergebnisse werden Anfang 2013 vorliegen.

Anmerkung

Die vorliegende Arbeit wird von der Akademie der Wissenschaften (ÖAW) im Rahmen des DOCFFORTE Programmes sowie von der Universität Würzburg gefördert. Die Autoren bedanken sich beim Forsttechnischen Dienst der Wildbach und Lawinenverbauung – insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. Christian Amberger – und bei der Geologischen Bundesanstalt in Wien – im Speziellen bei Herrn Mag. Thomas Hofmann – für die Bereitstellung von Datengrundlagen.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Dipl. Ing. Bettina Neuhäuser, MSc(GIS)
Stipendiatin der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW)
Tegelweg 15/2
A-1220 Wien
bettina.neuhaeuser@gmx.at

Dr. Joachim Schweigl
Landesbaudirektion (Geologischer Dienst) des Amtes der Niederösterreichischen Landesregierung
Landhausplatz 1
A-3109 St. Pölten
Joachim.schweigl@noel.gv.at

Univ.-Prof. Dr. Bodo Damm
Universität Vechta/ISPA
Universitätsstraße 5
D-49377 Vechta
bdamm@ispa.uni-vechta.de

Univ.-Prof. Dr. Birgit Terhorst
Universität Würzburg
Institut für Geographie und Geologie
Am Hubland
D-97074 Würzburg
Birgit.terhorst@uni-wuerzburg.de

Literatur / References:

- AGTERBERG F.P., BONHAM-CARTER G.F., WRIGHT D.F. (1990). Statistical pattern integration for mineral exploration. in: Gaal G., Merriam D.F. (Hrsg.). Computer application in resource estimation: prediction and assessment for metals and petroleum. Pergamon, Oxford.
- BAI Y.-F., ZHOU D.-P., WANG K., LI A.-H. (2004). Development environment and distribution characteristics of bedding plane landslides. *Natural Disasters* 13: 39-43.
- BONHAM-CARTER G.F. (2002). Geographic information systems for geoscientist: Modelling with GIS. Pergamon, New York: 302-334.
- BONHAM-CARTER G.F., AGTERBERG F.P., WRIGHT D.F. (1989). Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential. *Statistical Applications in Earth Sciences* 89-9: 171-183.
- BRABB E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. in: Proceedings Fourth Int. Symp. Landslides 1: 307-323.
- CRUDEN D.M., VARNES D.J. (1996). Landslide types and processes. in: Turner A.K., Schuster R.L. (Hrsg.): Landslides: Investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247: 36-75.
- DAI F.C., LEE C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 42/3-4: 213-228.
- DAMM B. (2005). Gravitative Massenbewegungen in Südniedersachsen. Die Altmündener Wand - Analyse und Bewertung eines Rutschungsstandortes. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Suppl.-Bd.* 138:189-209.
- DAMM B., BECHT M., VARGA K., HECKMANN T. (2010). Relevance of tectonic and structural parameters in Triassic bedrock formations to landslide susceptibility in Quaternary hillslope sediments. *Quaternary International* 222: 143-153.
- DAMM B., TERHORST B. (2010). A model of slope formation related to landslide activity in the Eastern Prealps, Austria. *Geomorphology* 122: 338-350.
- DAMM B., TERHORST B., KÖTTTRITSCH E., OTTNER F., MAYRHOFER M. (2008). Zum Einfluss bodenphysikalischer und bodenmechanischer Parameter in quartären Deckschichten auf Massenbewegungen im Wienerwald. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt* 62: 33-37.
- ENDO T., TSURUTA T. (1969). Effects of tree's roots upon the shearing strengths of soils. in: 18th Annual Report of the Hokkaido Branch, Government Forest Experimental Station, Tokyo.
- FORMAYER, H., CLEMENTSCHITSCH, L., KROMP-KOLB, H. (2008). Regionale Klimaänderung in Österreich. *Global 2000 Umweltforschungsinstitut* (http://www.global2000.at/files/klimawandel_oesterreich.pdf).
- GÖTZINGER G. (1943). Neue Beobachtungen über Bodenbewegungen in der Flysch Zone. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft* 86: 87-104.
- GÖTZINGER G., GRILL R., KÜPPER H., VETTERS H. (1952). Geologische Karte der Umgebung von Wien 1:75,000. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- GOVI M., MORTARA G., SORZANA, P.F. (1985). Hydrological events and landslides. *Geologia Applicata e Idrogeologia* 20: 359-375.
- KNOBLICH K. (1967). Mechanische Gesetzmäßigkeiten beim Auftreten von Hangrutschungen. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 11: 286-299.
- KOCIU A., KAUTZ H., TILCH N., GRÖSEL K., HEGER H., REISCHER J. (2007). Massenbewegungen in Niederösterreich. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt Band 147*: 215-220.
- KRAUT C. (1999). Der Einfluss verschiedener Geofaktoren auf die Rutschempfindlichkeit an der Schichtstufe der Schwäbischen Alb. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten D5*: 129-148.
- MATULLA, C. (2005). Regional, seasonal and predictor-optimized downscaling to provide groups of local scale scenarios in the complex structured terrain of Austria. *Meteorologische Zeitschrift* 14/1: 31-47.
- NEUHÄUSER B., TERHORST, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using weights-of-evidence applied on a study site at the Jurassic escarpment of the Swabian Alb (SW-Germany). *Geomorphology* 86: 12-24.
- NEUHÄUSER B., DAMM B., TERHORST B. (2012). GIS-based assessment of landslide susceptibility on the base of the weights-of-evidence model. *Landslides*, DOI 10.1007/s10346-011-0305-5.
- OBERHAUSER R. (1980). *Der Geologische Aufbau Österreichs*. Springer, Wien.
- PÁNEK T., HRADECKÝ J., MINÁR J., SILHÁN K. (2010). Recurrent landslides predisposed by fault-induced weathering of flysch in the Western Carpathians. *Engineering Geology* 23:183-199
- PLÖCHINGER B., PREY S. (1993). Der Wienerwald. in: Schnabel W. (Hrsg.) *Sammlung Geologischer Führer* 59, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- POISEL R., EPPENSTEINER W. (1986). Control of a large natural slope in a suburb of Vienna. in: Proc. Conf Rock Eng and Excav Urban Environ. Hong Kong (Institution of Mining and Metallurgy, London). American Publications Center, Brookfield, pp 335-340.
- PREY S. (1993). Die Flyschzone des Wienerwaldes. in: Plöchinger B., Prey S. (Hrsg.). *Der Wienerwald. Sammlung Geologischer Führer. Band 59. Gebrüder Borntraeger. Berlin, Stuttgart: 1-22.*
- Rudolf-Miklau F. (2009). *Naturgefahren-Management in Österreich. Vorsorge – Bewältigung – Information*. Verlag LexisNexis, Wien: 252 S.
- SAWATZKY D.L., RAINES G.L., BONHAM-CARTER G.F., LOONEY C.G. (2009). Arc-SDM: Spatial data modeller (SDM): ArcMap 9.3 geoprocessing tools for spatial modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. <http://www.ige.unicamp.br/sdm/>. Accessed 1 June 2011
- SCHNABEL W. (1992). New data on the Flysch Zone of the Eastern Alps in the Austrian sector and new aspects concerning the transition to the Flysch Zone of the Carpathians. *Cretaceous Research* 13:405-419.
- SCHNABEL W. (2002). Niederösterreich, Geologische Karte 1:200,000 mit Kurzerläuterung. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- SCHWENK H., SPENGLINGWIMMER R., SALZER F. (1992). Massenbewegungen in Niederösterreich. *Jahrbuch Geologische Bundesanstalt* 135/2.
- SCHWEIGEL J., HERVAS J. (2009). Landslide Mapping in Austria. – JRC Scientific and Technical Report EUR 23785 EN, Office of Official Publications of the European Communities, Luxembourg; 61 S.
- SOETERS R., VAN WESTEN C.J. (1996). Slope stability recognition, analysis, and zonation: application of geographical information system to landslide hazard zonation. in: Turner A.K., Schuster R.L. (Hrsg.). *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247. National Academy Press, Washington D.C.
- TERHORST B., DAMM B., PETICZKA R., KÖTTTRITSCH E. (2009). Reconstruction of Quaternary landscape formation as a tool to understand present geomorphological processes in the Eastern Prealps (Austria). *Quaternary International* 209: 66-78.
- TERHORST B., KREJA R. (2009). Slope stability modelling with SINMAP in a settlement area of the Swabian Alb. *Landslides* 6: 309-319.
- THEIN S. (2000). Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb; Statistische Vorhersagemodelle und regionale Gefährdungskarten unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten D6*: 1-38.
- VAN ASCH T.W.J., BUMA J., VAN BEEK L.P.H. (1999). A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology* 30/1-2: 25-32.
- VAN WESTEN C.-J., RENGERS N., SOETERS R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards* 30(3): 399-419.
- WANG H., CAI G., CHENG Q. (2002). Data Integration Using Weights of Evidence Model: Application in Mapping Mineral Resource Potentials. in: *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*: 1-3.
- WESSELY G. (2006). *Niederösterreich. Geologie der Österreichischen Bundesländer*. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- WIECZOREK G.F. (1984). Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists XXI* (3): 337-342.
- WU T.H. (1984). Effect of vegetation on slope stability. in: *Soil reinforcement and moisture effects on slope stability*, Transportation Research Board, Washington.



Mair Wilfried GmbH

I-39030 St. Lorenzen

Tel: +39 0474 474 071 • www.mairwilfried.it • info@mairwilfried.it

Stahlschneebrücken, Tribschneewände, Ablenkewände

Andreas Pichler

Startschuss für das ETC Projekt „SedAlp“

Im Juni 2012 wurde vom ETZ-Alpenraum-Programm das transnationale Projekt „SedAlp – Sediment management in Alpine basins: integrating sediment continuum, risk mitigation and hydropower“ genehmigt und wird somit aus EFRE-Mitteln kofinanziert. Das Ziel des Projektes „SedAlp“ – mit einer Laufzeit bis Juni 2015 – ist die gesamtheitliche Betrachtung des Sediment- und Wildholzmanagements in Alpinen Flüssen und Bächen unter ökologischen, ökonomischen und risikorelevanten Gesichtspunkten. Neben Österreich – dass mit dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft den Leadpartner stellt – sind auch die Länder Slowenien, Italien, Frankreich sowie Deutschland mit insgesamt 15 Partnern am Projekt beteiligt. Für die praktische Arbeit der Wildbach- und Lawinenverbauung werden als Resultat von SedAlp vor allem Verbesserungen von Geschiebetransport-Gleichungen sowie verfügbaren numerischen Modellen, wie auch Leitlinien zur baulichen Optimierung von Schutzwasserbauten im Kontext Geschiebe-, Sediment-, und Wildholztransport erwartet. Darüber hinaus wird auch der Evaluierung des Einflusses von Wasserkraftwerken auf den Geschiebe- und Wildholztransport in Wildbächen einen besonderen Stellenwert zugewiesen.

Anschrift des Verfassers:

DI Andreas Pichler
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
Abt. IV/5 – Wildbach- und Lawinenverbauung
Marxergasse 2, 1030 Wien
andreas.pichler@lebensministerium.at

Alfred Ellmer, Günther Hochleitner,
Christoph Skolaut, Markus Waibel

Hochwasserrückhaltebecken

Grundsätze für Planung, Bau und Betrieb im Bereich der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs

Im Zuge der fachstrategischen Ausrichtung der Strategie 2015 wurde ein Fachbereich für Hochwasserrückhaltebecken geschaffen.

Als eine der Kernaufgaben wurde der Fachbereich mit der Erstellung eines internen Leitfadens für die Planung, den Bau und den Betrieb von Hochwasserrückhaltebecken (HWRHB) im Bereich der Wildbach- und Lawinenverbauung betraut. Dieser soll das vorhandene Wissen und die Erfahrungen im Dienstzweig bezüglich Planung, geotechnischen Grundlagen, Bemessung sowie Entwurf und Konstruktion von Rückhaltebecken zusammenführen und den derzeitigen Stand der Technik definieren. Ziel ist es somit, den Planungsaufwand im Dienstzweig optimieren zu können, da nicht nur seit den letzten Hochwasserereignissen Rückhaltebecken verstärkt als Schutzkonzept umgesetzt werden.

Prinzipiell für den internen Gebrauch der WLW gedacht wird der Leitfaden auch im Rahmen von Planungsaufträgen den Auftragnehmern (Zivilingenieure, Technische Büros), unter Hinweis auf einen generellen Haftungsausschluss des Bundes, zur Verfügung gestellt, soll aber ausschließlich für HWRHB Anwendung finden, die in Wildbächen gemäß § 99 ForstG auf Grundlage der „Technischen Richtlinie für die Wildbach- und Lawinenverbauung“ errichtet werden. Für andere Hochwasserrückhaltebecken besteht, trotz ähnlicher Grundlagen keine Gültigkeit.

Dieser Leitfaden liegt nun als vorläufige Fassung dem Dienstzweig vor und ist nach einer Evaluierungsphase – unter Berücksichtigung allfälliger Stellungnahmen und inhaltlicher Anpassungen – endgültig in Kraft zu setzen.

Anschrift der Verfasser:

Alfred Ellmer, Wildbach- und Lawinenverbauung,
Sektion Steiermark, Conrad-von-Hötzendorf-Straße 127,
8010 Graz, Alfred.ellmer@die-wildbach.at



Anegreth Goldmann, Patrick Schartner, Gebhard Walter, Christoph Skolaut

WLK-Bauwerkskataster – erste Erfahrungen in Tirol und Salzburg

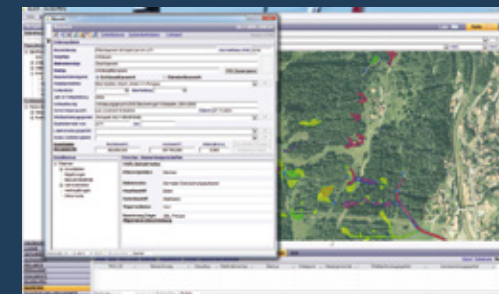
Mit dem Bauwerkskataster wurde eine österreichweite Datenbank zur Erfassung schutzrelevanter Bauwerke der Wildbach- und Lawinenverbauung geschaffen. In den Sektionen Tirol und Salzburg wurde bereits 2011 mit der Erfassung der Schutzbauwerke in den digitalen WLK begonnen. Während die Ersterfassung mit externen WerkvertragsnehmerInnen in Tirol nur in den beiden Gebietsbauleitungen Mittleres Inntal und Westliches Unterinntal erfolgte, wurde in Salzburg in allen vier Gebietsbauleitungen Osttirol und Östliches Unterinntal nachgezogen, 2013 wird mit den Gebietsbauleitungen Außerfern und Oberes Inntal die Ersterfassung in Tirol abgeschlossen. In Salzburg soll bereits in diesem Jahr die Ersterfassung sämtlicher Bauwerke seit Beginn der 1950er-Jahre weitestgehend abgeschlossen werden.

Im Zuge der Bauwerkserfassung zeigte sich in beiden Sektionen die Notwendigkeit einer einheitlichen Eingabe-Systematik sowie eine Kontrollroutine der Datensätze. Dies ermöglicht dem Endnutzer eine nachvollziehbare und praxisorientierte Filterung und Weiterverarbeitung der Daten. Um die Bauwerke den richtigen, insbesondere, Wildbacheinzugsgebieten zuordnen zu können, sind vielfach das Gewässernetz sowie die Teileinzugsgebiete vorher anzulegen. Dies kann den zeitlichen Aufwand bei der Ersterfassung deutlich erhöhen.

Im Juni 2012 wurde in der Sektion Tirol ein Büro eigens für Mitarbeiter mit WLK- und BWK-bezogenen Tätigkeiten eingerichtet, welche als tirolweite Anlaufstelle sowohl für ein Controlling der Eingabe als auch als Support für die einzelnen Sachbearbeiter in den Gebietsbauleitungen dienen soll. In Salzburg fungiert eine Person in der Sektion als zentraler Ansprechpartner, um eine einheitliche Vorgangsweise bei der Bauwerkseingabe sicherzustellen und die Gebietsbauleitungen bei sämtlichen Bearbeitungen im WLK zu unterstützen.

Seit Juli 2011 sind nunmehr ca. 8.000 Bauwerke in Tirol und ca. 6.200 Bauwerke in Salzburg in der Datenbank lage- und datenmäßig erfasst.

Neben der fortwährenden Bauwerkserfassung soll im Sommer 2012 in Tirol bereits die Zustandsbewer-



tung der bereits erfassten Bauwerke gestartet werden. Diese Bewertung soll mit Zweiertteams, bestehend aus einem Wildbachaufseher und einem Techniker aus der jeweiligen Gebietsbauleitung abgewickelt werden. Der Projektablauf sieht vor pro Jahr zwei Gebietsbauleitungen hinsichtlich Bewertungen von Schutzbauwerken abzuschließen und so eine vollständige Erfassung und Bewertung für die gesamte Sektion Tirol bis 2015 zur Verfügung zu haben. In Salzburg ist die Durchführung der Zustandsbewertung derzeit in Vorbereitung. Dabei gilt es, sämtliche Beteiligten (Wassergenossenschaften, Gemeinden, WLW) bestmöglich einzubinden. Bei ersten WLW-internen Testerhebungen zeigte sich, dass eine koordinierte und zwischen den Gebietsbauleitungen bzw. den handelnden Personen abgestimmte Vorgangsweise unerlässlich ist. Dies gilt insbesondere für eine einheitliche Bewertung der aufgetretenen Schäden.

Anzustrebendes Ziel sollte eine österreichweit einheitliche Vorgangsweise bei der Ersterfassung der Bauwerke und im Speziellen bei der Zustandsbewertung sein. Diese kann nur durch eine intensive Abstimmung zwischen den Verantwortlichen in den einzelnen Sektionen sowie in weiterer Folge mit den Personen vor Ort in den Gebietsbauleitungen sichergestellt werden.

Anschrift der VerfasserIn:

Anegreth Goldmann
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Mittleres Inntal
Liebeneggstraße 11
6020 Innsbruck
Annegret.Goldmann@die-wildbach.at

Bernadette Sotier

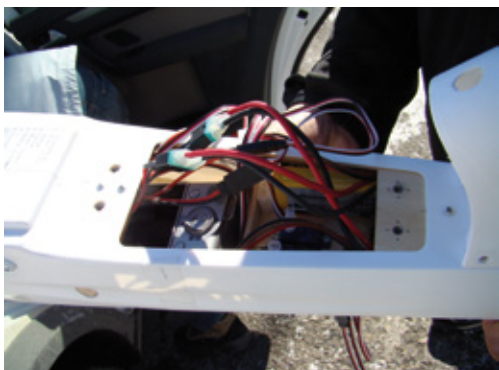
Einsatz von UAV in Forstwirtschaft und im Naturgefahrenmanagement

UAV – unmanned aerial vehicles – werden in den letzten Jahren verstärkt als kostengünstige und flexible Methode zur Gewinnung von Fernerkundungsdaten eingesetzt. Im Rahmen des INTERREG-Projektes „NewFOR“ werden am Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) derzeit verschiedene UAV-Systeme aufgebaut und ihr Anwendungsspektrum im alpinen Raum getestet.

Für die ersten Tests wurde ein Elektrosegler mit einer Spannweite von 2 m verwendet, der mit einer leichten Digitalkamera und einem Autopiloten ausgerüstet ist (Abb. 1).



Abb. 1: Elektrosegler mit Rumpfföffnung (Pfeil, oberes Bild) - Einbau der Kamera (unteres Bild)



Damit ist es möglich, einen Flugpfad vorzugeben oder bestimmte Punkte gezielt anzufliegen. Mit einem Abfluggewicht von ca. 1,5 kg ist mit einem voll aufgeladenen Akku eine Flugzeit von 15 bis 20 Minuten möglich. Die Einsatzmöglichkeiten von UAV's sind sowohl für forstliche Fragestellungen als auch im Naturgefahrenmanagement sehr vielfältig. Dazu gehören, neben einfachen Erkundungsflügen, Kartieraufgaben (Vegetation, Schutzbauwerke, Schäden etc...) sowie die Detektion und Analyse von Prozessen wie Rutschungen, Lawinen, Muren oder Hochwasser.



Abb. 2: Flug vom 15.03.2012. Gleitschneeböcke und Totholz sind aufgrund der fehlenden Belaubung gut erkennbar

Bisher konnten bereits einige Befliegungen durchgeführt werden, welche hoch aufgelöste und detailscharfe Luftbilder lieferten (Abb.2). Beim Post-Processing werden diese Bilder entzerrt und zur Berechnung von Orthofotos und Geländemodellen verwendet.

Anschrift der Verfasserin:

Bernadette Sotier
BFW – Bundesforschungszentrum für Wald
Rennweg 1, 6020 Innsbruck
Bernadette.Sotier@uibk.ac.at

1. ROCKFALL-X™ G mit Schaumglasschotter und TECCO® Geflecht
2. ROCKFALL-X™ A mit Altreifen und TECCO® Geflecht
3. Galerie-Verstärkung mit Schaumglasschotter in Weesen/Amden, Schweiz



ROCKFALL-X™ Dämpfungssystem macht Steinschlagschutzgalerien einfach stärker

ROCKFALL-X™ Dämpfungssystem mit Schaumglasschotter oder Altreifen verbessert den Schutz für Steinschlagschutzgalerien und reduziert die statische Belastung:

- 8000 kJ Einschlagenergie
- bessere Lastverteilung und Erhöhung der Dämpfungseigenschaften ohne Verstärkung der Struktur
- leichtere Bauweise bei neuen Galerien
- höhere Arbeitssicherheit durch schnelle Montage
- als permanenter oder temporärer Schutz für Betongalerien und Dächer

Fordern Sie unsere neue Broschüre an:
info@geobrugg.com

GEOBRUGG®
BRUGG

Geobrugg Austria Ges.m.b.H.
Innsbrucker Bundesstraße 71
A-5020 Salzburg
Tel. +43 664 91 542 91
www.geobrugg.com
info@geobrugg.com

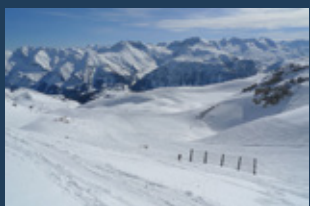


Engelbert Gleirscher

SNOWCATCHER – eine neue Schutzmaßnahme gegen Lawinen

Verzinkte Schneenetze finden vermehrt Anwendung im alpinen Raum. Oft dienen sie als Anbruchverbauung, um einen Lawinenabgang zu verhindern. Ein neueres Konzept ist die Verwendung von Netzen in der Sturzbahn, um Lawinen aufzuhalten. Während Anbruchverbauungen zu meist großflächig errichtet werden, können Konstruktionslängen von Verbauungen in der Sturzbahn deutlich kleiner sein. Das ist günstiger und minimiert ökologische Eingriffe.

Ein SNOWCATCHER-Prototyp der Firma TRUMER wurde am Mohrenfluh in Lech (Vorarlberg) errichtet. Das Bauwerk besteht aus 5 D-förmigen Dreigelenksrahmen, einem bergseitigen Netz, welches 4 Felder überspannt, und Stahlkabeln zur Stabilisierung. Die Konstruktion ist mit verschiedenen Kraftmessgebern instru-



mentiert. So können dynamische Kräfte während eines Lawinenaufpralls aufgezeichnet werden.

Zusätzlich zu den Feldmessungen werden skalierte Modellversuche im Labor durchgeführt. Mit Kunststoffpartikel als Ersatzmaterial für Schnee werden Lawinen simuliert, welche den SNOWCATCHER treffen. Aus Experimenten mit verschiedenen Neigungen, Auslösevolumina und Netzmaschenweiten werden Frontgeschwindigkeiten, Fließmächtigkeiten und Ablagerungsmuster gemessen.

Die skalierten Modellversuche lassen eine deutliche Reduktion der Frontgeschwindigkeiten durch den SNOWCATCHER erkennen. Das führt im Weiteren zu einer Verkleinerung des Ablagerungsgebietes und zu einer Reduktion der Auslauflänge.

Anschrift des Verfassers:

DI Engelbert Gleirscher
BFW, Hofburg, Rennweg 1
6020 Innsbruck
engelbert.gleirscher@uibk.ac.at

Wolfgang Stadlbauer, Thomas Tartarotti

Ankerdimensionierung gem. ONR 24810 XLSX-Tool zur Dimensionierung von Systemankern

Der Arbeitsaufwand für Steinschlagschutzverbauungen nimmt im Aufgabenspektrum der WLW einen kontinuierlich wachsenden Anteil in Anspruch. Durch Einführung der ONR 24810 soll nun erstmals ein einheitlich geltender Maßstab für Steinschlagschutz in Österreich definiert werden.

Auch wenn diese Vereinheitlichung in vielen Aspekten Vorteile bringt, bedeutet sie gleichzeitig eine wesentliche Umstellung gegenüber der bisherigen Bemessung von Schutzsystemen.

Die Facharbeit von Wolfgang Stadlbauer von der Gebietsbauleitung Steyr-Ennsgebiet bietet einen Einblick in die Vorschriften der ONR zur Dimensionierung sowie Abnahme von Mikropfahl-fundamentierungen für Steinschlagschutzwerke.

Im Zuge dieser Facharbeit wurde eine Excel-Tabelle zur Protokollierung von Ankerzugversuchen und anschließender Dimensionierung der Systemanker auf Basis der

ONR ausgearbeitet. Das XLSX-Tool soll nach Freigabe durch die Geologische Stabstelle im Zuge der Veröffentlichung der ONR dem Dienstzweig zur Verfügung gestellt werden.



Abb. 1: Zugversuche von Probeankern sollen künftig die Eingangswerte für die Dimensionierung der Systemanker gem. ONR liefern. Mittels Excel-Programm wird die Dimensionierung hierfür erleichtert. (Im Bild: ONR-gerechter Ankerzugversuch mit dem Ankerprüfgerät GBL 2.3.)

Anschrift der Verfasser:

Wolfgang Stadlbauer / DI Thomas Tartarotti
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Steyr-Ennsgebiet
Garnisonstraße 14, 4560 Kirchdorf
wolfgang.stadlbauer@die-wildbach.at
thomas.tartarotti@die-wildbach.at

RECKLI®

**Strukturmatrizen
Abformtechnik
Formen- und Modellbauharze
Betonveredelung**

DESIGN YOUR CONCRETE



RECKLI®-Strukturmatrizen

für alle Bereiche der Wildbachverbauung

- für Hochwasserschutzmauern
- für Einfriedungen und Stützwände
- für Ufergestaltung und Bebauung
- für Wasserstauwänden
- für Begrenzungsmauern
- ...

Fordern Sie unseren 468-seitigen Katalog mit Standardstrukturen und zahlreichen Referenzobjekten an und lassen Sie sich von unserem Außendienstmitarbeiter weitere Referenzobjekte „Der Wildbach“ zeigen!

RECKLI GmbH

Gewerkenstraße 9a · 44628 Herne · Tel. +49 2323 1706-0 · Fax +49 2323 1706-50 9
www.reckli.de · info@reckli.de

RECKLI Austria

Herr Reinhold Wagner · Kreitnergasse 10/18 · 1160 Wien · Tel. +43 1 7869844 · Fax +43 1 7869896
Mobil +43 664 5424437 · www.reckli.at · rwagner@reckli.at



Gernot Koboltschnig

12ter Interpraevent Kongress in Grenoble Frankreich vom 23. zum 26. April 2012

Um einen größeren Schritt in Richtung einer Mitgliedschaft Frankreichs bei der Internationalen Forschungsgesellschaft Interpraevent zu gehen, wurde die Idee geboren, einen Kongress in Grenoble zu organisieren. Der Kontakt mit den französischen Kollegen, die sich auch intensiv mit dem Thema „Schutz vor Naturgefahren“ auseinandersetzten, war schon immer sehr intensiv. So gibt es die engverbundene Entstehungsgeschichte der RTM (Restauration des Terrains en Montagne) in Frankreich und der Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich, welche nur kurze Zeit nacheinander und nach gegenseitiger fachlicher Beratung gegründet wurden.

Für das lokale Organisationskomitee konnten der Leiter der Forschungsgruppe ETNA (Erosion torrentielle, neige et avalanches) Didier Richard mit seinen Mitarbeitern Dominique Laigle und Frédéric Berger von Irstea Grenoble (National Institute for Environmental Science and Research, vormals CEMAGREF) gewonnen werden. Das 15-köpfige Team des wissenschaftlich-technischen Beirates, welches den Kongress fachlich vorbereitete, wurde von Prof. Johannes Hübl von der Universität für Bodenkultur und Niki Beyer Portner vom Büro Hydrocosmos in der Schweiz geleitet.

An der viertägigen Veranstaltung nahmen über 300 Personen aus 15 Nationen teil, wobei erfreulicherweise etwa die Hälfte der Teilnehmer Praktiker waren. Bereits im Herbst 2010 wurde der „Call for Abstracts“ versendet. 231 zweiseitige, englischsprachige Kurzfassungen wurden daraufhin von Autoren aus 16 verschiedenen Nationen eingereicht. Nach dem Review blieben 206 Kurzfassungen und daraus ausgewählte 99 Langfassungen, die jeweils in eigenen Bänden gedruckt wurden. Allen Autoren und Autorinnen wurde erstmals die Möglichkeit geboten, die eigene Arbeit als Poster zu präsentieren und diese in einer eigenen Session kurz vorzustellen.



Abb. 1:
Der Kongressaal in
der Alpexpo
(Foto: Alpexpo, Grenoble)



Abb. 2:
Exkursion Nr. 10 im Maurienne
Tal (Foto: Hallvard Berg, NVE
Norwegen)

Um „fachliche Grenzen“ zwischen den einzelnen Gruppen aus den Bereichen Hochwasser, Steinschlag, Muren und Lawinen zu überwinden und die Gemeinsamkeiten dieser Gruppen im Naturgefahrenmanagement herauszustreichen, wurden für die 45 mündlichen Vorträge in folgende Sessionen gegliedert:

- Monitoring und Modellierung
- Gefahrenkarten und passive Schutzmaßnahmen
- Strukturelle Schutzmaßnahmen und ökologische Wirkung von Schutzmaßnahmen
- Intervention, Sofortmaßnahmen und Wiederinstandsetzung und
- Risk Governance und Planungspolitik

Als Ergänzung zum Kongress, welcher in den Messehallen der Alpexpo abgehalten wurde, wurden zehn fachliche Exkursionen in der Umgebung von Grenoble angeboten. Dabei hat sich gezeigt, dass die Exkursionen ein zentraler Bestandteil des Interpraevent Kongresses sind und auch bleiben sollen.

Anschrift des Verfassers:

DI Dr. Gernot Koboltschnig
Geschäftsführer Interpraevent
Amt der Kärntner Landesregierung
Abt. 8, Kompetenzzentrum Umwelt,
Wasser und Naturschutz
Flatschacher Straße 70
9020 Klagenfurt, Österreich
gernot.koboltschnig@ktn.gv.at

Andreas Gaul, Thomas Tartarotti, Susanne Mehlhorn

Die WildbachaufseherIn – ÖWAV-Ausbildung zur Begehung von Wildbächen

Der ÖWAV-Arbeitsausschuss „Gewässerbetreuung am Wildbach“ erarbeitete einen neuen Kurs, um die notwendige Ausbildung für die Begehung von Wildbächen sicherzustellen.

Laut Forstgesetz liegt die Verpflichtung einer regelmäßigen Begehung der Wildbäche bei den Gemeinden. Die Folgen von Hochwasserkatastrophen, das Zerstörungspotenzial von Muren oder die Gefahr, die von Wildholzverklausungen ausgeht, sind den kommunalen Entscheidungsträgern und der betroffenen Bevölkerung wohl bewusst. Weniger bekannt sind hingegen die Bedeutung und der Umfang regelmäßiger Wildbachbegehungen sowie die laufende Überwachung bestehender Schutzbauwerke. Eine Vernachlässigung dieser Aufgaben kann nach Schadenseintritt schwerwiegende Haftungsfolgen nach sich ziehen. Die notwendigen Grundlagen dazu werden in der 3-tägigen ÖWAV-Ausbildung praxisnah vermittelt.

Ziel des neuen ÖWAV-Kurses ist es, das Wissen der künftigen WildbachaufseherInnen rund um das Thema Wildbach so zu festigen und das notwendige Rüstzeug dafür zu geben, dass Überstände richtig erkannt und dokumentiert, sowie selbstständig Entscheidungen für weiterführende Maßnahmen vor Ort getroffen werden können.

Der Kurs findet erstmalig in Gmunden vom 14. bis 16. November 2012 statt. Zielgruppe für den Kurs sind Aufsichtsorgane von Gemeinden, Wassergenossenschaften und -verbände sowie die Aufsichtsorgane von Verkehrsträgern.

Weitere Informationen zum Ausbildungskurs „WildbachaufseherIn“ werden im Internet unter www.oewav.at und www.naturgefahren.at bereitgestellt.

Anschrift der VerfasserIn:

Andreas Gaul, Österreichischer Wasser- und
Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV)
Marc-Aurel-Straße 5, 1010 Wien, gaul@oewav.at

Anita Kirmer, Bernhard Krautzer,
Sabine Tischew, Michele Scotton

Praxishandbuch zur Samengewinnung und Renaturierung von artenreichem Grünland

Aktuell besteht vor dem Hintergrund, die anspruchsvollen Ziele zum Erhalt der biologischen Vielfalt zu erreichen, ein großes Interesse an Techniken zur Gewinnung von regionalen Saatgutmischungen und zur Renaturierung und Etablierung von artenreichen Wiesen und Weiden. Dabei ist die Verfügbarkeit von Wildpflanzensamen bislang ein wesentlicher limitierender Faktor. Durch die Verwendung von direkt in artenreichen Grünlandbeständen geernteten Samenmischungen sowie von Wildpflanzensamen aus regionalen Vermehrungsbeständen kann bei Renaturierungsvorhaben mit hohen Erfolgchancen eine regionaltypische Vegetation entwickelt werden. Das betrifft beispielsweise die Neuanlage von artenreichen Wiesen und Weiden auf ehemaligen Ackerstandorten oder Rohbodenflächen sowie die Aufwertung von artenarmen Wirtschaftsgrünland. Der Einsatz von regionalen Samenmischungen ist gleichzeitig ein aktiver Beitrag zur Vermeidung von Florenverfälschungen. Um



den Renaturierungserfolg sicher zu stellen, sind zudem standortangepasste Flächenvorbereitungen sowie eine zielorientierte Entwicklungs- und Folgepflege unabdingbar. Mit diesem Praxishandbuch wollen wir Behörden und Firmen ein kompaktes Nachschlagewerk zu diesen Themenkreisen in die

Hand geben, das die langjährigen Erfahrungen der Autoren bündelt. Erschienen im Verlag Cleup Padova, Italien. ISBN 978-3-902559-70-8.

Anschrift der VerfasserInnen:

DI. Dr. Bernhard Krautzer
Altirdning 11, 8952 Irdning
bernhard.krautzer@raumberg-gumpenstein.at

Michelle Schneuwly-Bollschweiler, Markus Stoffel, Florian Rudolf-Miklau

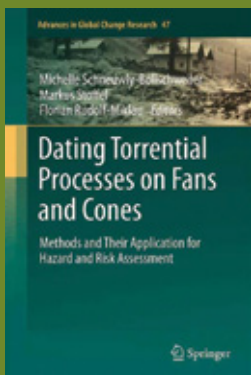
Datierung von Wildbachprozessen auf Schwemmfächern und Kegeln – Methoden und ihre Anwendung in der Gefahren- und Risikobeurteilung

Wasserbasierte Prozesse wie Hochwasser, Sturzströme, Schlammlawinen und Murgänge stellen in vielen Berggebieten der Welt eine große geomorphologische Gefahr dar. Durch den vielerorts zunehmenden Siedlungsdruck sind in den vergangenen Jahrzehnten wiederholt Konflikte zwischen Naturgefahren und menschlicher Nutzung verschärft haben. Eine detaillierte Datengrundlage zu Frequenz und Magnitude vergangener Hochwasser oder Murgänge auf Schwemmfächern und Kegeln ist in der Regel nur mangelhaft oder fehlt gänzlich, obwohl derartige Kenntnisse für die Gefahrenbeurteilung, Risikominderung und Raumplanung von zentraler Bedeutung sind. Die Datierung von Murgängen und Hochwassern kann mit verschiedenen Techniken erfolgen, wie zum Beispiel mit der Dendrochronologie, Radiokohlenstoff- oder Flechten-datierung, und kann so dazu beitragen die vergangene Prozessaktivität besser zu erfassen und so wichtige Informationen zum historischen Archiv hinzuzufügen.

Dieses Buch vermittelt einen detaillierten Einblick in die Methoden, welche für die Datierung vergangener Wildbachaktivitäten auf Kegeln und Schwemmfächern angewendet werden können, und diskutiert den Einfluss von vergangenen und möglichen künftigen Klimaveränderungen auf Wildbachprozesse. Das Buch fokussiert klar auf die praktische Anwendung dieser Methoden und die Texte sind ausgiebig mit Fallstudien illustriert. Zudem werden die Grenzen jeder Datierungsmethode aufgezeigt.

Somit bietet das Buch

- einen umfangreichen Überblick zu Datierungsmethoden von Murgängen und Hochwassern auf Schwemmfächern und Kegeln
- eine detaillierte praktische Checkliste für Feldanalysen
- einen Vergleich von Nutzen, Grenzen und Kosten der verschiedenen Methoden
- eine Darlegung der Wichtigkeit von historischen Daten zu vergangenen Ereignissen für die Gefahren- und Risikobeurteilung



Referenz:

Michelle Schneuwly-Bollschweiler, Markus Stoffel, Florian Rudolf-Miklau (Herausgeber): Dating torrential processes on fans and cones – methods and their application for hazard and risk assessment. Springer Verlag, Advances in Global Change Research, Ausgabe 47, ISBN 978-94-007-4335-9.

Anschrift der Verfasser:

Dipl. Geogr. Dr. Michelle Schneuwly-Bollschweiler Dipl. Geogr. Dr. PD Markus Stoffel
Labor für Dendrogeomorphologie
(www.dendrolab.ch)
Institut für Geologie, Universität Bern
Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Bern

und

Lehrstuhl für Klima- und Klimafolgenforschung
Institut für Umweltwissenschaften
Universität Genf
7, route de Drize, CH-1227 Carouge-Genève
E-mail: michelle.schneuwly@dendrolab.ch
markus.stoffel@dendrolab.ch

DI Dr. Florian Rudolf-Miklau
Wildbach- und Lawinenverbauung, BMLFUW, Abt. IV/5,
Marxergasse 2, 1030 Wien
florian.rudolf-miklau@die-wildbach.at

Jürgen Suda, Florian Rudolf-Miklau

Bauen und Naturgefahren: Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz

Naturgefahren stellen ein bedeutendes Sicherheitsrisiko für den Gebäudebestand und gewidmetes Bauland dar. Der technische Gebäudeschutz dient der effektiven Risikoversorgung und basiert auf der Analyse der Naturgefahren und deren Darstellung in Gefahrenzonenplänen. Er umfasst konstruktive Maßnahmen am Bauwerk selbst oder in dessen unmittelbarer Umgebung. Das Handbuch bietet dem Leser eine erschöpfende Darstellung der Gebäudeschutzmaßnahmen gegen Hochwasser, Muren, geologische Gefahren und Lawinen, außerdem werden Vorkehrungen gegen Erdbeben, Sturm, Blitzschlag und Schneelasten im Überblick behandelt. Bautechnische Bemessungsgrundlagen (einschließlich der relevanten Einwirkungsmodelle), Planungsgrundlagen, Detailskizzen (Umsetzungsbeispiele) und Checklisten unterstützen den Planer,

Bauherren oder Sachverständigen bei der Realisierung von Schutzmaßnahmen. Das Werk enthält eine kompakte Darstellung der relevanten Rechts- und Techniknormen (auf Basis des EUROCODES).

Aus dem Inhalt:

Einführung.- Naturgefahren in Gebirgsräumen.- Gefährdungsbilder für Objekte infolge alpiner Naturgefahren.- Einwirkungen auf Gebäude.- Gefahrendarstellung und Risikobewertung.- Umsetzung von Gefahrenkarten und Gefahrenzonenplänen in der Raumordnung und im Bauwesen.- Rechtliche und technische Normen des Gebäudeschutzes.- Planungsgrundsätze des Gebäudeschutzes.- Entwurf von Gebäudeschutzmaßnahmen.- Maßnahmen am Gebäude – Konstruktion und Hochbaudetails.- Maßnahmen vor dem Gebäude.- Bautechnische Bemessung von Gebäudeschutzmaßnahmen.- Tabellen und Checklisten.- Literaturverzeichnis.- Bildnachweis.
Springer Verlag Wien, ISBN 978-3-7091-0680-8.



Anschrift der Verfasser:

DDI Dr. nat. techn. Jürgen Suda
alpinfra, consulting + engineering gmbh
Kuefsteingasse 15-19
1140 Wien
juergen.suda@alpinfra.com

DI Dr. nat. techn. Florian Rudolf-Miklau
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung IV/5 (Wildbach- und Lawinenverbauung)
Marxergasse 2
1030 Wien
florian.rudolf-miklau@die-wildbach.at

Arnold Kogelnig

Development of acoustic monitoring for Alpine mass movements Dissertation (Abstract)

Die Dissertation „Development of Acoustic Monitoring for Alpine Mass Movements“ hatte zum Ziel das Potenzial von Infrasschall- und seismischen Sensoren für das Monitoring von alpinen Naturgefahren zu evaluieren. Die Dissertation basiert auf den Erkenntnissen der Diplomarbeit „Infrasound Monitoring of Avalanche Activity“ und wurde von Prof. Johannes Hübl (IAN, BOKU) und Prof. Emma Suriñach (UB Barcelona) betreut.

Infrasschall-Wellen sind tieffrequente (1–20 Hz) Druckwellen in der Luft und seismische Wellen, das Gegenstück dazu, sind elastische Wellen die sich im Boden ausbreiten. Sowohl seismische als auch Infrasschall-Wellen sind mechanische Wellen, welche sehr oft den gleichen physikalischen Ursprung haben. Die Erdoberfläche ist durchlässig für mechanische Wellen, egal ob es sich um seismische Vibrationen aus dem Boden oder Druckwellen aus der Luft handelt. Daher kann es auch zu Kopplungseffekten kommen. Infolge dessen erscheint es nur sinnvoll, sowohl die Druckwellen in der Luft (Infrasschall) als auch im Boden (seismische Wellen) zu monitoren, um Informationen über den Prozess zu erhalten.

Beide Sensortypen sind schon individuell in anderen Studien verwendet worden, aber das Potenzial einer Kombination dieser zwei Sensoren ist bis jetzt noch nicht untersucht worden.

Im Zuge dieser Dissertation wurden Infrasschall- und seismische Signale in verschiedenen Testgebieten in der Schweiz, Österreich und China aufgenommen und genau analysiert. Zusätzlich wurden die Daten mit anderen Messungen wie z. B. Fließtiefe, Geschwindigkeit oder Druck verglichen, um die Interpretation und Verifizierung zu erleichtern.

Die Ergebnisse offenbarten, dass Muren 90 s–635 s bevor sie die Sensoren passierten detektiert wurden, abhängig vom Testgebiet und Equipment. Es zeigte sich auch, dass sich der Frequenzgehalt des Infrasschall-Signales ändert, wenn ein Ereignis einen höheren Wassergehalt hat (z.B. murartiger Feststofftransport). Im Infrasschall-Signal haben Murgänge niedrigere Frequenzen (ca. 5 Hz) als ein murartiger Feststofftransport (>7 Hz).

Bei Lawinen hat sich gezeigt, dass die Sensoren auf unterschiedliche Fließkomponenten ansprechen. Genauer gesagt, spricht der Infrasschall-Sensor mehr auf die Turbulenzen im Staubanteil an und der seismische Sensor reagiert besser auf die Vibrationen, die durch den Fließanteil in den Boden übertragen werden. Daher kann der Infrasschall-Sensor besser eine Lawine im Anfangsstadium erkennen, wenn ein Staubanteil vorhanden ist. Im Gegensatz dazu detektiert der seismische Sensor die Lawine, sobald genug Masse vorhanden ist, um Vibrationen zu produzieren, welche von den Umgebungsgläuschen unterschieden werden können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Kombination von Infrasschall- und seismischen Sensoren ein sehr großes Potenzial für Monitoring- und Detektionssysteme hat. Die kombinierte Analyse der Signale macht es möglich, mehr Aussagen über den Prozess zu machen und die Fehlerquote bei Detektionen signifikant zu minimieren.

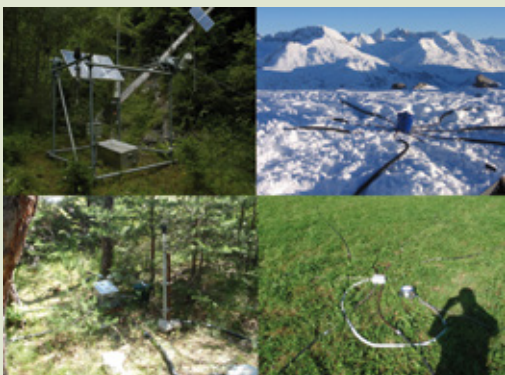


Abb. 1: Links oben: Messstation am Lattenbach mit Infrasschall- und seismischem Sensor; rechts oben: Infrasschall-Sensor in Lech am Arlberg; links unten: Messstation am Illgraben (Wallis Schweiz) mit Infrasschall- und seismischem Sensor; rechts unten: Versuchsaufbau des Infrasschall-Sensors in Pressbaum bei Wien.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Arnold Kogelnig
Wyssen Austria GmbH
Höttinger Au 85, 6020 Innsbruck, Österreich
Tel. +43 650 5210042, arnold@wyssen.com

Barbara Kogelnig-Mayer

Tree rings and torrential activity – tree disturbance and event histories Dissertation (Abstract)

Das Ziel der Dissertation „Tree ring and torrential activity – tree disturbance and event histories“ war die Rekonstruktion von vergangen Murgang- und Lawineneignissen durch die Analyse von Bohrkernen und Stammscheiben (= Dendrogeomorphologie), um einerseits die lokale Prozesskenntnis zu verbessern und andererseits detaillierteres Wissen über die Wachstumsreaktionen der Bäume zu gewinnen. Diese Forschungsarbeit wurde von Prof. Johannes Hübl (IAN, Boku) und Dr. Markus Stoffel (dendrolab, Uni Bern) betreut und von der Wildbach- und Lawinenverbauung fachlich und finanziell unterstützt. Das Kernstück der Arbeit, welche als sogenannte „kumulative Dissertation“ verfasst wurde, stellen drei Fachartikel dar.

Die Publikation „Four-dimensional growth response of mature Larix decidua to stem burial under natural conditions“ wurde in der Zeitschrift „Trees – Structure and Function“ publiziert und untersucht die Auswirkung von Einschüttung mit Murgangmaterial auf die Jahringbreite von Lärchen. In dieser Arbeit wurde erstmalig die abrupte Stammeseinschüttung an ausgewachsenen Lärchen systematisch und unter natürlichen Bedingungen untersucht. Die Auswirkung der Einschüttung (> 0,5 m) wurde in radialer, tangentialer und axialer Richtung mehr als drei Jahrzehnte nach dem Ereignis untersucht. Die Analyse basierte auf 572 Wachstumskurven von 143 Stammscheiben und zeigte einem massiven und plötzlichen Wachstumseinbruch unmittelbar nach dem Ereignis. Während die Dauer des Wachstumseinbruchs sehr stark zwischen den Bäumen variierte, konnten weder in axialer noch in tangentialer Richtung signifikante Unterschiede des prozentualen Wachstumseinbruchs im ersten Jahr nach dem Einbruch festgestellt werden (Abbildung 1).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konnten die Ereignisse des Gratzentalbachs (Tirol) bis zurück ins 19. Jahrhundert rekonstruiert werden. Aufgrund des vorherrschenden Prozesses (= murartiger Feststofftransport) basierte die Rekonstruktion hauptsächlich auf Wachstumsreaktionen (Wachstumsschub oder -einbruch) der 227 beprobten Fichten und Lärchen. Durch die Datierung der Wachstumsstörung und die Position der

gestörten Bäume konnten Daten über die Ereignisfrequenz, Ausbreitung und Ausbruchstellen von vergangenen Ereignissen gewonnen werden. Die Studie wurde in der Zeitschrift Geomorphology publiziert und trägt den Titel „Frequency and spread of debris floods on fans: a dendrogeomorphic case-study from a dolomite catchment in the Austrian Alps“.

Die dritte Publikation „Possibilities and limitations of dendrogeomorphic time-series reconstructions on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity“ evaluiert die Möglichkeiten und Grenzen der Jahringanalyse in komplexen Prozessgeschehen. Hierzu wurden 372 Picea abies (L.) Karst., die sowohl von Lawinen als auch von Murgängen beeinflusst sind, untersucht. Unterschieden wurden die Prozesse anhand der intra-annualen Positionsbestimmung von Verletzungen, Kallusgewebe und traumatischen Harzkanälen. Der Vergleich der Jahringdaten mit den Archivdaten zeigte deutlich, dass die rekonstruierte Ereignisfrequenz die Mehrheit der vergangenen Murgänge und Lawinen der Reiselehrinne (Tirol) beinhaltet.

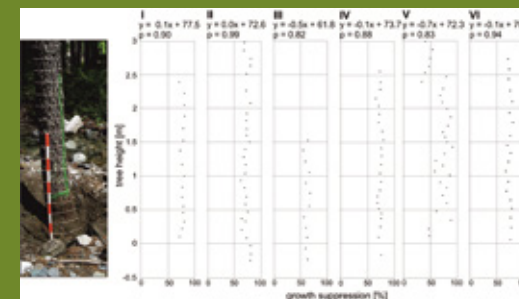


Abb. 1: Prozentualer Wachstumseinbruch auf den verschiedenen Baumhöhen: Die lineare Regression zeigt klar, dass kein Zusammenhang zwischen Baumhöhe und prozentualen Wachstumseinbruch besteht.

Anschrift der Verfasserin:

DI Dr. Barbara Kogelnig
Amt der Kärntner Landesregierung, Abteilung 8
Kompetenzzentrum Umwelt, Wasser und Naturschutz
Flatschacher Straße 70, 9020 Klagenfurt
barbara.kogelnig@ktn.gv.at

Johannes Hübl, Florin Florineth, Alfred Strauss

BOKU: Aktuelle Diplomarbeiten am Department für Bautechnik und Naturgefahren (abgeschlossen)

Stefan Hesse	Grundlagenerhebung zur Erstellung des Gefahrenzonenplanes für den Alpbach in Brixlegg unter Verwendung von ZEMOKOST, HEC-HMS und Tomsed	Hübl, 15.5.2012
Matthias Muellegger	Physikalische Modellierung von Muren – ein hydraulisch basierter Ansatz	Hübl, 15.2.2012
Reinhard Kaplanski	Sicherheitskonzept Liesgele. Dreidimensionale, hochaufgelöste Analyse des Lawinenanbruchgebiets am Liesgelespitz	Hübl, 26.1.2012
Werner Fleissner	Aufarbeitung des Murgangs am Wartschenbach im Jahr 2008 im Bezirk Lienz/Osttirol	Hübl, 11.3.2012
Benno Hofer	Erhöhung der Kosten-Nutzen-Effizienz durch innovative Schutzkonzepte, Angewandt am Mühlalpbach in der Gemeinde Marling	Hübl, 15.5.2012
Michael Wolfsgruber	Dendrogeomorphologische Untersuchungen am Schwemmkegel Toblacher See	Hübl, 15.5.2012
Markus Oismüller	Dendrogeomorphologische Untersuchungen an alpinen Schwemmkegeln im Gesäuse	Hübl, 15.5.2012
Lauriane Sandrine Fargier	Rockfall trajectory-simulation software: from theory to application	Hübl, 13.4.2012
Manuel Sokopp	Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen - Auswirkungen von Weiden- und Gräser/Kräuter-Bewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen	Florineth

Nähere Auskünfte:

Universität für Bodenkultur
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Peter Jordan Straße 82
1190 Wien
evelin.kamper@boku.ac.at

Antonia Zeidler, Daniel Hug

Unsicherheiten im Management von Naturgefahren Uncertainties in natural hazard risk management

Im Rahmen des Projektes RIMES (Climate Change and Risk Management in Energy Systems, finanziert aus Mitteln des ACRP) hat Daniel Hug das Thema Unsicherheiten im Management von Naturgefahren am Institut für Naturgefahren (BFW) in Form einer Diplomarbeit bearbeitet.

Naturgefahrenexperten und Entscheidungsträger sind in ihrer Arbeit damit konfrontiert, trotz unsicherer Datenbasis Entscheidungen treffen zu müssen. Betrachtet man die einzelnen Komponenten eines Risikomanagementkreislaufs: Risikoanalyse, Risikobewertung und den Entscheidungsprozess, wird deutlich, dass in allen Bereichen Daten oder Modelle verwendet werden, welche die natürlichen Gegebenheiten nur bedingt gut wiedergeben.

Bisher werden Unsicherheiten im Management von Naturgefahren nicht explizit berücksichtigt, obwohl sich Experten und Entscheidungsträger des Problems bewusst sind und diese teils qualitativ beschreiben. Eine Quantifizierung der Unsicherheiten ist jedoch schwierig, da das Wissen über die Gefahrenprozesse und ihre Auswirkungen limitiert ist und statistische Methoden zeit- und kostenintensiv sind. Jedoch versprechen die Befürworter von Unsicherheitsanalysen eine Qualitätssteigerung der Ergebnisse und die Möglichkeit zur einer zielgruppengerichteten Aufarbeitung und Kommunikation der Ergebnisse.

Daniel Hug hat den Fokus seiner Arbeit auf die Identifizierung von Unsicherheiten in der Risikoanalyse, v.a. der Bestimmung des Gefahren- und Schadenpotenzials, gelegt. In der Arbeit wurde eine Matrix entwickelt, mit der es nachvollziehbar möglich ist, Unsicherheiten im Management von Naturgefahren zu identifizieren.

Weiters wurden verschiedene Quantifizierungsmethoden auf der Basis einer Literaturrecherche diskutiert (z.B. Monte Carlo Simulation, Fuzzy Logic, Bayesian Statistik). Verschiedene Ansätze wurden miteinander verknüpft und neben der Unterscheidung in Parameter und Modellunsicherheiten die Unterscheidung der Art der Unsicherheiten herausgearbeitet. Üblicherweise spricht man von epistemischen Unsicherheiten (griech. episteme = Wissen, Wissenschaft) und aleatorischen Unsicherheiten (lat. alea = Würfel, Würfelspiel). Erstere sind assoziiert mit subjektiven Einschätzungen, unzureichendem Wissen, Ignoranz, nicht perfektem Datenmaterial und nicht ausreichendem Wissen über das System. Aleatorische Unsicherheiten treten hingegen aufgrund natürlicher, unvorhersagbarer Variationen des studierten Systems auf. Erstere können durch verbessertes Wissen und bessere Methoden reduziert werden und spielen im Risikomanagement eine wichtige Rolle.

Anschrift des/der VerfasserIn:

Antonia Zeidler, PhD
Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum
für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW)
Institut für Naturgefahren
Rennweg 1
6020 Innsbruck
antonia.zeidler@uibk.ac.at

Dipl. Geogr. Daniel Hug
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
daniel.hug@stud-mail.uni-wuerzburg.de

Inserentenverzeichnis

Firma	Inserat Seite
alpinfra, consulting + engineering gmbh	17
dlp Ziviltechniker-GmbH	149
EZB - Eberstaller TB gmbh	167
Geobruigg AG	309
GeoExpert Research and Planning GmbH	45
GEOGNOS Bertle ZT GmbH	255
Geolith Consult	167
GEOTECHNIK-HENZINGER	255
Gunz ZT GmbH	213
Heli Austria GmbH	4
Hofmann ZT	77
Hydrotech	149
i.n.n.	235
Klenkhart & Partner Consulting ZT GmbH	8
J.Krismer HandelsgmbH	245
Mair Wilfried GmbH	305
MEVA Schalungssysteme - Alzner Baumaschinen GmbH	6
Mineral Abbau GmbH	213
Moser-Jaritz Ziviltechnikergesellschaft	255

Firma	Inserat Seite
Moosbrugger Bau GmbH	213
ms.GIS informationssysteme gmbh	199
Naue Geotextilien GmbH & Co. KG	135
Ingenieure Patscheider & Partner GmbH	179
Ingenieurbüro Perzplan	178
Ziviltechnikerbüro Dipl.-Ing. Rainer Russ	167
Reckli GmbH	311
Revital GmbH	45
Schärdinger Granit Industrie AG	44
Samen Schwarzenberger	281
Sommer-Messtechnik GmbH & Co KG	27
Dr. Spang Ingenieurgesellschaft	293
SVWP Kommunikationsmanagement GmbH	113
Tiroler Wasserkraft	10
Ingenieurbüro Tschernutter	101
DI Werner Tiwald ZT-Ges.m.b.H.	77
Trumer	245
Unidata geodesign Schutzbauten GmbH	179
Wucher Helicopter GmbH	U4
Wyssen Austria GmbH	67



Ein eingespieltes Team das extreme und alltägliche Flugeinsätze souverän löst.





Ein eingespieltes Team das extreme und alltägliche Flugeinsätze souverän löst.

