

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

# Wildbach- und Lawinenverbau



# Hydrologie

ISBN: 978-3-9504924-2-2  
85. Jahrgang  
Dezember 2021  
Heft Nr. 188





## Impressum:

Herausgeber:

Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinerverbauung  
Österreichs, A-6900 Bregenz

Schriftleitung:

Dipl.-Ing. Christian Pürstinger [Technischer Referent]  
Wildbach und Lawinerverbauung,  
Gebietsbauleitung Oberösterreich West  
Traunreiterweg 5, 4820 Bad Ischl; +43 6132 232 32-21  
christian.puerstinger@wlv-austria.at

Layout & graphische Gestaltung: Studio Kopfsache – Kommunikation & Design, A-5310 Mondsee

Druck & Versand: Gugler GmbH, A-3390 Melk/Donau

Titelbild: Überflutung Pechgraben, Gemeinde Großraming [Foto: FF Pechgraben, 2005]

Wildbach- und  
Lawinerverbau

ISBN: 978-3-9504924-2-2  
85. Jahrgang, Dezember 2021, Heft Nr. 188

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



AS332 Super Puma



Bell 412



Bell 212HP



Ecureuil H 125/AS350B3e



# SUPER PUMA

TRAGKRAFT  
4,2 TONNEN

## Inhalt Heft 188

### Editorial

Seite 10

Stefan Achleitner, Benjamin Kammereck,  
Robert Sitzenfrei, Bernhard Kohl, Leopold Stepanek:  
**Wechselwirkung von Wildbacheinzugsgebieten  
und städtischen Einzugsgebieten**

Seite 14

Johannes Moser, Hydrographischer Dienst Kärnten:  
**Regionalisierung / Plausibilisierung von Hochwasserkennwerten  
kleiner Einzugsgebiete in Kärnten – Praxisorientierter  
Gebietsfaktoren-Katalog im Spektrum der Hochwasserstatistik**

Seite 28

Julia Eisl, Günter Humer, Michael Hofer:  
**Hydrologische Modellierung von Oberflächenabfluss –  
Erfahrungen eines Ingenieurbüros**

Seite 38

Gebhard Walter, Manfred Pittracher, Leopold Stepanek:  
**HYGENOT und PSINOT – Markstein in der Wildbachhydrologie**

Seite 46

W. Straka, T. Strauhal, C. Zangerl, M. Pittracher, B. Kohl, G. Markart,  
T. Sausgruber, L. Stepanek, J. Kammerlander, M. Kals, M. Pittracher:  
**HYGENOT – Großskalige hydrogeologische Charakterisierung  
von Wildbacheinzugsgebieten (Nordtirol)**

Seite 50

Bernhard Kohl, Gerhard Markart, Manfred Pittracher,  
Leopold Stepanek, Johannes Kammerlander, Gebhard Walter,  
Wolfgang Straka, Thomas Strauhal, Christian Zangerl:  
**PSINOT – Abflussbeiwertkarte Nordtirol**

Seite 62

J. Kammerlander, M. Pittracher, L. Stepanek, G. Walter, B. Kohl, G. Markart,  
W. Straka, T. Strauhal, C. Zangerl:  
**Anwendung neuer hydro(geo)logischer Flächendaten zur  
Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Tirol**

Seite 72

Peter Hartl:  
**Neueste Technologie im Praxistest – LoRaWAN Hochwassermonitoring –  
Ereignisanalyse Weißenbach/Chorinskyklause am 17./18.07.2021**

Seite 82

Hauptbeiträge



**Heli Austria GmbH**

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



**Heli Tirol GmbH**

A-6462 Karres, Tiroler Bundesstraße 1  
Tel. +43 (0)5412-61421 • fly@heli-tirol.at



Universell einsetzbar.

## StarTec, die Mehrbereichsschalung

# Sicher schalen. Sicher bauen.

Mit Teamwork sorgen wir am Hopfgartnergraben in Deferegggen gemeinsam für eine sichere Zukunft: MEVA Schalungs-Systeme. Alzner Baumaschinen. Und die Wildbach- und Lawinenverbau, GBL Osttirol.

Wir danken allen Beteiligten für Ihren Einsatz und die hervorragende Zusammenarbeit.



MEVA Schalungs-Systeme Ges. mbH  
Tel. +43 2252 209000  
www.meva.net

Alzner Baumaschinen G.m.b.H.  
Tel. +43 6219 8065  
www.alzner.at

## Inhalt Heft 188

Hauptbeiträge

Johannes Kammerlander, Markus Moser, Patrick Stolz:  
**Evaluierung von Hochwasserberechnungen am Strobl Weißenbach**

Seite 94

Thomas Frandl, Margarete Wöhrer-Alge:  
**Das Starkregenereignis in der Gemeinde Lingenau (Bezirk: Bregenz) am 09. Juni 2021**

Seite 104

Georgios Kyriazis, Harald Gruber:  
**Modifizierte Salcher-Abschätzung am Beispiel des Projektgebietes „AB162 – Hillslope“, Bereich Passau**

Seite 112

Markus Moser, Patrick Stolz:  
**Leistungsvermögen einer alten Wasserdosiersperre**

Seite 120

Johannes Hübl:  
**Ein einfaches Verfahren zur Bestimmung von Murgangabflüssen**

Seite 130

Hauptbeiträge zu anderen Themen

Lukas Kozłowski, Markus Moser, Roland Kaitna:  
**Berücksichtigung der Kurvenüberhöhung von murartigen Fließprozessen und Murgängen in der Gefahrenzonenplanung**

Seite 150

Matthias Schlögl, Micha Heiser, Christian Scheidl, Sven Fuchs:  
**Entwicklung der Wildbachereignisse in Österreich: Schäden als Ergebnis einer Kombination aus Klimawandel, Exposition und Verbauungsmaßnahmen**

Seite 160

Christian Pürstinger, Christoph Lainer:  
**Einrichtung eines Modelleinzugsgebietes: Der Rindbach in Oberösterreich**

Seite 176

Ursula Stephan, Wolfram Bitterlich:  
**Wildbachbuhnen als Ursache eines dynamischen Wellenbildes in Wildbachunterläufen**

Seite 188



Das im Jahre 1948 durch Herrn Josef Rüf sen. **gegründete Unternehmen** wird heute in der dritten Generation durch Bruno, Christoph und Josef jun. geleitet.

Unsere höchst motivierten und bestens ausgebildeten Mitarbeiter, unterstützt durch den modernen und technisch auf neuestem Stand aufgestellten Fuhrpark, bieten Leistungen für Kunden im 3-Länder-Eck Deutschland, Österreich und Schweiz an.

Unser Leistungsspektrum reicht von Tiefbau, Spezialtiefbau, Erdbebungung, Sprengarbeiten, Abbrucharbeiten über Rohstoffgewinnung und Transporte, Baustoffhandel bis

hin zur Deponierung von Bodenaushubmaterial.

Wir werden zum Partner für Ihr individuelles Projekt, von der Planung bis zur Ausführung unserer Leistungen mit bestem und transparentem Abschluss.

Rüf steht schon seit Generationen für Qualität, Vielseitigkeit, Innovation, Dynamik und Treue!

Mehr über uns: [www.ruefbau.com](http://www.ruefbau.com)



## Inhalt Heft 188

Aktuelles aus Wissenschaft und Praxis

Michael Berner, Markus Waibel:  
**Bemessungstool für Wildholzrechen lt. ONR 24802:2011 auf Excel-Basis**

Seite 196

Magnus Kramer, Johannes Kammerlander:  
**Simulation von Murgängen mit dem Lawinenmodell SamosAT**

Seite 200

Markus Moser, Gerald Jäger, Johannes Kammerlander, Michael Botthof, Stefan Janu, Christian Pürstinger, Gerhard Holzinger, Susanne Mehlhorn:  
**Neue Wege in der Wissensvermittlung – WEBINAR SERIES des Fachzentrum Wildbachprozesse**

Seite 205

Vorschau Heft 189

Seite 206

Inserentenverzeichnis

Seite 208

**CHRISTIAN PÜRSTINGER (SCHRIFTLEITUNG)**

## Editorial

Liebe Leserin, lieber Leser!

Die Ihnen hier vorliegende Ausgabe der Fachzeitschrift Wildbach- und Lawinenverbau ist dem Thema Hydrologie gewidmet. Per Definition ist die Hydrologie *„die Wissenschaft, die sich mit dem Wasser in der Biosphäre der Erde befasst. Dabei betrachtet sie das Wasser sowohl hinsichtlich seiner Erscheinungsformen, Zirkulationen und Verteilungen in Raum und Zeit wie auch bezüglich seiner physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften sowie seiner Interaktionen mit der Umwelt, einschließlich der Beziehungen zu Lebewesen“*.

Beschäftigt man sich auf dem Gebiet der Naturgefahren mit den diversen Arten von Niederschlags- und Abflussprozessen, so sind dabei sämtliche Fragestellungen untrennbar mit der Hydrologie verbunden. Expertinnen und Experten beobachten und messen ständig hydrologische Veränderungen und erarbeiten hydrologische Grundlagen als Basis für weiterführende Planungen. Ob bei der Berechnung von Spitzenabflüssen, der Festlegung von Bemessungswerten für weiterführende Untersuchungen (Simulationen, etc.), bei der Abschätzung von wildbachrelevanten Kenngrößen (z. B. in unbeobachteten Wildbacheinzugsgebieten), im Planungsprozess für Schutzmaßnahmen, in der Gefahrenzonenplanung, u.v.m., überall spielt das Thema Hydrologie eine zentrale Rolle.

Es haben sich zahlreiche Autorinnen und Autoren aus Wissenschaft und Praxis dankenswerterweise dazu bereit erklärt, zu diesem Thema einen Beitrag zu leisten.

Beginnend mit der Betrachtung der Wechselwirkung von Wildbacheinzugsgebieten und städtischen Einzugsgebieten sowie der Regionalisierung von Hochwasserkennwerten kleiner Einzugsgebiete werden bedeutende Projekte in Sachen Wildbachhydrologie in Tirol vorgestellt. Beiträge gewähren uns Einblicke in die Modellierung von Oberflächenabfluss, in die Evaluierung von Hochwasserberechnungen, über dokumentierte Starkregenereignisse und über grenzübergreifende Hochwassermanagementkonzepte. Neueste Technologien im Hochwassermonitoring und Untersuchungen zum Leistungsvermögen von Wasserdosiersperren runden das Thema optimal ab.

Mit der Berücksichtigung der Kurvenüberhöhung von murartigen Fließprozessen und Murgängen in der Gefahrenzonenplanung sowie neuesten Erkenntnissen zur einfachen Bestimmung von Murgangabflüssen wird auch das Thema Muren durchleuchtet.

Ebenso finden sich in der aktuellen Ausgabe Fachbeiträge zur Entwicklung der Wildbachereignisse in Österreich, zur Einrichtung eines speziellen Modelleinzugsgebietes sowie interessante Forschungsergebnisse betreffend Modellversuchen mit Wildbachbuhnen.

In der Praxispinwand werden ein Bemessungstool für Wildholzrechen, neue Wege in der Wissensvermittlung mit den Webinar Series des Fachzentrum Wildbachprozesse sowie eine Masterarbeit zum Thema „Simulation von Murgängen mit dem Lawinenmodell SamosAT“ vorgestellt.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Autorinnen und Autoren für die sehr interessanten Fachbeiträge bedanken.

Ich wünsche Ihnen nun viel Freude beim Lesen. Wenn Sie Anregungen für mich haben, welche Themen besonders interessant wären, oder wie man ein Fachjournal noch besser gestalten könnte, so würde es mich freuen von Ihnen zu hören.

Dipl.-Ing. Christian Pürstinger  
Technischer Referent / Schriftleitung

# Hauptbeiträge Hydrologie

Stefan Achleitner, Benjamin Kammereck,  
Robert Sitzenfrei, Bernhard Kohl, Leopold Stepanek:  
**Wechselwirkung von Wildbacheinzugsgebieten  
und städtischen Einzugsgebieten** Seite 14

Johannes Moser, Hydrographischer Dienst Kärnten:  
**Regionalisierung / Plausibilisierung von Hochwasserkennwerten  
kleiner Einzugsgebiete in Kärnten – Praxisorientierter  
Gebietsfaktoren-Katalog im Spektrum der Hochwasserstatistik** Seite 28

Julia Eisl, Günter Humer, Michael Hofer:  
**Hydrologische Modellierung von Oberflächenabfluss –  
Erfahrungen eines Ingenieurbüros** Seite 38

Gebhard Walter, Manfred Pittracher, Leopold Stepanek:  
**HYGENOT und PSINOT – Markstein in der Wildbachhydrologie** Seite 46

W. Straka, T. Strauhal, C. Zangerl, M. Pittracher, B. Kohl, G. Markart,  
T. Sausgruber, L. Stepanek, J. Kammerlander, M. Kals, M. Pittracher:  
**HYGENOT – Großskalige hydrogeologische Charakterisierung  
von Wildbacheinzugsgebieten (Nordtirol)** Seite 50

Bernhard Kohl, Gerhard Markart, Manfred Pittracher,  
Leopold Stepanek, Johannes Kammerlander, Gebhard Walter,  
Wolfgang Straka, Thomas Strauhal, Christian Zangerl:  
**PSINOT – Abflussbeiwertkarte Nordtirol** Seite 62

J. Kammerlander, M. Pittracher, L. Stepanek, G. Walter, B. Kohl, G.  
Markart, W. Straka, T. Strauhal, C. Zangerl:  
**Anwendung neuer hydro(geo)logischer Flächendaten zur  
Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Tirol** Seite 72

Peter Hartl:  
**Neueste Technologie im Praxistest – LoRaWAN Hochwassermonitoring –  
Ereignisanalyse Weißenbach/Chorinskyklause am 17./18.07.2021** Seite 82

Johannes Kammerlander, Markus Moser, Patrick Stolz:  
**Evaluierung von Hochwasserberechnungen am Strobler Weißenbach** Seite 94

Thomas Frandl, Margarete Wöhrer-Alge:  
**Das Starkregenereignis in der Gemeinde Lingenau  
(Bezirk: Bregenz) am 09. Juni 2021** Seite 104

Georgios Kyriazis, Harald Gruber:  
**Modifizierte Salcher-Abschätzung am  
Beispiel des Projektgebietes „AB162 – Hillslope“, Bereich Passau** Seite 112

Markus Moser, Patrick Stolz:  
**Leistungsvermögen einer alten Wasserdosiersperre** Seite 120

Johannes Hübl:  
**Ein einfaches Verfahren zur Bestimmung von Murgangabflüssen** Seite 130

STEFAN ACHLEITNER, BENJAMIN KAMMERECK,  
ROBERT SITZENFREI, BERNHARD KOHL, LEOPOLD STEPANEK

## Wechselwirkung von Wildbacheinzugsgebieten und städtischen Einzugsgebieten

Vor- und Nachteile von Regenrückhaltebecken

### Zusammenfassung:

Die Bemessung von Rückhaltemaßnahmen in städtischen Abwassersystemen ist gängige Praxis, wobei im Hinblick auf die hydraulische Bemessung von Rückhaltebecken, städtische und natürliche Einzugsgebiete meist unabhängig voneinander betrachtet werden. Neben der stofflichen Verdünnung bei Mischwassersystemen ist das Hauptziel, die Spitzenabflüsse aus dem Stadtgebiet vor Einleitung in den Vorfluter auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu reduzieren. Das grundsätzlich positive Ziel Spitzenabflüsse zu reduzieren, wurde mit Blick auf das Zusammenwirken zwischen Urbanraum und Wildbach beleuchtet. Ziel dieser Arbeit ist es, die dynamische Interaktion zwischen einem städtischen und einem Wildbacheinzugsgebiet zu untersuchen. Es stellt sich die Frage, ob eine Reduktion des städtischen Spitzenabflusses im Allgemeinen auch mit einer Reduktion des gesamten Spitzenabflusses einhergeht oder ob es auch Situationen gibt, bei denen sich die Verzögerung der städtischen Abflusskomponenten negativ auswirkt und es zu einer Erhöhung des Gesamtabflusses (städtisch und Wildbach) kommt. Für das Beispiel des Geroldsbachs/Götzens wurden zwei Modelle erstellt, um die Niederschlagsabflussbildung aus Wildbach- und städtischem Einzugsgebiet abzubilden.

Die gekoppelten Modellteile wurden mit unterschiedlichen Bemessungsniederschlägen betrieben, um die Auswirkungen von räumlich unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen, Intensität und Dauer bewerten zu können. Die Simulationen wurden jeweils mit und ohne Rückhaltebecken für den Abfluss aus dem städtischen Einzugsgebiet durchgeführt. Obwohl dessen flächenmäßiger Anteil, der über das Becken zurückgehalten wurde, im Vergleich zum Wildbacheinzugsgebiet klein war (1:40), wurde in einigen Fällen in Summe ein Anstieg der Spitzenabflüsse festgestellt. Die Größenordnung des Anstiegs war zwar gering und lag bei ca. 5 %, jedoch war aus der Konzeption der

### Stichwörter:

Bemessungsregen,  
Überlagerung von  
Ganglinien, Rückhaltebecken,  
Wildbachhydrologie,  
Stadthydrologie

Anlage ein geringerer Anstieg vorgesehen. Die Ergebnisse bilden die hier spezielle Einzugsgebietssituation ab, wobei die Anstiege bedeutender sein können, wenn das natürliche Einzugsgebiet im Vergleich zu den städtischen Gebieten kleiner ist. Eine systematische Untersuchung entsprechender Einzugsgebietenkonfigurationen ist geplant.

## *Interaction of torrential and urban catchments –*

*Pros and cons of storm sewer retentions*

### **Abstract:**

*The design of retention measures in urban sewer systems are well known, but – with regard of the hydraulic design of retention basins – the runoff from urban and torrential catchments is often considered independent due to the – in many cases – faster response from urbanized areas. To reduce the peak flows from the urban area at an economically feasible level is the main goal. In general, this argument does not lack logic but is far from being evidenced. Situations, where the urban peak discharge is reduced (which is positive) but as well delayed bear the risk that peak discharges (urban and torrent) superposition to an increased total discharge in the torrent. Purpose of this work is to investigate the dynamic interaction between an urban and a torrential catchment. The aim is to test, if reducing the urban peak discharge leads to an overall reduction of the peak flow for different situations.*

*Two models, describing the rainfall runoff generation from torrent and urban catchments were coupled and run sequentially. A systematic variation of spatial rainfall distributions and simulation allowed evaluating the situation in a generalized way. Simulations have been made with and without the retention basin between urban and torrential catchment. Although the urban catchment, which is retained via the basin was small compared to the overall catchment (1:40), a clearly visible increase of peak flows was found in some cases. Combinations of rainfall situation in the different catchment parts leading to increased peak discharges were identified. The magnitudes of increases found for this catchment situation were small, however less impact was aimed for. Still, for cases with smaller torrential catchments compared to the urban parts, increases can be even more significant. Thus, future steps will as well include the assessment of different catchment configurations.*

### **Keywords:**

*Design rainfall,  
hydrograph superposition,  
retention basin,  
torrent hydrology,  
urban hydrology*

## Einleitung

Urbane Gebiete, in oder in unmittelbarer Nähe von Wildbacheinzugsgebieten, können sich auf das Abflussverhalten derselben auswirken. Durch den in der Regel höheren Versiegelungsgrad im städtischen Gebiet kann es zu einem erheblichen Beitrag zum natürlichen Abfluss kommen. Künftiges Bevölkerungswachstum und damit verbundene Landnutzungsänderungen verstärken die Auswirkungen zusätzlich. Der Status quo ist, dass Rückhaltebecken zur Retention von Siedlungsabflüssen realisiert werden, die auf das Stadtgebiet und die Verringerung der daraus resultierenden Abflussspitzen abzielen. Oft gilt das Konzept "je größer desto besser", wobei tatsächliche Wechselwirkungen mit den flussabwärts gelegenen Vorflutern selten berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass Abflüsse aus natürlichen Systemen zeitlich entkoppelt sind, zumindest was das Auftreten von Abflussspitzen betrifft. In diesem Zusammenhang sind auch die sehr unterschiedlichen Größenordnungen von anzusetzenden Bemessungsniederschlägen zu sehen (Wiedner et al. 2020). Bei Anwendungen im Siedlungsbereich sind in der Regel Wiederkehrzeiten für Kanalbemessung und Überstaunachweis zwischen 1 und 10 Jahren vorgeschrieben, basierend auf Risikoabwägungen sowie aus gewässerökologischen Gesichtspunkten. Bemessungsereignisse mit Wiederkehrzeiten zwischen 20 und 100 Jahren sind im Urbanbereich zum Nachweis der Überflutungssicherheit und bei Hangwässern angedacht. Das Schutzziel mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren ist im Rahmen der technischen Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung (RIWA-T 2016) sowie der OIB-Richtlinie 3 (2019) definiert. In der Wildbachverbauung kommen auch höhere Wiederkehrzeiten zwischen 100 und 150 Jahren zur Anwendung. Rückhaltebecken für urbane

Gebiete befinden sich dabei an der Schnittstelle zwischen Siedlungsbereich und natürlichem Wildbacheinzugsgebiet mit jeweils unterschiedlichen Vorgaben zur Bemessung. Eine Argumentation die Teilflächen trotzdem entkoppelt zu betrachten ist der oft raschere Wellenablauf in urbanen Gebieten, sodass Maxima bereits vor dem Eintreffen der maximalen Abflüsse aus Wildbacheinzugsgebieten überschritten sein können (Sartor, 1998). In der hier vorgestellten Arbeit sollen diese Annahmen für alpine Situationen überprüft werden. Das Ziel ist es, einen ersten Schritt zur Entwicklung eines ganzheitlichen Bemessungsansatzes zu machen, der die Interaktion zwischen Wildbach und städtischem Abfluss gleichzeitig berücksichtigt. In Situationen, in denen der städtische Spitzenabfluss reduziert wird (was positiv ist), wird er aber auch verzögert, was das Risiko birgt, dass sich die Spitzenabflüsse (städtisch und Wildbach) zu einem erhöhten Gesamtabfluss überlagern. Daher liegt der Schwerpunkt auf der Bewertung der resultierenden Spitzenabflüsse unter Berücksichtigung von Situationen mit oder ohne Rückhaltebecken (gedrosselter Abfluss und Überlauf) in stromabwärts gelegenen städtischen Einzugsgebieten. Das Zusammenspiel von Wildbach und städtischem Abfluss wird anhand einer Fallstudie in Tirol untersucht. Die untersuchten Szenarien beruhen auf einem gekoppelten Modellansatz bestehend aus zwei hydrologischen/hydrodynamischen Modellen des (i) Wildbaches und (ii) des Urbanraums samt Kanalisationssystem. Bemessungsereignisse unterschiedlicher Intensität und Dauer in den Teilgebieten dienen dazu, das Verhalten bei realen, räumlich verteilten Niederschlagsereignissen nachzubilden. Unterschiedliche Einzugsgebietseigenschaften wie Größe, Ausdehnung, Gefälle, Abflussbeiwerte oder Abflussbereitschaft spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, werden hier aber nicht näher untersucht.

## Beschreibung des Einzugsgebiets

In der Fallstudie wird die Gemeinde Götzens (Tirol, Österreich) zusammen mit dem Wildbacheinzugsgebiet Geroldsbach betrachtet. Südlich von Innsbruck, im westlichen Mittelgebirge gelegen hat Götzens 4.138 Einwohner (Stand 01. Jan. 2021) bei einer Gesamtfläche des Gemeindegebietes von 9,72 Quadratkilometern. Das gesamte betrachtete Einzugsgebiet besteht aus den Wildbacheinzugsgebieten Geroldsbach (12 km<sup>2</sup>) und Marchbach (1,2 km<sup>2</sup>) sowie aus zwei Teilgebieten des städtischen Einzugsgebiets (Götzens und Neu-Götzens) im flussabwärts gelegenen Teil (siehe Abbildung 1).

Neu-Götzens ist Teil der Gemeinde Götzens mit teilweise Industrie- und neuem Sied-

lungsgebiet. Für Neu-Götzens (22 Hektar) besteht der Plan im Zuge der Erneuerung des bestehenden Entwässerungsnetzes von einer Misch- auf eine Trennkanalisation umzustellen, wobei die Abflüsse in die Vorfluter der beiden Wildbacheinzugsgebiete münden. Die diesen Untersuchungen zugrundeliegende Planung sieht die Rückhaltung des Siedlungsabflusses mit einem Becken (Fassungsvermögen: 1.600 Kubikmeter) vor. Das Wildbacheinzugsgebiet Geroldsbach befindet sich oberhalb der Ortschaft Götzens (868 m.ü.A.). Er entspringt in einer Höhe von 1920 m.ü.A. in der Nähe des Birgitzköpfls und wird im oberen Bereich von der Nockspitze (Saile; 2404 m.ü.M.) und vom Birgitzköpfl (1982 m.ü.A.) eingerahmt. Die Gesamtlänge des Haupteinzugsgebiets des Wildbachs beträgt 8 km, wobei der Geroldsbach nach 9,4 km in den Inn mündet. Auf seinem Weg münden in den Bach mehrere kleine Nebenbäche und Zuflüsse, wie Gehrbach, Großer Blaikenbach, Tödersbach, Kirchbach, Horachbach und Marchbach und einige andere (namenlose) Gerinne. Der mittlere Jahresniederschlag im Einzugsgebiet liegt zwischen 820 und 900 mm (1981–2010).

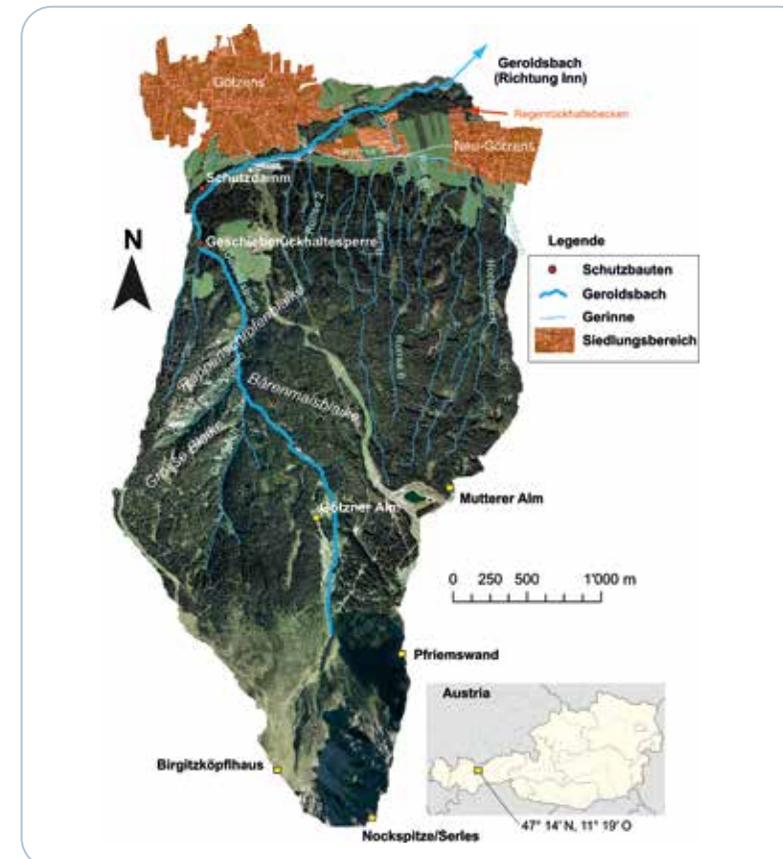


Abbildung 1:  
Übersichtskarte ÖK 200  
(©BEV) mit Lage der Gemeinde  
und der hauptbetroffenen  
Einzugsgebiete.

Figure 1:  
Overview map ÖK 200  
(©BEV)  
according to location of the  
community and mainly affected  
catchment areas.

## Methoden

### Software ZEMOKOST

Das am BFW (Bundesamt und Forschungszentrum für Wald) entwickelte Modell ZEMOKOST ist ein in Österreich gängiges Niederschlags/Abfluss-Modell für die Bemessung von unbeobachteten Wildbacheinzugsgebieten (Kohl, 2011). Grundlage ist die numerische Beschreibung von Abflussprozessen einschließlich der Abflussbildung und den Konzentrationsprozessen. Die Parametrisierung der zugrundeliegenden Gleichungen stützt sich stark auf die gleichzeitig entwickelten Methoden zur Ermittlung von Oberflächenabflusskoeffizienten für alpine Boden-Vegetationseinheiten (Markart et al., 2004). Die entwickelten Methoden und Klassifizierungen basieren auf über 800 Niederschlagsexperimenten im Feld und erlauben die Beschreibung der Abflussprozesse im Hinblick auf Anfangs- und Dauerverluste sowie den Routingprozess an der Oberfläche. Die Methoden sind speziell für Wildbachgebiete konzipiert, in denen keine Pegelmessungen vorhanden sind. Technisch basiert die Software auf Visual Basic und ist in MS EXCEL eingebettet.

### Software Storm Water Management Model (SWMM)

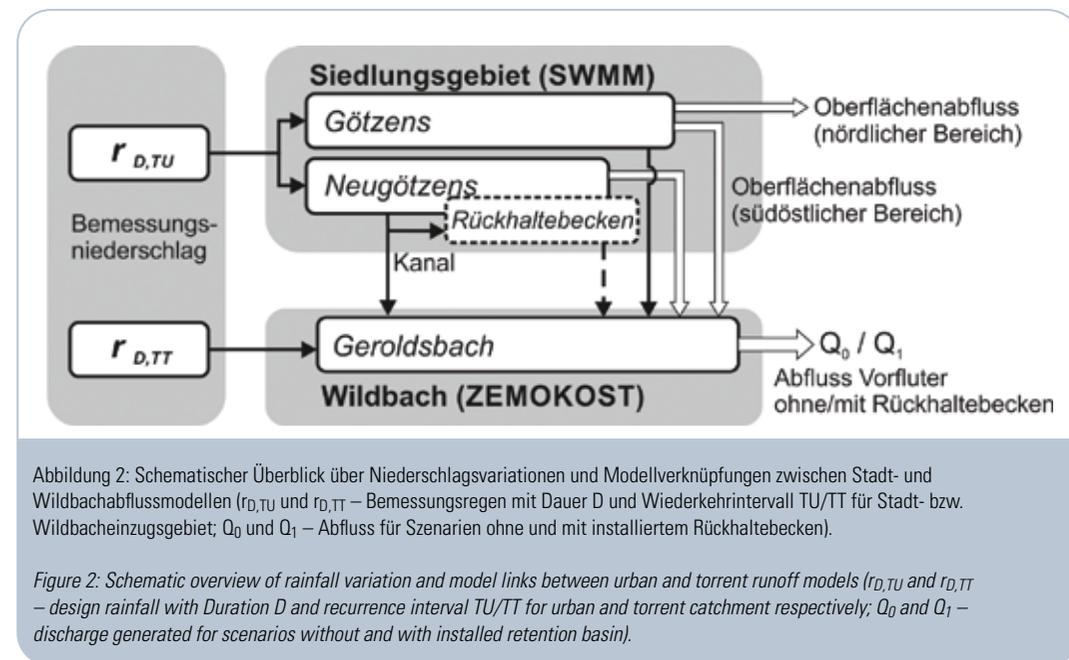
Für die Modellierung des städtischen Abflusses, einschließlich der Kanalisation, wird die Software SWMM 5.1 (Rossman, 2016) verwendet. Diese Software wird von der US-EPA seit 1969 entwickelt. Bis heute spielt SWMM eine wichtige Rolle in der hydrodynamischen Modellierung von Abflussmenge und -qualität in urbanisierten Einzugsgebieten. Das hydrologisch-hydraulische Wasserqualitätsmodell wird für die Planung, Analyse und Bemessung von Misch- und Trennsystemen verwendet (Rossman, 2015) und kann entweder ereignisbasiert oder für Langzeitsimulationen

zum Einsatz kommen. Die hydrologischen Komponenten bilden Teileinzugsgebiete des Gebiets ab, wobei neben dem Oberflächenabfluss auch einfache Modellansätze für Grundwasserleiter oder Schnee nutzbar sind (Rossman, 2016). Die Abflusskonzentration im Gebiet basiert auf einer detaillierten Abbildung des Kanalsystems und auch von Sonderbauwerken. Die Simulation der Rohrleitungskomponenten basiert dabei auf der Lösung der eindimensionalen Saint-Venant Strömungsgleichungen. Knotenbasiert werden Verzweigungen, Zu- und Abflüsse, Verteiler und Speicher erfasst. Pumpen, Blenden, Wehre und Auslässe werden, analog zu den Rohrleitungselementen, als Haltungen zwischen den Knotenpunkten realisiert.

### Modellstruktur und Kopplung

Die untersuchten Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der aufgebrachten Niederschläge (Eintrittswahrscheinlichkeit und Dauer), die eine Approximation unterschiedlicher räumlicher Niederschlagsverteilungen darstellen. Der Modellierungsansatz umfasst (a) die hydrodynamische Modellierung des städtischen Entwässerungsnetzes, (b) die hydrologische Modellierung des gesamten Wildbacheinzugsgebietes und (c) unterschiedlich (hydraulisch) dimensionierte Rückhaltebeckenvarianten. Rechenläufe ohne Berücksichtigung des Rückhaltebeckens dienen als Vergleich.

Dazu werden die Modelle sequenziell gekoppelt betrieben (siehe Abbildung 2). Der Modellaufbau berücksichtigt Abflüsse aus den städtischen Einzugsgebieten, die in den Vorfluter Geroldsbach über (a) die Kanalisation oder (b) den Oberflächenabfluss aus den städtischen Gebieten gelangen. Innerhalb von (a) werden die Abflüsse, die über die Drossel oder das Überlaufwehr des Rückhaltebeckens eintreten, erfasst. Der



Oberflächenabfluss im Stadtgebiet (b) berücksichtigt die im Kanalsystem nicht abführbaren Wassermengen (Überstau an Schächten). Die Überstauungen im nördlichen Teil des Siedlungsgebiets gelangen aufgrund der Topographie nicht in den Vorfluter. Die übrigen Oberflächenabflüsse (Süd/Ostbereich) werden räumlich verteilt erfasst, an das ZEMOKOST-Modell übergeben und dort verzögert zum Vorfluter abgeleitet. Damit erfolgt eine Überlagerung der Abflusskomponenten auch mit Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik.

### Modell Setup und Kalibrierung ZEMOKOST

Der Aufbau des Modells erfordert verschiedene Parameter die das Verhalten des Einzugsgebiets beschreiben. Die Quantifizierung dieser Parameter erfolgt durch eine Kombination aus GIS-Analyse und intensiver Feldarbeit. Als Datengrundlage wurden Luftbilder und ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 1 m (Quelle: Amt der Tiroler Landesregierung) verwendet. Für die Einschätzung der wichtigsten Parameter wie

Oberflächenabfluss und Rauigkeitskoeffizient ist eine Feldbegehung unerlässlich. Das Einzugsgebiet wird in mehrere Teileinzugsgebiete unterteilt und mit Zu- und Ablaufknoten verbunden. Die Gliederung des Einzugsgebiets hängt von der betrachteten Fläche und der gewünschten Genauigkeit ab. In Anbetracht der Größe des Einzugsgebiets und der Modellaufgabe wurde eine detaillierte Auflösung der Teileinzugsgebiete gewählt. Das Einzugsgebiet umfasst 105 Teilgebiete, um alle homogenen hydrologischen Einheiten und markanten Punkte abzudecken. Zu Beginn wird das Luftbild verwendet, um initial hydrologische Einheiten mit gleichem Abflussverhalten zu identifizieren und abzugrenzen. Die Definition der aufgeführten hydrologischen Reaktionseinheiten erfolgt nach Markart et al. (2004). Eine weitere Abgrenzung wird durch die Verwendung der Waldtypisierung Tirol ermöglicht, die vom Amt der Tiroler Landesregierung zur Verfügung gestellt wird. Mittels Feldaufnahmen wurden die Einheiten und deren Bewertung verifiziert.

### Modell Setup und Kalibrierung SWMM

Das Entwässerungssystem von Götzens besteht aus Misch- und Trennkanalisation zur Abfuhr von Schmutz- und Regenwasser. Das Modell des Götzener Kanalnetzes (Abbildung 3) umfasst 160 Teileinzugsgebiete, 495 Knotenpunkte (Schächte und Sonderbauwerke) mit insgesamt 497 Haltungen. Das Wasser wird je nach Lage der Teileinzugsgebiete zu einer der drei Einleitungsstellen in den Vorfluter transportiert. Der Mischwasserüberlauf ist dabei in SWMM als Wehrüberfall realisiert. Das Kanalsystem von Neu-Götzens, wurde ursprünglich vor ca. 60 Jahren von Anrainern

privat errichtet und soll im Zuge einer Sanierung auf ein Trennsystem umgestellt werden. Dazu ist die Errichtung eines Regenrückhaltebeckens geplant. Das Becken wurde in diesen Untersuchungen entsprechend dem Planungsstand mit rund 1.600 m<sup>3</sup> Volumen und einer gedrosselten Abgabe in den Vorfluter berücksichtigt. Das Kanalsystem Neu-Götzens umfasst 235 Knotenpunkte, 236 Haltungen/Kanäle und 38 Teileinzugsgebiete. Für die Kalibrierung des SWMM-Modells in Götzens stand eine Messkampagne zur Verfügung, die Zeitreihen eines mobilen Regenschreibers und Abflussmessungen umfasst (Kinzel, 2015). Die Kalibriergüte zwischen simu-

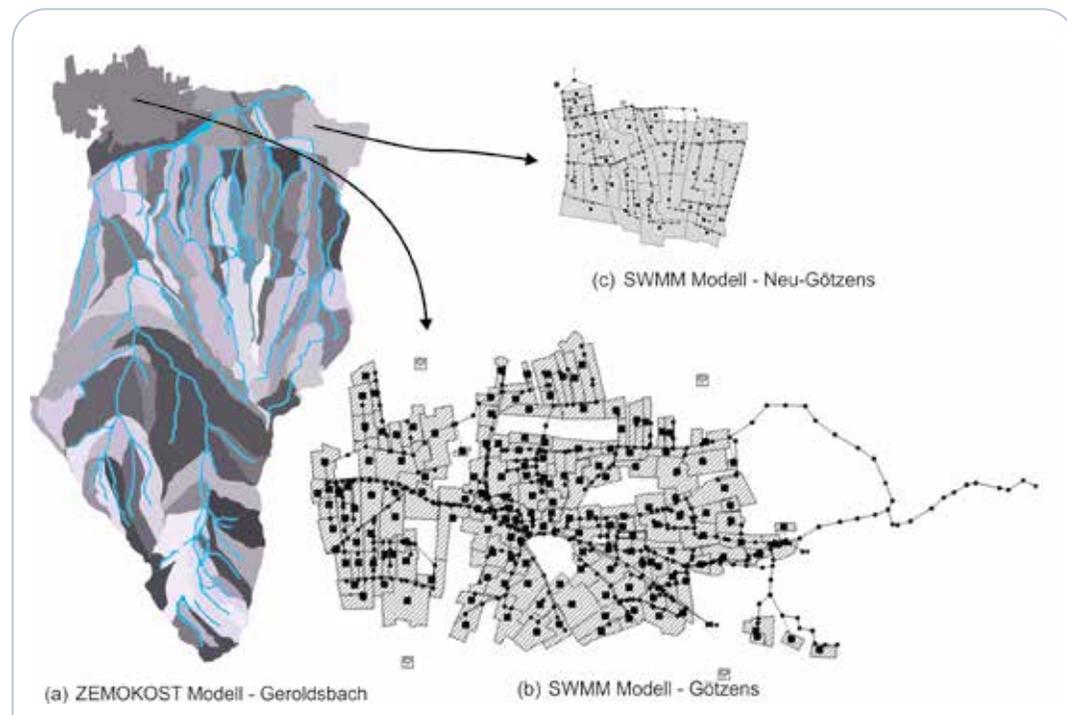


Abbildung 3: Modellaufbau und Diskretisierung des (a) Wildbach-ZEMOKOST-Modells und der städtischen SWMM-Modelle für (b) Götzens und (c) Neu-Götzens.

Figure 3: Model setup and discretization of the (a) Torrent-ZEMOKOST Model and urban SWMM Models for (b) Götzens and (c) Neu-Götzens.

lierten und beobachteten Einzelereignissen zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit Nash-Sutcliffe-Koeffizienten (NSE) von bis zu 0,951. Ebenso zeigte die Betrachtung mehrerer Monate eine entsprechende gute Übereinstimmung mit NSE-Werten von bis zu 0,926.

### Räumliche Variation der Niederschlagsmenge

Hier wurden die in Österreich vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) zur Verfügung gestellten Bemessungsniederschläge (Weilguni, 2009) genutzt. Konkret kamen die für Bemessungszwecke empfohlenen gewichteten Mittelwerte zur Anwendung.

In Tabelle 1 sind die Bemessungsregensummen (P[mm]) für verschiedene Wiederkehrintervalle (T[a]) und Dauerstufen (D[min]) dar-

gestellt. Im Hinblick auf die zeitliche Verteilung wird in dieser Studie der Blockregen verwendet. Weiters wurde auf Grund der Kleinräumigkeit keine flächenhafte, räumliche Reduktion der Niederschlagsintensität angewandt.

### Resultate

Das gekoppelte ZEMOKOST-SWMM Modell wurde systematisch mit Kombinationen unterschiedlicher Bemessungsregen beaufschlagt. Für unterschiedliche Dauerstufen D, die in allen Einzugsgebietsteilen gleich gehalten werden, wurden die Intensitäten der Niederschläge variiert. Je untersuchter Dauerstufe wurden für die Kombination unterschiedlicher Wiederkehrzeiten 18x18 (324) Simulationen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt ausgewählte Ergebnisse für die Dauerstufen D = 30, 60, 120 und 180 min.

T[a]	1	10	30	100	150
D[min]	P[mm]	P[mm]	P[mm]	P[mm]	P[mm]
30	14,7	39,4	51,0	63,6	67,9
60	18,2	47,7	61,6	76,5	81,6
120	22,3	55,2	70,5	87,1	92,8
180	25,1	59,6	75,9	93,4	99,4
240	27,4	63,2	80,2	98,7	105,0

Tabelle 1: Bemessungsregen für das Einzugsgebiet Geroldsbach/Götzens.

Table 1: Design rainfall applied for the catchment Geroldsbach/Götzens.

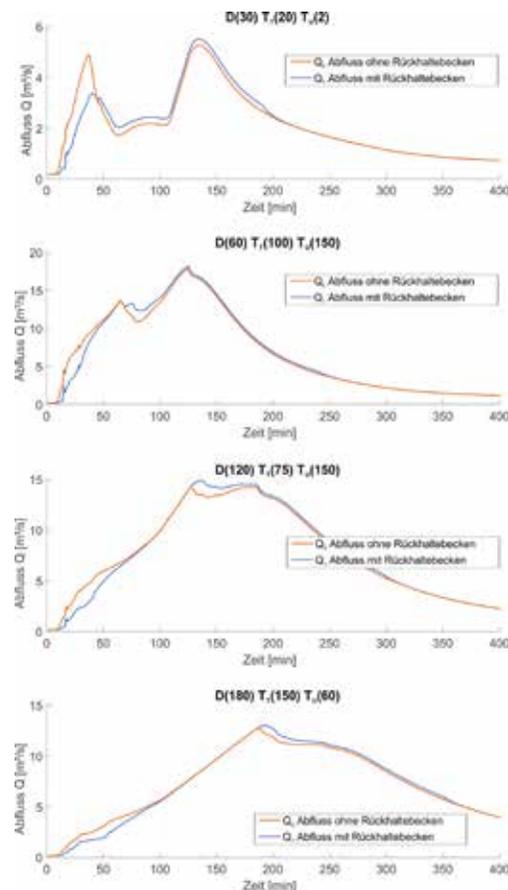


Abbildung 4: Ganglinie des Gesamtabflusses im Geroldsbach für die Dauerstufen  $D = 30, 60, 120$  und  $180$  Minuten; die gewählten Szenarien führen zu einer ungünstigen Kombination durch einen erhöhten Spitzenabfluss im Falle eines eingebauten Rückhaltebeckens.  $Q_0$  = ohne RHB;  $Q_1$  = mit RHB

Figure 4: Hydrograph of the total discharge in the torrent Geroldsbach for Durations  $D = 30, 60, 120$  and  $180$  minutes; the given scenarios of combined recurrence interval represent adverse combination, increasing the peak discharge in case of an installed retention basin.  $Q_0$  = without RB;  $Q_1$  = with RB

$Q_0$  und  $Q_1$  sind darin die Abflussganglinien für Szenarien ohne und mit einem Rückhaltebecken. Bei den bewusst gewählten Beispielen führt die Implementierung des Regenrückhaltebeckens dazu, dass sich im Gesamtabfluss eine verzögerte aber erhöhte Abflussspitze ergibt.

Die Differenzen der jeweiligen Spitzenabflüsse ( $Q_{0,p}$  und  $Q_{1,p}$ ) werden für alle Szenarien berechnet, um im Überblick aller Berechnungen zu prüfen, ob und wann die Gesamtabflussspitze zunimmt oder nicht. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse von Simulationen für die Bemessungsregen von 60 und 120 Minuten.

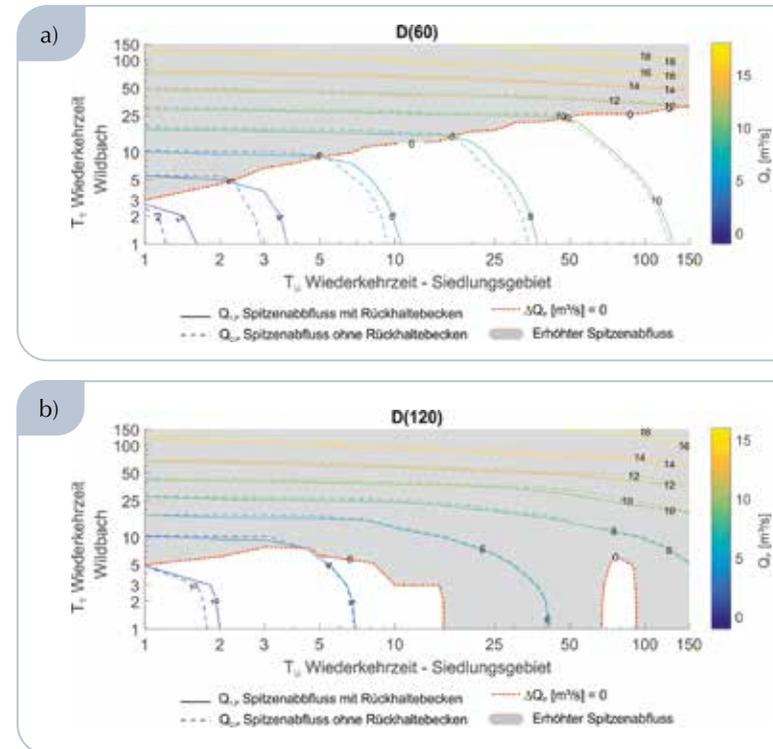


Abbildung 5: Konturdiagramm der Spitzenabflüsse ( $Q_{0,p}$ ,  $Q_{1,p}$ ) für eine Dauer von (a)  $D = 60$  min und (b)  $D = 120$  min, die aus der Simulation mit und ohne Rückhaltebecken ( $Q_1$  und  $Q_0$ ) gewonnen wurden. Die X- und Y-Achse markieren die verschiedenen Kombinationen des Wiederholungsintervalls des Bemessungsregenfalls im städtischen Einzugsgebiet bzw. im Wildbacheinzugsgebiet.

Figure 5: Contour plot of peak discharges ( $Q_{0,p}$ ,  $Q_{1,p}$ ) for a duration of (a)  $D = 60$  min and (b)  $D = 120$  min obtained from simulation with and without a retention basin installed ( $Q_1$  and  $Q_0$ ). X and Y Axis mark the different combinations of the recurrence interval of the design rainfall applied in the urban and torrent catchment respectively.

Auf der Abszisse und Ordinate sind die Wiederkehrzeiten der Niederschlagsmengen im Urbanraum bzw. Wildbach aufgetragen. Die für die einzelnen Rechenläufe ermittelten Spitzenabflüsse sind als Konturlinien mit gleichen Abflüssen zusammengefasst dargestellt. Rechenläufe mit bzw. ohne Berücksichtigung des Regenrückhaltebeckens wurden durchgezogen bzw. strichliert dargestellt. Die Richtung und Größe des Versatzes zwischen den Linien ist dabei der Indikator für einer Reduktion oder Erhöhung des Spitzenabflusses. Ist die Konturlinie aus der Simulation ohne Rückhaltebecken im Vergleich zum Fall mit Rückhaltebecken nach rechts oben verschoben, bedeutet dies eine Zunahme des Spitzenabflusses. Zur leichteren Lesbarkeit wurden Bereiche in denen es zu einem Anstieg der Spitzenabflüsse kommt, grau hinterlegt. Die rot gestrichelte Kurve stellt den Übergang dar. Für die Niederschlagsdauer  $D = 60$  min sind bei einigen räumlichen Niederschlagskombinationen

positive hydraulische Auswirkungen mit einer Verringerung der Spitzenabflüsse zu erkennen. In weiten Bereichen (grau) kommt es jedoch zu Anstiegen im Spitzenabfluss. Reduktionen der Spitzenabflüsse sind vor allem in Bereichen niedriger Wiederkehrzeiten zu sehen. Bei höheren Wiederkehrzeiten finden sich oftmals erhöhte Spitzenabflüsse.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Dauerstufe  $D = 120$  min. Die Kombinationen, bei denen ein Anstieg des Spitzenflusses auftritt, werden häufiger. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die absoluten Beträge der Verschiebungen im Vergleich zu den absoluten Spitzenabflüssen gering sind. In Abbildung 6a und 6b sind die absoluten Differenzen zwischen den Scheitelabflüssen ( $\Delta Q_p = Q_{0,p} - Q_{1,p}$ ) für verschiedene Wiederholungsintervalle ( $T_U$ ,  $T_T$ ) der Niederschläge im städtischen und Wildbacheinzugsgebiet dargestellt. In den Szenarien mit  $D = 120$  Minuten steigen die Scheitelabflüsse um höchstens  $0,6 m^3/s$ .

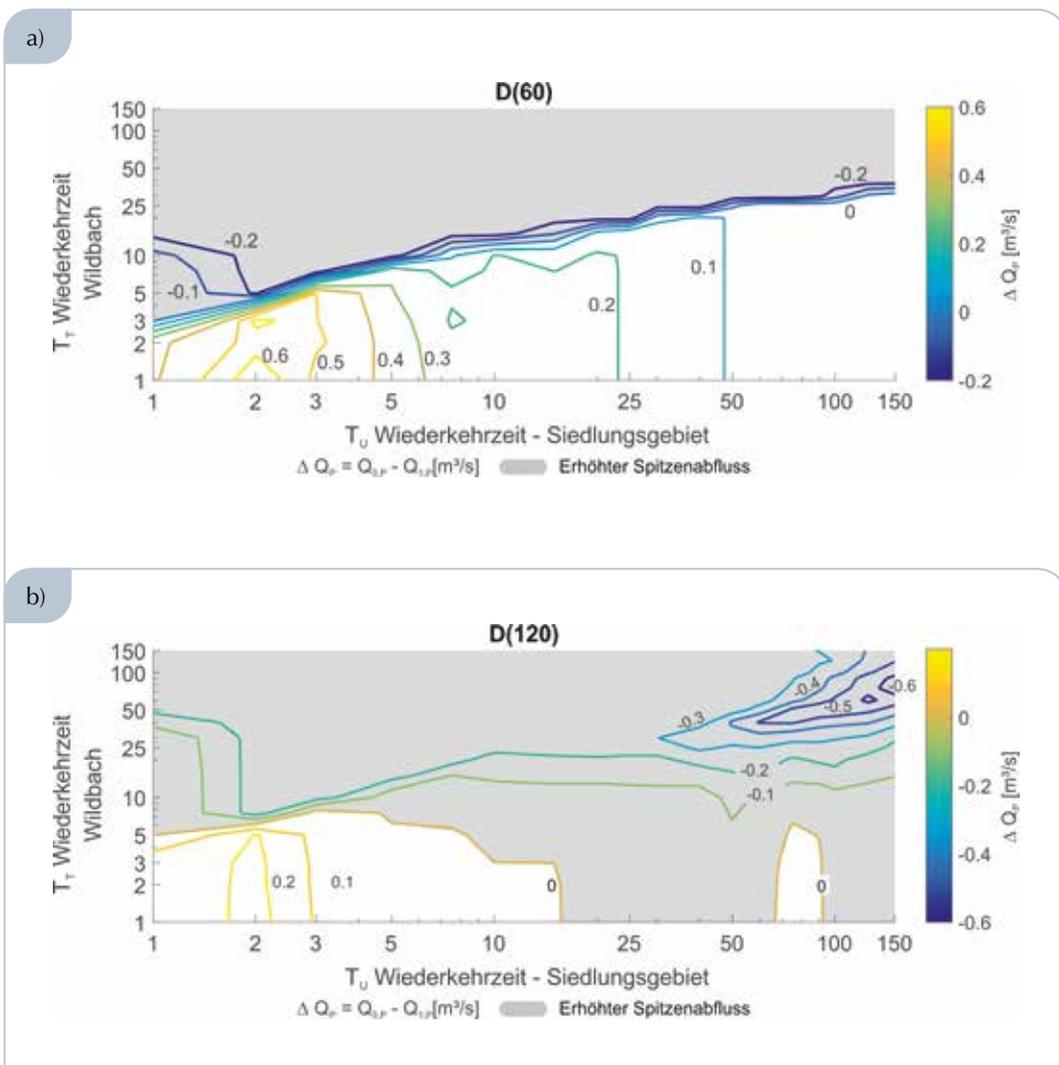


Abbildung 6: Konturdiagramm der Differenzen im Spitzenabfluss ( $\Delta Q_p = Q_{0,p} - Q_{1,p}$ ) für eine Dauer von (a)  $D = 60$  min und (b)  $D = 120$  min, die aus der Simulation mit und ohne Rückhaltebecken ( $Q_1$  und  $Q_0$ ) gewonnen wurden. Die X- und Y-Achse markieren die verschiedenen Kombinationen des Wiederholungsintervalls ( $T_U, T_T$ ) des Bemessungsregenfalls im städtischen bzw. im Wildbacheinzugsgebiet.

Figure 6: Contour plot of peak discharges ( $\Delta Q_p = Q_{0,p} - Q_{1,p}$ ) for a duration of (a)  $D = 60$  min and (b)  $D = 120$  min obtained from simulation with and without a retention basin installed ( $Q_1$  and  $Q_0$ ). X and Y Axis mark the different combinations of the recurrence interval ( $T_U, T_T$ ) of the design rainfall applied in the urban and torrent catchment respectively.

In Tabelle 2 sind Szenarien zusammengefasst, bei welchen die maximale bzw. minimale Änderung in der Abflussspitze auftritt. Die größte Erhöhung

wird für die Dauerstufe 120 Minuten festgestellt und es kommt zu einem Anstieg des Spitzenabflusses von ca. 5 %.

D	$Q_{1,P}$	$Q_{0,P}$	$\Delta Q_{P,MAX}$	$T_T$	$T_U$	$\Delta Q/Q_{0,P}$	$Q_{1,P}$	$Q_{0,P}$	$\Delta Q_{P,MIN}$	$T_T$	$T_U$	$\Delta Q/Q_{0,P}$
[min]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[a]	[a]	[%]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[a]	[a]	[%]
15	4.17	7.93	3.77	5	7.5	47	3.48	3.47	-0.01	150	1	0
30	4.22	5.94	1.71	1	5	29	5.50	5.26	-0.25	20	2	-5
60	2.44	3.12	0.68	1	2	22	18.18	17.90	-0.28	100	150	-2
90	2.30	2.65	0.36	1	2	13	9.61	9.28	-0.34	20	50	-4
120	2.01	2.24	0.23	1	2	10	14.89	14.23	-0.66	75	150	-5
180	1.52	1.71	0.19	1	2	11	12.99	12.73	-0.26	150	60	-2
240	1.21	1.39	0.17	1	2	13	5.81	5.56	-0.25	90	2	-4
360	1.20	1.30	0.10	1	3	8	5.48	5.44	-0.04	150	25	-1

$Q_{0,p}$  ... Spitzenabfluss ohne Rückhaltebecken  
 $Q_{1,p}$  ... Spitzenabfluss mit Rückhaltebecken  
 $\Delta Q_p$  ... Anstieg/Reduktion des Spitzenabflusses  
 $T_T$  ... Wiederkehrzeit (Wildbach)  
 $T_U$  ... Wiederkehrzeit (Siedlungsgebiet)  
 $D$  ... Dauerstufe des Bemessungsniederschlags

Tabelle 2: Spitzendurchflüsse ( $Q_{0,p}$ ,  $Q_{1,p}$ ) mit minimaler und maximaler Reduktion  $\Delta Q$  bei verschiedenen Ereignisdauern  $D$ .

Table 2: Peak flows ( $Q_{0,p}$ ,  $Q_{1,p}$ ) with minimum and maximum reduction  $\Delta Q$  at different event durations  $D$ .

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Das gängige Argument, dass die Rückhaltung von Abflüssen eine allgemein positive Maßnahme zur Verringerung von Spitzenabflüssen ist, wurde untersucht. Es wird meist davon ausgegangen, dass das schnellere Ansprechen der Scheitelabflüsse aus städtischen Gebieten vorüber ist, bevor der maximale Abfluss aus dem Wildbacheinzugsgebiet eintrifft. Daher sollte die Hochwasserspitze im Wildbacheinzugsgebiet nicht durch das städtische Einzugsgebiet erhöht werden. Obwohl diese Argumentation in gewisser Weise logisch ist, trifft

sie nicht in allen Fällen zu. Die Rückhaltung von Abflüssen und die Berücksichtigung der Dynamik eines Rückhaltebeckens machen die Situation komplexer. Es wurden die Intensität und Dauer von Niederschlägen systematisch variiert, um die Auswirkungen realer Niederschlagsereignisse mit einer spezifischen räumlichen Verteilung des Niederschlags nachzuahmen. Zweifellos verringert das Rückhaltebecken den Spitzenabfluss des städtischen Einzugsgebiets. Zugleich verzögert das Einzugsgebiet die Ganglinie. Wenn die Spitzenabflüsse des Wildbachs und des städtischen Einzugsgebiets durch die Verzögerung zusammentreffen, erhöht sich der Gesamtabfluss im Ver-

gleich zur Situation ohne Rückhaltung. In dieser Fallstudie wird nachgewiesen, dass ein solcher negativer Rückhalteeffekt auf den aufnehmenden Wildbach in besonderen Fällen auftreten kann. In dieser Fallstudie wurden jedoch nur geringe Auswirkungen mit einer maximalen Erhöhung von 5 % festgestellt. Wenn man bedenkt, dass nur eine kleine Fläche (22 Hektar) im Vergleich zum gesamten Einzugsgebiet (8 km<sup>2</sup>) zurückgehalten wurde, sind die festgestellten Erhöhungen dennoch bemerkenswert. Die Ergebnisse der Fallstudie berücksichtigt tatsächlich projektierte Kenngrößen (Volumen, Drosselung, ...) des Rückhaltebeckens. Diese, als auch generelle Einzugsgebietseigenschaften, wie Einzugsgebietsgrößen (Wildbach und Urbanraum), Form, Ausrichtung, Gefälle, Versiegelungsgrad etc. spielen eine wichtige Rolle und sollen weiter untersucht werden. Die hier gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass andere Konstellationen, wie z.B. ein geringeres Verhältnis zwischen Wildbach- und städtischer Einzugsgebietsgröße, zu noch höheren Anstiegen des Spitzenabflusses führen können. Anpassungen bei den Bemessungskriterien von Rückhaltebecken könnten sinnvoll sein. Zusätzlich sind Effekte durch reale Niederschlagsituationen, wie zeitlich und räumlich verteilte Niederschlagseinträge zu berücksichtigen.

#### **Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:**

Assoz. Prof. Dipl. Ing. Dr. Stefan Achleitner  
Arbeitsbereich für Wasserbau,  
Universität Innsbruck  
Technikerstrasse 13, 6020 Innsbruck  
stefan.achleitner@uibk.ac.at

DI Benjamin Kammereck  
Tandler.com Gmbh  
Am Griesberg 25–27, D-84172 Buch am Erlbach  
Benjamin.Kammereck@tandler.com

Prof. Dipl. Ing. Dr. Robert Sitzenfrei  
Arbeitsbereich für Umwelttechnik,  
Universität Innsbruck  
Technikerstrasse 13, 6020 Innsbruck  
robert.sitzenfrei@uibk.ac.at

MR Mag. Dr. Bernhard Kohl  
Bundesforschungszentrum für Wald  
Rennweg 1, Hofburg, 6020 Innsbruck  
bernhard.kohl@bfw.gv.at

DI Leopold Stepanek  
Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawin-  
nenverbauung, Gblt. Mittleres Inntal  
Josef Wilberger Straße 41, 6020 Innsbruck  
leopold.stepanek@die-wildbach.at

#### **Danksagung/ Acknowledgement:**

Die Autoren danken für die Unterstützung durch die Gemeinde Götzens sowie das Horizon 2020 Projekt RECONNECT (Regenerating ECOSystems with Nature-based solutions for hydro-meteorological risk rEduCTion) unter der Grant Agreement Nr. 776866.

*The authors acknowledge the support received from the municipality of Götzens and the Horizon 2020 RECONNECT (Regenerating ECOSystems with Nature-based solutions for hydro-meteorological risk rEduCTion) project, under the Grant Agreement No. 776866.*

#### **Literatur/References:**

KINZEL, C. (2015). Messkampagne ABA Götzens, Report. Unit of Environmental Engineering, Institute of Infrastructure, Faculty of Engineering Science, University of Innsbruck

KOHL, B. (2011). Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten; Doktorarbeit, Universität Innsbruck.

MARKART, G., KOHL, B., SOTIER, B., SCHAUER, T., BUNZA, G. AND STERN, R. (2004). Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0); A Simple Code of Practice for the Assessment of Surface Runoff Coefficients for Alpine Soil- Vegetation Units in Torrential Rain (Version 1.0), Report BFW-Dokumentation; Schriftenreihe des Bundesamtes und Forschungszentrums für Wald, Wien, 2004, Nr. 3, 88 S., ISSN 1811- 3044

OIB-Richtlinie 3 (2019): Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, OIB-330.3-007/19, Richtlinie des österreichischen Instituts für Bautechnik, Stand April 2019.

ÖNORM EN 752 (2017): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2017.

ÖWAV-RB 11 (2009): ÖWAV-Regelblatt 11, Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen. 2., vollständig überarbeitete Auflage, ÖWAV (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband), Wien, 2009.

RIWA-T (2016). Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung RIWA-T, gemäß § 3 ABS 2 WBFG idF 2016, GZ: UW.3.3.3/0028-IV/6/2015

ROSSMAN, L. (2015). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 - manual. US EPA Office of Research and Development.

ROSSMAN, L. (2016). Storm Water Management Model, Reference Manual, Volume 1 – Hydrology (Revised). US EPA Office of Research and Development.

SARTOR J. (1998): Die gleichzeitige Auftrittswahrscheinlichkeit hoher Abflüsse in Kanalisationsnetzen und Fließgewässern. Wasser und Boden, 8 24–28.

WEILGUNI, V. (2009): Bemessungsniederschläge in Österreich. In: Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser – Gewässer, Band 216 Hochwässer: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage. Hrsg: G. Blöschl, Technische Universität Wien, S. 71-84.

WIEDNER, J., GOBIET, A., LEIDINGER, D., PISTOTNIK, G., STROMMER, G., ACHLEITNER, S., BLÖSCHL, G., GÜNTHER, M., MEHLHORN, S., MUSCHALLA, D., UNTERWAINI, M., HORNICH, R., ANKOWITSCH, A., HUBER, H., NEUHOLD, C., SEHER, W., RAUHLATNER, P., FALKENSTEINER, P., HAIDER, S., HASLINGER, H., STARL, H. UND PAAL, W. (2020). ÖWAV-ExpertInnenpapier „Klimawandelanpassung WW – Pluviales Hochwasser/Oberflächenabfluss“ des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV), Wien September 2020



Ingenieurbüro Illmer Daniel e.U.

## Technisches Büro für Wildbach- und Lawinenschutz

Entwurf- und Einreichplanung  
Ausschreibungs- und Ausführungsplanung  
Bauaufsicht

Industriegelände Zone B27  
A-6166 Fulpmes  
Tel./Fax: +43 (0) 5225 62148  
Mobil: +43 (0)664 8831 7711  
E-Mail: office@ib-illmer.at  
Web: www.ib-illmer.at

JOHANNES MOSER, HYDROGRAPHISCHER DIENST KÄRNTEN

## Regionalisierung / Plausibilisierung von Hochwasserkennwerten kleiner Einzugsgebiete in Kärnten – Praxisorientierter Gebietsfaktoren-Katalog im Spektrum der Hochwasserstatistik

### Zusammenfassung:

Von kleinen Einzugsgebieten sind Hochwasserspitzenabflüsse gemessen an Pegeln oder von Einzelhochwässern abseits von Pegeln – rekonstruiert bzw. nachgerechnet – nur sehr rar vorhanden, sodass statistische Auswertungen von Hochwasserkennwerten ( $HQ_n$ ) lokal nur sehr ungenau bis fehleinschätzend möglich sind. Mit Hilfe von regionalhydrologischen Analysen und Informationserweiterungen können dennoch die Ergebnisse in einer standardisierten Gesamtschau deutlich verbessert werden. Anhand von 52 Pegel- und Einzelereignissen mit kleinen Einzugsgebieten wurden statistische als auch gebietsspezifische Zusammenhänge analysiert und die Ergebnisse als Katalog mit regionalen Spenden- bzw. Gebietsfaktoren für differenzierte Gebietseigenschaften zusammengestellt. Auf dieser Basis sind Übertragungen auf unbeobachtete Einzugsgebiete vereinfacht möglich. Hier sollen vordergründig die daraus resultierenden Verhältnisgrößen aufgezeigt werden, um damit für Plausibilisierungsüberlegungen abflussstatistisch bezogene Anhalte/Richtgrößen im beobachteten Spektrum aufzuzeigen. Anhand der Verhältnisgrößen soll auch deutlich werden, dass bei größeren Ereignissen ( $> HQ_{30}$ ) die Verhältnisse sehr nah

### Stichwörter:

Hochwasserstatistik,  
Hochwasserkennwerte,  
Regionalisierung,  
Plausibilisierung,  
Verhältnisgrößen

beieinanderliegen, sodass die Datenunsicherheit der Unsicherheit der statistischen Auslegung sehr nahekommt und somit praktisch zusätzlich die Devise gilt: Mut zur strategischen Festlegung der Hochwasserkennwerte mit mehr oder weniger Sicherheitszuschlägen, je nach Unsicherheit und Schadenspotenzial.

## *Methods of estimating and verifying statistical flood discharges of small catchment areas*

### **Abstract:**

*Datas of high flood events and gauging stations in small catchments are very rare. Therefore it is necessary to make regional analyses for estimating statistical flood discharges. The results of analysing 52 gauging stations and flood events with small catchments are content of a catalogue. By using the catalogue it is possible to estimate the statistical values of  $HQ_{100}$  by determining the character-categories of the ungauged catchment. The relations between the results of using different catchment-categories such as catchment-area, flow-concentration and flow-effectivity are also important for checking the contributions of the effects of different categories.*

### **Keywords:**

*Flood statistics, characteristic values of floods, regionalization, plausibility checks, proportion sizes*

## Einleitung

Statistische Hochwasserkennwerte zu ermitteln in Gebieten ohne Aufzeichnung oder anhand von Pegeln mit kurzen Beobachtungsdauern ohne größere Hochwasserereignisse oder nur anhand von vereinzelt beobachteten Hochwasserereignissen, von denen die Hochwassermengen nur recht und schlecht rekonstruiert werden können, kann so manchen Hydrologen zur Verzweiflung bringen. Es fehlt - ganz einfach und offen gesagt - an ausreichend lokalen Ereignisdaten, um statistische Auswertungen zuverlässig machen zu können.

Man kommt nicht richtig vom Fleck, wenn man den Blick nicht etwas über den Tellerand, sprich in die umliegende Region wagt.

Niederschlag-Abfluss-Modellierungen können hier Abhilfe schaffen, doch ist der Anspruch auf eine korrekte Aussage über die Jährlichkeit des Spitzenabflusses damit keineswegs größer, wenn nicht zusätzlich abflussstatistische Ergebnisse mitbetrachtet werden.

Daher kommt der breiten regionalen/überregionalen Analyse von beobachteten Hochwasserereignissen und die Übertragbarkeit auf un beobachtete Einzugsgebiete besondere Bedeutung zu. Je mehr Pegel- und beobachtete Einzelereignisse zur Analyse herangezogen werden können, umso besser sind die Größenordnungen, statistischen Zusammenhänge, aber auch die Unterschiede der hydrologischen Systeme bzw. Prozesse erkennbar.

Die Natur zeigt uns ihr sehr breites Spektrum an Ereignisgrößen und möglichen statistischen Ergebnissen. Differenziert man diese Ereignis- und Ergebnispalette nach bestimmten Kategorien, so wird das Spektrumkorsett schon deutlich enger. Pauschal nur nach der Einzugsgebietsgröße, wie im Spendendiagramm zu dif-

ferenzieren, ist eindeutig zu grobschlägig, das gleiche gilt auch für die Anwendung von vereinfachten Formeln mit der Einzugsgebietsgröße und Gebietsfaktoren  $GF_{100}$  für 100-jährliche Hochwassermengen (Gl (1)) – in Anlehnung an Wundt (1949)  $HQ=13.8 \cdot E^{0,6}$  – als Input.

Ein Regionalisierungsverfahren der Hochwasserkennwerte besteht daher in der Regel aus einer umfangreichen regionalhydrologischen Analyse von beobachteten Hochwässern und erst in weiterer Folge die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse, in Relation, auf un beobachtete Gebiete.

Werden im Verfahren bestimmte Systemfestlegungen bzw. Vorgaben getroffen, so spricht man hier von einer standardisierten Regionalisierung. Dies ist häufig der Fall, da Hochwasserereignisse in der Natur sehr komplex und unterschiedlich auftreten können. Es gibt unzählige meteorologische/hydrologische Kombinationen bzw. Szenarien (im NA-Modell: Variationen der maßgebenden Parameter), die den Abflussprozess bestimmen und ein Hochwasser mit einer bestimmten Wiederkehrswahrscheinlichkeit bzw. Jährlichkeit verursachen können. Die wesentlichen natürlichen Komponenten, die das Hochwasserausmaß bestimmen, sind der Niederschlag (Intensität, räumliche und zeitliche Verteilung), die Abflussbildung (Vegetation, Boden, Locker- und Festgestein), die Abflusskonzentration (Oberfläche und Gerinne) und das Ausuferungs- bzw. Retentionsverhalten. Um nicht alle Komponenten zu maximieren, werden für die Analyse als auch für die synthetische Hochrechnung sinnvolle Systemfestlegungen getroffen, die die Hochwässer charakterisieren. Es werden somit für die Analyse und Übertragung die hydrologischen Standards festgelegt, um eine verhältnismäßige, statistisch homogene und durch die Hochwasserbeobach-

tungen gestützte Übertragung auf un beobachtete Gebiete zu gewährleisten. Besonderheiten können dann in einem zweiten Schritt separat berücksichtigt werden.

Eine solche Standardisierung wurde von der Hydrographie vorgenommen mit dem Ergebnis eines Katalogs mit regionalen Gebietsfaktoren  $GF_{100}$ , die nach Kriterien/Kategorien, wie der Einzugsgebietsgröße, der Gebietssteilheit bzw. Konzentrationszeit, der Abflusswirksamkeit von vorwiegend bewaldeten Flächen mit wenig Abflusswirksamkeit bis zu dichten, abflusswirksamen Flächenanteilen gegliedert werden (Abb. 1).

Mit diesen resultierenden Gebietsfaktoren für die Jährlichkeit 100 ist dann, bei Berücksichtigung

der obigen Kategorien (Einzugsgebiets-eigenschaften), das  $HQ_{100}$  vereinfacht rasch berechenbar bzw. plausibilisierbar.

$$HQ_{100} = GF_{100}(EZG, Abflusskonzentration, Abflusswirksamkeit) \cdot E^{0,6} \quad \text{Gl. (1)}$$

Doch wie sind die statistischen Größenordnungen/Verhältnisse zwischen den Einzugsgebietsgrößen, der Abflusswirksamkeit, der Abflusskonzentration und den einzelnen Jährlichkeiten zueinander? Zur Plausibilisierung bzw. Übertragung/Einordnung können diese Verhältnisgrößen einen wertvollen Anhalt bieten.

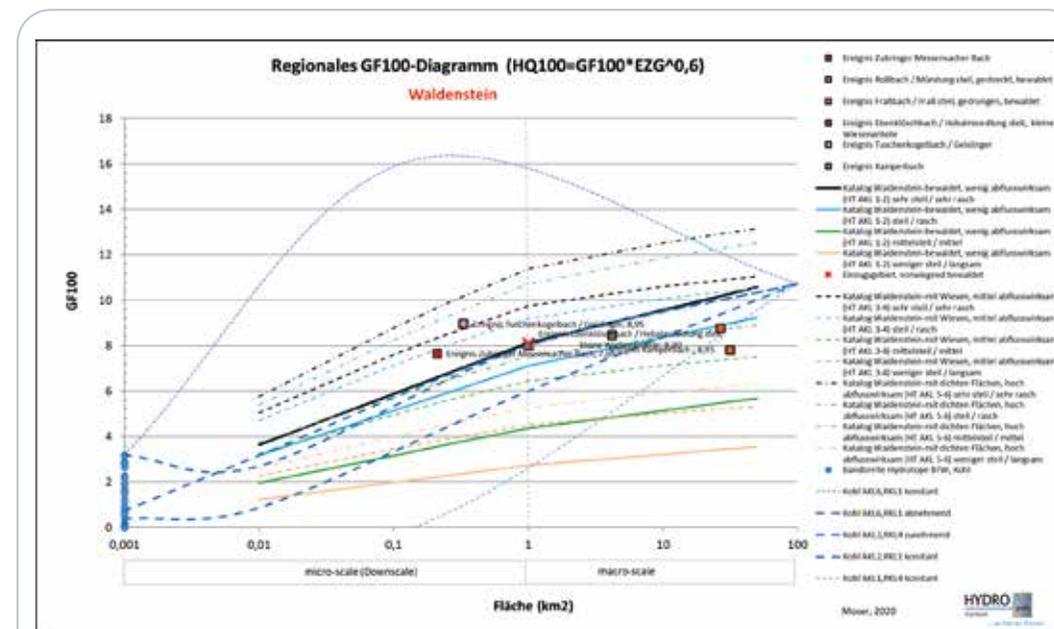


Abbildung 1:  $GF_{100}$ -Katalogblatt, differenziert für verschiedene Gebietseigenschaften für die Region Waldenstein im Lavanttal auf Basis der regionalen Pegel- und Einzelhochwasserauswertungen und für Kleinstflächen ( $0,001 \text{ km}^2$ ; Ergebnisse von Berechnungsversuchen für Hydrotöpfe nach B. Kohl, BFW).

Figure 1:  $GF_{100}$  catalogue page, differentiated according to various area properties of the region Waldenstein in the Lavanttal based on regional gauge and singular flood analysis and small areas ( $0,001 \text{ km}^2$ ; results of watering attempts for hydrotops by B. Kohl, BFW).

## Regionalisierung des $HQ_{100}$ Kennwertes bzw. des entsprechenden regionalen Gebietsfaktors $GF_{100}$

Die Methoden der Abflussstatistik sind in den diversen Leitfäden des BMLFUW (2011, 2010) und Fachliteraturen, wie z.B. ÖWAV Regelblatt 220 (2019) und J. Moser (2016, 2020) ausführlich beschrieben. Grundsätzlich werden in erster Linie an Pegeln aufgezeichnete Hochwässer nach extremwertstatistischen Regeln ausgewertet, sofern das Kollektiv repräsentativ ist und eine entsprechend lange Beobachtungsdauer vorliegt. Daraus werden dann im Abgleich die regionalen Gebietsfaktoren  $GF_{100}$  (Abb. 2) und Verhältnisfaktoren  $HQ_n/HQ_{100}$  aus den statistischen Jährlichkeitskurven ermittelt und dargestellt.

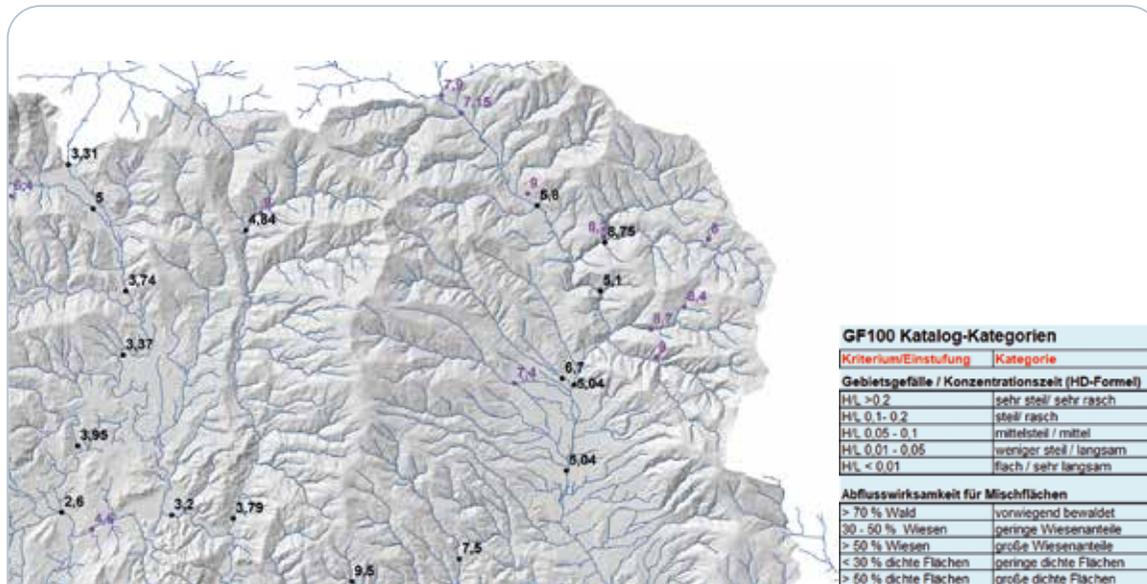


Abbildung 2: Regionale Kartendarstellung der  $GF_{100}$  Gebietsfaktoren (Pegel schwarz, Einzelereignisse violett) und Kriterien zur Einstufung des Einzugsgebietes entsprechend der festgelegten Kategorien.

Figure 2: Regional map view of the  $GF_{100}$  area factors (gauge black, singular events violet) and criteria to classify the catchment area in accordance with the defined categories.

Einzelereignisse werden einerseits durch grobschlägige Zuordnung historischer Jährlichkeiten (beobachtete Zeitspanne des Nichtauftretens von solchen großen Hochwasserereignissen durch Zeitzeugen vor Ort oder Hochwasserchroniken) und andererseits durch die Einordnung über die Verhältnisse zu statistisch abgesicherten Gebietsfaktoren berücksichtigt.

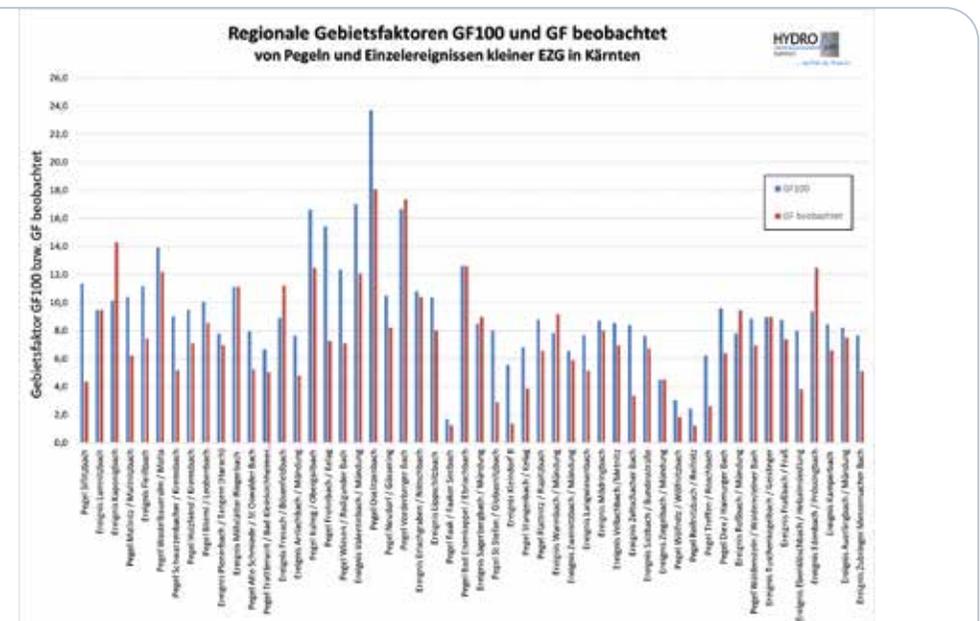


Abbildung 3: Regionales abflussstatistisches Spektrum von kleinen Einzugsgebieten ausgedrückt als Gebietsfaktoren  $GF_{100}$  und  $GF_{beobachtet}$ . Mittleres Verhältnis von  $GF_{beobachtet} / GF_{100} = 0,8$

Figure 3: Regional outflow statistical spectrum of small catchment areas expressed as area factors  $GF_{100}$  and  $GF_{observed}$ ; middle relation of  $GF_{observed} / GF_{100} = 0,8$ .

Zudem werden die Gebietsfaktoren der beobachteten größten Hochwässer ( $GF_{beobachtet} = HQ_{beobachtet}/E^{0,6}$ ) den Gebietsfaktoren für die Jährlichkeit 100 ( $GF_{100} = HQ_{100}/E^{0,6}$ ) gegenübergestellt (Abb. 3), um zu prüfen, welche Größenverhältnisse vorliegen. Im Fall von den 52 beobachteten Pegel und Einzelereignissen ergibt dies im Mittel ein Verhältnis von  $GF_{beobachtet} / GF_{100} = 0,8$ . Dies entspricht in Bezug zu  $HQ_{100}$  (100 Jahre) in etwa einer durchschnittlichen Jährlichkeit  $HQ_{50-70}$  der größten beobachteten Ereignisgrößen. Aus diesem Zeitraum von 50 bis 70 Jahren rückblickend stammen auch die Mehrheit der beobachteten Ereignisse, wobei sich eine starke Konzentration in den letzten 20 Jahren bemerkbar macht.

## Verhältnisgrößen zur Plausibilisierung / Übertragung von Gebietsfaktoren als Output der abflussstatistischen Ergebnisse.

Wie sind nun die Verhältnisgrößen des Gebietsfaktors  $GF_{100}$  in diesem ausgewerteten abflussstatistischen Spektrum für unterschiedliche Einzugsgebieteigenschaften/Kategorien? Das ist vor allem im Zuge von Plausibilisierungsüberlegungen und Übertragungen von statistisch gesicherten Einzugsgebieten auf unbeobachtete Einzugsgebiete bzw. auch in umgekehrte Richtung von Interesse.

Hierfür können zur Umrechnung von  $GF_{100}$  bzw.  $HQ_n/HQ_{100}$  in Abhängigkeit der

unterhalb angeführten Einzugsgebieteigenschaften bzw. Kategorien die ermittelten Verhältnisfaktoren angewendet werden.

- Einzugsgebietsgröße und Abflusswirksamkeit (Basis  $E = 1 \text{ km}^2$ , vorwiegend bewaldet,  $F_{EZG, \text{Abflusswirksamkeit}} = 1,0$ )
- Gebietsgefälle bzw. Abflusskonzentration (Basis, sehr steil/sehr rasch,  $F_{\text{Gebietsgefälle bzw. Abflusskonzentration}} = 1,0$ )
- Verhältnisse der Jährlichkeiten zueinander (Basis  $HQ_{100} = 1$ ,  $HQ_{100}/HQ_n$ )

### 1. Verhältnis/Faktor Einzugsgebietsgröße und Abflusswirksamkeit

Die Gebietsfaktoren  $GF_{100}$  nehmen mit kleiner

werdender Einzugsgebietsgröße entsprechend den Analysen grundsätzlich ab bzw. indirekt verläuft die Abflussspende nicht mehr so steil ( $E^{\wedge 0,6}$ ). Dies ist auch kausal damit begründbar, dass der rasche Gerinneabfluss (die Gerinnkonzentration) bei kleinen Flächen geringer und andererseits der langsamere Oberflächenabfluss bestimmender wird. Gleichzeitig steigen die Gebiets- bzw. Verhältnisfaktoren mit zunehmender Abflusswirksamkeit wieder an (Abb. 4).

Je nach Einzugsgebietsgröße und Abflusswirksamkeit kann daher der Verhältnisfaktor bestimmt und zur Plausibilisierung genutzt werden.

**Beispiel:** gesicherte vorhandene Pegelkennwerte

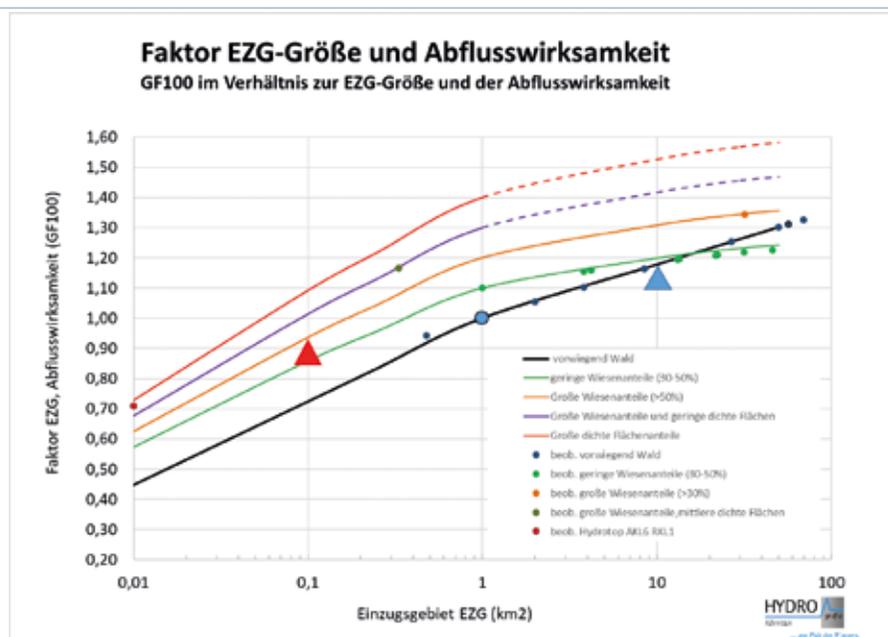


Abbildung 4: Verhältnisgrößen (Faktor) zwischen der Einzugsgebietsgröße und der Abflusswirksamkeit im  $GF_{100}$ -Katalog (Basis: EZG  $1 \text{ km}^2$ , vorwiegend bewaldet; 1,0)

Figure 4: Proportion sizes (factor) between the size of the catchment area and the outflow effectiveness in the  $GF_{100}$  catalogue (basis: catchment area  $1 \text{ km}^2$ , mainly forested; 1,0)

$E = 10 \text{ km}^2$ , vorwiegend bewaldet,  $GF_{100} = 8,5$ .  
Gesucht: Verhältnisfaktor zu unbeobachteten Einzugsgebiet  $E=0,1 \text{ km}^2$  mit großen Wiesenflächen ( $> 50\%$ ). Ergebnis: Faktor  $GF_{100, \text{unbeob}} = 8,5/1,18 \cdot 0,93 = 6,7$

### 2. Verhältnis/Faktor Gebietsgefälle bzw. Abflusskonzentration

Hiermit können die Verhältnisse von sehr steilen/sehr raschen Einzugsgebieten zu anderen Kategorien abgelesen werden. Dabei wird zwischen vorwiegend bewaldet und erhöht abflusswirksam (mit Wiesenanteilen...) unterschieden.

Sehr steil muss nicht unbedingt der Konzentrationszeit sehr rasch entsprechen.

Gestreckte Einzugsgebiete, Karst oder oberflächenabflussdominierte Einzugsgebiete können durchaus in die nächste oder übernächste Kategorie fallen, also zum Beispiel bei sehr steilem Gebietsgefälle in die Konzentrationszeitklasse rasch oder mittel.

In der Regel beginnt man mit der Einstufung über das Gebietsgefälle (sehr steil, steil...) und beurteilt dann noch zusätzlich den Konzentrationszeitcharakter (sehr rasch, rasch...). Umgekehrt kann auch von flachem auf sehr steiles Gebietsgefälle umgerechnet werden ( $1/\text{Faktor}$ ). Zwischenstufen können auch ermittelt werden als Zwischenfaktoren z.B.  $GF_{100}=7$ , Wiese steil/rasch auf mittel:  $GF_{100} = 7/0,92 \cdot 0,63 = 4,79$  bzw. umgekehrt von mittel auf rasch  $4,79/0,63 \cdot 0,92 = 7$ .

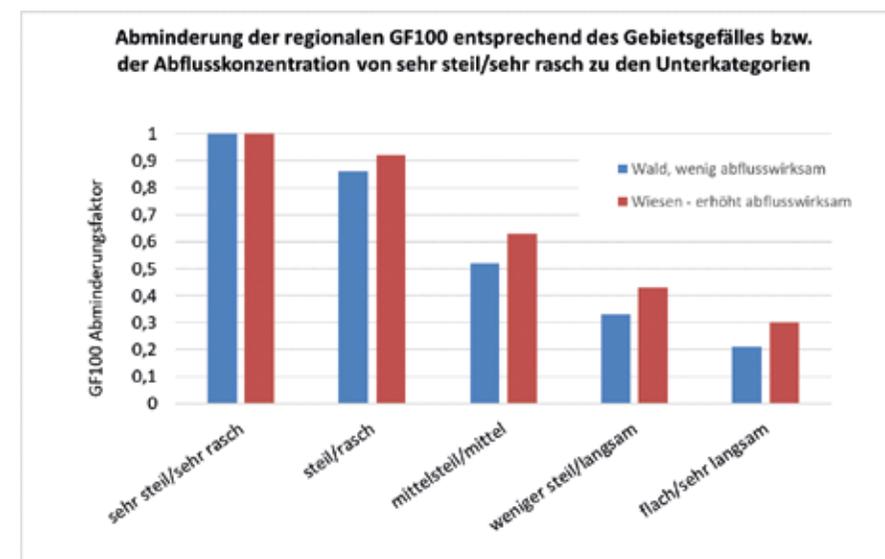


Abbildung 5: Verhältnisgrößen (Faktoren) zwischen dem Gebietsgefälle bzw. der Konzentrationskategorien. Umrechnung von sehr steil/sehr rasch auf Unterkategorien bzw. in umgekehrter Richtung Umrechnung von flach/sehr langsam auf die Oberkategorien ( $1/\text{Faktor}$ )

Figure 5: Proportion sizes (factors) between the area slope and the categories of concentration; conversion from very steep/very rapid to subcategories or rather in reverse order the conversion from flat/very slow to main categories ( $1/\text{factor}$ ).

### 3. Verhältnis/Faktor der Jährlichkeiten $HQ_n/HQ_{100}$

Sehr häufig ist eine Plausibilisierung von ermittelten  $HQ_{100}$  Werten auch in Bezug auf abgesicherte  $n$ -Jährlichkeiten von beobachteten Hochwässern bzw. statistisch abgesicherten geringeren  $n$ -Jährlichkeiten, wie  $HQ_5$ ,  $HQ_{10}$  ... sinnvoll.

Die Verhältniswerte zu  $HQ_{100}$  werden mit höheren Jährlichkeiten  $HQ_n$  sehr viel kleiner. Je niedriger die Vergleichsjährlichkeit z.B. bei  $HQ_5$ , umso größer sind die Schwankungsbreiten und damit Unsicherheiten (Abb. 6). Auch hier spielt die Einzugsgebietsgröße beim Verhältnis  $HQ_{100}/HQ_n$  entsprechend diesbezüglicher Analysen eine große Rolle. Daher werden die Verhältnisfaktoren für bestimmte Einzugsgebietsgrößen und Jährlichkeiten in ihrer Bandbreite dargestellt. Für Flächen dazwischen kann auch

interpoliert werden. Die mittleren Verhältnisfaktoren beschreiben mittlere Verhältnisse. Die obere Schwankungsgrenze gilt nach genaueren Analysen vorwiegend für sehr steile, rasche Einzugsgebiete mit wenig Retention. Hingegen sind die Faktoren der unteren Grenze maßgebend für Einzugsgebiete mit größeren Retentionen bzw. gelegen an Wetterzugstraßen mit größeren Hochwasserwerten bereits für niedrige Jährlichkeiten (Häufiges Auftreten von mittleren Hochwasserereignissen). Beispiel: Für ein mittelsteiles Einzugsgebiet (10 km<sup>2</sup>) mit etwas Retention ergibt die Pegelstatistik ein  $HQ_{10}$  von 13 m<sup>3</sup>/s.  $HQ_{100}$  plausibilisiert wäre bei Anwendung des Verhältnisfaktors  $F_n * HQ_n = 13 * 3,1 = 40,3$  m<sup>3</sup>/s. Wäre das gleiche Gebiet sehr steil mit wenig Retention würde der Faktor 4,0 und bei flachem Gebiet mit Retention der Faktor 2,2 betragen.

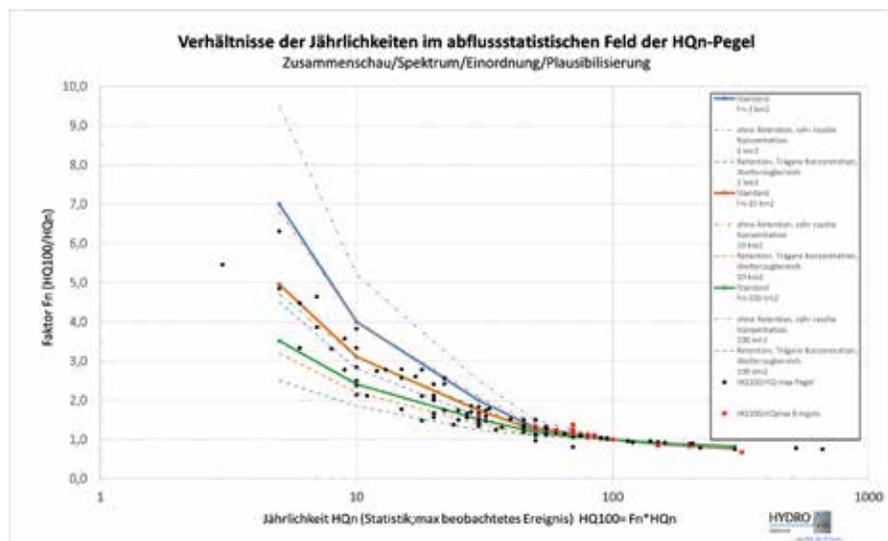


Abbildung 6: Verhältnisgrößen (Faktor) zwischen den Jährlichkeiten  $HQ_{100}$  und  $HQ_n$  für die Einzugsgebietsgrößen 1 km<sup>2</sup>, 10 km<sup>2</sup> und 100 km<sup>2</sup>, hergeleitet aus Ergebnissen der Hochwasserabflussstatistik.  $HQ_{100} = HQ_n * F_n$ .

Figure 6: Proportion sizes (factor) between the annualities  $HQ_{100}$  and  $HQ_n$  for the size of catchment areas 1 km<sup>2</sup>, 10 km<sup>2</sup> and 100 km<sup>2</sup>; deduced from the results of the flood outflow statistic;  $HQ_{100} = HQ_n * F_n$ .

### Conclusio

Fehlen lokal die Daten für statistische Hochwasserberechnungen, dann machen regionale Informationserweiterungen und die Plausibilisierung über vorhin beschriebene Verhältnisgrößen aus einem regionalen, abflussstatistischem Spektrum entsprechend der Einzugsgebietskategorien durchaus Sinn. Einzelne große, beobachtete Hochwässer in der Region sind als Informationserweiterung oft bedeutender als statistische Konfidenzbereiche eines nicht repräsentativen Hochwasserkollektivs. Aus der Gesamtschau von vielen abflussstatistischen Informationen und Analysen (Pegel und Einzelereignisse) ergibt sich doch eine deutlich verbesserte Basis zur Berechnung von Hochwassermengen  $HQ_n$  von Gewässern mit kleinen, unbeobachteten Einzugsgebieten.

### Anschrift des Verfassers/Author's address:

DI Johannes Moser  
Amt der Kärntner Landesregierung,  
Abt. 12 Wasserwirtschaft / Hydrographie  
9020 Klagenfurt, Flatschacher Straße 70  
johannes.moser@ktn.gv.at

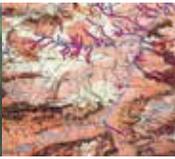
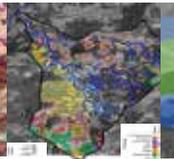
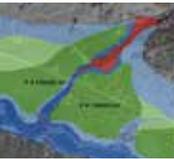
### Literatur/References:

- MOSER J. (2016, 2020).  
Hydrologische Hochwasserkennwerte von Fließgewässern in Kärnten.
- BMLFUW. (2011).  
Leitfaden – Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten.
- BMLFUW (2010).  
Leitfaden zur Festlegung und Harmonisierung von Bemessungsereignissen.
- ÖWAV Regelblatt 220. (2019).  
Niederschlag-Abfluss-Modellierung

i.n.n.

ingenieurgesellschaft  
für naturraum - management  
GmbH & Co KG

- **Unsere Leistungen im Naturgefahren – Management:**  
Regional- u. Gefahrenzonenplanungen, Schutzkonzepte, Gutachten, Einreichplanungen, Ausschreibungen, Umsetzungsbegleitung /-kontrolle
- **Weitere Bereiche:**  
Umwelttechnik, Rohstoff- u. Deponieprojekte, Freizeitinfrastruktur- u. Sportstättenplanungen






**Maria-Theresien-Straße 42a, A - 6020 Innsbruck**  
**Tel.: ++43(0)512/342725-0 Mail: office@inn.co.at Web: www.inn.co.at**

JULIA EISL, GÜNTER HUMER, MICHAEL HOFER

## Hydrologische Modellierung von Oberflächenabfluss – Erfahrungen eines Ingenieurbüros

### *Modeling of pluvial flooding – Practical experiences of an engineering office*

#### **Zusammenfassung:**

Die Hydrologische Modellierung von Oberflächenabfluss hat in den vergangenen Jahren an großer Bedeutung gewonnen. Starkregenereignisse im gesamten Bundesgebiet haben zahlreiche lokale Überflutungen abseits von Gewässern ausgelöst. Mit dem gekoppelten N/A-2d-Modell „Sturzflut“ können die Abflussbildung als pluvialer Prozess und das Gerinnerouting in einem Modell abgebildet werden. Im Zuge von verschiedenen Projekten aus der Angewandten Forschung wie aus der Praxis wurden Ereignisse nachgerechnet und Eingangsparameter für die Modellierung definiert, um realitätstreue Ergebnisse zu erzielen. Die Anwendungsbereiche reichen hierbei von sehr großräumigen bis hin zu kleinräumigen Betrachtungen unterschiedlicher Detailgenauigkeit. Der folgende Artikel beschreibt die Modellgrundlagen und zwei Anwendungsbeispiele.

#### **Abstract:**

*The modelling of pluvial flooding has gained importance in recent years, since risks of heavy rainfall events are increasing all over the country and beyond. Floods caused by overland flow can occur everywhere (they are not restricted to rivers) and anytime (they are often caused by short-term and local heavy rainfall). By applying a model, that combines a 2D hydrodynamic and a rainfall-runoff model, pluvial and fluvial flooding can be displayed in one step. The model can implement spatial and temporal distributions of rainfall data, and thus be used to back-calculate real events and calibrate the model parameters. Experience shows that parameters for initial abstraction, constant loss and flow resistance are crucial to achieve the most realistic results. The following article describes two case studies, that were done in the past years.*

#### **Stichwörter:**

Oberflächenabfluss,  
Sturzflut, Hydrologie,  
pluviales Hochwasser,  
2D-Modellierung

#### **Keywords:**

*Overland flow, flash flood,  
hydrology, pluvial flooding*

#### **Einleitung**

Lokale Starkregenereignisse führten in den letzten Jahren vermehrt zu pluvialen Hochwässern/Oberflächenabfluss und den daraus resultierenden Schäden. Gerade die jüngste Vergangenheit hat gezeigt, dass das Thema Oberflächenabfluss (oft auch als Sturzflut oder Hangwasser bezeichnet) nicht mehr ignoriert werden darf. Neben der fortschreitenden Bodenversiegelung und Bodenverdichtung verschärft vor allem die prognostizierte Zunahme von starken Regenfällen das Problem zusehends (IPCC, 2018; BMNT, 2019).

Da Starkregen standortungebunden sind und aufgrund der Kleinräumlichkeit zeitlich wie räumlich nur sehr schwer vorherzusagen sind, ist die Kenntnis von potentiellen Problembereichen für Oberflächenabfluss wesentlich, um weitere Schritte zu Schutz, Bewusstseinsbildung und Vorbereitung im Sinne eines integralen Risikomanagements zu setzen. Das Ingenieurbüro Humer hat dabei schon im Jahr 2012 begonnen, diese Thematik im Rahmen eines Forschungsprojekts mit der Universität Innsbruck zu bearbeiten (z.B. Klar et al., 2014, Humer et al., 2015). Seither wurde im Zuge von unterschiedlichen Projekten die Anwendbarkeit überprüft und Eingangsparameter kalibriert, um auch bei unbeobachteten Gebieten realistische Ergebnisse zu erlangen.

Im Folgenden werden das verwendete Modell und verschiedene Fallbeispiele beschrieben.

#### **Modellbeschreibung**

In den vorgestellten Beispielen kommt das gekoppelte N/A-2d-Modell „Sturzflut“ zum Einsatz, indem ein hydrodynamisch-numerisches Modell um ein Niederschlagsmodul erweitert wurde. Zur Ermittlung der maximalen Wassertiefe wird die

Hydrauliksoftware „Hydro\_AS-2D“ verwendet, welche mittels eines finiten Volumenansatzes die Flachwassergleichungen löst und auch als Standardsoftware für die Gefahrenzonenplanung eingesetzt wird.

Üblicherweise werden Überflutungsbe-reiche berechnet, indem Abflussganglinien aus hydrologischen Modellen oder hydraulischen Simulationen des Oberlieggers als obere Randbedingung festgelegt werden. Im gekoppelten N/A-2d-Modell ist die Definition der Zuflüsse nicht notwendig. Stattdessen wird der abflusswirksame Regenanteil des Gesamtniederschlags in Form unterschiedlicher Verlustansätze errechnet, wodurch jedem Knoten im Netz eine zusätzliche Wassertiefe je Zeitschritt zugeordnet wird. Der Regen kann dazu zeitlich und räumlich variabel definiert werden. Zum Einsatz kommt eine am AB Wasserbau der Universität Innsbruck in Zusammenarbeit mit der DI Günter Humer GmbH entwickelte Software, welche Hydro\_AS-2D als hydraulischen Rechenkern nutzt, um die räumlich verteilte Simulation der Abflusskonzentration abbilden zu können (Klar et al., 2014). Für jeden Zeitschritt werden die Systemzustände ausgeschrieben, danach erfolgt – abhängig von den vorgegebenen Verlusten und Niederschlagswerten - bei jedem Knoten eine Manipulation der berechneten Wasserhöhe. Die Berechnung bildet die Ausgangsbasis für den nächsten Zeitschritt. Die zeitlichen Abstände sind hierbei frei wählbar und je nach zeitlicher und räumlicher Auflösung der Eingangsdaten zu wählen. Die Gesamtrechnzeit des Modells ist die Summe aus Simulationszeiten und Manipulationszeit (Humer et al., 2015).

Die Verluste können sowohl mit dem SCS-CN-Verfahren (US SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972), als auch in Form von Anfangs- und eines kontinuierlichen Verlusten berechnet werden.

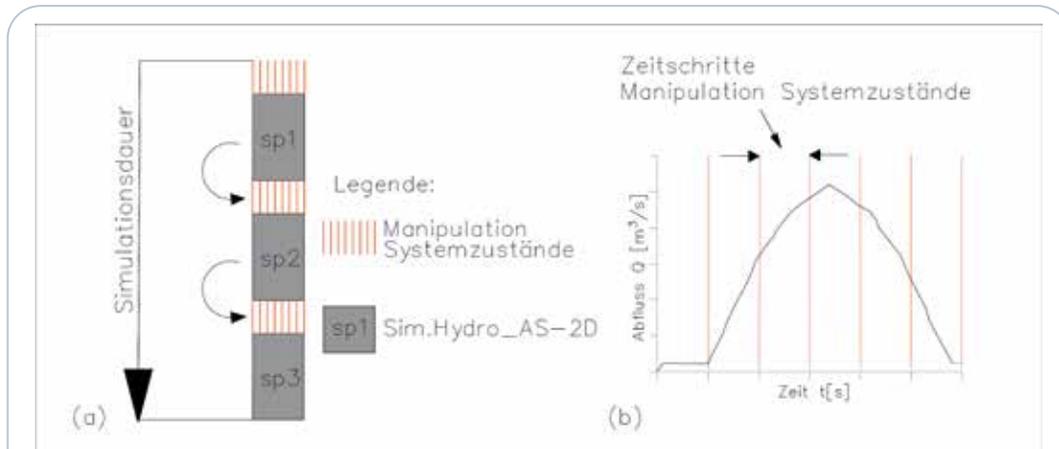


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Berechnungsvorgangs mit (a) Simulationsdauer und (b) der Zeitschritte (Humer et al., 2015)

Figure 1: (a) Temporal decomposition approach with initial conditions and calculation of sub-periods; (b) example of an inflow hydrograph with sub-periods

Durch die beschriebenen Modelleigenschaften ergeben sich unter anderem folgende Vorteile:

- Eingabe des Niederschlags zeitlich und räumlich variabel
- Eingabe von Nettoregen möglich (Verluste werden modellinhärent berechnet)
- Zeitschritte beliebig hoch auflösbar
- Hydraulisch relevante Einbauten (Mauern, Brücken, Bruchkanten etc.) können im Modell implementiert werden
- Mit dem gekoppelten Modell wird Abflussbildung und Gerinne-Routing kombiniert
- ggf. mit Geschiebetransportmodell HYDRO\_GS-2D kombinierbar

### Eingangsparameter

Wie bereits beschrieben, gehen Niederschlagsdaten zeitlich und räumlich variabel in das Modell ein. Somit ist die Nachrechnung von Einzelereignissen im Rahmen von Ereignisanalysen ebenso wie die Berechnung von Bemessungsereignissen

möglich. Die zeitliche Auflösung hängt dabei von den in der Modellierung gewählten Zeitschritten bzw. den vorhandenen Datengrundlagen ab, die räumliche Verteilung ist je nach Größe des Projektgebiets zu wählen; bei sehr großen Gebieten empfiehlt sich eine Reduzierung der Daten durch Zusammenlegung homogener Bereiche.

Für die Ermittlung des effektiven Niederschlags wird die in den Anwendungsbeispielen verwendete Methodik der Anfangs- und kontinuierlichen Verluste, als vereinfachte Summenparameter von Benetzungsverlusten, Muldenverlusten, Verdunstungsverlusten und Sickerverlusten, beschrieben. Dabei wird das Projektgebiet basierend auf den vorherrschenden Boden- und Landnutzungsdaten in Hydrotipe eingeteilt und mit entsprechenden Parametern belegt. Anfangsverluste werden dabei empirisch, kontinuierliche Verluste anhand von verfügbaren Boden- und Landnutzungsdaten abgeschätzt. Die Abgrenzung von Homogenbereichen kann anhand von Bodenkarten bzw. deren Durchlässigkeit oder – wenn bekannt – über die gesättigte Leitfähigkeit

(kf-Wert, in mm/h) erfolgen. Bei beobachteten Einzugsgebieten oder bekannten Abflüssen kann eine Kalibrierung anhand abgelaufener Ereignisse erfolgen. Bei unbeobachteten Einzugsgebieten wird auf Erfahrungen aus zurückliegenden Projekten zurückgegriffen, bei denen eine Kalibrierung des Modells stattgefunden hat oder eine regionale Übertragung aus hydrologisch ähnlichen Gebieten durchgeführt. Die Erfahrung zeigt, dass die Werte der gesättigten Leitfähigkeit aus den GIS-Karten deutlich erhöht werden müssen, um die beobachteten Ereignisse abbilden zu können. Das Wertespektrum liegt dabei jedoch im Bereich physikalisch plausibler Größen.

Die Rauigkeiten gehen in Form von Strickler-Beiwerten  $[m^{1/3}/s]$  in die Modellierung ein. Hier wird je nach Anwendungsgebiet zwischen pluvialen und fluvialen Bereichen unterschieden. Die verwendeten Werte haben enormen Einfluss auf die Ergebnisse von Scheitelabfluss und Wellenform. Die Problematik der korrekten Darstellung der Fließwiderstände infolge Oberflächenrauigkeiten und Vegetation wurde in diversen Studien behandelt. Oberle et al. (2021) empfehlen dabei beispielsweise Rauigkeitsbeiwerte aus dem „Leitfaden Kommunales Starkregenmanagement“ (LUBW, 2020). Diese Werte, welche für Oberflächenabfluss mit kleinen Fließtiefen wesentlich geringer sind als für fluviale Bereiche bzw. größere Fließtiefen, decken sich mit unseren Erfahrungen aus den Kalibrierungsereignissen. Als grobe Faustregel hat sich die Halbierung der Rauigkeitsbeiwerte bewährt.

Im Folgenden werden zwei abgeschlossene Anwendungsbeispiele unterschiedlicher Detailgenauigkeiten und Ausprägungen vorgestellt. Im Kapitel „Diskussion & Ausblick“ wird ein laufendes Projekt beschrieben, bei dem ein detailliertes Modell mit Kanalkoppelung zur Anwendung kommt.

### Flash Flood Risk Map (FFRM)

Die Flash Flood Risk Map (FFRM, abrufbar auf [ffrm.hangwasser.at](http://ffrm.hangwasser.at)) war im Jahr 2013 eines der ersten Projekte im Bereich der Simulation von Oberflächenabfluss. Im Zuge des EU-finanzierten Projekts „SWITCH-ON“ wurde das oben beschriebene Modell „Sturzflut“ als eines der ersten entwickelt und auf Anwendbarkeit überprüft. Die Kalibrierung erfolgte anhand eines Ereignisses vom Juni 2012 an den Pegeln der Waldzeller Ache und der Mettmach (OÖ). Teil des Projekts war auch die Nutzung und Weiterverwendung von Open Data im Bereich Hydrologie und verwandter Bereiche. Die zu diesem Zeitpunkt verfügbaren, flächendeckenden Höhenmodelle hatten eine Auflösung von 25 Meter. In dieses Höhenmodell wurde das Berichtsgewässernetz als terrestrische Bruchkanten eingeschnitten und das Netz in einem Puffer um die Gewässer auf eine Auflösung von 10 Meter verfeinert. Die Grundlage für die Bestimmung der Verluste bildeten die frei verfügbaren CORINE-Landnutzungsdaten, die Österreichische Bodenkarte und der Hydrologische Atlas.

Mit diesen Eingangsdaten wurde flächendeckend für das Landesgebiet von Oberösterreich (12 000 km<sup>2</sup>) ein 100-jährliches Niederschlagsereignis berechnet. Die Darstellung erfolgt als Gefahrenflächen (Wassertiefe) oder – mit Verschneidung des Gebäudedatensatzes – als Risikobereiche ([ffrm.hangwasser.at](http://ffrm.hangwasser.at)).

Im Sommer 2021 wurde vom Land Oberösterreich eine Berechnung mit höherer Auflösung publiziert, die die FFRM als landesweite Hangwassergefährdungskarte ablöst.

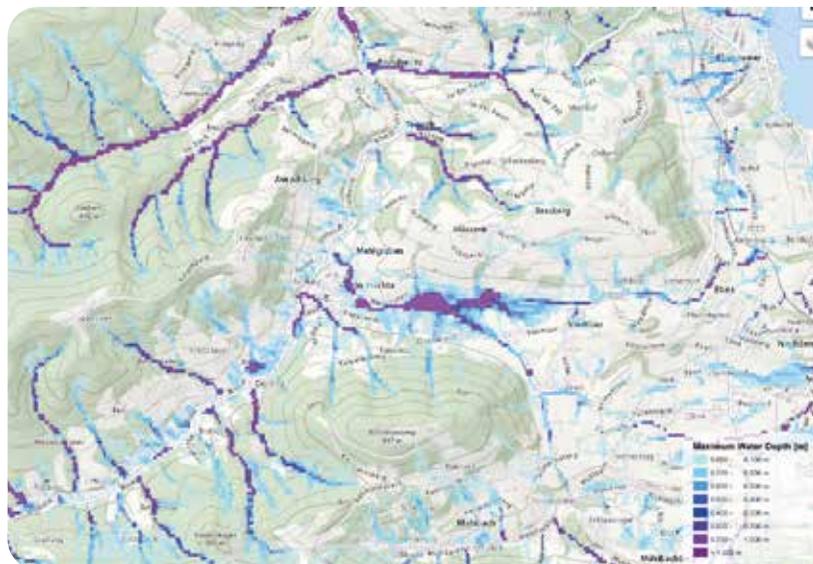


Abbildung 2:  
Ausschnitt aus der Flash  
Flood Risk Map mit (a)  
Gefahrenflächen und (b)  
Risikobereichen (ffm.  
hangwasser.at)

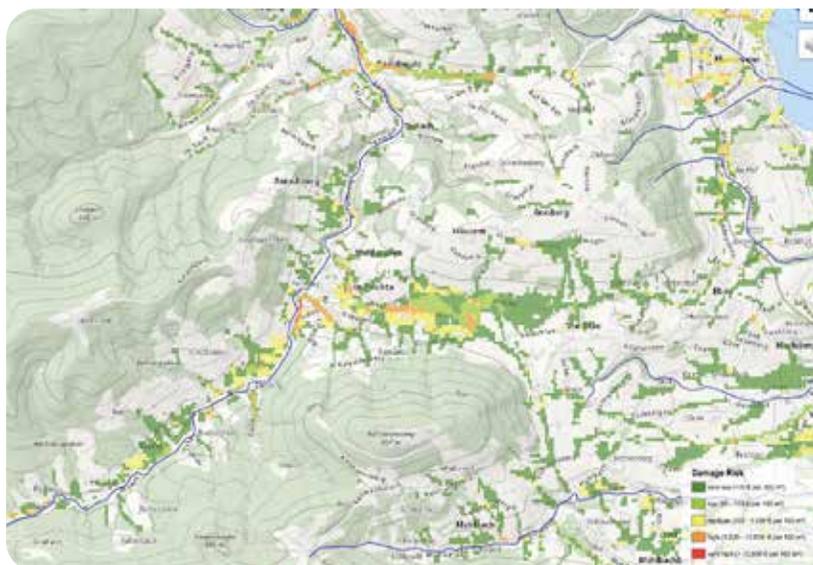


Figure 2:  
Flash Flood Risk Map with  
(a) Maximum Water Depth  
and (b) Risk areas (water  
depth combined with  
elements at risk)

## Enknach

Im Zuge der Erstellung des GE-RM (Gewässerentwicklungs- und Risikomanagementkonzept) für die Enknach (Bezirk Braunau, OÖ) wurden die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration mit dem Modell „Sturzflut“ berechnet. Die Berechnung erfolgte über ein Gesamteinzugsge-

biet von ~140 km<sup>2</sup> bzw. 64 Kilometer Gewässerlänge für die fluvialen Abschnitte.

Grundlage für die Erstellung des Modells waren Laserscandaten mit einer Auflösung von 1x1 m, sowie die terrestrische Vermessung von Gerinneprofilen, Brücken und Einbauten im Gerinne und Vorland.

Die Kalibrierung erfolgte anhand eines abgelaufenen Ereignisses aus dem Jahr 2016,

das am Pegel Österlehen aufgezeichnet wurde. Als Niederschlagseingangsdaten wurden INCA-Daten mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten und einer räumlichen Auflösung von 1x1 km angefordert, die aufgrund der Größe des Projektgebiets in 4x4 km große Homogenbereiche zusammengefasst wurden.

Bei der Definition der Fließwiderstände wurde zwischen pluvialen und fluvialen Bereichen unterschieden. Dabei wurde innerhalb der Gerinne und anderen Bereichen höherer Fließtiefe (z.B. Mulden) das übliche Wertespektrum verwendet, die Rauigkeitsparameter für den Oberflächenabfluss wurden etwa um die Hälfte gesenkt.

Das kalibrierte 2d-Modell wurde mit einem hundertjährigen Bemessungsniederschlag nach eHYD und Euler-Verteilung beaufschlagt, wobei für die ins Einzugsgebiet fallenden Gitterpunkte jeweils Thiessen-Polygone gebildet wurden.

Das Ergebnis waren einerseits die Überflutungsflächen, andererseits die Ganglinien für die weiteren, instationären Berechnungen. Die Hochwasserwellen können dabei an beliebig vielen Punkten abgegriffen werden. Das Gesamtmodell mit ausgewählten Zulaufganglinien ist in der folgenden Grafik dargestellt. Die Zulaufganglinien stellen dabei die charakteristische Wellenform für die jeweiligen Teileinzugsgebiete dar und können auf Ereignisse anderer Magnitude skaliert werden.

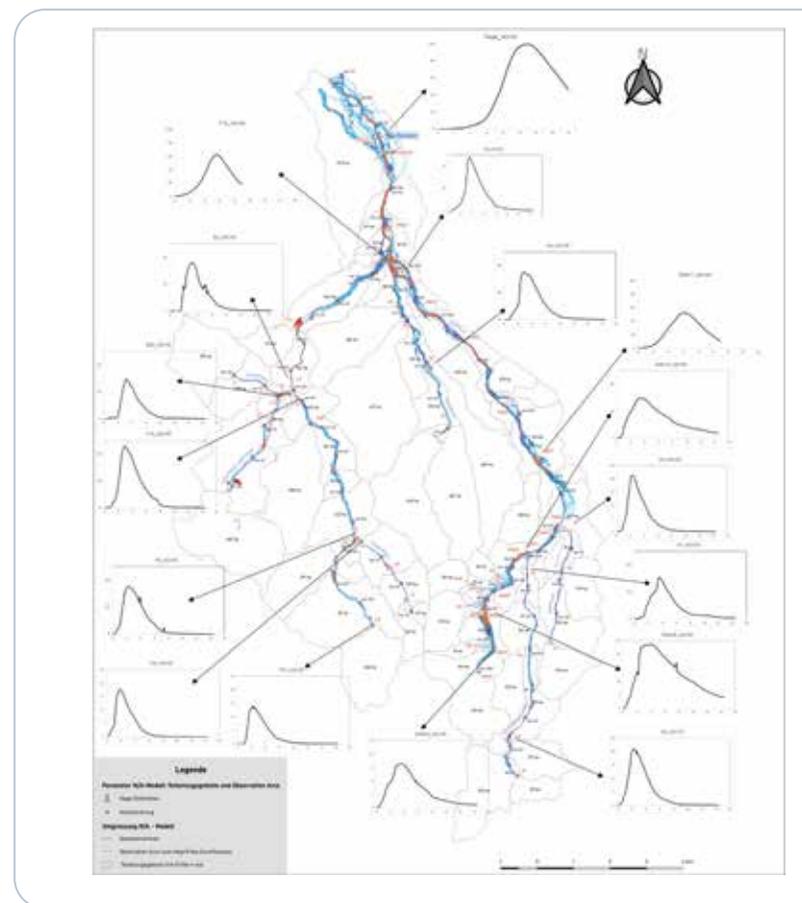


Abbildung 3:  
Einzugsgebiet Enknach  
mit Wellenformen der  
Teileinzugsgebiete und  
Überflutungsflächen

Figure 3:  
Catchment of "Enknach"  
with hydrographs being the  
output of the hydrological  
model and flooded areas  
being the output of the  
hydraulic model

## Diskussion & Ausblick

Die Parametrisierung der Rauigkeitsbeiwerte von Dünnfilmabfluss ist derzeit Gegenstand der Forschung. Besonders bei der Berechnung der Wellenform und des Scheitels haben diese einen großen Einfluss. Die Implementierung von tiefenabhängigen Fließwiderstandsparametern wäre dabei wesentlich, um gute Ergebnisse in Bereichen mit geringen Fließtiefen zu erlangen. Die Parametrisierung ist allerdings noch schwieriger als sie mit konstanten Werten ohnehin schon ist, Untersuchungen und praktische Erfahrungen sind nur spärlich vorhanden. Auch der Zusammenhang zwischen Fließwiderstand und Rastergröße der Eingangsdaten hat einen Einfluss auf das Ergebnis, da mit zunehmendem Abstand der Punkte auch Makrorauigkeiten des Geländes im Rauigkeitsbeiwert abgebildet werden müssen. In diesem Bereich gibt es jedenfalls Forschungsbedarf und standardisierte Werte wären hilfreich – auch um annähernd die gleiche Qualität der Ergebnisse von unterschiedlichen Modellierer/innen zu gewährleisten.

Zwischenzeitlich haben sich die Modelle weiterentwickelt. Hydro\_as ab Version 5 ermöglicht die direkte Applikation von Regen, allerdings muss er als effektiver Netto-Niederschlag aufgebracht werden.

Die berechenbare Modellgröße hat sich auch deutlich erhöht. Vor allem in urbanen und semi-urbanen Bereichen, in denen Hindernisse geringer Höhe bereits den Oberflächenabfluss behindern bzw. umleiten, ist eine Aufnahme hydraulisch relevanter Einbauten notwendig, um ein realistisches Ergebnis zu erzielen. Dabei gibt es unterschiedliche Methoden (terrestrische Vermessung, Mobile Laserscan, u.Ä.), die vor allem bezüglich der Kosten eine erhebliche Streuung aufweisen. Im Zuge des Projekts „Hillslope“ haben wir mit Hydro\_as die Auswirkung der

unterschiedlichen Erhebungsmethoden für Bruchkanten untersucht. Durch einfache Erhebung vor Ort mittels Maßband sind erhebliche Kostenvorteile ohne Einbuße bei der hydraulischen Berechnung zu erwarten.

Im urbanen Bereich ist außerdem die Überflutungsberechnung mit der Wirkung der Kanalisation ein brennendes Thema. Der Kanal kann sowohl eine Entlastung durch Abfuhr von Wasser bringen, andernorts dieses Wasser bei Überlastung aber wieder an die Oberfläche bringen und zu einer Verschlechterung führen. Im Projekt Hillslope konnten wir mittels MIKE Urban+ eine direkte Koppelung von Oberflächen- und Kanalabfluss modellieren und damit den Einfluss des Kanals im ganzen Stadtgebiet von Altheim/OÖ untersuchen sowie die Grenzen und Schwachstellen des vorhandenen Kanalsystems darstellen.

Auf dem Sektor der Modellierung hat sich viel getan, neben numerischen Modellen auf Basis der Flachwassergleichungen entwickeln sich auch GIS-basierte Ansätze wie SaferPlaces (Samela et al., 2020). Alle Modellierer versuchen, die ihnen zur Verfügung stehenden Kalibrierungsereignisse möglichst gut nachzubilden. Offen ist derzeit aber noch, mit welchen Bemessungsansätzen Schutzprojekte dimensioniert werden sollen. Das 100-jährliche Ereignis steht als Bemessungsgröße im Raum, doch gibt es zahlreiche Stellschrauben bei der Modellierung und es fehlt eine Hochwasserstatistik, an der man sich bei den pluvialen Hochwässern orientieren kann. Daher ist es unumgänglich abgelaufene Ereignisse zu dokumentieren und Daten zu sichern. Das Interesse betroffener Kommunen an einfachen Werkzeugen zur Dokumentation wurde z.B. von Körte et al. (2020) erörtert. In einem weiteren Schritt könnten Bürger\*innen im Zuge von Citizen Science Projekten in die Erhebungen eingebunden werden und so einen wertvollen Beitrag zur Sammlung der Daten leisten.

## Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

DI Julia Eisl  
Ingenieurbüro Humer  
Bahnhofstraße 2, 4810 Gmunden  
Eisl@ib-humer.at

DI Günter Humer  
Ingenieurbüro Humer  
Feld 16, 4682 Geboltskirchen  
Humer@ib-humer.at

DI Michael Hofer  
Ingenieurbüro Humer  
Bahnhofstraße 2, 4810 Gmunden  
Hofer@ib-humer.at

## Literatur/References:

ACHLEITNER S., KOHL B., LUMASSEGGGER, S., HUBER, A., FORMAYER H. UND WEINGRABER F. (2020). Sturzfluten. In Thomas Glade, Martin Mergili, Katrin Sattler (Hrsg.) ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Vienna University Press, S. 247-286, ISBN Print: 9783847110927

BMNT (2019). Eigenvorsorge bei Oberflächenabfluss. Ein Leitfaden für Planung, Neubau und Anpassung. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.). Wien

HUMER G., REITHOFER A., KLAR R., ACHLEITNER S. (2015). Erweiterung eines 2D-Strömungsmodelles zur Berechnung von Sturzfluten. Plausibilisierung und praktische Anwendung für die Darstellung von Gefahrenkarten und Lösung von Planungsaufgaben in Siedlungsgebieten. KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft, (3), S. 164-171, 2015, ISSN: 1865-9926.

IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

KLAR R., ACHLEITNER S., LUMASSEGGGER S., AUFLEGER M., HOFER M. (2014). Extension And Testing of a 2D Hydrodynamic Model for Direct Rainfall Runoff Simulation. In: Proceedings. 11th International Conference on Hydroinformatics. The City College of New York New York City, USA.

KÖRTE L., SAUER A., HEINKE J., ORTLEPP R. (2020). In-depth knowledge: Mapping and documentation of Floodmarks. In: T4.3.1 Module for assessment and mapping of heavy rain risks (RAINMAN Tool 1). Interreg Central Europe. Dresden: IÖR, 2020, S.1-11

LUBW (2020). Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Anhang 1a. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). Karlsruhe

OBERLE P., KRON A., KERLINT, RODRIGUEZ E.R., NESTMANN F. (2021): Diskussionsbeitrag zur Fließwiderstandsparametrisierung zur Simulation der Oberflächenabflüsse bei Starkregen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 65, S.12-21.

SAMELA C., PERSIANO S., BAGLI S., LUZZI V., MAZZOLI P., HUMER G., REITHOFER A., ESSENFELDER A., AMADIO M., MYSIK J., CASTELLARIN A. (2020): Safer\_RAIN: a DEM-based Hierarchical Filling&Spilling Algorithm for Pluvial Flood Hazard, Assessment and Mapping Across Large Urban Areas; Water 2020, 12(6), 1514; <https://doi.org/10.3390/w12061514>

SCS (Soil Conservation Service)-USDA (1972): Estimation of direct runoff from storm rainfall, National Engineering Handbook. Section 4-Hydrology 1972 pp. 10.1-10.24.US SOIL CONSERVATION SERVICE 1972



**Gunz ZT GmbH**  
Ziviltechniker für Forst- und Holzwirtschaft,  
Wildbach-, Lawinen- und Erosionsschutz,  
allg. beeid. und gerichtl. zert. Sachverständiger

4400 Steyr, Brucknerplatz 2

Tel.: 07252/42484 E-Mail: [office@gunz.at](mailto:office@gunz.at) Homepage: <http://www.gunz.at>

GEBHARD WALTER, MANFRED PITTRACHER, LEOPOLD STEPANEK

## HYGENOT und PSINOT – Markstein in der Wildbachhydrologie

### *HYGENOT & PSINOT – Markstone in torrential hydrology*

#### **Zusammenfassung:**

Die Ideen und Meilensteine zu den Projekten HYGENOT und PSINOT werden dargestellt und begründet.

#### **Abstract:**

*The ideas and milestones for the HYGENOT and PSINOT projects are presented and explained.*

#### **Stichwörter:**

Hydrogeologie,  
N/A-Modellierung

#### **Keywords:**

*hydrology, precipitation/  
flow-modelling*

#### **Motivation**

Die drei nachfolgenden Fachbeiträge (Straka et al.; Kohl et al.; Kammerlander et al.) berichten über das vor kurzem abgeschlossene Projekt HYGENOT (**Hydrogeologie Nordtirol**) und über die ersten Ergebnisse aus dem darauf aufbauenden und noch laufenden Projekt PSINOT ( $\psi$  = Abflussbeiwert Nordtirol). Beide Projekte wurden aus fachlichen Notwendigkeiten aus dem Dienstzweig heraus initiiert und von der Sektion Tirol beauftragt. Die Entwicklung der Fragestellung hat eine mittlerweile rund 20-jährige Geschichte. Die nunmehr vorliegenden Ergebnisse belegen neben den fachlichen Hypothesen auch die Notwendigkeit der Zusammenarbeit zwischen Praxis und Forschung. Nur so können anwendungsorientierte Methoden und Instrumente auf fachlich fundierter Grundlage generiert und weiterentwickelt werden.

#### **Zusammenarbeit**

Nach den bahnbrechenden Neuerungen im Bereich der Lawinensimulation in den Jahren vor der Jahrtausendwende stellte sich innerhalb der Wildbach- und Lawinerverbauung auch für den Bereich der Wildbachkunde die Frage, wo der Stand der Technik liegt. Das Projekt **ETALP** (ETALP, 2003), als interdisziplinärer Meilenstein auf dem Weg zu einem neuen, innovativen Zugang zur Wildbachhydrologie, beantwortete für die Fachbereiche Erosion, Transport und Abfluss in alpinen Einzugsgebieten, welche Methoden zur Abschätzung der wildbachrelevanten Kenngrößen (Abflussspitzen und -frachten, Abtragsraten, Transportkapazitäten, ...) zur Verfügung standen.

Quasi als Nebenprodukt der Erkenntnisse der Abflussgruppe des Projektes entstand außerhalb von ETALP das Programm ZEMOKOST zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten in unbeobachteten Wildbacheinzugsgebieten. Die leichte Verfügbarkeit, der unkomplizierte, anwendungsorientierte Programmaufbau und die Nachvollziehbarkeit der Rechenoperationen haben zu einer weiten Verbreitung dieses Programms innerhalb der WLV, aber auch an Universitäten und bei einschlägigen Dienstleistern gesorgt. Auch die Entwicklung von **ZEMOKOST**, (Kohl & Stepanek, 2005; Kammerlander et al., 2020) in Kooperation zwischen Praktikern der WLV und Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) ist als solcher Meilenstein zu betrachten.

#### **Expertise**

Ein weiterer Meilenstein wurde mit **HOPWAP** (Hochwasser Paznaun: Wald-Abfluss-Potential; Stepanek et al., 2009) gesetzt. In diesem Projekt wurden neben den Einschränkungen auch schnell die Vorteile des ursprünglichen, von Zeller übernommenen, modularen Programmansatzes von ZEMOKOST deutlich.

Damit konnten auch zusätzliche Module z.B. zur Abbildung von untergrundabhängigen Prozessen, ins Programm integriert werden. Die Weiterentwicklung von ZEMOKOST war nicht nur in der Lage, die 2005 im Paznaun gemessene Hochwasserganglinie der Trisanna aus den erfassten Niederschlägen nachzubilden, sondern kann seither auch untergrundabhängige Zwischenabflussprozesse für Bemessungsfragen mitberücksichtigen. Voraussetzung dafür ist allerdings die Verfügbarkeit entsprechender hydro(geo)logischer

Grundlagendaten, zu deren Erhebung auch standardisierte Vorgaben entwickelt wurden (Markart et al., 2004; Pirkl & Sausgruber, 2015). Die dafür notwendigen Arbeiten im Gelände, die Auswertung von Orthofotos und die Aufbereitung zur Programmeingabe verursachten allerdings einen beträchtlichen Aufwand.

### Ergebnis

Die in HYGNOT und PSINOT auf Basis der Erfahrungen eines Pilotprojektes in Osttirol (Pirkl, 2012; Kohl & Sotier, 2016) erarbeiteten Daten sind auf ihrer Maßstabsebene eine landesweit einheitliche Grundlage für zukünftige N/A-Modellierungen. Dieser Markstein stellt ein Fundament für die künftige Anwendung und Weiterentwicklung in der Wildbachhydrologie dar.

Die Daten zielen auf eine direkte Eingabe im Programm ZEMOKOST ab, können aber natürlich auch für die Parametrisierung anderer N/A-Modelle verwendet werden. Die für das gesamte Landesgebiet von Tirol verfügbaren Datensätze sind bereits voll in den WLK (digitaler Wildbach- und Lawinenkataster der WLV) integriert und werden bei projektbezogenem Bedarf auch an einschlägige Fachplaner in der Privatwirtschaft weitergegeben. Geplant ist, nach Abschluss des Projektes PSINOT auch die entsprechenden Schulungen zum dienstinternen Umgang mit den Daten durchzuführen.

### Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Gebhard Walter  
Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Gebhard.Walter@die-wildbach.at

DI Manfred Pittracher (i.R.)  
vormals Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
manfred.pittracher@aon.at

DI Leopold Stepanek  
Gebietsbauleitung Mittleres Inntal  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Leopold.Stepanek@die-wildbach.at

### Literatur/References:

ETALP (2003):  
Agerer H., H. Aigner, H. Angerer, F. Anker, G. Bunza, E. Ferlan, W. Gattermayr, K. Hafner, F. Hehn, H. Honsowitz, H. Hübl, R. Kirnbauer, W. Klaus, B. Kohl, G. Markart, R. Marschallinger, R. Mayer, M. Mayerl, M. Mölk, G. Ofner, H. Pirkl, M. Pittracher, D. Rickenmann, H. Schiegg, M. Schiffer, F. Schmid, R. Schmidt, I. Schnetzer, L. Stepanek (2004): "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.

KAMMERLANDER, J., KOHL, B., MOSER, M. (2020). PRAXISLEITFADEN Niederschlag-Abfluss Modellierung in der Wildbachverbauung, Teil ZEMOKOST. BMLRT, Abt. III/4 Wildbach- und Lawinenverbauung und Schutzwaldpolitik, Wien.

Kohl, B., Sotier, B. (2016). Erarbeitung eines bodenhydrologischen Datensatzes - Bodendaten für ein Wasserhaushaltsmodell für das Einzugsgebiet der Drau einschließlich Isel. BFW-Projektbericht im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung Abteilung Wasserwirtschaft Sachgebiet Hydrographie und Hydrologie. 24 S.

KOHL, B., STEPANEK, L. (2005). ZEMOKOST – neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. BFW-Praxisinformation, 8, 21–22.

MARKART, G., KOHL, B., SOTIER, B., SCHAUER, T., BUNZA, G., STERN, R. (2004). Provisorische Geländeleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). Bundesamt und Forschungszentrum für Wald.

PIRKL, H. (2012). Untergrundabhängige Abflussprozesse. Kartierung und Quantifizierung für das Bundesland Tirol Flächendeckende Aufnahme Osttirols. Endbericht, im Auftrag von: Amt der Tiroler Landesregierung, Hydrographie und Hydrologie, Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, GeoÖko Techn. Büro für Geologie, Wien.

PIRKL, H., SAUSGRUBER, T. (Hrsg.) (2015). Handbuch zur qualitativen und quantitativen Erfassung untergrund-abhängiger Abflüsse in Wildbacheinzugsgebieten. Wildbach- und Lawinenverbauung, Stabstelle Geologie, Innsbruck.

STEPANEK, L., KOHL, B., PIRKL, H., PERZL, F., MARKART, G., KLEBINDER, K., RIEDL, F. (2009). Hochwasser Paznaun 2005: Wald - Abfluss - Potentiale: Bericht der Wildbach- und Lawinenverbauung, die.wildbach, Lebensministerium, Land Tirol, BFW, Wien: 192.



[www.geobrugg.com/lawinenschutz](http://www.geobrugg.com/lawinenschutz)

**GEOBRUGG®**  
BRUGG

Safety is our nature



**SPIDER® AVALANCHE** Lawinenprävention

DER EFFIZIENTE SCHUTZ  
VOR LAWINEN

WOLFGANG STRAKA, THOMAS STRAUHAL, CHRISTIAN ZANGERL, MEINHARD PITTRACHER,  
BERNHARD KOHL, GERHARD MARKART, THOMAS SAUSGRUBER, LEOPOLD STEPANEK,  
JOHANNES KAMMERLANDER, MONIKA KALS, MANFRED PITTRACHER

## HYGENOT – Großskalige hydrogeologische Charakterisierung von Wildbacheinzugsgebieten (Nordtirol)

### *HYGENOT – Large-scale hydrogeological characterisation of alpine torrent catchments (Northern Tyrol)*

#### **Zusammenfassung:**

HYGENOT erweitert die in Osttirol begonnene, detaillierte Kartierung und Charakterisierung untergrund-abhängiger Abflussprozesse auf das gesamte Bundesland Tirol. Das resultierende GIS-Produkt enthält eine Abflusstypenkarte (flächendeckend, mit überarbeiteter Legende), Gerinnenetz (dauerhaft und temporär), Quellen, Vernässungen, Versickerungen, Abrisskanten und erwiesene hydrogeologische Verbindungen zwischen Einzugsgebieten. Die Ergebnisse erlauben es zukünftig wesentlich besser als bisher, die untergrund-abhängigen Prozesse in der Hochwassermodellierung (mittels ZEMOKOST) zu berücksichtigen.

#### **Abstract:**

*HYGENOT extends the detailed mapping and characterization of subsurface-dependent runoff processes started in the Eastern Tyrol to the entire federal state of Tyrol. The resulting GIS product contains the runoff type map (area-wide, with improved classification), channel network (perennial and temporary), springs, marshes, infiltration points, scarp lines, and proven hydrogeological connections between catchments. In the future, the results will allow to consider the subsurface processes in flood modelling (using ZEMOKOST) much better than before.*

#### **Stichwörter:**

Nordtirol, Abflusstyp, Gerinnenetz, Hochwassermodell, Hydrogeologie

#### **Keywords:**

*Northern Tyrol, runoff type classification, channel network, design flood estimation, hydrogeology*

#### **Einleitung**

Die WLW hat in den letzten beiden Jahrzehnten (beginnend 2001), in Zusammenarbeit mit dem Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), der Geologischen Bundesanstalt Wien (GBA) und anderen Forschungsinstitutionen, etliche Projekte (ETALP, NAB, HOPWAP, HOWATI, PSIOT, AlpRetInn) zum Thema der Abflussbildung in Wildbacheinzugsgebieten und deren rechnerischer Nachbildung durchgeführt. Zunächst auf Basis von Bearbeitungen einzelner, kleinerer Einzugsgebiete wurde erkannt, dass die Abflussmodellierung mit ZEMOKOST (Kohl & Stepanek, 2005; Kohl, 2011; Kammerlander et al., 2017) bei Berücksichtigung der Fließsysteme im Untergrund wesentlich verbessert werden konnte. Ein federführend durch Herbert Pirkl (2015; 2016) betreutes Projekt führte zu einer qualitativen (teilweise semiquantitativen) Klassifizierung der unterhalb des Bodens anstehenden geologischen Körper hinsichtlich ihres Abflussverhaltens, angewandt auf die gesamte Fläche Osttirols. Im Projekt AlpRetInn (Posch-Trözmüller, 2016) wurde diese, als (hydrogeologische) „Abflusstypen“ bezeichnete Klassifizierung auf das Inn-Einzugsgebiet angewendet, auf Basis der vorhandenen geologischen Karten der GBA (d.h. die dort ausgeschiedenen geologischen Einheiten wurden klassifiziert). Ergänzungen zu AlpRetInn im Bereich der Nördlichen Kalkalpen (Posch-Trözmüller, 2018) wurden zuletzt im Rahmen von HYGENOT abgewickelt. Sowohl die Pionierarbeit von Pirkl in Osttirol, als auch das Projekt AlpRetInn hatten zudem eine Kartierung von Abbruchkanten u.a. Anzeichen für tiefgründige Massenbewegungen zum Inhalt, in Osttirol darüber hinaus auch eine Kartierung der Quellen und des Gerinnenetzes.

Das Projekt HYGENOT wurde von der WLW, Sektion Tirol, initiiert, einerseits um die in

Osttirol begonnene Abflusstypen-, Gerinne- und Abbruchkantenkartierung auf ganz Tirol auszuweiten, und andererseits um den vorhandenen Ansatz dahingehend auszubauen, dass (a) die Charakterisierung der kalkalpinen Gebiete stärker differenziert, (b) die Quellen und das Gerinnenetz in einer größeren, für die Modellierung geeigneten räumlichen Dichte erfasst, sowie (c) Zusammenhänge zwischen den Abflusstypen im Sinne großskaliger Fließsysteme herausgearbeitet werden. HYGENOT hatte eine Laufzeit von April 2017 bis Dezember 2020.

Als **Grundlagen** der digitalen Kartierung standen zur Verfügung: Das 1x1 m<sup>2</sup> digitale Geländemodell (DGM) und Farborthofoto (jeweils 177 Szenen), die Österreichische Karte 1:50.000 (ÖK50, 1167 Szenen), die Geologische Karte (größtenteils GeoFast) als WMS-Webservice der GBA, die digitalen Ergebnisse des Projektes AlpRetInn der GBA (Posch-Trözmüller, 2016, Ergänzungen 2018), das digitalisierte Gesamtwässernetz Tirol sowie das Wässernetz Innsbruck Land (GMod-Projekt des BFW), Quellen nach WGEV (Excel-Tabelle, Stand 2017), Seen und Beileitungen aus dem Wässernetzsystem (WIS) des Landes Tirol, das Gletscherinventar der LISA-Datenbank (Stand 2018), das Blockgletscherinventar (Excel-Tabelle, Stand 2017), die Braunen Hinweisbereiche der Gefahrenzonenpläne der WLW (Stand 2017), sowie verschiedene Regionalstudien bzw. Fremdkartierungen.

Von der Gesamtfläche Nordtirols (ca. 10.640 km<sup>2</sup>) waren ca. 2.910 km<sup>2</sup> bereits durch Vorprojekte bearbeitet und nicht eigentlich Gegenstand der Untersuchung. Tatsächlich wurde jedoch letztlich um der Einheitlichkeit willen die gesamte Fläche Nordtirols, mit Ausnahme des Paznaun (Pirkl & Riedl, 2006), kartiert.

## Klassifikationssystem; Kartierung

Abbildung 1 zeigt die Klassifizierung in Form der Legende, die mit dem GIS-Polygonlayer Abflusstypen verknüpft ist, mit der zugeordneten Farbcodierung. Sie enthält die Codenummern, auf die im Folgenden allenthalben Bezug genommen wird, sowie kürzestmögliche Benennungen. „Oberflächenabfluss“ ist dabei z.B. so gemeint, dass bei Starkregen überwiegend Oberflächenabfluss eintritt. Im Zuge der Arbeit mit dem beschriebenen Ansatz zeigte sich, v.a. im Bereich der Nördlichen Kalkalpen, dass einige Ergänzungen und eine inhaltliche Neufassung mancher Kategorien (Abflusstypen) notwendig waren, um den Erfah-

### Ablusstypen

#### Festgestein:

- 11 tiefgründig, sehr hoher Rückhalt
- 12 tiefgründig, hoher Rückhalt
- 13 tiefgründig, geringer Rückhalt
- 41 Oberflächenabfluss, hoher Rückhalt
- 42 Oberflächenabfluss, geringer Rückhalt
- 43 Oberflächenabfluss, sehr geringer Rückhalt
- 44 Oberflächenabfluss, kein Rückhalt
- 45 Oberflächenabfluss, hoher bis kein Rückhalt

#### Lockergestein:

- 21 Zwischenabfluss, hoher Rückhalt
- 22 Zwischenabfluss, geringer Rückhalt
- 23 Zwischenabfluss, hoher bis kein Rückhalt
- 30 Oberflächen-/Zwischenabfluss, sehr geringer Rückhalt

#### Sonstiges:

- 50 Oberflächenabfluss auf Feuchtflächen, kein Rückhalt
- 60 Talböden, variabler Rückhalt
- 70 Abfluss auf Eis und Firn, sehr geringer Rückhalt
- ///

Abbildung 1: Untergrund-abhängige Abflusstypen.

Figure 1: Subsurface runoff classes.

rungen Rechnung zu tragen. Zwei Abflusstypen (13 Karst und Bergsturzablagerungen, und 45 tonig-mergelige Sedimentgesteine) wurden neu eingeführt.

Abbildung 2 soll die im Folgenden beschriebene Vorgangsweise in einem Flussdiagramm verdeutlichen. Die Arbeitsschritte sind grundsätzlich im Bild von oben nach unten gereiht, wobei zwei parallele Sequenzen erkennbar sind: Links Abflusstypen-, rechts Gerinnekartierung. Grundlagen und Arbeitsschritte sind hellblau, Ergebnisse himmelblau unterlegt. Uferanrisse und Grundwasserfließlinien sind nicht an eine bestimmte Reihenfolge gebunden.

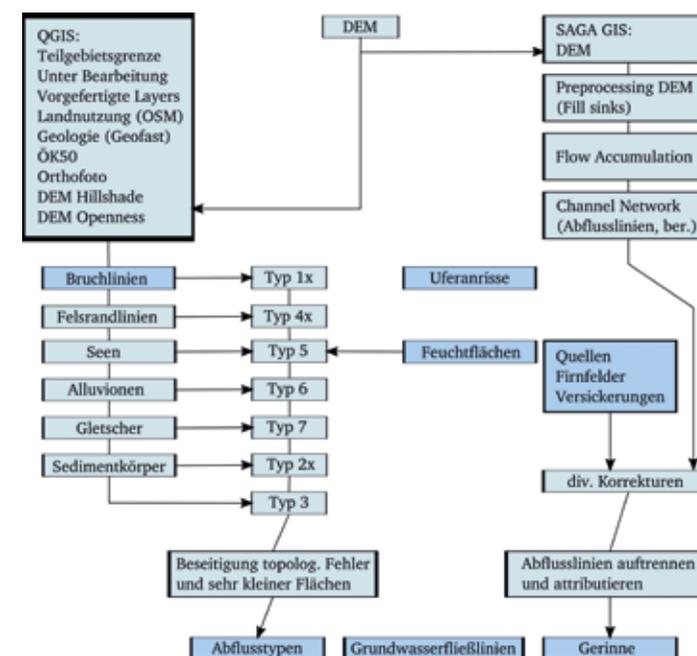


Abbildung 2: Flussdiagramm der Bearbeitungsmethode.

Figure 2: Flow chart of mapping procedure.

Die Kartierung wurde komplett digital durchgeführt, mit folgenden GIS-Programmen in jeweils aktuellen Versionen: ArcGIS (zuletzt Version 10.6), SAGA GIS (7.4) und QGIS (3.12), alle unter Windows 10. Es wurde ein Maßstab von 1:10.000 angestrebt, jedoch war es häufig notwendig, stärker vergrößerte Ausschnitte zu betrachten, d.h. eine Maßstabsebene von 1:5.000 oder 1:2.500, und lokal (zur Verortung einzelner Punkte) sogar noch darüber, zu verwenden. Die Kartierung fand also in einer „mittleren Maßstabsebene“ von 1:2.500 bis 1:10.000 statt.

In jedem Teilarbeitsgebiet wurden zunächst die Bruchlinien (Abbruchkanten, Nackentälchen, Uferanbrüche) kartiert, als Richtschnur zur Eingrenzung der Abflusstypen 11 und 12 (Massenbewegungen, tiefreichende Felsauf-

lockerung). Die bereits durch die GBA kartierten Abbruchkanten wurden übernommen. Es hat sich bewährt, die Abflusstypen in folgender Reihenfolge zu kartieren:

- Typ 11–13: Sind zumeist im Fels, müssen aber vom Typ 4x unterschieden und sollten daher zuerst festgelegt werden. Der neue Typ 13 ergänzt die Abflusstypen 11 und 42, welche tiefgründige Versickerung mit hoher bzw. geringer Retention anzeigen, aber bei Extremniederschlägen doch überwiegend Oberflächenabfluss und i.A. durchgängige Gerinne aufweisen. Typ 13 erfasst demgegenüber Areale, die entweder stark verkarstet sind oder aus anderen Gründen (Bergsturz-Blockwerk) zu einer vollständigen oder

zumindest weitgehenden Versickerung führen, wobei Abflusslinien häufig in abflusslosen Senken enden (die als „Senken“ im Quellenlayer kartiert wurden, s.u.) und durchgehende Gerinne fehlen.

- Typ 41–45: Fels ist im DGM gut erkennbar und die Grenzen sind zumeist leicht nachvollziehbar. Die Zuordnung zu den Unterkategorien war i.A. ohne größere Schwierigkeiten möglich. Typ 45 wurde aus dem Typ 43 ausgegliedert, speziell um Schichtkomplexe wie Partnach- oder Allgäuschichten von Gesteinskomplexen des Typs 41 abzutrennen (nicht vermergelte Sandsteine verblieben dort). Diese beiden Typen (41 und 45) unterscheiden sich zwar nicht wesentlich im Gerinnenetz, jedoch im Abflussverhalten.
- Typ 50–70: Alluvionen (Typ 60) waren durch ihre charakteristische Morphologie ebenfalls leicht zu erfassen. Für Seen und Gletscher (Typ 50 bzw. 70) gab es die erwähnten Inventare, die grundsätzlich übernommen werden konnten. Wegen des aktuellen Gletscherrückzugs haben sich jedoch viele Gletschergrenzen stark verschoben und mussten neu gezogen werden, und zahlreiche kleine Seen wurden hinzugefügt. Größere Seen sind häufig von Feuchtfächen (ebenfalls Typ 50) umgeben und die Abgrenzung der Gesamtfläche aus See und Sumpf (Feuchtfäche) in diesen Fällen größer als der eigentliche See. Zum Teil konnte die Information aber unverändert übernommen werden.
- Typ 21–23 (glazigene Lockersedimentkörper, Schwemmkegel, ältere Talfüllungen): Die Abgrenzung dieser Kategorien war nicht selten problematisch.

Am leichtesten sind morphologisch charakteristische Einheiten wie Blockgletscher, Eisrandterrassen (zu Typ 21) oder Schwemmkegel (zu Typ 23) zu kartieren, wo jedoch Schuttschürzen (zu Typ 22) gegen mächtigere Sedimentkörper oder Typ 30 angrenzen, ist oft schwer festzulegen.

- Typ 30: Diese Kategorie wurde zugeordnet, wo sich im DGM gewissermaßen ein geringmächtiger Schleier über den eindeutig erkennbaren Felsen legt, und nicht die bis dahin festgelegten, o.a. Kategorien vorliegen.

Es konnte letztlich eine lückenlose Kartierung der untergrund-abhängigen Abflusstypen erreicht werden. Zuletzt mussten verschiedene topologische Unstimmigkeiten, z.B. kleine Überlappungen, keilförmige „Restpolygone“ oder lokale Selbstüberschneidungen, bereinigt werden. Polygone < 50 m<sup>2</sup> wurden mit Nachbarpolygonen vereinigt.

#### Quellen und Gerinne

Gerinne wurden wie allgemein üblich in dauerhaft (perennierend) und zeitweilig (temporär) klassifiziert. Wenn beide Kategorien auf einer Abflusslinie vorkommen, dann sind i.A. an den Grenzpunkten entweder eine Quelle oder eine Versickerung anzunehmen. Versickerungen sind selten punktgenau lokalisierbar, es sei denn, die Abflusslinie endet in einer abflusslosen Senke. Diese Senken sind in den Nördlichen Kalkalpen besonders häufig und wurden nur dort systematisch kartiert. Das gilt ebenfalls für „Quellen“ (Gerinneursprünge), die nicht auf Exfiltration, sondern auf dauerhafte Eis- und Firnfelder (häufig in Schattenlagen und unter Schuttbedeckung) zurückzuführen sind. Diese wurden ebenfalls in

den Punktlayer Quellen aufgenommen. Daraus ergab sich in den Nördlichen Kalkalpen eine vierfache Kategorisierung dieses Layers: (1) Quelle (im üblichen Sinn) – Eine Unterteilung nach Abflussmenge wurde nicht versucht, weil eine Beurteilung im Orthofoto problematisch ist. Das liegt u.a. daran, dass Quellen häufig (meist unter Vegetationsbedeckung) nur erschlossen werden können und nicht eigentlich sichtbar sind; (2) Versickerung – Diese Kategorie ist nicht für die Kartendarstellung gedacht, sondern diente zur Orientierung bei der Auftrennung der Abflusslinien in zeitweilige und dauerhafte Gerinne; (3) Senke – Vier Arten von abflusslosen Senken wurden beobachtet: Karstdolinen, Gipsdolinen, Toteislöcher, und sonstige, z.B. durch den Gletscherschliff erzeugte Senken. Diese Typen können fast immer aus dem Vergleich mit den Abflusstypen erschlossen werden, konkret sind die ersten drei Arten i.A. an die Abflusstypen 42, 45 bzw. 21 gebunden; (4) Firnfeld – Gekennzeichnet wurde der Ursprung eines (zumeist dauerhaften) Gerinnes am unteren Rand eines in der ÖK50 eingezeichneten oder im Orthofoto ersichtlichen, in der warmen Jahreszeit fortbestehenden, Firn- bzw. Eisfeldes.

Die Gerinne wurden anfangs händisch nachgezeichnet, Versuche mit berechneten Gerinnen schienen zu viel Korrekturarbeit nach sich zu ziehen. Besonders störend für die Berechnung sind Straßen, die quer über die Hänge verlaufen oder in Serpentinaen angelegt sind. Sie leiten den Routing-Algorithmus oft auf falsche Bahnen, lassen ihn im ursprünglichen Graben erst weiter unten wieder beginnen, und es müssen zahlreiche Gerinne geschnitten und neu verknüpft werden.

Trotzdem wurde im überwiegenden Kartiergebiet diese Methode als erster Schritt angewendet, weil der Computer rationaler arbeitet und keine Müdigkeit kennt, sich am Ende ein dichteres und qualitativ besseres Gerinnenetz ergibt. Auch

ist die wirkliche Gefällrichtung am Höhenmodell (Hillshade) nicht immer zu erkennen. Die Berechnung des Channel Networks wurde in SAGA GIS, die anschließende Bereinigung in QGIS durchgeführt. Der berechnete Linienlayer wurde vereinfacht, um treppenartige Verläufe zu beseitigen, die die Abflusslänge unnötig erhöhen. Die Korrekturen im nächsten Schritt waren umfangreich, bestanden technisch jedoch aus Standardoperationen im GIS. In diesem Schritt wurden Teilstrecken des vorhandenen Gesamtwässernetzes, insbesondere im Bereich der Alluvionen und an Teilgebietsgrenzen, eingebaut, ggf. aber auch korrigiert. Die Quellen und Versickerungen dienten im Folgenden als Schnittpunkte zur Auftrennung der Gerinne in perennierend und temporär.

#### Abbruchkanten

Abbruchkanten sind in drei Kategorien eingeteilt: Abbruchkante (i.e.S.), Nackentälchen und Uferanbruch. Die ersten zwei haben die allgemein bekannte Bedeutung als Anzeichen für Hangbewegungen. Das Augenmerk lag dabei auf tiefreichende, langsame Massenbewegungen und Felsauflockerungszonen, und somit auf der Ausscheidung der Abflusstypen 11 und 12. Unter der Kategorie Uferanbruch wurden Steilabbrüche und Erosionskanten entlang der Gerinne kartiert, als Hinweise auf eine Unterschneidung von Prallhängen.

#### Ergebnisse: Gerinne- und Abflusstypenkarte

Das GIS-Kartenwerk besteht aus folgenden Layern: (1) Polygonlayer Abflusstypen, attribuiert nach der erweiterten Legende, Abb. 1; (2) Linienlayer Abbruchkanten, klassifiziert in „Abbruchkante“, „Nackentälchen“, und „Uferanbruch“; (3) Polygonlayer Feuchtfächen: Diese entsprechen i.A. dem Typ 50 der Abflusstypenkarte, wobei in

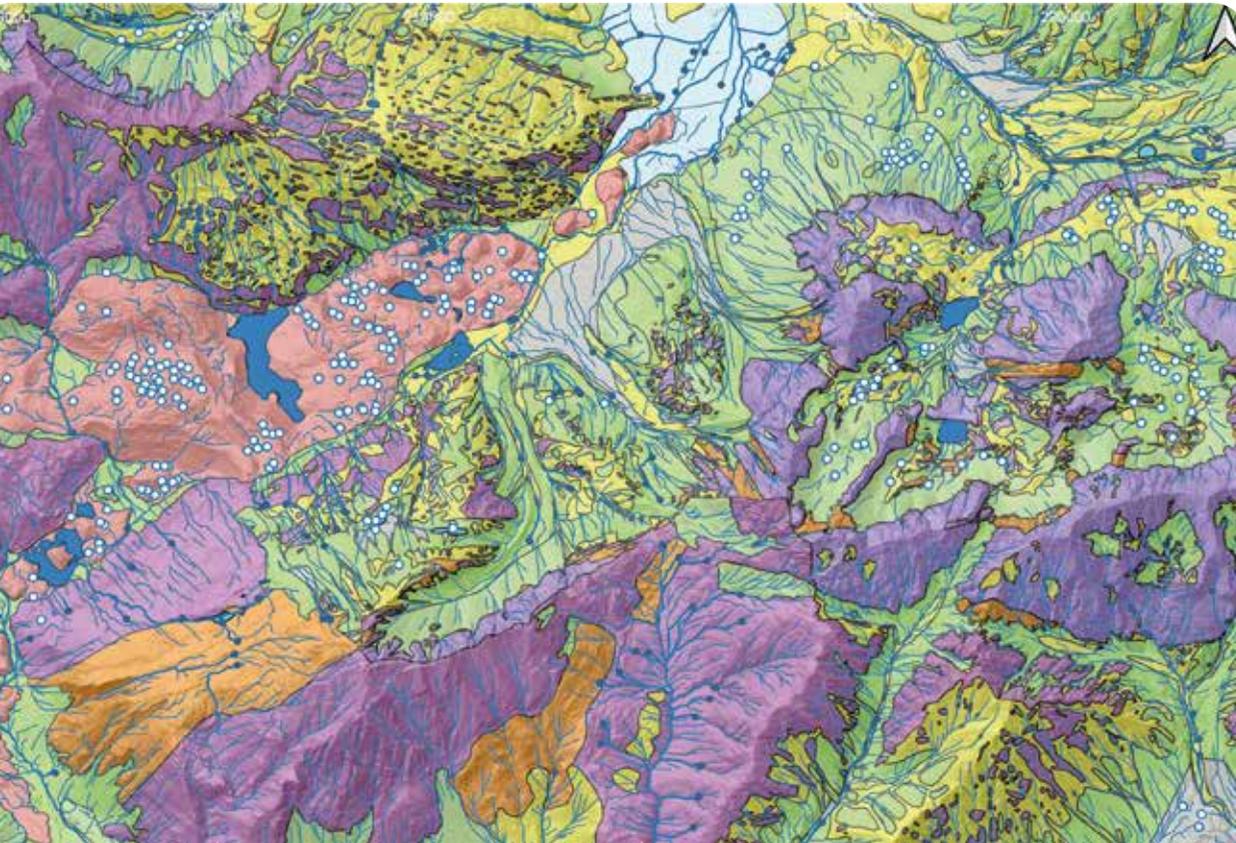


Abbildung 3: Karte der untergrund-abhängigen Abflusstypen, Ausschnitt Umgebung Fernpass–Ehrwald.

Figure 3: Map of subsurface-dependent runoff types, around Ehrwald and the Fernpass.

einem Teilgebiet (Kühtai) eine komplette, unabhängige Kartierung angefertigt wurde, die auch nicht dauerhaft vernässte Flächen umfasst (dieser Ansatz konnte u.a. aus Zeitgründen nicht weiter verfolgt werden); (4) Punktlayer Quellen, in den Kalkalpen mit Einträgen für „Firnfeld“ (Gewässerursprung ohne Exfiltration), „Versickerung“, und (abflusslose) „Senke“; (5) Linienlayer Gerinne, perennierend und temporär; (6) Linienlayer Grundwasserfließlinien: Linien, die unterirdische Verbindungen zwischen oberirdischen Einzugsgebieten anzeigen (Infiltrations- und Exfil-

trationsgebiet gehen aus der Höhenlage der Endpunkte hervor).

Alles in allem wurden ca. 218.000 Polygone kartiert. Von der Gesamtfläche entfallen ca. 28 % auf Sedimentkörper vom Typ 21–23. Für diese gibt es nun zum ersten Mal eine flächendeckende Erfassung. Im Quellenlayer wurden in Summe ca. 31.000 Punkte (zum größten Teil Quellen) erfasst. Auf etwas mehr als 10.000 km<sup>2</sup> ergibt dies eine durchschnittliche kartierte Quelldichte von ca. 3/km<sup>2</sup>. Die Zahl vor allem kleiner Quellaustritte ist in der Natur wesentlich höher.

Abbildung 3 illustriert das Ergebnis an einem Ausschnitt der Abflusstypenkarte der Umgebung Fernpass–Ehrwald (der Fernpass ist links, Ehrwald oberhalb der Bildmitte; Überlagerung des DEM mit den Abflusstypen, ohne Bruchlinien, Ausschnittsbreite ca. 18 km). Hinsichtlich der erkennbaren Zusammenhänge, Analyse- und Kartierkriterien heben wir hervor:

- Die in diesem Fall zahlreichen Senken (Ringsignatur mit weißer Füllung) sind von verschiedener Art, Schlucklöcher im Bereich der Bergsturzmasse (Typ 11, rot), Toteislöcher im Bereich der Moränen- und Eisrandablagerungen (größtenteils Typ 21, graugrün), und wahrscheinlich Gipsdolinien in Bereichen mit Evaporitführenden Schichtkomplexen (Typ 45, orange). Ein Blick auf die geologische Karte verrät normalerweise, worum es sich handelt, und daher (und auch weil die Unterscheidung nicht immer eindeutig ist) wurden diese Unterklassen nicht attribuiert.
- Quellen sind vielfach (durchaus nicht immer) an Mittelhängen vom Typ 41 (rotviolett) vorhanden, keine einzige Quelle jedoch im Bereich von Typ 42 (blauviolett). Die Kalksteinserien vom Typ 42 sind nicht verkarstet, sonst wären auch in diesen Flächen Senken eingetragen.
- Gerinne im Bereich der mächtigeren Sedimentkörper (bes. Typ 21) sind häufig relativ spärlich oder unterbrochen (können nicht durchgezeichnet werden). Das trifft auch auf die Schwemmkegel (Typ 23) zu, wobei diese Gerinne hangabwärts divergieren. Auf den Schwemmkegeln beginnen auch Gerinne, d. h. treten

gelegentlich temporäre Quellen auf, die auch eingetragen wurden, wenn deutliche (zumeist trockene) Quellnischen vorhanden sind, was in diesem Beispiel nicht der Fall ist.

- Die tonig-mergeligen Sedimentgesteine (Typ 45) unterscheiden sich im Gerinnenetz nicht wesentlich vom Typ 41. Sie wurden trotzdem ausgeschieden, weil sich die beiden Typen in der Abflussbildung deutlich unterscheiden können, indem bei Typ 45 der Kontrast zwischen anfänglicher Retention und späterer Sättigung mit Übergang zu fast reinem Oberflächenabfluss wesentlich stärker ausgeprägt ist.

#### Diskussion: Hydrogeologie der Abflusstypen

In der Niederschlag-Abflussmodellierung dient das Gerinnenetz zur Festlegung der Abflusswege, aber es muss auch in einer Dichte vorliegen, sodass die räumliche Verteilung der Abflusslängen zum jeweils nächsten Gerinne für alle Teileinzugsgebiete realitätsnah abgebildet werden kann. Dies sollte mit der im Zuge des Projekts HYGENOT durchgeführten Gerinnenmodellierung und -kartierung erreicht werden. Eine weitere, damit noch nicht beantwortete Frage stellt sich jedoch hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit des Abflusses. Für den oberflächennahen Abfluss gibt es hinreichend Erfahrungen und Kennwerte, aber welchen Einfluss hat die Grundwasserströmung, verbunden mit Exfiltration in tieferliegenden Abschnitten des Einzugsgebietes, auf das Gesamtabflussverhalten? Es liegt kein Datenmaterial vor, das auch nur annähernd im Umfang sowie im Plausibilitätsgrad mit den zahlreichen Untersuchungen an der Oberfläche zur Festle-

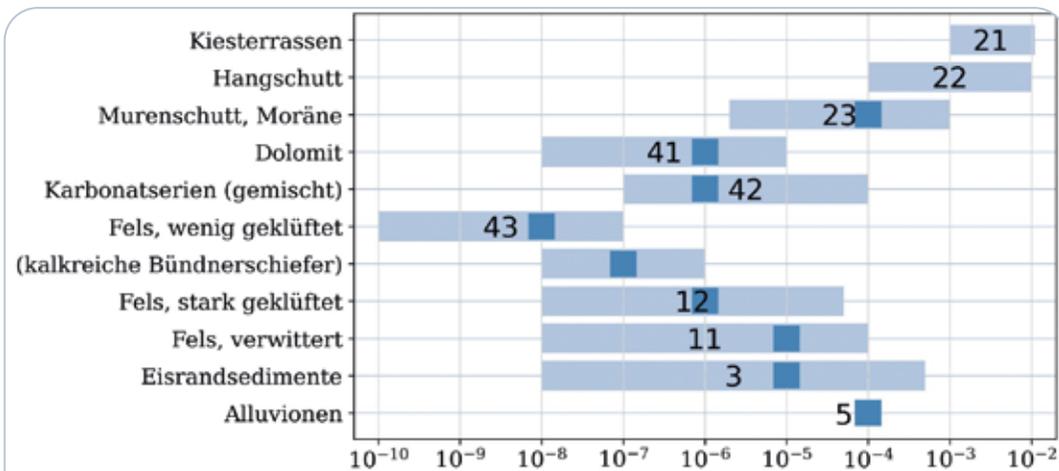


Abbildung 4: Zuordnung Abflusstypen – hydraulische Durchlässigkeit (m/s).

Figure 4: Correspondence between runoff types and hydraulic permeability (m/s).

gung von Abflussbeiwerten, einschließlich Beregnungsversuchen und Modellierung, vergleichbar ist, und es müssen die üblichen hydrogeologischen Kennwerte, die geologisch bedingt eine sehr große Schwankungsbreite aufweisen, herangezogen werden. Die hydrogeologische Komplexität des Untersuchungsgebietes wird durch die räumliche Variabilität der – und Wechselwirkung zwischen den – Aquifertypen maßgeblich beeinflusst. Häufig sind Klufgrundwasserleiter, Karst- und Porenaquifere durch dreidimensionale Geometrien mit unterschiedlichen Randbedingungen gekennzeichnet. Die Festlegung der hydraulischen Durchlässigkeit ist i.A. nur dimensionsmäßig möglich, aber zumeist besser abschätzbar als die weiteren Speichereigenschaften. Wenn Messdaten nicht verfügbar sind, könnte – auf Basis des nun vorliegenden Datenmodells – etwa der Gradient in erster Näherung aus dem Geländemodell abgeleitet, das flächenbezogene Speichervermögen aus der durchschnittlichen Mächtigkeit des Grundwasserleiters und der effektiven Porosität abgeleitet werden.

Abbildung 4 unternimmt den Versuch, in der Literatur genannte minimale, maximale und typische Durchlässigkeiten für Gesteinsserien, die im Untersuchungsraum vorkommen, den Abflusstypen zuzuordnen (charakteristische Werte als dunkelblaue Quadrate). Verwendet wurden Überblickswerke (Walton, 2006; Langguth & Voigt, 2013; Hölting & Coldewey, 2019), regionale Untersuchungen (Achtziger-Zupancic et al., 2017; Hendry, 1982; Clow et al., 2003; Dewandel et al., 2006; Hildebrandt, 2018; Masset & Loew, 2010; Muir et al., 2011; Pirkl, 2012, 2016; Strauhal et al., 2016a, 2016b; Zangerl et al., 2009), und Einschätzungen, die sich in den UVP-Unterlagen zum Brenner Basistunnel finden. Naturgemäß werden nirgends Werte genannt, die direkt auf die kartierten Abflusstypen zutreffen. Es bedarf einer Interpretation aus der Erfahrung der Autoren, und diese wird durch die Abbildung offengelegt. Bei den Festgesteinen gelten die Minimalwerte für das Gestein mit primärer Klüftung oder Porosität, die Maximalwerte für tektonisch zerscherte Zonen. Bei den Alluvionen sind auf Grund der sedimen-

tären Schichtung die vertikale und horizontale Durchlässigkeit oft sehr verschieden, es wird daher ein charakteristischer Wert der horizontalen Durchlässigkeit angegeben.

In welcher Weise die den Abflusstypen zugeordneten Gesteinskomplexe in einem typischen, im Hochgebirge vielfach verwirklichten Fließsystem verknüpft sind, wird durch das konzeptionelle, hydrogeologische Schema in Abbildung 5 illustriert. Um die groben, literaturbelegten Vorstellungen betreffend den relativen Abflussbeitrag der Abflusstypen und die Reaktionsweise eines solchen, typischen Fließsystems rechnerisch zu untermauern, wurden numerische Modellierungen ausgewählter zweidimensionaler Profilschnitte mit der Software SEEP/W (Geoslope, Calgary, Canada) durchgeführt (Auinger, 2020, und Mitterlehner, 2020). Die räumliche Vertei-

lung der Druckhöhen und zeitliche Verzögerungen zwischen Niederschlags- und Abflussganglinie waren rechnerisch recht gut nachvollziehbar und entsprachen den Aussagen des konzeptionellen Modells. In jedem Fall geht hervor, dass i.A. bei Extremniederschlägen nur die über der Fels-oberfläche liegenden Sedimentkörper sowie die bestenfalls wenige Zehnermeter unter die Fels-oberfläche reichenden Felsauflockerungs- oder Felsübergangszonen einen wesentlichen Einfluss auf den Abfluss innerhalb des zeitlichen „Ereignishorizontes“ von einigen Tagen haben. Ausreichende Durchlässigkeit in wesentlich größeren Tiefen (bis etliche 100 m) haben dagegen hohlraumreiche Gesteinskörper wie z.B. Karstaquifere (Typ 13; der unterirdische Abfluss erscheint unter Umständen nur wenige Stunden nach Beginn eines Starkniederschlags in Quellen, die dann das

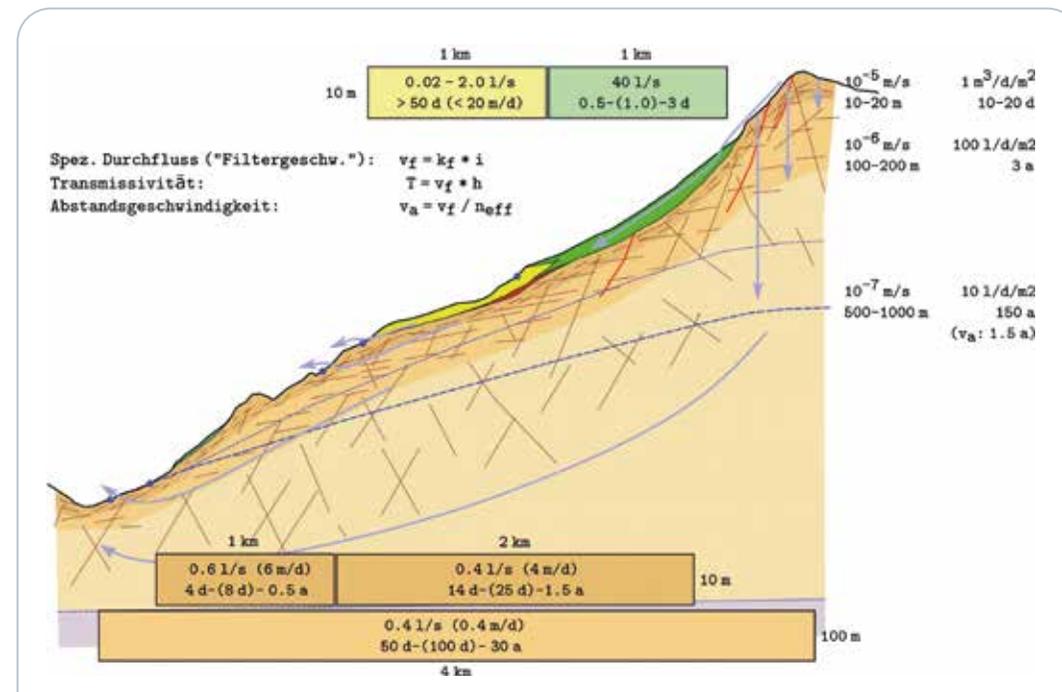


Abbildung 5: Konzeptionelles hydrogeologisches Schema eines typischen Wildbacheinzugsgebietes.

Figure 5: Conceptual hydrogeologic schematic of a typical Alpine torrent catchment.

10- oder sogar das 100-fache ihrer Trockenwetterschüttung abgeben), sowie durch Massenbewegung tiefgründig stark aufgelockerte Felspartien (Typ 11; das tiefgründig versickerte Wasser erst nach dem Hochwasser und wird in der Modellierung nicht weiter berücksichtigt).

Trotz der erwähnten Einschränkungen im Einzelnen erlauben es die erarbeiteten Grundlagen, zukünftig wesentlich besser als bisher, den Einfluss des untergrund-abhängigen Abflusses und seiner räumlichen Verteilung über Einzugsgebiete abzuwägen und in der Hochwassermodellierung zu berücksichtigen.

#### **Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:**

Dr. Wolfgang Straka  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Angewandte Geologie  
Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
wolfgang.straka@boku.ac.at

Dr. Thomas Strauhal  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Angewandte Geologie  
Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
thomas.strauhal@boku.ac.at

Univ.Prof. Dr. Christian Zangerl  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Angewandte Geologie  
Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
Christian.j.zangerl@boku.ac.at

Meinhard Pittracher  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Angewandte Geologie  
Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
meinhard.pittracher@boku.ac.at

Dr. Bernhard Kohl  
Bundesforschungszentrum für Wald  
Rennweg 1, Hofburg, 6020 Innsbruck  
bernhard.kohl@bfw.gv.at

Dr. Gerhard Markart  
Bundesforschungszentrum für Wald  
Rennweg 1, Hofburg, 6020 Innsbruck  
gerhard.markart@bfw.gv.at

Ing. Mag. Dr. techn. Thomas Sausgruber  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Thomas.Sausgruber@die-wildbach.at

DI Leopold Stepanek  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Leopold.Stepanek@die-wildbach.at

Dr. Johannes Kammerlander  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Johannes.Kammerlander@die-wildbach.at

DI Monika Kals  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Monika.Kals@die-wildbach.at

DI Manfred Pittracher  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
manfred.pittracher@aon.at

#### **Literatur/References:**

- ACHTZIGER-ZUPANCIC, P., LOEW, S., MARIETHOZ, G. (2017). A new global database to improve predictions of permeability distribution in crystalline rocks at site scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 3513–3539.
- AUINGER, G. (2020). Hydrogeologische Analyse und numerische Modellierung der Massenbewegung Misljoch/Navistal. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- CLOW, D.W., SCHROTT, L., WEBB, R., CAMPBELL, D.H., TORIZZO, A., DORNBLASER, M. (2003). Ground Water Occurrence and Contributions to Streamflow in an Alpine Catchment, Colorado Front Range. *Groundwater*, 41, 937–950.
- DEWANDEL, B., LACHASSAGNE, P., WYNS, R., MARÉCHAL, J.C., KRISHNAMURTHY, N.S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330, 260–284.
- HENDRY, M.J. (1982). Hydraulic Conductivity of a Glacial Till in Alberta. *Groundwater*, 20, 162–169.
- Hildebrandt, J. (2018). Hydrologische Bilanzierung und Abflussmodellierung der Großhangbewegung Misljoch im Navistal, Tirol, Österreich. Masterarbeit, Univ. Innsbruck.
- HÖLTING, B., COLDEWEY, W.G. (2019). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Springer-Verlag.
- KAMMERLANDER, J., EGGER, M., KOHL, B. (2017). PRAXISLEITFADEN Niederschlag-Abfluss Modellierung in der Wildbachverbauung, Teil ZEMOKOST. BMLFUW, Abt. III/5 Wildbach- und Lawinenverbauung, Wien.
- KOHL, B. (2011). Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. Dissertation, Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck.
- KOHL, B., STEPANEK, L. (2005). ZEMOKOST–neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *BFW-Praxisinformation*, 8, 21–22.
- LANGGUTH, H.R., VOIGT, R. (2013). *Hydrogeologische Methoden*. Springer-Verlag.
- MASSET, O., LOEW, S. (2010). Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. *Hydrogeology Journal*, 18, 863–891.
- MITTERLEHNER, S. (2020). Hydrogeologische 2D-Modellierung alpiner Hangflanken. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- MUIR, D.L., HAYASHI, M., MCCLYMONT, A.F. (2011). Hydrological storage and transmission characteristics of an alpine talus. *Hydrological Processes*, 25, 2954–2966.

PIRKL, H. (2012). Untergrundabhängige Abflussprozesse. Kartierung und Quantifizierung für das Bundesland Tirol Flächendeckende Aufnahme Osttirols. Endbericht, im Auftrag von: Amt der Tiroler Landesregierung, Hydrographie und Hydrologie, Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, GeoÖko Techn. Büro für Geologie, Wien.

PIRKL, H. (2016). Multidisziplinäres Verständnis alpiner Wildbacheinzugsgebiete. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 114, Wien.

PIRKL, H., RIEDL, F. (2006). Projekt HOPWAP. Hochwasser Paznaun 2005. Wald-Abfluss-Potentiale. Hydrogeologische Grundlagen für die Hochwassermodellierung Paznaun. Endbericht, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, Innsbruck.

PIRKL, H., SAUSGRUBER, T. (HRSG.) (2015). Handbuch zur qualitativen und quantitativen Erfassung untergrundabhängiger Abflüsse in Wildbacheinzugsgebieten. Wildbach- und Lawinenverbauung, Stabstelle Geologie, Innsbruck.

POSCH-TRÖZMÜLLER, G. (2016). AlpRetInn - Auswirkung alpiner Retention auf die Hochwasserabflüsse des Inn: Adaptierung und Ergänzung der Lockergesteinskarte und erweiterte Interpretation zur Darstellung untergrundabhängiger Abflusstypen in ausgewählten Einzugsgebieten Tirols. Endbericht AlpRetInn-GBA, im Auftrag des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Geologische Bundesanstalt, Wien.

POSCH-TRÖZMÜLLER, G. (2018). HYGENOT - Erweiterte Abflussbeiwertkarte für Nordtirol – Hydrogeologie: Ergänzung der Karte „Untergrundabhängige Abflusstypen im Einzugsgebiet des Inns“ um die Einzugsgebiete des Lechs und der Großache in Nordtirol und Verbesserung des bestehenden Kartenteiles in Bereichen mit ungenügenden geologischen Grundlagenkarten. Endbericht, im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, Geologische Bundesanstalt, Wien.

STRAUHAL, T., PRAGER, C., MILLEN, B., SPÖTL, C., ZANGERL, C.J., BRANDNER, R. (2016a). Aquifer geochemistry of crystalline rocks and Quaternary deposits in a high altitude alpine environment (Kauner Valley, Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 109, 29–44.

STRAUHAL, T., LOEW, S., HOLZMANN, M., ZANGERL, C.J. (2016b). Detailed hydrogeological analysis of a deep-seated rockslide at the Gepatsch reservoir (Klasgarten, Austria). *Hydrogeology Journal*, 24, 349–371.

WALTON, W.C. (2006). *Aquifer Test Modeling*. CRC Press.

YOKOYAMA, R., SHIRASAWA, M., PIKE, R.J. (2002). Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68, 257–265.

ZANGERL, C.J., PRAGER, C., CHWATAL, W., MERTL, S., RENK, D., SCHNEIDER-MUNTAU, B., KIRSCHNER, H., BRANDNER, R., BRÜCKL, E., FELLIN, W., TENTSCHERT, E., EDER, S., POSCHER, G., SCHÖNLAUB, H. (2009).

Process-based investigations and monitoring of deep-seated landslides. In: Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments (Veulliet, E., Stötter, J., Weck-Hannemann, H., Hrsg.). Springer, Berlin, Heidelberg, 135–178.

**BERNHARD KOHL, GERHARD MARKART, MANFRED PITTRACHER,  
LEOPOLD STEPANEK, JOHANNES KAMMERLANDER, GEBHARD WALTER,  
WOLFGANG STRAKA, THOMAS STRAUHAL, CHRISTIAN ZANGERL**

## PSINOT – Abflussbeiwertkarte Nordtirol

### *PSINOT – Surface runoff coefficient map Northern Tyrol*

#### **Zusammenfassung:**

Für die Bemessung von Wildbacheinzugsgebieten hat sich die Niederschlag/Abfluss-Modellierung zur Gefahren- und Maßnahmenplanung etabliert. Erforderliche Modellparameter sind jedoch meist unzureichend vorhanden. Mit dem Projekt PSINOT wurde im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV), Sektion Tirol, eine standardisierte, einheitliche und verbesserte Datengrundlage (Oberflächenabflussbeiwerte, Oberflächenrauheitsklassen) flächendeckend für ganz Nordtirol geschaffen. Durch Verschneidung mit Daten der „Großskaligen hydrogeologischen Charakterisierung von Fließsystemen in Wildbacheinzugsgebieten“ (HYGENOT) wurde die Datengrundlage zu Oberflächen- und Zwischenabfluss deutlich verbessert. Die Daten sind kompatibel mit dem QGIS Tool „Aufbereitung\_ZEMOKOST“ und werden in den Wildbach- und Lawinenkataster (WLK) der WLV eingepflegt.

#### **Stichwörter:**

Abflussbeiwert,  
Oberflächen-  
rauheit,

Wildbachhydrologie,  
Niederschlag-Abfluss-Model-  
lierung, ZEMOKOST

#### **Abstract:**

*For the design of torrent catchments, precipitation/runoff modelling has become established for hazard and action planning. However, required model parameters are mostly insufficiently available. With the PSINOT project, a standardized, uniform and significantly improved data basis (surface runoff coefficients, surface roughness classes) was created on behalf of the Forest Engineering Service in Torrent and Avalanche Control (WLV), Tyrol Section, covering the whole of Northern Tyrol. By intersection with data of the "Large-scale hydrogeological characterization of flow systems in torrent catchments (HYGENOT) the data basis on surface and interflow was significantly improved. The data are compatible with the QGIS tool "Aufbereitung\_ZEMOKOST" and will be held available in the torrent and avalanche register (WLK) of the WLV.*

#### **Keywords:**

*Runoff coefficient, surface roughness, torrent hydrology, precipitation runoff modelling, ZEMOKOST*

#### **Einleitung**

Für Niederschlag/Abfluss-Modellierungen werden besonders in unbeobachteten Einzugsgebieten hinreichend genaue Eingangsparameter benötigt. Viele Ansätze, darunter auch das N/A-Modell ZEMOKOST (Kohl & Stepanek, 2005; Kohl, 2011; Kammerlander et al., 2017), verwenden für die Berechnung von Abflussbildung und -konzentration als maßgebliche Parameter den Oberflächen-Abflussbeiwert (Verlustkonzept), die Oberflächenrauheit sowie für den Abfluss im Untergrund einen Zwischenabflussanteil und einen Faktor für dessen Geschwindigkeit.

Aus diesen Informationen und den Angaben zum geologischen Untergrund lassen sich differenzierte und genauere Angaben zu wildbachrelevanten Abflussprozessen (Oberflächenabfluss und rascher Zwischenabfluss) ableiten. Solche Flächeninformationen, z.B. Karten von Abflussprozesstypen oder bodenhydrologischen Kennwerten, sind derzeit in Österreich nur für wenige größere Gebiete vorhanden. Um diesem Mangel entgegenzutreten, wurde seitens des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) 2017 für Osttirol im Projekt PSINOT eine flächendeckende Bearbeitung dieser hydro(geo)logischen Parameter initiiert. PSINOT stützte sich auf zwei wesentliche Vorarbeiten. Zum einen baute das Projekt auf die Arbeiten von Kohl & Sotier (2016) auf, die im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung (Abteilung Wasserwirtschaft, Sachgebiet Hydrographie und Hydrologie) in regionalem Maßstab einen bodenhydrologischen Datensatz für ein Wasserhaushaltsmodell im Einzugsgebiet der Drau erarbeiteten.

zum anderen auf die Arbeiten von Herbert Pirkl (2012, 2015, 2016), der für Osttirol flächendeckend untergrundabhängige Abflussprozesse kartierte und quantifizierte.

Diese Informationen zum geologischen Untergrund und zum Boden stellen ideale Datengrundlagen dar, aus denen durch Verschneidung mit anderen Oberflächen- und Untergrundinformationen aufwand- und kostengünstig Oberflächen-Abflussbeiwertkarten und Oberflächen-Rauheitskarten sowie optimierte Karten für den Zwischenabfluss (Zwischenabflussanteile und Faktor für die Zwischenabfluss-Geschwindigkeit) für Osttirol abgeleitet werden konnten. Solche Parameter erlauben es nun, die N/A-Modellierung in Wildbacheinzugsgebieten von rein konvektiven Starkregen auch auf kritische Langzeitregen auszuweiten, bzw. machen erst die Berechnung von Zwischenabfluss möglich. Der Datenkomplex wurde im Projekt PSINOT an sechs unterschiedlichen Wildbacheinzugsgebieten erfolgreich validiert.

Mit geringerem Adaptierungsaufwand ließ sich dieser methodische Ansatz der Integration raumrelevanter Daten, (v.a. eBOD – landwirtschaftliche Bodenkarte, Daten der Waldtypisierung Tirol) und der Zusammenführung der Datensätze für Oberflächenabfluss mit Daten untergrundabhängiger Prozesse im gegenständlichen Projekt PSINOT flächendeckend auf Nordtirol ausdehnen.

Als Ziele des Projektes PSINOT wurden definiert:

1. Die Erstellung einer für die Einpflege in den WLK der WLV angepassten „Erweiterten Abflussbeiwertkarte“ flächendeckend für ganz Nordtirol als Grundlage für die N/A-Modellierung mit dem Modell ZEMOKOST.

2. Die Erhöhung der Nachvollziehbarkeit von N/A-Modellierungen in Wildbacheinzugsgebieten durch standardisierte, einheitliche und verbesserte Datengrundlagen (Abflussbeiwerte, Rauigkeit).
3. Die Verbesserung der Datengrundlagen durch Verschneidung mit Daten der hydrogeologischen Abflusstypenkarte für Nordtirol (HYGENOT; Straka et al. in diesem Heft) und
4. Die Kompatibilität dieser Daten mit dem QGIS Tool „Aufbereitung\_ZEMOKOST“.

### Datengrundlagen

Für die flächendeckende Zuordnung von Abflussbeiwerten (Oberflächen-Abflussklasse AKL) und Oberflächenrauheit (Rauheitsklasse RKL) wurden mehrere Datensätze miteinander verschnitten. Die unterste Ebene bildet die Realraumanalyse Österreichs nach SEGER (2001). Für diesen Datensatz

wurden am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Klagenfurt mittels eines Typen-Schlüssels (Realraumtypen) Nutzungs- und Oberflächentypen anhand von Satellitenbildern, topographischen und thematischen Datengrundlagen sowie zusätzlichen räumlichen Informationen erfasst. Der daraus resultierende thematische Landnutzungsdatensatz und die entsprechende Landnutzungskarte beinhalten für Nordtirol 81 verschiedene Nutzungsklassen.

Als weitere Datengrundlage zur Differenzierung der Realraumtypen (SEGER-Daten) wurde der Datensatz „HYGENOT Erweiterte Abflussbeiwertkarte für Nordtirol – Hydrogeologie“ herangezogen (Straka & Zangerl, 2021). Die darin ausgewiesenen 15 (hydrogeologischen) Abflusstypen wurden mit den Realraumtypen verschnitten. Letztlich beinhaltet der resultierende PSINOT Layer 682 Kategorien aus dieser Verschneidung mit einem Landesflächenanteil von 45 % (vgl. Tab.1).

OBJEKT	Typen	Entitäten	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Fläche
SEGER / HYGENOT	682	723.502	4.754	45 %
HYGENOT Gletscher	1	914	235	2 %
Bodenkarte eBOD	924	76.306	821	8 %
Waldtypenkatalog	166	368.118	4.462	42 %
Infrastruktur	21	403.862	371	3 %
Summe	1.794	1.572.702	10.643	100 %

Tabelle 1: Anzahl der Klassen, Einheiten und Flächenanteile der verwendeten PSINOT Datengrundlagen.

Table 1: Number of classes, units, and the proportional areal coverage of PSINOT base data.

Als nächste Verschneidungsebene wurden die Gletscherflächen aus HYGENOT (Abflusstyp 70) überlagert. Sie repräsentieren gegenüber den Landnutzungsdaten den deutlich aktuelleren Stand. Die aus der Verschneidung verbliebenen, ehemaligen Eisflächen des SEGER-Datensatzes wurden mittels Nachbarschaftsbeziehung dem Felsgelände oder Geröllhalden zugeordnet.

Eine weitere Ebene der PSINOT Verschneidungshierarchie bildet die digitale Bodenkarte Österreichs (eBOD; BFW, 2020). Die digitale Bodenkarte Österreichs nimmt mit einer Fläche von 821 km<sup>2</sup> 8 % der Gesamtfläche Nordtirols ein. Aus der eBOD wurden 924 unterschiedliche Bodenformen mit insgesamt 76.306 Entitäten bewertet.

Der Datensatz der Waldtypisierung Tirol (ATLR – Amt der Tiroler Landesregierung, 2020) deckt für PSINOT in Nordtirol eine Fläche von 4.462 km<sup>2</sup> ab, was 42 % der Gesamtfläche ausmacht. Ein Waldtyp ist dabei durch die Kombination der Standortmerkmale Lage, Klima, Boden und potenzielle natürliche Vegetation bestimmt. Insgesamt wurden für Nordtirol 166 Waldtypen unterschieden, wobei die Kategorie „Latschen, Grünerlen, Laubholz-Buschwälder, Verbuschende Flächen“ nach dem geologischen Substrat (Kalk, Silikat) und den HYGENOT-Abflusstypen weiter differenziert wurde. Auf diese Weise konnten hydrologisch stark unterschiedlich reagierende Einheiten wie „Latsche über lockerem Kalkschutt“ von „Grünerle auf silikatischen Feuchtfächen“ getrennt werden.

Die Infrastrukturdaten wurden aus der digitalen Katastralmappe (DKM; BEV – Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 2020), der OpenStreetMap® (OSM, 2020) und zusätzlichen Datensätzen des Tiroler Rauminformationssystems (TIRIS, 2020) entnommen und bewertet.

Die beschriebenen Datengrundlagen wurden in der angeführten Reihenfolge verschnitten: 1.) Realraumtypen/Abflusstypen; 2.) HYGENOT Gletscher; 3.) Bodenformen eBOD; 4.) Waldtypisierung Tirol und 5.) Infrastrukturdaten. Die resultierende PSINOT Kategorienkarte wurde einer Geometrieprüfung unterzogen, Lücken gefüllt und Überlappungen bereinigt. Die minimale Entitätsgröße wurde mit 2 m<sup>2</sup> definiert, kleinere Flächen im Zuge des Postprozessings den Nachbarn mit der längsten gemeinsamen Grenze zugeschlagen. Insgesamt ergeben sich daraus 1.794 unterschiedliche hydrologische Kategorien untergliedert in über 1,5 Millionen Einzelflächen. Die größte zusammenhängende Entität ist eine Gletscherfläche mit 23,8 km<sup>2</sup> Ausdehnung. Die durchschnittliche Entitätsfläche beträgt 0,7 Hektar.

### Bewertung

Jeder Bodenform der digitalen Bodenkarte Österreichs (eBOD; BFW, 2020) ist eine Profilstelle zugewiesen. Die Profilbeschreibung enthält normative Werte (Horizonttiefe, Zusammensetzung des Feinbodens, Humusgehalt), vor allem aber deskriptive Beschreibungen. Letztere wurden von der beschreibenden Bewertung via Pedotransferfunktionen in numerisch verwertbare Größen überführt. Beispielsweise wurde die Lagerungsdichte aus der Strukturansprache ermittelt (Gefüge, Porosität und Zerdrückbarkeit).

Für die weitere hydrogeologische Bewertung wurde das Merkblatt DWA-M 922 „Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung“ herangezogen (Kohl et al. 2016; DWA 2020). Dieses unter Mitwirkung des BFW seitens der DWA Arbeitsgruppe „Bodenhydrologische Kartieranleitung“ entstandene Regelwerk erlaubt eine Bewertung von Abflussprozessen für derartige Profilanlagen.

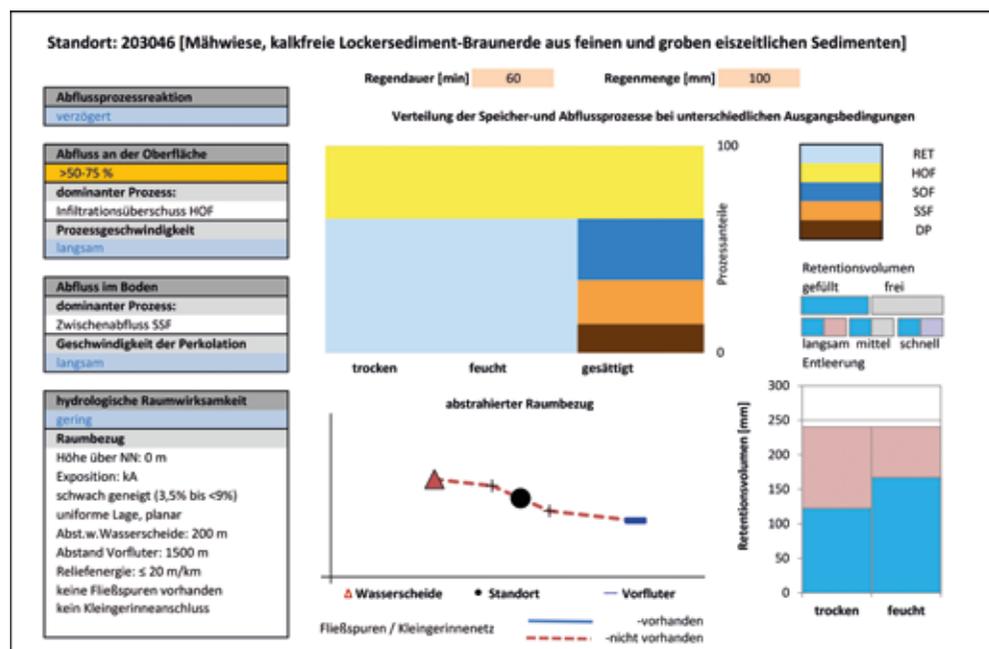


Abbildung 1: Beispiel einer hydropedologischen Bewertung nach Merkblatt DWA-M 922.

Figure 1: Example of hydropedological assessment according to Code of Practice DWA-M 922.

Abbildung 1 zeigt als Beispiel der hydropedologischen Bewertung nach Merkblatt DWA-M 922 die Auswertung für eine Mähwiese auf einer kalkfreien Lockersediment-Braunerde. Diese Standortseinheit ist jene Bodenform, die in Nordtirol mit ca. 14 km<sup>2</sup> die größte Fläche der eBOD-Daten einnimmt. Als Hortonischer Oberflächenabfluss (HOF, gelb) gemeinsam mit gesättigtem Oberflächenabfluss (SOF, dunkelblau) resultiert auf diesem Standort bei einem normierten Starkregen von 100 mm in einer Stunde die Oberflächenabflussklasse 4 (> 50–75 %). Die Prozessgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses wird als „langsam“ ausgewiesen, was einer Oberflächenrauheitsklasse 3 entspricht (etwas glatt).

Für die Waldtypisierung Tirol werden im zugehörigen Waldtypenhandbuch für jeden

Waldtyp die Standortmerkmale Lage, Boden, Nährstoff- und Wasserhaushalt dargestellt. Diesen typischen Bodenprofilen wurden im gegenständlichen Projekt anhand von Literaturdaten (z.B. Leitgeb et al. 2013; Blaser et al. 2005) bodenphysikalische Eigenschaften zugewiesen. Analog wie für die eBOD-Profile wurden daraus die benötigten Kennwerte mittels Pedotransferfunktionen abgeleitet und die entsprechenden hydropedologischen Auswertungen nach DWA vorgenommen.

Jene Landnutzungskategorien, die nicht durch die Waldtypisierung, nicht durch Bodenformen der eBOD und nicht durch Infrastrukturflächen oder Gletscher abgedeckt sind, nehmen 45 % der Landesfläche Nordtirols ein. Was im ersten Moment sehr viel erscheint, zeigt sich bei näherer Betrachtung als eher einheitlich.

Nur wenige unterschiedliche Einheiten machen den Großteil der Flächen aus. 16 Prozent hiervon sind Felsgelände, 23 % Geröllhalden, 42 % alpine Rasen und Matten. Aus dem Datenpool des BFW aus unterschiedlichen Projekten in Nordtirol (Starkregensimulationen, Bodenaufnahmen, Bodenlaboranalytik) wurden repräsentative Profile für die hydropedologische Beschreibung dieser Klassen herangezogen. Dabei wurde nach der Verschneidung mit den hydro(geo)logischen Abflussprofiltypen, als Indikator für das bodenbildende Ausgangsmaterial, auch die unterschiedliche Bodenentwicklung in die Bewertung mit einbezogen.

Infrastrukturklassen wurden nach ihrem Versiegelungsgrad gewichtet, Gletscherflächen und stehende Gewässer wurden mit Abflussklasse AKL 6 und Rauheitsklasse 1 belegt (100 % Oberflächenabfluss; „sehr glatt“).

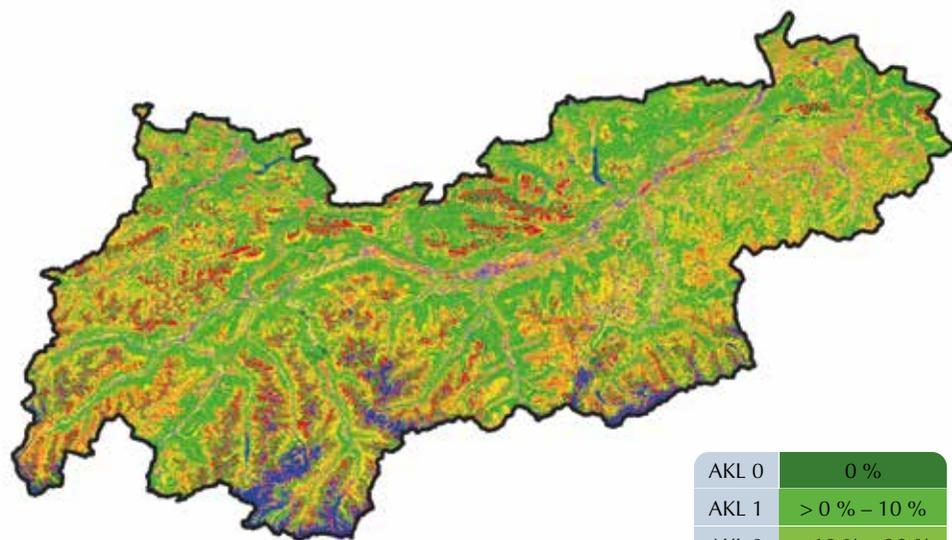
## Resultate

Unter Zuhilfenahme qualitativ hochwertiger Eingangsdaten (Waldtypisierung Tirol, digitale Bodenkarte Österreichs, untergrundabhängige Abflussprozessstypen Nordtirols) konnten die angestrebten Projektziele erreicht werden:

- Gegenüber den bisher Tirol-weit verwendeten Grundlagen konnte ein einheitlicher, verbesserter, nachvollziehbarer a priori Datensatz als Grundlage für die N/A-Modellierung mit dem Modell ZEMOKOST für ganz Tirol erarbeitet werden. Abbildung 2 zeigt die resultierende Oberflächenabflussbeiwertkarte Nordtirol (PSINOT).
- Durch diese standardisierten, einheitlichen und verbesserten Eingangsparameter (Oberflächenabflussbeiwerte,

Oberflächenrauheitsklassen) kann künftig die Nachvollziehbarkeit von N/A-Modellrechnungen im Wildbachbereich wesentlich besser gewährleistet werden. Diese flächendeckend vorhandenen, standardisierten Datengrundlagen ermöglichen belastbare Ergebnisse und bieten dadurch mehr Sicherheit für Projektanten und Sachbearbeiter.

- Mit der Verschneidung und Interpretation der Daten aus dem Datensatz „HYGNOT – Erweiterte Abflussbeiwertkarte für Nordtirol – Hydrogeologie“ (Straka et al. in diesem Heft) liegt nun ein Datensatz vor, der es erlaubt N/A-Modellrechnungen im Wildbachbereich über den Bereich von kleinen Gebieten mit vorwiegend Oberflächenabfluss und kurze Regendauerstufen hinaus zu parametrisieren. Erst dadurch konnten diese Daten für die N/A-Modellierung von Zwischenabfluss zugänglich gemacht werden.
- Der Ansatz ist kompatibel mit dem QGIS-Tool „Aufbereitung\_ZEMOKOST“ (siehe Kammerlander et al., in diesem Heft). Der Anwender benötigt wie bisher eine Karte seines zu untersuchenden Einzugsgebietes mit einer Teilgebietsgliederung und der hierarchischen Knotentopologie. Unter Angabe des Speicherortes der nun allgemein verfügbaren Daten (Geländemodell, Gerinnenetz, AKL, RKL, ZAA und ZAF) kann ein Algorithmus die grundlegend notwendigen Input-Daten für das N/A-Modell ZEMOKOST generieren. Die vier Kartenwerke liegen als Shapefiles, einem als Quasistandard im Desktop-GIS-Umfeld verbreiteten Format, vor.



AKL 0	0 %
AKL 1	> 0 % – 10 %
AKL 2	> 10 % – 30 %
AKL 3	> 30 % – 50 %
AKL 4	> 50 % – 75 %
AKL 5	> 75 % – 100 %
AKL 6	100 %

Abbildung 2: Oberflächenabflussbeiwertkarte Nordtirol (PSINOT).

Figure 2: Surface runoff coefficient map North Tyrol (PSINOT).

### Validierung

An 721 Punkten, an denen für Nordtirol aus unterschiedlichen Projekten des BFW Bewertungen der Standortseigenschaften hinsichtlich ihres Abflussverhaltens zusammengetragen werden konnten (z.B. Geländeaufnahmen nach Markart et al. (2004), Beregnungsversuche, ...), wurde der neue Datensatz validiert. Hierdurch konnten vereinzelt Standortstypen nachjustiert und korrigiert werden. Die PSINOT Abflussbeiwertkarte zeigt mit einem  $R^2 = 0,72$  eine hohe Korrelation zu diesen Validierungsaufnahmen. Dabei ist anzumerken, dass lokale Sonderstandorte ohne Flächenrelevanz das Ergebnis drücken (z.B. Aufnahmen an punktuellen Quellstandorten).

Auf der Ebene von Wildbacheinzugsge-

bieten wurde der neue Datensatz in Kombination mit den neu festgelegten Parametern Zwischenabflussanteil (ZAA) und Zwischenabflussfaktor (ZAF) aus dem Projekt HYGNOT und dem ebendort generierten Gewässernetz an neun neu zu bearbeitenden Wildbacheinzugsgebieten getestet. Die Größenordnung der Testgebiete lag zwischen 2 km<sup>2</sup> und 81 km<sup>2</sup> über Nordtirol verteilt. Die neuen PSINOT-Karten zeigen mit den Geländeaufnahmen der neun Testgebiete eine gute Übereinstimmung. Im Zuge der N/A-Modellrechnung ergaben sich Verbesserungen bei der Datenübernahme, aber auch neue Probleme hinsichtlich (semiautomatisierter) Teileinzugsgebietsgliederung und der Integration des Haupt- bzw. Feingewässernetzes (siehe Kammerlander et al., in diesem Heft).

Für sieben weitere Testgebiete (vornehm-

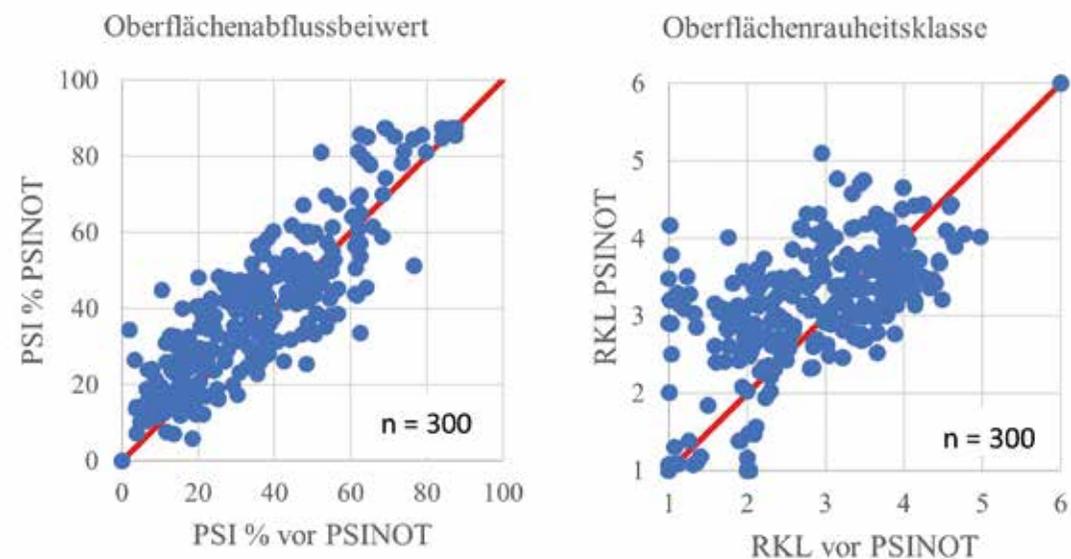


Abbildung 3: Korrelation von Oberflächen-Abflusskoeffizienten und Rauheitswerten vor und nach PSINOT.

Figure 3: Correlation of surface runoff coefficients and surface roughness values before and after PSINOT.

lich aus dem Projekt HOWATI; Rogger et al., 2011) in der Größenordnung zwischen 7 km<sup>2</sup> und 64 km<sup>2</sup> wurden alte N/A-Modellrechnungen mit ZEMOKOST mit Modellrechnungen unter Verwendung der neu generierten PSINOT-Daten verglichen. Bei 300 Teileinzugsgebieten zeigt der Oberflächenabflussbeiwert zwischen den alten Daten und den PSINOT-Daten erwartungsgemäß eine hohe Korrelation (Abbildung 3, links). Die positiven und negativen Abweichungen sind annähernd gleich verteilt und die mittlere Abweichung beträgt 9 %. Bei der Oberflächenrauheitsklasse sind die Abweichungen etwas größer und die Korrelation etwas schwächer (Abbildung 3, rechts). Die PSINOT-Daten führen bei geringen Rauheiten tendenziell zu höheren Werten, aber die mittlere Abweichung beträgt mit 0,7 trotzdem weniger als eine Rauheitsklasse.

Abflussbeiwert und Oberflächenrauheit beeinflussen, als maßgebliche a priori Parameter für die Abflussbildung und Abflusskonzentration, naturgemäß die Hochwassererwartungswerte der N/A-Modellierungen von Wildbacheinzugsgebieten am meisten. Für die sieben Testgebiete wurde ZEMOKOST aus den alten Projekten mit aktuellen Bemessungsniederschlägen (BMLRT eHYD, 2020) neu aufgesetzt und mit den alten Abflussbeiwerten und Rauheitsklassen den Berechnungen mit den neuen PSINOT-Daten gegenübergestellt. Im Schnitt wirkt sich das für die Bemessungsrechnung der sieben Gebiete mit einer Steigerung des HQ<sub>100</sub> um 2 % aus. Die Spannweite innerhalb der Testgebiete reicht allerdings von minus 46 % bis plus 50 %. Im konkreten Einzelfall müssen diese Unterschiede einer genaueren, detaillierten Prüfung unterzogen werden.

## Fazit

Mit den Projekten PSIOT und PSINOT liegen nun für ganz Tirol (12.640 km<sup>2</sup>) flächendeckend eine Abflussbeiwertkarte und eine Rauheitskarte für die Modellierung von Oberflächenabfluss vor. Dieser neue Datensatz wurde unter Verwendung der besten aktuell verfügbaren Grundlagendaten (eBOD, Waldtypisierung, Realraumtypen, HYGENOT) und mittels nachvollziehbarer, hydrope-dologischer Bewertung (Merkblatt DWA-M 922) generiert. Durch diese standardisierten, einheitlichen und verbesserten Eingangsparameter (Oberflächenabflussbeiwerte, Oberflächenrauheitsklassen) kann künftig die Nachvollziehbarkeit von N/A-Modellrechnungen im Wildbachbereich in Tirol wesentlich besser gewährleistet werden.

### Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Dr. Bernhard Kohl  
Bundesforschungszentrum für Wald  
Rennweg 1, Hofburg, 6020 Innsbruck  
bernhard.kohl@bfw.gv.at

Dr. Gerhard Markart  
Bundesforschungszentrum für Wald  
Rennweg 1, Hofburg, 6020 Innsbruck  
gerhard.markart@bfw.gv.at

DI Manfred Pittracher (i.R.)  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
manfred.pittracher@aon.at

DI Leopold Stepanek  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Leopold.Stepanek@die-wildbach.at

Dr. Johannes Kammerlander  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Johannes.Kammerlander@die-wildbach.at

DI Gebhard Walter  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Gebhard.Walter@die-wildbach.at

Dr. Wolfgang Straka  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Angewandte Geologie  
Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
wolfgang.straka@boku.ac.at

Dr. Thomas Strauhal  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Angewandte Geologie  
Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
thomas.strauhal@boku.ac.at

Univ.-Prof. Dr. Christian Zangerl  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Angewandte Geologie  
Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
Christian.j.zangerl@boku.ac.at

### Literatur/References:

ATLR - Amt der Tiroler Landesregierung (2020).  
Waldtypisierung Tirol – Waldtypenhandbuch  
<https://www.tirol.gv.at/umwelt/wald/schutzwald/waldtypisierung/waldtypenhandbuch/>.

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (2020).  
Digitaler Kataster - Grundstücke Tirol.  
[www.bev.gv.at](http://www.bev.gv.at).

BFW (2020).  
Digitale Bodenkarte von Österreich - eBOD: <https://bodenkarte.at/>.

BLASER, P., ZIMMERMANN, S., LUSTER, J., WALTHERT, L., LÜSCHER, P. (2005).  
Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite.  
Eidg. Forschungsanstalt WSL and Hep Verlag, Birmensdorf and Bern, Switzerland.

BMLRT eHYD (2020):  
eHyd-Auswertungen - Karte Bemessungsniederschlag: <https://ehyd.gv.at/>.

DWA (2020).  
Merkblatt DWA-M 922 Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung.  
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.  
194 Seiten, ISBN 978-3-88721-912-3.

KAMMERLANDER, J., KOHL, B., MOSER, M. (2020).  
PRAXISLEITFADEN Niederschlag-Abfluss Modellierung in der Wildbach-  
verbauung, Teil ZEMOKOST. BMLRT, Abt. III/4 Wildbach- und Lawinenver-  
bauung und Schutzwaldpolitik, Wien.

KOHL B., KLEBINDER, K., SOTIER, B., MARKART, G., MEISSEL, G. (2016).  
Profilsprache, Kartierung, Regensimulation Erkennen, Abbilden und  
Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozesse. Forum für  
Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Hennef, (36.16): 9-20.

KOHL, B., SOTIER, B. (2016).  
Erarbeitung eines bodenhydrologischen Datensatzes - Bodendaten für ein  
Wasserhaushaltsmodell für das Einzugsgebiet der Drau einschließlich Isel.  
BFW-Projektbericht im Auftrag des Amtes der Tiroler Landesregierung Abtei-  
lung Wasserwirtschaft Sachgebiet Hydrographie und Hydrologie. 24 S.

KOHL, B., Stepanek, L. (2005).  
ZEMOKOST – neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserab-  
flüssen. BFW-Praxisinformation, 8, 21–22.

KOHL, B. (2011).  
Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Dissertation, Universität  
Innsbruck, 264 S.

LEITGEB, E., REITER, R., ENGLISCH, M., LÜSCHER, P., FEGER, K. H. (EDS.). (2013).  
Waldböden: ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich,  
Deutschland und der Schweiz. John Wiley & Sons.

MARKART, G., KOHL, B., SOTIER, B., SCHAUER, T., BUNZA, G., STERN,  
R. (2004).  
Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabfluss-  
beiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Stark-  
regen (Version 1.0). Bundesamt und Forschungszentrum für Wald.

OSM – OpenStreetMap® (2020):  
<https://www.openstreetmap.org/copyright>.

PIRKL, H. (2012).  
Untergrundabhängige Abflussprozesse. Kartierung und Quantifizierung für  
das Bundesland Tirol Flächendeckende Aufnahme Osttirols. Endbericht, im  
Auftrag von: Amt der Tiroler Landesregierung, Hydrographie und Hydrolo-  
gie, Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, GeoÖko Techn. Büro  
für Geologie, Wien.

PIRKL, H. (2016).  
Multidisziplinäres Verständnis alpiner Wildbacheinzugsgebiete. Berichte  
der Geologischen Bundesanstalt, 114, Wien.

PIRKL, H., SAUSGRUBER, T. (Hrsg.) (2015).  
Handbuch zur qualitativen und quantitativen Erfassung untergrund-abhän-  
giger Abflüsse in Wildbacheinzugsgebieten. Wildbach- und Lawinenver-  
bauung, Stabstelle Geologie, Innsbruck.

ROGGER, M., KOHL, B., PIRKL, H., HOFER, M., KIRNBAUER, R., MERZ,  
R., ..., BLÖSCHL, G. (2011).  
HOWATI-Hochwasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwassern in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirt-  
schaft, 63(7), 153-161.

SEGER, M. (2001).  
Rauminformationssystem Österreich – ein digitaler thematischer Datensatz  
des Staatsgebietes. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoin-  
formation, 2, 101-110.

STRAKA, W., ZANGERL, C. (2021).  
HYGENOT Erweiterte Abflussbeiwertkarte für Nordtirol – Hydrogeologie.  
Endbericht, im Auftrag der Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion  
Tirol; Universität für Bodenkultur, Department für Bautechnik und Natur-  
gefahren, Wien.

TIRIS - Tiroler Rauminformationssystem (2020):  
<https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/tiris/>.



JOHANNES KAMMERLANDER, MANFRED PITTRACHER, LEOPOLD STEPANEK,  
GEBHARD WALTER, BERNHARD KOHL, GERHARD MARKART, WOLFGANG STRAKA,  
THOMAS STRAUHAL, CHRISTIAN ZANGERL

## Anwendung neuer hydro(geo)logischer Flächendaten zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Tirol

### *New hydro(geo)logic data for Tyrol*

#### **Zusammenfassung:**

Die flächendeckenden hydro(geo)logischen Daten für das Bundesland Tirol sind das Ergebnis einer mehrjährigen, projekteübergreifenden Zusammenarbeit, allen voran mit den Kollegen der BOKU (Straka et al., in diesem Heft) und des BFW (Kohl et al., in diesem Heft). Die Daten liegen nun vor und sind bereits in den Wildbach- und Lawinenkataster der Tiroler Dienststellen eingebunden. Es ist nun unsere Aufgabe, dass das große Potential dieser Daten von den Kolleginnen und Kollegen auch genutzt wird. Einige Anwendungsgebiete sind in diesem Beitrag erläutert und erste Ergebnisse zu deren Zuverlässigkeit werden präsentiert. Zusammen mit einem GIS-gestützten Aufbereitungstool für das N/A-Modell ZEMOKOST wird die Modellerstellung sehr vereinfacht, was sich in mehrerlei Hinsicht positiv auf die Ergebnisqualität auswirken soll. Zum einen durch die bessere Datenqualität, zum anderen durch die Möglichkeit den Fokus nun noch stärker auf die Modell-/ Ergebnisaufbereitung (Plausibilisierung) zu legen.

#### **Stichwörter:**

Hydro(geo)logische  
Flächendaten,  
N/A-Modellierung

#### **Abstract:**

*Detailed hydro(geo)logic data were generated for the entire region of Tyrol. They result from several projects with the BOKU (Straka et al., in this issue) and the BFW (Kohl et al., in this issue). In future, these data and a new GIS-algorithm can/ should be used for hydrologic modelling issues within the WLK. Some examples regarding the application of these data are presented in this article.*

#### **Keywords:**

*Hydro(geo)logical data,  
p/r modelling*

#### **Einleitung**

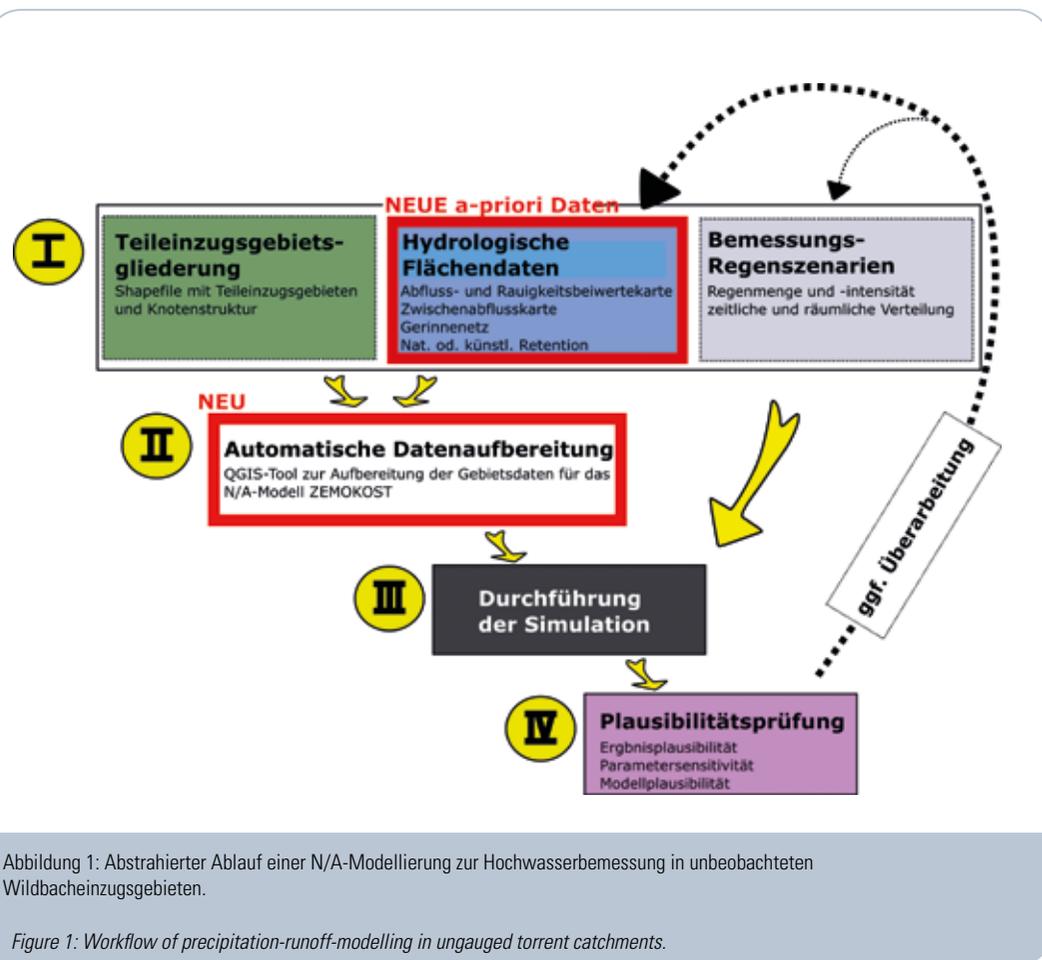
In den beiden vorangegangenen Beiträgen (Straka et al. und Kohl et al., beide in diesem Heft) wurde die Erstellung von hydro(geo)logischen Flächendaten für Tirol vorgestellt. Diese Daten liegen nun für das gesamte Bundesland Tirol vor und sind bereits in den Wildbach- und Lawinenkataster (WLK) der Tiroler Dienststellen eingebunden. Sie sollen zukünftig die Bearbeitung hydrologischer Fragestellungen in qualitativer und quantitativer Hinsicht vereinfachen und verbessern.

Hydrologische Fragestellungen in der Wildbachverbauung betreffen zumeist die Ermittlung von Hochwasserkennwerten oder Basisbemessungsganglinien. Konzeptionelle Niederschlag-Abflussmodelle, wie z. B. ZEMOKOST, sind hierfür ein immer wichtiger werdendes Tool. Mit ihnen können die maßgebenden hydrologischen Abflussprozesse simuliert und so die Abflussreaktion auf bestimmte Bemessungs-Regenszenarien ermittelt werden. Der abstrahierte Ablauf einer praxisüblichen N/A-Simulation für unbeobachtete Wildbacheinzugsgebiete ist in Abb. 1 dargestellt und wird nachfolgend kurz zusammengefasst:

- I. Die erforderliche Datengrundlage setzt sich zusammen aus: (i) Teileinzugsgebietsgliederung des Untersuchungsgebietes, (ii) digitalen Kartenwerken mit hydro(geo)logischen Flächendaten für die Parametrisierung des Modells (z.B.

Abflussbeiwertekarte, Gerinnenetz, u. ä.) und (iii) Regendaten für die Definition der Bemessungs-Regenszenarien.

- II. Für die Aufbereitung eines N/A-Modells sind schließlich die topografische Gebietsgliederung und die hydro(geo)logischen Karten in die erforderlichen Modellparameter zu überführen. In der jüngeren Vergangenheit haben sich hierfür GIS-Berechnungsroutinen etabliert. Damit werden die topografischen und hydro(geo)logischen Daten in objektiver und somit nachvollziehbarer Art und Weise berechnet.
- III. Das fertig aufgesetzte N/A-Modell kann nun mit diversen Bemessungs-Regenszenarien „betrieben“ und die Abflussreaktion in Form von HW-Scheitelwerten, Ganglinien, etc. berechnet werden.
- IV. Das Ergebnis der Simulation ist auf seine Plausibilität und die Modellparameter auf ihre Sensitivität zu prüfen. Für fortgeschrittene Anwendungen wird das hydrologische N/A-Modell auch in qualitativer Hinsicht evaluiert. Wenn sich hierbei Unstimmigkeiten zeigen, sollen/ können die Modellparameter bzw. die zugrundeliegenden hydro(geo)logischen Flächendaten nochmal geprüft und gegebenenfalls geändert werden.



Im Gegensatz zu den (alten) empirischen Methoden ist die Anwendung von N/A-Modellen in der Regel mit mehr Aufwand in der Datenverarbeitung verbunden. Das betrifft insbesondere (I) die Erhebung/Zusammenstellung der Datengrundlagen und (II) die Aufbereitung des N/A-Modells. Je nach Fragestellung, gewünschter Ergebnisqualität und der hydrologischen Komplexität des Untersuchungsgebiets liegt die erforderliche Nettoarbeitszeit zwischen mehreren Stunden bis Wochen. Oft ist daher der gesamte Aufwand für die Datenaufbereitung und die Modellerstellung (I und II in Abb. 1) um einiges höher als jener für die obli-

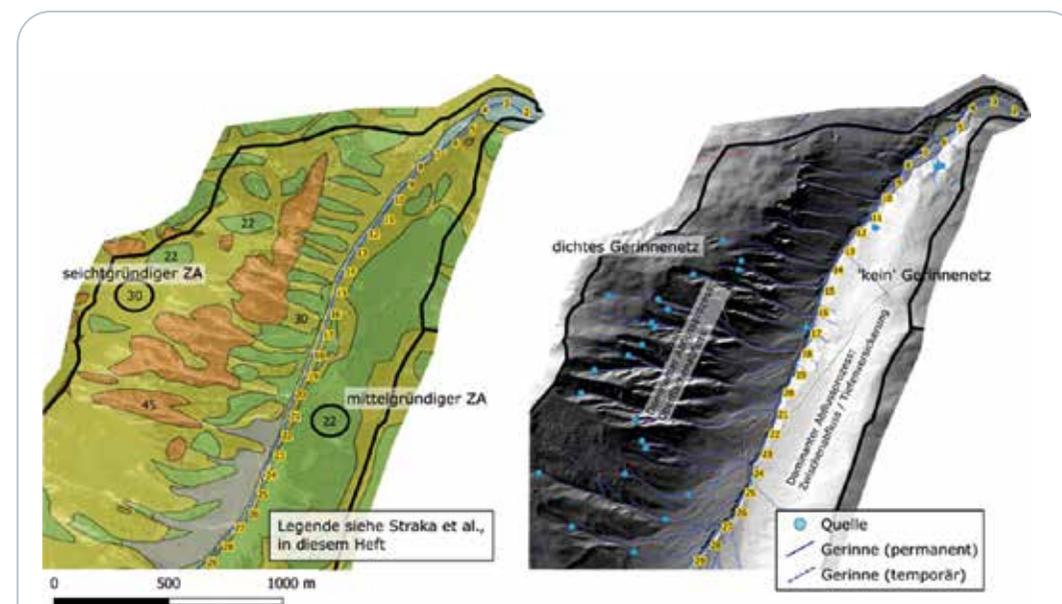
gatorische Plausibilisierung und Interpretation der Ergebnisse im Nachhinein.

Mit den in den Projekten HYGENOT und PSI(N)OT erarbeiteten hydro(geo)logischen Flächendaten und der Programmierung eines neuen Aufbereitungstools arbeiten wir diesem Trend entgegen. Zum einen liegen nun wichtige Grundlagendaten flächendeckend in guter Qualität und einheitlichem Maßstab vor. Zum anderen erlauben diverse Erleichterungen in der Datenaufbereitung für das N/A-Modell ZEMOKOST, dass das Ergebnis bzw. seine Plausibilisierung stärker in den Vordergrund rücken kann.

## Qualitative Anwendung der neuen Daten

In der alpinen Hochwasserhydrologie wird häufig zwischen den drei Abflussprozessen *Oberflächenabfluss*, *Zwischenabfluss* und *tiefgründiger Abfluss* unterschieden. Mit der hydrogeologischen Abflusstypenkarte und der hochaufgelösten Gerinnenetz- und Quellenkartierung (Abb. 2) lassen sich wichtige, qualitative Informationen zu den dominanten Abflussprozessen ableiten.

Die Gerinnenetzdichte in einem Einzugsgebiet und seine räumliche Verteilung gibt Aufschluss über den dominanten Abflussprozess. Eine hohe, bis nahe an die Wasserscheide reichende Gerinnenetzdichte lässt auf eine Dominanz von oberflächennahem Abfluss schließen. Das vermehrte Auftreten von Quellen im Mittelhangbereich deutet im Allgemeinen auf Zwischenabflussprozesse hin, während Lockergestein mit hohem Rückhaltevermögen einen tiefgründigen Abfluss vermuten lässt (Abb. 2).



Diese qualitativen Informationen können auch für die Plausibilisierung von N/A-Modellen herangezogen werden. So sollte die simulierte Abflussreaktion auf Flächen mit hohem Rückhaltevermögen stark verzögert sein bzw. sehr kurze Regenereignisse komplett gepuffert werden. Die Anlaufzeit und die maßgebende (= kritische) Regendauer sind in Gebieten mit hoher Gerinnenetzdichte in der Regel kürzer als anderswo.

### Quantitative Anwendung der neuen Daten

Die neuen, hydro(geo)logischen Flächendaten aus den Projekten HYGENOT und PSI(N)OT sind derart aufbereitet, dass sie auch in quantitativer Hinsicht verwendet werden können. Und zwar als einheitlicher, verbesserter und nachvollziehbarer a priori Datensatz für das N/A-Modell ZEMOKOST (siehe Kohl et al. in diesem Heft):

- Die Abfluss- und Rauheitsbeiwertkarte entsprechen den Modellparametern zur Berechnung des Oberflächenabflusses.
- Auf der Grundlage des Gerinnenetzes kann der mittlere, maximale Oberflächenfließweg GIS-gestützt bestimmt werden. Es handelt sich dabei um die mittlere Fließlänge von allen Wasserscheidpunkten bis zum nächsten Gerinne oder zur nächsten Runse (temporäres Gerinne). Je länger diese Distanz, desto langsamer die Abflusskonzentration.
- Die Karte der untergrundabhängigen Abflusstypen wurde in eine Parameterkarte für den Zwischenabfluss „übersetzt“. Die konzeptionellen Modellparameter ZAA und ZAF (Zwischenabflussanteil bzw. -faktor) geben den Anteil und die Geschwindigkeit des Zwischenabflusses an.

Für die Überführung dieser digitalen Karten in die Gebietsdaten von ZEMOKOST wurde das QGIS-Tool „Aufbereitung\_ZEMOKOST“ (Python Script) entwickelt, welches auch Teil der WLK-Tools im WLK ist. Es wandelt die erforderlichen Datengrundlagen (Teileinzugsgebietsgliederung, Abflussbeiwertkarte, Gerinnenetz, etc.) in die Parameterstruktur von ZEMOKOST um, indem es vorgegebene Rechenalgorithmen durchführt. In der Vergangenheit „mussten“ diese Rechenalgorithmen einzeln und von Hand ausgeführt werden. Das QGIS-Tool führt dieselben Rechenalgorithmen seriell und automatisch durch.

### Bedeutung des Zwischenabfluss

Osttirol war das großflächige Pilotgebiet für die flächendeckende Ausweisung der untergrundabhängigen Abflusstypen (Pirkl & Sausgruber, 2015) und der hydro(geo)logischen Flächendaten in Tirol (Kohl et al., 2018). Die Evaluierung dieser Daten anhand von N/A-Modellierungen durch das BFW führte zu vielversprechenden Ergebnissen. Die damit berechneten Hochwasserscheitelwerte stimmten gut mit jenen aus Referenzsimulationen überein (Kohl et al., 2018). Allerdings führten die neuen hydro(geo)logischen Flächendaten zu durchschnittlich längeren Konzentrationszeiten für die Basisbemessungsereignisse. Es stellte sich daher die Frage nach dem Einfluss des Zwischenabflusses auf die Hochwasserwelle. Zur Beantwortung dieser Frage wurden die Ergebnisse aus den ersten zwölf Untersuchungsgebieten herangezogen und die berechnete Basisbemessungsganglinie in ihre beiden Komponenten *Oberflächenabfluss* und *Zwischenabfluss* getrennt. Es zeigte sich ein sehr differenziertes Bild. In einzelnen Wildbacheinzugsgebieten war der Oberflächenabfluss dominant, aber in der Mehrheit lag das Verhältnis

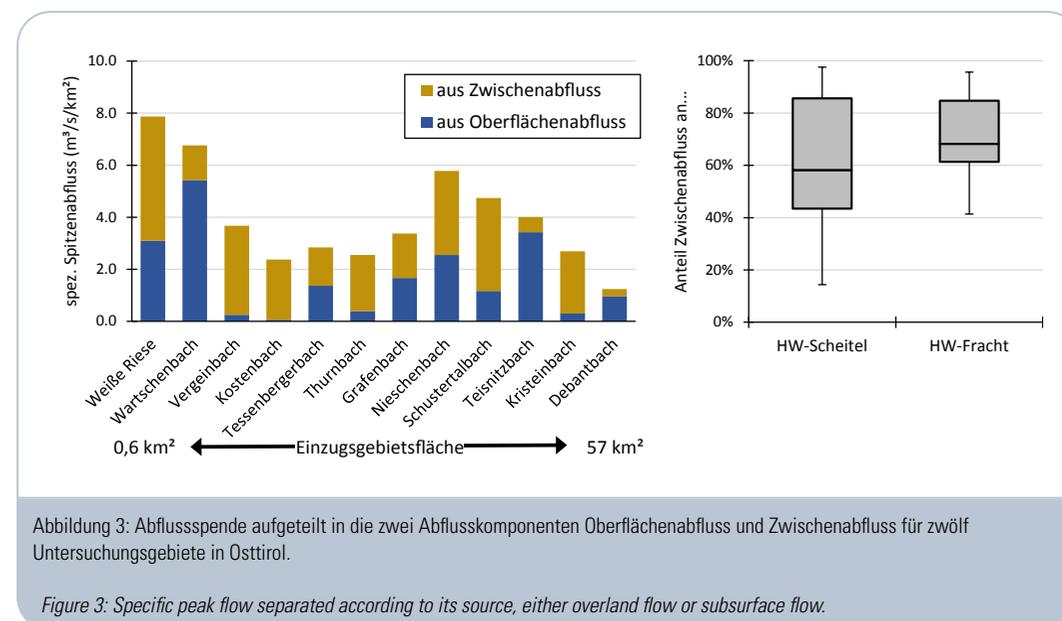


Abbildung 3: Abflussspende aufgeteilt in die zwei Abflusskomponenten Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss für zwölf Untersuchungsgebiete in Osttirol.

Figure 3: Specific peak flow separated according to its source, either overland flow or subsurface flow.

zugunsten des Zwischenabflusses (Abb. 3). Die landläufige Meinung, dass Zwischenabfluss lediglich für den Nachlauf der Hochwasserwelle oder bei Dauerregen einen ausschlaggebenden Einfluss besitzt, wird mit diesen Daten nicht unterstützt.

### Kompatibilität mit bisherigen N/A-Simulationen

N/A-Modellierungen mit ZEMOKOST wurden in der WLK, Sektion Tirol, auch bisher häufig durchgeführt. In den Dienststellen gibt es hierzu viel Erfahrung. Es lag deshalb die Frage nahe, ob diese neuen, hydro(geo)logischen Flächendaten zu ähnlichen Ergebnissen führen wie die bisherigen. In der GBL Außerfern wurden deshalb sieben „alte“ ZEMOKOST-Simulationen aus den vergangenen Jahren zusammengetragen und die Modelle nochmals mit dem neuen QGIS-Tool und den neuen, hydro(geo)logischen Flächendaten aufgesetzt.

Damit man auch erkennen kann, welche der drei Neuentwicklungen (GIS-Tool, neue AKL/RKL-Karte, neue Zwischenabfluss- und Feinge-

rinnkarte) welchen Einfluss hat(te), wurden die Daten schrittweise ausgetauscht. Insgesamt wurden für jedes der sieben Testgebiete drei neue Modelle erstellt:

1. Modell mit alten Grundlagendaten, die aber nun mit dem neuen QGIS-Tool aufbereitet wurden,
2. wie 1, aber mit den neuen AKL/RKL-Daten für den Oberflächenabfluss aus PSINOT,
3. wie 2, aber auch mit den neuen ZAA/ZAF-Daten für den Zwischenabfluss und dem neuen Feingerinnenetz (FG) für den Oberflächenfließweg aus HYGENOT.

Die Zielgröße war der maximale Spitzenabfluss. Der neu berechnete Spitzenabfluss ( $Q_{\max}(\text{NEU})$ ) wurde mit dem ursprünglichen ( $Q_{\max}(\text{ALT})$ ) ins Verhältnis gesetzt. Die Ergebnisse sind in Form eines Boxplots in Abb. 4 dargestellt. Das neue QGIS-Tool hat nahezu keine Auswirkungen auf den Spitzenabfluss (linker Boxplot in Abb. 4). Hierbei muss festgehalten werden, dass die Datenaufbereitung auch bereits früher in sehr

ähnlicher Art und Weise gemacht wurde, allerdings mit einem anderen GIS-Programm. Die Verwendung der neuen Abflussbeiwertekarte (AKL) und Rauheitsbeiwertekarte (RKL) bei sonst gleichbleibender Datengrundlage führte zu einer tendenziellen Unterschätzung der ursprünglichen Scheitelabflüsse (mittlerer Boxplot in Abb. 4). In drei der insgesamt sieben Untersuchungsgebieten lag  $Q_{\max}(\text{NEU})$  mehr als 25 % niedriger als  $Q_{\max}(\text{ALT})$ . Werden hingegen alle neuen, hydro(geo)logischen Flächendaten (AKL, RKL, ZAA, ZAF und Gerinnenetz) für die Modellaufbe-

reitung verwendet, stimmen die neu berechneten, maximalen Spitzenabflüsse deutlich besser mit den ursprünglichen überein (rechter Boxplot in Abb. 4). Dennoch werden die alten  $HQ_{100}$ -Werte tendenziell unterschätzt. Hier muss man aber festhalten, dass die alten  $HQ_{100}$ -Werte ( $Q_{\max}(\text{ALT})$ ) aus plausibilisierten (angepassten) N/A-Modellen stammen. Die neuen  $HQ_{100}$ -Werte ( $Q_{\max}(\text{NEU})$ ) wurden hingegen für Testzwecke ohne jegliche Plausibilisierung ermittelt, sondern nur durch Austausch der Flächendaten.

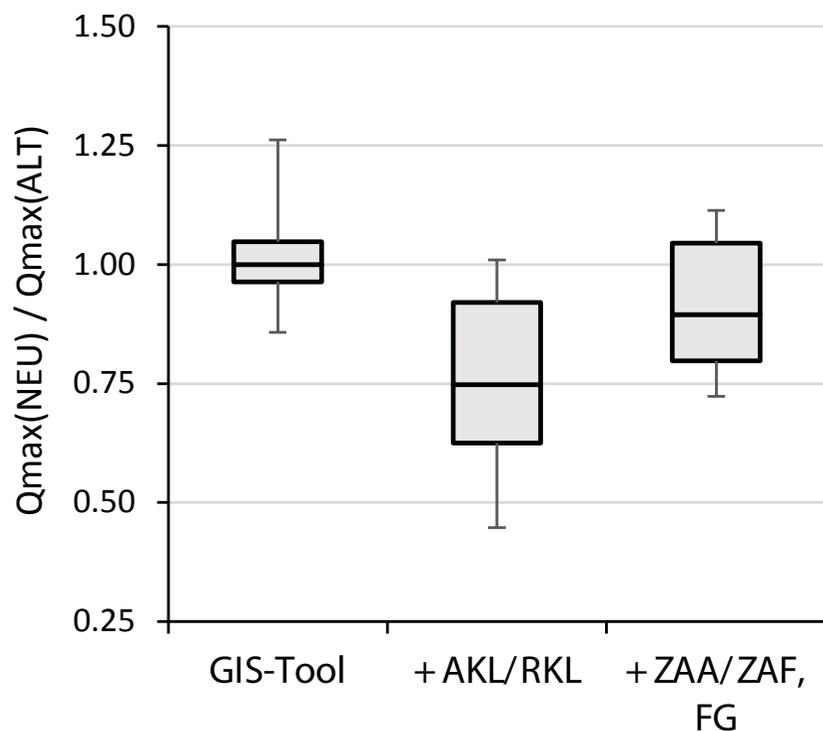


Abbildung 4: Verhältnis der maximalen Spitzenabflüsse aus N/A-Simulationen mit den neuen hydro(geo)logischen Flächendaten zu den ursprünglichen Simulationsergebnissen ohne diese Daten.

Figure 4: Ratio of the maximum peak flows, determined either with the new hydro(geo)logic data or with the previous data.

## Ausblick

Die hydro(geo)logischen Flächendaten werden in weiteren Untersuchungsgebieten, quer durch Tirol, getestet und evaluiert. Die gute Dokumentation der Kartierungskriterien (Straka et al., in diesem Heft), der Datengrundlagen und der hydrologischen Zuordnung (Kohl et al, in diesem Heft) erlaubt auch eine Weiterentwicklung oder allfällige Aktualisierung zu einem späteren Zeitpunkt. Die Anwendungsgebiete dieser neuen Daten sind weitreichend. Es gibt einerseits quantitative Anwendungsgebiete, insbesondere für die N/A-Modellierung mit ZEMOKOST, aber eben auch qualitative. Es ist geplant, diese Anwendungsgebiete und die damit gewonnenen Erfahrungen in anschaulicher (bildgestützter) Art und Weise zu dokumentieren.

Das QGIS-Tool zur Aufbereitung des ZEMOKOST-Modells ist ebenfalls in ständiger Weiterentwicklung. Das Tool ist derzeit noch empfindlich auf fehlerhafte Eingangsdaten und die Fehlersuche kann mühsam sein. Daher werden zum einen alle bekannten Fehlermeldungen gesammelt und die Lösungswege im „Praxisleitfaden ZEMOKOST“ des Fachzentrums Wildbachprozesse (Kammerlander et al., 2020) laufend aktualisiert. Darüber hinaus wird das QGIS-Tool regelmäßig aktualisiert und zukünftig in seiner Anwendung robuster gemacht.

In Bezug auf diese Erleichterungen in der N/A-Modellierung soll abschließend festgehalten werden, dass die Datengrundlage und Modellaufbereitung nur zwei von mehreren Bausteinen in der Hochwasserbemessung sind. Die Plausibilisierung der Ergebnisse, die fundierte Auswahl von Bemessungs-Regenszenarien oder die kritische Auseinandersetzung mit dem Modell (Modellevaluierung) sind mindestens gleichbedeutend. Mit den neuen hydro(geo)logischen Flächendaten

und dem QGIS-Tool zur automatisierten Modellaufbereitung kann deshalb zukünftig der Schwerpunkt in der N/A-Modellierung noch stärker auf eben diese Aspekte gelegt werden.

## Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Dr. Johannes Kammerlander  
Gebietsbauleitung Außerfern  
Buchenort 2A, 6600 Lechaschau  
johannes.kammerlander@die-wildbach.at

DI Monika Kals  
Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Forsttechnischer  
Dienst, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Monika.Kals@die-wildbach.at

DI Manfred Pittracher (i.R.)  
vormals Wildbach- und Lawinenverbauung,  
Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
manfred.pittracher@aon.at

DI Leopold Stepanek  
Gebietsbauleitung Mittleres Inntal  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Leopold.Stepanek@die-wildbach.at

Ing. Mag. Dr. techn. Thomas Sausgruber  
Fachzentrum Geologie und Lawinen  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Thomas.Sausgruber@die-wildbach.at

DI Gebhard Walter  
Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol  
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck  
Gebhard.Walter@die-wildbach.at

Dr. Bernhard Kohl  
 Bundesforschungszentrum für Wald  
 Rennweg 1, Hofburg, 6020 Innsbruck  
 bernhard.kohl@bfw.gv.at

Dr. Gerhard Markart  
 Bundesforschungszentrum für Wald  
 Rennweg 1, Hofburg, 6020 Innsbruck  
 gerhard.markart@bfw.gv.at

Dr. Wolfgang Straka  
 Universität für Bodenkultur Wien,  
 Institut für Angewandte Geologie  
 Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
 wolfgang.straka@boku.ac.at

Thomas Strauhal, PhD  
 Universität für Bodenkultur Wien,  
 Institut für Angewandte Geologie  
 Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
 thomas.strauhal@boku.ac.at

Univ. Prof. Dr. Christian Zangerl  
 Universität für Bodenkultur Wien,  
 Institut für Angewandte Geologie  
 Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
 christian.j.zangerl@boku.ac.at

#### Literatur/References:

KAMMERLANDER, J., KOHL, B., MOSER, M. (2020).  
 PRAXISLEITFADEN Niederschlag-Abfluss Modellierung in der Wildbach-  
 verbauung, Teil ZEMOKOST. BMLRT, Abt. III/4 Wildbach- und Lawinenver-  
 bauung und Schutzwaldpolitik, Wien.

KOHL, B., SOTIER, B., LECHNER, V., KLEBINDER, K., MARKART, G. (2018).  
 Erweiterte Abflussbeiwertkarte für Osttirol. Projektbericht im Auftrag der  
 WLW, Sektion Tirol.

PIRKL, H., SAUSGRUBER, T. (Hrsg.) (2015).  
 Handbuch zur qualitativen und quantitativen Erfassung untergrund-abhän-  
 giger Abflüsse in Wildbacheinzugsgebieten. Wildbach- und Lawinenver-  
 bauung, Stabstelle Geologie, Innsbruck.

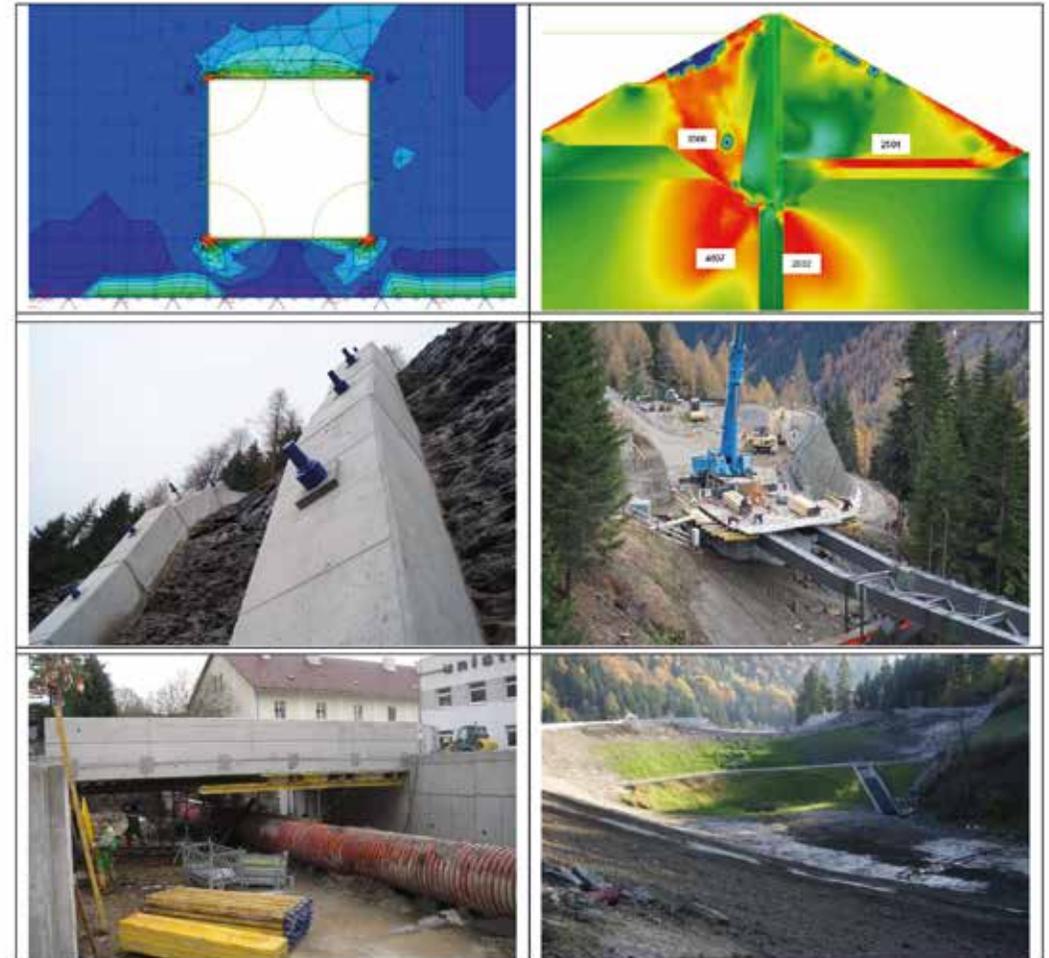
STRAKA, W., STRAUHAL, T., ZANGERL, C., PITTRACHER, M., KOHL, B.,  
 MARKART, G., SAUSGRUBER, T., STEPANEK, L., KAMMERLANDER, J.,  
 PITTRACHER, M. (2021).  
 HYGENOT – Großskalige hydrogeologische Charakterisierung von Fließ-  
 systemen in Wildbacheinzugsgebieten (Nordtirol). Wildbach- und Lawi-  
 nenverbau, Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlag-  
 schutz, Heft 188.

KOHL, B., MARKART, G., PITTRACHER, M., STEPANEK, L., KAMMERLAN-  
 DER, J., WALTER G., STRAKA, W., STRAUHAL, T., ZANGERL, C. (2021).  
 PSINOT - Abflussbeiwertkarte Nordtirol. Wildbach- und Lawinenverbau,  
 Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz, Heft  
 188.

## alpinfra consulting + engineering gmbh :: Internationale Ingenieurkompetenz

### Innovative Lösungen und Baustellenführung im anspruchsvollen alpinen Umfeld

- Statische und dynamische Strukturanalysen für Stahl- und Betonbauwerke
- Geotechnisch, grundbautechnische Sonderlösungen, Injektionstechnik
- Schutzwasserbau, Wildbach- und Lawinenverbauung
- Numerisch-Physikalische Modellierung von Lawinen, Muren und Felsstürzen



alpinfra consulting + engineering gmbh  
 Marktplatz 5 - 5163 Mattsee  
 office@alpinfra.com  
 www.alpinfra.com  
 +43 - 6217 - 20271

# GEOMÄHR

PETER HARTL

## Neueste Technologie im Praxistest – LoRaWAN Hochwassermonitoring – Ereignisanalyse Weißenbach/ Chorinskyklause am 17./18.07.2021

### *Latest Technology in Field Test – LoRaWAN Flood Monitoring – Analysis of the Goiserer Weißenbach/Chorinskyklause at the flood event 17./18.07.2021*

#### **Zusammenfassung:**

Die Überwachung von Schutzbauwerken ist eine wichtige, aber auch herausfordernde Aufgabe, da die Bauwerke oftmals in sehr schwer erreichbaren Gebieten gelegen sind, in denen es weder Telefonverbindung noch Stromnetz gibt. Die Chorinskyklause am Goiserer Weißenbach ist ein Beispiel hierfür. Mit der Funktechnologie LoRaWAN ist es nun möglich, auch solche Bereiche zu überwachen. Sensoren mit sehr langer Batterielaufzeit zeichnen die Wetter- und Wasserstandsdaten auf und übernehmen die Ereignisdokumentation. In diesem Bericht wird das Monitoring-System der Chorinskyklause erklärt und die gemessenen Daten am Beispiel des Hochwasserereignisses vom 17./18.07.2021 präsentiert.

#### **Abstract:**

*The monitoring of protective structures is an important but also challenging task, as many of the structures are in remote areas where often no telephone connection nor electricity is available. The Goiserer Weißenbach is such an example. With the wireless technology of LoRaWAN however, it is possible to monitor these areas. Sensors with very high battery-life measure water levels and weather data and serve for the event documentation. In this report the monitoring system of the Chorinskyklause is explained and data collected during the 17./18.07.2021 flood event are shown as an example of the output.*

#### **Stichwörter:**

Hochwasser-  
monitoring,  
LoRaWAN, Fernüber-  
wachung

#### **Keywords:**

Flood Monitoring,  
LoRAWAN, Remote Monitoring

#### **Einleitung**

Wildbäche bedrohen mit Hochwasserereignissen besiedelte Gebiete und Infrastruktur. Das detaillierte Wissen um Abflussvorgänge in den Einzugsgebieten ist daher essenziell, um vorbeugende Maßnahmen zu treffen und das Risiko für die Überflutungsbereiche zu reduzieren. Um beginnende Hochwässer möglichst rasch zu erkennen, bedarf es daher einer breiten Datengrundlage in Echtzeit. Hochwassermonitoring Systeme können hierbei helfen, diese Daten bereitzustellen.

Es gibt bereits GSM-basierte Systeme, welche jedoch, aufgrund der fehlenden Netzabdeckung, insbesondere im Alpenraum nicht überall verwendbar sind. Neue Funktechnologien wie LoRaWAN können einerseits diese Lücke schließen und andererseits, aufgrund der einfachen Installation, eine Alternative zu den GSM-basierten Systemen darstellen.

In diesem Bericht wird die Verwendung eines solchen LoRaWAN-Netzwerkes für das Hochwassermonitoring am Goiserer Weißenbach, Marktgemeinde Bad Goisern (OÖ), näher beschrieben.

#### **Monitoring System**

##### Sensoren und Gateways im Projektgebiet

Um das Abflussgeschehen des Weißenbaches zu beobachten, wurden im Projektgebiet Ultraschall- und Drucksensoren sowie eine Wetterstation errichtet (siehe folgende Tabelle, Lage siehe Abbildung 1 und Abbildung 2).

Sensor Name	Art	im Bereich
S01	Wetterstation	Chorinskyklause
S02	10m Ultraschall Wasserstand	Chorinskyklause
S03	Drucksensor	Chorinskyklause
S04	5 m Ultraschall Wasserstand	1. Brücke bei Taleinfahrt

Tabelle 1: Übersicht der im Projektgebiet installierten Sensoren

Table 1: Overview of the sensors installed in the project area

Da in dem Gebiet keine Netzabdeckung vorhanden ist, wurde ein eigenes Funknetzwerk basierend auf der LoRaWAN-Technologie errichtet (näheres zur Technologie im nächsten Kapitel). Um den relevanten Bereich abzudecken, wurden zwei LoRaWAN Gateways installiert, welche mit den Sensoren kommunizieren. Gateway\_01

befindet sich im Feuerwehrhaus der Freiwilligen Feuerwehr Weißenbach und Gateway\_02 im Klausenhaus der Chorinskyklause (siehe folgende Abbildungen). Letzteres Gateway wurde an eine bestehende Solar-Anlage neben dem Klausenhaus angeschlossen und eine externe Antenne installiert.

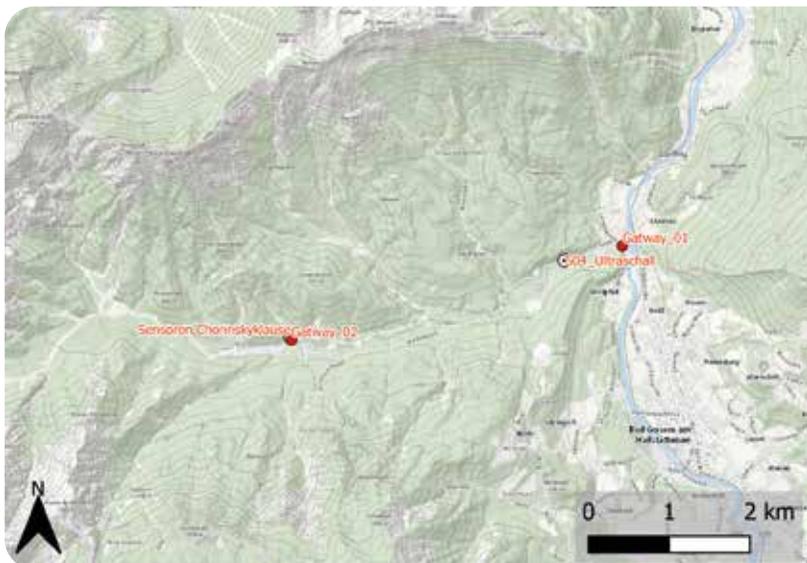


Abbildung 1:  
Übersicht Projektgebiet  
mit Lage der Gateways  
und Sensoren  
(Stand: 21.07.2021).  
Hintergrundkarte ©  
basemap.at

Figure 1:  
Overview of the project  
area showing the location  
of gateways and sensors  
(State: 21.07.2021).  
Basemap © basemap.at



Abbildung 2:  
Lageplan der Messanlage  
im Bereich der  
Chorinskyklause (Stand:  
21.07.2021).

Figure 2:  
Map of the monitoring  
system in the area of the  
Chorinskyklause (State:  
21.07.2021).

## LoRaWAN Funktechnologie

LoRaWAN ist ein Funknetzwerk, welches mit dem LoRa-Übertragungsverfahren Daten über große Distanzen, bei sehr geringem Batterieverbrauch, senden kann.

Um ein solches Netzwerk zu installieren bedarf es eines Gateways mit aufrechter Internetverbindung. Sämtliche Sensoren in der Reichweite davon können daraufhin Daten an das Gateway senden, welches dieses an einen Internet-Server weitergibt (in diesem Fall an [www.thethingsnetwork.org](http://www.thethingsnetwork.org)). Anschließend können die Daten in einer Datenbank gespeichert und für die jeweiligen Zwecke visualisiert werden.

Der große Vorteil des Systems ist die hohe Energieeffizienz der Sensoren. Mit nur einer Batterieladung können viele Sensoren über mehrere Jahre Daten liefern. Und dies bei Reichweiten von bis zu 100 km bei direkter Sicht auf das Gateway. Außerdem ist das System sehr einfach erweiterbar und skalierbar, da ein einzelnes Gateway mit mehr als tausend Sensoren kommunizieren kann. Es können auch Daten vom Gateway an die Sensoren geschickt werden, um beispielsweise das Sendintervall zu verändern.

Da das System im zuteilungsfreien Frequenzbereich rund um 868 MHz arbeitet, sind für Sensoren keine Lizenzkosten oder SIM-Karten notwendig.

Besonders im Alpenraum wie etwa im Bereich der Chorinskyklause eignet sich das System, um Daten von abgelegenen Gebieten, in denen eine schlechte Netzabdeckung vorhanden ist, zu erfassen.

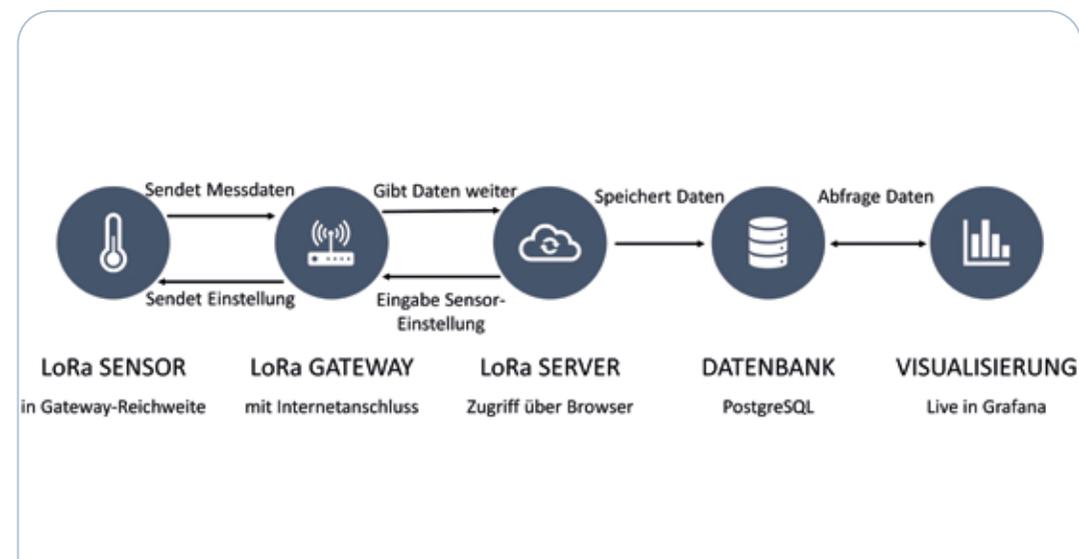


Abbildung 3: Funktionsschema eines LoRaWAN-Netzwerks

Figure 3: Principle of a LoRAWAN network

In den folgenden Bildern sind einige verwendete Sensoren und Gateways dargestellt.

Die aktuellen Daten der Sensoren sind online unter folgendem Link abrufbar:

<https://dashboard.opensensing.com/d/iRUT814Mt/chorinskyklause-bad-goisern-wasserstande?orgId=4>



Abbildung 4: LoRaWAN-Gateway montiert am Feuerwehrhaus Weißenbach bei Bad Goisern

*Figure 4: LoRaWAN gateway mounted at the fire station in Weißenbach in Bad Goisern*

Abbildung 6: Solar-Wetterstation S01 in der Nähe der Klausenmauer

*Figure 6: Solar weather station located close to the Chorinskyklause*



Abbildung 5: LoRaWAN Solar-Gateway montiert am Klausengebäude, mit externer Antenne am Dach, angeschlossen an die bestehende Solaranlage vor dem Klausengebäude

*Figure 5: LoRaWAN solar gateway mounted at the house next to the Chorinskyklause with an external antenna on the roof, connected with the existing solar panel next to the building*



Abbildung 7: Ultraschallsensor S02 montiert an der Klausenmauer

*Figure 7: Ultrasonic sensor S02 mounted at the wall of the dam*



Abbildung 8: Drucksensor S03 montiert an der Klausenmauer

*Figure 8: Pressure sensor S03 mounted at the wall of the dam*



Abbildung 9: Ultraschallsensor S04 montiert bei der 1. Brücke im Weißenbachtal

*Figure 9: Ultrasonic sensor S04 mounted at first bridge in the valley of Weißenbach*



Abbildung 10: Ansicht der Chorinskyklause mit den Messeinrichtungen

Figure 10: View on the Chorinskyklause with the measurement system



Abbildung 11:  
Ansicht der 1. Brücke mit dem Ultraschallsensor S04

Figure 11:  
View of the bridge with the ultrasonic sensor S04

## Hochwasserereignis vom 17./18.07.2021

### Niederschlagsdaten

Circa 50 m von der Chorinskyklause entfernt wurde eine Wetterstation errichtet, welche Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Strahlungsenergie und Niederschlagsmenge aufzeichnet. Die folgen-

den Grafiken zeigen die unkorrigierten Niederschlagsdaten, gemessen während des Ereignisses. Insgesamt fiel 103 mm Niederschlag in der Zeit von 17.07.2021, 18:00 Uhr bis 18.07.2021, 04:00 Uhr.

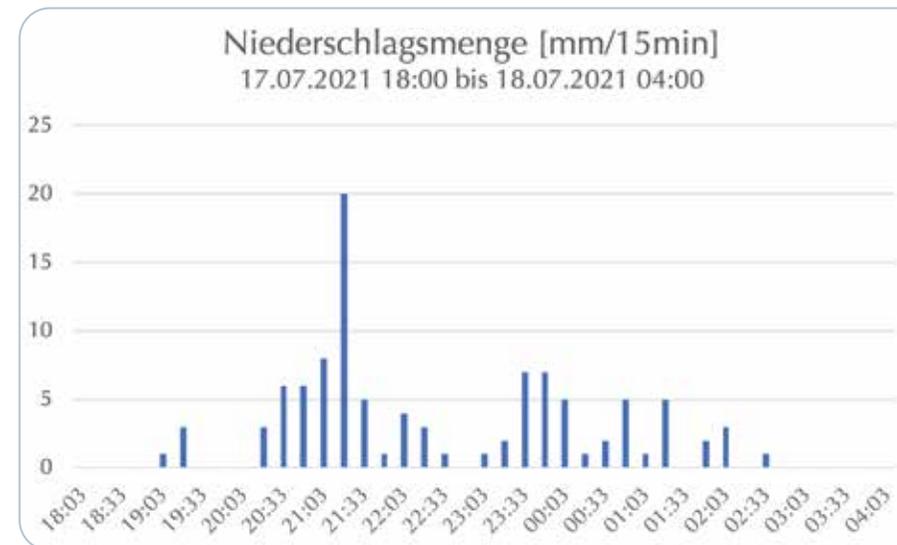


Abbildung 12:  
Viertelstündliche  
Niederschlagsmenge  
gemessen mit Solar-  
Wetterstation S01

Figure 12:  
Quarter-hourly  
precipitation measured  
with solar weather  
station S01



Abbildung 13:  
Niederschlagssumme  
gemessen mit Solar-  
Wetterstation S01

Figure 13:  
Summed up precipitation  
measured with solar  
weather station S01

Anhand des nächstgelegenen Gitterpunktes für Bemessungsniederschläge (Gitterpunkt 3907, <https://ehyd.gv.at>, Lage siehe Abbildung 14) ergeben sich folgende Wiederkehrzeiten für das Niederschlagsereignis (Tabelle 2):

### Wasserstandsdaten

Die folgende Abbildung 15 zeigt die Wasserstände des Hochwasserereignisses gemessen mit Druck- und Ultraschallsensoren (Lage der Sensoren in Abbildung 1 und Abbildung 2 ersichtlich).

Intervall	Max. gemessener Niederschlag während des Ereignisses [mm]	Wiederkehrzeit nach ehyd.gv.at [Jahre]
15 min	20	2–3
30 min	28	2–3
60 min	40	3–5
4 Stunden	80	10–20

Tabelle 2: Gemessener Niederschlag während des Ereignisses und zugehörige Wiederkehrzeit nach ehyd.gv.at

Table 2: Measured precipitation of the event and corresponding return period after ehyd.gv.at

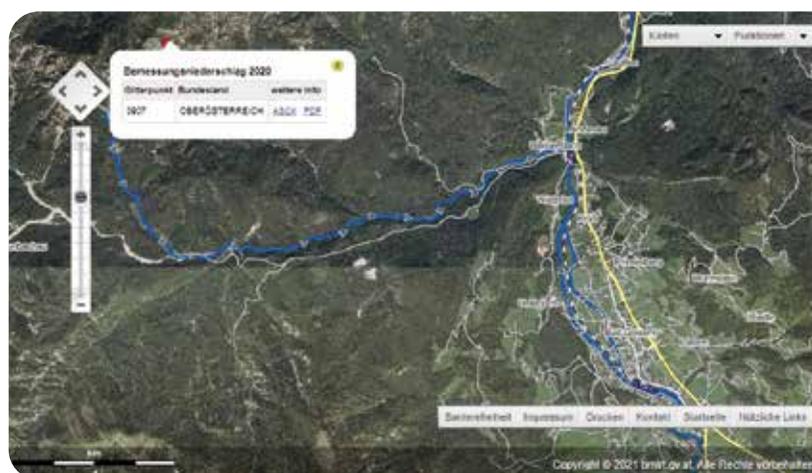


Abbildung 14: Lage des Bemessungsniederschlags-Punktes Nr. 3907 (Quelle: <https://ehyd.gv.at>)

Figure 14: Position of the point with number 3907 used for determining the design rainfall (Source: <https://ehyd.gv.at>)

Bei den Wasserstands-Daten im Bereich der Chorinskyklause sind zwei lokale Maxima sichtbar. Beim ersten lokalen Maximum um 22:06 wurde ein Wasserstand von 611 cm gemessen, beim zweiten um 00:56 ein Wasserstand von 673 cm (beide gemessen mit Drucksensor S03).

Der 10 m Ultraschallsensor (S02) bei der Klausenmauer konnte montagebedingt nur einen maximalen Wasserstand von 6 m messen. Messtechnisch waren mit diesem Ultraschallsensor maximal 10 m möglich.

Beim 5 m Ultraschallsensor im Bereich

der Brücke (S04) ist ebenfalls ein erstes lokales Maximum ersichtlich bei dem um 22:41 ein maximaler Wasserstand von 131 cm gemessen wurde.

Die Zeitdifferenz vom ersten Maximum beim Drucksensor vor der Klausenmauer (S03) und vom 5m Ultraschallsensor an der Brücke unten (S04) beträgt 35 min. Wenn man einen Warnwert ab 2 m Wasserstand an der Klausenmauer berücksichtigt, ergibt sich eine potentielle Frühwarnzeit von 1 Stunde bis zum Erreichen der Hochwasserwelle im Ortsteil Weißenbach/Bad Goisern.



Abbildung 15: Wasserstände des Hochwasserereignisses (17.07.2021 bis 18.07.2021); OBEN: Wasserstand vor der Klausenmauer gemessen mit Drucksensor S03; MITTE: Geschiebe-/Wasserstand vor der Klausenmauer gemessen mit Ultraschallsensor S02, UNTEN: Wasserstand im Bereich der Brücke gemessen mit Ultraschallsensor S04

Figure 15: Water levels during the flood event (17.07.2021 to 18.07.2021): TOP: Water level above the dam measured with pressure sensor S03; MIDDLE: Debris/water level above dam measured with ultrasonic sensor S02, BOTTOM: Water level under the bridge measured with ultrasonic sensor S04

## Fotodokumentation

Die folgenden Fotos wurden vom Feuerwehrhauptmann Thomas Urstöger zur Verfügung gestellt und zeigen die Auswirkungen des Hochwassers.



Abbildung 16: Aufstauung und Treibholz im Bereich Naglstein, wo noch ein Sensor installiert werden soll (© Thomas Urstöger)

Figure 16: Impoundments and driftwood in the section of Naglstein where an additional sensor should be placed (© Thomas Urstöger)



Abbildung 17: Aufräumarbeiten im Staubecken der Chorinskyklause (© Thomas Urstöger)

Figure 17: Cleaning up in the retention basin of the Chorinskyklause (© Thomas Urstöger)

## Schlussfolgerung und Ausblick

Anhand des Monitoring Systems im Bereich der Chorinskyklause konnte gezeigt werden, dass die neue Technologie LoRaWAN (Datenübertragung über weite Strecken mit sehr geringem Energiebedarf) ideal geeignet ist, um GSM-unterversorgte und insbesondere abgelegene Bereiche mit Sensoren auszustatten und zu überwachen. Obwohl in dem Gebiet ein sehr schlechtes Telefon- und kein Stromnetz vorhanden ist, gelang es, die Wasserstände und Klimadaten kontinuierlich alle 10 bis 15 Minuten zu erfassen und die Daten online verfügbar zu machen.

Bei dem dargestellten Ereignis kann mit den aufgezeichneten Daten eine Vorwarnzeit von ca. 1 Stunde vom Überschreiten eines Wasserstandes von 2 m an der Klausenmauer bis zum Erreichen der Hochwasserwelle im Ortsteil Weißenbach/Bad Goisern ermittelt werden.

Mit Batterielaufzeiten von mehreren Jahren verringert sich auch der Wartungsaufwand der Sensoren auf ein Minimum. Außerdem können zusätzlich zu den hier verwendeten Sensoren

unter anderem Neigungssensoren, Systeme zur Messung der Betonqualität, Bodenfeuchtesensoren, GPS-Tracker, Zählsensoren für Autos sowie Personen, Türkontaktsensoren, Blitzsensoren und Sensoren zur Erfassung von Bewegungen installiert werden.

Da die Sensoren keine SIM-Karten benötigen, lassen sich insbesondere bei Systemen mit vielen Sensoren hohe Kosten und Verwaltungsaufwand vermeiden.

Aufgrund der vielen Vorteile ist die LoRaWAN-Technologie daher eine ernst zu nehmende Alternative für Monitoringsysteme.

### Anschrift des Verfassers/Author's address:

DI Peter Hartl MAS(GIS)  
Hartl Consulting e. U.  
Gröben 11  
A-6134 Vomp  
Tirol/Austria  
office@hartl-consulting.com  
www.hartl-consulting.com

# hartl consulting

## Leistungen

- Planungen für WLW und Skigebiete
- Geographische Informationssysteme (GIS)
- Global Positioning Systems (GPS)
- Laserscan und Orthofoto
- Sensortechnik/GPS-Tracker für Tiere

[www.hartl-consulting.at](http://www.hartl-consulting.at)

JOHANNES KAMMERLANDER, MARKUS MOSER, PATRICK STOLZ

## Evaluierung von Hochwasserberechnungen am Strobl Weißenbach

### *Evaluation of flood estimates at the Strobl Weissenbach*

#### **Zusammenfassung:**

Am Beispiel des Strobl Weißenbach in der Salzburger Gemeinde Strobl wird untersucht, wie konsistent der  $HQ_{100}$ -Wert und die zugrundeliegenden N/A-Simulationen sind. Für das 45 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet gibt es mehrere hydrologische Untersuchungen, welche bis ins Jahr 1970 zurückreichen. Seit 2011 ist im Strobl Weißenbach ein Pegel situiert und in der jüngsten Vergangenheit ereigneten sich zwei große Hochwasserereignisse. Grund genug, die bisherigen  $HQ_{100}$ -Werte kritisch zu hinterfragen und bestehende N/A-Modelle zu testen. Die Auswertungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der  $HQ_{100}$ -Werte. Die Rückrechnung der jüngsten Hochwässer mit zwei vorhandenen N/A-Modellen führt hingegen zu unstimmgigen Ergebnissen.

#### **Abstract:**

*Several hydrologic studies have been conducted at the Strobl Weißenbach in the district of Salzburg (Austria) since the 1970s. There is a gauging station situated in the main stream since 2011 and two large flood events took place in 2019 and 2021. This study compares the 100-years flood estimates ( $HQ_{100}$ ) resulting from previous studies. It is valid to check the compliance with the flood magnitude of the recent events.*

#### **Stichwörter:**

Niederschlag-Abfluss-Modellierung,  
 $HQ_{100}$ , Ereignisdokumentation,  
Strobl Weißenbach

#### **Keywords:**

Precipitation-runoff-modelling,  
event documentation,  
Strobl Weißenbach

#### **Einleitung**

Für die Ermittlung von Basisbemessungshochwasserganglinien in Wildbacheinzugsgebieten sind Niederschlag-Abflussmodelle nicht mehr wegzudenken. In den allermeisten Wildbacheinzugsgebieten sind aber keine Pegelmessstationen vorhanden und die Modellparameter müssen daher im Vorhinein ausreichend gut „geschätzt“ werden. Um dennoch ein belastbares Ergebnis zu erhalten, sollten das Modell und/oder die Ergebnisse mit anderen Methoden plausibilisiert werden. Das ist die gängige Praxis in der WLW.

Aber auch in Einzugsgebieten mit Abflusspegel bleiben Unsicherheiten bestehen. Denn die gemessenen Hochwasserereignisse sind allzu häufig viel kleiner als die benötigten, 100-jährlichen Basisbemessungshochwässer. Es bedarf also in der Regel auch hier der Plausibilisierung.

Das Endergebnis einer N/A-Simulation ist also in der Regel nicht rein objektiv, sondern unterliegt zahlreichen, subjektiven Einschätzungen und Interpretationen des Bearbeiters. Das führt zwangsläufig zu der Frage: „Wie gut sind nun die Hochwasserwerte abgesichert?“ bzw. „Wie verlässlich sind unsere N/A-Modellanwendungen?“

#### **Ausgangslage und Zielsetzung**

Im Strobl Weißenbach in der Salzburger Gemeinde Strobl gibt es den glücklichen Fall, dass es hier einerseits einen Abflusspegel gibt und andererseits erst kürzlich, in den Jahren 2019 und 2021, zwei große Hochwässer (Spitzenabfluss war knapp unter Wundt!) aufgetreten sind. Zudem

gibt es für den Strobl Weißenbach mehrere hydrologische Studien mit fix-fertig aufgesetzten N/A-Modellen aus Zeiten vor 2019.

Im ersten Teil dieses Beitrags werden die Ergebnisse der unterschiedlich alten Studien gegenübergestellt und mit den großen Hochwässern 2019 und 2021 in Relation gesetzt. Dieser Teil soll Auskunft über die Methodik-bedingte Schwankungsbreite des  $HQ_{100}$ -Werts im Strobl Weißenbach liefern. Oder in anderen Worten: „Wie gut passen die bisherigen  $HQ_{100}$ -Werte unter Berücksichtigung der jüngsten Hochwasserereignisse?“

Im zweiten Teil werden zwei bereits aufgesetzte N/A-Modelle (HEC-HMS und ZEMO-KOST) herangezogen, um die Hochwässer 2019 und 2021 rückzurechnen. Es wird der Frage nachgegangen, ob jene Modelle, mit denen das  $HQ_{100}$  berechnet wurde, auch ein „echtes“, großes Bemessungshochwasser gut nachbilden können.

#### **Beschreibung des Einzugsgebiets**

Der Strobl-Weißenbach befindet sich in den Salzburger Kalkvoralpen und gehört im Wesentlichen zu den Bergen der Osterhorngruppe in den nördlichen Kalkalpen. Das langgestreckte Einzugsgebiet verläuft von SW nach NO und mündet im Ortsteil Weißenbach/Aigen als rechtsufriger Zubringer in den Ischlfloss.

Das Einzugsgebiet ist rund 45 km<sup>2</sup> groß und der Hauptbach rund 11 km lang. Es handelt sich um einen Jungschuttbach mit großen Geschiebequellen in den schroffen, südlichen und östlichen Kopfeinzugsgebieten, in denen Dachsteinkalk und Ramsaudolomit vorherrschen. Im Westen liegt die rückstandsreiche Oberalm-

Formation vor, welche zur Entwicklung von Böden mit hoher Abflussbereitschaft neigt. Es befindet sich hier die bekannte Postalm.

In Bezug auf die Hochwasserentstehung sind Nordstaulagen maßgebend, ebenso die Gewitterstraßen aus NW bzw. W im Bereich der Postalm. Hohe Abflüsse treten aber auch bei sehr starker Schneeschmelze im Frühjahr bzw. bei Tauwetterphänomenen mit hochreichendem Regen im Winter auf. Am Strobl/Weißbach wird seit dem Jahr 2011 vom HD Salzburg der Abflusspegel Strobl/Aigen [EZG Größe ( $A_e$ ) von 38 km<sup>2</sup> im hm 36] betrieben.

#### Bisherige hydrologische Studien und HQ<sub>100</sub>-Werte

Im Verbauungsprojekt *Strobl/Weißbach 1970* wurde die 100-jährliche Hochwasserspitze am Eingang in die Langersalplkamm (hm 40,  $A_e \sim 35$  km<sup>2</sup>) anhand verschiedener Abschätzverfahren und einfacher N/A-Modelle ermittelt und schließlich mit 160 m<sup>3</sup>/s festgelegt.

Im Jahr 2007 wurde das Ingenieurbüro *dlp (diensch | laner | prax)* von der zuständigen GBL mit einer hochwasser-hydrologischen Studie für den Strobl/Weißbach beauftragt. Das primäre Ziel der Studie war es, die Wirkung der Geschiebedosiersperren auf die Hochwasserspitze zu untersuchen. Es wurde dazu das N/A-Modell HEC-HMS herangezogen. Die Modellkalibrierung erfolgte über die Nachrechnung von zwei Hochwasserereignissen aus dem Jahr 2002. Laut Augenzeugen und anhand von Anschlaglinien konnten damals die Scheitelwerte beider Ereignisse auf rund 50–60 m<sup>3</sup>/s rückbestimmt werden. Für die Ermittlung der 100-jährlichen Basisbemessungsganglinie wurden als Regeninput die (damaligen) ÖKOSTRA-Daten unter Berücksichtigung einer konstanten Flächenabminderung herange-

zogen. Als kritische Regendauerstufe ergab sich ein 3-Stunden-Starkregen (Blockregen), der am Eintritt in den Unterlauf bei hm 25 ( $A_e \sim 40$  km<sup>2</sup>) zu einer Abflussspitze von 164 m<sup>3</sup>/s führte.

Für die Erarbeitung eines Hochwasserschutzkonzeptes für den Vorfluter hat das Ingenieurbüro *RIOCOM* im Jahr 2009 und im Auftrag der Oberösterreichischen Landesregierung das 100-jährliche Basisbemessungshochwasser für den Ischlfluss berechnet. Der Ischlfluss entspringt am Seeauslass des Wolfgangsees und mündet in Bad Ischl in die Traun. Das Einzugsgebiet zwischen Seeauslass und Einmündung in die Traun ist 128 km<sup>2</sup> groß und der Strobl/Weißbach ist der größte Zubringer. Die hydrologische Berechnung durch *RIOCOM* erfolgte mit dem N/A-Modell ZEMOKOST, welches vermutlich auf den statistisch gut abgesicherten HQ<sub>100</sub>-Wert am Pegel Giselabrücke in der Ischl kalibriert wurde. Als Regenszenario wurde ein 100-jährlicher ehyd-Bemessungsregen mit distanzabhängiger, schwacher Abminderung herangezogen. Für den Strobl/Weißbach, als Teileinzugsgebiet des Ischlflusses, ergaben die Berechnungen ein HQ<sub>100</sub> von 172 m<sup>3</sup>/s.

Im Jahr 2011 wurde am Strobl/Weißbach bei hm 36 ( $A_e \sim 38$  km<sup>2</sup>) der Abflusspegel Strobl/Aigen (HZA 204255) durch den HD Salzburg in Betrieb genommen und bereits im zweiten Messjahr konnte ein Hochwasserereignis mit rund 37 m<sup>3</sup>/s Spitzenabfluss gemessen werden. Im Jahr 2016 wurde am Abflusspegel des Strobl/Weißbachs eine Anschlagtafel mit den hydrologischen Kenndaten montiert. Auf Grundlage einer nicht näher bekannten, statistischen Auswertung wird das HQ<sub>100</sub> für den Pegelstandort ( $A_e \sim 38$  km<sup>2</sup>) mit ca. 115 m<sup>3</sup>/s angegeben.

Diese zusätzliche Datenlage, sowie die Weiterentwicklung der N/A-Modellierung in

den vorangegangenen Jahren waren der Anlass für eine neuerliche, hydrologische Studie durch das Fachzentrum Wildbachprozesse der WLV im Jahr 2015. Es wurde wiederum das N/A-Modell HEC-HMS herangezogen und anhand mehrerer, gemessener Hochwasserereignisse der Größenordnung HQ<sub>1–5</sub> kalibriert und validiert. Mit dem neu aufgesetzten HEC-HMS Modell wurden schließlich mehrere, 100-jährliche Niederschlags-szenarien definiert und das Basisbemessungshochwasser ermittelt. Für den Pegelstandort bei hm 36 ( $A_e \sim 38$  km<sup>2</sup>) ergab sich ein HQ<sub>100</sub> von 141 m<sup>3</sup>/s und für die Einmündung in den Ischlfluss ( $A_e \sim 45$  km<sup>2</sup>) ein HQ<sub>100</sub> von 149 m<sup>3</sup>/s.

Aus Eigeninteresse des Fachzentrums Wildbachprozesse und insbesondere zur Überprüfung der Modellsensitivität wurde für den Strobl/Weißbach nachträglich (im Jahr 2017) auch das N/A-Modell ZEMOKOST herangezogen. Die Modellkalibrierung erfolgte wiederum anhand bisher gemessener Hochwasserereignisse. Für die Berechnung des Basisbemessungshochwassers HQ<sub>100</sub> wurde die „Standardroutine“ mit einem 100-jährlichen Blockregen und distanzabhängiger, starker Abminderung verwendet. Für den Pegelstandort bei hm 36 ( $A_e \sim 38$  km<sup>2</sup>) ergab sich damit ein HQ<sub>100</sub> von 164 m<sup>3</sup>/s und für die Einmündung in den Ischlfluss ( $A_e \sim 45$  km<sup>2</sup>) ein HQ<sub>100</sub> von 173 m<sup>3</sup>/s.

#### Hochwasserereignis 2019

In der Nacht vom 28. auf 29.07.2019 ereignete sich im Einzugsgebiet des Strobl/Weißbachs ein heftiger, mehrstündiger Starkregen. Es gab dabei zwei Regenzentren. Eines lag im Südosten des Einzugsgebietes am oberen Rand des Teileinzugsgebiets Kammersbach und das andere lag im Osten am oberen Rand der Teileinzugsgebiete

Gallbach und Werkstattgraben (Abbildung 1a). Gegen 04:00 Uhr früh erreichte die sehr schnell ansteigende Hochwasserwelle den Siedlungsraum. Der Abflusspegel Strobl/Aigen bei hm 36 verzeichnete einen Scheitelwert von 112 m<sup>3</sup>/s (Abb. 1c); dieser Wert hat sich anhand von Referenzprofilmessungen grob bestätigt.

Die Ganglinien von Abfluss und Niederschlag in Abbildung 1c zeigen, dass der schwache Vorregen sozusagen vollständig gepuffert wurde und zu keiner unmittelbaren Abflussreaktion führte. Erst bei Einsetzen der sehr hohen Intensitäten kam es zu einem sprunghaften Anschwellen des Abflusses; Augenzeugen sprachen von einem fast flutwellenartigen Anstieg des Wasserstands im Unterlauf. Eine ähnliche, hydrologische Reaktion wurde bereits bei kleineren Abflussereignissen festgestellt. Beim ersten Starkregen auf trockenen Boden fällt die Abflussreaktion im Strobl/Weißbach üblicherweise schwach aus und bei einem darauffolgenden, weiteren Starkregen ist diese hingegen äußerst stark und schnell.

Im 5-stündigen Zeitfenster des Regenpeaks betrug die Regenhöhe lokal bis zu 129 mm und im Gebietsmittel rund 82 mm (Abb. 1b). Für die zwei lokalen Regenschwerpunkte entspricht diese Regenmenge einer „Jährlichkeit“ von rund 70 Jahren (gem. ehyd-Bemessungsregen, Gp. 3906). Allerdings liegt das Gebietsmittel etwas unter dem 30-jährlichen, flächenabgeminderten ehyd-Bemessungsregen. Die Jährlichkeit des Regenereignisses liegt also für den Hauptbach und sein 45 km<sup>2</sup> großes Einzugsgebiet irgendwo zwischen 30 und 70 Jahren. Zusammen mit extremwert-statistischen Auswertungen der 10-jährigen Pegelreihe ergibt sich für den Spitzenabfluss eine plausible Bandbreite der Jährlichkeit von 30 bis 50 Jahren.

## a) Auswertung INCA

28.07. 12:00 Uhr bis 29.07. 12:00 Uhr

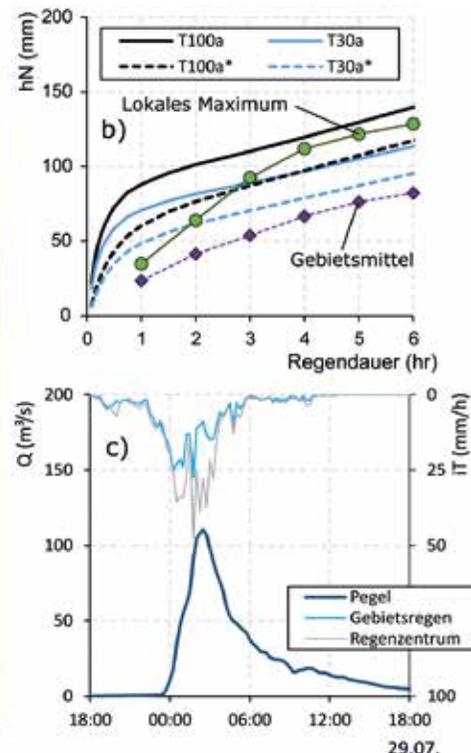
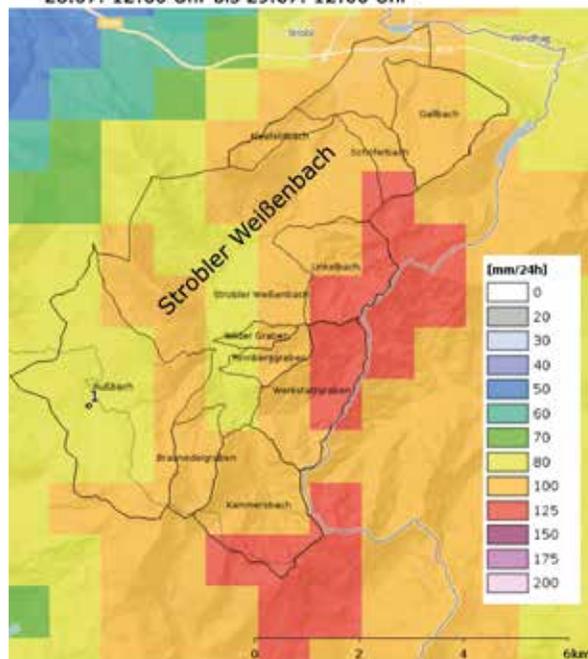


Abbildung 1: a) Darstellung der Regenmengen im erweiterten Ereigniszeitraum (24 Stunden) laut INCA-Analysedaten der ZAMG, b) Gegenüberstellung der gemessenen Regenhöhen (lokales Maximum und Gebietsmittel) mit den ehyd-Bemessungsregendaten; T100a und T30a entsprechen den 100- bzw. 30-jährlichen Bemessungsregen am Gitterpunkt und T100a\* und T30a\* entsprechen den flächenabgeminderten, 100- bzw. 30-jährlichen Bemessungsregen im gesamten Einzugsgebiet und c) Abflussganglinie am Pegel Strobl/Aigen mit dem Gebietsregen und dem lokalen Regenmaximum.

Figure 1: a) 24-hours rainsum of the event in 2019; b) comparison of the design-rain: T100 and T30 are the design rains with an occurrence interval of 30 and 100 years at the point-scale, and T100\* and T30\* account for the 45 km<sup>2</sup> catchment size; c) discharge hydrograph at the gauging station and mean and maximum rainfall in the catchment.

## Hochwasserereignis 2021

Am 17.07.2021 ereignete sich im Einzugsgebiet des Strobl-Weißenbachs ein weiteres, sehr großes Hochwasserereignis mit einer Abflussspitze von 107 m<sup>3</sup>/s am Pegel Aigen/Strobl.

Der Auslöser waren mehrere, hintereinander folgende Starkregenereignisse innerhalb von ca. 24 Stunden. Der letzte Starkregen war zugleich der Stärkste und ereignete sich von ca. 20:00 bis 23:00 Uhr [UTC], inkl. Nachregen bis ca. 02:00 Uhr. Im 5-stündigen Zeitfenster

des Regenpeaks betrug die Regenhöhe lokal bis zu 105 mm und im Gebietsmittel rund 62 mm. Die Niederschlagsmengen des Regenereignisses waren somit geringer als beim Ereignis von 2019. Das Gebietsmittel und das lokale Maximum entsprechen in etwa dem Bemessungsregen mit 10-jähriger und 30-jähriger, mittlerer Wiederkehrdauer.

Demgegenüber lagen die Spitzenabflüsse beider Ereignisse sehr nahe beieinander, also im Bereich einer 30- bis 50-jährigen, mittleren Wiederkehrdauer. Der Grund, warum die Scheitelabflüsse beider Ereignisse fast gleich groß

sind, obwohl die Regenhöhe 2021 deutlich geringer war als 2019, liegt in den Vorbedingungen. Anders als in 2019, hat sich rund 12 Stunden vor dem auslösenden Starkregen ein vorhergehender, mittelstarker und ca. 3-stündiger Starkregen ereignet. Am Pegel Aigen/Strobl führte dieser Vorregen zu einer Hochwasserwelle mit einem Scheitelwert von ca. 30 m<sup>3</sup>/s (ca. HQ<sub>1</sub>).

## Rückrechnung der Hochwasserereignisse 2019 und 2021

Nachdem für den Strobl-Weißenbach bereits zwei N/A-Modelle fertig aufbereitet vorlagen, lag es nahe, diese beiden Modelle anhand der Ereignisse 2019 und 2021 erneut zu validieren. Die Zielgröße war die gemessene Abflussganglinie am Pegel Strobl/Aigen bei hm 36 (Ae ~ 38 km<sup>2</sup>) mit den Scheitelwerten von 112 m<sup>3</sup>/s (Ereignis 2019) und 107 m<sup>3</sup>/s (Ereignis 2021). Der Gesamtabflussbeiwert beider Ereignisse lag jeweils bei knapp unter 50 %.

Die Regenmengen als Modellinput wurden von den INCA-Analysedaten abgeleitet. Über das ZAMG-Wetterinformationsportal wurden die INCA-Regendaten für zehn Teileinzugsgebiete des Strobl-Weißenbachs erhalten. Für die Rückrechnung beider Ereignisse wurden den 29 Teilgebieten der zwei N/A-Modelle jeweils eine räumlich und mengenmäßig passende Zeitreihe der zehn INCA-Teileinzugsgebiete zugewiesen. In den überwiegenden Fällen handelte es sich um die Zeitreihe der mittleren Regenmenge (INCA-mean-Werte). Nur in den Teilgebieten mit lokalen Regenspitzen wurde die Zeitreihe der maximalen Regenmenge verwendet (INCAmax-Werte). Das Ziel war es, die INCA-Regenverteilung (Abb. 1a für das Ereignis 2019) gut nachzubilden.

Die Rückrechnung des Ereignisses von 2019 mit dem N/A-Modell ZEMOKOST ergibt

einen Scheitelwert von 94 m<sup>3</sup>/s und somit eine Unterschätzung von 15 %. Die Hochwasserfracht stimmt allerdings sehr gut überein (Abb. 2, oben). Die Wellenform, insbesondere der Wellennachlauf, konnte mit ZEMOKOST ebenfalls gut nachgebildet werden. Ganz anders zeigt sich die Rückrechnung des Ereignisses von 2019 mit dem N/A-Modell HEC-HMS. Der simulierte Scheitelwert beträgt 128 m<sup>3</sup>/s und liegt 15 % über dem gemessenen Wert. Die Wellenform stimmt bis zum absteigenden Ast der Hochwasserwelle gut überein, der Nachlauf (ab Q < 50 m<sup>3</sup>/s) wird ohne Anwendung der Recession-Methode sehr stark überschätzt (nicht in Abb. 2 dargestellt), aber mit „Recession Constant = 0,1“ und „Ratio to Peak = 0,1“ gut getroffen (Abb. 2, oben). Die Hochwasserfracht wird mit HEC-HMS überschätzt und damit auch der Gesamtabflussbeiwert.

Für das Ereignis 2021 ist der Unterschied zwischen den beiden N/A-Modellen noch stärker ausgeprägt (Abb. 2, unten). Die Abflussreaktion des Vorregens wird mit ZEMOKOST gut und mit HEC-HMS weniger gut getroffen. Die Pegelmessungen zeigen eine Abflussreaktion in Höhe eines HQ<sub>1</sub> für den ersten Starkregen, aber kaum eine Abflussreaktion für den nachfolgenden Vorregen. Die ZEMOKOST-Simulation zeigt ein ähnliches Bild, überschätzt aber die Abflussfracht. Hingegen führt die HEC-HMS-Simulation zu insgesamt vier Hochwasserwellen mit Scheitelwerten zwischen 20 m<sup>3</sup>/s und 40 m<sup>3</sup>/s. Die große Hauptwelle wird mit ZEMOKOST um ca. 30 % unterschätzt, der Wellenanstieg ist zu langsam, hingegen passt der Wellennachlauf gut. Mit HEC-HMS wird der gemessene Scheitelwert um rund 19 % überschätzt. Der ansteigende Ast der Hauptwelle stimmt gut überein, der absteigende Ast liegt aber zu hoch. Die Hochwasserfracht bzw. der Gesamtabflussbeiwert wird mit ZEMOKOST gut getroffen, mit HEC-HMS stark überschätzt.

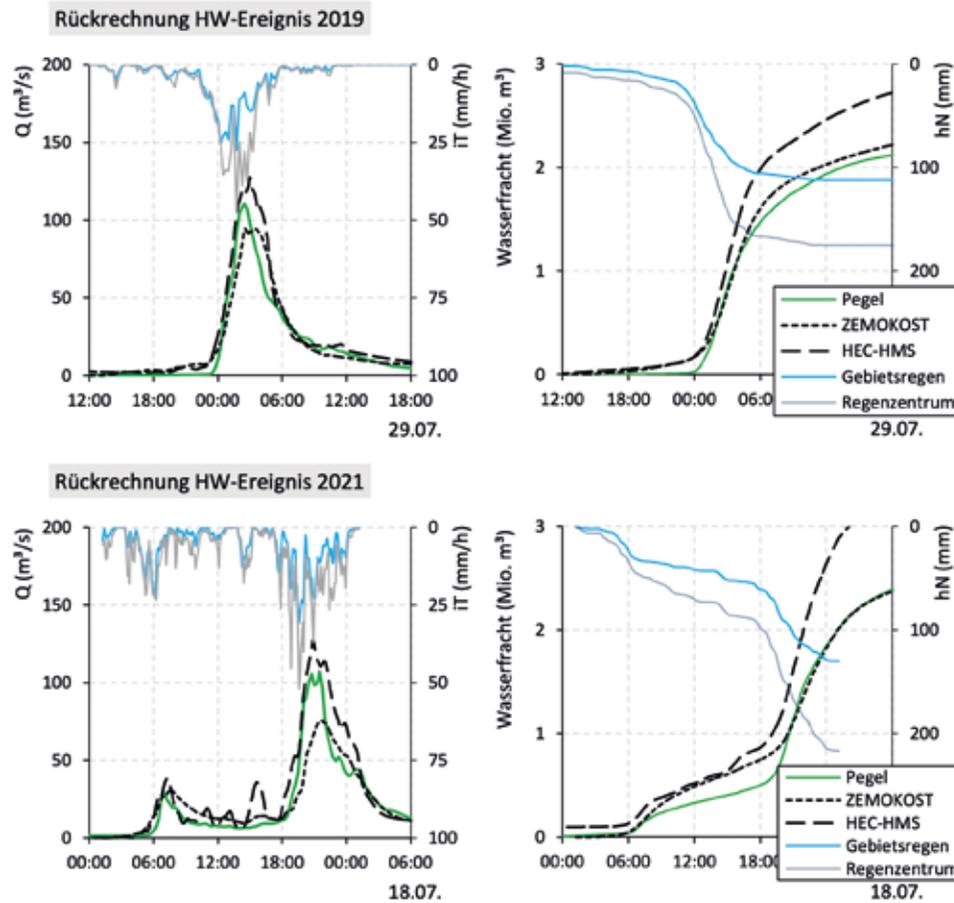


Abbildung 2: Gemessene und simulierte Abflussganglinie (links) und Wasserfracht (rechts) am Standort des Pegels Strobl/Aigen

Figure 2: Measured and modelled discharge hydrograph (left) and flood volume at the gauging station.

### Wie gut passen die bisherigen HQ<sub>100</sub>-Werte unter Berücksichtigung der jüngsten Hochwassereignisse?

Die grafische Zusammenstellung der bisher ermittelten HQ<sub>100</sub>-Werte am Strobl/Weißbach ist in Abb. 3 dargestellt und sie zeigt eine domi-

nante Gruppe. Vier der sechs HQ<sub>100</sub>-Werte liegen nahezu auf einer Linie, sofern man den Bezugspunkt entsprechend berücksichtigt. Ein HQ<sub>100</sub>-Wert (WLV 2015) liegt rund 15 % unter den oben genannten und der kleinste HQ<sub>100</sub>-Wert liegt 27 % darunter bzw. im Bereich der Scheitelabflüsse der beiden Ereignisse von 2019 und 2021.

Die Spitzenabflüsse der beiden Ereignisse von 2019 und 2021 haben eine mittlere

Wiederkehrdauer zwischen 30 und 50 Jahren. Die Pegelzeitreihe ist zwar zu kurz für eine extremwertstatistische Auswertung hinsichtlich dem HQ<sub>100</sub>-Wert, aber es kann daraus eine Bandbreite bzw. ein potentieller Wertebereich abgeleitet werden. Demnach liegt die Bandbreite des „wahren“ HQ<sub>100</sub>-Wertes des Strobl/Weißbach am Pegelstandort zwischen 115 m<sup>3</sup>/s und 190 m<sup>3</sup>/s. Dieser potentielle Wertebereich deckt alle bisher ermittelten HQ<sub>100</sub>-Werte ab, ist aber deutlich größer als die Streuung der bisherigen HQ<sub>100</sub>-Werte.

Der „wahre“ HQ<sub>100</sub>-Wert kann mittels statistischer Auswertungen also nicht näher eingegrenzt werden, die bisherige Bandbreite aus den N/A-Simulationen erweist sich aber als plausibel.

### Wie gut funktionieren die N/A-Modelle für echte Ereignisse?

Am Beispiel Strobl/Weißbach konnten die Parameter der beiden N/A-Modelle mittels Kalibrierung und Validierung grob nachjustiert werden.

Die Hochwasserereignisse, welche für die Kalibrierung herangezogen wurden, lagen in einer Größenordnung von ca. HQ<sub>1</sub> bis HQ<sub>5</sub>. Solche günstigen Voraussetzungen sind in Wildbacheinzugsgebieten eher selten.

Die nachträgliche Validierung der N/A-Modelle mit den beiden großen Hochwasserereignissen von 2019 und 2021 zeigte aber trotzdem einige Defizite auf. Zum einen unterscheiden sich die Ergebnisse der Rückrechnung zwischen den beiden N/A-Modellen stark. Mit ZEMOKOST wird der Peak unterschätzt, mit HEC-HMS etwas weniger stark überschätzt. Die Ganglinienform der Hauptwelle, insbesondere der

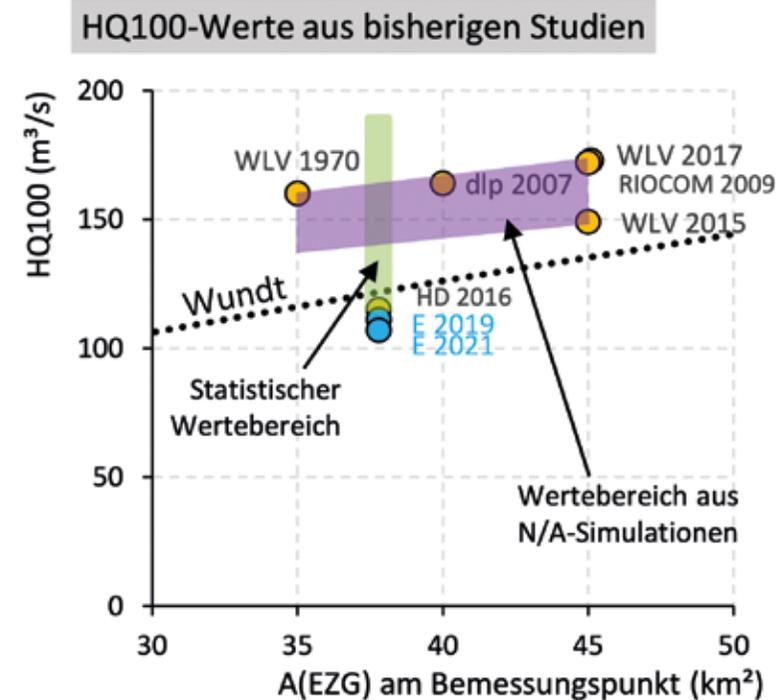


Abbildung 3: Zusammenstellung der HQ<sub>100</sub>-Werte des Strobl/Weißbachs aus allen bekannten Untersuchungen. Zum Vergleich werden auch die Wundt-Formel sowie die Scheitelwerte der beiden jüngsten Hochwässer (Ereignis 2019 und Ereignis 2021) dargestellt. Die violette Fläche stellt die Bandbreite der HQ<sub>100</sub>-Werte aus den N/A-Simulationen dar und die grüne Fläche entspricht dem statistisch-ermittelten Wertebereich des HQ<sub>100</sub> am Pegelstandort.

Figure 3: Compilation of the 100-years peak-flows, that were obtained from all known studies. For comparison, the empiric formula of Wundt, and the peak flows of the two flood events in 2019 and 2021 are plotted. The purple area indicates the bandwidth of the modelled 100-year peak-flows and the green area shows the range of the 100-year peak-flow, that was obtained from statistical analyses of the gauging data.

ansteigende Ast und der Peak, können mit HEC-HMS besser nachgebildet werden; der Vor- und Nachlauf, die Hochwasserfracht und somit der Gesamtabflussbeiwert hingegen mit ZEMOKOST.

Die Auswirkung von ungünstigen Vorbedingungen (Vorfeuchte) auf die Abflussreaktion wurde mit ZEMOKOST nicht gut nachgebildet. Im Ereignis 2021 wurde die erste Hochwasserwelle zwar gut getroffen, die 12 Stunden spätere Hauptwelle hingegen deutlich unterschätzt. In ZEMOKOST müssen ungünstige Vorbedingungen vermutlich durch Parameteranpassungen, wie z. B. Erhöhung des Abflussbeiwerts oder Verringerung der Initialabstraktion, berücksichtigt werden. Die bloße Simulation eines Vorregens reicht nicht aus. Die HEC-HMS-Simulationsergebnisse lassen hier keine Interpretation zu.

#### Schlussfolgerungen für N/A-Modellierungen zur Hochwasserabschätzung

Die Ergebnisse der bisherigen N/A-Simulationen am Strobl-Weißenbach (Abb. 3) lieferten eine enge und plausible Bandbreite des  $HQ_{100}$ -Werts von  $141 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $163 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegelstandort. In all diesen Untersuchungen wurden die ermittelten  $HQ_{100}$ -Werte bzw. die verwendeten N/A-Modelle entsprechend plausibilisiert. Die Abflusspende schwankt dabei zwischen  $3,7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  und  $4,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ .

Allerdings lieferten die beiden N/A-Modelle ZEMOKOST und HEC-HMS widersprüchliche Ergebnisse: Die HEC-HMS-Simulation überschätzte die Hochwasserscheitel der beiden Ereignisse, lieferte aber einen eher geringen  $HQ_{100}$ -Wert (WLV 2015 in Abb. 3). Ganz anders bei ZEMOKOST: die Rückrechnungen lagen deutlich unter den Pegelmessungen, dasselbe Modell lieferte aber einen eher höheren

$HQ_{100}$ -Wert (WLV 2017 in Abb. 3). Der Grund für diesen Gegensatz dürfte in den unterschiedlichen Bemessungsregenszenarien liegen. Die Regenszenarien für die  $HQ_{100}$ -Bemessung werden nämlich in den meisten Fällen vom Bearbeiter festgelegt und unterliegen somit subjektiven Einflüssen. Für das Beispiel Strobl-Weißenbach ist es daher insgesamt nahezu verwunderlich, dass die  $HQ_{100}$ -Ergebnisse aller bisherigen N/A-Modelle (bzw.  $HQ$ -Werte) trotzdem so gut übereinstimmen.

Die maßgebenden Regenszenarien für die Berechnung des  $HQ_{100}$ -Werts im Strobl-Weißenbach waren:

- Die Studien von dlp 2007 und WLV 2015 (beide mit dem N/A-Modell HEC-HMS) ergaben beide eine kritische Regendauer von 3 Stunden. In dlp 2007 wurde dazu ÖKOSTRA als Blockregen mit Flächenabminderung verwendet, in WLV 2015 wurden hingegen mittelbetonte, synthetische Regenszenarien mit flächenabgeminderter Bemessung (Regenzentrum) und ÖKOSTRA (restliches Gebiet) definiert.
- In den Studien von riocom 2009 und WLV 2017 (beide mit dem N/A-Modell ZEMOKOST) wurde hingegen eine kritische Regendauer von rund 1,5 Stunden ermittelt. Beiden Simulationen liegt die ehyd-Bemessung als Blockregen mit räumlichem Regenzentrum und distanzabhängiger Abminderung zugrunde.

Aus dem Ereignis 2019 geht allerdings hervor, dass eine insgesamt mindestens 5-stündige Niederschlagsbelastung mit räumlichen und zeitlichen Regenspitzen für das Einzugsgebiet als maßgebend zu betrachten ist. Am Nächsten kommt hier die Studie von WLV 2015 mit den mittelbetonten Regenzentren.

Um mehr Objektivität und auch Konsistenz in den Regenszenarien zu erreichen, sollten gewisse Standard-Routinen oder Empfehlungen für deren Definition geschaffen werden. Mit dem N/A-Modell ZEMOKOST ist man hier schon nahe dran. In der Praxis ist die Standard-Routine der Blockregen mit räumlichen Regenzentrum und distanzabhängiger, starker Abminderung und die maßgebende Dauerstufe wird in der Simulation automatisch bestimmt. Am Beispiel Strobl-Weißenbach zeigt sich, dass damit zwar ein plausibler  $HQ_{100}$ -Wert berechnet wird, die maßgebende Regendauer aber deutlich geringer ist als die bisher beobachteten. Für das N/A-Modell HEC-HMS fehlen konkrete Empfehlungen und die Wahl der Bemessungsregenszenarien ist teilweise stark subjektiv.

Die enge Bandbreite der  $HQ_{100}$ -Werte im Strobl-Weißenbach zeigt aber, dass durch die Unterschiede in den Bemessungsregenszenarien die  $HQ_{100}$ -Bemessungsergebnisse nicht unbedingt negativ beeinflusst werden. Das gilt jedoch womöglich nur für erfahrene Bearbeiter und bei entsprechend guter Ergebnisplausibilisierung.

Eine weitere Unsicherheit in der N/A-Modellierung ist die Festlegung der Vorbedingungen. Zum einen ist die Frage, wie die Parameter geändert werden sollen, damit bestimmte, ungünstige Vorbedingungen richtig abgebildet werden. Zum anderen sind für ungünstige Vorbedingungen auch andere Regenszenarien (in der Regel mit höherer Wiederkehrwahrscheinlichkeit) heranzuziehen. Ansonsten würde vermutlich ein unrealistisches Worst-Case-Szenario berechnet. Es wäre daher sinnvoll, auch hinsichtlich der Kombination von Vorbedingungen und Regenszenario modellspezifische Standards zu schaffen.

Um eben solche Standard-Routinen zu erstellen, sind Ereignisnachrechnungen, wie sie

in diesem Beitrag gemacht wurden, eine Voraussetzung. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden gesammelt, aufbereitet und schließlich in Form von Empfehlungen (good practices) für zukünftige N/A-Simulationen zusammengefasst.

#### Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Dr. Johannes Kammerlander  
Gebietsbauleitung Außerfern  
Buchenort 2A, 6600 Lechaschau  
johannes.kammerlander@die-wildbach.at

DI Markus Moser  
Gebietsbauleitung Lungau  
Johann-Löckerstraße 3, 5580 Tamsweg  
markus.moser@die-wildbach.at

DI Patrick Stolz  
Gebietsbauleitung Pongau,  
Flachgau und Tennengau  
Bergheimerstraße 57, 5020 Salzburg  
patrick.stolz@die-wildbach.at

#### Literatur/References:

TECHNISCHES BÜRO FÜR KULTURTECHNIK UND WASSERWIRTSCHAFT, RIOCOM (2010).

Hochwasserschutzkonzept Ischlfluss. Generellen Planung für den Hochwasserschutz entlang der Ischl in den Gemeinden Strobl, St. Wolfgang, und Bad Ischl, Technischer Bericht. Im Auftrag des Amtes der OÖ Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft.

DIENESCH – LANER – PRAX (2007). Hydrologische Studie Strobl-Weißenbach, Technischer Bericht. Im Auftrag der Wildbach- und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Pongau, Flachgau, und Tennengau.

FACHZENTRUM WILDBACHPROZESSE (2015). Hydrologische Berechnungen Strobl-Weißenbach. Im Auftrag der Wildbach- und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Pongau, Flachgau, und Tennengau.

FACHZENTRUM WILDBACHPROZESSE (2017). Hydrologische Berechnungen Strobl-Weißenbach, Ergänzung um N/A-Modell ZEMOKOST. Unveröffentlichte Rohdaten.

THOMAS FRANDL, MARGARETE WÖHRER-ALGE

## Das Starkregenereignis in der Gemeinde Lingenau (Bezirk: Bregenz) am 09. Juni 2021

### *Heavy rain event in the municipality of Lingenau (district: Bregenz) on June 9th, 2021*

#### Zusammenfassung:

Am 09.06.2021 ging am Nachmittag zwischen 15:15 und 16:15 Uhr in der Gemeinde Lingenau ein lokales Starkregenereignis nieder, wobei laut INCA-Auswertung 68 mm Niederschlag zu verzeichnen waren. Der Hauptteil des Niederschlages fiel innerhalb von 30 Minuten. Die Auswirkungen waren verheerend, es kam zu großflächigen Überflutungen in den Einzugsgebieten des Elsengrabens, des Dorfbaches und des Oberbuchgrabens, wodurch auch beträchtliche Schäden an Objekten entstanden.

#### Abstract:

*On June 9th, 2021, in the municipality of Lingenau a local heavy rain event happened in the afternoon between 2:15 and 3:15 p. m., in which according to the INCA evaluation, a precipitation of 68 mm was recorded. Most of it fell within 30 minutes. The effects were devastating, extensive flooding occurred in the catchment areas of the Elsengraben, the Dorfbach and the Oberbuchgraben, which caused considerable damage to objects.*

#### Stichwörter:

Starkregenereignis,  
Überflutungen

#### Keywords:

heavy rain event, flood

#### Einleitung

Am Nachmittag des 09.06.2021 ging zwischen 15:15 und 16:15 Uhr MESZ (zwischen 13:15 und 14:15 Uhr UTC) in der Gemeinde Lingenau im Vorderen Bregenzerwald (Bezirk Bregenz) ein Starkregenereignis nieder. Hauptbetroffen war der Ortskern von Lingenau. Neben Überflutungen in einigen Einzugsgebieten kam es punktuell auch zu konzentrierten Oberflächenabflüssen. Die nächste Grafik zeigt überblicksmäßig die betroffenen Einzugsgebiete.

#### Geologie

Der Felsuntergrund von Lingenau wird von den

Weißsachschichten und den Steigbachschichten aufgebaut, welche der Molassezone zugeordnet werden. Diese Formationen bestehen aus einer Wechselfolge von Tonmergeln und Mergeln mit eingeschalteten Sandstein- und Konglomeratlagen. Da die Tonmergel wasserempfindlich sind, wird der Felsuntergrund großflächig von einer bindigen, zum Teil mehrere Meter mächtigen Verwitterungsschwarte überdeckt. Aufgrund dieser bindigen Verwitterungsschichten sind die Böden sehr begrenzt durchlässig und es kommt somit bei kurzen intensiven Starkniederschlägen zu einem schnellen Anstieg der Abflüsse sowohl in den Bächen als auch an der Oberfläche. Die landwirtschaftlichen Flächen werden intensiv genutzt (4–5 Schnitte pro Jahr).

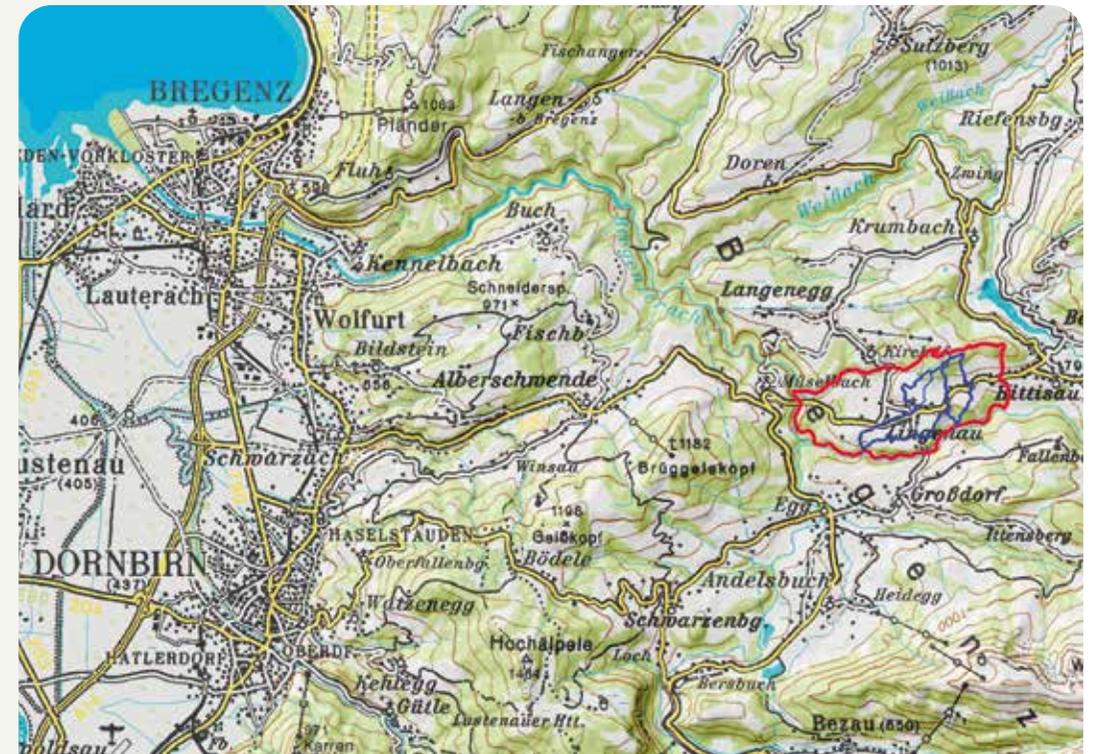


Abbildung 1: Übersichtskarte ÖK 200 (©BEV) mit Lage der Gemeinde und der hauptbetroffenen Einzugsgebiete.

Figure 1: Overview map ÖK 200 (©BEV) according location of the community and mainly affected catchment areas.

## Niederschlagsverhältnisse

In der Zeit zwischen 15:45 und 16:45 Uhr MESZ (zwischen 13:45 und 14:45 Uhr UTC) fielen laut INCA-Auswertung im Einzugsgebiet des Oberbuchgrabens 68 mm Niederschlag (siehe Abb. 2).

Der Hauptteil des Niederschlages fiel innerhalb von 25 bis 30 Minuten, die Intensität war zwischen 14:00 Uhr und 14:25 Uhr UTC am höchsten und erreichte in diesem Zeitraum zwischen 1,5 und 2,6 mm/min (berechnet aus INCA-Daten der ZAMG, siehe Abb. 3)

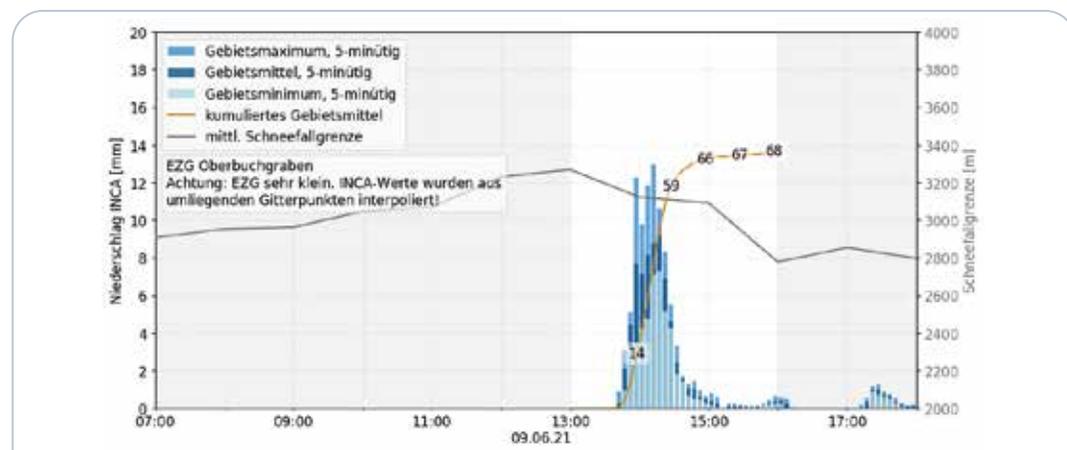


Abbildung 2: Auswertung der INCA-Daten – Zeit in UTC angegeben. (Quelle: ZAMG)

Figure 2: Evaluation of the INCA-Data. (Source: ZAMG)

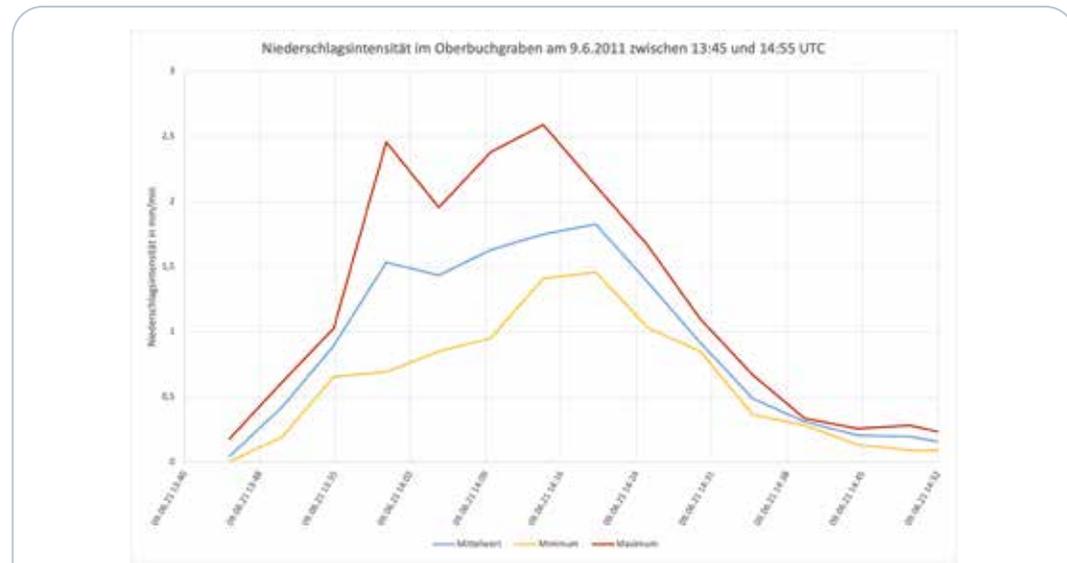


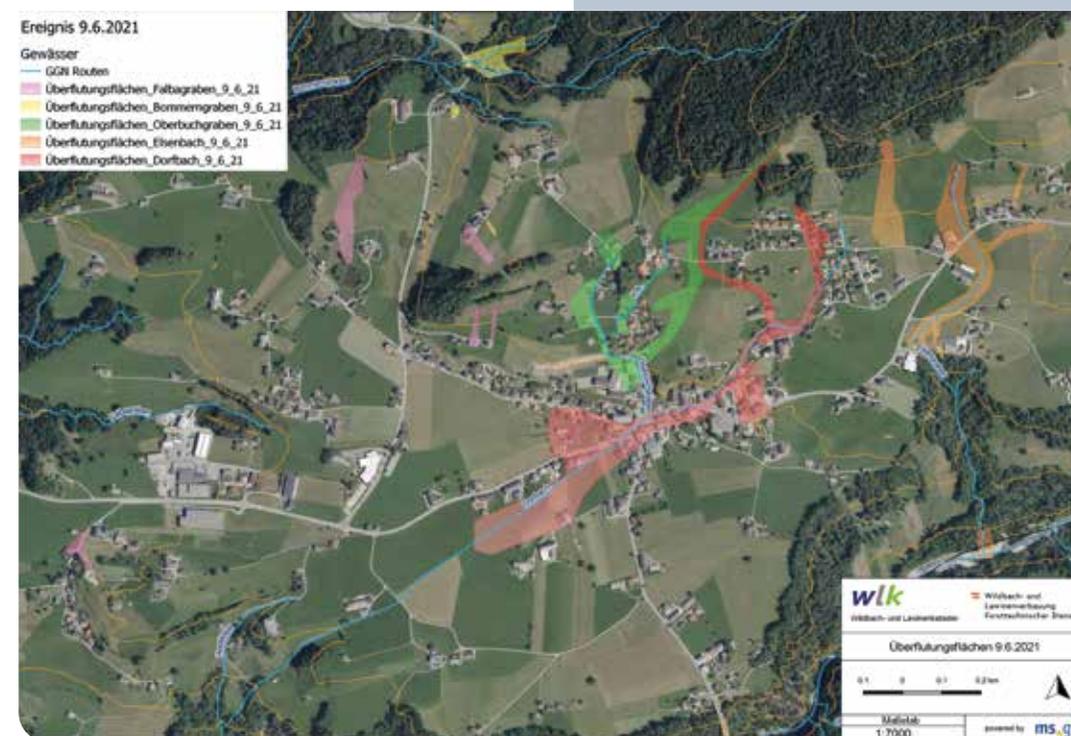
Abbildung 3: Niederschlagsintensität im Oberbuchgraben (Quelle: WLV)

Figure 3: Precipitation Intensity in the Oberbuchgraben (Source: WLV)

Aus Abbildung 4 geht klar hervor, dass das Einzugsgebiet des Dorfbaches (inklusive Zubringer Oberbuchgraben) am stärksten beaufschlagt wurde. Der Dorfbach ist im Ortszentrum großteils verrohrt, wobei die Verrohrung nicht in der Lage war, die ankommenden Wässer schadlos in den Vorfluter Subersach abzuleiten.

Abbildung 4: Überflutungsflächen (Quelle: WLV Vorarlberg)

Figure 4: Flood areas (Source: WLV Vorarlberg)



## Auswirkungen

Die Auswirkungen waren verheerend, es kam in den Einzugsgebieten des Elsengrabens, des Dorfbaches und des Oberbuchgrabens zu großflächigen Überflutungen, wobei an einigen Objekten erheblicher Sachschaden entstand. Ein großes Problem stellte der Dorfbach mit seinem rechtsufrigen Zubringer Oberbuchgraben dar. Diese Gräben sind im Siedlungsraum großteils und vor allem mit unzureichenden Dimensionen verrohrt. Erschwerend kommt hinzu, dass die Tagwassereinleitungen der angrenzenden Objekte

einerseits unzureichend sind und andererseits die Vorfluter nicht in der Lage waren diese Wässer schadlos abzuleiten. Die Folge war ein Rückstau der Tagwässer, welche die Flutung einiger Keller verursachten.

Im Einzugsgebiet des Elsengrabens wurden seitens der WLV, GBL Bregenz in den Jahren 2008, 2009 und 2011 Verbauungsmaßnahmen umgesetzt. Es wurde eine Flutmulde errichtet und anschließend ein Gerinne bis in die Subersach erstellt. Das Starkregenereignis hat gezeigt, dass die getätigten Maßnahmen funktioniert und größere Schäden verhindert haben.



Abbildung 5:  
Elsengraben:  
Der natürliche  
Retentionsraum und  
die Flutmulde haben  
gut funktioniert.  
(Quelle: WLV  
Vorarlberg)

*Figure 5:  
Elsengraben: The  
natural retention  
area and the flood  
channel worked  
efficiently. (Source:  
WLV Vorarlberg)*



Abbildung 6: Abfluss über die Zufahrtsstraßen. (Quelle: WLV Vorarlberg)

*Figure 6: Discharge along the access roads. (Source: WLV Vorarlberg)*



Abbildung 7:  
Lokale  
Abwehrmaßnahmen  
durch die Anrainer.  
(Quelle: WLV  
Vorarlberg)

*Figure 7:  
Local defensive  
measures by the  
residents. (Source:  
WLV Vorarlberg)*

Die betroffenen Anrainer haben versucht, mit lokalen Abwehrmaßnahmen die Schäden zu verringern. Glück im Unglück war, dass das Ereignis untertags stattfand.



Abbildung 8:  
Oberflächenabfluss  
(Quelle: WLV  
Vorarlberg)

*Figure 8:  
Surface discharge  
(Source: WLV  
Vorarlberg)*

Beachtlich war auch der Oberflächenabfluss über landwirtschaftliche Flächen. Die Böden sind sehr lehmhaltig und dicht, wodurch es vor allem bei Starkniederschlägen zu Oberflächenabflüssen kommt.



Abbildung 9: Über diese Wiesen fließt der Dorfbach großteils verrohrt. Es kam zu großflächigen Überflutungen. (Quelle: WLV Vorarlberg)

*Figure 9: The major part of the Dorfbach is piped across these meadows. There occurred widespread flooding. (Source: WLV Vorarlberg)*

Die Verrohrung des Dorfbaches war nicht in der Lage, die anfallenden Wässer schadlos abzuleiten. Dadurch kam es zu großflächigen Überflutungen. Problematisch ist, dass der Dorfbach auf große Strecken verrohrt wurde und diese Verrohrungen zu gering dimensioniert wurden. Erschwerend kommt dazu, dass aufgrund der Bautätigkeit in den vergangenen Jahrzehnten für einen Ausbau des Dorfbaches nur wenig Platz zur Verfügung steht. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Verrohrungen über weite Strecken über landwirtschaftlich intensiv genutzte Flächen führen. Eine Öffnung von Verrohrungen ist erfahrungsgemäß schwierig umsetzbar (Einschränkung der Bewirtschaftung, Flächenverlust, etc.). Fakt ist jedoch, dass

der Vorfluter Dorfbach nicht in der Lage ist, die ankommenden Wässer schadlos in die Subersach abzuführen. Hier ist die WLV und die Gemeinde gefordert, zeitnah ein umsetzbares Schutzkonzept vorzulegen, welches von den Grundeigentümern mitgetragen wird und bewilligungsfähig ist.

#### Gefahrenzonenplanung

Die Gebietsbauleitung Bregenz ist seit 2020 mit der Revision des Gefahrenzonenplanes der Gemeinde Lingenau beschäftigt. Die Erkenntnisse aus diesem Ereignis fließen selbstverständlich in die Gefahrenzonenausweisung ein.

#### Schlussfolgerungen

Starkregenereignisse führen in kleinen Einzugsgebieten zu einem sehr raschen Anstieg der Abflüsse, welche in weiterer Folge Überflutungen verursachen können. Das Ereignis in Lingenau hat gezeigt, wie schnell es in Kleineinzugsgebieten zu hohen Abflüssen kommen kann. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang sind die Oberflächenabflüsse. Diese sind im Zuge der Planung von Projekten bei der Dimensionierung von Schutzbauwerken zu berücksichtigen.

Neben leistungsfähigen Gerinnen und Verrohrungen ist die ausreichende Dimensionierung und die regelmäßige und sorgfältige Überprüfung von Tagwassereinleitungen von großer Bedeutung.

#### Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Thomas Frandl  
Gebietsbauleitung Bregenz  
Rheinstraße 32/4  
6900 Bregenz  
thomas.frandl@die-wildbach.at

DI Margarete Wöhrer-Alge  
Sektion Vorarlberg  
Rheinstraße 32/5  
6900 Bregenz  
margarete.woehrer-alge@die-wildbach.at

#### Literatur/References:

ZAMG (2021):  
Standardisierte Auswertung der ZAMG, erstellt am 11.6.2021 08:40 UTC,  
ID: 1034, Titel: Lingenau Oberbuchgraben



**Halbeisen & Prast KG**  
Transporte - Erdbau

GEORGIOS KYRIAZIS, HARALD GRUBER

## Modifizierte Salcher-Abschätzung am Beispiel des Projektgebietes „AB162 – Hillslope“, Bereich Passau

### Zusammenfassung:

Das Ziel der modifizierten Salcher Formel liegt in der vereinfachten Abschätzung eines Basisbemessungswertes anhand von Niederschlagsintensität, Einzugsgebietsfläche und einem einfachen Abflussbeiwert. Anhand eines aktuellen Projektes wurden Basisbemessungsabflüsse ( $Q_{100}$ ) von kleinen Einzugsgebieten nach der modifizierten Methode nach Salcher abgeschätzt und mit den Ergebnissen der hydrologischen Simulation verglichen. Unter der Annahme einer Blockniederschlagsverteilung und durch die Anwendung von aktuellen Datengrundlagen (Flächenabminderung, e-HYD Datenbank, digHAÖ) liefert die modifizierte Salcher Methode ohne großen Rechenaufwand realistische Spitzenabflüsse für die Region „Böhmische Masse – nördliches Oberösterreich“. Die hydrologische Schwäche der modifizierten Salcher Methode ist die Annahme eines konstanten Abflussbeiwertes für alle Niederschlagsintensitäten.

### Stichwörter:

Salcher, Abflussformel, Abflussbeiwert, Flächenabminderung, Blockniederschlag, e-HYD, SCS

### Abstract:

*The goal of the modified Salcher formula is to simplify the estimation of design peak discharges using a function of mean precipitation intensity, watershed area and a simple runoff coefficient. Based on a current project, design peak discharges ( $Q_{100}$ ) of small catchment areas were estimated using the modified Salcher method and were also compared to the results of the hydrological simulation. Assuming a constant precipitation intensity and using the latest hydrological data (depth - area reduction factors, e-HYD database, digHAÖ), the modified Salcher method delivers fast and realistic peak discharge results for the region "Bohemian Massif - northern Upper Austria". The hydrological weakness of the modified Salcher method lies in the assumption of a constant runoff coefficient for all precipitation intensities.*

### Keywords:

Salcher, discharge formula, runoff coefficient, depth - area reduction, constant rain intensity, e-HYD, SCS

### Aufgabenstellung

Das Ziel der modifizierten Salcher Formel liegt in der vereinfachten Abschätzung eines Basisbemessungswertes in Anlehnung zum Grundgedanken der Rationalen Methode (rational formula). Die Rational Formula stellt den Spitzenabfluss eines Einzugsgebietes in Relation zu Niederschlagsintensität, Einzugsgebietsfläche und einem Abflussbeiwert dar.

Als Fallbeispiel werden die Einzugsgebiete des Projektes „Hillslope – AB162“ im Bereich Passau herangezogen. Das Projekt „Hillslope – AB162“ im Bereich Passau ist das Ergebnis einer engen Zusammenarbeit der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV), Sektion OÖ, Gebietsbauleitung OÖ-Nord mit dem Wasserwirtschaftsamt (WWA) Deggendorf. Die primäre Aufgabenstellung des Projektes ist die Ermittlung von Basisbemessungswerten und die Erstellung eines grenzübergreifenden Hochwassermanagementkonzeptes für die Einzugsgebiete der Gewässer Erlenbach, Hagenbach, Haibach, Doblach und Kräuterbach. Die fünf Einzugsgebiete des Projektgebietes liegen Großteils in Österreich, ihre Mündungen und ein hoher Anteil des Schadenspotentials befinden sich jedoch auf deutschem Staatsgebiet. In einem ersten Schritt wurden einheitliche Grundlagendaten erhoben. Darauf aufbauend wurde eine hydrologische Untersuchung für alle Einzugsgebiete erstellt (HEC-HMS; SCS Methode modifiziert nach ASCE; ÖWAV-Regelblatt 220, 2019).

In Anlehnung zur empirischen Formelanwendung des hydrographischen Dienstes der oberösterreichischen Landesregierung werden als erstes die  $Q_{30}$  Abflüsse aller Einzugsgebiete nach Salcher abgeschätzt und anhand der Statistik des Pegels Pram (14,2 km<sup>2</sup>) auf  $Q_{100}$  ( $\pm 20$  %) umgerechnet. Schließlich werden diese Abschätzungen mit den Ergebnissen im HEC-HMS verglichen.

### Kurzbeschreibung der Original Abflussformel nach Salcher (1936)

Die Kurzbeschreibung der Original-Methode basiert Großteils auf die ausführliche Präsentation von Hagen et al. (2007). Salcher geht bei seinem Ansatz von einem mittleren jährlichen Abflussbeiwert  $\alpha$  aus, der durch eine jährliche Niederschlagsbeziehung ermittelt wird. Salcher weist darauf hin, dass genauere Werte nur durch Beobachtungen von Hochwasserereignissen zu ermitteln sind.

$$HQ_n = \alpha \cdot \beta_S \cdot A_E \cdot r_n \quad (\text{Gl.1})$$

Wobei:  $\alpha$  = mittlerer jährlicher Abflussbeiwert (Modellkoeffizient wird durch die Höhenlage reduziert)  
 $\beta$  = Flächenreduktionsfaktor  
 $r_n$  = Niederschlagsspende in m<sup>3</sup>/(s.km<sup>2</sup>)  
 $A$  = Fläche des EZG in km<sup>2</sup>

Modellparameter ( $\alpha$ )					
Niederschlag [mm]	100 m SH	250 m SH	1000 m SH	2000 m SH	3000 m SH
750	0,25	0,26	-	-	-
1000	0,42	0,43	0,48	0,55	-
1500	-	-	0,62	0,68	0,77
2000	-	-	0,69	0,75	0,82

Tabelle 1: Mittlerer jährlicher Abflussbeiwert  $\alpha$  (Salcher, 1936)Table 1: Mean yearly runoff coefficient  $\alpha$  (Salcher, 1936)

Im Mühlviertel (Oberösterreich) wurden folgende  $\alpha$ -Werte empirisch gewonnen (Gorgon, 1952).

Region Gebiet	Östliches Mühlviertel	Östliches Mühlviertel	Vorland	Gebirge	Hochgebirge
$\alpha$	0,4 – ~0,45	~0,45 – ~0,50	~0,5 – ~0,55	~0,70 – ~0,75	> 0,81

Tabelle 2: Mittlerer jährlicher Abflussbeiwert  $\alpha$  (Gorgon, 1952)Table 2: Mean yearly runoff coefficient  $\alpha$  (Gorgon, 1952)

Als zweiter Modellparameter wird ein Reduktionsfaktor ( $\beta_s$ ) herangezogen, der eine Flächenabminderung des Niederschlages berücksichtigt. Die Niederschlagspende  $r_n$  ( $m^3/s \cdot km^2$ ) wird durch den Abminderungsfaktor  $\beta_s$  abgemindert, um die Niederschlagsabnahme einer Schauerzelle mit zunehmender Fläche in Einzugsgebieten bis 25  $km^2$  zu berücksichtigen. Der Niederschlag sollte laut Salcher anhand von Isohyeten ermittelt werden, so dass die Höhenabhängigkeit des Niederschlages in der Niederschlagspende wieder gegeben wird.

Der Reduktionsfaktor kann laut Gorgon (1952) mit folgender Formel berechnet werden.

$$\beta_s = \sqrt[1,5]{\frac{1}{A_E}} \quad (\text{nach Specht, 1915}) \quad (Gl.2)$$

Modellparameter $\beta_s$	$A_E$ [ $km^2$ ]
0,90	5
0,83	10
0,76	25

Tabelle 3: Abminderungsfaktor  $\beta_s$ Table 3: Depth-area reduction factor  $\beta_s$ 

Die Datengrundlagen, Methoden und die Ergebnisse der Formelberechnungen wurden von Salcher (1936) nicht dokumentiert. Die Formel wurde für Einzugsgebiete  $A_E$  bis 25  $km^2$  und für Hochwasserabflüsse von kurzzeitigen Starknie-

derschlägen ausgelegt. Da die anzunehmende Niederschlagsdauer nicht näher definiert wird, liegt sie vermutlich im Bereich der Konzentrationszeit.

#### Abschätzung der Konzentrationszeit

Specht (1915), zitiert in Rosenauer (1932), gibt folgende Formeln für die Konzentrationszeit an (haben sich in Oberösterreich bewährt):

$$t_{C[1h]} = \frac{1}{3} L_G[km] \quad (Gl.3)$$

$$t_{C[1h]} = \frac{1}{2} L_G[km] \quad (\text{für besonders verzögerten Abfluss}) \quad (Gl.4)$$

Specht (1915), zitiert in Kreps (1963), gibt folgende Formel für die Konzentrationszeit:

$$t_{C[1h]} = \frac{1}{2,5} L_G[km] \quad (Gl.5)$$

Der Parameter  $L_G[km]$  wird in Gorgon (1952) als die Länge von der Wasserscheide bis zum untersuchten Profilschnitt definiert.

#### Umrechnung der eHYD – Niederschläge in Niederschlagspenden

Die eHYD – Niederschläge können wie folgt in Niederschlagspenden umgewandelt werden:

$$1 \frac{[mm]}{[min]} = 10^{-3} \frac{[m]}{[sec]} = 10^{-3} \frac{[m^3]}{[m^2]} = \frac{10^{-3} [m^3]}{10^{-6} [km^2]} = 10^3 \frac{[m^3]}{[km^2]} \quad (Gl.6)$$

$$\text{und} \quad 1 \frac{[min]}{[min]} = 60 \frac{[sec]}{[sec]} \quad (Gl.7)$$

also:

$$1 \frac{[mm]}{[min]} = \frac{10^3 [m^3]}{60 [sec]} = \frac{10^2 [m^3]}{6 [sec \cdot km^2]} = \frac{100 [m^3]}{6 [sec \cdot km^2]} \quad (Gl.8)$$

#### Modifikation der Salcher Methode – Anpassung an die aktuellen Datengrundlagen

Die Modifizierung der Salcher Methode besteht aus zwei Teilen:

- 1) Statt dem empirischen mittleren jährlichen Abflussbeiwert von Gorgon wird der Abflusskoeffizient aus der Jahreswasserbilanz des digitalen Hydrologischen Atlas Österreichs (digHAÖ) eingesetzt.
- 2) Statt dem Flächenreduktionsfaktor  $\beta_s$  nach Specht wird  $\beta_s=1$  eingesetzt und die Niederschlagspende  $r_n$  wird nach dem Entscheidungsschema für die Flächenabminderung nach Kohl (2011) abgemindert.

Auswahl der Niederschlagsszenarien, der eHYD – Niederschläge und der räumlichen Abminderung für die hydrologischen Bemessungen im Projektgebiet

Für alle fünf Einzugsgebiete wurden im HEC-HMS vier zeitliche Niederschlagsszenarien getestet: Blockregen, anfangsbetont, mittenbetont und endbetont. Für jene Einzugsgebiete, die eine Fläche bis 5  $km^2$  aufweisen (Doblbach, Erlenbach & Kräutergrabenbach), wurden die Bemessungsniederschläge nicht abgemindert. Für die Einzugsgebiete Haibach und Hagenbach wurden die Bemessungsniederschläge nach Lorenz – Skoda (2000) sanft abgemindert.

Anhand der modifizierten Methode nach Salcher entstehen als erstes folgende  $Q_{30}$  Abschätzungen:

<b>Haibach:</b>	$\alpha = 0.395, \beta = 1$	$r_n$ (schwach abgemindert nach Lorenz – Skoda, 2000)
$HQ_{30} = 0,395 \times 1 \times 13,284 \times 5,38 = 28,2 \text{ m}^3/\text{s}$		
<b>Hagenbach:</b>	$\alpha = 0.343, \beta = 1$	$r_n$ (schwach abgemindert nach Lorenz – Skoda, 2000)
$HQ_{30} = 0,343 \times 1 \times 6,4 \times 6,89 = 15,2 \text{ m}^3/\text{s}$		
<b>Erlenbach:</b>	$\alpha = 0.343, \beta = 1$	$r_n$ (nicht abgemindert; EZG – Fläche kleiner als 5 km <sup>2</sup> )
$HQ_{30} = 0,343 \times 1 \times 3,2 \times 8,64 = 9,5 \text{ m}^3/\text{s}$		
<b>Kräuterbach:</b>	$\alpha = 0.395, \beta = 1$	$r_n$ (nicht abgemindert; EZG – Fläche kleiner als 5 km <sup>2</sup> )
$HQ_{30} = 0.395 \times 1 \times 1,6 \times 8,62 = 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$		
<b>Doblbach:</b>	$\alpha = 0.395, \beta = 1$	$r_n$ (nicht abgemindert; EZG – Fläche kleiner als 5 km <sup>2</sup> )
$HQ_{30} = 0.395 \times 1 \times 0,4 \times 14,32 = 2,3 \text{ m}^3/\text{s}$		

Aus der Pegelstatistik an der Pram (14,2 km<sup>2</sup>) kann abgeleitet werden, dass  $Q_{100}:Q_{30} \approx 1,3$  beträgt (ÖWAV-Regelblatt 220, 2019). Somit können die  $Q_{100}$  Werte der Einzugsgebiete wie folgt abgeschätzt werden:

<b>Haibach:</b>	$HQ_{30} = 28,2 \text{ m}^3/\text{s}$	$HQ_{100} = 36,7 \text{ m}^3/\text{s} (\pm 20\%)$
<b>Hagenbach:</b>	$HQ_{30} = 15,2 \text{ m}^3/\text{s}$	$HQ_{100} = 19,8 \text{ m}^3/\text{s} (\pm 20\%)$
<b>Erlenbach:</b>	$HQ_{30} = 9,5 \text{ m}^3/\text{s}$	$HQ_{100} = 12,4 \text{ m}^3/\text{s} (\pm 20\%)$
<b>Kräuterbach:</b>	$HQ_{30} = 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$	$HQ_{100} = 7,2 \text{ m}^3/\text{s} (\pm 20\%)$
<b>Doblbach:</b>	$HQ_{30} = 2,3 \text{ m}^3/\text{s}$	$HQ_{100} = 3,0 \text{ m}^3/\text{s} (\pm 20\%)$

Da in der Salcher-Formel eine konstante Niederschlagspende  $r_n$  eingesetzt wird, werden als Nächstes die oben abgeschätzten  $Q_{100}$  Erwartungswerte mit den Blockregen-Simulationen verglichen (Blockniederschlag = konstante Intensität, siehe Tab. 4 und Abb. 1).

wertwerte mit den Blockregen-Simulationen verglichen (Blockniederschlag = konstante Intensität, siehe Tab. 4 und Abb. 1).

### Vergleich der modifizierten Salcher-Auswertung zu den Ergebnissen der N-A-Simulationen nach der modifizierten SCS Methode

Wie in Tabelle 4 und Abbildung 1 abzulesen ist, nähern sich die modifizierten Abschätzungen nach Salcher den Ergebnissen der blockverteilten N-A Simulationen an.

Reinwasserabfluss $Q_{100}$ in m <sup>3</sup> /s							
EZG – Name	Fläche in km <sup>2</sup>	Erwartungswert nach Salcher und Pegel Pram	block	Anfangsbetont	Mittentbetont	Endbetont	Obere Grenze (Erwartungswert +20 %)
Haibach	13,3	36,7	37,5	41,4	43,8	50,8	44,0
Hagenbach	6,4	19,8	20,3	23,0	24,2	27,6	23,7
Erlenbach	3,2	12,4	12,0	13,4	14,2	16,1	14,8
Kräuterbach	1,6	7,2	7,0	8,2	8,7	9,9	8,6
Doblbach	0,4	3,0	2,6	3,1	3,3	3,7	3,6

Tabelle 4: Ermittlung Basisbemessungswert  $Q_{100}$  mit eHYD N<sub>100</sub> Bemessungsniederschlägen

Table 4: Peak discharge estimated with a 100-year design rainfall-runoff model

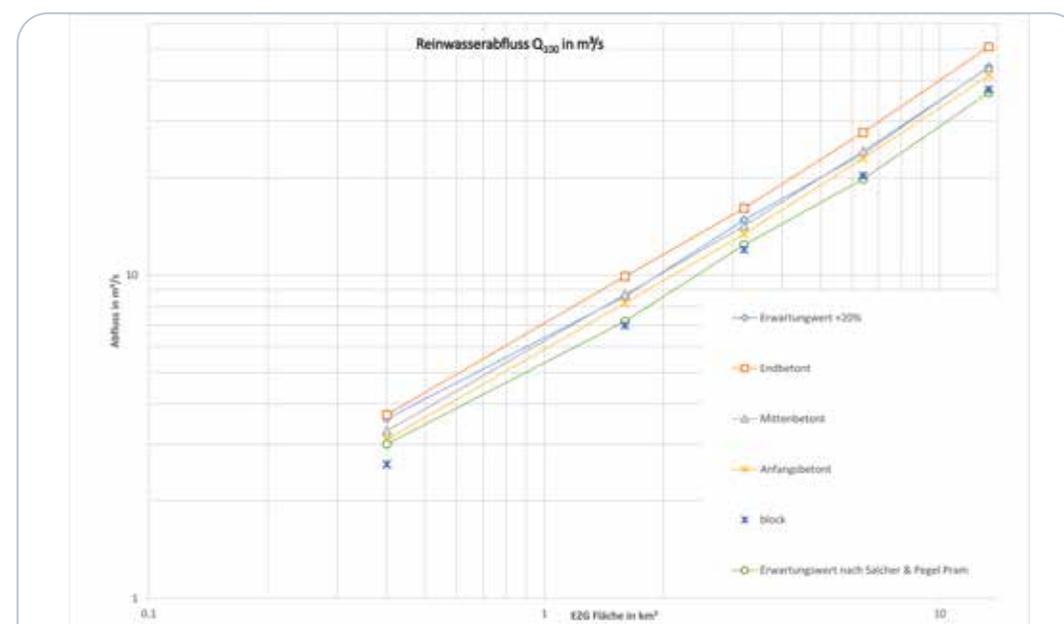


Abbildung 1: Modifizierte Salcher-Auswertung im Vergleich zu den Ergebnissen der N-A Simulationen mit eHYD N<sub>100</sub> Bemessungsniederschlägen

Figure 1: Modified Salcher estimation compared to the 100-year design rainfall-runoff model estimations

### Interpretation & Anwendung der modifizierten Salcher-Auswertung bei der Gebietsbauleitung Oberösterreich Nord und weiterer Handlungsbedarf

Der Parameter  $\alpha$  drückt den Abflussbeiwert aus und stammt aus dem Oberflächenanteil in der Gleichung der jährlichen Wasserbilanz. Für ein kleines Einzugsgebiet mit konvektiven Starkniederschlägen kann die Wasserbilanzgleichung im Ereignisfall als

$$N = A + V + \Delta S \quad (\text{Gl.9})$$

umschrieben werden (Grundwasserströmungen werden im Ereignisfall vernachlässigt).

Wobei:

$N$  = Niederschlag

$A$  = Abfluss

$V$  = Verdunstung

$\Delta S$  = Änderung der Wasserspeicher

Unter der Annahme, dass die Verdunstung im Ereignisfall gleich null ist, wird die Wasserbilanzgleichung wie folgt vereinfacht:

$$N = A + \Delta S, \quad \text{das heißt: } A = N - \Delta S \quad (\text{Gl.10})$$

Der Gesamtabflussbeiwert  $\alpha$  während eines Ereignisses beschreibt den Koeffizienten von Effektivniederschlag durch den Gesamtniederschlag:

$$\alpha = \frac{N_{eff}}{N}, \quad \text{das heißt: } \alpha = \frac{A}{N} \quad (\text{Gl.11})$$

in Kombination mit Gl.10 gilt dann:

$$\alpha = \frac{N - \Delta S}{N} \quad (\text{Gl.12})$$

Die Gleichung 12 beschreibt grob die Abflussentstehung in einem kleinen Einzugsgebiet. Der Abflussbeiwert  $\alpha$  kann somit wie folgt interpretiert werden: Er beschreibt eine mittlere Grunddisposition eines Einzugsgebietes, vorausgesetzt, dass Grundwasser und Verdunstung keine wesentliche Rolle spielen (einfache Rahmenbedingungen). Der hydrologische Nachteil der modifizierten Salcher Methode ist, dass der Abflussbeiwert  $\alpha$  für alle Dauerstufen und Intensitäten konstant bleibt.

Im Rahmen zahlreicher hydrologischer Simulationen in den Jahren 2014–2021 wurde beobachtet, dass die modifizierte Salcher-Abschätzung ähnliche Ergebnisse wie die Block-Verteilung der N-A Simulationen im Gebietsbauleitungsgebiet liefert. Die Methode eignet sich somit für jene Zielsetzungen, bei denen Ergebnisse schnell verfügbar sein müssen und Spitzenabflüsse als Ergebnis ausreichen: Zum Beispiel bei der Fragestellung, ob eine Liegenschaft von einem Bemessungsereignis betroffen ist oder nicht. Dazu bräuchte man eine schnelle Abschätzung eines  $Q_{100}$ -Reinwasserwertes für eine hydraulische 2D Simulation usw.

Als weiterer Handlungsbedarf kann die Frage herangezogen werden, ob diese Modifikation nur für das Gebiet der Böhmisches Masse gilt, oder auch unter anderen geologischen Verhältnissen Anwendung finden kann (komplexere Rahmenbedingungen). Um solche Fragestellungen abzuklären, werden künftig in einem nächsten Schritt die modifizierten Abschätzungen nach Salcher und die Ergebnisse der N-A Simulationen (modifiziertes SCS Verfahren nach ASCE) von mindestens 27 Wildbacheinzugsgebieten in der Gebietsbauleitung Oberösterreich Nord ausgewertet.

### Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Georgios Kyriazis  
Institut für Alpine Naturgefahren  
Peter Jordan Str. 82, 1190 Wien  
georgios.kyriazis@boku.ac.at

DI Harald Gruber  
Gebietsbauleitung Oberösterreich Nord  
Ferihermerstraße 13, 4040 Linz  
harald.gruber@die-wildbach.at

### Literatur/References:

BMLFUW, (2003):  
Hydrologischer Atlas Österreichs, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

BMLFUW, (2011):  
Leitfaden - Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten, Wien: BMLFUW, Abteilung VII3 - Wasserhaushalt,

GORGON, B., (1952b):  
Merkblatt zum Nomogramm für die Ermittlung der Hochwasserspanden von 10- und 30-jährlichen Hochwässern aus Einzugsgebieten bis 25 km<sup>2</sup> nach Salcher, Zeitschrift für Wildbach- und Lawinenverbauung, H. 2, 8 S.

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

KOHL, B., (2011):  
Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST: Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten; Dissertation; Universität Innsbruck, Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften

KREPS, H. (1963):  
Eine kritische Betrachtung von Hochwasserformeln, Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Heft 36, S3-16.

ÖWAV, (2019):  
Regelblatt 220, Niederschlag-Abfluss-Modellierung, Wien

SALCHER, E. (1936):  
Zur Berechnung von Hochwasserabflüssen, Wasserwirtschaft und Technik, Nr. 28/30, S278-280.

SPECHT, A. (1915):  
Größte Regenfälle in Bayern und ihre Verwertung zur Hochwasserberechnung, München, zitiert in GORGON, B. (1952), und KREPS, H. (1963).



Ingenieurkonsulent • Ingenieurbüro  
DI Thomas Perz  
Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Wildbach- und Lawinenschutz      Forst- und Holzwirtschaft  
2620 Neunkirchen                      8600 Bruck an der Mur  
www.perzplan.at                              office@perzplan.at

MARKUS MOSER, PATRICK STOLZ

## Leistungsvermögen einer alten Wasserdosiersperre

### *Efficiency of an old water dosing dam*

#### Zusammenfassung:

Die hydrologische Wirkung – Reduzierung des Spitzenabflusses auf ein unschädliches Ausmaß im Unterlauf – wurde bei älteren Bautypen nicht systematisch untersucht, Variantenberechnungen mit verschiedenen Niederschlagsbelastungen hinsichtlich Menge und Dauer fehlen meistens. Oftmals liegen diese Schutzbauten im hinteren Teil der Einzugsgebiete, wodurch auch die Wirkung im Bereich der Siedlungsgebiete in Richtung Vorflut oftmals relativ bescheiden ist. Zur Optimierung dieser Bauwerke sind umfassende Berechnungen unter Berücksichtigung der Kennlinien am Bauwerk unter verschiedener Abflussbelastung notwendig. Für eine alte Wasserdosiersperre konnte auf Basis einer umfassenden NA-Modellierung sowie verschiedener Varianten am Bauwerk selbst eine wirtschaftlich und technisch optimierte Adaption gefunden werden.

#### Abstract:

*The hydrological effect – reducing the peak runoff to a harmless extent in the lower reaches – has not been systematically investigated in older construction types, variant studies with different precipitation loads in terms of quantity and duration are mostly missing. These construction types are often located in the backside part of the catchments, which means that the effect in the settlement areas is often relatively modest. To optimize these structures, comprehensive calculations are necessary, taking into account the characteristic curves on the structure under various discharge loads. An economically and technically optimized adaptation could be found for the old water dosing dam based on a comprehensive rainfall-runoff model and various variants on the functional part.*

#### Stichwörter:

Wasserdosiersperren, Niederschlags- und Abflussmodellierung

#### Keywords:

water dosing dams, rainfall-runoff modeling

#### Einleitung

Die Errichtung von Schutzbauten mit wasserdosierender Funktion reicht schon sehr weit zurück, die Änderung des Abflussscheitels an einer bestimmten Stelle erfolgt dabei meist an einer von der Geländemorphologie gesehen günstigen Stelle mit einer möglichst engen Querprofilgeometrie am Sperrenstandort (wirtschaftlicher und technischer Mitteleinsatz) und großem Stauraumvolumen.

#### Ausgangslage

Eine Sperre im hm 110,80 des Göriachbaches wurde im Jahr 1969 an die Stelle eines durch Vermurungen vom Pindlgraben und Ochsenkargraben in den Jahren 1925 und 34 bereits bestehenden Staueses errichtet. Ca. 53 % des Gesamteinzugsgebietes (~25 km<sup>2</sup>) entwässern bis zur Wasserdosiersperre, welche einen Stauraum mit einem Fassungsvermögen von ca. 300.000 m<sup>3</sup> hat. Im Mündungsbereich im hm 6,1 wird seit 1. Jänner 1993 ein Abflusspegel betrieben. Aufgrund der relativ kurzen Zeitreihe sind statistische Aussagen über Jährlichkeiten der vergangenen Ereignisse sehr vage. Die Abflussmengen am Pegel reichten von ca. 7 m<sup>3</sup>/s (2013) bis über 20 m<sup>3</sup>/s (2002, 2010, 2012) für das 48 km<sup>2</sup> große Gesamteinzugsgebiet. Aussagen Ortsansässiger berichten dabei von einer guten Wirkung der Wasserdosiersperre, jedenfalls war in den meisten Fällen der Stauraum gut mit Wasser gefüllt. Im ca. 6 km bachabwärts der Sperre gelegenen Ortszentrum von Göriach wird auch immer wieder auf die gute

Wirkung des Bauwerks samt Stauraum hingewiesen. Wie die Wirkung im Bemessungsfall mit verschiedenen Kurvenscharen (unterschiedliche Niederschlagsbelastung hinsichtlich Dauer [D] und Jährlichkeit [T]) sowie resultierender Abflussmenge ist (Scheitelwert und Abflussfracht), wurde bis dato nicht untersucht.

#### Zielsetzung

Im Zuge eines „Generellen Schutzprojektes“ für die Gemeinde Göriach sollte das Ziel sein, auf Basis der derzeitigen Berechnungsmethoden und -modelle die Wirkung des ungesteuerten Bauwerks bei verschiedenen Szenarien für die Ortschaften Göriach sowie Sankt Andrä zu berechnen und weiters – bei möglichst wirtschaftlichem Mitteleinsatz – eine Optimierung zu erzielen. Die Niederschlags-/Abflussberechnungen wurden dabei unter Anwendung der Empfehlungen des ÖWAV-Regelblattes 220 N/A-Modellierung realisiert.

#### Beschreibung des Einzugsgebiets

Der Göriachbach entspringt im sog. Göriachwinkel und ist ein stark geschiefbeführender Wildbach mit einem Einzugsgebiet von 48,0 km<sup>2</sup> und mündet im Ortsgebiet von St. Andrä im Lungau linksufrig in die Taurach ein. Er ist auf weiten Strecken reguliert und weist zwischen hm 70 und hm 120 zahlreiche natürliche Retentionsräume auf. Das langgestreckte Einzugsgebiet reich von einer Seehöhe um die 1.000 m bis zum Hochgolling auf über 2.800 m. ü.A.

## Niederschlags- und Abflussmodellierung

(Kurzfassung nach ÖWAV Regelblatt 220 – N/A-Modellierung)

Vorgabe	
<b>HQ Bemessung:</b>	Jährlichkeit 100 an verschiedenen hydrologischen Knoten im EZG Göriachbach
<b>Detaillierte Beschreibung:</b>	Hochwasserbemessung, Wellenscharen, Retentionswirkung für eine ungesteuerte Retentionssperre
<b>Hydrologische Kategorie:</b>	HK 2 aufgrund fachkundiger Einschätzung gewählt
Modellgebiet	
<b>Göriachbach bis Pegel St. Andrä:</b>	EZG Größe 48 km <sup>2</sup> bis Pegel St. Andrä
Modelleingangsdaten	
<b>Ereignisklassifizierung:</b>	Hauptbach mit fluvialem Feststofftransport, Zubringer stark geschiebeführend, bzw. murartiger Feststofftransport bis Murgang
<b>Geologie/Boden:</b>	Geologische Karte, Ortskenntnisse
<b>Vegetation/Landnutzung:</b>	Gutachterlich, Basis Orthofoto, Begehungen, LISA Landnutzungsdaten
<b>Topographie, Gefälle:</b>	Laserdaten 1x1 m
<b>Fließstrecken:</b>	Routing, einfaches Verfahren (LagTime in min auf Basis gemessener v in m/s)
<b>Feldbegehungen:</b>	Ja, vorhanden
<b>Abflussbeiwerte:</b>	Abflussbeiwerte aus der Geländeanleitung und Literaturangaben
<b>Qualitätsbewertung:</b>	Hoch Gebietskenngrößen aus Kartenwerken und Begehung
<b>Geschätzter Aufwand:</b>	Hoch

## Niederschlag und andere meteorologische Messgrößen

<b>Niederschlagsdaten:</b>	Ereignisniederschlag Juli 2012 Wetterradar (ZAMG/INCA) aus Wetterportal WLW	
<b>Temperatur:</b>	Nicht berücksichtigt	
<b>Verdunstung/Strahlung:</b>	Keine	
<b>Abfluss:</b>	Pegel St. Andrä – Abflussganglinie mit 15 min Auflösung, Scheitelwerte, historische Ereignisse	
<b>Datenprüfung:</b>	Gutachterlich	
<b>Modellniederschlag:</b>	ehyd, gewichteter Bemessungsniederschlag	
<b>Niederschlagsverteilung:</b>	Blockniederschlag über dem gesamten Einzugsgebiet	
<b>Qualitätsbewertung:</b>	Hoch	Messdaten verfügbar, Modellierung mit Messdaten – Kalibrierung der Ergebnisse
<b>Geschätzter Aufwand</b>	Hoch	

## Modellwahl

<b>Modellwahl:</b>	Ereignisbasiert	
<b>Modell:</b>	HEC-HMS mit SCS Verfahren, Grey-Box, Teileinzugsgebiete, ereignisbasiert	
<b>Berechnungsansätze:</b>	Einfach, keine Verdunstung, kein Schnee	
<b>Abflussbeiwerte:</b>	Konzeptionell, SCS-CN Abflussbeiwerte mit Ansatz UH	
<b>Fließstrecken:</b>	Hydrologisch einfach/lumped	
<b>Qualitätsbewertung:</b>	Mittel	Prozesse in ausreichender zeitlicher/räumlicher Auflösung
<b>Geschätzter Aufwand:</b>	Hoch	

### Wahl der Modellparameterwerte

<b>Modellparameter:</b>	A priori	
<b>Vorgangsweise bei der Parameterwahl:</b>	Zusatzinfos auf Basis ERDOK, Abstimmung auf EZG-Typ	
<b>Prozessanalysen:</b>	Feldbegehungen	
<b>Parameterkalibrierung am Abfluss:</b>	Lokal, am Pegel St. Andrä mit dem Ereignis im Juli 2012	
<b>Anpassungsgüte:</b>	Abflussscheitel und Ganglinie – mittel	
<b>Kalibrierung:</b>	manuell	
<b>Qualitätsbewertung:</b>	Mittel	Kalibrierung an einem Ereignis möglich (Juli 2012)
<b>Geschätzter Aufwand:</b>	Mittel	

### Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

<b>Plausibilitätsprüfung:</b>	Auf Basis Ereignis 2012, Überprüfung des rückgerechneten Scheitelabflusses und der Ganglinie mit den beobachteten Werten des Ereignisses am Pegel	
<b>Qualitätsbewertung:</b>	Mittel	Kalibrierung anhand eines Einzelereignisses, keine Wasserbilanz etc.
<b>Geschätzter Aufwand:</b>	Hoch	

### Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

<b>Interpretation und Berichte:</b>	Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen, detaillierte hydrologische Interpretation und zusammenfassende Bewertung	
<b>Qualitätsbewertung:</b>	Mittel	Sensitivitätsanalyse, Plausibilisierung
<b>Geschätzter Aufwand:</b>	Mittel	

### Ergebnis am Pegel St. Andrä

<b>HQ<sub>100</sub> Basisbemessungswert:</b>	77,0 m <sup>3</sup> /s
--	------------------------

### Hydrologische Wirkung der Wasserdosiersperre im hm 110,80

Die ungesteuerte Dosiersperre erfüllt bei kleinen bis mittleren Hochwasserereignissen eine sehr wirkungsvolle Dämpfung der Hochwasserwelle, vergangene Hochwasserereignisse zeigten dies bereits mehrmals auf. Aufgrund der beiden groß-doligen Öffnungen (Grundablassöffnungen) mit dem davor angebrachten Schrägrechen ist die tatsächliche Wirkung bei einem Hochwasserereignis immer davon abhängig, wie viel Wildholz bis zum Rechen gelangt und diesen bzw. die Dolen in weiterer Folge verlegt bzw. verklaust. Eine derartige teilweise Verklauung des Rechens war bei den vergangenen Hochwasserereignissen stets der Fall, und führte auch immer zu Rückstauvorgängen in den dahinter situierten Almwiesen (Stauraum).

Die beiden Dolen hatten nach Baufertigstellung Abmessungen von  $h = 1,7 \text{ m}$  und  $b = 2,5 \text{ m}$  ( $4,25 \text{ m}^2$  je Dole) und wurden im Nachhinein wasserseitig mit einer Stahlplatte verkleinert, sodass die gegenwärtigen Abmessungen je Dole  $1,15 \text{ m}$  Höhe und  $2,5 \text{ m}$  Breite =  $2,88 \text{ m}^2$  betragen. Die beiden Dolen sind sohlgleich angebracht, die Abflusssektion liegt in einer Höhe von  $3,5 \text{ m}$  über der Sohle. Der Schrägrechen hat aktuell lichte quadratische Öffnungen von je ca.  $0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$  und wurde auch bereits einmal adaptiert (Vergrößerung der Öffnungen).

Für die vorliegenden hydrologischen Berechnungen wurde eine 40%ige Verklauung/ Verlegung des Rechens in seinem gegenwärtigen Zustand unterstellt, da es auch bei den vergangenen Ereignissen, insbesondere beim Plausibilisierungsereignis aus dem Jahr 2012, bereits so ähnlich dazu kam. Die vollgefüllte Sperre, inklusive der Abflusssektion, kann unter der Annahme einer 40%igen Verlegung des Rostes  $41,5 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasser abführen, die restliche Wasserdotation bei vollem Retentionsraum würde bei größeren Ereignissen somit unkontrolliert über die Sperrenflügel abströmen. Zur Berechnung der Beckeninhaltslinien bediente man sich einer 2dimensionalen Berechnung mit dem Programm FLO-2D auf Basis von Laserdaten und Zuflussganglinien aus dem NA-Modell.

Die Wellenscharen beginnend von 1 h, 3 h, 6 h, 9 h, 12 h, 18 h und 24 h führen zu Scheitelwerten von ca.  $27 \text{ m}^3/\text{s}$  (1 h) bis  $72 \text{ m}^3/\text{s}$  (12 h), der Grenzwert für das Bestandsbauwerk liegt bei  $41,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (Annahme 40 % Verklauung des Rostes) wodurch ab einer Dauerstufe von 9 h eine Überlastung erfolgt. Ähnliches gilt für das Fassungsvermögen in der Ortschaft Göriach mit einer Überlastung bei Dauerstufen von 9, 12 und 18 h (sh. Abb. 2).



Abbildung 1:  
Schrägwehre der  
Wasserdosiersperre  
(Foto links);  
Stauraum nach dem  
Ereignis am 2. August  
2012.

Figure 1: Vertical  
beams of the water  
dosing dam (picture  
left); storage area  
after the event on  
2nd August 2012.



### Verbesserung/Adaption der Wasserdosiersperre

Unter Berücksichtigung der oben genannten Phänomene mit der Verklausung des Rechs, der Größe der Dolen und der Topographie wurden 4 mögliche Varianten einer Verbesserung/ Adaption ins Auge gefasst und der Nullvariante (Variante 0) gegenübergestellt:

1. Erhöhung der Sperre um 1 m bei gleichbleibenden Dolen (je 2,9 m<sup>2</sup>) und unverändertem Rechen (Annahme: 40%ige Verlegung durch Wildholz im Hochwasserfall) → **Variante 1**
2. Verbesserung der Rechenkonstruktion, sodass eine Verklausung/ Verlegung verhindert wird, gleichbleibende Dolenöffnungen (je 2,9 m<sup>2</sup>) und gleiche Höhe der Sperre → **Variante 2**

3. Verbesserung der Rechenkonstruktion, sodass eine Verklausung/ Verlegung verhindert wird, größere Dolenöffnungen wie nach Baufertigstellung (je 4,25 m<sup>2</sup>) und gleiche Höhe der Sperre → **Variante 3**
4. Verbesserung der Rechenkonstruktion, sodass eine Verklausung/ Verlegung verhindert wird, gleichbleibende Dolenöffnungen (je 2,9 m<sup>2</sup>) und Erhöhung der Sperre um 1 m → **Variante 4**

Die hydrologische Wirkung aller vier Varianten und Dauerstufen am Knoten Ortszentrum Göriach sind in nachstehendem Diagramm zu sehen. Die angegebenen Werte sind die jeweiligen Spitzenabflusswerte aller durchgerechneten Dauerstufen D. Die grauen Balken spiegeln die Spitzenabflusswerte aller D der Variante 0 wider, bei der die Sperre in hm 110,80 im gegenwärtigen Zustand ins N/A-Modell integriert wurde. Bei allen andersfarbigen Balken handelt es sich um Spitzenabflusswerte, bei deren Berechnungen

mit dem NA-Modell HEC-HMS die Sperre in hm 110,80 laut den Annahmen der vier möglichen Adaptionvarianten verändert wurde.

Die Ergebnisse zeigen ein klares Bild:

- Bei Hochwasserereignissen mit Niederschlagsdauerstufen von 1 h, 3 h und 6 h wird für jede Variante eine Erhöhung des Scheitelwertes erreicht. Der Grund liegt in der Vergrößerung der Dolen, Adaptionierung des Rechs oder Erhöhung des Druckabflusses durch die Erhöhung der Sperre um 1m. Der Spitzenabfluss liegt dabei unterhalb des kritischen Abflusses für das bestehende Ortsgerinne von 53 m<sup>3</sup>/s.
- Bei einer Belastung mit einer Dauerstufe von 9 h liegt die Variante 0, 2 und 3 über der kritischen Marke im Ortsbereich. Eine Erhöhung der Sperre um 1m ohne Veränderung des Rechs und der Dolen (Variante 1) und Adaption des Rechs

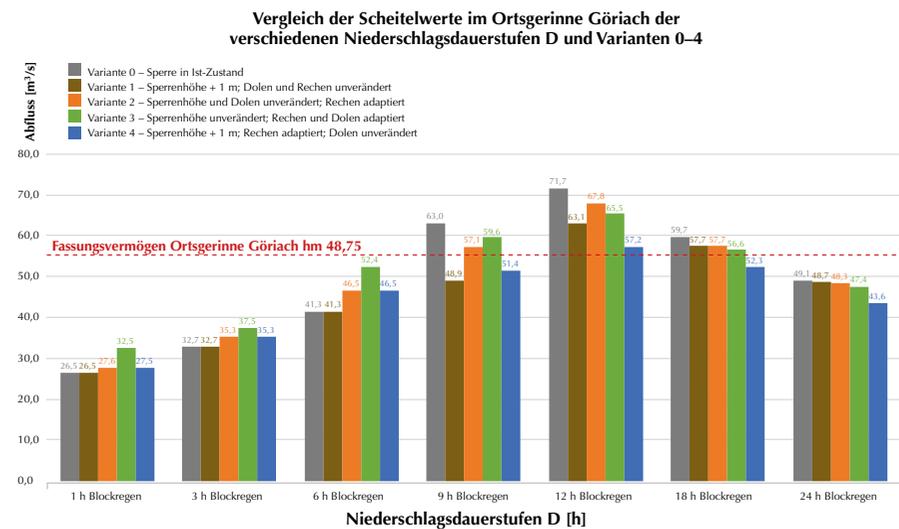


Abbildung 2: Vergleich der Spitzenabflusswerte je Adaptionsvariante und Dauerstufe.

Figure 2: Comparison of the peak discharge values for each adaptation variant and duration level.

(Variante 4) führt zu einer Reduktion des Scheitels unterhalb des kritischen Bereichs.

- Ein blockförmiger zwölfstündiger Niederschlag führt zu einer Überlastung des Ortsgerinnes, die Variante 4 reduziert den Scheitel auf eine Größenordnung von 57 m<sup>3</sup>/s am besten. Dies gilt auch für die 18 stündige blockförmige Belastung mit der besten Wirkung der Variante 4.
- Ein 24 h Regen führt bei allen Varianten zu einem Spitzenabfluss unterhalb der kritischen Abflussmenge, die Variante 4 schneidet aber auch hier am besten ab.

#### Beurteilung der Unsicherheit der Ergebnisse – Plausibilitätsbeurteilung

Eine Kalibrierung/ Plausibilisierung des aufgesetzten Modells erfolgte durch die Rückrechnung des Ereignisses im Juli 2012, gestützt auf die Wetterradar- und Ereignisaufzeichnungen und den Pegel St. Andrä [HD Salzburg 203992]. Die Wetterradar- und Ereignisaufzeichnungen zeigen eine starke Erhöhung der Niederschlagsintensität im hinteren Einzugsgebiet, die niedrigsten Werte im Talboden im Mündungsbereich in den Vorfluter. Aus diesem Grund wurden für die Rückrechnung die Auswertung der Wetterradar- und Ereignisaufzeichnungen je Teileinzugsgebiet und nicht jene der Niederschlagsstation im Talboden verwendet. Die Ungenauigkeit der Wetterradar- und Ereignisaufzeichnungen liegt hinsichtlich Radarabschattungskarte (Relative Höhe des niedrigen Radarstrahls – ZAMG 2013) in einem guten Bereich (0–1000 m über Topographie – grüner Bereich). Effekte wie Winddrift und Bodenstationsdichte liegen im mittleren bis schlechten Bereich. Bedingt durch diese Unsicherheiten in den Eingangsdaten wird sowohl der Spitzenabfluss mit 17 m<sup>3</sup>/s im Vergleich zu

den gemessenen 14 m<sup>3</sup>/s am Pegelstandort St. Andrä als auch die Abflussfracht überschätzt. Der Anstieg der Abflusswelle erfolgt ebenso zu früh, möglicherweise wurde die LagTIME (ca. 2 m/s im Gerinne) zu optimistisch eingeschätzt. Die Wirkung der Wasserdosiersperre wurde ins Modell mit einer auf Basis einer 2-dimensionalen Berechnung erzeugten Kennlinie integriert. In diesem Fall liegen die Unsicherheiten in der Definition des Verklausungsgrades (Annahme 40 %). Die durchgeführte manuelle Kalibrierung erfolgte einerseits mit einer Veränderung der CN Werte um -10 % und die Anpassung der Fließlaufzeiten im Hauptgerinne (Mittelwert ca. 2 m/s).

#### Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Die für die Nachrechnung des Hochwasserereignisses vom Juli 2012 verwendeten 15-minütigen INCA Daten führten zu einer recht guten Übereinstimmung mit den Werten des Pegels St. Andrä. Das berechnete Ergebnis liegt hinsichtlich Scheitelwert zwar um 18 % höher als beobachtet, und grundsätzlich wurde die Fracht überschätzt, jedoch kann die Form der Ganglinie als durchaus plausibel eingestuft werden. Die Berechnung des Bemessungsereignisses erfolgte mit verschiedenen Niederschlagsdauerstufen (1 h–24 h) und blockförmiger Verteilung auf Basis der ehyd Modellpunkte (Bemessung).

Der Scheitelwert der 12 h Variante liegt am Pegel St. Andrä mit 77,0 m<sup>3</sup>/s am höchsten und damit weit über dem statistisch angegebenen Wert für ein HQ<sub>100</sub> Hochwasserereignis von 32 m<sup>3</sup>/s an der Pegelhütte. Dieser statistische Wert des Pegels St. Andrä ist jedoch aufgrund der erst sehr kurzen Beobachtungsdauer von ca. 25 Jahren sehr kritisch zu betrachten.

Die Kennlinien am Dosierbauwerk für

jede Variante (0–4) waren ins NA Modell zu integrieren, deren Berechnung erfolgte mittels einer 2-dimensionalen numerischen Simulation inklusive Sperrenbauwerk. Durch diese Berechnung wurde die Wirkung der Dosiersperre hinsichtlich freiem Durchfluss, Rückstau und Fließretention dargestellt. Als Ergebnis bekam man nicht nur die Kennlinie je Variante, sondern auch die Einstaufläche und -dauer im Stauraum.

Das Leistungsvermögen der alten Wasserdosiersperre konnte mit den oben beschriebenen Eingangsdaten dann für alle Umbauvarianten berechnet werden. Als Ergebnis zeigte sich, dass eine Erhöhung der Sperre um 1 m (Variante 1) sehr wirkungsvoll für den Ortsbereich ist, und eine Erhöhung um 1 m und Verbesserung der Rostkonstruktion (Variante 4) den besten Effekt bringt.

#### Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Markus Moser  
Gebietsbauleitung Lungau  
Johann-Löckerstraße 3, 5580 Tamsweg  
markus.moser@die-wildbach.at

DI Patrick Stolz  
Gebietsbauleitung Pongau,  
Flachgau und Tennengau  
Bergheimerstraße 57, 5020 Salzburg  
patrick.stolz@die-wildbach.at

#### Literatur/References:

ÖWAV (2019):  
Niederschlags-Abfluss-Modellierung, Regelblatt 220 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Selbstverlag des ÖWAV, Wien.

Scharffenberg W. (2016):  
Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Kalifornien.

Weigluni V. (2018):  
ehyd – Auswertungen, Karte Bemessungsniederschlag.  
Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.



JOHANNES HÜBL

## Ein einfaches Verfahren zur Bestimmung von Murgangabflüssen

### *A simple method to estimate debris-flow hydrographs*

#### Zusammenfassung:

Auf der Grundlage von zahlreichen veröffentlichten und gemessenen Abflusshöhen und Hydrographen von Murgängen wird ein einfaches Verfahren zur Berechnung von Murenabflüssen entwickelt. Es basiert auf dem Konzept der dimensionslosen Einheitsganglinie nach Kreps (1957), das mit Ansätzen aus dem SCS Verfahren erweitert wird. Dadurch lassen sich Spitzenabflüsse und Murenhydrographen berechnen. Weiters lässt sich daraus eine empirische Funktion für den Spitzenabfluss in Abhängigkeit von der Murenfracht ableiten. Im Vergleich mit bereits publizierten empirischen Funktionen ergibt die neue Funktion höhere Abflüsse bei geringeren Murenfrachten. Zuletzt wird ein Prozessfaktor abgeleitet, der als Basiswert für den Intensitätsfaktor dienen kann.

#### Abstract:

To determine a debris flow hydrograph a dimensionless unit hydrograph (DUH) is used. Information about the shape of these hydrographs is composed by observed stage curves and hydrographs of debris flows. These hydrographs were evaluated, taking into account the time for the rising and recession limb, presuming a debris flow consists of only one surge. For practical use the DUH developed by Kreps (1957) was applied. According to the SCS procedure the shape factor and the peak rate factor are implemented. This method allows to roughly estimate a debris flow hydrograph, although some shortcomings still remain.

#### Stichwörter:

Murgang, dimensionslose Murenganglinie, Murenspitzenabfluss

#### Keywords:

Debris flow, dimensionless debris-flow hydrograph, debris-flow peak discharge

#### Einleitung

Die Berechnung von Bemessungsabflüssen in Wildbächen stellt für PlanerInnen eine große Herausforderung dar, da in solchen kleinen und zumeist steilen Einzugsgebieten unterschiedliche Verlagerungsprozesse auftreten können, die entweder von Wasser (Systemzustand I) oder von Geschiebe (Systemzustand II) dominiert werden (Hübl, 2018). Messdaten von Wildbachereignissen sind oft nur spärlich vorhanden, da die Abflussmessung, speziell für den Systemzustand II, für diese seltenen Ereignisse mit großem materiellen und somit finanziellen Aufwand verbunden ist. Weiters ist das äußerst unterschiedliche Verhalten der Einzugsgebiete zu berücksichti-

gen, da je nach Disposition, sogar bei gleicher Belastung unterschiedliche Verlagerungsprozesse auftreten können. Analogieschlüsse sind deshalb von einem Einzugsgebiet auf ein anderes nur sehr beschränkt zulässig.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Ganglinien von wasserdominanten Prozessen (Hochwasser, Abbildung 1) von geschiebedominanten Prozessen (Muren, Abbildung 2) markant. Augenscheinliche Unterschiede in der Form der Ganglinie sind die Basisdauer des Ereignisses ( $t_b$ ), die Höhe des Scheitelabflusses ( $Q_p$ ) und die oftmals beobachtete Ausbildung mehrerer, in rascher Abfolge auftretender Abflussspitzen, den sogenannten Murschüben, deren Entstehung noch nicht eindeutig geklärt ist.

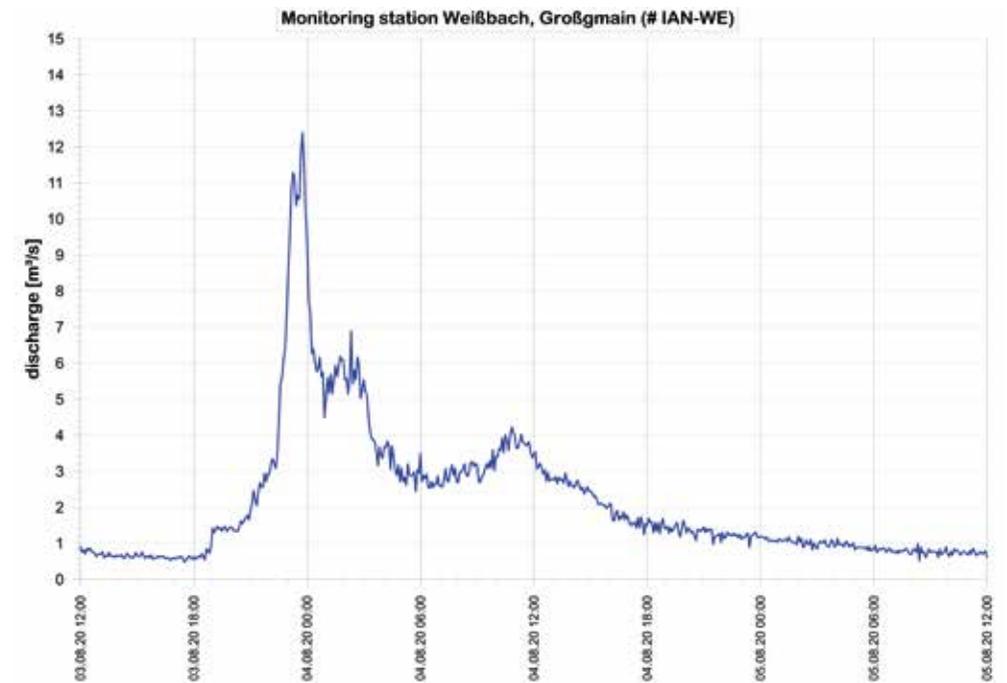


Abbildung. 1: Typische Ganglinie eines Hochwassers (Weißbach, Großgmain), die Zeitachse umfasst 48 Stunden.

Figure 1: Typical flood hydrograph (Weißbach, Großgmain), time axis covers 48 hours.

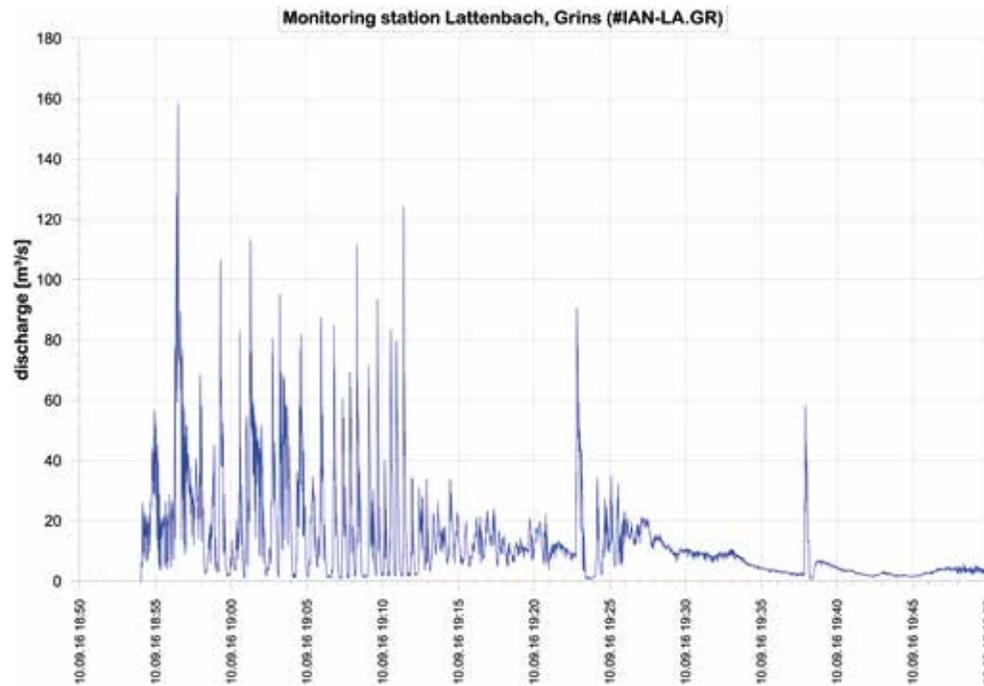


Abbildung 2: Typische Ganglinie einer Mure (Lattenbach, Grins), die Zeitachse umfasst 1 Stunde..

Figure 2: Typical debris-flow hydrograph (Lattenbach, Grins), time axis covers 1 hour.

Festgestellt werden kann nur, dass

- sich ein Murgang zumeist aus mehreren Murschüben zusammensetzt,
- die einzelnen Murschübe von kurzer Dauer sind,
- kurze Murschübe innerhalb eines Murgangs die höchsten Abflüsse aufweisen,
- die Abflussscheitelwerte von Murgängen zumeist um ein Vielfaches größer sind als bei Reinwasserabflüssen,
- nur ein Teil der direkten Abflussfracht in einem Murgang oder Murschub enthalten ist,
- Murganghydrographen zumeist keine Ähnlichkeit mit fluviatilen Abflussganglinien zeigen,
- und dass die Magnitude eines Murganges von der Größe des Einzugsgebietes unabhängig ist.

### Aufgabenstellung

Zur Bemessung von technischen Schutzmaßnahmen und als Grundlage für Simulationen für die Gefahrenanalyse ist ein einfaches Verfahren zu entwickeln. Dieses soll nachvollziehbar und mit den üblicherweise vorhandenen Daten, wie z. B. dem mobilisierbaren Geschiebepotential, Spitzenabflüsse von Murgängen sowie Muren-Hydrographen ermitteln. Ziel des Verfahrens sollte eine Methode sein, die eine geschlossene Ableitung von Ganglinienform, Scheitelabfluss und Volumen von Murschüben bzw. Murgängen zulässt.

Weiters sollte ein Prozessfaktor berechnet werden können, der den Scheitelabfluss von Murgängen dem Spitzenwert des hydrologischen Abflusses aus einem Niederschlag-Abflussmodell gegenüberstellt.

### Methodik

Zur Entwicklung einer passenden Methodik ist vorab die Frage zu stellen, welche Eingangsdaten grundsätzlich vorhanden sind. In zahlreichen Publikationen der letzten 20 Jahre finden sich graphisch dargestellte Fließhöhen (stage curves) verschiedener Murgänge in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung, die an verschiedenen Standorten (Mittellauf, Kegel) entlang eines Gerinnes erfasst wurden. Die Qualität der Angaben lässt sich nicht feststellen. Bestenfalls werden in den Publikationen auch Angaben zur Murenfracht bzw. zu den Spitzenabflüssen angeführt. Generell nicht nachvollziehbar ist, ob die abgelagerten Murenfrachten geschätzt oder gemessen wurden. Trotzdem stellen diese Angaben eine auswertbare Grundlage für weitere Untersuchungen dar.

Aus diesen Ganglinien der Murenabflusshöhen lassen sich folgende Parameter ableiten:

- zeitlicher Verlauf der Abflusshöhen
- Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens des Murgangs (Phänotyp)
- Anstiegszeit
- Abfallszeit
- Spitzenabfluss (wenn angegeben)
- Murenfracht (wenn angegeben)

In den letzten Jahren wurden am Institut für Alpine Naturgefahren die Messstationen am Lattenbach (Tirol) und der Gadoria (Südtirol) mit einem Hochfrequenzradar bestückt, sodass zumindest Oberflächengeschwindigkeiten von Murgängen in hoher zeitlicher Auflösung (1 Sekunde) gemeinsam mit Abflusshöhen gemessen werden. Dadurch lassen sich die Murenabflüsse in sekundlicher Auflösung berechnen.

Aus den Messungen lassen sich folgende Parameter ableiten:

- zeitlicher Verlauf der Abflusshöhen
- Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens des Murgangs (Phänotyp)

- Abflussganglinie
- Anstiegszeit
- Abfallszeit
- Volumetrische Feststoffkonzentration
- Spitzenabflüsse
- Murenfracht

Von einigen Autoren (Mizuyama et al., 1992; Costa, 1988; Jitousono et al., 1996; Ou et al., 1991; Ikeda et al., 2019) wurden auch empirische Ansätze publiziert, die den Muren Scheitelabfluss auf Basis der Murenfracht abschätzen lassen. Diese Funktionen können jedenfalls zu Vergleichszwecken herangezogen werden. Weiters stehen Datensätze für Murenfrachten und Spitzenabflüsse aus dem Wildbach- und Lawinenkataster zur Verfügung, die im Rahmen von Ereignisdokumentationen erhoben wurden.

Zur Beschreibung der Form der Ganglinie können somit aus den Literaturdatensätzen und den Messdaten die zeitlichen Kennwerte (Beginn des Anstiegs der Abflusshöhe, Kulminationspunkt der Kurve und Übergang in einen üblichen Abflussverlauf) einer Abflusshöhen- oder einer Abflussganglinie visuell abgegrenzt werden. Da sich Murenganglinien typischerweise von hydrologischen Ganglinien unterscheiden, wird für jede Analyse vorab ein Phänotyp (Abbildung 3) festgelegt. Dafür werden folgende Kriterien herangezogen:

- Single surge (SI): Ausgeprägte eingipfelige Abflusskurve mit eindeutigem Beginn und Ende
- Single surge with body (SB): Einem ausgeprägten Gipfel folgt ein längerer flacher Verlauf der Abflusskurve bevor sie sich absenkt
- Intermittent surge (IN): Mehrgipfelige Abflusskurve, bei der eine Unterteilung in einzelne Schübe schwierig ist
- Intermittent surge within a series of surges (SS): zeitlicher Ausschnitt aus einer

mehrgipfeligen Abflusskurve mit der Ausprägung einer single surge

- Compound surge (CO): Mehrgipfelige Abflusskurve, wobei die Gipfel sowohl vor als auch nach dem Spitzenwert auftreten können

Mit diesen zeitlichen Kennwerten lässt sich ein dimensionsloser Unit Hydrograph (DUH) für alle analysierten Ereignisse ableiten. Als Basis dient das annähernd dreiecksförmige dimensionslose UH-Modell von Kreps (1957), das mit dem shape factor ( $SF_{MG}$ ) und dem peak rate factor ( $PRF_{MG}$ ) aus dem SCS Verfahren (Fang, 2005) erweitert wird (Abbildung 4).

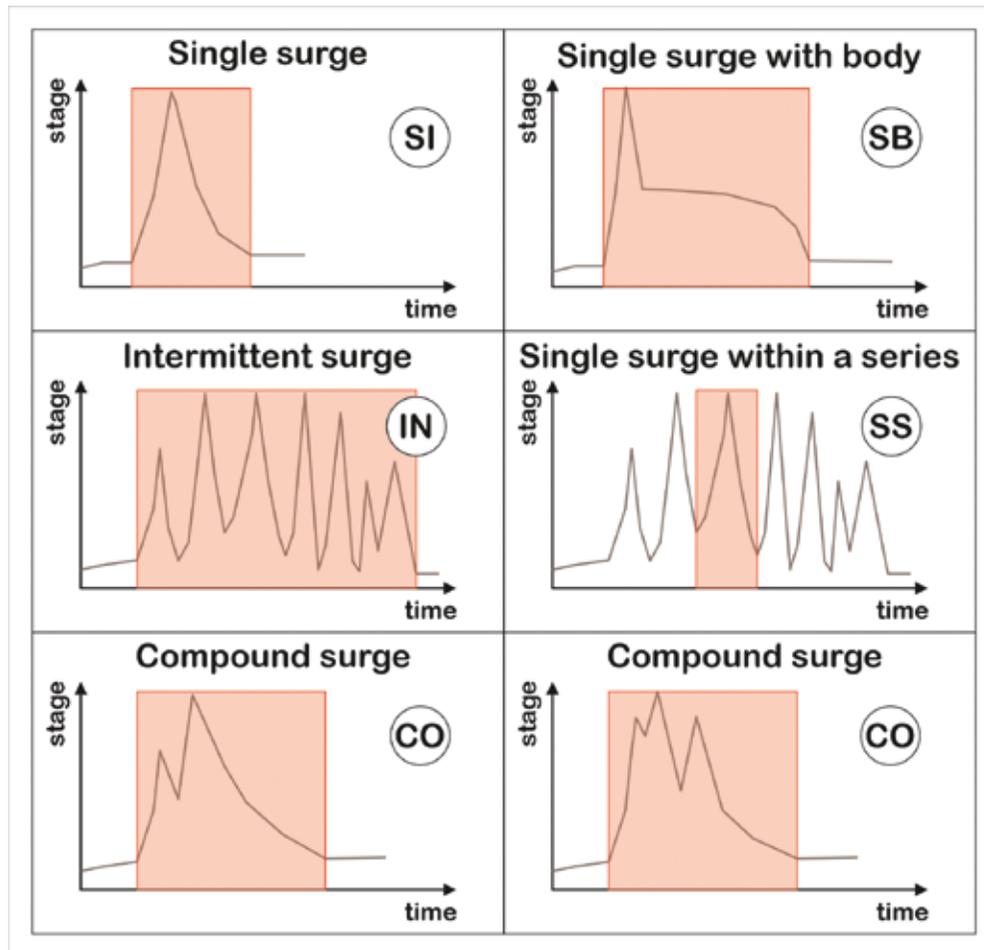


Abbildung 3: Schema zur zeitlichen Abgrenzung der Murschübe unter Festlegung von Phänotypen von Murgängen.

Figure 3: Scheme to identify different surge types (phenotype) and to delimit these surges.

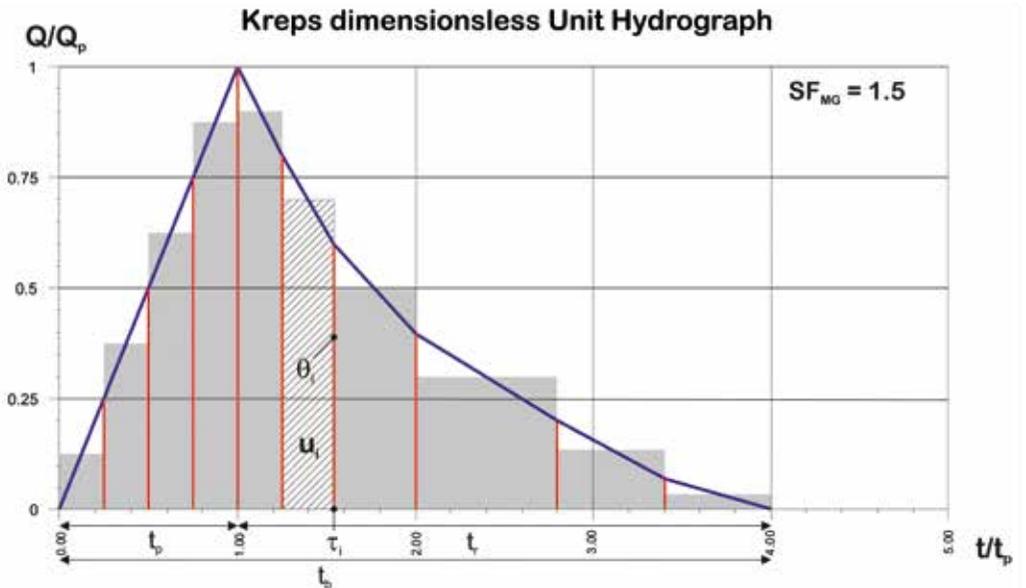


Abbildung 4: Dimensionslose Einheitsganglinie (DUH) nach Krepis (1957).

Figure 4: Dimensionless Unit Hydrograph (DUH) according to Krepis (1957).

Der Umrechnungsfaktor (CF) kann für zeitliche Angaben in Sekunden mit 1 angenommen werden. Zugleich wird als Variable (X) das Verhältnis von Abfall ( $t_r$ ) zu Anstiegszeit ( $t_p$ ) eingeführt,

wodurch das Modell von Krepis (Tabelle 1) an die unterschiedlichen Murenspiegellagen bzw. -hydrographen besser angepasst werden kann.

$\Theta$ time ratio ( $t/t_p$ )	$\tau$ peak ratio ( $Q/Q_p$ )	$1+(SF_{MG} - 0,5) * 0,25$	0,8
0	0	$1+(SF_{MG} - 0,5) * 0,55$	0,6
0,25	0,2	$1+(SF_{MG} - 0,5) * 1,00$	0,4
0,5	0,5	$1+(SF_{MG} - 0,5) * 1,80$	0,2
0,75	0,8	$1+(SF_{MG} - 0,5) * 2,40$	0,07
1	1	$1+(SF_{MG} - 0,5) * 3,00$	0

Tabelle 1: Dimensionslose Einheitsganglinie (DUH) nach Krepis (1957).

Table 1: Dimensionless Unit Hydrograph according to Krepis (1957).

Dadurch lässt sich für jeden Murschub der Formfaktor  $SF_{MG}$  individuell bestimmen. Dieser Formfaktor kann somit zahlreiche Formen eines Murschubs beschreiben. Wenn sich der Murgang jedoch aus mehreren Murschüben zusammensetzt, stößt das Verfahren an seine Grenzen. Die Umrechnung in die reale Ganglinie mit dem Scheitelabfluss ( $Q_p$  bzw.  $Q_{MG}$ ) erfolgt unter Berücksichtigung der Murenfracht ( $V_{MG}$ ), wobei die volumetrische Konzentration ( $c_v$ ) als Variable eingeführt wird, die den Bezug zum vor Ort aufgenommenen mobilisierbaren Geschiebepotential ( $V_G$ ) herstellt.

$$X = \frac{t_r}{t_p} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$t_b = t_p + X \cdot t_p = t_p \cdot [1 + 3 \cdot (SF_{MG} - 0,5)] \quad \text{Gl. (2)}$$

$$SF_{MG} = \frac{X + 1,5}{3} \quad \text{Gl. (3)}$$

$$PRF_{MG} = \frac{CF}{SF_{MG}} \quad \text{Gl. (4)}$$

$$V_{MG} = \frac{1}{PRF_{MG}} \cdot Q_{MG} \cdot t_p = \frac{Q_{MG} \cdot t_p \cdot (X + 1,5)}{3 \cdot PRF_{MG}} \quad \text{Gl. (5)}$$

$$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_{MG}}{t_p} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p} = \frac{3}{X + 1,5} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p} \quad \text{Gl. (6)}$$

Eine einfache statistische Analyse der Kennwerte der dimensionslosen Ganglinie soll die Häufigkeitsverteilung der Kennwerte liefern und einen Vergleich unterschiedlicher Ganglinienformen ermöglichen.

Der Vergleich der Kennwerte der Murenganglinien, sowohl für einzelne Schübe als auch für unterschiedliche Einzugsgebiete, erfolgt durch die Implementierung des Abflusses aus einem

mobilisierten Einheitsvolumen (UV) von  $1 \text{ m}^3$ , wobei ebenfalls eine volumetrische Feststoffkonzentration von 0,7 unterstellt wird.

$$Q_{MG(UV)} = \frac{1}{0,7} \cdot \frac{3}{t_p \cdot (X + 1,5)} = \frac{4,2857}{t_p \cdot (X + 1,5)} \quad \text{Gl. (7)}$$

Die synthetische Murenganglinie kann einerseits zur Plausibilisierung von gemessenen Murenganglinien eingesetzt werden, wenn die Formen der Ganglinien ähnlich sind. Andererseits lässt sich mit angenommenen Kennwerten, die innerhalb der statistisch ermittelten Bandbreite liegen, eine Ganglinie für die Bemessung oder eine Eingangsganglinie für weitere Simulationen ableiten.

Die Kennwerte des DUH können auch in Beziehung zur Murenfracht gesetzt werden, wodurch ein empirischer Zusammenhang zwischen Murenspitzenabfluss und Murenfracht hergestellt werden kann (Gl. 8 und Gl. 9). Diese Funktion lässt sich sodann mit anderen publizierten Formeln vergleichen. Bei dem neu entwickelten Ansatz ist jedoch vorteilhaft, dass sowohl Form der Ganglinie, als auch Fracht und Scheitelabfluss zusammenpassen. Dadurch können durch Umformen der Ausgangsgleichungen (Gl. 6) aus der Murenfracht und dem Scheitelabfluss die Kennwerte der Form der Ganglinie bestimmt werden.

$$\frac{PRF_{MG}}{t_p} = a \cdot V_{MG}^b \quad \text{Gl. (8)}$$

$$Q_{MG} = V_{MG} \cdot a \cdot V_{MG}^b = a \cdot V_{MG}^{1+b} \quad \text{Gl. (9)}$$

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse dieser Methode werden die zumeist angenommenen (geschätzten) Werte zur Murenfracht und zum Spitzenabfluss aus dem Wildbach- und Lawinenkataster als auch publizierte Angaben über diese Werte herangezogen.

Mit dieser Formel und dem Hüllkurven-

ansatz nach Wundt (1953) lässt sich der maßgebliche Prozessfaktor (PF) berechnen. Dieser sollte für Einzugsgebietsflächen ( $A_E$ ) von 1 bis  $30 \text{ km}^2$ , Gebietsfaktoren (GF) von 8 bis 14 und Murenfrachten von 100 bis  $100000 \text{ m}^3$  Gültigkeit haben. Dieser Prozessfaktor kann als Basiswert für den Intensitätsfaktor (IF) angesehen werden.

$$Q_{hydro} = GF \cdot A_E^{0,6} \approx HQ_{100} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$PF = \frac{Q_{MG}}{HQ_{100}} \quad \text{Gl. (11)}$$

$$PF = \frac{a \cdot V_{MG}^{1+b}}{GF \cdot A_E^{0,6}} \approx IF \quad \text{Gl. (12)}$$

## Ergebnisse

Aus der Literatur konnten 72 Murschübe hinsichtlich der Form der Ganglinie analysiert und daraus die Formkennwerte ( $t_p$ ,  $t_r$ ,  $t_b$ ,  $X$ ) abgeleitet werden (Tabelle 2).

Da die Ganglinien der Fließhöhen einen ähnlichen Verlauf wie die Abflusshydrographen aufweisen, wurden diese normalisiert und mit dem DUH Modell verglichen. Wie Abbildung 5 zeigt, können die Formen der Fließhöhenkurven sehr gut mit dem verwendeten Modellansatz abgebildet werden.

Einzugsgebiet	Anzahl der Murschübe	Ereignistage	Referenz
Rio Moscardo (Italien)	21	11	Arattano et al. (2003), Arattano et al. (2004), Marchi et al. (2002), Zanuttigh et al. (2007)
Acquabona (Italien)	7	3	Genevois et al. (2000), Zanuttigh et al. (2007)
Illgraben (Schweiz)	7	5	Berger et al. (2011), data provided by B. McArdell (2010)
Dunsmore (US)	3	2	Kean et al. (2011)
Arroyo Seco (US)	1	1	Kean et al. (2011)
Jesusita	1	1	Kean et al. (2011)
Mount St.Helens	5	1	Pierson et al. (1986)
Rio Rebaixer (Spanien)	5	5	data provided by M. Hürlimann (2018)
Gadria	22	4	Comiti et al. (2014), Coviello et al. (2021)

Tabelle 2: Verwendete Daten von publizierten Murgängen.

Table 2: Applied data of published debris flows.

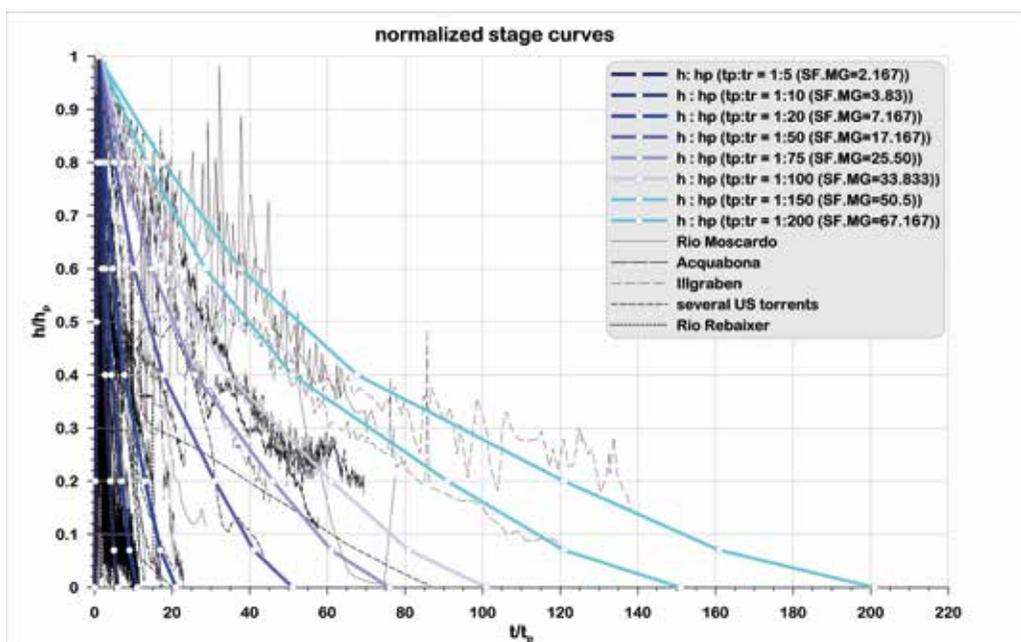


Abbildung 5: Normalisierte Abflusshöhen der verwendeten publizierten Datensätze.

Figure 5: Normalized stage curves of all applied published data.

Aus den gemessenen Abflussganglinien konnten insgesamt 64 Murschübe hinsichtlich der Form der Abflussganglinie analysiert werden. Davon entfallen auf den Lattenbach 25 Schübe an 7 Ereignistagen und auf die Gadria 39 Schübe an 9 Ereignistagen.

Jeder identifizierbare Murschub wurde einem Phänotyp zugeordnet und mit den Formkennwerten der Einheitganglinie der peak rate factor (PRFMG) berechnet, mit der Vereinfachung, dass für alle Ereignisse die volumetrische Feststoffkonzentration mit 0,7 angenommen wird.

Von den insgesamt 136 Datensätzen entfallen auf die Phänotypen single surge (SI) 40 Datensätze, single surge within a series of surges (SS) 62 Datensätze, compound surge (CO) 17

Datensätze, intermittent surge (IN) 14 Datensätze und single surge with body (SB) 3 Datensätze.

Der Median der Anstiegszeiten der Murschübe zeigt Werte zwischen 10 und 30 Sekunden (Abbildung 6). Der hohe  $t_p$  Wert beim Phänotyp IN liegt darin, dass die Zeit bis zum höchsten Scheitelwert in einer Serie von Schüben herangezogen wurde und nicht unbedingt der erste Schub den höchsten Scheitel aufweist. Die Verhältniswerte deuten darauf hin, dass der abfallende Ast etwa 5 bis 15mal so lang wie der Anstieg dauert (Abbildung 7). Der hohe Wert beim Phänotyp SB liegt darin, dass einem kurzen Anstieg eine größere Abflusshöhe auf eine längere Zeit folgt.

Werden alle 121 publizierten und beobachteten Daten mit bekannten Murenvolumina

Box plots of  $t_p$  [s] for different surge types

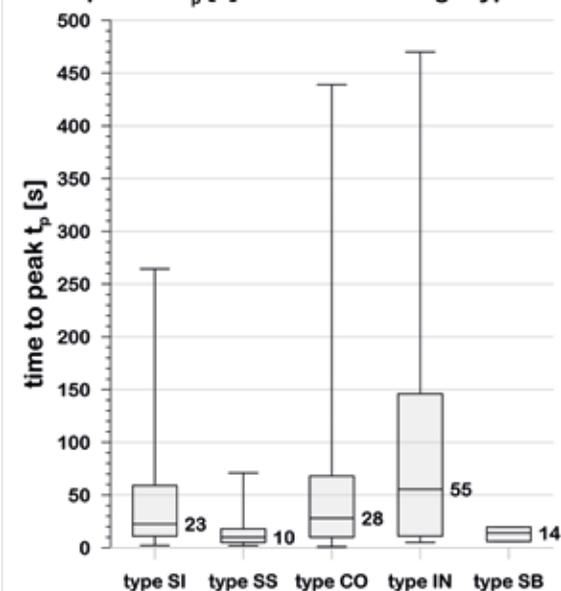


Abbildung 6: Anstiegszeiten bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=136).

Figure 6: Box plots of time to peak for different phenotypes (n=136).

Box plots of factor X for different surge types

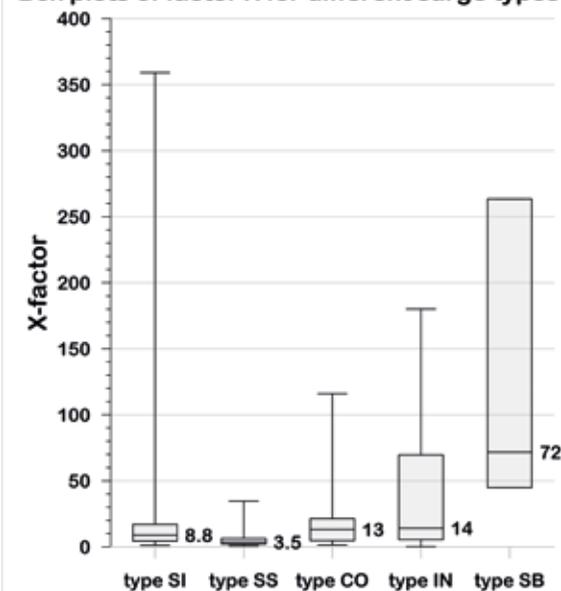


Abbildung 7: Verhältniswert X bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=136).

Figure 7: Box plots of factor X for different phenotypes (n=136).

in ein Diagramm mit dem Verhältniswert (X) als Abszisse und der Anstiegszeit ( $t_p$ ) als Ordinate gemeinsam mit den Abflüssen aus dem mobilisierbaren Einheitsvolumen bei einer Feststoffkonzentration von 0,7 aufgetragen, zeigt sich, dass

die höchsten Abflüsse aus einem Einheitsvolumen (QMG.UV) bei insgesamt kleineren Feststoffvolumen, die kleineren Abflüsse jedoch nur bei größeren Feststoffvolumen auftreten (Abbildung 8).

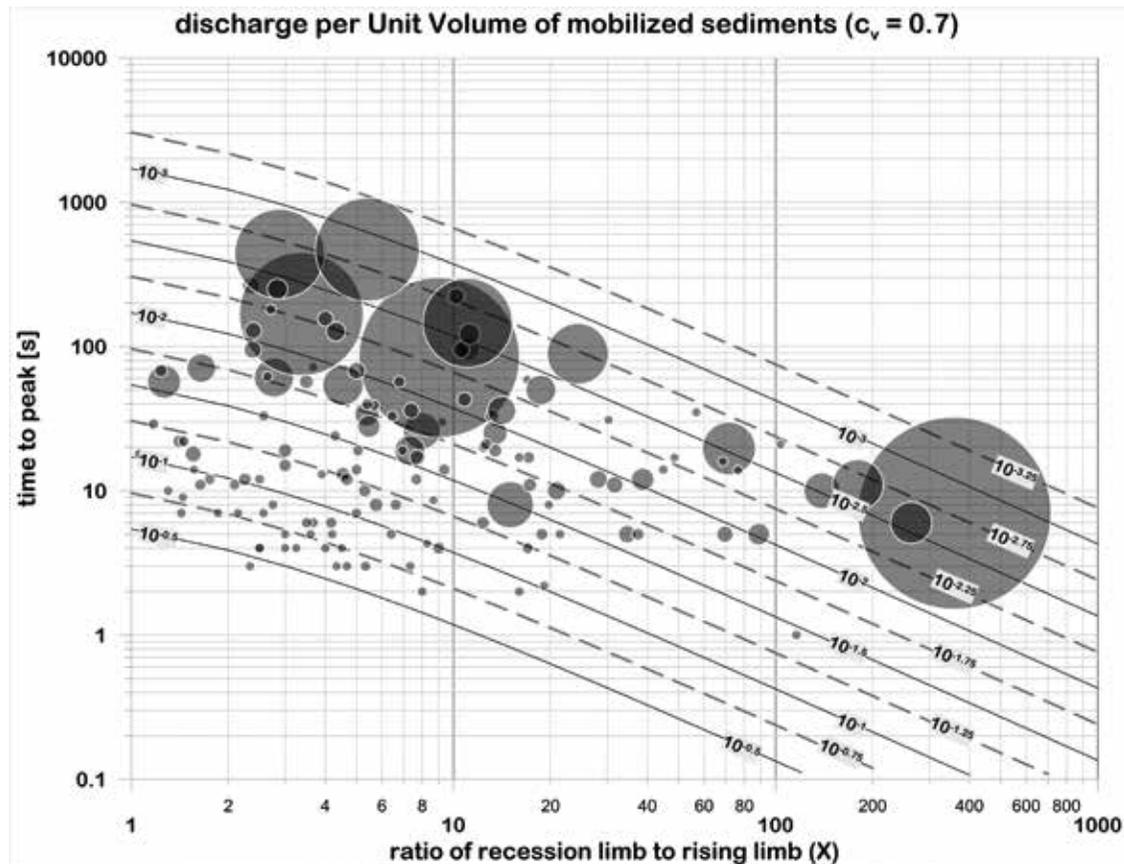


Abbildung 8: Kurvenscharen der Abflüsse aus einem Einheitsvolumen mit einer volumetrischen Feststoffkonzentration von 0,7 (Gleichung 7) und beobachtete bzw. publizierte Murenfrachten. Die Größe der Kreise ist proportional der Murenfrachten.

Figure 8: Analysed discharges of a mobilized Unit Volume assuming a volumetric sediment concentration of 0,7 (equation 7). The size of the circles is proportional to the total debris-flow volume.

Von 121 Datensätzen sind sowohl die Murenfracht als auch der Scheitelwert bekannt. Bei Murenfrachten zwischen 100 und rund 100000 m<sup>3</sup> schwanken die Murenabflüsse von 10 bis zu 250 m<sup>3</sup>/s. Allgemein lässt sich nur feststellen, dass mit zunehmendem Volumen auch die Scheitelabflüsse ansteigen, wobei die Phänotypen SS und CO die höchsten Abflüsse aufweisen. Bei

hohen Frachten ergeben die berechneten Abflüsse zumeist zu geringe Werte. Rund 50 Prozent aller Differenzen liegen im Bereich zwischen  $\pm 20$  Prozent (Abbildung 9). Die geringsten Differenzen weisen die Phänotypen SI und SS auf, obwohl von diesen Phänotypen auch 4 Datensätze eine Unterschätzung von über 80 Prozent zeigen.

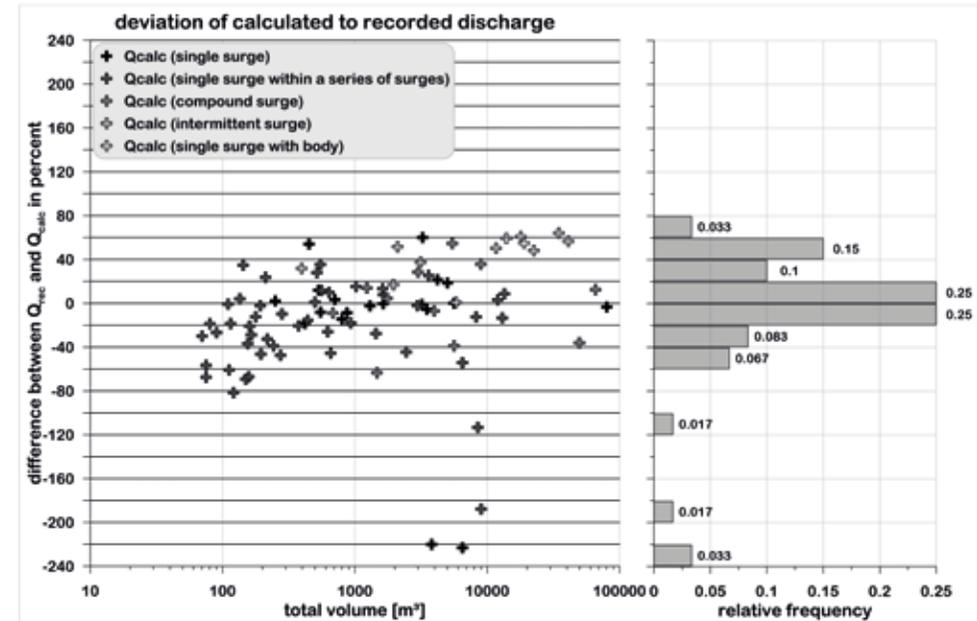


Abbildung 9: Abweichung der gemessenen und publizierten Abflüsse von den berechneten Abflüssen in Prozent.

Abbildung 9: Difference between measured/published discharges and calculated discharges in percent.

Unter Anwendung des empirischen Ansatzes (Gl. 8 und 9) können Potenzfunktionen für alle Datensätze (Gesamt), nur für die Datensätze deren Abflussdifferenz zwischen Beobachtung und

Berechnung kleiner als 20 Prozent ist (Selection), sowie für alle ausgewiesenen Phänotypen abgeleitet werden (Tabelle 3 und Abbildung 10).

Datenauswahl	Koeffizient a	Exponent b	1+b	R <sup>2</sup>	Anzahl
Gesamt	2,4213925	-0,6686801	0,3313199	0,61	121
Selection	2,4719344	-0,6389523	0,3610477	0,64	43
SI	0,1424572	-0,3544591	0,6455409	0,19	29
SS	1,9803304	-0,5645395	0,4354605	0,70	61
CO	0,5270569	-0,4887855	0,5112145	0,66	15
IN	1,1396101	-0,6647349	0,3352651	0,81	13
SB	0,0123701	-0,1883602	0,8116398	0,97	3

Tabelle 3: Koeffizienten (a), Exponenten (b) und Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) der ermittelten Potenzfunktionen für unterschiedliche Datensätze.

Table 3: Coefficient (a), exponent (b) and determination coefficient (R<sup>2</sup>) of the derived empirical functions for different sets of data.

Die beste Anpassung wird beim Phänotyp SB erzielt, was jedoch auf die nicht repräsentative Anzahl an Datensätzen zurückzuführen ist. Ähnlich verhält es sich beim Phänotyp IN. Aber auch die Anpassungen für den Phänotyp SS mit 61 Datensätzen und für die Selection mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,70 bzw. 0,64 deuten auf eine anwendbare Funktion hin. Wird die Anpassungsfunktion für alle Datensätze gewählt, erreichen viele simulierte Abflüsse nicht den Beobachtungs- bzw. Messwert, besonders ab Abflüssen mit einem Wert größer als 40 m<sup>3</sup>/s. Mit der Anpassungsfunktion für ausgewählte Datensätze wird eine bessere Streuung erreicht, größere Abflüsse werden jedoch auch eher unterschätzt. Mit der Anpassungsfunktion für den Phänotyp SI erreichen viele simulierten Abflüsse nicht den Beobachtungs- bzw. Messwert, besonders ab Abflüssen mit einem Wert größer als 40 m<sup>3</sup>/s. Unter Anwendung der Funktion für den Phänotyp SS ergibt sich zwar

eine größere Streuung, die simulierte Abflüsse liegen jedoch eher über dem Beobachtungs- bzw. Messwert. Dies gilt auch für größere Abflüsse. Die Anpassungsfunktionen für die Phänotypen CO, IN und SB ergeben berechnete Abflüsse die zumeist unter dem Beobachtungs- bzw. Messwert liegen. Sehr deutlich ist dieser Effekt bei den Phänotypen IN und SB erkennbar. Dies ist jedenfalls auf die Differenz zwischen gegebener Ganglinie und unterstellter Form der Ganglinie zurückzuführen.

Der Vergleich der neu entwickelten Funktionen mit den bereits publizierten Funktionen (Mizuyama et al., 1992; Costa, 1988; Jitousono et al., 1996; Ou et al., 1991; Ikeda et al., 2019) zeigt, dass die Abflüsse für Murenvolumina von unter 1000 m<sup>3</sup> mit den bereits veröffentlichten Ansätzen unterschätzt werden (Abbildung 11). Als Obergrenze ist sicherlich die Formel von Ikeda et al. (2019) mit einem Koeffizienten von 1 anzusehen, da alle Messwerte unterhalb dieser

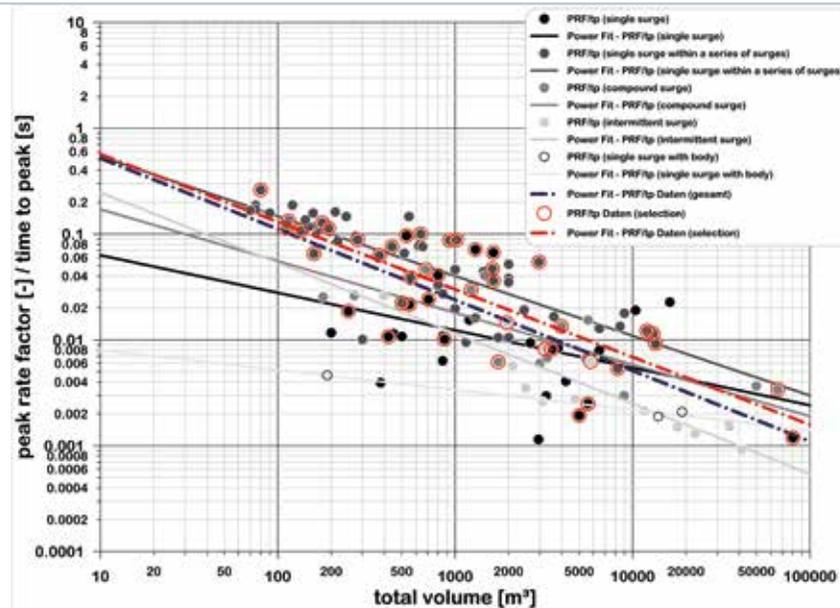


Abbildung 10: Ermittelte empirische Potenzfunktionen für unterschiedliche Datensätze.

Figure 10: Derived empirical functions for different sets of data.

Geraden liegen. Von der Steigung der Funktion her passt Ou et al. (1991) mit seinem „#2 rare debris flows“ noch am besten zu den bearbeiteten Datensätzen. Allgemein ist festzuhalten, dass die Exponenten der Potenzfunktion prinzipiell zu hoch angesetzt werden, wodurch die berechneten Scheitelabflüsse bei kleineren Murenvolumina als zu gering anzusehen sind. Zumindest bis zu einem Murenvolumen von 100000 m<sup>3</sup> lässt sich mit den neuen Funktionen der Scheitelabfluss von Murschüben berechnen. Prinzipiell könnten die Funktionen Selection und SS verwendet werden, um aber einen konservativen Ansatz speziell für kleinere Murenfrachten zu wählen, wird für die Plausibilisierung nur mehr die Anpassung für den Phänotyp SS verwendet.

$$Q_{MG(SS)} = 1,980 \cdot V_{MG}^{0,4355} \quad \text{Gl. (13)}$$

Zur Ableitung der entsprechenden Ganglinien müssen die oben angeführten Formeln umgeformt

werden. Die Werte für den time to peak sind dabei frei zu wählen. Der peak rate factor, der Formfaktor, der Verhältniswert X und die Dauer der Ganglinie errechnet sich dann mit Gleichungen 14 bis 18.

$$PRF_{MG} = t_p \cdot a \cdot V_{MG}^b \quad \text{Gl. (14)}$$

$$SF_{MG} = \frac{CF}{PRF_{MG}} \quad \text{Gl. (15)}$$

$$X = 3 \cdot SF_{MG} - 1,5 \quad \text{Gl. (16)}$$

$$t_r = X \cdot t_p \quad \text{Gl. (17)}$$

$$t_b = t_p + t_r \quad \text{Gl. (18)}$$

Mit diesen Angaben können die Ganglinien von Murenergebnissen, die den gleichen Scheitelabfluss aber veränderliche time to peak aufweisen, berechnet und visualisiert werden.

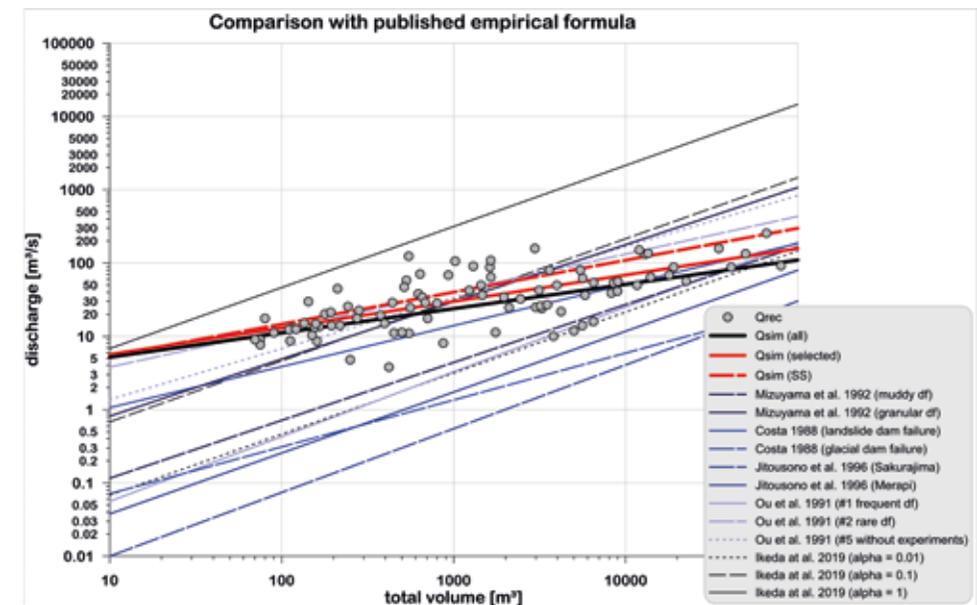


Abbildung 11: Vergleich der neuen empirischen Funktionen mit publizierten Potenzfunktionen.

Abbildung 11: Comparison of the new empirical function in comparison with already published functions.

Für die Plausibilisierung werden dokumentierte Ereignisse aus Österreich und der Schweiz (Zimmermann und Rickenmann, 1992), aus den Murenversuchen in Chemolgan (Rickenmann et al., 2003), aus China (Chen und Chuang, 2014) und aus Japan (Ikeda et al., 2019) herangezogen (Abbildung 12). Berücksichtigt man nur die Daten des Wildbach- und Lawinenkatasters, liegen fast alle dokumentierten Scheitelabflüsse unabhängig vom Murenvolumen unter der Anpassungsfunktion. Die Schweizer Ereignisse aus dem Jahr 1987 zeigen etwas höhere Scheitelwerte, während die Spitzenabflüsse aus den Murenversuchen von Chemolgan überwiegend unterhalb der Anpassungsfunktion rangieren. Die granularen Murenabflüsse aus Ikeda et al. (2019) streuen um die

Funktion, liegen aber speziell bei größeren Volumina deutlich über der empirischen Funktion. Bei den als „muddy“ klassifizierten Murenabflüssen zeigt sich ein anderes Bild, da die dokumentierten Abflüsse zumeist unter der Funktion liegen. Die vom Typ nicht definierten Abflüsse liegen alle auf oder über der Anpassungsfunktion.

Der Prozessfaktor stellt den Quotienten aus dem Murenabfluss zum hydrologischen Abfluss her (Gleichung 11) und kann mit Gleichung 19 geschätzt werden. Für den Murenabfluss wird Gleichung 13 verwendet, für den hydrologischen Abfluss Gleichung 10. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Gleichung 19 eine volumetrische Feststoffkonzentration von 0,7 unterstellt wird und der Gebietsfaktor (GF) für alpine

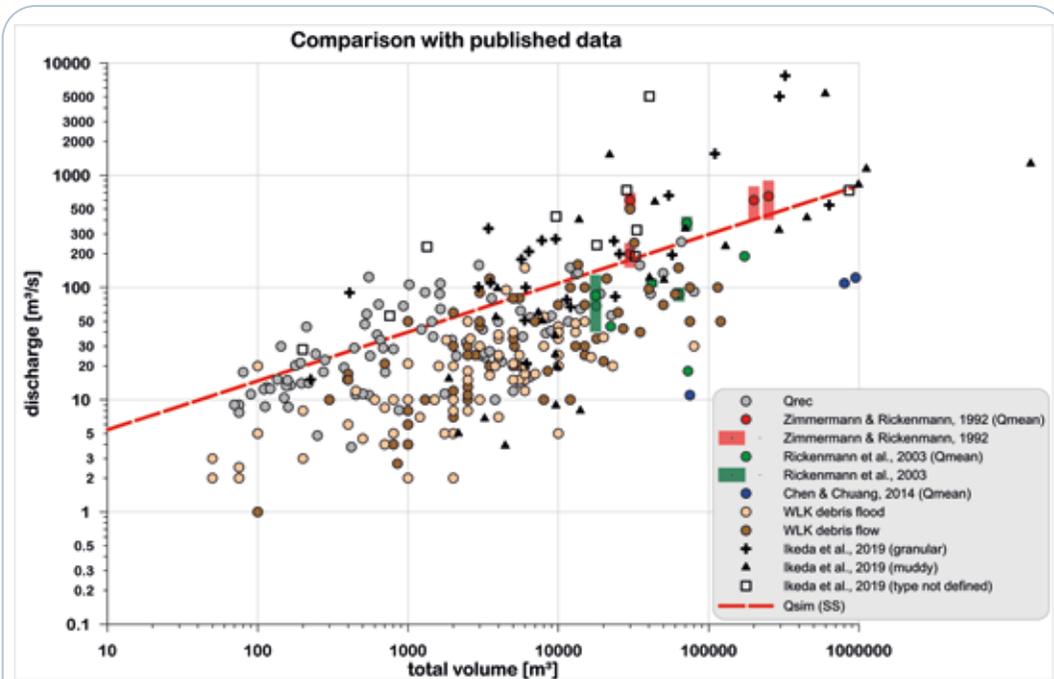


Abbildung 12: Plausibilisierung der vorgeschlagenen empirischen Anpassungsfunktion mit dokumentierten Ereignissen.

Figure 12: Verification of plausibility of the derived function with documented data of debris flows.

Einzugsgebiete zwischen 8 und 14 variieren kann. Beispielhaft ist der Verlauf des Prozessfaktors für einen Gebietsfaktor von 10 in Abbildung 13 dargestellt. Bei Kenntnis der Einzugsgebietsfläche und der Murenfracht kann der Prozessfaktor abgelesen werden. Wird dieser mit dem Reinwasserabfluss multipliziert erhält man den Spitzenabfluss eines Murganges (Gleichung 20).

$$PF = \frac{1,980 \cdot V_{MG}^{0,4355}}{GF \cdot A_E^{0,6}} \quad \text{Gl. (19)}$$

$$Q_{MG} = PF \cdot Q_{hydro} \quad \text{Gl. (20)}$$

Mit den durchgeführten Vereinfachungen lässt sich der Prozessfaktor für unterschiedliche Murenfrachten, Einzugsgebietsflächen und Gebietsfaktoren berechnen. Die Prozessfaktoren sind indirekt proportional zu den Gebietsfaktoren und den Flächen der Einzugsgebiete, sie nehmen jedoch mit Vergrößerung der Murenfracht bis auf das Zehnfache zu. Dieser Prozessfaktor kann nun entsprechend dem Leitfaden zur Festlegung und Harmonisierung von Bemessungsereignissen (BMLFUW, 2010) als Basiswert für den erforderlichen Intensitätsfaktor angesehen werden.

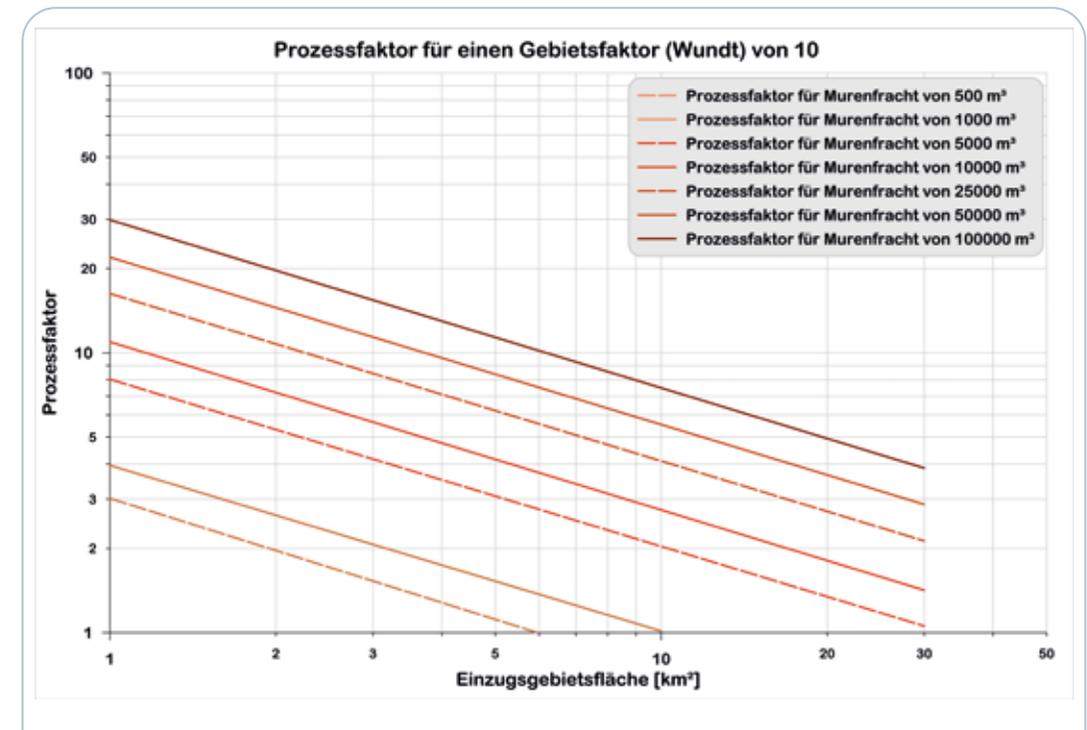


Abbildung 13: Prozessfaktor für einen Gebietsfaktor 10 nach Wundt für variable Murenfrachten und Einzugsgebietsgrößen.

Figure 13: Process factor calculated with a coefficient of 10 according to the Wundt-formula for different total volumes of debris flows and catchment areas.

## Diskussion und Ausblick

Das Verfahren ist zeitinvariant und linear, das bedeutet, dass das relative, zeitliche Verhalten des Abflusses unabhängig von der Größe der Murenfracht und der Abfluss direkt proportional zur Murenfracht ist. Eine Aussage über die Jährlichkeit des Abflusses kann mit diesem Verfahren nicht direkt getroffen werden, eine Abschätzung ist jedoch über die Magnitude des mobilisierbaren Geschiebes möglich.

Die visuelle zeitliche Abgrenzung der Murschübe ist mit einer Unsicherheit behaftet. Der Beginn des Ganglinienanstiegs ist noch relativ eindeutig festzulegen, der Zeitpunkt des Übergangs in den Basisabfluss ist aber zumeist nicht deutlich ausgeprägt. Die Geometrie der normalisierten Abflusshöhen und der gemessenen Murschübe passt prinzipiell sehr gut mit den Annahmen des DUH nach Kreps zusammen. Abweichungen ergeben sich natürlich bei zusammengesetzten Murschüben, da die einzelnen Wellen in einen Murschub zusammengefasst werden.

Die vereinfachte Annahme einer volumetrischen Feststoffkonzentration von 0,7 ist auf den Auswertungen von Messdaten zahlreicher Murschübe in der Gadria begründet.

Mit der gewählten Methodik kann prinzipiell nur ein Murschub berechnet werden, die Anzahl und deren zeitliche Verteilung wird nicht berücksichtigt. Wie die Analyse von Murgängen zeigt, setzen sich diese in den meisten Fällen aus mehreren Murschüben zusammen. Das bedeutet, dass das vorab bestimmte mobilisierbare Geschiebevolumen nicht als Gesamtes in einem Murschub abflusswirksam wird, sondern grundsätzlich auf mehrere Murschübe aufzuteilen ist. Die Berechnung der Spitzenabflüsse solcher Schübe wird in diesem Verfahren berücksichtigt, da im Gegensatz zu anderen empirischen Verfahren kleinere Murschüben relativ größere Abflüsse aufweisen.

Das hier vorgestellte Verfahren erlaubt eine nachvollziehbare Bestimmung von Spitzenabflüssen und Ganglinien von Muren auf Basis einer hydrologischen Methodik. Es beruht auf zahlreichen publizierten und gemessenen Datensätzen und ermöglicht durch die Bildung von Szenarien die Anpassung an die jeweiligen örtlichen Verhältnisse.

Eine ausführliche Beschreibung der Methodik, der verwendeten Eingangsdaten, der Ergebnisse als auch von Berechnungsbeispielen findet sich im IAN Report 215 (<https://boku.ac.at/baunat/ian/forschung/reports-forschungsberichte>).

### Anschrift des Verfassers/Author's address:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl  
Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Alpine Naturgefahren  
Peter Jordan Str. 82, 1190 Wien  
[johannes.huebl@boku.ac.at](mailto:johannes.huebl@boku.ac.at)

### Literatur/References:

- ARATTANO, M., FRANZI, L. (2003). On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. *Nat. Hazards and Earth System Sciences*, 3: 539-544.
- ARATTANO, M., FRANZI, L. (2004). Analysis of different water-sediment flow processes in a mountain torrent. *Nat. Hazards and Earth System Sciences*, 4: 783-791.
- BERGER, C., MCARDILL, B. W., SCHLUNEGGER, F. (2011). Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland. *Journal of geophysical research*, 116. F01002. doi:10.1029/2010JF001722.
- BMLFUW (2010). Leitfaden zur Festlegung und Harmonisierung von Bemessungsereignissen. <https://info.bmlrt.gv.at/themen/wasser/schutz-vor-hochwasser/richtlinien-leitfaeden/bemessungsereignisse.html>.
- CHEN, J. C., CHUANG, M. R. (2014). Discharge of landslide-induced debris flows: case studies of Typhoon Morakot in southern Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14: 1719-1730.
- COMITI, F., MARCHI, L., MACCONI, P., ARATTANO, M., BERTOLDI, G., BORGA, M., BRARDINONI, F., CAVALLI, M., D'AGOSTINO, V., PENNA, D., THEULE, J. (2014). A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadria basin. *Natural Hazards*, 73: 1175-1198. DOI 10.1007/s11069-014-1088-5.
- COVIELLO, V., THEULE, J., CREMA, ST., ARATTANO, M., COMITI, F., CAVALLI, M., LUCIA, A., MACCONI, P., MARCHI, L. (2021). Combining Instrumental Monitoring and High-Resolution Topography for Estimating Sediment Yield in a Debris-Flow Catchment. *Environmental and Engineering Geoscience*, 27 (1): 95-111. <https://doi.org/10.2113/EEG-D-20-00025>.

- COSTA, J. E. (1988). Floods from dam failures. in: Baker, V. R. et al. (eds.). *Flood Geomorphology*. John Wiley & Sons, New York: 439-463.
- FANG, X., KHANAL, P., THEODORE, C., DAVID, T., AND PRATISTHA, P. (2005). Revisit of NRCS unit hydrograph procedures. *Proceedings of the ASCE Texas Section Spring Meeting*, Austin, Texas.
- GENEVOIS, R., TECCA, P. R., BERTI, M., SIMONI, A. (2000). Debris flows in Dolomites: experimental data from a monitoring system. in: Wieczorek G. F. & Naeser, N. D. (eds.). *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Debris Flow Hazard and Mitigation - Mechanics, Prediction and Assessment*. Taipei, Taiwan, Aug. 16-18, 2000: 283-291. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- JITOUSONO, T., SHIMOKAWA, E., TSUCHIYA, S. (1996). Debris flow following the 1994 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia. *J. Jap. Soc. Erosion Control Engineering*, 48 (Special Issue): 109-116.
- HÜBL, J. (2018). Conceptual Framework for Sediment Management in Torrents. *Water*, 10: 1718. <https://doi.org/10.3390/w10121718>.
- IKEDA, A., MIZUYAMA, T., ITOH, T. (2019). Study of prediction methods of debris-flow peak discharge. *Proc. of the 7th Int. Conf. on Debris Flow Hazard and Mitigation - Mechanics, Prediction and Assessment*. Golden, Colorado.
- KEAN, J. W., STALEY, D. M., CANNON, S. H. (2011). In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research*, 116: F04019. doi:10.1029/2011JF002005.
- KREPS, H. (1957). Ein Versuch zur schematischen Berechnung von Hochwasser-Abflussfrachten. *Mitteilungsblätter des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 18.

- MARCHI, L., ARATTANO, M., DEGANUTTI, A. M. (2002). Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46 (1/2): 1-17.
- MIZUYAMA, T., KOBASHI, S., OU, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. *Proc. Int. Symposium Interpraevent*, Bern, Switzerland, 4: 99-108.
- OU, G., KOBASHI, S., MIZUYAMA, T. (1991). Prediction of Debris Flow Peak Discharge. *J. Jap. Soc. Erosion Control Engineering*, 44/4: 24-29.
- PIERSON, T. C., (1986). Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. in: Abrahms, A. D., Allen & Unwin (eds.): 269-296. *Hillslope Processes*, Boston.
- RICKENMANN, D.; WEBER, D., STEPANOV, B. (2003). Erosion by debris flow in field and laboratory experiments. in: Rickenmann, D., Chen, L.-C. (eds.). *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Debris Flow Hazard and Mitigation - Mechanics, Prediction and Assessment*: 883-893. Rotterdam, Millpress.
- WUNDT, W. (1953). *Gewässerkunde*. Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- ZANUTTIGH, B., LAMBERTI, A. (2007). Instability and surge development in debris flows. *Review of Geophysics*, 45: RG3006, doi:10.1029/2005RG000175.
- ZIMMERMANN, M., RICKENMANN, D. (1992). Beurteilung von Murgängen in der Schweiz: Meteorologische Ursachen und charakteristische Parameter zum Ablauf. *Proc. Int. Symposium Interpraevent*, Bern, Switzerland, 2: 153-163.

## INGENIEURBÜRO FÜR NATURGEFAHRENMANAGEMENT

Analysen  
Planungen  
Baubegleitung  
Beratung und Gutachten



DI Meinrad Cuggenbichler-Str. 2/2  
5310 Mondsee  
T: +43 660 3624341  
E: christoph@skolaut.at  
[www.skolaut.at](http://www.skolaut.at)

## Hauptbeiträge zu anderen Themen

Lukas Kozłowski, Markus Moser, Roland Kaitna:  
**Berücksichtigung der Kurvenüberhöhung von murartigen  
Fließprozessen und Murgängen in der Gefahrenzonenplanung**

Seite 150

Matthias Schlögl, Micha Heiser, Christian Scheidl, Sven Fuchs:  
**Entwicklung der Wildbachereignisse in Österreich:  
Schäden als Ergebnis einer Kombination aus Klimawandel,  
Exposition und Verbauungsmaßnahmen**

Seite 160

Christian Pürstinger, Christoph Lainer:  
**Einrichtung eines Modelleinzugsgebietes: Der Rindbach in Oberösterreich**

Seite 176

Ursula Stephan, Wolfram Bitterlich:  
**Wildbachbuhnen als Ursache eines  
dynamischen Wellenbildes in Wildbachunterläufen**

Seite 188

LUKAS KOZLOWSKI, MARKUS MOSER, ROLAND KAITNA

## Berücksichtigung der Kurvenüberhöhung von murartigen Fließprozessen und Murgängen in der Gefahrenzonenplanung

### *Consideration of the superelevation of debris floods and debris flows in hazard zone planning*

#### Zusammenfassung:

Murgänge und murartige Feststofftransporte sind schnell fließende Massenströme und stellen eine Gefahr für die Bevölkerung und deren Infrastruktur dar. Um Murgänge richtig beurteilen zu können, braucht es Informationen über ihre Eigenschaften und ihr Fließverhalten. Die Fließgeschwindigkeit von Murgängen und murartigen Feststofftransporten kann üblicherweise aus vergangenen Ereignissen rückgerechnet werden. Ein gängiger Ansatz dafür ist die sogenannte „forced-vortex“ Gleichung. Diese berechnet die Fließgeschwindigkeit anhand der Kurvenüberhöhung und morphometrischen Parametern, sowie eines zu definierenden Korrekturfaktors. Diese Parameter sind in der Natur sehr schwierig zu bestimmen, viele Annahmen (besonders der Korrekturfaktor  $k$ ) müssen getroffen werden. Zur besseren Bestimmung der Kurvenüberhöhung soll auf der Basis von Rückrechnungen gut dokumentierter Murgänge ein Leitfaden erarbeitet werden, um sowohl die Kurvenüberhöhung in der Gefahrenzonenplanung fundiert berücksichtigen zu können, als auch eine Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten zu schaffen.

#### Stichwörter:

Murgang,  
Kurvenüberhöhung,  
Fließgeschwindigkeit,  
Gefahrenzonenplanung

#### Abstract:

*Debris flows and debris floods are rapid moving mass flows and represent a threat to the population and the infrastructure. In order to assess debris flows, information about their properties and flow behaviour is required. The flow velocity of debris flows is commonly back-calculated from past events. The forced-vortex equation is often used to estimate the velocity of debris flows. It is based on the radii of curvature and morphometric parameters. Based on the knowledge, a guideline is being created to consider superelevation in hazard zone planning and as a foundation for future research.*

#### Keywords:

*Debris flows, superelevation, flow velocity, hazard zone planning*

#### Einleitung

Als Murgang wird ein langsam bis schnell abfließendes breiartiges Gemisch von Wasser und Feststoffen bezeichnet. Die Beobachtbarkeit von Murgängen ist in der Regel schwierig, da sie selten und spontan auftreten. Um ihre Gefährdung richtig beurteilen zu können, braucht es Wissen über ihre Eigenschaften und ihr Fließverhalten. Dynamische Variablen, wie die Fließgeschwindigkeit und Fließhöhe (auch Kurvenüberhöhung) eines Erdbebens oder Murganges, spielen eine entscheidende Rolle beim Naturgefahrenmanagement.

Wenn keine Messungen möglich sind, bilden Anschlagmarken nach einem Mureignis eine gute Wahl (sogenannte Stumme Zeugen), um Rückschlüsse auf die Prozesse und den Ereignisablauf ziehen zu können. Die Berechnung der Fließgeschwindigkeit kann anhand von Überhöhungsmaßen ermittelt werden.

#### Fragestellung und Zielsetzung

Allgemein sollen im Zuge dieser Arbeit murartige Fließprozesse und Murgänge mit Kurvenüberhöhung untersucht werden. Für unterschiedliche geologische Wildbacheinzugsgebiete wird die Methode der Kurvenüberhöhung bzw. die Anwendbarkeit der „forced-vortex“ Gleichung angewandt, um die Praxistauglichkeit zu testen. Ziel dieser Arbeit ist es, die Erkenntnisse aus der Literatur mit Feldbeobachtungen, -messungen und Berechnungen zusammenzuführen. Die Untersuchung von Kurvenüberhöhungen aus Naturdaten soll zu einem besseren Verständnis und zur Ermittlung bzw. Definition der notwen-

digen Parameter bei der Anwendung der „forced-vortex“ Gleichung beitragen.

Die Fragestellung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Welche Zusammenhänge gibt es zwischen beobachteten Kurvenüberhöhungen und morphometrischen Parametern des Einzugsgebietes und des Gerinnes?
- Welchen Zusammenhang gibt es zwischen beobachteten Kurvenüberhöhungen und ereignisbezogenen Kennwerten?

#### Projekttablauf

Die für diese Arbeit verwendeten Ereignisse beziehen sich auf 12 Mureignisse in Kärnten und Salzburg. Zentrales Grundelement der Ereignisdaten ist der digitale Ereigniskataster der Wildbach- und Lawinerverbauung.

#### Ereignisbezogene Daten

Die Erhebung der Murgangvolumina erfolgt durch die Bilanzierung des erodierten und abgelagerten Materials. Für die in dieser Studie analysierten Ereignisse fehlen Informationen über gemessene Spitzenabflüsse zur Gänze. Die Ermittlung der Spitzenabflüsse erfolgt anhand eines empirischen Ansatzes nach RICKENMANN (1999).

#### Bestimmung morphometrischer Parameter im Einzugsgebiet und im Gerinne

Ein einfach zu bestimmender Parameter ist die sogenannte Melton-Zahl. Die Melton-Zahl beschreibt die spezifische Höhendifferenz des Einzugsgebietes bezogen auf die Quadratwurzel der

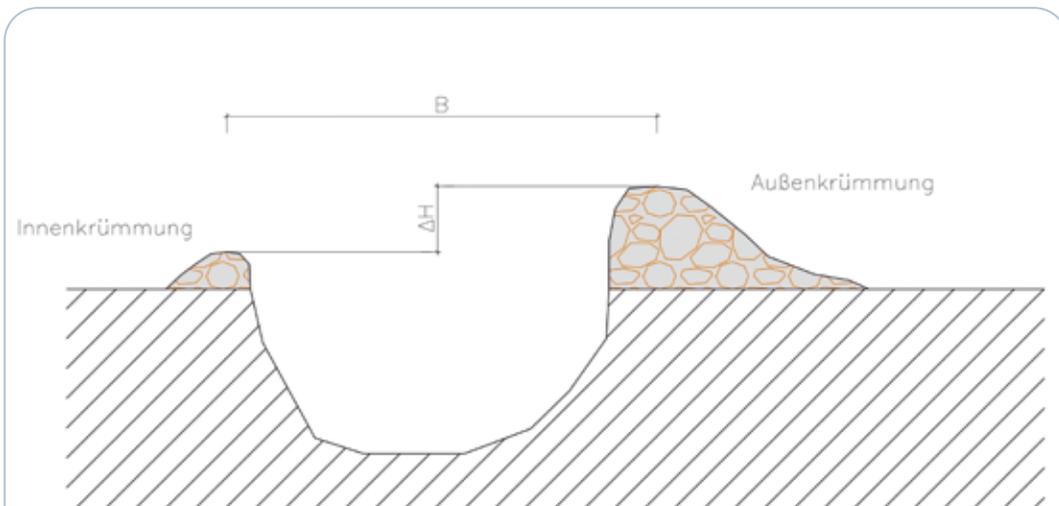


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer typischen Kurvenüberhöhung, Blick in Fließrichtung; B...Fließbreite,  $\Delta H$ ... Kurvenüberhöhung

Figure 1: schematic illustration of a typical superelevation, view in flow direction; B... flow width,  $\Delta H$ ...superelevation

Einzugsgebietsfläche. Eine grobe Klassifizierung zwischen den Leitprozessen murartiger Feststofftransport und Murgang kann aufgrund der Gegenüberstellung Melton-Zahl und mittlerer Gerinneneigung am Wildbachkegel getroffen werden. Die mittlere Gerinneneigung in den Bereichen der Kurvenüberhöhung (100 m bachaufwärts und 100 m bachabwärts) wird über das Verhältnis der Höhendifferenz zur Länge des Abschnittes errechnet. Zusätzlich wurde in den Abschnitten der Kurvenüberhöhung die Sinuosität, auch als Laufentwicklung bezeichnet, ermittelt. Die Erhebung der Gerinnebreite erfolgt anhand einer einfachen Profilaufnahme nach dem ingenieurmäßigen Ansatz mittels Maßband oder Laserdistanzmesser.

#### Bestimmung Kurvenüberhöhung und Radius

Die Zentrifugalkraft steht im Zusammenhang mit der Gerinnegeometrie und die Strömungsdynamik in pendelförmigen Gerinnen führt zu einer höheren Fließhöhe entlang der Außenkurve im Ver-

gleich zur Innenkurve. Der Unterschied zwischen diesen Fließhöhen wird als Kurvenüberhöhung (eng. superelevation) definiert. Im Allgemeinen wird die Überhöhung als die positive Differenz der erhöhten Ablagerungen der fließenden Masse zwischen der äußeren Krümmung und der inneren Krümmung definiert.

Die „forced-vortex“ Gleichung ermittelt die maximale Fließgeschwindigkeit als Funktion vom Verhältnis Kurvenradius zu Gerinnebreite, dem Korrekturfaktor  $k$ , der Überhöhung und der Neigung. MEARS (1981) war der erste, der die Überhöhungsmaße für Schneelawinen anwendete. Um die mittlere Murgeschwindigkeit  $v_{df}$  genauer abschätzen zu können, leitete SCHEIDL et al. (2014) eine einfache Modellgleichung ab. Sie lautet wie folgt:

$$v_{df} = \left( \frac{R_c g^* \Delta h}{Bk} \right)^{0,5} \quad \text{Gl. (1)}$$

In Gleichung 1 bezeichnet  $R_c$  den zentralen Kurvenradius [m],  $g^*$  die normal auf die schiefe Ober-



Abbildung 2: Darstellung der Eingangsparameter der „forced-vortex“ Gleichung am Beispiel Ofnergraben (Gem. Muhr); (B)... Fließbreite, R...Radius,  $\theta$ ...Gerinneneigung,  $\beta$ ...Überhöhungswinkel,  $g$ ...Erdbeschleunigung;

Figure 2: A graphic account of the input parameters for the „forced-vortex“ equation according to Ofnergraben (com Muhr); (B)... flow width, R...radius,  $\theta$ ...channel slope,  $\beta$ ...superelevation angle,  $g$ ...acceleration of gravity;

fläche projizierte Erdbeschleunigung ( $g \times \cos \theta$ ) und B die Fließbreite [m] an der Stelle der Kurvenüberhöhung  $\Delta h$  [m]. Der Korrekturfaktor  $k$  entspricht einem dimensionslosen empirischen Wert zur Charakterisierung des Fließverhaltens eines Murganges (z.B. nach SCHEIDL et al., 2014, BULMER et al., 2002)

Die Bestimmung der Kurvenradien erfolgt nach dem 3-Punkt Verfahren (PROCHASKA et al., 2008). Grundsätzlich handelt es sich hierbei um ein Annäherungsverfahren. Der Gerinneverlauf

wird mit Hilfe einer Geoinformationssoftware auf eine topographische Karte (Auflösung 1 x 1 m) projiziert. Am Punkt der stärksten Krümmung werden Punktsätze (30 m, 60 m und 90 m) bachauf- und bachabwärts aufgetragen. Die Radien werden an den Kreisbögen gemessen, die an den Punktsätzen angepasst wurden. Der maßgebende Kurvenradius wird nach Homogenität der Kurve festgelegt, d.h. die Übereinstimmung der Punktsätze mit dem natürlichen Gerinneverlauf.



Abbildung 3: Übersicht des Gerinneabschnittes am Beispiel Nothdorfergraben für die Auswertung der Kurvenüberhöhung. Die Bestimmung der Kurvenradien basieren auf dem 3-Punktverfahren nach PROCHASKA et al. (2008).

Figure 3: Overview of the channel section using the example of Nothdorfergraben for the evaluation of the superelevation. The determination of the radius is based on the 3-point method according to PROCHASKA et al. (2008).

## Resultate

### Zusammenhang Melton-Zahl mit der Kurvenüberhöhung

Die Hälfte der ausgewählten Ereignisse entspricht einem Murgang. Jene Werte die im Übergangsbereich B liegen, sind aufgrund ihrer Tendenz zur Zone C, einem murartigen Feststofftransport zuzuordnen (Abbildung 4 oben).

Die Steigung der Regressionsgerade zeigt, dass mit zunehmender Melton-Zahl der Wert der Kurvenüberhöhung abnimmt. Das bedeutet in weiterer Folge, dass auf Basis der Klassifizierung nach

BARDOU (2002) der Prozess Murgang tendenziell eine geringere Kurvenüberhöhung als ein fluvialer Prozess aufweist. Es ist allerdings zu beachten, dass Murgänge sehr heterogene Mischungen von Sediment und Wasser sind und keine Informationen über die Materialzusammensetzung in die Ermittlung der Melton-Zahl eingehen. Der Einfluss der Materialzusammensetzung darf jedoch nicht vernachlässigt werden. Wie in zahlreichen Studien (BARDOU, 2002; SCHEIDL & RICKENMANN, 2010) publiziert, dient die Melton-Zahl (Me-Zahl) lediglich als Kenngröße zur Unterscheidung der dominanten Leitprozesse in Wildbacheinzugsgebieten und sollte nicht zur Abschätzung der Kurvenüberhöhung herangezogen werden.

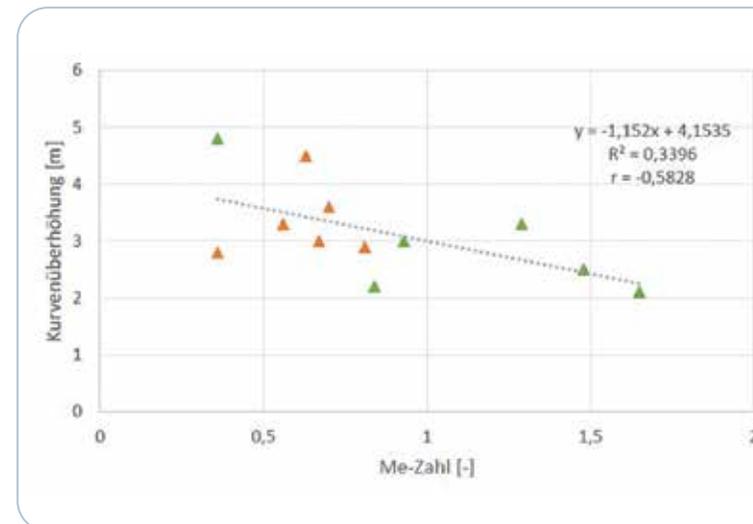
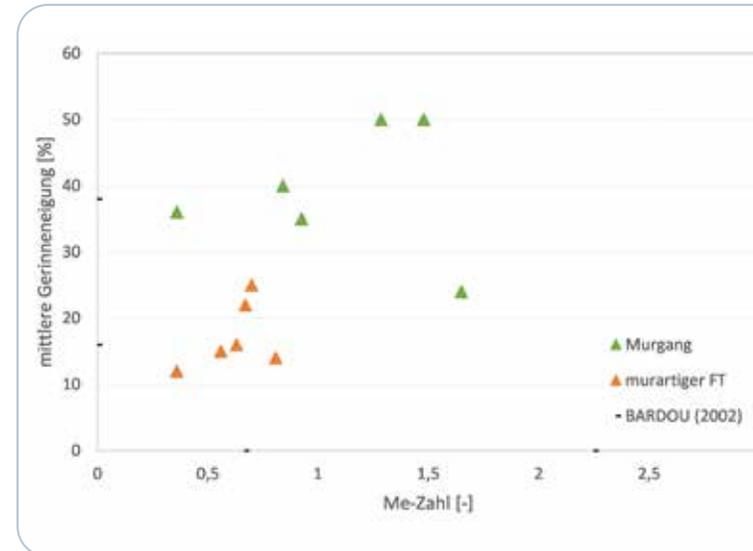


Abbildung 4: oben: Zusammenhang der mittleren Gerinneneigung und der Melton-Zahl für die ausgewählten Ereignisse. Dargestellt sind auch die Bereiche nach BARDOU (2002): Bereich A, fluvialer Feststofftransport, Bereich C vorwiegend Murgang und Bereich B als Übergangsbereich; unten: Zusammenhang zwischen der Melton Zahl (Me-Zahl) und der Kurvenüberhöhung  $\Delta h$  [m]

Figure 4: above: Relation between the mean channel slope and the Melton number for selected events. The areas according to BARDOU (2002) are also shown: area A, fluvial solid transport, area C debris flow and area B as a transition area; below: Relationship between the Melton number (Me number) and superelevation  $\Delta h$  [m]

### Verhältnis Kurvenüberhöhung mit Kurvenradius zu Gerinnebreite (R/B-Wert)

Im Vergleich zu den zuvor genannten Parametern, besteht zwischen der Kurvenüberhöhung und der Verhältniszahl Kurvenradius [R] zu Gerinnebreite [B] (R/B-Wert) ein positiver Zusammenhang. Das bedeutet, dass je höher der berechnete R/B-Wert, desto höher die beobachtete Kurvenüberhöhung.

Geht man von einem konstanten Kurvenradius aus und erhöht die Gerinnebreite, so nimmt der R/B-Wert ab. Demzufolge nimmt ebenso die Kurvenüberhöhung ab. Im Gegensatz dazu, kann von einer höheren Kurvenüberhöhung bei Reduzierung der Gerinnebreite ausgegangen werden. Im Allgemeinen gilt also, dass die Gerinnebreite einen signifikanten Einfluss auf die Kurvenüberhöhung hat.

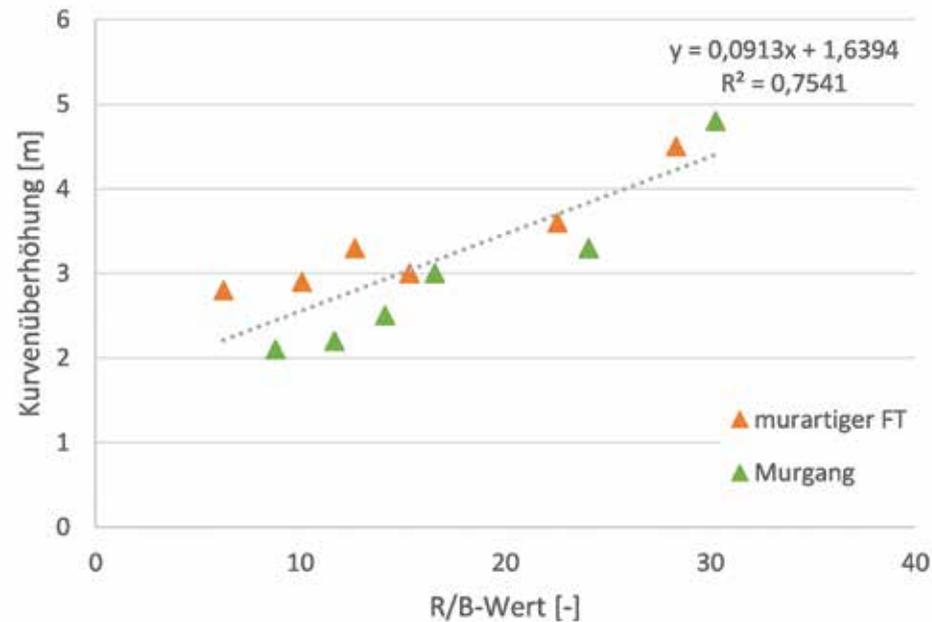


Abbildung 5: Gegenüberstellung Kurvenüberhöhung mit dem R/B-Wert

Figure 5: Comparison superelevation with the R/B-rate

Dies bedeutet in weiterer Folge, dass ein angereicherter Murgang mit konstantem Volumen in einem „kleineren“ Wildbach (geringe Gerinnebreite und steile Gerinneneigung) eine höhere Kurvenüberhöhung erzeugt. Ein möglicher Grund ist die geringere Querschnittsfläche, welche der Murgang durchfließt.

In Bezug auf die Gerinnehydraulik ist der R/B-Wert ein wesentlicher Faktor für die Energieverluste. Diese stellen sich aufgrund von sohnlahen Sekundärströmungen ein, indem das Sediment zur Innenkurve transportiert wird. Demzufolge treten an der Außenkurve die Geschwindigkeitsmaxima auf.

#### Zusammenhang R/B-Wert mit dem Murgangsvolumen

Einen weiteren positiven Trend liefert die Gegenüberstellung des Murgangsvolumens mit dem R/B-Wert. Da mit steigendem Murgangsvolumen und steigendem R/B-Wert die Kurvenüberhöhung zunimmt, kann davon ausgegangen werden, dass mit zunehmenden Murgangsvolumen auch das Verhältnis Kurvenradius zu Gerinnebreite steigt.

Dieser aufschlussreiche Zusammenhang ist insofern interessant, weil der R/B-Wert ein rein morphometrischer Parameter ist. Aufgrund dessen kann anhand topografischer Gegebenheiten möglicherweise eine Eingrenzung des Volumens vorgenommen werden. Aussagekräftiger ist jedoch

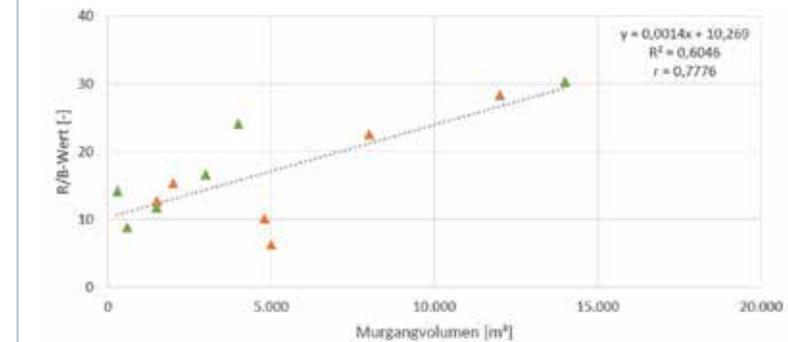


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Murgangsvolumen und R/B-Wert; orange...murartiger Feststofftransport, grün...Murgang

Figure 6: Relation between debris flow volume and R/B-rate; orange...debris flow, green...debris flow

die umgekehrte Interpretation, welche anhand eines abgeschätzten Murgangsvolumens den Wertebereich eines R/B-Wertes eingrenzen soll. Auf dieser Basis könnte schlussendlich eine Kurvenüberhöhung angeschätzt werden.

#### Empfehlung für die Praxis zur Abschätzung der Kurvenüberhöhung in der Gefahrenzonenplanung

##### Orthofotokarte und Laserscan

- Beurteilung und Verortung von möglichen Ausbruchsstellen von murartigen Feststofftransportprozessen und Murgängen (z.B.: Kurvenphänomene am Schwemmkegel)
- Aufnahme von Längsneigungen, Gerinnebreiten und Kurvenradien mit einfachem ingenieurmäßigem Ansatz (Distanzmesser, Maßband)

##### Geländeerhebung

- Begehung des gesamten Einzugsgebietes
- Quantifizierung des Geschiebepotentials je Homogenabschnitt (Geschiebefracht-diagramm)
  - Kartierung von Auftrags- und Abtragsprozessen (punktueller Einträge)

- Korngrößenanalyse
- Ermittlung des Wildholzanteiles und Stellen möglicher Verklausungen
- **Detaillierhebungen im Bereich der Kurven mit der Erhebung folgender Parameter:**
  - \* Sohlbreite am Punkt der maximalen Krümmung
  - \* Mittlere Gerinneneigung im Bereich 100 m bachabwärts und 100 m bachaufwärts
  - \* Abschätzen des maßgebenden Wildbachprozesses lt. ONR 24800 im Abschnitt der Kurvenüberhöhung

##### Dokumentation der Geländeerhebung

- Begehungsprotokoll, Fotodokumentation

##### Auswertung der Grundlagen- und Geländedaten

- Quantifizierung des Geschiebepotentials und -fracht im Bemessungsereignis
- Definition des maßgebenden Wildbachprozesses nach ONR 24800
- Eingrenzung des Gefahrenbereiches unter Berücksichtigung einer Kurvenüberhöhung

## Berechnung der Kurvenüberhöhung

- Ermittlung des Kurvenradius  $R_c$  mithilfe des 3-Punkt Verfahrens
- Abschätzung möglicher Kurvenüberhöhung in kritischen Kurven/Abschnitten unter Berücksichtigung verschiedener Zusammenhänge wie Topographie und Fließgeschwindigkeit:

- \* **Topographie:** Abschätzung über Korrelation R/B und Kurvenüberhöhung

$$KH = 0,1 \frac{R}{B} + 1,6 \quad \text{Gl. (2)}$$

- \* Geschwindigkeit: bei plausibler Abschätzung der Geschwindigkeit (RICKENMANN, 1999) anhand der forced-vortex Gleichung

$$\Delta h = \frac{k * bv^2}{R_c g} \quad \text{Gl. (3)}$$

- \* Abschätzen des Korrekturkoeffizienten  $k$ , z. B. nach SCHEIDL et al. (2014)  $1 < k > 5$  oder nach BULMER et al. (2002)  $2 < k > 10$

## Schlussfolgerung

Unter den in dieser Arbeit analysierten Beziehungen ist die Auswertung der morphometrischen Parameter wie Sinuosität und Melton Zahl für diese Fragestellung nur bedingt aussagekräftig, wohingegen die Auswertung des Verhältnisses Kurvenradius zu Gerinnebreite („R/B-Wert“) eine hohe Korrelation mit der Kurvenüberhöhung zeigte. Ein ähnlicher Zusammenhang wurde mit dem Murgangvolumen gefunden, die Bestimmung eines solchen Volumens in der Praxis jedoch eine hohe Bandbreite aufweist. Deshalb ist für die praktische Anwendung grundsätzlich festzuhalten, dass die Bestimmung des Murgangsvolumens nicht aus der

Interpretation einer beobachteten Kurvenüberhöhung erfolgen sollte.

Wichtiger Anhaltspunkt für die Praxis ist die Korrelation der Kurvenüberhöhung mit der Gerinnegeometrie, da die dafür notwendigen Parameter im Felde gut zu messen und die Kennzahl R/B dimensionslos ist. Geht man von einem konstanten Kurvenradius aus und erhöht die Gerinnebreite, so nimmt der R/B-Wert ab. Demzufolge nimmt ebenso die Kurvenüberhöhung ab. Im Gegensatz dazu, kann von einer höheren Kurvenüberhöhung bei Reduzierung der Gerinnebreite ausgegangen werden. Im Allgemeinen gilt also, dass die Gerinnebreite einen signifikanten Einfluss auf die Kurvenüberhöhung hat, in Abbildung 5 wird dies durch einen starken Zusammenhang ( $r > 0,75$ ) bestätigt.

Die in dieser Arbeit ermittelte Formel bezieht sich auf gut dokumentierte Ereignisse mit R/B-Werten zwischen 6 und 30 und daraus folgenden Kurvenüberhöhungen zwischen 2,1 und 4,8 m. Das Sohlgefälle liegt für murartige Feststofftransportprozesse zwischen 12–22 % und für Murgänge zwischen 24–50 %.

Mit der im Zuge dieser Arbeit vorgestellten Formel (Gl.2) kann mit einfachen Parametern [Fließbreite, Kurvenradius, Längsgefälle] eine erste Abschätzung über die Höhe von Kurvenüberhöhungen getroffen werden. Nützlich ist die Kenntnis der Kurvenüberhöhung in der Sachverständigentätigkeit, Gefahrenzonenabgrenzung sowie Maßnahmenplanung. Zur Weiterentwicklung der Ansätze für eine bessere Berechnung oder Abschätzung ist einerseits eine gute Ereignisdokumentation mit der Aufnahme der wichtigen Kenndaten und beobachteten Phänomene und andererseits auch eine vermehrte Anwendung möglicher Berechnungsmethoden in der Praxis wichtig. Die Erkenntnisse und Berechnungen aus der Praxis liefern dann auch weitere Inputs für die Wissenschaft und Forschung.

## Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Lukas Kozłowski  
Wildbach- und Lawinenverbauung  
Gebietsbauleitung Lungau  
Johann Löcker Straße 3, 5580 Tamsweg  
lukas.kozłowski@die-wildbach.at

DI Markus Moser  
Fachbereich Wildbachprozesse  
Gebietsbauleitung Lungau  
Johann Löcker Straße 3, 5580 Tamsweg  
Markus.moser@die-wildbach.at

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna  
Universität für Bodenkultur Wien  
Institut für Alpine Naturgefahren  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
Roland.kaitna@boku.ac.at

## Literatur/References:

- BULMER, M.H., BARNOUIN-JHA, O.S., PEITERSON, M.N und BOURKE, M. (2002):  
An empirical approach to studying debris flows: implications for planetary modeling studies. *Journal of Geophysical Research*; 107: S. 9-1 – 9-14.
- BARDOU, E. (2002):  
Methodologie de diagnostic et prevision des laves torentielles surun basin versant alpin: These no. 2479. Dissertation, Ecole Polytechnique Federale Lausanne.
- HUNGR, O.; MORGAN, G. C. and KELLERHALS, R. (1984):  
Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Can. Geotech. Journal* 21, S. 663-677.
- MEARS, A. I. (1981):  
Design Criteria for Avalanche Control Structures in the Runout Zone. General Technical Report RM-84. S. 1 – 28.
- PROCHASKA, A. B; SANTI, P. M.; HIGGINS, J. D. und CANNON, S. H. (2008):  
A study of methods to estimate debris flow velocity. *Landslides* 5, S. 431-444.
- RICKENMANN, D. (1999):  
Empirical Relationships for Debris Flows. In: *Natural Hazards* 19, S. 47 – 77.
- RICKENMANN, D. und SCHEIDL, C. (2010):  
Modelle zur Abschätzung des Ablagerungsverhaltens von Murgängen. *Wasser Energie Luft – 102. Jahrgang. Heft 1, Baden (Schweiz)*. S. 17 – 26.
- SCHEIDL, C.; McARDELL, B. W. and RICKENMANN, D. (2014):  
Debris-flow velocities and superelevation in a curved laboratory channel. *Can. Geotech. Journal* 52, S. 305-317.



**MATTHIAS SCHLÖGL\*, MICHA HEISER\*, CHRISTIAN SCHEIDL, SVEN FUCHS**

## Entwicklung der Wildbachereignisse in Österreich: Schäden als Ergebnis einer Kombination aus Klimawandel, Exposition und Verbauungsmaßnahmen

### **Zusammenfassung:**

In den letzten Dekaden haben Schäden durch Wildbachereignisse in Österreich zugenommen. Auswirkungen des Klimawandels und eine dynamische Siedlungsentwicklung werden als Ursachen angenommen, die – ebenso wie der mögliche Einfluss von Verbauungsmaßnahmen auf die Schadensdynamik – jedoch bislang kaum umfassend untersucht wurden. Wir sind der Frage nach den Ursachen für Wildbachschäden auf Grundlage des Ereigniskatasters der WLV nachgegangen (12.000 dokumentierte Ereignisse im Zeitraum 1962–2017), ergänzt um eine Auswertung des Schutzbautenkatasters (120.000 Schutzbauwerke), eine Analyse des Gebäudebestands und unter Berücksichtigung von verschiedenen Klimaindizes zu den prozessauslösenden Bedingungen. Während die Indizes für auslösende Niederschläge und die Anzahl der exponierten Gebäude stetig zunahmen, zeigten Häufigkeit, Ausmaß und Saisonalität der schadenverursachenden Wildbachereignisse keine klaren Trends. Dieser scheinbare Widerspruch wird auf eine kompensatorische Wirkung der zunehmenden Anzahl von technischen Schutzbauten zurückgeführt. Die Aufrechterhaltung dieser Strukturen ist daher von großer Bedeutung, um den künftigen Auswirkungen des Klimawandels auf das Ausmaß und die Häufigkeit von Ereignissen, sowie der zunehmenden Nachfrage nach Bauland in gefährdeten Gebieten entgegenzuwirken.

### **Stichwörter:**

Wildbach, Klimawandel,  
Exposition, Schutzmaßnahmen,  
Dynamik, Ostalpen

*\* Beide Autoren  
trugen gleichermaßen  
zu dieser Studie bei.*

## *Trends in torrential events in Austria: Damages resulting from a combination of climate change, exposure and mitigation measures*

### **Abstract:**

*In recent decades, the damage caused by torrents has increased in Austria. Effects of the climate change and a dynamic settlement development are assumed to be root causes, which, combined with a possible influence of mitigation measures, have hardly been investigated comprehensively so far. We studied the causes of torrential damage on the basis of the WLV event register (12,000 documented events in the period 1962–2017), supplemented by an evaluation of the protective structures register (120,000 protective structures), an analysis of the building stock, and considering multiple climate indices on the process-triggering conditions. While the indices of triggering precipitation and the number of exposed buildings increased steadily, the frequency, magnitude, and seasonality of damage-causing torrent events showed no clear trends. This apparent contradiction is attributed to a compensatory effect of the increasing number of technical mitigation structures. The maintenance of these structures is of great importance to counteract the future effects of climate change on the magnitude and frequency of events, as well as the increasing demand for building land in exposed areas.*

### **Keywords:**

*Torrential hazards,  
climate change,  
exposition, mitigation measures,  
dynamics, Eastern Alps*

## Einleitung

Wie die Ereignisse in der jüngeren Vergangenheit auch in der öffentlichen Wahrnehmung dramatisch vor Augen führen, nehmen Hochwasserschäden in ganz Europa zu. Während eine beträchtliche Anzahl von Studien zu Überschwemmungen entlang großer europäischer Flüsse vorliegt (DI Baldassarre et al. 2018), gibt es bislang de facto aber keine Untersuchungen der Beziehungen zwischen der Auftretenshäufigkeit von Wildbachereignissen in Gebirgseinzugsgebieten, der Exposition von Gebäuden und der Entwicklung technischer Schutzmaßnahmen (Schlögl et al. 2021).

Wir definieren Wildbäche als konstant oder temporär fließende Gewässer mit stark wechselnden Abflüssen und intermittierenden Strömungsverhältnissen, die in kleinen und steilen Gebirgseinzugsgebieten entstehen (Austrian Standards Institute 2009). Im Allgemeinen sind diese Prozesse durch stark schwankenden Sedimenttransport sowie durch das Vorhandensein von nicht-newtonschen Strömungen gekennzeichnet, wobei das Geschiebe einen wesentlichen Teil der Gesamtfracht ausmacht (Church and Jakob 2020). Trotz ihrer Unterschiede in Bezug auf den Zeitpunkt des Auftretens, die Dauer, die Magnitude und die Frequenz umfassen Wildbachereignisse eine Vielzahl verschiedener Prozesse, die sich durch die Sedimentkonzentration (Costa 1984) oder den Spitzenabfluss (Hungri et al. 2014) unterscheiden lassen. Zu diesen Prozessen gehören fluvialer Sedimenttransport, Murgänge und murartige Prozesse. Mit Blick auf die europäischen Gebirgsregionen wurde eine allgemeine Zunahme der Schäden durch diese Prozesse festgestellt (Rickenmann 2016), und die jährlichen Schäden wurden für den Ostalpenraum auf 200 bis 300 Millionen Euro geschätzt (Andres and

Badoux 2019; Fuchs et al. 2013; Zorn and Komac 2011). Die Zunahme der Schäden werden auf die Auswirkungen des Klimawandels zurückgeführt (Keiler et al. 2010), die zu veränderten Umweltbedingungen in Gebirgseinzugsgebieten führen und sich auf das Ausmaß und die Häufigkeit von Wildbachereignissen (Heiser et al. 2019; Klein et al. 2019), sowie auf die Bevölkerungsdynamik und die wirtschaftliche Entwicklung (Fuchs et al. 2015; Fuchs et al. 2017) auswirken.

Detaillierte Untersuchungen, die diese Ursachen bestätigen und die zugrunde liegende Schadensdynamik erklären, liegen jedoch bislang nur lückenhaft vor (Fuchs et al. 2019; Huggel et al. 2019; Stäubli et al. 2018). Vertiefende Aussagen waren zudem nicht möglich, da bestehende Zeitreihen dokumentierter Ereignisse entweder nur einen relativ kurzen Zeitraum mit unzureichender Datenqualität umfassen, oder nur einen lokalen Bezug haben und damit die Übertragbarkeit auf eine größere Region nicht möglich war (Fuchs et al. 2015; Heiser et al. 2019). Einige Studien konzentrierten sich auf andere Regionen der europäischen Alpen. So wurde für die französischen Alpen ein positiver jährlicher Trend der Murgangaktivität seit den 1980er Jahren festgestellt, basierend auf einer Zusammenstellung von 565 Murgangereignissen in 237 Einzugsgebieten zwischen 1970 und 2005 (Pavlova et al. 2014). Für die Region Zermatt in den Schweizer Alpen wurden auf dendrochronologischer Grundlage 296 Murgangereignisse in acht hoch gelegenen Einzugsgebieten identifiziert, wobei jedoch kein signifikanter jährlicher Anstieg zu verzeichnen war (Bollschweiler and Stoffel 2010). Seit den 1860er Jahren wurden jedoch saisonale Verschiebungen der Murganghäufigkeit beobachtet. Eine weitere Analyse von Murgangereignissen, die sich auf das Periglazial in den französischen, italienischen und schweizerischen Alpen konzentriert,

kommt zu dem Schluss, dass die beobachtete allgemeine Zunahme von Ausmaß und Häufigkeit der Prozesse hauptsächlich auf die Auswirkungen des Klimawandels zurückgeführt werden kann (Stoffel et al. 2014). Derartige lokale Studien sind jedoch weder auf eine größere Region noch auf die österreichischen Alpen übertragbar, da (i) das Klima im Vergleich zum westlichen Alpenraum weniger ausgeglichen ist und es weniger Gletscher- oder Permafrostgebiete gibt, (ii) aufgrund der unterschiedlichen Besiedlungsgeschichte andere Expositionsmuster bestehen und (iii) es technische Schutzmaßnahmen gibt, die die Häufigkeit und das Ausmaß von Wildbachereignissen und damit verbundenen Schäden beeinflussen.

Insbesondere die Frage, ob die Schadensdynamik auf die Auswirkungen des Klimawandels, die veränderte Exposition oder die Umsetzung von technischen Schutzmaßnahmen (oder eine Kombination dieser Faktoren) zurückzuführen ist, ist nach wie vor unklar, da diese Fragen bisher nicht vertiefend untersucht wurden. Erst seit kurzem liegt eine flächendeckende Bestandsaufnahme der Wildbachereignisse für die österreichischen Alpen vor (Heiser et al. 2019), die helfen kann, diese Lücke zu schließen.

Was die Klimadynamik betrifft, so sind die Temperaturen in den osteuropäischen Alpen seit Beginn des 20. Jahrhunderts etwa doppelt so stark angestiegen wie im Durchschnitt der Nordhalbkugel (Kuhn and Olefs 2020), was zu einem höheren Feuchtigkeitsgehalt in der Atmosphäre und damit zu einem größeren Energiefluss und intensiveren Stürmen führt (Breugem et al. 2020). Diese Stürme werden zudem wahrscheinlich saisonale Verschiebungen und eine höhere Variabilität aufweisen, was zu regional ausgeprägten Sturmstärken und -häufigkeiten auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen führt (Formayer and Fritz 2016; Gobiet et al. 2014) und folglich die Häu-

figkeit von Wildbachereignissen in den Ostalpen beeinflusst. Der Alpenraum befindet sich jedoch in der Übergangszone zwischen unterschiedlichen Niederschlagsmustern, was zu erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich der prognostizierten zukünftigen Niederschlagsänderungen (Heinrich et al. 2013) und der für Wildbachereignisse kritischen Niederschlagsbedingungen (Gobiet et al. 2014; Jomelli et al. 2019; Turkington et al. 2016) führt. Darüber wird in einigen Studien argumentiert, dass der Gletscherrückgang, die Erwärmung und das Auftauen des Permafrosts oder die Schneeschmelze die Disposition von Lockersedimenten verändert, was wiederum die Häufigkeit von Wildbachereignissen in einigen Regionen der Alpen beeinflusst (Beniston et al. 2007; Stoffel and Huggel 2012; Stoffel et al. 2014), während in anderen Untersuchungen ein derartiger Zusammenhang nicht nachweisbar war (Sattler et al. 2011).

Es gibt Belege dafür, dass die Zahl der wildbachexponierten Gebäude in den österreichischen Alpen deutlich zugenommen hat (Fuchs et al. 2015) – seit 1900 hat sich deren Anzahl insgesamt versechsfacht. Aufgrund des Strukturwandels ist eine beträchtliche Steigerung bei Gastgewerbebetrieben und anderen Gewerbebauten nachweisbar. In erheblichem Maße sind auch Wohngebäude exponiert, und das obwohl seit Mitte der 1970er Jahre die Gefahrenzonenplanung eingeführt wurde und Anstrengungen unternommen wurden, mögliche Schäden durch technische Schutzbauwerke zu vermindern (Holub and Fuchs 2009).

In Anlehnung an den Bericht des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) über Veränderungen von Klimaextremen und deren Auswirkungen auf die natürliche physische Umwelt (Seneviratne et al. 2012) befasst sich unsere Studie insbesondere mit Fra-

gen der Häufigkeit, des Ausmaßes und des (saisonalen) Auftretens von fast 12.000 Wildbachereignissen, die zwischen 1962 und 2017 Schäden an der bebauten Umwelt verursacht haben. Der verwendete Datensatz deckt große Teile der Ostalpen ab. Um den zugrundeliegenden Auslösemechanismen Rechnung zu tragen, unterscheiden wir zwischen (i) fluvialem Sedimenttransport, den wir im Folgenden als fluviale Ereignisse bezeichnen, und (ii) allen Prozesstypen zwischen murartigen Prozessen und Murgängen, die sich im Gegensatz zum fluvialen Sedimenttransport durch nicht-newtonsches Fließverhalten auszeichnen und die wir im Folgenden als Murgänge bezeichnen. Neben einer umfassenden Trendanalyse bezüglich der Häufigkeit, des Ausmaßes und der Saisonalität von schadensverursachenden Wildbachereignissen stellen wir ein Regressionsmodell vor, das Informationen über die Effekte verschiedener Indizes für Klima, Exposition und Verbauungsmaßnahmen auf die Häufigkeit der dokumentierten Schadensereignisse in den letzten sechs Jahrzehnten liefert.

## Daten und Methode

### Ereigniskataster der WLV

Die verwendeten Informationen über vergangene Wildbachereignisse stammen aus dem digitalen Ereigniskataster der WLV. Alle analysierten Ereignisse verursachten Schäden und traten in steilen Einzugsgebieten mit einer Fläche  $< 25 \text{ km}^2$  und einem mittleren Gerinnegefälle von mehr als 10 % auf. Basierend auf einer umfassenden Analyse (Heiser et al. 2019) kann der WLV-Ereigniskataster ab etwa 1945 als homogen und somit als vollständig angenommen werden.

### Klimadaten und -indizes

Alle Klimaindizes wurden auf Basis des SPARTACUS-Datensatzes der ZAMG geschätzt, einem hochauflösenden gerasterten Datensatz, der speziell den österreichischen Alpenraum abdeckt. Er liefert klimatologische Informationen über die täglichen Minimal- und Maximaltemperaturen (Hiebl and Frei 2016) sowie die täglichen Niederschlagssummen (Hiebl and Frei 2018) auf einem  $1 \times 1 \text{ km}$ -Raster. Informationen zur Evapotranspiration sowie zu Schneehöhe, Schneewasseräquivalent und Abfluss sind im gleichen Detaillierungsgrad verfügbar, abgeleitet aus der Klima-Version des ZAMG-Schneedeckenmodells SNOWGRID (Olefs et al. 2020; Schöner et al. 2019).

Um die Auswirkungen klimatologischer Effekte auf die Häufigkeit von schadensverursachenden Starkregenereignissen abzubilden, wurden 15 Niederschlagsindizes (Alexander et al. 2006; Vicente-Serrano et al. 2010; Oliver 1980) herangezogen. Alle Berechnungen wurden zunächst für jede  $1 \times 1 \text{ km}$  Rasterzelle des SPARTACUS bzw. des SNOWGRID-Rasters durchgeführt und anschließend auf die Ebene des Einzugsgebiets aggregiert, indem das flächengewichtete arithmetische Mittel aller Rasterzellen innerhalb jedes Einzugsgebiets gebildet wurde. Alle Indizes wurden dann weiter aggregiert, indem wiederum das flächengewichtete arithmetische Mittel über alle Einzugsgebiete des Untersuchungsgebiets, d.h. des österreichischen Teils der Ostalpen, berechnet wurde.

### Schutzbauwerke

Die Informationen über bestehende technische Schutzbauwerke basieren auf dem Schutzbauwerkskataster des Bundesministeriums für Landwirt-

schaft, Regionen und Tourismus. Der Aufbau der Datenbank basiert auf der ONR für die Instandhaltung und Überwachung von Schutzbauten (ONR 24803, Austrian Standards Institute 2007). Zum Zeitpunkt der Analyse enthielt die Datenbank 120.186 Einträge mit Informationen über den Standort, das Baujahr sowie die Art und das verwendete Material des jeweiligen Bauwerks.

Um die Auswirkung von Schutzmaßnahmen auf die Häufigkeit der erfassten Wildbachereignisse zu analysieren, wurde die Anzahl der funktionsfähigen Bauwerke pro Einzugsgebiet, d.h. der Bauwerke, für die eine Schutzfunktion gewährleistet werden kann, ermittelt. Zu diesem Zweck wurde zunächst jedem Bauwerkstyp und je nach verwendetem Material eine mittlere Lebensdauer ( $t$ ) zugewiesen, basierend auf einer Analyse von Paratscha et al. (2019). Definiert man  $t_0$  als das Jahr der Errichtung, so gilt ein Bauwerk im Jahr  $t$  als funktionsfähig, wenn die Bedingung  $t_0 < t \leq (t_0 + t)$  erfüllt ist. Für jedes Einzugsgebiet und jedes Jahr wurde dann die Anzahl der funktionsfähigen Bauwerke geschätzt, indem die Anzahl der vorhandenen funktionsfähigen Bauwerke gezählt und der Durchschnitt sowie die minimale und maximale Lebensdauer berücksichtigt wurden. Schließlich wurde ein nach Einzugsgebieten gewichteter Durchschnitt berechnet, aus dem sich die durchschnittliche, minimale und maximale Anzahl von funktionalen Schutzbauten pro Jahr ergab, die für die Modellierung verwendet wurden.

### Exposition von Gebäuden

Die Gemeinden sind für die Sammlung und digitale Verarbeitung von Informationen über den gesamten Gebäudebestand in Österreich verantwortlich (Republik Österreich 2009). Diese Informationen sind im Gebäude- und Wohnungsregis-

ter enthalten und umfassen die geografische Lage und Größe jedes Gebäudes sowie die Gebäudekategorie und die Bauzeit (1919-2000) bzw. das Baujahr (seit 2001) (Statistik Austria 2012). Zusätzliche Informationen zu den einzelnen Stockwerken, wie Höhe und Nettofläche, Hauptzweck und Konfiguration, sind ebenfalls enthalten. Jedes Gebäude wird durch die Hauptnutzung charakterisiert, die durch die Nettofläche der für verschiedene Zwecke genutzten Flächen in jedem Stockwerk bewertet wird. Darüber hinaus verfügt dieser Datensatz über eine Schnittstelle zum zentralen Melderegister, so dass für jedes Gebäude die Zahl der Hauptwohnsitzinhaber pro Wohneinheit ermittelt werden kann. Es wurden für diese Studie jene Gebäude aus dem Gebäude- und Wohnungsregister extrahiert, die sich in Gebieten befinden, die in ausgewiesenen Wildbach-Gefahrenzonen liegen.

### Saisonalität der Wildbachereignisse

Die jährliche Variabilität von Wildbachereignissen wird neben extrinsischen klimatischen Bedingungen auch durch intrinsische Bedingungen wie z.B. Geologie, Geomorphologie, Landnutzung und Schutzmaßnahmen beeinflusst. Bei einigen dieser intrinsischen Faktoren kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sie über den betrachteten Untersuchungszeitraum konstant sind (Geologie), während sich andere (Geomorphologie, Landnutzung und Schutzmaßnahmen) im Laufe der Zeit verändert haben könnten. Es wurde angenommen, dass das saisonale Auftreten von Wildbachereignissen weniger von der Veränderung intrinsischer Faktoren beeinflusst wird und daher Veränderungen der Saisonalität hauptsächlich auf Veränderungen extrinsischer Faktoren, d.h. klimatischer Faktoren, zurückzuführen sind (Blöschl et al. 2017). In diesem Sinne untersuchten wir die

Daten auf potenzielle Veränderungen der Saisonalität und stellten die Hypothese auf, dass Veränderungen der Saisonalität Signale für potenzielle Auswirkungen des Klimawandels sind. Zur Analyse des saisonalen Auftretens von Wildbachereignissen wurde der Tag des Jahres, d.h. der julianische Tag, anstelle von Ereignissen pro Monat verwendet. Der Mittelwert, die Varianz, die Quantile und die Dichte der Beobachtungen wurden unter Verwendung der entsprechenden Definitionen für zirkuläre Daten berechnet (Jammalamadaka and Sengupta 2001).

#### Trendtests

Für die explorative Analyse der zeitlichen Trends in den Daten wurden verschiedene Regressionsmethoden sowie verschiedene statistische Trendtests angewendet (Schlögl et al. 2021). Diese Methodenpluralität wurde gewählt, um robustere Aussagen über verschiedene Arten von Trends treffen zu können.

#### Modellierung des Einflusses von Klima, Exposition und Mitigation auf die Anzahl der Wildbachereignisse pro Jahr

Insgesamt wurden 46 verschiedene Prädiktoren zur Charakterisierung der Anzahl der Wildbachereignisse pro Jahr verwendet. Diese umfassen 43 Klimaindizes, die Exposition, die Anzahl der funktionalen Schutzbauwerke und das Ereignisjahr. Da die Anzahl der Variablen (46) ungefähr der Anzahl der Beobachtungen (56 Jahre) entspricht, wurde ein Modell gewählt, das eine Variablenselektion ermöglicht, um eine möglichst robuste Beurteilung der Bedeutung der Prädiktoren zu garantieren. Aufgrund der Überdispersion (d.h., die Varianz ist größer als der Mittelwert) in beiden Ereigniszeitreihen wurde die negative Binomialverteilung als generative Verteilung gewählt. Mit

dieser Verteilungsannahme wurde eine komplexe Variante von Generalisierten Additiven Modellen (mit inhärenter Variablenselektion) geschätzt (Schlögl et al. 2021).

#### Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für den Zeitraum von 1962 bis 2017 (56 Jahre) in Bezug auf (i) die jährliche Häufigkeit und (ii) das Ausmaß von Schadensereignissen, (iii) die saisonalen Muster dieser Ereignisse (vgl. Abb. 1) und (iv) ein Modell der Ereignishäufigkeit unter Berücksichtigung des Klimawandels, der Exposition und der Schutzbauwerke vorgestellt.

#### Frequenz

Für den untersuchten Zeitraum wurden insgesamt 8.791 fluviale Ereignisse registriert. Im Mittel wurden 115 Ereignisse pro Jahr dokumentiert, die Standardabweichung beträgt dabei 126. Die Jahre 2005 (n=638), 2002 (n=465), 1966 (n=462), 1965 (n=394) und 1991 (n=366) wiesen eine deutlich höhere Anzahl von Ereignissen auf. Die Glättung der Zeitreihen mittels lokaler polynomialer Regression ergab einen leichten, aber nicht signifikanten Anstieg der Zahl der fluvialen Ereignisse, beginnend in den frühen 1990er Jahren.

Ebenso wurden im Untersuchungszeitraum insgesamt 3.184 Murgangereignisse registriert. Die mittlere Anzahl der Ereignisse pro Jahr betrug 49 – was nur etwa 42 % der Anzahl der fluvialen Ereignisse entspricht – mit einer Standardabweichung von 48. Die Glättung der Zeitreihen mittels lokaler polynomialer Regression zeigte einen parabolischen Trend. Dabei nahm die Anzahl der Murgangereignisse zwischen 1962 und 1994 im Mittel um 20 Ereignisse alle 10 Jahre ab, und ab 1995 im Mittel um 24 Ereignisse alle 10 Jahre wieder zu.

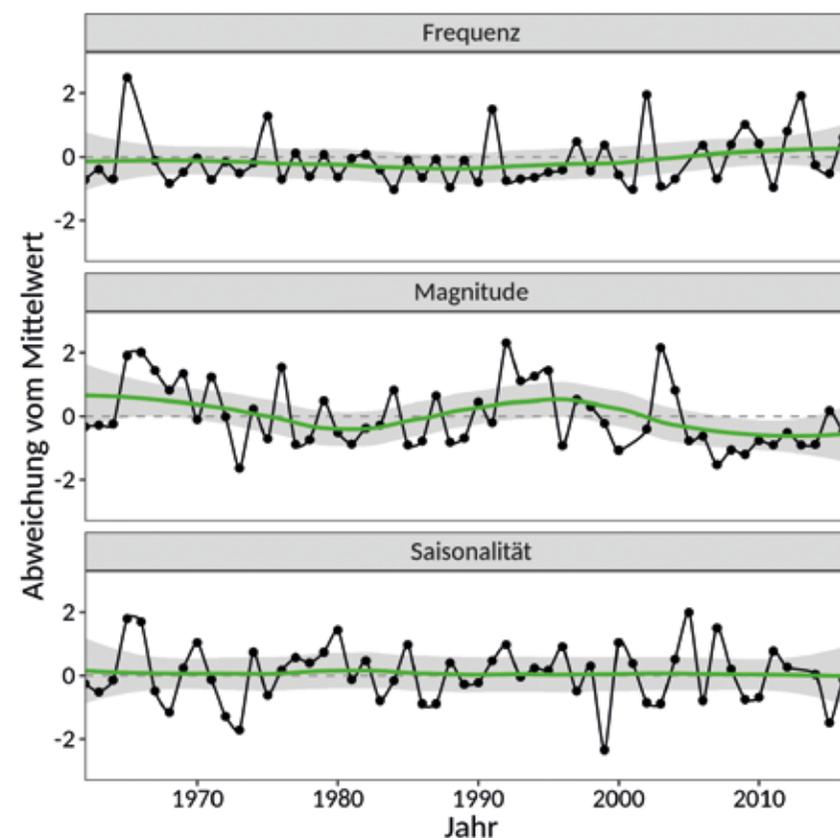


Abbildung 1: Frequenz, Magnitude und Saisonalität von schadenverursachenden Ereignissen im Zeitraum 1962–2017. Frequenz und Magnitude werden standardisiert als Abweichung vom Mittelwert über den gesamten Zeitraum dargestellt

Figure 1: Frequency, magnitude and seasonality of damage-inducing events (1962–2017). Frequency and magnitude are shown standardized in terms of deviation from the mean over the entire period

#### Magnitude

Bei den fluvialen Ereignissen lagen im Zeitraum 1972–2004 im Durchschnitt lediglich für 8 % der dokumentierten Ereignisse pro Jahr Informationen über die Ereignisgröße (Ablagerungsvolumen) vor. Aufgrund einer Änderung der Datenerfassung im Jahr 2005 stieg diese Zahl auf durchschnittlich 36 % im Zeitraum 2005–2017. Während für die Zeit vor 1972 kaum Informationen über die Ablagerungsvolumina von fluvialen Ereignissen

existieren, liegen im letzten Viertel der Zeitreihe (2005–2017) fast drei Viertel aller Ereignisse mit bekannten Ablagerungsmengen (1051 von 1437). Offensichtlich war die Informationsdichte in den Daten für die letzten 13 Jahre der Zeitreihe deutlich höher, während die Zahl der fluvialen Ereignisse per se über den Gesamtzeitraum relativ gleichmäßig verteilt ist. Die geschätzte mittlere Größe dieser Ereignisse zeigt dabei einen abnehmenden Trend von  $-3,84\%$  pro Jahr, was allerdings auch eine Folge der höheren Beobachtungsdichte hinsichtlich der Größenangaben seit 2005

sein kann. Der Median der Ereignisgröße veränderte sich von 2.200 m<sup>3</sup> auf 700 m<sup>3</sup> zwischen den Zeiträumen 1972–2005 und 2005–2017. Innerhalb dieser beiden Zeiträume konnten keine individuellen Trends festgestellt werden. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Zeiträume von 33 bzw. 13 Jahren sind diese Ergebnisse jedoch mit Vorsicht zu interpretieren.

Bei Murgangereignissen lagen für den Zeitraum von 1962 bis 2005 im Durchschnitt für 32 % der Ereignisse Informationen über die Magnitude vor. Zwischen 2000 und 2005 wurden kaum Ablagerungsvolumina erfasst. Aufgrund einer Änderung der Datenerfassung im Jahr 2005 wurden im Zeitraum 2005–2017 für durchschnittlich 67 % der Einträge Magnituden erfasst. Im letzten Viertel der Zeitreihe (2005–2017) traten mehr als die Hälfte (471 von 909) aller Ereignisse mit bekannten Ablagerungsvolumina auf. Offensichtlich war auch hier die Informationsdichte in den Daten für die letzten 13 Jahre der Zeitreihe deutlich höher, während die Zahl der murartigen Ereignisse per se über den Gesamtzeitraum relativ gleichmäßig verteilt ist. Zudem ist auch hier – wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß – die Veränderung der Dokumentationsstandards in den Jahren 1972 und 2017 zu erkennen. Das mittlere Murgangablagerungsvolumen von 9.000 m<sup>3</sup> hat sich jedoch – im Gegensatz zu den fluvialen Ereignissen – nicht signifikant verändert.

#### Saisonalität der Wildbachereignisse

Bei den fluvialen Ereignissen von Juni bis August ein deutlicher Häufigkeitsspitzen pro Monat zu verzeichnen. Im Juni wurden 18 % aller Ereignisse aufgezeichnet, im Juli 27 % und im August 28 %, was insgesamt 73 % der Dateneinträge ausmacht. Wird der julianische Tag als Maß für die Saisonalität zugrunde gelegt, so schwankt der Median des Ereignistages um einen Wert von 203, was Mitte

Juli entspricht. Für den untersuchten Zeitraum ist eine Verschiebung des Medians in Richtung Frühling mit -0,38 Tagen pro Jahr nachweisbar. Der Trend ist jedoch im Vergleich zur Variabilität des Medians zwischen den einzelnen Jahren (etwa 10 Tage) gering. Darüber hinaus wurde die Größe des Trends stark durch das Jahr 2013 beeinflusst.

Auch bei den Murgangereignissen zeigte sich ein deutlicher Höhepunkt in der Häufigkeit der Ereignisse im Juni (17 %), Juli (37 %) und August (29 %), was insgesamt 83 % der Dateneinträge ausmacht. Murgangereignisse traten jedoch im Juli deutlich häufiger und im Mai weniger häufig auf als fluviale Ereignisse. Die stärkere Konzentration von Murgangereignissen auf die Sommermonate zeigt sich auch in der engeren Verteilung der Ereignistage im Vergleich zur Verteilung der Ereignistage von fluvialen Ereignissen. Auch bei Murgangereignissen liegt der Median des Ereignistags Mitte Juli, konkret um den 204. Tag des Jahres. Über den Untersuchungszeitraum hinweg ist eine Verschiebung des Medians in Richtung Frühling mit -0,19 Tagen pro Jahr feststellbar. Dieser niedrige Wert entspricht aber einer Verschiebung des Medians der Ereignistage in Richtung Frühling um 2 Tage in 10 Jahren, was im Vergleich zur Variabilität des Medians zwischen den einzelnen Jahren (etwa 10 Tage) ebenso wie bei den fluvialen Ereignissen sehr gering ist.

#### Modellierung der Häufigkeit von Wildbachereignissen unter Berücksichtigung von Klima, Exposition und Schutzbauten

Von den 46 Prädiktoren wurden primär Indizes für Starkniederschlag (Dauer und Intensität) sowie das Verhältnis zwischen Siedlungsaktivität und funktionalen Schutzbauwerken als relevant für die Häufigkeit des Auftretens von schadensverursachenden Wildbachereignissen identifiziert. Leichte Effekte der Schneeschmelze konnten nur

in Kombination mit Niederschlag nachgewiesen werden. Die Modelle für die beiden Prozessstypen (fluviale bzw. Murgangereignisse) zeigten eine hohe Qualität ( $R^2 = 0,83$  für fluviale und  $R^2 = 0,79$  für Murgangereignisse), unterschätzen jedoch die Auftretenshäufigkeit in Jahren mit einer besonders hohen Anzahl an Ereignissen.

#### Diskussion

##### Trends bei Wildbachereignissen

Die absolute Zahl und das Verhältnis von Varianz zu Mittelwert der aufgezeichneten fluvialen Ereignisse war für den Untersuchungszeitraum höher als die der Murgänge. Bei den fluvialen Ereignissen war kein Trend feststellbar. Bei den Murgängen herrschte ein leichter parabolischer Trend vor, der seit den 1990er Jahren eine Zunahme der Schadensereignisse suggeriert. Dieser Trend wird jedoch als Artefakt dreier Jahre mit einer außergewöhnlich hohen Anzahl Ereignisse (1965, 1966, 2013) angesehen, welche eine gewisse „Hebelwirkung“ an beiden Enden der Zeitreihe ausüben. Daher kann die Häufigkeit von fluvialen und Murgangereignissen pro Jahr von 1962 bis 2017 als mehr oder weniger konstant angesehen werden.

Die Angaben zur Magnitude von Wildbachereignissen müssen im Zusammenhang mit zwei Änderungen des Dokumentationsstandards während des Beobachtungszeitraums betrachtet werden, welche einmal im Jahr 1972 und das zweite Mal im Jahr 2005 stattgefunden haben. Vor 2005 war die Definition des Ausmaßes von Wildbachereignissen (insbesondere von fluvialen Ereignissen) weitgehend vom Beobachter abhängig. Die Einführung einer Standardisierung der Dokumentation von Naturereignissen (Hübl et al. 2002; Berger et al. 2007), gepaart mit technischen Neuerungen – insbesondere der breiten Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten – hat

dieses Problem deutlich entschärft. Innerhalb der Zeiträume, in denen von einem homogenen Dokumentationsstandard ausgegangen werden kann (1962–1972, 1972–2005 und 2005–2017), zeigten unsere Analysen jedoch keine Trends in den jährlichen Magnituden, weder für fluviale noch für Murgangereignisse. Für Murgangereignisse gilt dies auch, wenn der gesamte Beobachtungszeitraum (1962–2017) betrachtet wird. Der leichte Trend abnehmender Magnituden bei fluvialen Ereignissen (für 1962–2017) könnte darauf beruhen, dass vor 2005 hauptsächlich Magnituden oberhalb eines bestimmten Niveaus aufgezeichnet wurden und nach 2005 vergleichsweise mehr Informationen über kleinere Magnituden dokumentiert sind (Heiser et al. 2019).

Für beide Prozessstypen wurde eine leichte Verschiebung des Zeitpunkts der Ereignisse in Richtung Frühling festgestellt. Dies steht im Einklang mit den vorgeschlagenen Szenarien für veränderte Abflüsse, die durch (i) den Rückzug der Gletscher in einem sich erwärmenden Klima verursacht werden, wobei sich der Zeitpunkt des maximalen Abflusses im Allgemeinen von den Sommermonaten auf das Frühjahr verschieben dürfte, und (ii) den früheren Beginn der Schneeschmelze (Beniston et al. 2018). Während in einigen Studien von einer zunehmenden Häufigkeit von Murgängen im Frühjahr und Herbst in den von Permafrostdegradation betroffenen Einzugsgebieten berichtet wurde (Stoffel et al. 2014), kamen andere Studien zu dem Schluss, dass dieser Zusammenhang nicht nachweisbar ist (Sattler et al. 2011). Außerdem ist Permafrost zwar generell in 50 % der Einzugsgebiete, die von dem analysierten Datensatz abgedeckt werden, vorhanden, seine räumliche Ausdehnung innerhalb der Einzugsgebiete ist jedoch eher gering (Kaitna and Huber 2017). Daher bleibt eine tatsächliche leichte Verschiebung des Ereigniseintritts in Richtung Frühling an dieser Stelle eher fraglich.

## Klimawandel, Exposition und Schutzmaßnahmen

Das Regressionsmodell bestätigte eindeutig, dass meteorologische Auslösevariablen wie Dauerregen und Starkregen, die beide durch die Intensität der Schneeschmelze verstärkt werden, den größten Einfluss auf die Ereignishäufigkeit für beide Prozesstypen haben. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit anderen Studien mit Schwerpunkt auf den europäischen Alpen (Seneviratne et al. 2012; Enigl et al. 2019; Prenner et al. 2019). In unserer Studie wiesen fluviale Ereignisse eine nahezu

lineare Beziehung zu diesen Klimavariablen auf, während diese Beziehung bei Murgangereignissen komplexer war. Eine qualitative Bewertung der signifikanten Klimavariablen deutet auf eine leichte Zunahme der Zahl der extremen Niederschlagstage im Beobachtungszeitraum hin.

Neben den klimatischen Bedingungen wirkten sich jedoch auch Schutzmaßnahmen sowie eine veränderte Exposition der Gebäude auf das Auftreten und damit die Häufigkeit von Schadensereignissen aus (Abb. 2). Beide Faktoren wurden im vorgeschlagenen Modell berücksich-

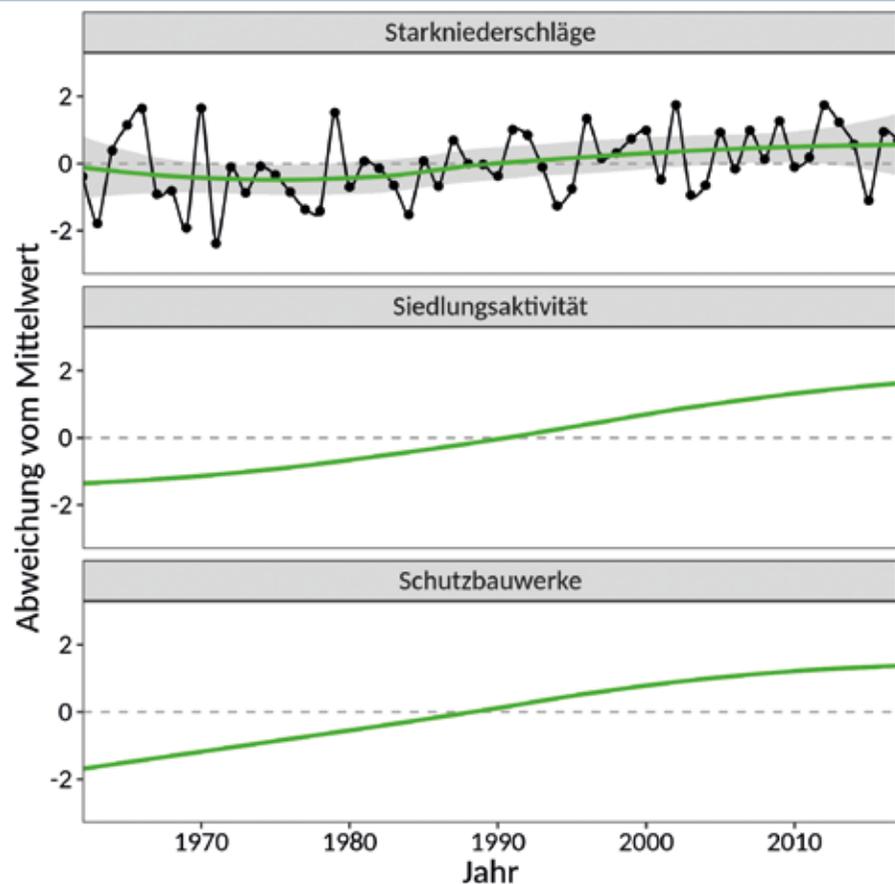


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf von Starkniederschlägen, Siedlungsaktivität und Schutzbauwerken im Zeitraum 1962-2017. Die Daten werden standardisiert als Abweichung vom Mittelwert über den gesamten Zeitraum dargestellt

Figure 2: Evolution of heavy precipitation, exposure and technical mitigation (1962-2017). The data are shown standardized in terms of deviation from the mean over the entire period

tigt, wobei die Anzahl der exponierten Gebäude pro Schutzmaßnahme die Varianz der Ereignishäufigkeit stark beeinflusst. In den 1960er und 1970er Jahren ist die Varianz dieser Ereignisse rückläufig, was auf die hohe Anzahl der in diesem Zeitraum errichteten technischen Schutzmaßnahmen zurückgeführt wird (Holub and Fuchs 2009; Löschner et al. 2017). Infolgedessen wurden Schadensereignisse mit größeren Magnituden reduziert und Ereignisse mit kleineren Magnituden verursachten zunehmend Schäden. Im Gegenzug stieg die Anzahl der Schutzmaßnahmen zwischen 1962 und 1973 im Vergleich zur Anzahl der exponierten Gebäude überproportional an, was bedeutet, dass die Anzahl der Gebäude pro Schutzmaßnahme abnahm. Gleichzeitig ist jedoch die absolute Zahl der exponierten Gebäude in den 1960er und 1970er Jahren in Österreich überdurchschnittlich gestiegen (Fuchs et al. 2015), wobei insbesondere Wohn- und Gewerbebauten in wildbachgefährdeten Gebieten errichtet wurden. Während in den 1980er Jahren die Zahl der neu errichteten Gebäude in diesen Gebieten zurückging, steigt das Verhältnis zwischen Schutzmaßnahmen und Gebäuden wieder an, bevor das Verhältnis von Mitte der 1980er bis Ende der 1990er Jahre wieder abnimmt. Parallel dazu erfuhren die meteorologischen Auslöser von Wildbachereignissen eine höhere Varianz, was vermutlich zu einem ausgeprägteren Auftreten von Ereignissen mit größerem Ausmaß führte und die Zuordnung der höheren Varianz bei Schadensereignissen schwierig macht. Trotz der Umsetzung von Raumplanungsvorschriften wurden Gebiete, die Wildbachereignissen ausgesetzt sind, kontinuierlich bebaut, was in vielen Gemeinden in den europäischen Alpen nachgewiesen wurde (Röthlisberger et al. 2017; Thaler et al. 2018; Zischg et al. 2018). So wurden ursprünglich in den 1960er und 1970er Jahren frei gehaltene Flächen in späteren Jahrzehnten sukzessive

bebaut (Fuchs et al. 2015; Fuchs et al. 2017). Dies lässt sich auch an der relativen Zunahme der Gebäude pro Schutzmaßnahme ab den ausgehenden 1990er Jahren ablesen. Eine ähnliche Entwicklung der sozioökonomischen Dynamik in Bergregionen und die Auswirkungen auf das Risiko von Schadenslawinen wird von Zgheib et al. (2020) beschrieben.

## Schlussfolgerung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde für den österreichischen Alpenraum erörtert, ob die Schadensdynamik von Wildbachereignissen auf die Auswirkungen des Klimawandels, auf Veränderungen der Exposition von Gebäuden oder auf die Umsetzung von technischen Schutzmaßnahmen zurückzuführen ist. Unsere Ergebnisse zeigen, dass der Klimawandel, d.h. die erwartete Zunahme der auslösenden Niederschlagsereignisse, in Kombination mit einem zunehmenden Trend in der Exposition, durch die ansteigenden Schutzmaßnahmen kompensiert wird (Schlögl et al. 2021). Folglich zeigte die Häufigkeit sowohl von fluvialen als auch von Murgangereignissen keinen eindeutigen Trend zu einer Zunahme von Schadensereignissen im Untersuchungszeitraum. Unter der Annahme, dass sich die positiven Trends bei den auslösenden Niederschlagsereignissen und der Exposition der gefährdeten Gebäuden fortsetzen, könnte ein Verlust der Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen – beispielsweise in den Einzugsgebieten, in denen die Schutzmaßnahmen das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben – zu einem überproportionalen Anstieg der Schadensereignisse führen. Betrachtet man die Gesamtzahl der Bauwerke in den österreichischen Alpen über den gesamten Beobachtungszeitraum, so zeigt sich, dass die Anzahl der Schutzbauwerke, die ihre Lebensdauer überschritten haben, seit dem Jahr 2000 stetig zunimmt. Die Zuverlässig-

keit bestehender Bauwerke ist daher nicht nur für die Aufrechterhaltung der aktuellen Schutzfunktion von großer Bedeutung, sondern auch, um den zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels und dem zunehmenden Bedarf an Bebauung in gefährdeten Gebieten entgegenzuwirken.

Die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen den Auswirkungen des Klimawandels, den Veränderungen der Exposition und der Umsetzung technischer Schutzmaßnahmen ist von grundlegender Bedeutung für ein besseres Verständnis der Schadendynamik im Naturgefahrenmanagement. Es hat sich gezeigt, dass eine Debatte über zunehmende Schäden, die sich nur auf die Auswirkungen des Klimawandels konzentriert, irreführend sein kann, und dass insbesondere in Berggebieten andere Faktoren wie Landnutzung oder technischer Schutz von ähnlicher Bedeutung sind.

### Weitere Informationen und Datenverfügbarkeit

Die Studie von BOKU und ZAMG „Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures“ enthält weitere Informationen, erschien 2021 im Fachjournal „Climate Risk Management“ und steht kostenlos zum Download zur Verfügung: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100294>. Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten und Ergebnisse sind auf PANGAEA unter <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.927584> zu finden.

### Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Dr. Matthias Schlögl  
Universität für Bodenkultur  
Institut für Alpine Naturgefahren,  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
[matthias.schloegl@boku.ac.at](mailto:matthias.schloegl@boku.ac.at)

Dr. Micha Heiser  
Universität für Bodenkultur  
Institut für Alpine Naturgefahren,  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
[heiser.micha.mh@gmail.com](mailto:heiser.micha.mh@gmail.com)

Priv.-Doz. Dr. Christian Scheidl  
Universität für Bodenkultur  
Institut für Alpine Naturgefahren,  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
[christian.scheidl@boku.ac.at](mailto:christian.scheidl@boku.ac.at)

Priv.-Doz. Dr. Sven Fuchs  
Universität für Bodenkultur  
Institut für Alpine Naturgefahren,  
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien  
[sven.fuchs@boku.ac.at](mailto:sven.fuchs@boku.ac.at)

### Literatur/References:

- ALEXANDER LV, ZHANG X, PETERSON TC, CAESAR J, GLEASON B, KLEIN TANK AMG, HAYLOCK M, COLLINS D, TREWIN B, RAHIMZADEH F, TAGIPOUR A, RUPA KUMAR K, REVADEKAR J, GRIFFITHS G, VINCENT L, STEPHENSON DB, BURN J, AGUILAR E, BRUNET M, TAYLOR M, NEW M, ZHAI P, RUSTICUCCI M, VAZQUEZ-AGUIRRE JL (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111:D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- ANDRES N, BADOUX A (2019) The Swiss flood and landslide damage database: Normalisation and trends. *Journal of Flood Risk Management* 12 (S1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12510>
- AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE (2007) Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Betrieb, Überwachung und Instandhaltung. ONR 24803. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE (2009) Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung. ONR 24800. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- BENISTON M, FARINOTTI D, STOFFEL M, ANDRASSAN LM, COPPOLA E, ECKERT N, FANTINI A, GIACONA F, HAUCK C, HUSS M, HUWALD H, LEHNING M, LÓPEZ-MORENO J-I, MAGNUSSON J, MARTY C, MORANTEJEDA E, MORIN S, NAAM M, PROVENZALE A, RABATEL A, SIX D, STÖTTER J, STRASSER U, TERZAGO S, VINCENT C (2018) The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere* 12 (2):759-794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- BENISTON M, STEPHENSON DB, CHRISTENSEN OB, FERRO CAT, FREI C, GOYETTE S, HALSNAES K, HOLT T, JYLHÄ K, KOFFI B, PALUTIKOF J, SCHÖLL R, SEMMLER T, WOTH K (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81 (Supplement 1):71-95. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>
- BERGER E, GRISOTTO S, HÜBL J, KIENHOLZ H, KOLLARIS S, LEBER D, LOIPERSBERGER A, MARCHI L, MAZZORANA B, MOSER M, NÖSSING T, RIEDLERS S, SCHEIDL C, SCHMID F, SCHNETZER I, SIEGEL H, VOLK G (2007) DIS-ALP. Disaster information system of alpine regions. Final report.

- BLÖSCHL G, HALL J, PARAJKA J, PERDIGPO RAP, MERZ B, ARHEIMER B, ARONICA GT, BILIBASHI A, BONACCI O, BORGA M, ČANJEVAC I, CASTELLARIN A, CHIRICO GB, CLAPS P, FIALA K, FROLOVA N, GORBACHOVA L, GÜL A, HANNAFORD J, HARRIGAN S, KIREEVA M, KISS A, KJELSDEN TR, KOHNOVÁ S, KOSKELA JJ, LEDVINKA O, MACDONALD N, MAVROVA-GUIRGUINOVA M, MEDIERO L, MERZ R, MOLNAR P, MONTANARI A, MURPHY C, OSUCH M, OVCHARUK V, RADEVSKI I, ROGGER M, SALINAS JL, SAUQUET E, ŠRAJ M, SZOLGAY J, VIGLIONE A, VOLPI E, WILSON D, ZAIMI K, ŽIVKOVIĆ N (2017) Changing climate shifts timing of European floods. *Science* 357:588-590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
- BOLLSCHWEILER M, STOFFEL M (2010) Changes and trends in debris-flow frequency since AD 1850: Results from the Swiss Alps. *The Holocene* 20 (6):907-916. <https://doi.org/10.1177/0959683610365942>
- BREUGEM AJ, WESSELING JG, OOSTINDIE K, RITSEMA CJ (2020) Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods – An overview. *Earth-Science Reviews* 204:103171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103171>
- CHURCH M, JAKOB M (2020) What is a debris flood? *Water Resources Research* 56 (8):e2020WR027144. <https://doi.org/10.1029/2020wr027144>
- COSTA J (1984) Physical geomorphology of debris flows. In: Costa J, Fleisher P (eds) *Developments and applications of geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin, pp 268-317. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-69759-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69759-3_9)
- DI BALDASSARRE G, NOHRSTEDT D, MÅRD J, BURCHARDT S, ALBIN C, BONDESSON S, BREINL K, DEEGAN FM, FUENTES D, LOPEZ MG, GRANBERG M, NYBERG L, NYMAN MR, RHODES E, TROLL V, YOUNG S, WALCH C, PARKER CF (2018) An integrative research framework to unravel the interplay of natural hazards and vulnerabilities. *Earth's Future* 6 (3):305-310. <https://doi.org/10.1002/2017EF000764>
- ENIGL K, MATULLA C, SCHLÖGL M, SCHMID F (2019) Derivation of canonical total-sequences triggering landslides and floodings in complex terrain. *Advances in Water Resources* 129:178-188. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.04.018>
- FORMAYER H, FRITZ A (2016) Temperature dependency of hourly precipitation intensities – surface versus cloud layer temperature. *International Journal of Climatology* 37 (1):1-10. <https://doi.org/10.1002/joc.4678>
- FUCHS S, HEISER M, SCHLÖGL M, ZISCHG A, PAPATHOMA-KÖHLE M, KEILER M (2019) Short communication: A model to predict flood loss in mountain areas. *Environmental Modelling and Software* 117:176-180. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.026>
- FUCHS S, KEILER M, SOKRATOV SA, SHNYPARKOV A (2013) Spatiotemporal dynamics: the need for an innovative approach in mountain hazard risk management. *Natural Hazards* 68 (3):1217-1241. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0508-7>
- FUCHS S, KEILER M, ZISCHG A (2015) A spatiotemporal multi-hazard exposure assessment based on property data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15 (9):2127-2142. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2127-2015>
- FUCHS S, RÖTHLISBERGER V, THALER T, ZISCHG A, KEILER M (2017) Natural hazard management from a coevolutionary perspective: Exposure and policy response in the European Alps. *Annals of the American Association of Geographers* 107 (2):382-392. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1235494>
- GOBIET A, KOTLARSKI S, BENISTON M, HEINRICH G, RAJCAK J, STOFFEL M (2014) 21st century climate change in the European Alps – A review. *Science of the Total Environment* 493:1138-1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- HEINRICH G, GOBIET A, MENDLIK T (2013) Extended regional climate model projections for Europe until the mid-twenty-first century: Combining ENSEMBLES and CIMP3. *Climate Dynamics* 41 (2):521-535. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1840-7>

- HEISER M, HÜBL J, SCHEIDL C (2019) Completeness analyses of the Austrian torrential event catalog. *Landslides* 16 (11):2115-2126. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01218-3>
- HIEBL J, FREI C (2016) Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability. *Theoretical and Applied Climatology* 124:161-178. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4>
- HIEBL J, FREI C (2018) Daily precipitation grids for Austria since 1961 – development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theoretical and Applied Climatology* 132:327-345. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2093-x>
- HOLUB M, FUCHS S (2009) Mitigating mountain hazards in Austria – Legislation, risk transfer, and awareness building. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2):523-537. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-523-2009>
- HÜBL J, KIENHOLZ H, LOIPERSBERGER A (eds) (2002) DOMODIS - Documentation of mountain disasters. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Klagenfurt
- HUGGEL C, MUCCIONE V, CAREY M, JAMES R, JURT C, MECHLER R (2019) Loss and damage in the mountain cryosphere. *Regional Environmental Change* 19 (5):1387-1399. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1385-8>
- HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11 (2):167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- JAMMALAMADAKA SR, SENGUPTA A (2001) Topics in circular statistics, vol 5. Series on Multivariate Analysis. World Scientific, River Edge. <https://doi.org/10.1142/4031>
- Jomelli V, Pavlova I, Giacona F, Zgheib T, Eckert N (2019) Respective influence of geomorphologic and climate conditions on debris-flood occurrence in the Northern French Alps. *Landslides* 16:1871-1883. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01195-7>
- KAITNA R, HUBERT (2017) Debris flow activity in permafrost regions in Austria during the 20th century. In: Mikoš M, Casaghi N, Yin Y, Sassa K (eds) *Advancing culture of living with landslides*, vol 4. Springer, Cham, pp 421-427. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5_50)
- KEILER M, KNIGHT J, HARRISON S (2010) Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368 (1919):2461-2479. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0047>
- KLEIN JA, TUCKER CM, NOLIN AW, HOPPING KA, REID RS, STEGER C, GRÉT-REGAMEY A, LAVOREL S, MÜLLER B, YEH ET, BOONE RB, BOURGERON P, BUTSIC V, CASTELLANOS E, CHEN X, DONG SK, GREENWOOD G, KEILER M, MARCHANT R, SEIDL R, SPIES T, THORN J, YAGER K, THE MOUNTAIN SENTINELS NETWORK (2019) Catalyzing transformations to sustainability in the world's mountains. *Earth's Future* 7:547-557. <https://doi.org/10.1029/2018ef001024>
- KUHN M, OLEFS M (2020) Elevation-dependent climate change in the European Alps. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.762>
- LÖSCHNER L, HERRNEGGER M, APPERL B, SENONER T, SEHER W, NACHTNEBEL HP (2017) Flood risk, climate change and settlement development: a micro-scale assessment of Austrian municipalities. *Regional Environmental Change* 17 (2):311-322. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1009-0>
- OLEFS M, KOCH R, SCHÖNER W, MARKET (2020) Changes in snow depth, snow cover duration, and potential snowmaking conditions in Austria, 1961-2020 – a model based approach. *Atmosphere* 11 (12):1330. <https://doi.org/10.3390/atmos11121330>
- OLIVER JE (1980) Monthly precipitation distribution: a comparative index. *The Professional Geographer* 32:300-309. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x>

PARATSCHA R, STRAUSS A, SMUTNY R, LAMPALZER T, RAUCH H-P, CVON DER THANNEN M (2019)  
Probabilistic performance prediction model for Austrian torrent control infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering* 15 (2):170-179. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1526195>

PAVLOVA I, JOMELLI V, BRUNSTEIN D, GRANCHER D, MARTIN E, DÉQUÉ M (2014)  
Debris flow activity related to recent climate conditions in the French Alps: A regional investigation. *Geomorphology* 219:248-259. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.025>

PRENNER D, HRACHOWITZ M, KAITNA R (2019)  
Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *Science of the Total Environment* 658:958-972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.206>

REPUBLIK ÖSTERREICH (2009)  
Bundesgesetz, mit dem das Registerzählungsgesetz, das Bundesgesetz über das Gebäude- und Wohnungsregister, das Bundesstatistikgesetz 2000 und das E-Government-Gesetz geändert werden. BGBl 125/2009

RICKENMANN D (2016)  
Methods for the quantitative assessment of channel processes in torrents (steep streams). CRC Press/Balkema, Leiden

RÖTHLISBERGER V, ZISCHG A, KEILER M (2017)  
Identifying spatial clusters of flood exposure to support decision making in risk management. *Science of the Total Environment* 598:593-603. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.216>

SÄTTLER K, KEILER M, ZISCHG A, SCHROTT L (2011)  
On the connection between debris flow activity and permafrost degradation: A case study from the Schnalstal, South Tyrolean Alps, Italy. *Permafrost and Periglacial Processes* 22:254-265. <https://doi.org/10.1002/ppp.730>

SCHLÖGL M, FUCHS S, SCHEIDL C, HEISER M (2021)  
Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures. *Climate Risk Management* 32:100294. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100294>

SCHÖNER W, KOCH R, MATULLA C, MARTY C, TILG A-M (2019)  
Spatiotemporal patterns of snow depth within the Swiss-Austrian Alps for the past half century (1961 to 2012) and linkages to climate change. *International Journal of Climatology* 39 (3):1589-1603. <https://doi.org/10.1002/joc.5902>

SENEVIRATNE SI, NICHOLLS N, EASTERLING D, GOODNESS CM, KANAE S, KOSSIN J, LUO Y, MARENGO J, MCINNES K, RAHIMI M, REICHSTEIN M, SORTEBERG A, VERA C, ZHANG X (2012)  
Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Field CB, Barros V, Stocker TF et al. (eds) *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 109-230

STATISTIK AUSTRIA (ed) (2012)  
Adress-GWR Online Handbuch, Teil C, Anhang 2: Merkmalskatalog. Statistik Austria, Wien

STÄUBLI A, NUSSBAUMER SU, ALLEN SK, HUGGEL C, ARGUELLO M, COSTA F, HERGARTEN C, MARTÍNEZ R, SOTO J, VARGAS R, ZAMBRANO E, ZIMMERMANN M (2018)  
Analysis of weather- and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. In: Mal S, Singh RB, Huggel C (eds) *Climate change, extreme events and disaster risk reduction*. Springer, Cham, pp 7-41. [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-56469-2\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-56469-2_2)

STOFFEL M, HUGGEL C (2012)  
Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography* 36 (3):421-439. <https://doi.org/10.1177/0309133312441010>

STOFFEL M, TIRANTI D, HUGGEL C (2014)  
Climate change impacts on mass movements – Case studies from the European Alps. *Science of the Total Environment* 493:1255-1266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.102>

THALER T, ZISCHG A, KEILER M, FUCHS S (2018)  
Allocation of risk and benefits – distributional justices in mountain hazard management. *Regional Environmental Change* 18 (2):353-365. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1229-y>

TURKINGTON T, REMAÏTRE A, ETTEMA J, HUSSIN H, VAN WESTEN C (2016)  
Assessing debris flow activity in a changing climate. *Climatic Change* 137 (1-2):293-305. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1657-6>

VICENTE-SERRANO SM, BEGUERFA S, LÓPEZ-MORENO JJ (2010)  
A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23 (7):1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

ZGHEIB T, GIACONA F, GRANET-ABISSET A-M, MORIN S, ECKERT N (2020)  
One and a half century of avalanche risk to settlements in the upper Maurienne valley inferred from land cover and socio-environmental changes. *Global Environmental Change* 65:102149. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102149>

ZISCHG A, HOFER P, MOSIMANN M, RÖTHLISBERGER V, RAMIREZ JA, KEILER M, WEINGARTNER R (2018)  
Flood risk (de)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. *Science of the Total Environment* 639:195-207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.056>

ZORN M, KOMAC B (2011)  
Damage caused by natural disasters in Slovenia and globally between 1995 and 2010. *Acta Geographica Slovenica* 51 (1):32-41. <https://doi.org/10.3986/ags51101>

## WIR SICHERN & KULTIVIEREN ERDE.

### Steilwälle Wasserbau Entwässerung Sonderkonstruktionen

### Hangsicherung Böschungssicherung Steinschlagschutz Stützbauwerke



ZT für WLV -, Studien, Projekte, Gutachten, Ausschreibungen,  
Baubegleitung, Sicherheitsanalysen, Wildbachbegehungen...

**Standort Ost**  
Langseitenrotte 19  
3223 Wienerbruck

**Standort West**  
Saurweinweg 5  
6020 Innsbruck

T: +43 2728 20404  
M: +43 664 2047240  
Web: [www.tiwald.at](http://www.tiwald.at)



J. Krismer | Bundesstraße 23  
A - 6063 Innsbruck - Rum  
T +43 512 26 38 00

[www.krismer.at](http://www.krismer.at)  
[office@krismer.at](mailto:office@krismer.at)

CHRISTIAN PÜRSTINGER, CHRISTOPH LAINER

## Einrichtung eines Modelleinzugsgebietes: Der Rindbach in Oberösterreich

### *Set up a model catchment area: Rindbach (Upper Austria)*

#### Zusammenfassung:

Im Rahmen des Schutzwaldzentrums am WALDCAMPUS Österreich in Traunkirchen/Oberösterreich wurde von den Kooperationspartnern BMLRT/WLV, ÖBf AG, BFW und BOKU ein Modelleinzugsgebiet eingerichtet. Der dafür ausgewählte Rindbach im Gemeindegebiet Ebensee soll als Naturlaboratorium für Monitoring und Forschung sowie als Trainingsgebiet für praktische Ausbildungslehrgänge dienen. Im dem Langzeitprojekt (30 Jahre) stehen verschiedenste Fragestellungen im Vordergrund: Die Verknüpfungen zwischen dem Wald und Naturgefahren wie auch Fragen der Jagd und des Wildmanagements sollen dabei intensiv aufgezeigt und besser verstanden werden.

#### Abstract:

*The cooperation partners BMLRT/WLV, ÖBf AG, BFW and BOKU established a model catchment area within the framework of the Protective Forest Hub at WALDCAMPUS Austria in Traunkirchen/Upper Austria. The Rindbach in the Ebensee municipal area was selected for this purpose and will be used as a natural laboratory for monitoring and research as well as training area for practical training courses. The long-term project (30 years) will address a wide range of issues: the links between the forest and natural hazards as well as hunting and game management issues will be intensively analyzed and thus be better known and understood.*

#### Stichwörter:

Modelleinzugsgebiet,  
hydrologische Untersuchungen, Wildbach

#### Keywords:

*model catchment,  
hydrological analyses, torrent*

#### Einleitung

Durch die Schaffung eines Schutzwaldzentrums am Standort des WALDCAMPUS Österreich in Traunkirchen soll die Zusammenarbeit und bundesweite Koordinierung zum Thema „Schutzwirkung des Waldes“ forciert und gebündelt werden. Die Zusammenarbeit der vier Kooperationspartner Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT), vertreten durch die Abteilung III/4 – Wildbach- und Lawinerverbauung und Schutzwaldpolitik, Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) und Österreichische Bundesforste AG (ÖBf AG) sieht vor, zur besseren Vermittlung und Erforschung von geologischen, hydrologischen, hydraulischen, forst- und bautechnischen Zusammenhängen ein Modell-Wildbacheinzugsgebiet aufzubauen. Dazu wurde das

Wildbacheinzugsgebiet des Rindbaches in der Gemeinde Ebensee, Bezirk Gmunden, Oberösterreich ausgewählt.

#### Beschreibung des Modelleinzugsgebietes

Der Rindbach, auch als „Rinnbach“ bezeichnet, als südlicher Zubringer des Traunsees entwässert eine Gesamtfläche von 23,44 km<sup>2</sup> und entspringt an den West- und Nordwestabhängen der Angerlhöhe (1205 m) und wird von zahlreichen Bergen (Eibenberg 1598m, Grünangerl 1025 m, Schnellerplan 1411 m, Gaßkogel 1411 m und Erlakogel 1575 m) begrenzt. Sein 9,21 km langer Lauf ist vorwiegend nach Westen orientiert, im Mündungsbereich weist er eine scharfe Ablenkung nach Norden auf. Die Mündung in den Traunsee liegt auf 422 m Seehöhe.

#### Lage des Modelleinzugsgebietes Rindbach

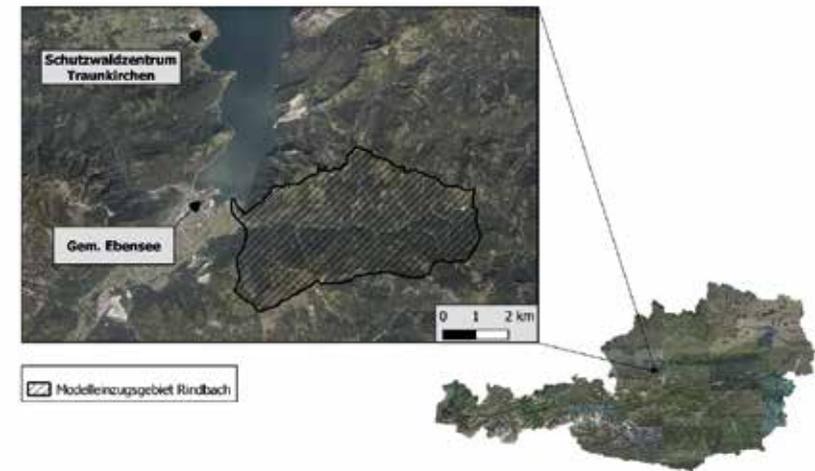


Abbildung 1: Übersicht über das Einzugsgebiet des Rindbaches

Figure 1: Overview of the Rindbach catchment area

Etliche Zubringer wie Eibengraben, Eibenberggraben, Waltersgraben, Häuseleckgraben, Kleiner Bärengraben, Lochbach, Karbentalgraben und Alpenhüttengraben münden in den Rindbach. Die Quellbäche sowie der Oberlauf weisen eine durchschnittliche Neigung von ca. 13 % auf, die Gefällsverhältnisse im Unterlauf bewegen sich zwischen 1 % und 2,5 %. Insgesamt untergliedert sich der Rindbach in 43 Teileinzugsgebiete.

### Geologischer Überblick

Das Einzugsgebiet zählt zu den nördlichen Kalkalpen und wird großteils von dolomitisierten Dachsteinkalk mit seinen abgelagerten Hang-

schuttsystemen dominiert. Oberhalb des Rindbachfalles (bei Kote 470 m) überwiegen Formationen der Trias. Ab hier verändert sich der Bachlauf zu einem tief in den Felsen eingekerbtem V-Tal. Der vorwiegend auftretende Hauptdolomit wird gegen Westen von Rhätkalken (Dachstein-Plattenkalken) überlagert. Das Lockermaterial besteht aus dem normal anfallenden Jungschutt. Zahlreiche würmeiszeitliche Talverfüllungen (Würm-Grundmoräne) bzw. Unterhangauflagen unterhalb des Rindbachfalles, welche ihren Ursprung in der Gletscherbewegung der letzten Eiszeit haben, neigen zu Rutschungen. Die Mündung in den Traunsee erfolgt über Alluvien des Trauntales.



Abbildung 2: Oberhalb der Rindbachfälle, einem Wasserfall mit bis zu 10 m hohen Abstürzen, ist im Mittellauf die Bachsohle zu weiten Teilen felsig (© Christoph Lainer, WLV).

Figure 2: Above the Rindbach Falls, which is a waterfall with drop-offs up to 10 m high, the stream bottom is rocky to a large extent in its middle section (© Christoph Lainer, WLV).

### Klimatische Verhältnisse

Die Niederschlagsverhältnisse sind stark durch den Nordstau der Alpen geprägt, wobei die abgeschirmte Lage hinter Traunstein und Erlakogelmasiv (Lee-Effekt) das Bachregime leicht abschwächt. Das ozeanisch getönte Gebirgsklima mit einem mittleren Jahresniederschlag von 1700 mm kann mit seinen West-, Nord- und Nordwest-Staulagen für kritische Wetterlagen sorgen. Konvektive sommerliche Gewitter mit Starkniederschlägen (Gewitterhäufigkeit 20–30 Tage/Jahr) können katastrophenauslösende Ereignisse herbeiführen, vor allem in einzelnen Teileinzugsgebieten sind

diese extrem kritisch. Der maximale beobachtete Einzelniederschlag wurde am 4.9.1922 mit 200 mm (Basisstation Ebensee) registriert. In den meist sehr schneereichen Wintern mit der Hauptwindrichtung Nordwest sorgt die Leewirkung für besondere Schneeakkumulationen. So führte dieser Effekt besonders nach den großflächigen Entwaldungen im Einzugsgebiet nach den großen Windwurfereignissen 2005–2009 (Sturmtief Kyrill, Paula und Emma) zu Lawinenabgängen (insbesondere die Häuseleckgrabenlawine) mit einem Wildholzeintrag von rd. 1.000 fm in die Rindbachschlucht.



Abbildung 3: Der Eibenberg (1598 m) als markante Erhebung im südwestlichen Teil des Einzugsgebietes. Im Zuge großflächiger Entwaldungen aufgrund von Sturmereignissen in den Jahren 2005–2009 und darauffolgender Borkenkäferkalamitäten sorgte eine verstärkte Leewirkung für Schneeakkumulationen, die den Abgang der Häuseleckgrabenlawine am 26.2.2009 begünstigte (© Christoph Lainer, WLV).

Figure 3: The Eibenberg (1598 m) as a prominent peak in the southwestern part of the catchment area. In the following years of large-scale deforestation due to storm events in 2005–2009 and subsequent bark beetle calamities, an increased lee effect caused snow accumulations, which was conducive to the avalanche of the Häuseleckgraben on 26.2.2009 section (© Christoph Lainer, WLV).

## Hauptprozess und Hydrologie

Die Prozesse Fluvialer Feststofftransport im Hauptbach und Murgang im Oberlauf sowie in den Teileinzugsgebieten bzw. Zubringerrunsen sorgen für eine 150-jährliche Geschiebefracht von rd. 30.000 m<sup>3</sup> (GF<sub>150</sub> gemäß GZP, 2004). Weite Strecken der Bachsohle und des Ufers im Mittellaufes sind felsig, die Geschiebemobilisierung beginnt vor allem in den hinteren Teileinzugsgebieten.

Das BE (HQ<sub>150</sub>) kann gemäß gültigen Gefahrenzonenplan der WLW für das Marktgemeindegebiet von Ebensee (Revision 2004) mit 100,00 m<sup>3</sup>/s (ermittelt nach Wundt, 90 % mod.) inkl. einem 10%igen Geschiebeanteil angegeben werden.

## Einfluss der Landnutzung

Das Einzugsgebiet ist vor allem durch seine hohe Waldausstattung geprägt, wobei die höchsten Punkte des Gebietes sich deutlich unterhalb der natürlichen Waldgrenze befinden. Weite Teile der zur Gänze im Besitz der Österreichischen Bundesforste AG befindlichen Wälder wurden durch die vorhin genannten Stürme sowie darauf folgende Borkenkäferkalamitäten stark in Mitleidenschaft gezogen. Bestand vor den Stürmen ein Bewaldungsprozent von rd. 90 %, so liegt dies derzeit bei rd. 60 %.

Durch die intensive Bergbautätigkeit für die Salzgewinnung wurden die Wälder im Salzkammergut in der Vergangenheit intensiv genutzt, so auch das Einzugsgebiet des Rindbaches. Speziell durch die Errichtung des Pfannhauses in Ebensee zwischen 1605 und 1607 waren die Wälder um Ebensee eine wichtige Quelle für Brennholz für die Salzversiedung.

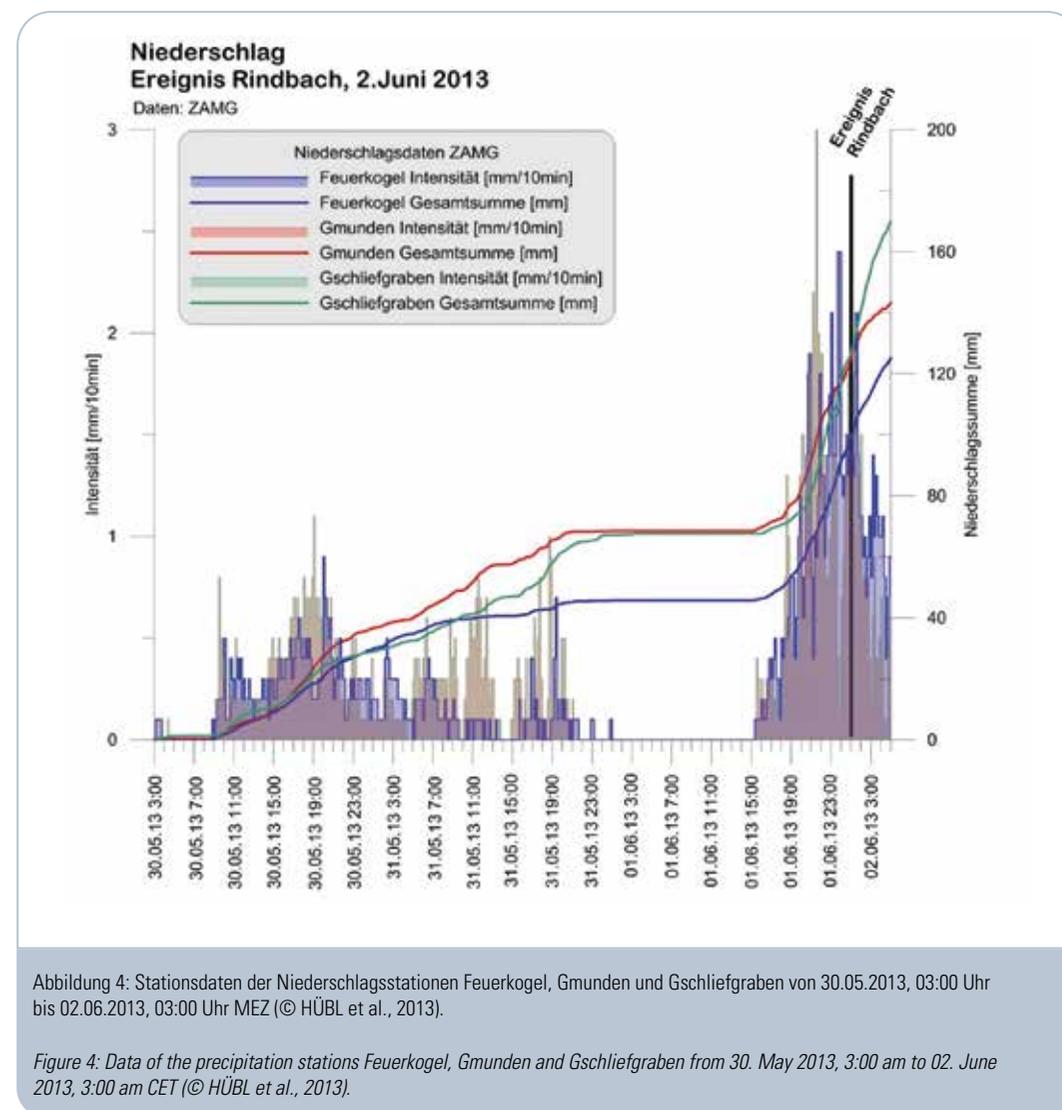
Im gleichnamigen Ortsteil Rindbach ist das Wildbacheinzugsgebiet stark besiedelt (567 EinwohnerInnen, Stand 01.01.2021), im Rindbachtal selbst befinden sich keine dauerhaft bewohnten Gebäude bzw. Siedlungskerne. Die Landwirtschaft spielt kaum eine Rolle, es herrscht extensive Grünland- und Weidewirtschaft vor.

## Ereignischronik und das Katastrophenereignis von 2013

Für das Wildbacheinzugsgebiet des Rindbaches sind Hochwasserereignisse aus den Jahren 1899, 1944, 1948, 1958, 1959, 1973, 1974, 1975, 1977, 1981, 2002, 2006, 2013 und 2014 bekannt. Die Ereignisse von 1899 und 2013 können dabei als Katastrophenereignisse angesehen werden.

Durch einen länger andauernden Regen kam es zwischen 01. Juni 2013 abends und 02. Juni 2013 vormittags im Wildbacheinzugsgebiet des Rindbaches zu einem sehr großen Hochwasserereignis. Die Niederschlagssumme der von der Station Ebensee aufgezeichneten Werte betrug vom 30.5.2013 00:00 MEZ bis zum Ereigniszeitpunkt (2.6.2013, 00:00 MEZ) in etwa 140 mm. Die 4-Tages-Niederschlagssumme bis zum Folgetag des Ereignisses betrug dabei 230 mm.

Nach Aussagen von betroffenen Anrainern kam es am 02. Juni 2013 gegen 02:00 Uhr morgens zu umfangreichen Überflutungen im Siedlungsbereich. Grund dafür war der extreme Geschiebetrieb sowie die großen Mengen an mittransportiertem Unholz. Durch das Unholz kam es zu umfangreichen Verklausungen an Brücken und Stegen: bei hm 0,70 (Strandbadsteg; dieser wurde durch das Ereignis weggerissen), bei hm 4,95 (Loipernbrücke; diese wurde verschoben und stark beschädigt, sodass diese abgetragen werden musste), bei hm 9,20 (Jocher-



brücke; diese wurde ebenfalls beschädigt), bei hm 12,90 (Rindbachmühlsteg; dieser wurde beinahe vom Brückenpfeiler weggeschoben) sowie bei hm 24,50 (Wasserfallwanderwegsteg; dieser wurde total zerstört). Das größte Problem dabei stellten die Mittelpfeiler dieser Brücken dar. Weiters konnten Verklausungen durch Unholz an dem bachbegleitenden Uferbewuchs festgestellt werden. Bachaustritte und umfangreiche Überflu-

tungen konnten im Rindbach zwischen hm 1,50 und hm 2,60 (links- und rechtsufrig), zwischen hm 3,50 und hm 7,50 (größtenteils linksufrig), bei hm 9,30 (linksufrig) und zwischen hm 12,50 und hm 15,00 (linksufrig) verzeichnet werden.

Der für das Ereignis rekonstruierte Spitzenabfluss kann mit ca. 105 m<sup>3</sup>/s angegeben werden.

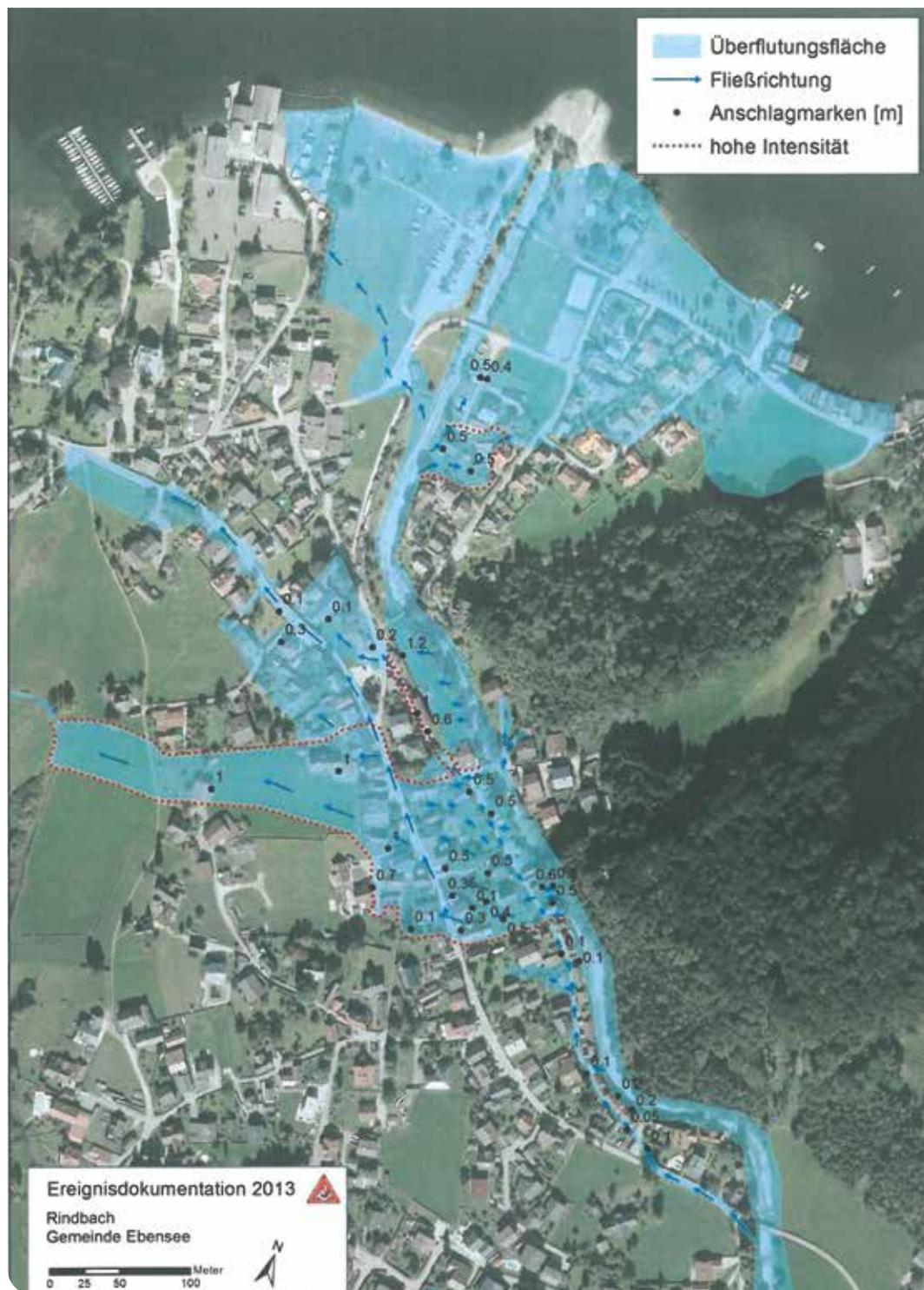


Abbildung 5: Beim Ereignis von 2013 überflutete Fläche im Ortsteil Rindbach (© HÜBL et al., 2013).

Figure 5: During the event from 2013 flooded area in the district Rindbach (© HÜBL et al., 2013).

Im Zuge des Ereignisses kam es weiters im hinteren Einzugsgebiet zu einer starken Geschiebemobilisierung. Das Geschiebe wurde zu großen Teilen hinter einer bestehenden Geschieberückhaltesperre bei hm 18,15 bzw. im flachen Bereich unterhalb des Rindbach-Wasserfalls abgelagert (bis hm 23,00). Im Ortsgebiet kam es zu Auflandungen im verbauten Bereich des Rindbaches (Auflandungshöhe zwischen 0,3 m bis 1,0 m) bis zum Traunsee. Die gesamte im Unterlauf abgelagerte Geschiebemenge kann mit ca. 40.000 m<sup>3</sup> angegeben werden. Dies ergibt eine spezifische Geschiebeablagerung von 17,4 m<sup>3</sup>/l<sub>fm</sub> Gerinnelänge.

Die abgelagerte Wildholzmenge im Unterlauf belief sich auf rund 300–400 fm. Mitunter sind durch starke Stämme (vermutlich Lawinenzholz aus dem taleinwärtigen Bereich) Verklausungen eingetreten, die zu Bachaustritten und zu Beeinträchtigungen an tiefliegenden Brückenbauwerken geführt haben. Wildholzablagerungen konnten auch bei der bestehenden Geschieberückhaltesperre bei hm 18,15 sowie bei einem rustikalen Unholzrechen (hm 19,60), der im Zuge des Ereignisses gänzlich verschottert wurde, festgestellt werden. Neben den Verschotterungen des Bachlaufes zwischen hm 0,00 und hm 23,00 verursachte das Hochwasser auch umfangreiche Schäden an der Unterlaufregulierung.

## Verbauungsprojekt 2015

Nach dem großen Hochwasser von 2013 wurde durch die Wildbach- und Lawinerverbauung, GBL OÖ. West ein Hochwasserschutzprojekt ausgearbeitet. Das Projektziel besteht darin, den betroffenen Dauersiedlungsraum sowie die vorhandenen Infrastruktureinrichtungen der vorhandenen Gefährdungssituation angepasst zu sichern und eine nachhaltige Reduktion der Häufigkeit von Überflutungsereignissen im Ortsteil Rindbach sicherzustellen. Zur Verwirklichung dieses Schutzziels ist ein Maßnahmenbündel bestehend aus Geschiebe- und Unholzrückhalt im Mittellauf bzw. am Beginn des Unterlaufes sowie eine Vergrößerung des Abflussquerschnittes im Unterlauf des Rindbaches zwischen hm 0,00 und hm 17,00 erforderlich. Zusätzlich soll das Verklausungsrisiko an den zahlreichen Brückenbauwerken zwischen hm 3,67 und hm 12,93 durch Umbau derselben (Entfernung der Brückenpfeiler) im Ereignisfall minimiert werden.

Vor allem durch die geschiebe- und unholzausfilternden Maßnahmen im Mittellauf bei hm 20,70 (geplanter Unholzrechen in Stahlbetonbauweise) sowie bei hm 53,60 (geplante Geschiebesortiersperre mit Grobrechen) soll die Geschiebefracht des Bemessungsereignisses sowie der enorme Wildholzanfall durch zwei Filterbauwerke, welche gemäß ONR 24803 als Schlüsselbauwerke einzuordnen sind, zurückgehalten werden. Zusätzlich soll in einigen Zubringergerinnen durch Erosionsschutz- und Stabilisierungsmaßnahmen eine weitere Geschiebemobilisierung minimiert werden.



Abbildung 6: Im Jahr 2020 fertiggestellter Wildholzrechen bei hm 20,70 (© WLV, 2021).

Figure 6: Wood rake at hm 20,70, completed in 2020 (© WLV, 2021).

### Projektsinhalt und Schwerpunkte

Mit Beginn im Sommer 2020 wurde eine Vielzahl an Projektzielen und Forschungsfragen gesammelt, die in einem Projektzeitraum von 30 Jahren durch die Kooperationspartner aufgegriffen und in weiteren Teilprojekten – mit unterschiedlichen Finanzierungsmöglichkeiten – umgesetzt werden

sollen. Vier Themengebiete dienen als übergeordnete Schwerpunkte:

- Wald
- Naturgefahren
- Jagd und Wildmanagement
- Ausbildung und Wissensvermittlung

Exemplarisch mit Schwerpunkt Hydrologie und Wassergefahren sind nachfolgend einige Forschungsfragen aufgelistet (Auszug):

#### Niederschlag und Abfluss

- Bestimmung der Hydrologie im Einzugsgebiet inklusive Charakterisierung hinsichtlich Konzentrationszeiten, Abflussreaktionsverhalten, kritische Regenereignisse, Abfluss im Untergrund mit Konnex zu geologischen und vegetationsökologischen Rahmenbedingungen sowie besondere Betrachtung im Forststraßenbereich und seinen Ausleitungssystemen
- Szenarien-Untersuchungen des Wasserhaushaltes und Abflussgeschehens verursacht durch Auswirkungen von historischen und aktuellen Landnutzungen, natürlicher Störungen, wasser-getriggerte Naturgefahrenprozesse und flächenwirtschaftliche Maßnahmen der Abflussprävention mit dem Ziel, Verbesserungen oder Standards für die Parametrisierung von N/A-Modellen in Wildbach-Einzugsgebieten abzuleiten
- Ermittlung des Einflusses des Waldes auf die Hydrologie auch unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Erfordernisse (Saline) unter Einbeziehung historischer und aktueller Daten der Waldinventur

#### Angedachte Methodik

- Verdichtung der Niederschlagsinformationen durch räumlich und zeitliche Verdichtung des Messnetzes (Wetterstationen) mit Berücksichtigung der Standortwahl (Gewitterzugrichtungen) und Naturgefahren: Erfassung

von Niederschlagsmenge/-art, Lufttemperatur, Strahlung, Wind, Verwendung der INCA-Daten (ZAMG), optisches Monitoring (Webcam mit Datenfernübertragung)

- Abflussmessung an mehreren Standorten (Pegelmessung) inklusive Trübesonden für den Rückschluss auf Sedimenttransport
- Vergleichende Auswertung von vergangenen und zukünftigen Ereignissen (Wetterradardaten und Stationsdaten, WLV-Wetterinformationsportal der ZAMG) sowie mit den verdichteten Daten
- Kartierung der untergrundabhängigen Abflusstypen, Quellen, Bestimmung des Einflusses der Höhlensysteme, Bestimmung der Abflusspfade (Feingerinnenetze), Altersbestimmung des Wassers
- Erstellung und Aufbereitung von N/A-Modellen
- Kalibrierung von N/A-Modellen und Verbesserung von deren Anwendungen (Anwendung für unbeobachtete EZG), Ableitung von Standards für die Parametrisierung von N/A-Modellen in Wildbacheinzugsgebieten

#### Hydraulik und Geschiebe im Einzugsgebiet

- Ermittlung von Ursachen der Feststoffbereitstellung sowie von Geschiebefrachten (inklusive Schwebstoffanteil), Erfassung von Ablagerungs- und Erosionsstrecken, auch unter Berücksichtigung historischer Änderungen des Bachlaufes und unter Einbeziehung der subaquatischen Schwemmkegelbildung

- Szenarienanalyse (Geschiebereaktionsverhalten) verschiedener Wildbachprozesse im Unterlauf in Abhängigkeit des hydrologischen Ereignisses und seiner Ausprägungen (Anlandung, Seitenerosion, Auflandung)

#### Angedachte Methodik

- Morphologische Kartierung des gesamten Bachlaufes inkl. der Zubringerrinne: Bestimmung von Gefälle, Breite, Einbauten, bordvoller Abfluss, Kornzusammensetzung, Sohlstruktur
- Erstellung und Interpretation einer Geschiebekartierung inklusive Verklauungsstellen, Erosionsdynamik, Anlandungen im Vorland am Schwemmkegel, Eintrag in den Vorfluter/Traunsee
- Abschätzung und Berechnung von Geschiebefrachten mit derzeit vorhandenen Möglichkeiten (z.B. durch Drohnenbefliegungen und Differenzenmodelle vorher und nachher)
- Verwendung verschiedenen Geschiebe-Messtechniken

#### Anschrift des Verfassers/Author's address:

DI Christian Pürstinger  
FTD für WLW Gebietsbauleitung OÖ. West  
Traunreiterweg 5, 4820 Bad Ischl  
christian.puerstinger@die-wildbach.at

DI Christoph Lainer

BMLRT – Abt. III/4 Wildbach- und  
Lawinenverbauung und Schutzwaldpolitik  
Marxergasse 2, 1030 Wien  
christoph.lainer@die-wildbach.at

#### Literatur/References:

HÜBL J., EISL J., SCHEIDL C., CHIARI M., WIESINGER T., HEISER M., SCHIMMEL A., TROJER M., REISCHENBÖCK G. (2013): Ereignisdokumentation 2013. IAN Report 155, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur – Wien, Seite 38 – 67, 2013.

ONR 24803 (2008): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Betrieb, Überwachung und Instandhaltung. ASI Austrian Standards Institute/ON Österreichisches Normungsinstitut – Wien, 2008.

WLW, GBL Salzkammergut (2004): Gefahrenzonenplan für das Marktgemeindegebiet von Ebensee, 1. Revision 2004 – Bad Ischl, 2004.

WLW, GBL OÖ. West (2015): Technischer Bericht zum Verbauungsprojekt Rindbach 2015, Marktgemeinde Ebensee – Bad Ischl, 2015.

Gmunden . Saalfelden . Oberalm . Kitzbühel

**mp**

ZIVILTECHNIKER  
GMBH

Ingenieurkonsulenten . Geologie und Hydrogeologie  
Geotechnik und Bauingenieurwesen . Naturgefahren und Umwelt

**Go ahead...**

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

- Wildbachverbauungen
- Schutzwasserbauten
- Böschungssicherungen
- Lawinenverbauungen
- Forst- und Güterwegen
- Landschaftspflegerische Begleitplanung
- Speicherteiche
- Schneeanlagengesamtlplanung
- Skipistenbau
- Schneileitungssystemen
- Wasser- und Quellsfassungen
- Wasserver- und entsorgung
- schiGIS®-Infosystem für Skigebiete
- uvm...

Holzstützverbauung  
Forst- und Güterwegplanung  
Alperschornbach

**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

**KLENKHART & Partner Consulting**

URSULA STEPHAN, WOLFRAM BITTERLICH

## Wildbachbuhnen als Ursache eines dynamischen Wellenbildes in Wildbachunterläufen

### *Groynes as a source of wave formation in torrents*

#### Zusammenfassung:

In Zusammenarbeit zwischen der Wildbach- und Lawinenverbauung und dem Bundesamt für Wasserwirtschaft werden Modellversuche über die Wirkungsweise von Buhnen durchgeführt. Im Rahmen der Versuche werden verschiedene Buhnenparameter, wie z.B. Buhnenlänge oder Buhnenabstand hinsichtlich ihrer Wirkung auf Strömung und Wellenbildung untersucht. Aus den bisher durchgeführten Versuchen zeigt sich eine eindeutige Abhängigkeit von Buhnenabstand bzw. Buhnenlänge und der Wellenhöhe.

#### Abstract:

*Within the scope of the recently developed co-operation between Torrent and Avalanche Control (Department for Ecology and Torrent Processes) and Federal Agency for Water Management (both Ministry for Sustainability and Tourism), laboratory experiments are conducted focussing on the effects of specific groynes parameters such as groynes length or groynes distance on the wave development in torrents. Preliminary results demonstrate the dependency between groynes parameters and the maximum wave height.*

#### Stichwörter:

Buhnen,  
Wellenhöhe,  
Ufererosion

#### Keywords:

Groynes,  
wave height,  
bank erosion

Im Rahmen von physikalischen Modellversuchen am Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung / Bundesamt für Wasserwirtschaft werden Versuche zur quantitativen Erfassung der Wirkungsweise von Buhnen auf Gewässer in einem Gefällebereich größer oder gleich 2 % durchgeführt, wobei der Fokus der Untersuchungen vor allem auf der Wirkung von Buhnen hinsichtlich Uferschutz, Strukturierungselement bzw. Geschiebelenkung liegt. Es wurden bisher Versuche mit Störsteinen mit unterschiedlicher Anordnung von Störsteinclustern durchgeführt (siehe auch Stephan et al., 2021). Eine strömungungünstige Anordnung von Störsteinen führte in diesen Versuchen zu einer Wellenbildung, deren Ausmaß je nach Durchfluss 30–70 % der Fließtiefe erreichte. Die sich daraus ergebende Strömungsdynamik erforderte die massive Einbindung

von Störsteinen in die Gewässersohle, um einer Erosion der Einbauten vorzubeugen. Die Einbindung der Störsteine in die Sohle betrug im Versuch rund 70 % der angeströmten Störsteinfläche.

In einem weiteren Versuch wurden zwei unterschiedliche Buhnenkonfigurationen mit einer Buhnenlänge von  $\frac{1}{4}$  der Flussbettbreite BF in versetzter Anordnung untersucht. Die Buhnenfeldlänge entsprach im oberen Abschnitt des physikalischen Modells der 2-fachen und im unteren Abschnitt der 3-fachen Flussbettbreite. Die Höhe des Buhnenkopfes wurde gleich der Höhe der Buhnenwurzel gewählt und entsprach näherungsweise einem HQ<sub>1</sub>. Die Buhnensteine können in die Steinklasse HMB1000/3000 eingeordnet werden, wobei ein Steingewicht von 2 t nicht unterschritten wurde. Im Mittel betrug es 2,5 t mit einer mittleren Kantenlänge der Steine von 1–1,5 m.



Abbildung 1: Grundriss eines Versuchs mit Buhnen mit Variation des Buhnenabstands

Figure 1: Plan view of the set-up of a laboratory experiment varying the groynes distance

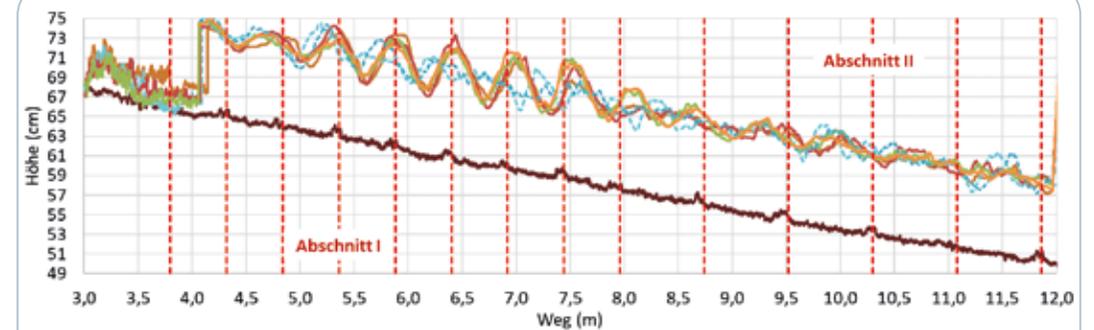


Abbildung 2: Gemessene Ausgangssohlenlage (braun) und Wasserspiegellagen während eines extremen Hochwasserereignisses

Figure 2: Measured bed (brown) and water levels during an extreme flood event

Alle Buhnensteine wurden einlagig verlegt. Jeder Buhnenstein wurde dabei mit halber Höhe in den Untergrund eingebunden. Im Grundriss wurden die Buhnen 2-reihig errichtet (siehe auch Abbildung 1), woraus sich eine Buhnenbreite von rund 20 % der Flussbettbreite ergibt. Diese Buhnenkonfiguration wurde mit einem Hochwasser-Extremereignis belastet und Sohl- und Wasserspiegellagen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Verlauf der Hochwasserwelle vermessen (Abbildung 2).

Aus diesem Versuch wurde klar ersichtlich, dass die sich ausbildenden Wellen massiv von der Buhnenkonfiguration beeinflusst werden, da sich in Abschnitt I deutlich größere Wellenhöhen als in Abschnitt II ausbilden, wobei lediglich der Buhnenabstand variiert wurde. Als Folge dieses Versuches wurde daher eine ergänzende Versuchsserie ohne bewegliche Sohle begonnen, die allein die Ausbildung der Wellenhöhen je nach Variation von Buhnenfeldlänge  $L_{BF}$ , Buhnenlänge  $L_B$  oder Buhnenhöhe  $h_B$  untersucht. Die bisher durch-



Abbildung 3: Ergänzende Versuchsreihe mit fester Sohle ( $L_{BF} = 0,75$  und  $1 \cdot B_F$  bzw.  $L_B = 1/3 \cdot B_F$ ) (Fotos: BAW 2021)

Figure 3: Additional experimental series with groynes on a fixed bed ( $L_{BF} = 0,75$  and  $1 \cdot B_F$  as well as  $L_B = 1/3 \cdot B_F$ ) (Photos: BAW 2021)

geführten Versuche umfassen die Variation der Buhnenfeldlänge zwischen  $L_{BF} = 0,75 - 2 \cdot B_F$  und die Variation der Buhnenlänge  $L_B = 1/3 - 1/6 \cdot B_F$  für eine Reihe verschiedenster Durchflüsse. Das Gefälle des Versuchsgerinnes entsprach mit 2 % dem Gefälle des morphologischen Modells (ausgewählte Buhnenkonfiguration in der Versuchsrinne, siehe Abbildung 3).

Die Auswertung der gemessenen Wasserspiegellagen hinsichtlich maximaler Wellenhöhen ist in Abbildung 4 ersichtlich. Hier zeigt sich, dass maximale Wellenhöhen nicht notwendigerweise mit einem maximalen Durchfluss korrelieren müssen. Es ist vielmehr so, dass es im Zusammenspiel von Fließgeschwindigkeit, Fließtiefe und den Buhnenparametern ungünstige

Zwischenzustände gibt, die zu einem Aufschaukeln der Wellen und damit zu maximalen Wellenhöhen führen können. Diese Zusammenhänge zu parametrisieren, ist das Ziel dieser ergänzenden Versuchsreihe, um ungünstige Wellenformationen zu vermeiden, die Uferanrisse oder auch eine großflächige Erosion von Ufersicherungsmaßnahmen bewirken können.

Weitere Untersuchungen werden sich mit der Anlandungs- und Erosionsdynamik von Geschiebe im Nahbereich der Buhnen befassen. Im speziellen sollen die Ausbildung von Kolken, ihre Ausdehnung und Tiefe rund um den Buhnenkopf sowie die Lokalisierung von für Uferanrisse besonders gefährdeten Bereichen beleuchtet werden.



Abbildung 4: Vergleichende Gegenüberstellung der Wellenhöhen aufgrund ausgewählter Kombinationen von Buhnenparametern

Figure 4: Comparison of wave heights depending on the combination of specific groynes parameter

**Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:**

DI Dr. Ursula Stephan  
 Institut für Wasserbau und  
 hydrometrische Prüfung  
 Bundesamt für Wasserwirtschaft  
 Severingasse 7, 1090 Wien  
 ursula.stephan@baw.at

DI Dr. Wolfram Bitterlich  
 Fachbereich Ökologie  
 Wildbach- und Lawinenverbauung  
 Gebietsbauleitung OÖ West  
 Traunreiterweg 5, 4820 Bad Ischl  
 wolfram.bitterlich@die-wildbach.at

**Literatur/References:**

STEPHAN, U., KAINZ, S., HENGL, M. et al.  
 Wasserbauliche Modellversuche zu Bühnen in steilen Gewässern – Möglichkeiten und Grenzen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 73, 134–143 (2021).



- Stahlschneebrücken
- Gleitschneebrücken
- Dreibeinböcke aus Stahl
- Triebschneewände
- Lawinenablenkwände
- Stahlteile für Schutzbauten



- System Farfalla Böschung
- System Farfalla Bachverbauung



# Integration im WAC.3<sup>®</sup> Cockpit

Zusammenwachsen  
 aller relevanten Daten



**WYSSSEN** avalanche  
 switzerland control

**Wyssen Austria GmbH**  
 6020 Innsbruck  
 +43 664 8822 9015  
 austria@wyssen.com  
 www.wyssen.com

# Aktuelles aus Wissenschaft und Praxis

Michael Berner, Markus Waibel:  
**Bemessungstool für Wildholzrechen lt. ONR 24802:2011 auf Excel-Basis**

Seite 196

Magnus Kramer, Johannes Kammerlander:  
**Simulation von Murgängen mit dem Lawinenmodell SamosAT**

Seite 200

Markus Moser, Gerald Jäger, Johannes Kammerlander, Michael Botthof,  
Stefan Janu, Christian Pürstinger, Gerhard Holzinger, Susanne Mehlhorn:  
**Neue Wege in der Wissensvermittlung – WEBINAR SERIES des Fachzentrum  
Wildbachprozesse**

Seite 205



## Naturgefahrenschutz

Sicherheit ohne Kompromisse

MICHAEL BERNER, MARKUS WAIBEL

## Bemessungstool für Wildholzrechen lt. ONR 24802:2011 auf Excel-Basis

### Zusammenfassung

Wildholz- und Geschieberechen sind zentrale Elemente des Schutzes vor Wildbächen. Ihre wesentliche Aufgabe ist es, schadbringendes Wildholz oder Geschiebe zurückzuhalten. Sie schützen entweder als Einzelbauwerke oder als „Filterelemente“ einer Wildbachsperre. Die statische Dimensionierung erfolgte bisher bei kleineren Bauwerken aufgrund von Erfahrungswerten und bei größeren/komplexeren Bauwerken durch umfangreiche Berechnungen.

Ziel des vorliegenden Bemessungstools ist es, eine einfache und somit kostengünstige, einheitliche und dem Stand der Technik entsprechende Bemessung von einfachen Wildholzrechen auf Excel-Basis im Dienstzweig zu ermöglichen. Reine Abschätzungen, „Angstzuschläge“ und Vergaben an Dritte sind dadurch großteils vermeidbar. Auf einem übersichtlichen Excel-Blatt sind alle notwendigen Eingabeparameter, Skizzen und die Ergebnisse der Endbemessung samt den selbst wählbaren Dimensionen der Rechenstäbe und Hauptträger dargestellt.

Auf Knopfdruck wird die Bemessung von Deckblatt, Eingabewerten, bemaßten Skizzen von Längs- und Querschnitt, sowie den Endergebnissen auf nur drei A4-Seiten als fertige Projektsbeilage generiert.

### Welche Rechen können bemessen werden?

Das vorliegende Bemessungsprogramm ist für die Berechnung von Wildholzrechen der Wildbach- und Lawinverbauung mit einer maximalen Breite von 10,0 m bzw. einer maximalen Höhe von 10,0 m kon-

zipiert. Die Organismenpassierbarkeit berücksichtigend kann der Rechenabstand zur Sohle zw. 0 m und 1,5 m gewählt werden.

### Mögliche Rechenformen:

- Einfacher Schrägrechen, wahlweise auf 2 oder 3 Querträgern aufgelagert.
- Schrägrechen mit oberem horizontalem Teil, wahlweise auf 3 oder 4 Querträgern aufgelagert.

### Mögliche Gerinnequerschnitte:

- rechteckig
- trapezförmig

### Wählbare Bemessungsparameter lt. ONR 24802:2011 (u.a.):

- Höhe, Breite, (Länge), Neigung, Achsabstand
- Mit oder ohne statischer Ersatzlast  $F_E$
- Fließgeschwindigkeit
- Wichte Wasser mit Geschiebe
- Wichte Erdreich
- Hydraulische Überströmhöhe

Die ungünstigste der folgenden drei Einwirkungskombinationen wird dabei vom Programm automatisch für die Bemessung herangezogen:

- EK B – Verlandungsraum nicht verlandet, ohne Sickerströmung
- EK D – Verlandungsraum teilverlandet, ohne Sickerströmung
- EK B – Verlandungsraum vollständig verlandet, ohne Sickerströmung

### Dimensionierung

Die Dimensionierung kann vom Anwender frei aus folgenden Stahlprofilen und Stahlgüten gewählt werden.

- **Stahlgüten:** S235, S275, S335
- **Querträger:** I-Profile der Reihe HEA, HEB, HEM
- Hier werden die exakte Einbauhöhe des Trägers, die seitliche Mindesteinbautiefe (in Grobsteinschichtung, Ufermauer oder Sperre) und die erforderliche Trägerlänge vom Programm als Ergebnis ausgegeben.
- **Stäbe:** Rechteck-Hohlprofile von RRO 60x40x3 bis RRO 500x300x16

### Planungsüberlegungen

#### Stababstand

Die Erfahrung des Autors zeigt, dass die Stababstände der Rechen tendenziell zu eng gewählt wurden. Ist der Rechen einem Rohr/Durchlass vorgeschaltet, so scheint aktuell ca. der halbe Rohrdurchmesser als Stababstand sinnvoll.

Größere Stababstände haben auch den Vorteil (infolge der geringeren Verklauungsanfäll-

igkeit durch Wildholz), dass – je nach Schutzziel – mehr „nicht-schadbringendes“ Geschiebe durchgeschleust werden kann. Dadurch ergeben sich 2 wesentliche Vorteile:

- geringere Erosionsanfälligkeit im Unterlauf
- geringere Kosten durch weniger Räumungsaufwand

#### Offene Sohle

Wenn aus schutztechnischen Gründen eine offene Sohle, also ein Abstand zw. Rechenunterkante und Sohle möglich ist, sollte dies jedenfalls ausgeführt werden:

- geringere Verklauungsanfälligkeit des Rechens und somit geringerer Erhaltungsaufwand
- verbesserte Organismenpassierbarkeit, tlw. Forderung der Sachverständigen

#### Rechenform mit oberem horizontalem Teil

Der obere horizontale Teil eines Rechens ermöglicht (zusätzlich) die Ablagerung von Wildholz und verhindert ein Zurückrutschen des Wildholzes nach dem Ereignis in das freizuhaltenen Abflussprofil und kann somit die Durchgängigkeit/Funktionsfähigkeit des Rechens länger gewährleisten.

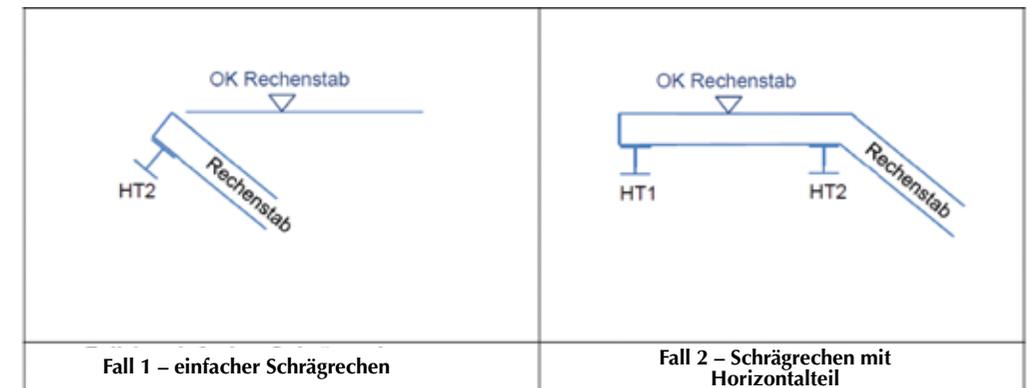


Abbildung 1: Das Bemessungstool kann für einfache Schrägrechen und Schrägrechen mit Horizontaltail verwendet werden

## Rechenzähne

Damit, insbesondere bei Rechen mit einem horizontalen Abschluss, das Wildholz nicht wieder über diesen horizontalen Teil ins Unterwasser geschoben werden kann, bewährt es sich, beispielsweise rund 30 cm hohe, vertikale „Zähne“ am bachabwärtigen Ende des Horizontalteils aufzuschweißen, damit dort das Wildholz zurückgehalten werden kann. Auch bei Schrägreden bewähren sich derartige

„Zähne“. Beide Varianten können beim vorliegenden Bemessungstool ohne weiteren Nachweis ausgeführt werden.

## Abflussprofil

Bei der hydraulischen Dimensionierung des Abflussprofils eines Wildholzrechens ist zu berücksichtigen, dass umfangreiche Wildholz-

teile in das Abflussprofil ragen können und somit den Abflussquerschnitt und die Abflussgeschwindigkeit wesentlich verringern können. Somit ist, wenn möglich, einer großzügigen Dimensionierung der freien Abflusssektion der Vorrang zu geben.

Abbildung 2: Auf nur einer Excel-Seite finden sich übersichtlich alle Eingabeparameter samt bemaßten Skizzen und können Rechenstäbe und Hauptträger sofort dimensioniert und optimiert werden. Diese Seite dient ausgedruckt als erste Seite der fertigen Projektsbeilage.

Bemessung Wildholzrechen Version V 1.0		Wildbach- und Lawinenerbauer Forsttechnischer Dienst	
<b>Eingabe</b>			
<b>Rechengeometrie</b>			
Systemauswahl	Fall 2	<b>Schrägreden mit Horizontalteil</b>	
Anzahl der Hauptträger am Rechen	3		
Lage Hauptträger 2	vertikal		
Statische Ersatzlast $F_E$ ansetzen	<input type="checkbox"/>		
Stahlgüte Rechenstäbe	S235		
Stahlgüte für alle Hauptträger	S235		
Rechenstab Dimension	RRO 200x100x10		
Hauptträger 1 - HT1	HE-B 200		Träger OK $\eta=0,60$
Hauptträger 2 - HT2	HE-A 500		Träger OK $\eta=0,44$
Hauptträger 3 - HT3	HE-A 400		Träger OK $\eta=0,84$
Hauptträger 4 - HT4	HE-A 400	Träger OK $\eta=0,56$	
<b>Eingaben Geometrie</b>			
Gerinnequerschnitt	Trapez		
Gerrinnebreite unten $B_u$	2,50 m		
Gerrinnebreite oben $B_o$	5,00 m		
Gerinnehöhe $H_G$	7,00 m		
Rechenhöhe vertikal	4,00 m		
Winkel Rechen	45 °		
Rechenabstand zur Sohle	0,50 m		
Achsabstand Rechenstäbe	0,50 m	Lichte Weite = 0,4m	
Länge horizontaler Rechenabschnitt	2,05 m		
<b>Eingaben WLV</b>			
Wichte Wasser mit Geschiebe	13 kN/m <sup>3</sup>		
Fließgeschwindigkeit	4 m/s		
Wichte Erdreich	20 kN/m <sup>3</sup>		
Wichte Erdreich unter Auftrieb	10,0 kN/m <sup>3</sup>		
Erdruehdruckbeiwert $K_0$	0,5 [-]		
Statische Ersatzkraft $F_E$	350 kN		
Abflußhöhe aus hydr. Bemessung	1,50 m		
Höhe $h_{dyn}$ für Ermittlung von $A_{dyn}$	2,0 m	(Breite entspricht Rechenbreite)	

## Bemessungsergebnisse

Normen: ONR 24801:2013, ONR 24802:2011, ÖNORM EN 1993-1-1:2014, ÖNORM B 1993-1-1:2017

### Ergebnisse Zwischenwerte

$P_w$	208,0 kN
$w_{dyn}$	20,8 kN/m <sup>2</sup>

### Daten für Hauptträger

	Einbauhöhe (Trägerachse) über GOK [m]	Mindesteinbindetiefe in Ufermauer [m]	erf. Trägerlänge [m]
Hauptträger 1 - HT1	4,20m	0,60m	5,20m
Hauptträger 2 - HT2	4,05m	0,60m	5,15m
Hauptträger 3 - HT3	0,74m	0,40m	3,56m
Hauptträger 4 - HT4	2,40m	0,60m	4,56m

## Anschrift der Verfasser

DI Michael Berner  
KMP ZT-GmbH  
Niederlassung Pucking  
Hobelweg 4  
4055 Pucking  
berner@kmp.co.at

DI DI Markus Waibel  
Wildbach- und Lawinenerbauer  
Gebietsbauleitung Oberösterreich Ost  
Garnisonstr. 14  
4560 Kirchdorf  
markus.waibel@die-wildbach.at

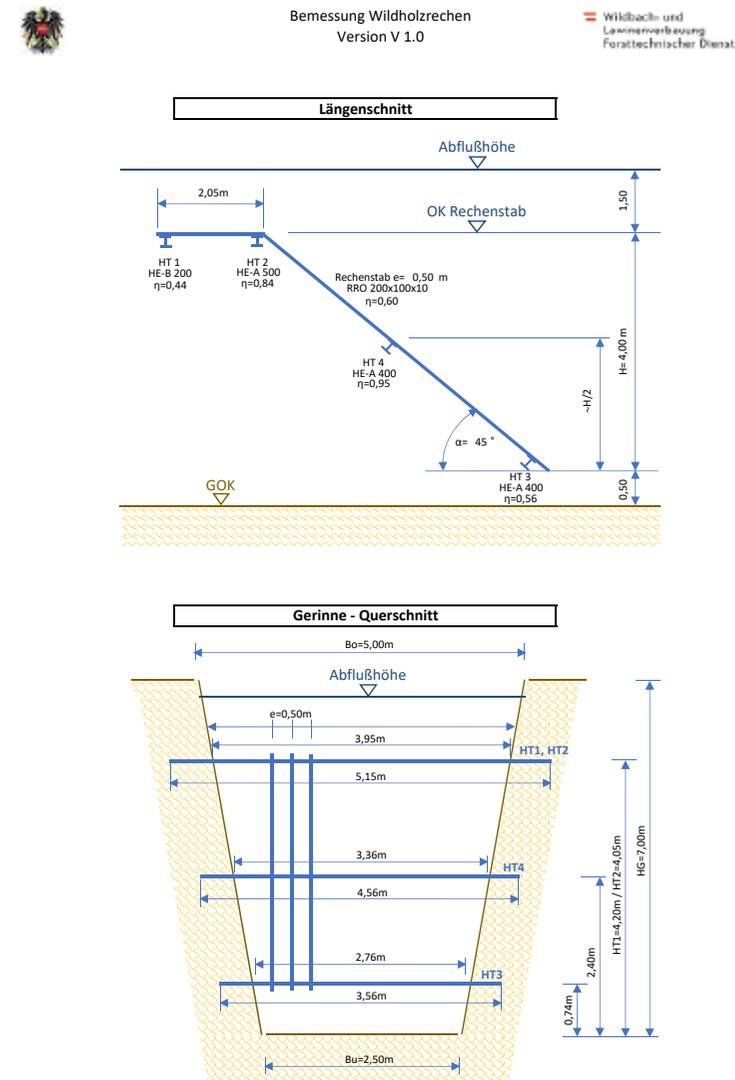


Abbildung 3: Automatisch generierte Seite 2 des Ausdrucks mit Längenschnitt und Querschnitt und den bemaßten Skizzen und Trägerbezeichnungen samt Wirkungsgrad/Ausnutzung als fertige Projektsbeilage

MAGNUS KRAMER, JOHANNES KAMMERLANDER

## Simulation von Murgängen mit dem Lawinenmodell SamosAT

### Debris-flow modeling with the avalanche simulation tool SamosAT

#### Zusammenfassung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde untersucht, ob das Lawinensimulationsmodell SamosAT auch für die Modellierung von Murgängen herangezogen werden kann. Es wurden zwei gut dokumentierte Murgangereignisse (Sattelbach im Jahr 2013 und Tronitzerbach im Jahr 2016) mit SamosAT rückgerechnet. Hierzu wurden verschiedene rheologische Modelle verwendet. Das Ergebnis der Masterarbeit zeigt, dass sich SamosAT grundsätzlich auch für die Modellierung von Murgängen eignet. Viele Ansätze der ursprünglichen Modellstruktur können übernommen oder entsprechend modifiziert werden. Die hohe Sensitivität der Eingangsparameter, insbesondere für das rheologische Modell, erfordert aber weitere Rückrechnungen und Tests dieser Art.

#### Abstract

This study uses the Austrian avalanche simulation tool SamosAT to model the propagation debris-flows. In two case studies, SamosAT is tested with different rheologic models. The two observed debris-flow were back-calculated properly. However, the input parameters are crucial and more tests are necessary.

#### Stichwörter (Keywords)

Murgang, Modellierung, SamosAT  
Debris flow, modelling, SamosAT

#### Einleitung

Die Untersuchung von Naturgefahrenprozessen stellt ein zentrales Aufgabenfeld der WLV dar. Die signifikanten Veränderungen von Disposition und Schadenpotential führen dazu, dass eine stetige Entwicklung von verbesserten Analyseverfahren notwendig ist (Wagner & Suda, 2006). Aufgrund des technischen Fortschritts in den letzten Jahrzehnten können heutzutage vermehrt computerbasierte Simulationsprogramme zur Modellierung von Naturgefahrenprozessen eingesetzt werden.

Aufgrund diverser Korrelationen zwischen dem Prozessgeschehen von Murgängen und Fließlawinen wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Kramer, 2020), das numerische Fließlawinenmodell SamosAT angepasst, kalibriert und folglich auf dessen Performance zur Berechnung von Murgangereignissen untersucht. Bei beiden Phänomenen handelt es sich um Fließprozesse, die mit ähnlichen physikalischen Grundgleichungen beschrieben werden können (Rickenmann, 1996; Stoffel et al., 2006). Zentral wurde in diesem Zusammenhang auf das rheologische Modell eingegangen, welches das Fließ- und Deformationsverhalten von Materialien beschreibt.

#### Untersuchungsgebiete

Als Grundlage für die Anpassung und Kalibrierung des SamosAT-Modells dienten zwei gut dokumentierte Murgangereignisse aus dem österreichischen Alpenraum.

Das Event I ereignete sich im Juni 2013 am Sattelbach, welcher in der Gemeinde Hütttau im Pongau in den Fritzbach mündet. Nach einer dreitägigen Vorregenperiode initiierte schließlich ein Starkregenereignis eine Rutschung, welche als auslösendes Ereignis für den Murgang betrachtet wird.

Der zweite untersuchte Murgang (Event II) fand im August 2016 am Tronitzerbach, oberhalb der Gemeinde Afritz in Kärnten, statt. Sehr intensive Tiefenerosion im Hauptgraben, speziell im Ober- und Mittellauf, führte zur Murgangentstehung. In der Ereignisdokumentation wurde, anders als beim Murgang am Sattelbach, eine Murgangganglinie rekonstruiert.

#### Methode

Für die Simulation von Fließprozessen sind die Randbedingung (Massenstrom, der in das Modell einfließt) und die Rheologie (physikalische Beschreibung des Fließverhaltens) entscheidend (Socio et al., 2007).

Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlage (Anbruchfläche der Rutschung im Sattelbach und Murgangganglinie im Tronitzerbach) wurden folglich zwei unterschiedliche Ansätze für die Randbedingungen bzw. den Murgangstart gewählt:

- Für die Simulation des Event I am Sattelbach wurde, in Anlehnung an eine Lawinensimulation, ein *Anbruchpolygon* mit einer bestimmten Mächtigkeit und Materialdichte definiert. Das Entrainment, welches die Materialaufnahme (Erosion) beim Durchgang des Murgangs beschreibt, wurde über das SamosAT-Modul „Globale Schneeaufnahme“ definiert. Die Festlegung der potentiellen Entrainmentmasse erfolgte über den Vergleich und die Interpretation von modellierten und tatsächlichen Ablagemassen.
- Für die Simulation des Events II am Tronitzerbach wurde über das SamosAT-Modul *Punktquelle* versucht, eine Murgangganglinie nachzustellen. Dieses Modul (in seiner derzeitigen Form) bietet die Möglichkeit, einen konstanten Massenstrom in das Modell einfließen zu lassen. Es kann also keine Ganglinie im engeren Sinn vorgegeben werden, sondern nur ein konstanter Zuflusswert. Es muss hierfür unter anderem die Menge (kg/s), die Zuflussgeschwindigkeit (m/s) und Zuflussbreite (m), sowie die Zuflussdauer (min) angegeben werden. Ein Entrainment wurde für die Simulation des Event II nicht berücksichtigt, da sich die rekonstruierte Murgangganglinie bereits auf den Schwemmkegel bezog.

SamosAT bietet die Möglichkeit unterschiedliche Fließgesetze (rheologische Modelle) miteinzubinden. Für die Anwendung von SamosAT auf Murgänge wurden folgende drei rheologische Modelle getestet:

- zum einen das klassische, für Lawinen entwickelte *Voellmy-Modell*, bei welchem die Fließeigenschaften über die Reibungsparameter  $\mu$  (Trockenreibung) und  $\xi$  (turbulent-dispersive Reibung) gesteuert werden,
- des Weiteren wurde das rheologische *Bingham-Modell* in SamosAT implementiert. Hierzu sind die Mindestschubspannung  $\tau_0$  und die Viskosität des Bingham'schen Fluids  $\eta$  zu definieren.
- und außerdem wurde die *Quadratic Rheologie* nach O'Brien und Julien (1985), welche auch im Murgangmodell Flo2d (FLO-2D Software, Inc.) implementiert ist, verwendet. Diese *Quadratic Rheologie* beinhaltet alle vier zentralen Reibungsmechanismen von hyperkonzentrierten Fließprozessen. Nach Julien & Lan (1991) sind dies die Kohäsion zwischen den Sedimentpartikeln (ausgedrückt durch die Mindestschubspannung  $\tau_0$ ), die viskose Reibung zwischen dem Reinwasseranteil und den geförderten Partikeln (ausgedrückt durch die Viskosität  $\eta$  und den Fließwiderstandsparameter  $K$ ), die Turbulenz des Fließprozesses, sowie Partikelkollisionen innerhalb der Masse (ausgedrückt durch den turbulent-dispersen Widerstandsbeiwert  $n_{td}$ ).

Die Parametrisierung dieser drei rheologischen Modelle erfolgte anfangs mit gängigen Literaturwerten. Über diverse Kalibrierverfahren, sowie Sensitivitätsanalysen wurden die empirischen Parameter schließlich weiter angepasst und optimiert. Das Ziel war die bestmögliche Nachbildung der dokumentierten Murgänge. Die

Bewertung der einzelnen Simulationen erfolgte mit der Gegenüberstellung des beobachteten und modellierten Ablagerungsgebiets, den berechneten Ablagerungskubaturen und der Plausibilität der Fließgeschwindigkeiten.

### Ergebnisse

Die besten Ergebnisse ergaben sich mit der Quadratic Rheologie, dicht gefolgt vom *Voellmy-Modell*. Abbildung 1 zeigt die Best-Fit-Modellierungen für die beiden untersuchten Murgänge, einmal mit der *Quadratic Rheologie* (Abbildung 1, links) und dem *Voellmy-Modell* (Abbildung 1, rechts).

Hinsichtlich dem gesamten Ablagerungsgebiets (Murgangausdehnung) sind die Ergebnisse mit dem *Voellmy-Modell* und der *Quadratic Rheologie* sehr ähnlich. Am Tronitzerbach werden hingegen die Fließgeschwindigkeit und Fließhöhe mit der *Quadratic Rheologie* deutlich besser und am Sattelbach in etwa gleich gut wie mit dem *Voellmy-Modell* nachgebildet.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass das SamosAT-Modell die untersuchten Ereignisse, unabhängig des genutzten rheologischen Gesetzes, flächenmäßig unterschätzt. Dieser Effekt scheint auch aufgrund einer übermäßig hohen Geländeabhängigkeit vorzuliegen. So werden bei beiden Untersuchungsgebieten vor allem die dokumentierten Bereiche bezüglich lateraler Ausbreitung nicht korrekt wiedergegeben. Dieser Effekt zeigt sich auch anhand der simulierten Fließ-/Ablagerungshöhen im vorherrschenden Gerinne. Es ergeben sich in diesem Zusammenhang oftmals überschätzte Fließhöhen entlang des Wildbachgrabens. Die modellierten Fließgeschwindigkeiten können tendenziell ebenfalls als eher zu hoch betrachtet werden.

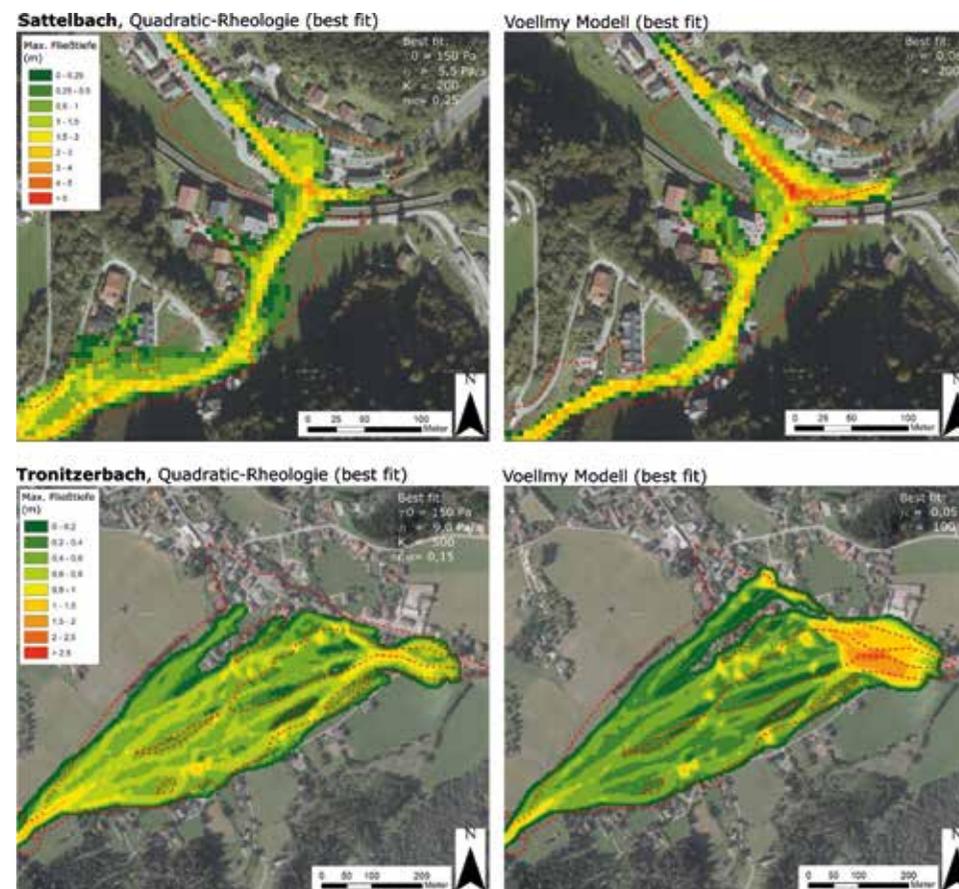


Abbildung 1: Ergebnisse der Rückrechnung beider Events mit SamosAT mit der *Quadratic-Rheologie* (links) und dem *Voellmy-Modell* (rechts). Die kartierte Ausdehnung der Murgänge auf den Schwemmkegeln ist als rot gestrichelte Linie dargestellt.

Figure 1: Results of the back-calculation of two debris-flow events by using SamosAT in combination with the *Quadratic-Rheologie* (left) and the *Voellmy-model* (right). The red line indicates the observed debris-flow outlines.

## Erkenntnisse, Blick in die Zukunft

Die Untersuchungen, welche im Zuge dieser Masterarbeit (Kramer, 2020) durchgeführt wurden, liefern diverse Erkenntnisse bezüglich der Nutzung des Lawinenmodells SamosAT zur Berechnung von Murgängen. In diesem Kontext werden neben Potentialen des Modells auch Problematiken oder Limitierungen ersichtlich.

Vorweg konnte festgestellt werden, dass das SamosAT-Modell zur groben Einschätzung von granularen Murgängen herangezogen werden kann. Viele grundsätzliche Ansätze der ursprünglichen Modellstruktur können übernommen oder angepasst genutzt werden. So stimmen auch die Ergebnisse dieser Untersuchungen gut mit vergleichbaren, vorhergegangenen Untersuchungen überein. Die Sensitivität der rheologischen Parameter verhält sich im SamosAT-Modell ebenfalls sehr ähnlich wie bei anderen, etablierten Murgangmodellen.

Das rheologische Gesetz stellt dementsprechend auch im SamosAT-Modell den zentralen Einflussfaktor bezüglich der Modellperformance dar. Die Wertebereiche der rheologischen Parameter aus einschlägiger Literatur weisen große Bandbreiten auf. Boniello et al. (2010) erläutern dazu, dass die Parametrisierung der Rheologie bei der numerischen Simulation von Murgängen grundsätzlich einen so starken Einfluss auf die Modellergebnisse besitzt, dass dabei kaum Verallgemeinerungen getätigt werden können. Um hier eine Verbesserung zu erreichen, sind Rückrechnungen von dokumentierten Murgängen, wie sie in dieser Arbeit gemacht wurden, essentiell und weiter notwendig.

Mit dem modellinternen Modul Punktquelle wurde am Tronitzerbach getestet, ob SamosAT auch mit einer stark vereinfachten (konstanten!) Murgangganglinie betrieben werden kann. Die Ergebnisse können speziell für das *Voellmy-Modell* und die *Quadratic Rheologie* als recht sinnvoll betrachtet werden. Die fehlende zeitliche Komponente der tatsächlichen Murganggang-

linie wirkt sich für Event II im Tronitzerbach nicht negativ auf die Modellperformance aus. Trotzdem sollte eine Möglichkeit geschaffen werden, auch einen zeitlich veränderlichen Zufluss in SamosAT modellieren zu können.

### Anschrift der Verfasser/Author's adresses

MSc. Magnus Kramer  
Peter-Mayr-Straße 7, 6020 Innsbruck  
magnus.kramer@kompass.at

DI Dr. Johannes Kammerlander  
Gebietsbauleitung Außerfern  
Buchenort 2A, 6600 Lechaschau  
johannes.kammerlander@die-wildbach.at

### Literatur/References

BONIELLO, M. A., CALLIGARIS, C., LAPASIN, R., & ZINI, L. (2010). Rheological investigation and simulation of a debris-flow event in the Fella watershed. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(5).

JULIEN, P., & LAN, Y. (1991). Rheology of Hyperconcentrations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(3).

KRAMER, M. C. (2020). Anpassung und Kalibrierung des numerischen Lawinenmodells Samos-AT zur Simulation von alpinen Murgängen. Masterarbeit an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.

O'BRIEN, J. S., & JULIEN, P. Y. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. In: Bowles, D. S., *Delineation of landslide, flash flood, and debris flow hazards in Utah 85/03*.

RICKENMANN, D. (1996). Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung. In: Oddsson, B., *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse* (S. 397 - 407). Birkhäuser Basel.

SOSIO, R., CROSTA, G. B., & FRATTINI, P. (2007). Field observations, rheological testing and numerical modelling of a debris-flow event. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(2).

STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M., & HASSLER, G. (2006). Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(11).

WAGNER, K., & SUDA, M. (2006). Naturgefahren oder NaturGEFAHREN - Die Sichtweise von Wissenschaft, Verwaltungen und Bevölkerung auf Sturzfluten, Rutschungen und vergleichbare alpine Prozesse. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt*, 71. Jg., München.

MARKUS MOSER, GERALD JÄGER, JOHANNES KAMMERLANDER, MICHAEL BOTTHOF, STEFAN JANU, CHRISTIAN PÜRSTINGER, GERHARD HOLZINGER, SUSANNE MEHLHORN

## Neue Wege in der Wissensvermittlung – WEBINAR SERIES des Fachzentrum Wildbachprozesse

In „normalen Jahren“ wird vom Fachzentrum Wildbachprozesse jährlich ein sogenannter Anwenderkurs angeboten, der Praxisschulungen zu aktuellen Fragestellungen und gängigen Simulationsprogrammen in der WLW beinhaltet und immer gern besucht wurde. Aus bekannten Gründen lag der fachliche Austausch im letzten Jahr etwas auf Eis. Um auch ohne regelmäßige Kurse auf dem Laufenden zu bleiben, wurden vom Fachzentrum Wildbachprozesse jeden Dienstag 1.5 stündige Online- „Auffrischkurse“ zu aktuellen Entwicklungen, beginnend mit dem Fachhema Hydrologie und weiter zu Hydraulik, Geschiebe und Murgang angeboten. In den 13 Webinaren konnten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter regelmäßig in kleinen Häppchen die Neuigkeiten kennenlernen und auch mit den „alten Hasen“ fachliche Diskussionen führen. Die Gruppe des Fachzentrums Wild-

bachprozesse fungierte dabei auch als sogenannte „podcaster“ indem die Webinare alle aufgezeichnet wurden und interessierten Kolleginnen und Kollegen über die Conny zur Verfügung stehen. Insgesamt waren 350 Teilnehmer direkt an den Webinaren dabei (Anm.: Heutzutage würde man die Reiseersparnis wahrscheinlich in CO2 Mengen umrechnen). Abschließend muss man sagen, dass die WEBINARE den persönlichen Austausch nicht ersetzen können, aber jedenfalls den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern helfen, am Stand der Technik zu bleiben und aktuelle Fragen zu diskutieren. Zukünftig liegt sicher der Weg in einer Art hybriden Wissensvermittlung aus klassischen analogen Veranstaltungen an einem physischen Ort und virtuellen digitalen Events (Webinare, Podcasts).





Die nächste Ausgabe *Wildbach- und Lawinenverbau* erscheint voraussichtlich im Juni 2022 mit dem Schwerpunktthema „Aus der Praxis, für die Praxis“.

Möchten Sie einen Artikel zum nächsten Heft beitragen oder haben inhaltliche Vorschläge?

Wir freuen uns auf Ihre Unterstützung:  
[schriftleitung@wlv-austria.at](mailto:schriftleitung@wlv-austria.at)

Vorschau  
Heft 189

## Inserentenverzeichnis

Firma	Inserat Seite
Aartesys AG	U4
ALP-infra Consulting + Engineering GmbH	81
Geobrugg AG	49
Geolith Consult	71
Geomähr GmbH	80
Gunz ZT GmbH	45
Halbeisen & Prast KG	111
Hartl Consulting e. U.	93
Heli Austria GmbH	4
Ingenieurbüro Illmer Daniel e. U.	27
i.n.n.	37
J. Krismer HandelsgmbH	175

Firma	Inserat Seite
Klenkhart & Partner Consulting ZT GmbH	187
Mair Wilfried GmbH	192
MEVA Schalungs-Systeme GmbH/ Alzner Baumaschinen GmbH	6
mjp Ziviltechniker GmbH	186
PERZPLAN Ingenieurbüro	119
Gebrüder Rief Bau und Transport GmbH & Co KG	8
Gerhard Rusch Erdbau	129
Skolaut NATURRAUM	147
DI Werner Tiwald ZT GmbH	174
Trumer Schutzbauten GmbH	194
UNIDATA GEODESIGN GMBH	159
Wyssen Austria GmbH	193

# aartesys



## **AarteLink®** – Quantensprung im Naturgefahrenalarm

**AarteLink®** – das Naturtalent.  
Naturgefahrenalarm für Steinschlag, Murgang,  
Lawine und Hochwasser und vielem mehr.

Dank Funklösung ist **AarteLink®** schnell und flexibel  
einsetzbar und überzeugt durch die enorme  
Batterielebensdauer und hohe Funkreichweite.

**[www.aartelink.ch](http://www.aartelink.ch)**