



Universität für Bodenkultur – Wien  
Institut für Alpine Naturgefahren



# **Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren und deren Relevanz auf die Ausbreitung alpiner Murgänge**

Masterarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
**Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)**

eingereicht von:  
**Martin PFITSCHER BSc**

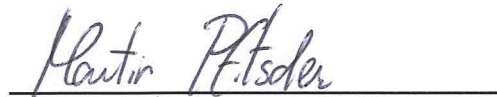
Betreuung:  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes HÜBL  
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland KAITNA

Wien, Jänner 2016

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Wien, 2016

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Martin Pfitscher', is written over a horizontal line.

Martin Pfitscher

# Danksagung

An dieser Stelle gilt mein Dank Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna und Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl, die es mir ermöglichten diese Masterarbeit zu verfassen. Danke für die gute Betreuung, die hilfreichen Tipps und die stets konstruktiven Ratschläge. Ein weiterer Dank gilt der Abteilung Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen mit Abteilungsdirektor Dr. Rudolf Pollinger für die freundliche Bereitstellung der Daten der Messstation am Gadriabach, sowie Dr. Pierpaolo Macconi für die zahlreichen, hilfreichen und vor allem schnellen Antworten. Weiters möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Matthias Platzer und Mag. Martina Reichegger für die Zurverfügungstellung des Flo2D-Projektes, die fachlichen Anregungen und das Korrekturlesen bedanken. Ein weiterer Dank gilt auch Dipl.-Ing. Stefan Janu vom Forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung und Dr. Bernhard Kohl vom BFW Innsbruck.

Den MitarbeiterInnen des Instituts für Alpine Naturgefahren möchte ich zudem für das angenehme und hilfsbereite Arbeitsklima danken. Vor allem der Sekretärin Monika, gebührt an dieser Stelle ein besonderer Dank für ihren unermüdlichen Einsatz für die Studenten und ihre stets freundliche Art.

Mein Dank gilt außerdem der Abteilung Wasserschutzbauten und dem Amt für Forstplanung der Autonomen Provinz Bozen, sowie Dipl.-Ing. Matthias Platzer für die lernreichen und interessanten Feriarbeiten.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, die mich immer motiviert und unterstützt hat. Vor allem meinen Eltern Evi und Christian, die mir dieses Studium erst ermöglichten und mir immer und in jeglicher Situation aufopferungsvoll beiseite standen, gilt ein außerordentlicher Dank. Auch über die nicht selbstverständlichen, zahlreichen Taxidienste Walten – Innsbruck, in selbst stürmischen Nächten, bin ich sehr dankbar.

Aber was wäre ein Studium ohne Studienkollegen und Freunde?

Bei meinen Studienkollegen und Freunden möchte ich mich ganz besonders für den schönen Lebensabschnitt in Wien bedanken. Egal ob auf Exkursionen, Partys, Spitzerständen, Oper, Musical, Theater oder einfach nur im Tirolerheim, stets fühlte ich mich in eurer Umgebung sehr wohl. Gemeinsam durften wir eine unvergessliche, lustige, aktionreiche Zeit in Wien verbringen, die ich nie missen werde.

Last but not least möchte ich mich bei meinen Freunden und Nachbarn aus der Heimat, Feuerwehrkameraden und „Alpenvereinlern“ bedanken, die mir immer auf verschiedenste Art und Weise zeigten, „dass es auch außerhalb der Stadt noch etwas gibt“ und mich stets auf den realistischen Boden zurückholten.

Vielen Dank an alle, die mich auf meinen bisherigen Weg unterstützt, begleitet, geleitet, beeinflusst und geprägt haben.

# Kurzfassung

Ein optimaler Schutz vor Murgängen ist eine wesentliche Voraussetzung für die nachhaltige Entwicklung alpiner Räume. Dafür werden vorausplanende Gefahrenzonenpläne erstellt, sowie umfangreiche Schutzkonzepte geplant und umgesetzt. Eine grundlegende Voraussetzung der Gefahrenabschätzung und Dimensionierung von Schutzbauwerken ist dabei die Bestimmung des Volumens sowie des Spitzenabflusses eines Murganges. Vor allem der Spitzenabfluss hat große Auswirkungen auf die Ausbreitung alpiner Murgänge. Dennoch bereitet dessen Bestimmung auch nach heutigem Erkenntnisstand große Schwierigkeiten und beinhaltet zahlreiche Unsicherheiten.

Der Stand der Technik zur Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses ist in Österreich die weltweit angewandte Methode des sog. Murgangsintensitätsfaktors. Der Murgang-Spitzenabfluss einer bestimmten Jährlichkeit errechnet sich dabei aus der Multiplikation des Reinwasser-Spitzenabflusses und des Murgangsintensitätsfaktors. Der Murgangsintensitätsfaktor kann hierfür aus Literaturdaten abgeleitet oder als Verhältnis des Murgang-Spitzenabflusses zum Reinwasser-Spitzenabfluss beobachteter Ereignisse bestimmt werden.

Das primäre Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, diese Methode durch die Erstellung einer Datengrundlage und der Ableitung nützlicher Zusammenhänge abzusichern. Hierzu wurden neben einer intensiven Literatursuche in einschlägiger Fachliteratur, Murgangsintensitätsfaktoren von drei beobachteten Ereignissen am Gadriabach (Südtirol) bestimmt. Die aufgezeichneten Murgang-Spitzenabflüsse wurden dabei mit den dazugehörigen Reinwasser-Spitzenabflüssen verglichen. Diese wurden mit Hilfe einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit dem Modell ZEMOKOST unter Anwendung zwei verschiedener Ansätze berechnet und mit einer weiteren Methode plausibilisiert.

Die Analyse der weltweit erhobenen Daten ergibt eine enorme Bandbreite des Murgangsintensitätsfaktors von 1-114. Mittels der Bestimmung einer Trendlinie ( $Q_{Murgang} = \sim 11 * Q_{Reinwasser}$ ) und der Berechnung von Hüllkurven können jedoch genauere Aussagen getroffen werden. Zusätzlich wurde eine Trendlinie auf Grundlage der im alpinen Raum erhobenen Murgangsintensitätsfaktoren bestimmt. Der Vergleich der erhobenen Murgangsintensitätsfaktoren mit herkömmlichen Berechnungsmethoden zeigt, dass diese Ansätze die Murgangsintensitätsfaktoren teils unterschätzen. Im Zuge der Festlegung oberer und unterer Grenzen kann zudem eine Trendänderung bei einem Reinwasser-Spitzenabfluss von etwa 10 m<sup>3</sup>/s beobachtet werden. Während die Grenzfunktionen unterhalb eines Reinwasser-Spitzenabflusses ( $Q_w$ ) von 10 m<sup>3</sup>/s einer quadratischen Funktion folgen, wird der Zusammenhang im Bereich  $Q_w > 10$  m<sup>3</sup>/s mit einer linearen Funktion beschrieben. Eine Korrelationsanalyse zeigt in weiterer Folge, dass der Murgangsintensitätsfaktor vermutlich mit steigender volumetrischen Feststoffkonzentration und Dichte des Murganges, sowie zunehmender Mobilisierungsintensität des Geschiebes steigt.

Die Untersuchung der Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf das Ausbreitungsverhalten von Murgängen ergibt zudem eine drastische Zunahme der Ablagerungsfläche mit zunehmendem Murgangsintensitätsfaktor.

Die Methode des Murgangsintensitätsfaktors ermöglicht dem Praktiker trotz Unsicherheiten und Annahmen eine datenbasierte Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses, wodurch höhere Sicherheiten für den Lebens- und Wirtschaftsraum alpiner Räume gewährleistet werden können.

## Abstract

The optimal protection against debris flows is an important prerequisite for the development of alpine spaces. To protect human lives and infrastructure, delineation of hazard zones and the construction of protection structures are inevitable.

The basis for this is the determination of the volume and the maximal discharge of the debris flow. Especially the maximum discharge has a large impact on the design of debris flow countermeasures. The determination of this indispensable design factor is very difficult and connected to large uncertainties.

In Austria the state of the art for the assessment of debris flow peak discharge is a simple, but frequently used method based on the definition of an intensity coefficient (or also termed bulking factor). With this method the peak discharge of an expected relevant debris flow of a determined return period can be calculated by multiplication of the design flood peak discharge for this return period with the intensity coefficient. The intensity coefficient can be estimated on the basis of literature data or calculated as the ratio between peak discharge of observed debris flows and the maximal discharge of the equivalent flood discharge.

The main objective of this work is the validation of this method by the development of a data base and deviation of useful relationships.

Therefore an extensive literature review was done to gather all available data regarding this topic that have been published so far. Additionally intensity coefficients of three observed debris flow events in the Gadria catchment (South Tyrol) were determined by the comparison of the measured debris flow peak discharge and the equivalent flood discharge. The flood peak discharge has been calculated with the rainfall-discharge-model for alpine catchments, named ZEMOKOST, using two different ways. Additionally the results were tested for plausibility with another different method.

The analysis of the world-wide data shows an enormous spread (1-114) of the intensity coefficient. By the determination of a trendline ( $Q_{DebrisFlow} = \sim 11 * Q_{Flood}$ ) and by the calculation of envelopes more precise assessments are possible. Also a trendline based on data, observed in European Alps, was established. The comparison with other approaches shows that the intensity coefficients are partially underestimated by these methods.

The definition of an upper and lower limit shows a scaling break at a maximal flood discharge of 10 m<sup>3</sup>/s. While the limit functions below a flood discharge of 10 m<sup>3</sup>/s are described with a quadratic function, the relationship above of 10 m<sup>3</sup>/s follows a linear function. A simple correlation-analysis with other specific parameters shows that the intensity coefficient probably rises by increasing sediment concentration and density of the debris flow as well as by increased sediment mobilization intensity.

Simulations with different intensity coefficients demonstrate that the diffusion of debris flow is quite sensitive to the intensity coefficient.

Despite of uncertainties and some assumptions the method using the intensity coefficient allows a data-based determination of debris flow peak discharge, which implicates superior safety for alpine living and economic areas.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Danksagung</b> .....                                                          | <b>II</b>  |
| <b>Kurzfassung</b> .....                                                         | <b>III</b> |
| <b>Abstract</b> .....                                                            | <b>IV</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> .....                                                  | <b>V</b>   |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....                                               | <b>10</b>  |
| <b>1 Einleitung</b> .....                                                        | <b>13</b>  |
| 1.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit.....                              | 14         |
| <b>2 Grundlagen</b> .....                                                        | <b>15</b>  |
| 2.1 Hydrologie und Abfluss in Wildbacheinzugsgebieten .....                      | 15         |
| 2.1.1 Niederschlag .....                                                         | 15         |
| 2.1.2 Abfluss.....                                                               | 15         |
| 2.1.2.1 Abflussganglinie.....                                                    | 15         |
| 2.1.2.2 Maximalabfluss .....                                                     | 15         |
| 2.1.3 Abflussbildung in alpinen Einzugsgebieten .....                            | 16         |
| 2.1.3.1 Einflussfaktoren .....                                                   | 17         |
| 2.2 Hydrologische Modelle zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung .....            | 17         |
| 2.2.1 Statistische (stochastische) Modelle .....                                 | 17         |
| 2.2.2 Deterministische Modelle.....                                              | 18         |
| 2.3 Murgänge .....                                                               | 20         |
| 2.3.1 Definition .....                                                           | 20         |
| 2.3.2 Abgrenzung von anderen Prozessen in Wildbacheinzugsgebieten .....          | 20         |
| 2.3.3 Charakteristische Eigenschaften von Murgängen .....                        | 22         |
| 2.3.4 Arten von Murgängen .....                                                  | 22         |
| 2.3.5 Fließverhalten von Murgängen.....                                          | 23         |
| 2.3.6 Auslösebedingungen .....                                                   | 24         |
| 2.3.7 Wichtige Größen von Murgängen.....                                         | 25         |
| 2.3.8 Ablagerungsverhalten .....                                                 | 25         |
| <b>3 Der Murgang-Spitzenabfluss</b> .....                                        | <b>27</b>  |
| 3.1 Definition .....                                                             | 27         |
| 3.2 Charakteristika von Murgang-Spitzenabflüssen .....                           | 27         |
| 3.2.1 Fracht eines Murganges .....                                               | 28         |
| 3.2.2 Art des Murganges (granularer Murgang vs. schlammstromartige Murgänge).... | 28         |
| 3.2.3 Geomorphologie des Gerinnes und des Einzugsgebiets.....                    | 29         |
| 3.2.4 Mobilisierungsintensität des Geschiebes .....                              | 29         |
| 3.2.5 Niederschlagsintensität.....                                               | 31         |
| 3.3 Methoden zur Bestimmung der Murgang-Spitzenabflüsse .....                    | 31         |
| 3.3.1 Methode nach MIZUYAMA .....                                                | 31         |
| 3.3.2 Methode des sog. Murgangsintensitätsfaktors.....                           | 32         |
| <b>4 Murgangsintensitätsfaktoren</b> .....                                       | <b>33</b>  |
| 4.1 Definition .....                                                             | 33         |
| 4.2 Synonyme.....                                                                | 33         |

|          |                                                                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3      | Methoden zur Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren .....                                   | 34        |
| 4.3.1    | Methoden basierend auf der volumetrischen Feststoffkonzentration $c_v$ .....                    | 34        |
| 4.3.1.1  | Methode nach TAKAHASHI .....                                                                    | 34        |
| 4.3.1.2  | Methode nach TOGNACCA .....                                                                     | 35        |
| 4.3.1.3  | Vergleich beider Methoden .....                                                                 | 35        |
| 4.3.1.4  | Kritische Anmerkungen .....                                                                     | 35        |
| 4.3.2    | Methode nach HÜBL .....                                                                         | 36        |
| 4.3.3    | Methode nach ZHANG .....                                                                        | 39        |
| 4.3.4    | Methode nach HAMPEL und TAKAHASHI .....                                                         | 40        |
| 4.3.5    | Critical-Wave-Method .....                                                                      | 41        |
| 4.3.6    | Rain-Flood-Method .....                                                                         | 41        |
| 4.3.7    | Methode nach WEI et al., in. prep. ....                                                         | 42        |
| 4.3.8    | Methode basierend auf der Rutschungsfläche .....                                                | 43        |
| 4.3.9    | Methode nach GREGORETTI .....                                                                   | 43        |
| <b>5</b> | <b>Das Untersuchungsgebiet.....</b>                                                             | <b>44</b> |
| 5.1      | Auswahl des Untersuchungsgebiets .....                                                          | 44        |
| 5.2      | Beschreibung des Untersuchungsgebiets .....                                                     | 45        |
| 5.2.1    | Geologie des Untersuchungsgebiets .....                                                         | 45        |
| 5.2.2    | Klimatische Bedingungen und Wetterlagen im Untersuchungsgebiet .....                            | 46        |
| 5.2.3    | Wildbachklassifikation nach Aulitzky und Stiny .....                                            | 47        |
| 5.2.4    | Landnutzung und Vegetation .....                                                                | 47        |
| 5.2.5    | Disposition des Einzugsgebiets in Bezug auf die Auslösung von Murgängen .....                   | 48        |
| 5.3      | Beschreibung der Messstation .....                                                              | 48        |
| 5.3.1    | Messung des Niederschlags .....                                                                 | 49        |
| 5.3.2    | Messung der Fließtiefen .....                                                                   | 50        |
| 5.3.3    | Messung des Geschiebeanteils im Murgang .....                                                   | 50        |
| <b>6</b> | <b>Methodik.....</b>                                                                            | <b>51</b> |
| 6.1      | Berechnung von Murgangsintensitätsfaktoren .....                                                | 51        |
| 6.1.1    | Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses .....                                                   | 51        |
| 6.1.2    | Bestimmung des Reinwasser-Abflusses .....                                                       | 52        |
| 6.1.3    | Problematik und Schwierigkeiten .....                                                           | 52        |
| 6.2      | Angewandtes Niederschlags-Abfluss-Modell .....                                                  | 53        |
| 6.2.1    | Vor- und Nachteile von ZEMOKOST im Vergleich zu anderen Niederschlag-<br>Abfluss-Modellen ..... | 54        |
| 6.2.2    | Bestimmung der Eingangsdaten .....                                                              | 55        |
| 6.2.3    | Überblick der notwendigen Eingangsparameter .....                                               | 55        |
| 6.2.3.1  | Topologie-Parameter .....                                                                       | 56        |
| 6.2.3.2  | Gerinne-Parameter .....                                                                         | 58        |
| 6.2.3.3  | Niederschlags-Parameter .....                                                                   | 59        |
| 6.2.3.4  | Zusätzliche, vertiefende Parameter .....                                                        | 59        |
| 6.3      | Validierung der Reinwasser-Spitzenabflüsse .....                                                | 60        |
| 6.3.1    | Methode 1 .....                                                                                 | 60        |
| 6.3.2    | Methode 2 .....                                                                                 | 63        |
| 6.3.2.1  | Vorgehensweise .....                                                                            | 63        |

|          |                                                                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.3.2.2  | Anpassung des Modells ZEMOKOST .....                                                                                         | 63        |
| 6.3.3    | Methode 3 .....                                                                                                              | 65        |
| 6.3.3.1  | Beschreibung der Methode .....                                                                                               | 66        |
| <b>7</b> | <b>Auswertungen.....</b>                                                                                                     | <b>67</b> |
| 7.1      | Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren im Einzugsgebiet des<br>Gadriabaches (Vinschgau/Südtirol).....                    | 67        |
| 7.1.1    | Murgang 2011 .....                                                                                                           | 67        |
| 7.1.1.1  | Methode 1 .....                                                                                                              | 68        |
| 7.1.1.2  | Methode 2 .....                                                                                                              | 69        |
| 7.1.1.3  | Methode 3 .....                                                                                                              | 69        |
| 7.1.2    | Murgang 2013 .....                                                                                                           | 69        |
| 7.1.2.1  | Methode 1 .....                                                                                                              | 70        |
| 7.1.2.2  | Methode 2 .....                                                                                                              | 71        |
| 7.1.2.3  | Methode 3 .....                                                                                                              | 72        |
| 7.1.3    | Murgang 2014 .....                                                                                                           | 72        |
| 7.1.3.1  | Methode 1 .....                                                                                                              | 73        |
| 7.1.3.2  | Methode 2 .....                                                                                                              | 73        |
| 7.1.3.3  | Methode 3 .....                                                                                                              | 74        |
| 7.1.4    | Methodenübersicht und Berechnung der Murgangsintensitätsfaktoren .....                                                       | 74        |
| 7.1.4.1  | Berechnung der Murgangsintensitätsfaktoren .....                                                                             | 74        |
| 7.1.4.2  | Beschreibung der Ergebnisse .....                                                                                            | 75        |
| 7.2      | Auswertung Literaturdaten .....                                                                                              | 76        |
| 7.2.1    | Ausgangsdaten .....                                                                                                          | 76        |
| 7.2.2    | Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren und die<br>daraus resultierenden Unsicherheiten .....     | 83        |
| 7.2.2.1  | Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses .....                                                                                | 84        |
| 7.2.2.2  | Bestimmung des Reinwasser-Spitzenabflusses .....                                                                             | 84        |
| 7.2.3    | Unsicherheiten der berechneten Murgangsintensitätsfaktoren .....                                                             | 84        |
| <b>8</b> | <b>Ergebnisse .....</b>                                                                                                      | <b>85</b> |
| 8.1      | Zusammenführung der im Zuge der eigenen Berechnungen ermittelten<br>Murgangsintensitätsfaktoren mit den Literaturdaten ..... | 85        |
| 8.1.1    | Einschränkung der Daten .....                                                                                                | 86        |
| 8.2      | Beschreibung der Ergebnisse .....                                                                                            | 86        |
| 8.2.1    | Daten aus den Alpen .....                                                                                                    | 88        |
| 8.2.2    | Bestimmung von unteren und oberen Grenzen .....                                                                              | 89        |
| 8.3      | Vergleich der gemessenen Murgangsintensitätsfaktoren mit den<br>vorgeschlagenen Methoden in der Literatur .....              | 92        |
| 8.4      | Abhängigkeiten des Murgangsintensitätsfaktors .....                                                                          | 94        |
| 8.4.1    | Reinwasser-Spitzenabfluss .....                                                                                              | 94        |
| 8.4.2    | Dichte des Murganges .....                                                                                                   | 95        |
| 8.4.3    | Feststoffkonzentration des Murganges .....                                                                                   | 96        |
| 8.4.4    | Fläche des Einzugsgebietes .....                                                                                             | 97        |
| 8.4.5    | Anteil der Rutschflächen im Einzugsgebiet .....                                                                              | 97        |
| 8.4.6    | Mobilisierungsintensität des Geschiebes - Systemzustand .....                                                                | 98        |

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.4.7 Weitere Auswertungen mit verschiedenen Parametern.....                                        | 99         |
| 8.5 Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf das Ausbreitungsverhalten<br>alpinen Murgänge ..... | 100        |
| 8.5.1 Auswahl des Untersuchungsgerinnes .....                                                       | 100        |
| 8.5.2 Festlegung der Murgang-Ganglinien mit unterschiedlichen<br>Murgangsintensitätsfaktoren.....   | 101        |
| 8.5.3 Kurze Beschreibung der verwendeten Simulationssoftware .....                                  | 101        |
| 8.5.4 Ergebnisse der Modellierungen mit unterschiedlichen<br>Murgangsintensitätsfaktoren.....       | 102        |
| <b>9 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....</b>                                        | <b>104</b> |
| <b>10 Schlussfolgerung und Ausblick .....</b>                                                       | <b>110</b> |
| Was könnte im Zuge zukünftiger Arbeiten gemacht werden? .....                                       | 110        |
| <b>Anhang.....</b>                                                                                  | <b>112</b> |
| Anhang 1: Methoden zur Bestimmung von Murgang-Abflüssen .....                                       | 112        |
| Methode nach HUNGR.....                                                                             | 112        |
| Rückwärtsgerichtete Indikationsmethode .....                                                        | 112        |
| Methoden nach MASSAD.....                                                                           | 112        |
| Anhang 2: Verwendete Niederschlagsverteilungen .....                                                | 114        |
| Umrechnung der gemessenen Niederschlagsdaten .....                                                  | 115        |
| Niederschlagsverteilung für das Murgangsereignis 2011 .....                                         | 115        |
| Niederschlagsverteilung für das Murgangsereignis 2013.....                                          | 115        |
| Niederschlagsverteilung für das Murgangsereignis 2014:.....                                         | 117        |
| Anhang 3: Zusammenfassende Auflistung der erhobenen<br>Murgangsintensitätsfaktoren .....            | 119        |
| Anhang 4: Ausgangsdaten für die Analyse der Abhängigkeiten .....                                    | 121        |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                                                   | <b>122</b> |
| Internetquellen .....                                                                               | 128        |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                                                                    | <b>130</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                                                                  | <b>132</b> |

## Abkürzungsverzeichnis

Die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen entsprechen grundsätzlich der im Abkürzungsverzeichnis angeführten Bedeutung. Eventuelle Abweichungen (vor allem in Abbildungen) sind allerdings nicht ausgeschlossen und werden entsprechend angeführt.

|                       |                     |                                                   |
|-----------------------|---------------------|---------------------------------------------------|
| <b>A</b>              | [m <sup>2</sup> ]   | Durchflussfläche                                  |
| <b>AKL</b>            | [-]                 | Abflussbeiwert-Klasse                             |
| <b>b</b>              | [m]                 | Breite des kurzzeitigen Gerinne-Aufstaus          |
| <b>b<sub>1</sub></b>  | [m]                 | Breite des Dammbbruchs                            |
| <b>B</b>              | [m]                 | Dammbreite                                        |
| <b>BFW</b>            |                     | Bundesforschungszentrum für Wald                  |
| <b>BF</b>             | [-]                 | Mengenfaktor                                      |
| <b>BOKU</b>           |                     | Universität für Bodenkultur                       |
| <b>C</b>              | [-]                 | Abflussbeiwert                                    |
| <b>c</b>              | [-]                 | Trockene Sediment-Bett Konzentration              |
| <b>c<sub>1</sub></b>  | [-]                 | Oberflächenrauigkeit                              |
| <b>c<sub>b</sub></b>  | [-]                 | Murgangsintensitätsfaktor                         |
| <b>c<sub>F</sub></b>  | [-]                 | Volumetrische Feststoffkonzentration der Murfront |
| <b>c<sub>v</sub></b>  | [-]                 | Volumetrische Feststoffkonzentration              |
| <b>c*</b>             | [-]                 | Grenzkonzentration des Murganges                  |
| <b>D</b>              | [min]               | Dauerstufe                                        |
| <b>D<sub>c</sub></b>  | [-]                 | blocking coefficient                              |
| <b>D<sub>90</sub></b> | [m]                 | 90. Perzentile der Korndurchmesserverteilung      |
| <b>EF</b>             | [-]                 | Murgangsintensitätsfaktor                         |
| <b>EZG</b>            |                     | Einzugsgebiet                                     |
| <b>F</b>              | [m <sup>2</sup> ]   | Fläche des Einzugsgebiets                         |
| <b>F<sub>1</sub></b>  | [km <sup>2</sup> ]  | Fläche des Einzugsgebiets                         |
| <b>FFT</b>            |                     | Fluviatiler Feststofftransport                    |
| <b>g</b>              | [m/s <sup>2</sup> ] | Erdbeschleunigung (9,81 m/s <sup>2</sup> )        |
| <b>g<sub>1</sub></b>  |                     | Grundlinie des Dreiecks                           |
| <b>h</b>              |                     | Höhe des Dreiecks                                 |
| <b>h<sub>1</sub></b>  | [m]                 | Höhe des kurzzeitigen Gerinne-Aufstaus            |
| <b>h<sub>2</sub></b>  | [m]                 | Höhe des verbleibenden Damms                      |
| <b>h<sub>3</sub></b>  | [m]                 | Dammhöhe                                          |
| <b>H</b>              | [m]                 | Wasserhöhe nahe dem Damm                          |
| <b>H<sub>1</sub></b>  | [m]                 | Maximale Höhendifferenz des Gerinnes              |

|                                                                          |          |                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>hN</b>                                                                | [mm]     | Niederschlagsmenge                                                            |
| <b>HQ100</b>                                                             |          | 100-jährliches Hochwasser                                                     |
| <b>HSX Gully</b>                                                         |          | Hong-Shui-Xian Gully                                                          |
| <b>HW</b>                                                                |          | Hochwasser                                                                    |
| <b>I</b>                                                                 | [mm/h]   | Aufsummierte Regenintensität von der Stunde, in der sich der Murgang ereignet |
| <b>IF</b>                                                                | [-]      | Murgangsintensitätsfaktor                                                     |
| <b>i<sub>t</sub></b>                                                     | [mm/min] | Niederschlagsintensität                                                       |
| <b>J</b>                                                                 | [‰]      | Gefälle des Gerinnes                                                          |
| <b>J<sub>G</sub></b>                                                     | [°]      | Gerinneneigung                                                                |
| <b>J<sub>OB</sub></b>                                                    | [%]      | Hangneigung                                                                   |
| <b>k</b>                                                                 | [-]      | Retentionskoeffizient                                                         |
| <b>k<sub>1</sub></b>                                                     | [-]      | Koeffizient                                                                   |
| <b>L</b>                                                                 | [m]      | Gerinnelänge                                                                  |
| <b>L<sub>1</sub></b>                                                     | [m]      | Länge des Sees                                                                |
| <b>L<sub>2</sub></b>                                                     | [km]     | Gerinnelänge                                                                  |
| <b>LfW</b>                                                               |          | Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft                                     |
| <b>L<sub>OB</sub></b>                                                    | [m]      | Projizierter Fließweg an der Oberfläche                                       |
| <b>m</b>                                                                 |          | Mittlere Klassengrenze in ZEMOKOST                                            |
| <b>mf</b>                                                                |          | mäßig frisch                                                                  |
| <b>MFT</b>                                                               |          | Murartiger Feststofftransport                                                 |
| <b>MG</b>                                                                |          | Murgang                                                                       |
| <b>MI</b>                                                                | [-]      | Murgangsintensitätsfaktor                                                     |
| <b>N</b>                                                                 | [-]      | Gerinnebettraugigkeit                                                         |
| <b>n<sub>1</sub></b>                                                     | [-]      | Porosität der Murwelle                                                        |
| <b>n</b>                                                                 |          | nass                                                                          |
| <b>n<sub>0</sub></b>                                                     | [-]      | Porosität des Materials                                                       |
| <b>N-A-Modell</b>                                                        |          | Niederschlags-Abfluss-Modell                                                  |
| <b>o</b>                                                                 |          | Obere Klassengrenze in ZEMOKOST                                               |
| <b>PE</b>                                                                | [J]      | Potentielle Energie                                                           |
| <b>Q</b>                                                                 | [m³/s]   | Abfluss des Murganges                                                         |
| <b>Q<sub>M</sub>; Q<sub>d</sub>; Q<sub>dp</sub>; Q<sub>MURGANG</sub></b> | [m³/s]   | Maximalabfluss des Murganges                                                  |
| <b>Q<sub>RW</sub></b>                                                    | [m³/s]   | Abfluss des Reinwassers                                                       |
| <b>Q<sub>W</sub>; Q<sub>WP</sub>; Q<sub>REINWASSER</sub></b>             | [m³/s]   | Reinwasser-Spitzenabfluss                                                     |
| <b>R²</b>                                                                | [-]      | Bestimmtheitsmaß                                                              |
| <b>RC</b>                                                                | [-]      | Reduktions-Koeffizient                                                        |
| <b>RKL</b>                                                               |          | Rauigkeitsbeiwert-Klasse                                                      |

|                                     |                      |                                                                             |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>R<sub>L</sub></b>                | [-]                  | Verhältnis der Rutschflächen zur Fläche des Einzugsgebiets                  |
| <b>S</b>                            | [-]                  | Sättigungsgrad                                                              |
| <b>S<sub>SE</sub></b>               | [-]                  | volumetrische Feststoffkonzentration                                        |
| <b>SF</b>                           | [-]                  | Skalierungsfaktor                                                           |
| <b>SXK Gully</b>                    |                      | Sha-Xin-Kai Gully                                                           |
| <b>SZI</b>                          |                      | Systemzustandsindex                                                         |
| <b>T</b>                            | [a]                  | Wiederkehrszeit                                                             |
| <b>t<sub>AN</sub></b>               | [min]                | Anlaufzeit                                                                  |
| <b>t<sub>c</sub></b>                | [min]                | Konzentrationszeit                                                          |
| <b>T-EZG</b>                        |                      | Teileinzugsgebiet                                                           |
| <b>t<sub>G</sub></b>                | [min]                | Laufzeit an der Oberfläche                                                  |
| <b>t<sub>OB</sub></b>               | [min]                | Gerinnelaufzeit                                                             |
| <b>tr</b>                           |                      | trocken                                                                     |
| <b>t<sub>w</sub></b>                |                      | Dauer der Hochwassers                                                       |
| <b>t<sub>wG</sub></b>               |                      | Dauer des Murganges                                                         |
| <b>ü.d.M</b>                        |                      | über den Meeresspiegel                                                      |
| <b>u</b>                            | [-]                  | Untere Klassengrenze in ZEMOKOST                                            |
| <b>u<sub>1</sub></b>                | [-]                  | Ausgleichsparameter                                                         |
| <b>v</b>                            | [m/s]                | Fließgeschwindigkeit des Murganges                                          |
| <b>v<sub>g</sub></b>                | [m/s]                | Fließgeschwindigkeit im Gerinne                                             |
| <b>V<sub>G</sub></b>                | [m <sup>3</sup> ]    | Geschiebefracht                                                             |
| <b>V<sub>w</sub></b>                | [m <sup>3</sup> ]    | Wasserfracht                                                                |
| <b>V<sub>wG</sub></b>               | [m <sup>3</sup> ]    | Murfracht                                                                   |
| <b>w</b>                            | [-]                  | Ausgleichsparameter                                                         |
| <b>XKD Gully</b>                    |                      | Xin-Kai-Dafo Gully                                                          |
| <b>α</b>                            | [-]                  | Volumetrischer Wasseranteil des Murganges                                   |
| <b>β</b>                            | [-]                  | Murgangskoeffizient                                                         |
| <b>ξ</b>                            | [-]                  | volumetrischer Wasseranteil im Geschiebe (vor der Entstehung des Murganges) |
| <b>φ</b>                            | [-]                  | Korrektur-Koeffizient                                                       |
| <b>γ<sub>c</sub>; ρ<sub>d</sub></b> | [kg/m <sup>3</sup> ] | Dichte des Murgangs                                                         |
| <b>γ<sub>w</sub></b>                | [kg/m <sup>3</sup> ] | Dichte des Wassers                                                          |
| <b>γ<sub>H</sub></b>                | [kg/m <sup>3</sup> ] | Dichte des Materials                                                        |
| <b>Φ</b>                            | [-]                  | $\frac{(\gamma_c - \gamma_w)}{(\gamma_H - \gamma_c)}$                       |
| <b>π</b>                            | [-]                  | Porosität des Murganges                                                     |

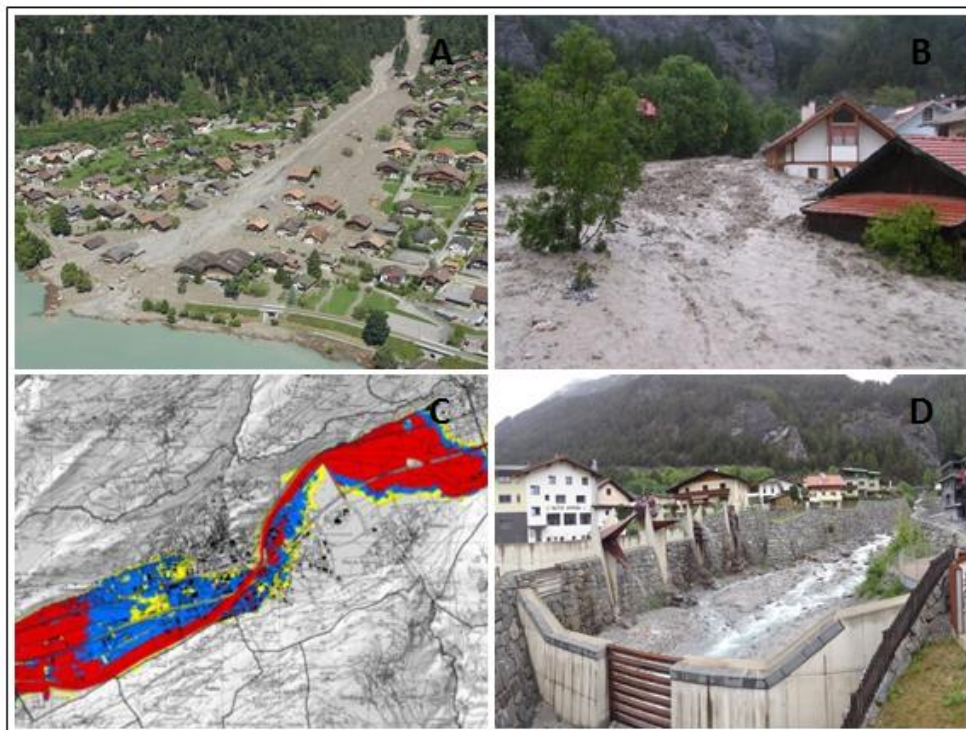
# 1 Einleitung

Murgänge können in alpinen Räumen zu großen Risiken für Menschen führen. Sie bedrohen nicht nur den Lebens- und Siedlungsraum, sondern behindern auch Verkehrswege und wichtige Versorgungslinien sowie Infrastruktureinrichtungen und Kulturgüter (Bergmeister et al., 2008). Für eine nachhaltige, sichere Entwicklung alpiner Gebiete in jeglicher Hinsicht ist eine optimale Anpassungsstrategie gegen Murgänge eine wichtige Grundvoraussetzung. Grundlage jeglicher Anpassungsstrategie ist die Abschätzung der Gefahrensituation.

Für die Gefahrenabschätzung alpiner Murgänge ist neben dem Murgangs-Volumen auch der Murgang-Abfluss ein sehr wichtiger Parameter. Einerseits dient er als Voraussetzung für die Ausweisung und Klassifizierung von gefährdeten Gebieten und der Erstellung von Gefahrenzonenplänen, andererseits auch für die Dimensionierung von erforderlichen Schutzbauwerken.

Insbesondere der Murgang-Spitzenabfluss ist ausschlaggebend für das Ausmaß der Gefährdung. Beispielsweise kann ein Gerinne ein Murgang-Ereignis mit niedrigem Spitzenabfluss und einem bestimmten Volumen in den Vorfluter abführen ohne umliegende Infrastrukturen zu beschädigen, während ein Ereignis mit demselben Volumen, aber mit einem höheren Murgang-Spitzenabfluss beträchtliche Schäden mit sich führen kann.

Der Murgang-Spitzenabfluss zählt somit zu den wichtigsten Parametern für die Gefahrenabschätzung und Dimensionierung von Schutzbauwerken (Rickenmann, 1999).



**Abbildung 1.1: BILD A aus PLANAT, s.a.; BILD B aus INTERPRAEVENT, s.a.; BILD C aus Kanton Wallis, s.a.; Bild D: Pfitscher, 2014.**

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die Berechnung des Murgang-Spitzenabflusses bereitet auch nach heutigem Erkenntnisstand große Probleme mit teils hohen Unsicherheiten (Hübl, s.a.). Neben den zahlreichen, in der Literatur beschriebenen Methoden zur Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses beschreibt die ÖNORM-REGEL 24800, 2009 die Berechnung des Murgang-Spitzenabflusses mit Hilfe von sog. Murgangsintensitätsfaktoren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine bessere Datengrundlage für die Methode der Murgangsintensitätsfaktoren zu schaffen. Somit können Murgang-Spitzenabflüsse für zukünftige Vorhaben (Gefahrenzonenplanung; Dimensionierung von Schutzbauwerken) aufgrund einer Datengrundlage mit größerer Genauigkeit berechnet werden.

Hierfür wurden folgende Teilziele und Fragestellungen festgelegt:

- Welche Murgangsintensitätsfaktoren weisen die Murgänge im Einzugsgebiet des Gadiabaches (Vinschgau – Südtirol) auf?
- Welche Murgangsintensitätsfaktoren findet man in einschlägiger Fachliteratur?
- Nach welchen Parametern lassen sich Murgangsintensitätsfaktoren klassifizieren?
- Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Murgangsintensitätsfaktoren auf die Ausbreitung alpiner Murgänge?

## 2 Grundlagen

### 2.1 Hydrologie und Abfluss in Wildbacheinzugsgebieten

Der Zusammenhang zwischen den Niederschlägen und den korrespondierenden Abflüssen in Gerinnen ist sehr komplex. Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die wichtigsten Begriffe und Prozesse der Abflussentstehung in Wildbacheinzugsgebieten liefern.

#### 2.1.1 Niederschlag

Als Niederschlag wird jenes Wasser in flüssiger oder fester Phase verstanden, das durch Kondensation oder Sublimation in der Atmosphäre entsteht und sich infolge der Schwerkraft zur Erdoberfläche bewegt. Die so entstandenen Niederschlagsformen sind Regen, Schnee, Graupel, Hagel, Tau oder Reif. In Wildbacheinzugsgebieten zählen Stark- und Dauerregen, fallweise auch Hagel zu den maßgeblichen Niederschlägen (ÖNORM-REGEL 24800, 2009).

Für die hydrologische Modellierung ist die Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlags von großer Bedeutung (Maringer, 2013). Als effektiver oder abflusswirksamer Niederschlag wird jener Niederschlag bezeichnet, der als Hochwasser abfließt (Maniak, 2010). Der abflusswirksame Niederschlag errechnet sich aus der Integration der resultierenden Abflussganglinie abzüglich des Basisabflusses (DVWK, 1984).

#### 2.1.2 Abfluss

Unter dem Abfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\text{l/s}$ ] versteht man das Wasservolumen, das ein definiertes Einzugsgebiet unter dem Einfluss der Gravitation innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit verlässt (ÖNORM-REGEL 24800, 2009).

Der Abfluss in einem Gerinne kann in Basisabfluss (Trockenwetterabfluss) und Direktabfluss gegliedert werden. Der Basisabfluss ist definiert als jener Abfluss, welcher vor und nach dem Hochwasserereignis im Gerinne vorhanden ist. Er kann meist auf den Grundwasserzufluss zurückgeführt werden und ist im Vergleich zum Scheitelabfluss meist vernachlässigbar. Der Direktabfluss kann in den Zwischen- (Interflow) und Oberflächenabfluss gegliedert werden und stellt die rasche, den Niederschlag direkt folgende Abflusskomponente dar (Maniak, 2010).

##### 2.1.2.1 Abflussganglinie

Unter der Abflussganglinie versteht man die graphische Darstellung des Abflusses in seiner zeitlichen Abfolge als Zeit-Mengen-Diagramm (ÖNORM-REGEL 24800, 2009).

##### 2.1.2.2 Maximalabfluss

Der Maximalabfluss (Abflussspitze; Spitzenabfluss) ist die größte Abflussmenge, die während eines Abflussereignisses in einem bestimmten Abflussquerschnitt auftritt. Der Maximalabfluss stellt somit den höchsten Abflusswert einer Ganglinie dar (ÖNORM-REGEL 24800, 2009).

### 2.1.3 Abflussbildung in alpinen Einzugsgebieten

Grundsätzlich kann bei der Abflussbildung in alpinen Einzugsgebieten zwischen den Abflusssentstehungsprozessen am Hang und der Abflussfortpflanzung im Gerinne unterschieden werden (Hegg et al., 2001).

Die Abflussbildung ist die Aufteilung eines Niederschlagsereignisses in den abflusswirksamen Niederschlag (effektiver Niederschlag), welcher ohne große Verzögerungen zum Abfluss führt, und in den Gebietsrückhalt (z.B. Tiefensickerung, Bodenspeicherung, Transpiration, Interzeption, Evapotranspiration), der keinen Beitrag zur Entstehung einer Hochwasserganglinie leistet (Rinderer und Rickenmann, 2009). Die Abflussbildung ist eine Kombination aus verschiedenen Teilprozessen der Interzeption, Verdunstung, Infiltration, und Grundwasserspeicherung (Rinderer und Rickenmann, 2009). Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, bilden die Entstehung, die Konzentration und das Abfließen der Niederschlagsmengen die grundlegenden Teilprozesse (Karner, 2014).



**Abbildung 2.1: Prozesse der Abflussbildung (aus Wasserwehr Ginsheim–Gustavsburg, 2013).**

Im Zusammenhang mit der Entstehung von Hochwasserereignissen sind der Oberflächenabfluss sowie der Zwischenabfluss von größter Relevanz (Hegg et al., 2001).

Der Oberflächenabfluss entsteht, wenn der Niederschlag die Infiltrationsrate des Bodens übersteigt und an der Oberfläche abfließt. Das in den Boden infiltrierte Wasser bildet vor allem in der obersten Bodenzone mit sog. Makroporen den Zwischenabfluss. Wenn die Durchlässigkeit des Bodens mit der Tiefe abnimmt, ist der Zwischenabfluss besonders hoch. Ein Teil des infiltrierten Wassers gelangt schließlich in den Grundwasserspeicher und ist somit nicht hochwasserwirksam (Hegg et al., 2001).

Nach Überwindung des Interzeptionswiderstandes, nach Überschreiten der Infiltrationskapazität und nach Auffüllung des Muldenspeichers sammelt sich das Wasser des Zwischen- und Oberflächenabflusses in kleinen Gerinnen und Gräben (Maringer, 2013). Der Oberflächen- und Zwischenabfluss gelangt so als Flächenabfluss ins nächste Gerinne und bildet vereint

mit dem Basisabfluss und den Wassermengen aus weiter oben liegenden Hängen den Gerinneabfluss (Hegg et al., 2001).

Durch das Gefälle des Gerinnes entsteht ein natürlicher Fließvorgang im Gerinne. Die dabei auftretende Fließgeschwindigkeit ist neben der Abflussmenge ein wichtiger Parameter, da die Fließgeschwindigkeit darüber entscheidet, wie sich Abflussganglinien aus verschiedenen Teileinzugsgebieten überlagern. Der Abflussvorgang im Gerinne wird durch topographische, klimatologische, geologische, geomorphologische, pedologische, vegetative und anthropogene Gegebenheiten beeinflusst.

### **2.1.3.1 Einflussfaktoren**

Die Abflussbildung in Gerinnen wird von verschiedenen Faktoren maßgeblich beeinflusst (Klebinde et al., 2014; Markart et al., 2004a; Markart et al., 2014; Spreafico et al., 2003; Dyck und Peschke, 1995):

- Topographie und Relief (z.B. Hangneigung und Gerinnedichte)
- Geologie und Geomorphologie
- Pedologie (z.B. Durchlässigkeit und Porosität des Bodens)
- Landbedeckung, Landnutzung und Vegetation
- Versiegelungsgrad
- Abflussbeiwerte und Oberflächenrauigkeit
- Vorbefeuchtung/Feuchtezustand
- Intensität des Niederschlages
- Zeitliche Verteilung der Niederschläge (Starkregen oder Dauerregen)
- Räumliche Verteilung der Niederschläge
- Zugrichtung der Regenzelle
- Schneebedeckung im Einzugsgebiet

## **2.2 Hydrologische Modelle zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung**

Prinzipiell wird zur Prozessmodellierung von Naturgefahren zwischen stochastischen, deterministischen (Black-, White-, und Grey-Box-Modellen) und hybriden Modellen unterschieden. Dabei stellen die hybriden Modelle eine Verknüpfung der deterministischen und stochastischen Modelle dar (Hübl, 2012).

### **2.2.1 Statistische (stochastische) Modelle**

Die grundlegende Aufgabe von stochastischen Modellen ist die statistische Beschreibung von Beobachtungsdaten. Dabei ist der hydrologische Aspekt bereits in den Daten selbst enthalten (Maniak, 2010).

Um statistische Ansätze verwenden und aussagekräftige Auswertungen durchführen zu können, werden lange Abflussmessreihen benötigt. Derartige langjährige Abflussmessreihen stehen für Wildbacheinzugsgebiete äußerst selten zur Verfügung (Markart et al., 2014).

Ist im betrachteten Einzugsgebiet dennoch ein Pegel mit einer entsprechend langen Datenmessreihe vorhanden, kann der Abflusswert einer bestimmten Jährlichkeit (Bemessungsabfluss) direkt über die Auswertung der Pegelaufzeichnungen ermittelt werden. Fehlen allerdings langjährige Pegelaufzeichnungen, kann ein Abflusswert aus ähnlichen Referenz-

gebieten bestimmt und auf das zu untersuchende Einzugsgebiet umgelegt werden (Rimböck et al., 2013).

### 2.2.2 Deterministische Modelle

Die deterministischen Modelle können aufgrund des Detaillierungsgrades, mit dem die physikalischen Prozessabläufe in Funktion der Gebietskenntnisse abgebildet werden, in Black-, Grey-, und White-Box-Modelle unterteilt werden (Spreafico et al., 2003). Die Hauptaufgabe von deterministischen Modellen ist die Transformation der Niederschläge in einem Einzugsgebiet anhand physikalisch-mathematischer Zusammenhänge in eine Abflussganglinie an einem bestimmten Punkt im Gerinne (Maniak, 2010). Somit setzen deterministische Modelle das Verständnis der Teilprozesse, welche zu einen Abfluss führen, voraus (Hübl, 2012).

Während einfachere Black-Box-Modelle mit wenigen Eingangsparametern das Reaktionsverhalten von Einzugsgebieten beschreiben, versuchen detaillierte White-, oder Grey-Box-Modelle die grundlegenden, abflussbildenden Prozesse (Abflussbildung, Abflusskonzentration, Gerinnerouting) anhand von empirischen oder physikalischen Ansätzen zu beschreiben (Rinderer und Rickenmann, 2009).

Beispielsweise versuchen Niederschlag-Abfluss-Modelle neben dem Abfluss auch den zeitlichen Verlauf (Ganglinie) abzubilden (Spreafico et al., 2003). Dabei gehen Niederschlag-Abfluss-Modelle vereinfacht davon aus, dass ein n-jährlicher Niederschlag einen n-jährlichen Abfluss generiert.

Für die Berechnung der Abflussbildung und Abflussverformung stehen in der Hydrologie verschiedene, einfachere oder aufwändigere Verfahren zur Verfügung. Um die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen, ist eine Kalibrierung mit Abflussmessungen erforderlich. Da in Wildbacheinzugsgebieten Abflussmessungen meist fehlen (Rinderer und Rickenmann, 2009), ist eine Kalibrierung von Niederschlag-Abfluss-Modellen sehr schwierig. Daraus resultieren große Schwankungen und Unsicherheiten.

Das in dieser Arbeit verwendete Programm ZEMOKOST zählt zu dieser Art von Modellen (Rimböck et al., 2013). Neben der Eingabe von Bemessungsniederschlägen ist auch die Eingabe von tatsächlich, gemessenen Niederschlägen möglich. Somit eignet sich das Modell zur hydrologischen Nachrechnung eines bestimmten Niederschlagsereignisses.

Neben den Niederschlag-Abfluss-Modellen zählen auch die sog. Hüllkurven zu den deterministischen Modellen.

Zur Bestimmung von Hüllkurven werden mehrere beobachtete, maximale Abflussspenden (z.B.  $Q_{max} = a \times F^b$ ) in Abhängigkeit charakteristischer Größen (z.B. EZG-Fläche) ausgewertet. Die verwendeten Koeffizienten werden dabei aus den beobachteten Ereignissen bestimmt. Die Bestimmung von Abflusswerten erfolgt anschließend über die Eingabe von wenigen, einfach zu ermittelnden Eingangsgrößen (z.B. EZG-Fläche). Abfluss- und Niederschlagsmessreihen werden im Zuge dieser Methode nicht benötigt. Das ermittelte Ergebnis ist allerdings ein Abflusswert ohne einer bestimmten Jährlichkeit, sodass deren Qualität als gering eingestuft werden kann (Rimböck et al., 2013). Die bekannteste, empirische Schätzformel im Bereich der Abflussbestimmung ist wohl die Abflussformel nach Wundt (Hübl, 2012).

Eine Übersicht über derzeitig verfügbare Methoden zur Abflussabschätzung und N-A-Modellen gibt Abbildung 2.2.

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

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

Abbildung 2.2: Überblick verschiedener hydrologischer Methoden (aus Rimböck et al., 2013).

## 2.3 Murgänge

### 2.3.1 Definition

Unter dem Begriff „Murgang“ versteht man „ein schnell abfließendes, breiartiges Gemisch von Wasser und Feststoffen, das in mehreren Schüben (Murschub) abgehen kann, einer bereits ausgebildeten Tiefenlinie folgt und charakteristische Ablagerungen aufweist“ (Hübl et al. 2011., S.35). Die ÖNORM-REGEL 24800, 2009 definiert einen Murgang als langsam bis schnell abfließende Suspension aus Wasser, Feststoffen und Wildholz, die sich dann entwickelt, wenn in kurzer Zeit große Geschiebemengen verfügbar werden.

Rickenmann, 2014 beschreibt typische alpine Murgänge als Gemisch aus den drei Hauptkomponenten Wasser, Feinmaterial und groben Steinen. Dabei stellen sie eine Mischung aus reinen Hochwässern, Erdrutschen und Fels- oder Bergstürzen dar. In Abbildung 2.3 sind die relativen Anteile der drei Hauptkomponenten für Murgänge dargestellt:

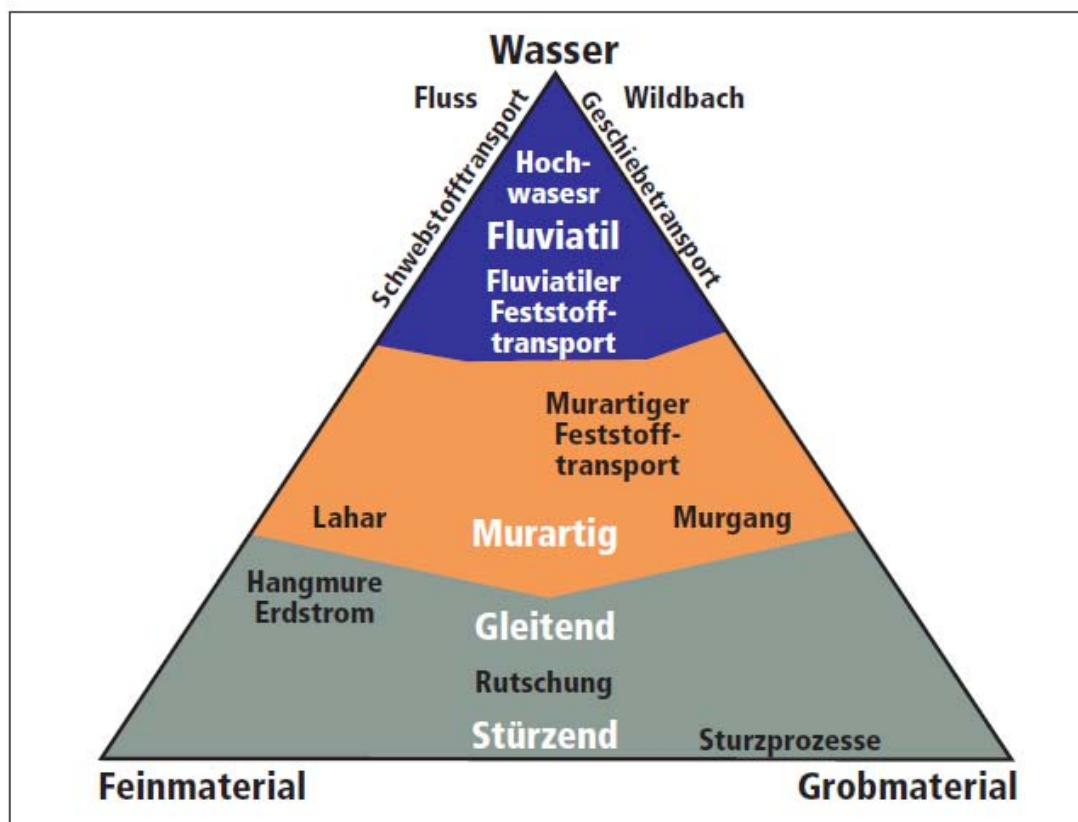


Abbildung 2.3: Übersicht über die Systematik der Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten (aus Rimböck et al., 2013).

### 2.3.2 Abgrenzung von anderen Prozessen in Wildbacheinzugsgebieten

Auf Basis einiger Parameter und Eigenschaften (siehe Tabelle 2.1) können Murgänge von anderen Prozessen in Wildbacheinzugsgebieten unterschieden werden:

**Tabelle 2.1: Übersicht von charakteristischen Eigenschaften von Verlagerungsprozessen in Wildbacheinzugsgebieten (aus ÖNORM-REGEL 24800, 2009).**

| Verlagerungstyp                                         | Hochwasser<br>(flood)                                                                             |                                                                                                   | Mure<br>(landslide of flow type)                                                                       |                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verlagerungsart                                         | fluvial                                                                                           |                                                                                                   | murartig                                                                                               |                                                                                                                                                                               |
| Terminus                                                | Hochwasser                                                                                        | Fluvialer<br>Feststofftransport                                                                   | Murartiger<br>Feststofftransport                                                                       | Murgang                                                                                                                                                                       |
| Prozesstyp                                              | Reinwasserabfluss                                                                                 | schwach Feststofftransport                                                                        | stark                                                                                                  | Murgang                                                                                                                                                                       |
| Fließverhalten                                          | newtonisch                                                                                        | newtonisch                                                                                        | annähernd newtonisch                                                                                   | nicht newtonisch                                                                                                                                                              |
| Vol. Feststoff-<br>konzentration $c_v$<br>(ca. Bereich) | Promillebereich                                                                                   | 0-20 %                                                                                            | 20-40 %                                                                                                | >40%                                                                                                                                                                          |
| Größtkorn                                               | mm-cm                                                                                             | -dm                                                                                               | -m                                                                                                     | -m                                                                                                                                                                            |
| Dichte (ca.<br>Bereich)                                 | 1000 kg/m <sup>3</sup>                                                                            | <1300 kg/m <sup>3</sup>                                                                           | 1300-1700 kg/m <sup>3</sup>                                                                            | >1700 kg/m <sup>3</sup>                                                                                                                                                       |
| Reinwasserabfluss<br>bestimmung<br>möglich              | Ja                                                                                                | Eingeschränkt                                                                                     | Nein                                                                                                   | Nein                                                                                                                                                                          |
| Pegelschlüssel er-<br>stellbar                          | Ja                                                                                                | Ja                                                                                                | Nein                                                                                                   | Nein                                                                                                                                                                          |
| $Q_{\text{gesamt}}/Q_{\text{Hochwasser}}$               | 1                                                                                                 | 1-1.4                                                                                             | 1.4-3.5                                                                                                | > 3.5                                                                                                                                                                         |
| Viskosität<br>(ungefähr)                                | 0.001-0.01 Pas                                                                                    | 0.01-0.2 Pas                                                                                      | 0.2-2 Pas                                                                                              | >2 Pas                                                                                                                                                                        |
| Scherfestigkeit                                         | Keine                                                                                             | Keine                                                                                             | Keine                                                                                                  | Vorhanden                                                                                                                                                                     |
| Maßgeblich<br>wirkende Kräfte                           | Turbulenz,<br>Schleppspannung                                                                     | Turbulenz,<br>Schleppspannung                                                                     | Auftrieb, Turbulenz,<br>Schleppspannung,<br>dispersiver Druck                                          | Auftrieb, dispersiver<br>Druck, viskose und<br>friktionale Kräfte                                                                                                             |
| Verteilung der<br>Feststoffe im<br>Querschnitt          | Feststoffe<br>sohlennah (rollend,<br>hüpfend, springend)<br>und Schweb verteilt<br>im Querschnitt | Feststoffe sohlennah<br>(rollend, hüpfend,<br>springend) und<br>Schweb verteilt im<br>Querschnitt | Feststoffe und Schweb<br>verteilt im Querschnitt                                                       | Feststoffe verteilt im<br>Querschnitt                                                                                                                                         |
| Ablagerungsform<br>(stumme Zeugen)                      | Bankige<br>Feinstoffrückstände                                                                    | Sortierte Fächer und<br>Lappen                                                                    | Bänke und Lappen,<br>zumeist korngestützt,<br>Grobgeschiebe bis in<br>Höhe Wasserspiegel<br>abgelagert | Murköpfe, Murfirste<br>(Levéés) und<br>zungenförmige Lappen,<br>korn- oder<br>matrixgestützt, zumeist<br>scharfe Begrenzung<br>der Ablagerungen, U-<br>förmiges Abflussprofil |
| Sortierung der<br>abgelagerten<br>Feststoffe            | Vorhanden                                                                                         | Vorhanden                                                                                         | Eher nicht vorhanden                                                                                   | Nicht vorhanden                                                                                                                                                               |
| Entmischung der<br>Ablagerungen                         | ja                                                                                                | ja                                                                                                | ja/nein                                                                                                | nein                                                                                                                                                                          |
| Schaden durch                                           | Wasser und Schweb                                                                                 | Wasser, Schweb und<br>Geschiebe                                                                   | Feststoffe und Wasser                                                                                  | Feststoffe (und<br>Wasser)                                                                                                                                                    |

Von sog. *Hangmuren* (engl. hillslope debris flow/avalanche debris flow) unterscheiden sich Murgänge durch den Ort des Auftretens. Murgänge treten meistens in Gerinnen oder Runsen auf, während Hangmuren meist keine seitliche Begrenzung und relativ kurze Fließwege aufweisen (Rickenmann, 2014). Zusätzlich treten Hangmuren nach Rickenmann, 2014 nicht öfters am gleichen Ort auf und laufen meist nicht in mehreren Schüben ab.

### 2.3.3 Charakteristische Eigenschaften von Murgängen

In Abbildung 2.4 sind die wichtigsten, charakteristischen Eigenschaften und Spuren von Murgängen zusammengefasst:

#### Zusammensetzung und Fließverhalten:

- stark unterschiedliche Korngrößen, +/- gleichmässig über Abflusstiefe verteilt
- Transport sehr grosser Blöcke möglich
- höchste Geschiebekonzentration an der Front, dahinter häufig flüssigeres Gemisch
- hohe Dichte des Wasser-/Feststoffgemisches (ca. 1.6 ... 2.4 t/m<sup>3</sup> in der Front)
- hohe "Zähigkeit" (Nicht-Newton'sche Flüssigkeit)
- meist Abfluss in Wellen, d.h. schubweises Auftreten einer oder mehrerer Gemischfronten
- Bildung von Murwällen (Levéés) bei fehlender seitlicher Begrenzung des Abflussquerschnitts
- Ablagerungen insbesondere bei Verbreiterung des Bachbettes oder bei Gefällsknick; häufig bei Gefällen von 5% ... 18%

#### Charakteristische Spuren im Gelände, die auf Murgänge hindeuten:

- Levées (seitliche Murwälle)
- stehengebliebene Murzungen, auf dem Kegel oder bei lokaler Gerinneverbreiterung
- unsortierte Ablagerungen (alle Korngrößen durcheinander, keine Schichtung)
- grobe Blöcke und feinkörnige Matrix (sofern nicht ausgewaschen) in Ablagerungen
- abgeschliffene und geritzte Felspartien
- scharfe Begrenzung der Ablagerungen
- geringe Schäden an Vegetation im Ablagerungsbereich
- Erosionsquerschnitt meist U-förmig

**Abbildung 2.4: Charakteristische Eigenschaften von Murgängen (aus Rickenmann, 1996 in Rickenmann, 2014).**

### 2.3.4 Arten von Murgängen

Wie in Abbildung 2.5 graphisch dargestellt, werden Murgänge in der Literatur abhängig von ihrer Kornzusammensetzung in Schlammströme und granulare Murgänge unterschieden (Rickenmann, 2014).

Bei *granularen Murgängen* (engl. *debris flow*; *granular or stony debris flow*) sammeln sich an der Murfront große Blöcke an und auch im restlichen Teil des Murganges wird Geschiebe größerer Korngrößen transportiert.

Bei *Schlammströmen* (*mud flow*) dagegen dominieren das Feinmaterial und das Wasser. Größere Korngrößen (z.B. Steine) fehlen in der Regel oder haben keinen ausschlaggebenden Einfluss auf das Fließverhalten.

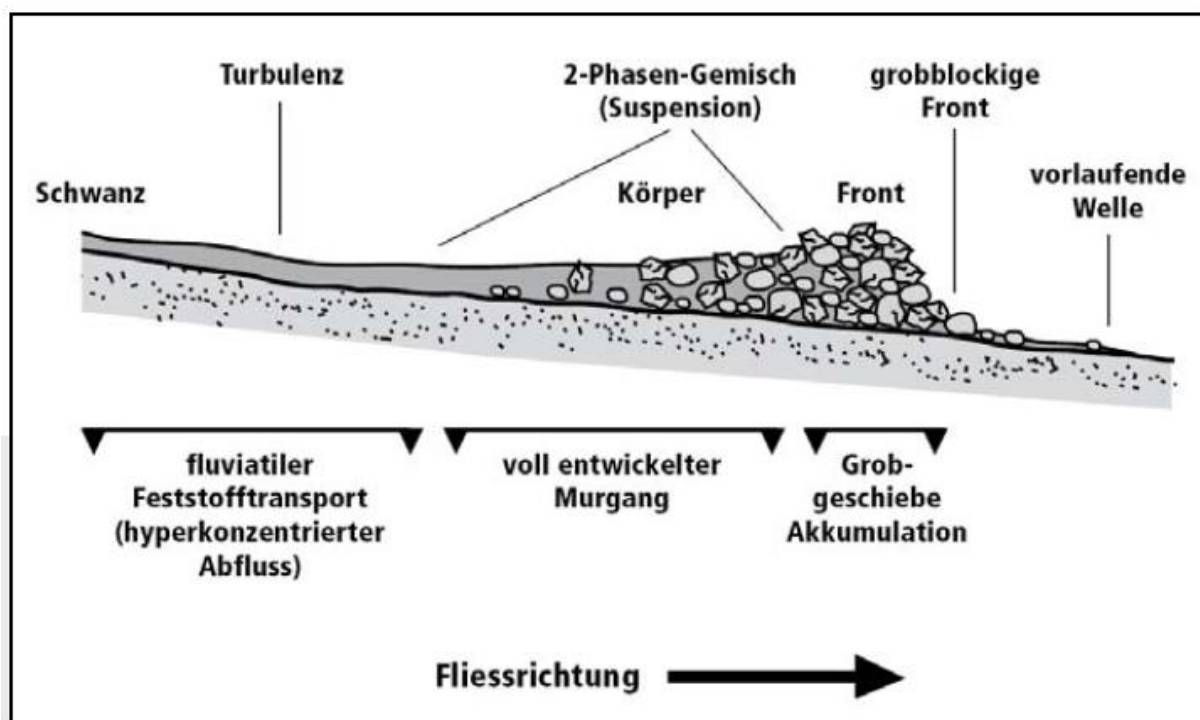


**Abbildung 2.5:** Bild A: Front eines Schlammstromes (Youtube, s.a.); Bild B: Front eines granularen Murganges (Abteilung Wasserschutzbauten, 2015).

### 2.3.5 Fließverhalten von Murgängen

Der wellenförmige, schubartige Abfluss mit der Bildung einer Murfront ist charakteristisch für das Fließverhalten eines Murganges. Dieses Fließverhalten unterscheidet einen Murgang deutlich vom Reinwasserabfluss (Rickenmann, 2001). Beispielsweise weist ein Murgang, als Suspension aus Wasser und Gestein, im Vergleich zu einem Hochwasser eine deutlich höhere Zähigkeit auf (Rickenmann, 2014).

Ein Murgang kann aus einem oder mehreren Murschüben bestehen. Wie in Abbildung 2.6 dargestellt, kann ein einzelner Murschub in die Murfront (Murkopf), den Murkörper und den Murschwanz gegliedert werden (Hübl et al., 2011).



**Abbildung 2.6:** Längsschnitt eines Murschubes (aus Hübl et al., 2011).

An der Murfront sind meist die Feststoffe konzentriert, wobei dort sogar Blöcke mit mehreren Metern Durchmesser transportiert werden können. Die Höhe einer Murfront kann bis zu 10 Metern betragen und maximale Fließgeschwindigkeiten von 15 m/s (54 km/h) bis 20 m/s (70 km/h) aufweisen (Rickenmann, 2014; Hübl et al., 2011).

Hinter der Front, im sog. Murkörper, vermindert sich sowohl die Abflusstiefe als auch die Feststoffkonzentration  $c_v$  (Rickenmann, 2002). Der Murkörper besteht aus einer Mischung von groben bis feinen Partikeln und Wasser (Hübl et al., 2011). In diesem Bereich des Murganges werden die größeren Kornfraktionen eher in Sohlennähe transportiert (Rickenmann, 2002).

Schließlich bildet der, aus einem Gemisch aus Wasser und feineren Partikel bestehende, sog. Murschwanz den Abschluss eines Murschubes (Hübl et al., 2011). Sein flüssigeres Verhalten ähnelt den hydraulischen Bedingungen eines geschiebeführenden Hochwassers (Rickenmann, 2002; Hübl et al., 2011).

### 2.3.6 Auslösebedingungen

Für die Auslösung von Murgängen muss neben den direkt auslösenden Niederschlägen eine Grunddisposition des Einzugsgebiets gegeben sein (Haeberli et al., 1991). Diese Grunddisposition ist geprägt von der morphologischen Entstehungsgeschichte, der aktuellen Dynamik des Einzugsgebiets, den geologischen und glaziologischen Verhältnissen, sowie von den hydrologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet (Haeberli et al., 1991). Murgänge entstehen bei kritischen Kombinationen von Geschiebe, Wasser und Gefälle (Haeberli et al., 1991):

#### Wasser

Das Wasser spielt bei der Auslösung eines Murganges die entscheidende Rolle (Rickenmann, 2002). Neben dem Oberflächenabfluss, welcher aus dem auslösenden Niederschlagsereignis generiert wird, ist auch das Ausmaß der Bodensättigung entscheidend (Rickenmann, 2014).

#### Geschiebe

Für die Bildung von Murgängen muss eine Mindestmenge an Gesteinsmaterial plötzlich in Bewegung geraten (Rickenmann, 2014). Hierfür werden in der Literatur mehrere *Auslösemechanismen* beschrieben:

- Hanginstabilität oder Hangrutschung mit Verflüssigung des Materials und Weiterfließen als Murgang (Haeberli et al., 1991).
- Verflüssigung eines Teiles des Lockermaterials im Gerinnebett bei ausreichendem Gefälle und einer Belastung durch Oberflächenabfluss (Haeberli et al., 1991).
- Bruch einer Blockierung oder Verkläusung im Gerinne: Durch gröbere Blöcke, Holz, oder seitliche Rutschungen kann ein temporärer Damm entstehen. Beim Bruch des Dammes kommt es zur Ausbildung von schwallartigen Murgängen (Haeberli et al., 1991).
- Mobilisierung von Geschiebe aufgrund Tiefen- und Seitenerosion (Hübl et al., 2011).

#### Hangneigung

Nach Rickenmann, 2014 beträgt das Mindestgefälle für die Ausbildung von Murgängen 25-30 %; beim Vorhandensein von kritischen Bedingungen für Murgänge (z.B. Schwemmholz; Engstellen) kann sich ein Murgang bereits ab einem mittleren Gefälle von 15 % ausbilden.

### 2.3.7 Wichtige Größen von Murgängen

Zur Abschätzung von maßgebenden Reichweiten, Ablagerungsflächen und Anprallkräften sind die Murfracht, die Geschwindigkeit, die volumetrische Feststoffkonzentration, die Ganglinie sowie der Maximalabfluss eines Murganges von höchster Relevanz.

- Murfracht  
Für eine Gefahrenbeurteilung ist die Festlegung der Ereignisgröße  $[m^3]$ , sowie deren Bezug zur Ereignishäufigkeit von großer Bedeutung. Auf Basis der Ereignisgröße können die Reichweiten und Ablagerungslängen auf dem Kegel bestimmt werden (Rickenmann, 2014). In der Regel ist die Murfracht größer als die Fracht eines geschiebeführenden Hochwasserereignisses (Rickenmann, 2014). Für detailliertere Informationen zur Abschätzung von Murgang-Frachten wird auf Rickenmann, 2014 verwiesen.
- Geschwindigkeit  
Die Geschwindigkeit ist neben der Dichte des Murganges eine wichtige Größe zur Berechnung des auftretenden Staudruckes. Murgänge können maximale Geschwindigkeiten von 15-20 m/s (54-70 km/h) aufwiesen (Hübl et al., 2011; Rickenmann, 2002). Auch Costa, 1984 beschreibt in seiner Arbeit Fließgeschwindigkeiten von 0,5 m/s bis 20 m/s.
- Volumetrische Feststoffkonzentration  
Die volumetrische Feststoffkonzentration  $c_v$  ist definiert als das Verhältnis der Geschiebefracht  $[m^3]$  zur Gesamtfracht  $[m^3]$  von Murgängen (Hübl, 2009).  
In der Literatur beschreiben mehrere Autoren (Costa, 1984; Hübl et al., 2011; Fleischer, 2011; Rickenmann, 2014) eine Bandbreite der volumetrischen Feststoffkonzentration von 0,2 bis 0,9. Navratil et al., 2013 konnten bei der Auswertung von Murgängen in Frankreich feststellen, dass die newtonsche Viskosität mit steigendem Spitzenabfluss steigt und ab einem gewissen Maximalabfluss (bei ihren Untersuchungen 8  $m^3/s$ ) nahezu konstant bleibt.
- Dichte  
Murgänge weisen nach Suda und Rudolf-Miklau, 2012 eine Dichte von 1300-2500  $kg/m^3$  auf. Dies kann durch Costa, 1984 und Rickenmann, 2014 bestätigt werden.
- Maximalabfluss/Ganglinie  
Der Maximalabfluss eines Murganges und deren Charakteristika werden in Kapitel 3 genauer untersucht und beschrieben.

### 2.3.8 Ablagerungsverhalten

Aufgrund der verschiedenen Parameter (Viskosität, Dichte, Volumen, Ganglinie,...) und der unterschiedlichen Topographien ist es sehr schwierig charakteristische Gemeinsamkeiten des Ablagerungsverhaltens von Murgängen zu beschreiben. Trotzdem gibt es einige typische Ablagerungsformen von Murgängen:

- Murkopf  
Der Murkopf ist ein markantes Erkennungszeichen von Murgängen (Hübl et al., 2011). Murköpfe entstehen durch das plötzliche Anhalten der hoch-viskosen Mursuspension (Rickenmann, 2002) und bilden eine steil gewölbte, aus grobem Material bestehende

Stirn (Hübl et al., 2011). Da sie eine Mächtigkeit von mehreren Metern aufweisen können (Hübl et al., 2011), grenzen sie sich deutlich vom umliegenden Terrain ab (Rickenmann, 2002).

– Murzunge/Murlappen

Murzungen sind klar begrenzte, zungenförmige Erweiterungen der Murablagerung. Murzungen entstehen durch das seitliche Ausbrechen des Murkörpers auf dem Kegelbereich nach dem Stillstand der Murfront. Sie weisen aufgrund eines höheren Feinfraktion-Anteils ein flüssigeres Verhalten auf, und können entlegenere Kegelbereiche erreichen (Hübl et al., 2011). Vereinzelt können sogar auf der Oberfläche große Blöcke mittransportiert werden. Die scharf vom Umland abgegrenzten Ablagerungen weisen weder eine Schichtung auf, noch sind sie sortiert.

– Murfirte (Levéés)

Levéés sind strömungsparallele, dammförmige und meist grobkörnige Ablagerungen mit steilen Flanken, welche ein charakteristisches Merkmal von Transportstrecken und Ablagerungsbereichen darstellen. Die Materialablagerungen werden meist auf das bestehende Gelände aufgebaut und bilden eigene „Leitbahnen“ der Murgänge (Hübl et al., 2011; Rickenmann, 2002).

Weiterführende Zusammenhänge zwischen charakteristischen Murgang-Parametern (Murfracht, Ablagerungsfläche; Reichweite von Murgängen) werden in Rickenmann, 2014 beschrieben.

### 3 Der Murgang-Spitzenabfluss

Der Spitzenabfluss von Murgängen überschreitet oft die maximale Abflusskapazität des Gerinnes. Somit kommt es zu Murablagerungen am Schwemmkegel und beträchtlichen Gefahren für Gebäude, Infrastrukturen und Menschen (Rickenmann, 1999). Bei der Bewertung von Einwirkungen auf mögliche Schadobjekte infolge von Murgängen ist der Abfluss das wichtigste Kriterium (Suda und Rudolf-Miklau, 2012).

Weiters ist der Maximalabfluss für die Abschätzung von kritischen Stellen (Ausbruchstellen), wie zum Beispiel Brücken, von großer Bedeutung (Rickenmann, 1999 und Rickenmann, 2014). Beispielsweise kann ein Gerinne einen Murgang mit einem kleinen Spitzenabfluss schadlos abführen, während die Kapazität bei demselben Murgangsvolumen, aber einem höheren Spitzenabfluss überschritten wird und es infolge des Ausbruchs des Murganges zu einer Vermurung möglicher Schadobjekte kommt.

#### 3.1 Definition

Der Spitzenabfluss ist definiert als die größte Abflussmenge, die während eines Abflusserignisses in einem bestimmten Abflussquerschnitt gemessen wird. Somit stellt der Maximalabfluss den höchsten Abflusswert einer Ganglinie dar (ÖNORM-REGEL 24800, 2009).

#### 3.2 Charakteristika von Murgang-Spitzenabflüssen

Der wellenförmige, schubartige Abfluss eines Murganges ist ausgeprägt instationär mit einem nicht-newtonischen Fließverhalten. Ein Murgang weist zumeist nur eine sehr kurze, ausgeprägte Abflussspitze auf (Hübl, s.a.). Allerdings werden in der Literatur auch Murgänge mit mehreren, in kurzen Zeitabständen aufeinander folgenden Murschüben beschrieben (Hübl, 2009). Im chinesischen Einzugsgebiet des Xiaojiang River beschreibt Costa, 1984 sogar Murgänge mit 100-200 Murschüben, welche auf den Bruch von temporären Verklauungen im Gerinne zurückzuführen sind.

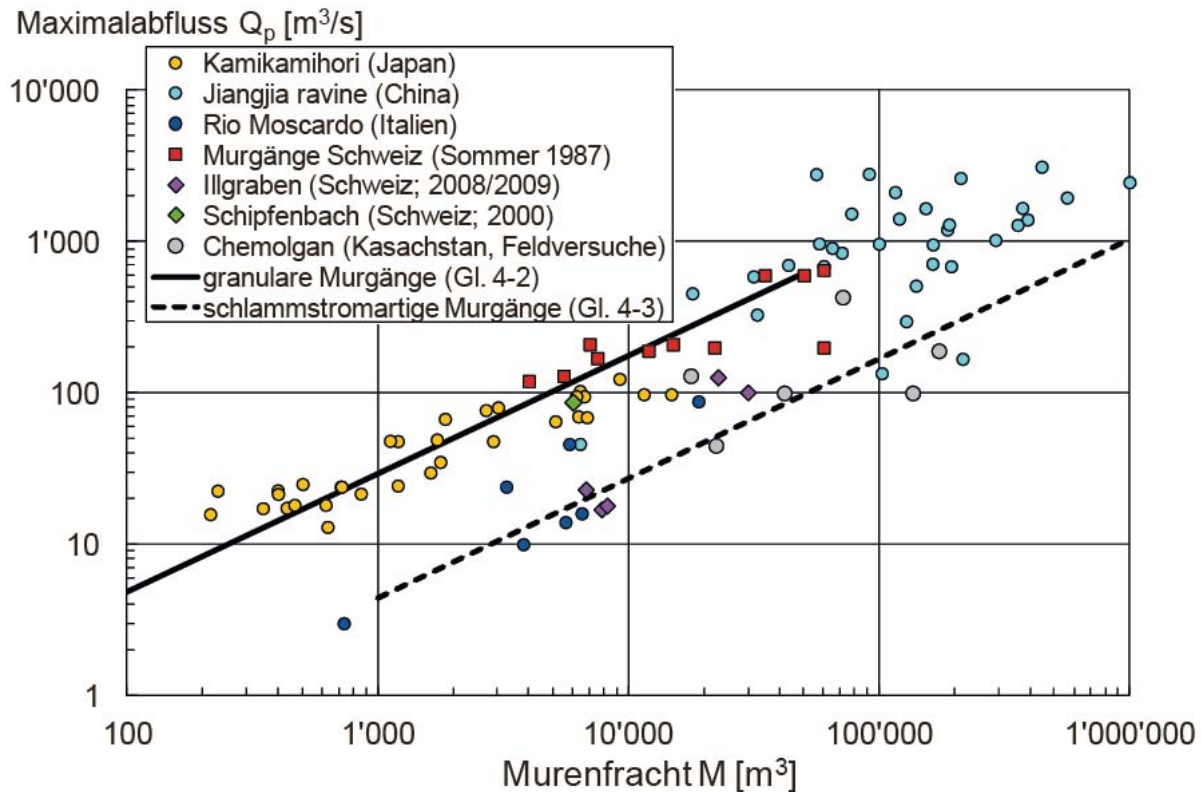
Die Ganglinie eines Murganges kann vereinfachend mit einem dreiecksförmigen Verlauf angenommen werden, wobei der Maximalabfluss meist an der Murfront auftritt (Haeberli et al., 1991). Nach Rickenmann, 2014 kann der Maximalabfluss bei alpinen Murgängen 100 m<sup>3</sup>/s bis 1000 m<sup>3</sup>/s erreichen.

Der Murgang-Spitzenabfluss wird von verschiedenen, nachfolgend erläuterten Faktoren beeinflusst:

- Murgangsvolumen
- Art des Murgangs (granularer Murgang/schlammartiger Murgang)
- Mobilisierungsintensität der Feststoffe
- Systemzustände
- Disposition des Einzugsgebiets
- Morphologie des Gerinnes und des Einzugsgebiets
- Reinwasserspitzen-Abfluss im Gerinne
- Niederschlagsstärke

### 3.2.1 Fracht eines Murganges

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Murgang-Spitzenabfluss und der Fracht eines Murganges. Dabei ist ersichtlich, dass der Maximalabfluss eines Murganges mit steigender Murfracht ansteigt:



**Abbildung 3.1:** Maximalabfluss eines Murganges in Abhängigkeit der Murfracht (aus Rickenmann, 2014).

Rickenmann, 2014 konnte jedoch feststellen, dass der Maximalabfluss eines Murganges eher mit dem Volumen des größten Schubes als mit der gesamten Murfracht eines Ereignisses korreliert.

### 3.2.2 Art des Murganges (granularer Murgang vs. schlammstromartige Murgänge)

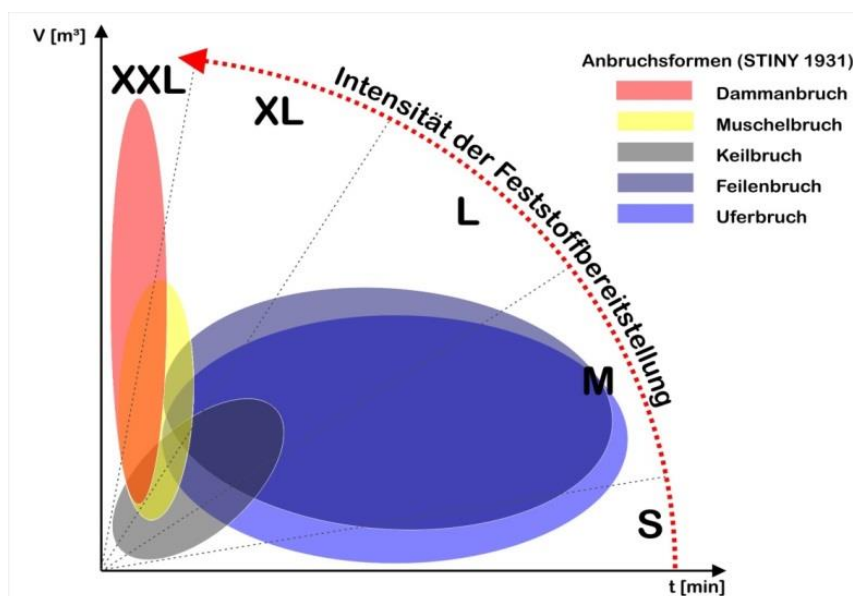
Wie bereits in Kapitel 2.3.4 beschrieben, können Murgänge in granulare und schlammstromartige Murgänge unterschieden werden. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, unterscheiden sich schlammstromartige und granulare Murgänge auch anhand des Spitzenabflusses. Mizuyama et al., 1992 konnte feststellen, dass granulare Murgänge im Vergleich zu schlammartigen Murgängen aufgrund des höheren Fließwiderstandes höhere Murgang-Spitzenabflüsse aufweisen. Generell besteht nach Rickenmann et al., 2001 die Tendenz, dass Murgänge mit einem hohen Anteil an Feinmaterial einen niedrigeren Maximalabfluss aufweisen. Tsuchiya et al. 1996 beschreiben bei höheren Murgang-Spitzenabflüssen auch höhere Feststoffkonzentrationen.

### 3.2.3 Geomorphologie des Gerinnes und des Einzugsgebiets

Die Geomorphologie des Gerinnes und des Einzugsgebiets haben grundlegende Auswirkungen auf den Spitzenabfluss eines daraus resultierenden Murganges. Beispielsweise ist der Maximalabfluss eines Murganges aus einem kleinen Einzugsgebiet mit langen Fließzeiten eher klein (Chen und Chuang, 2014). Bovis und Jakob, 1999 konnten in ihren Untersuchungen zudem eine Korrelation zwischen dem Abfluss transport-limitierter Murgänge und der Einzugsgebietsgröße sowie der Gerinnelänge finden. Die Ergebnisse der Untersuchungen von Wei et al., in. prep. zeigten jedoch, dass die mittlere Neigung, die Dichte und die Gerinnebettraugigkeit einen größeren Einfluss auf den Spitzenabfluss haben als die Einzugsgebietsfläche, die Gerinnelänge oder etwa der Hochwasser-Spitzenabfluss.

### 3.2.4 Mobilisierungsintensität des Geschiebes

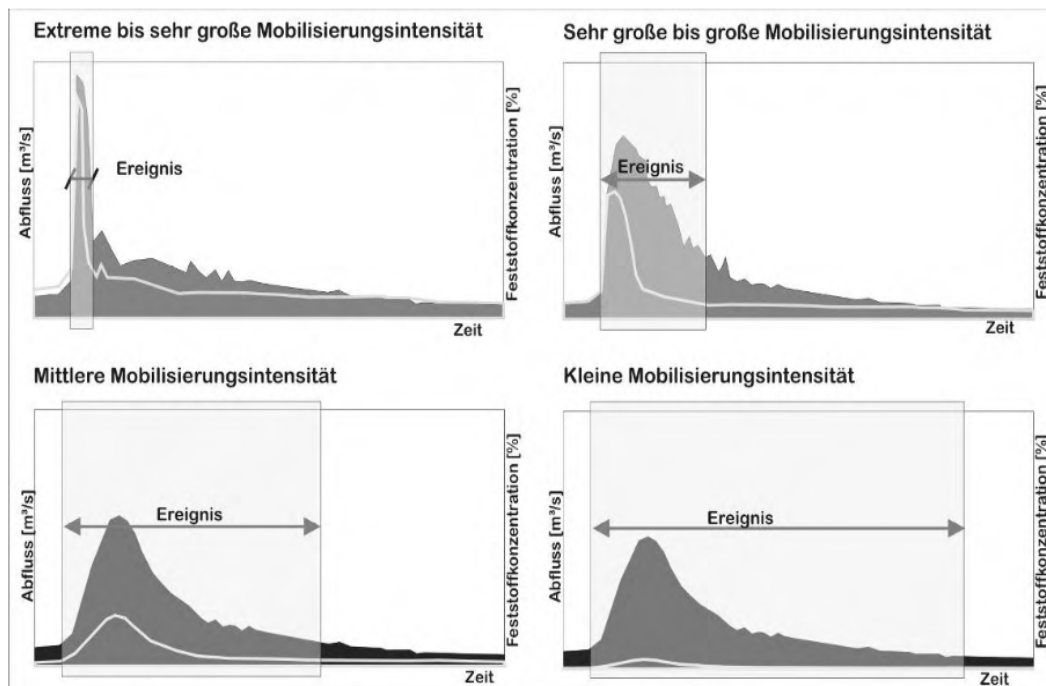
Die Form der Ganglinie und somit auch der Spitzenabfluss eines Murganges wird maßgeblich von der Mobilisierungsintensität der Feststoffe beeinflusst (Hübl, 2009). Die Mobilisierungsintensität ist definiert als jene Zeit, in der das Geschiebe mobilisiert wird und stellt somit eine Kombination des mobilisierten Volumens und der Mobilisierungszeit dar. Die Mobilisierungsintensität kann anhand geomorphologischer Indikatoren (z.B. Anbruchsform) und der Versagensmechanismen abgeleitet werden. Beispielsweise können Muschel- und Dammanbrüche sehr große Geschiebemengen in kurzer Zeit bereitstellen und weisen somit hohe Mobilisierungsintensitäten auf. Abbildung 3.2 veranschaulicht verschiedene Mobilisierungsintensitäten abhängig von der Anbruchsform (Hübl, s.a.).



**Abbildung 3.2:** Schema zur Intensitätsklassifizierung verschiedener Anbruchsformen (aus Hübl, s.a.).

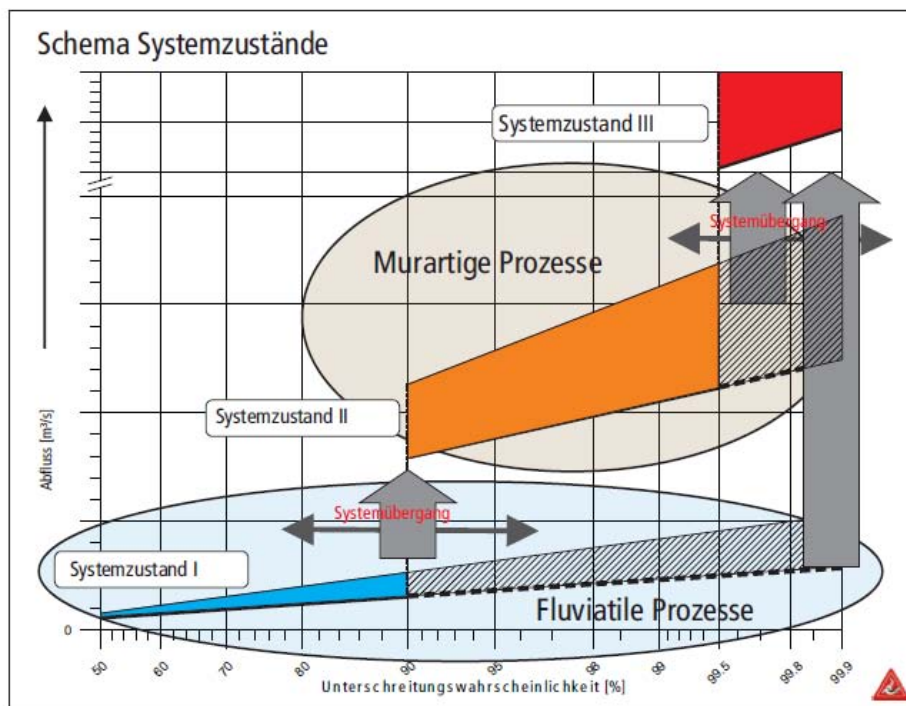
Durch die Mobilisierungsintensität wird die Form der Ganglinie und der Maximalabfluss eines Murganges maßgeblich verändert (Hübl, s.a.). Beispielsweise können große bis extreme Mobilisierungsintensitäten einen kurzen aber sehr hohen Spitzenabfluss oder auch mehrere aufeinanderfolgende, größere Abflussspitzen aufweisen (Hübl, 2009). Abbildung 3.3 zeigt die

Ausbildung verschiedener Ganglinien und Spitzenabflüsse abhängig von der Mobilisierungsintensität.



**Abbildung 3.3: Verschiedene Ausprägungen der Ganglinien und Spitzenabflüsse aufgrund unterschiedlicher Mobilisierungsintensitäten (aus Hübl, 2009).**

Weiters ist die Mobilisierungsintensität ein Kriterium für die weitere Entwicklung des Verlagerungsprozesses im Gerinne.



**Abbildung 3.4: Schemaskizze Systemzustände von Wildbacheinzugsgebieten (aus Rimböck et al., 2013).**

Durch unterschiedliche Mobilisierungsintensitäten werden unterschiedliche Systemzustände generiert, welche sich wiederum auf den Murgang-Spitzenabfluss auswirken (Hübl, s.a.). In obiger Abbildung ist der schematische Zusammenhang der Systemzustände mit dem Abfluss graphisch dargestellt.

Beispielsweise verhält sich ein Wildbacheinzugsgebiet mit einer kleinen Disposition zur Feststoffmobilisierung ähnlich einem größeren Einzugsgebiet, wo fluviale Prozesse (Hochwasser; fluvialer Geschiebetransport) dominieren, während ein Wildbacheinzugsgebiet mit einer steigenden Disposition in einen Systemzustand mit murartigen Verlagerungsprozessen übergeht. Bei sehr hohen Dispositionen kann ein Übergang in einen anderen Systemzustand bereits bei sehr kleinen Auslöseereignissen erfolgen.

In gewissen Einzugsgebieten mit extremen Mobilisierungsintensitäten kann sogar ein Übergang in den Systemzustand 3 mit extrem hohen Murgangabflüssen stattfinden. Die Disposition eines Einzugsgebiets ist ein dynamischer Faktor, der auf einer Kombination von Untergrund (Boden, Vegetation), Morphologie, Klima, Vegetation, Landnutzung und Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes beruht (Hübl, 2009).

### **3.2.5 Niederschlagsintensität**

Tsuchiya et al., 1996 und Wei et al., in. prep. stellten bei ihren Untersuchungen fest, dass der Spitzenabfluss eines Murganges bei starken, intensiven Niederschlägen steigt. Bei langandauernden Niederschlägen steigt hingegen nur die gesamte Murfracht.

## **3.3 Methoden zur Bestimmung der Murgang-Spitzenabflüsse**

Die Bestimmung von Murgang-Spitzenabflüssen stellt auch heute noch ein weitgehend ungelöstes Problem dar. Einerseits lässt sich dies auf den Mangel an verfügbaren Messdaten zurückführen, da Murgänge in einem Einzugsgebiet nur sporadisch auftreten und die Messung von Spitzenabflüssen nur mit teils hohen, technischen und finanziellen Mitteln möglich ist. Andererseits können in einem Einzugsgebiet, abhängig von den Vorbedingungen, bei gleicher Belastung unterschiedliche Verlagerungsprozesse auftreten, sodass Analogieschlüsse von einem Einzugsgebiet auf ein anderes nur beschränkt zulässig sind (Hübl, s.a.). Trotzdem versuchen zahlreiche Wissenschaftler und Praktiker Methoden zur Bestimmung von Murgang-Spitzenabflüssen zu entwickeln. Im folgenden Teil werden zwei Methoden näher beschrieben, welche im Alpenraum häufig Verwendung finden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden weitere Methoden zur Abflussbestimmung von Murgängen in Anhang 1 angeführt.

### **3.3.1 Methode nach MIZUYAMA**

Die Methode nach Mizuyama et al., 1992 basiert auf dem Zusammenhang zwischen Volumen und Spitzenabfluss des Murgangs. Auf der Grundlage von Daten aus Japan konnte Mizuyama et al., 1992 eine Korrelation zwischen beiden Parametern finden, welche auch mit Daten aus China, U.S.A, Kolumbien, Canada und der Schweiz bestätigt wurde (Mizuyama et al., 1992; Rickenmann, 2014). Dabei konnten Mizuyama et al., 1992 granulare und schlammstromartige Murgänge unterscheiden (vgl. Abbildung 3.1):

$$Q_M = 0.0188 * V^{0,79} \quad (\text{schlammstromartige Murgänge})$$

$$Q_M = 0.135 * V^{0,78} \quad (\text{granulare Murgänge})$$

**wobei:**

$$Q_M = \text{Spitzenabfluss des Murganges [m}^3\text{/s]}$$

$$V = \text{Gesamtvolumen des Murganges [m}^3\text{]}$$

Aufgrund der unterschiedlichen Wasser- und Feinstoffanteile ist jedoch in manchen Fällen eine eindeutige Zuordnung schwierig.

### **3.3.2 Methode des sog. Murgangsintensitätsfaktors**

Viele Wissenschaftler aus aller Welt versuchten Murgang-Spitzenabflüsse mithilfe von Murgangsintensitätsfaktoren zu bestimmen. Ausführliche Erläuterungen zur Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses anhand dieser Methode finden sich im folgenden Kapitel.

## 4 Murgangsintensitätsfaktoren

Neben der Beschreibung der Methode des Murgangsintensitätsfaktors soll im folgenden Kapitel der Begriff „Murgangsintensitätsfaktor“ erläutert, sowie die in der Literatur verwendeten Synonyme genannt werden. Weiters soll das Kapitel verschiedene Methoden zur Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren beleuchten.

### 4.1 Definition

Murgangsintensitätsfaktoren sind Faktoren, welche dazu dienen, auf der Grundlage von Reinwasser-Spitzenabflüssen maximale Murgang-Abflüsse zu bestimmen. Durch die Multiplikation des theoretischen Reinwasser-Spitzenabflusses  $Q_w$  mit dem Murgangsintensitätsfaktor IF kann der Spitzenabfluss eines Murganges berechnet werden (Hübl, s.a.). Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, kann dieser um ein Vielfaches höher sein als der Reinwasser-Spitzenabfluss.

$$Q_{Murgang} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = Q_{Reinwasser} \left[ \frac{m^3}{s} \right] * IF [-]$$

wobei:

|                  |   |                                       |
|------------------|---|---------------------------------------|
| $Q_{Murgang}$    | = | Spitzenabfluss des Murganges [m³/s]   |
| $Q_{Reinwasser}$ | = | Spitzenabfluss des Reinwassers [m³/s] |
| IF               | = | Murgangsintensitätsfaktor [-]         |

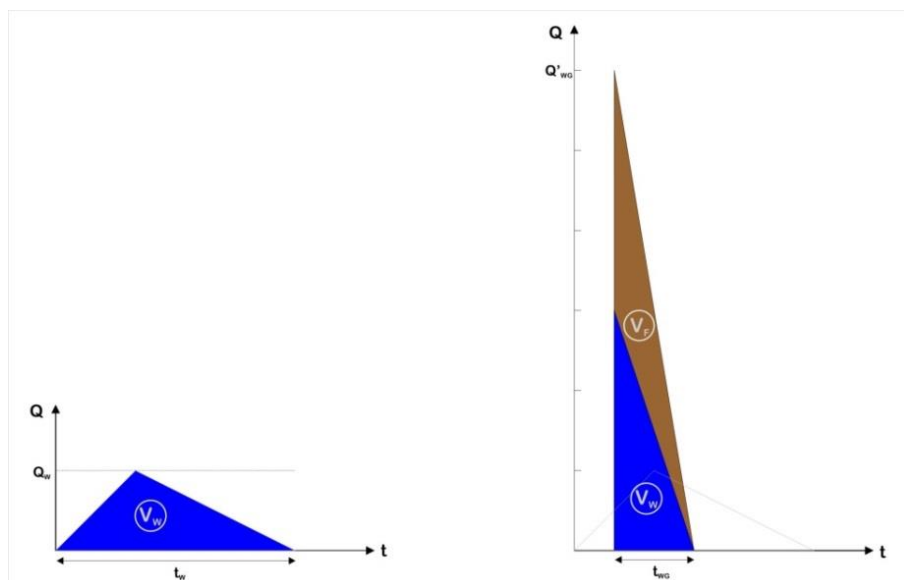


Abbildung 4.1: Systemskizze Murgangsintensitätsfaktor [Q: allgemein Abfluss] (aus Hübl, s.a.).

### 4.2 Synonyme

Da mehrere Autoren auf unterschiedliche Weise Murgangsintensitätsfaktoren beschreiben, findet man in der Literatur auch unterschiedliche Bezeichnungen. Häufig verwendete Synonyme sind beispielsweise Ereignisfaktor; discharge coefficient; bulking factor; coefficient of discharge.

### 4.3 Methoden zur Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren

Mehrere Wissenschaftler versuchten den Murgangsintensitätsfaktor mit verschiedenen Ansätzen und Parametern zu beschreiben. Im folgenden Teil sollen die verschiedenen Methoden und Ansätze der Autoren beschrieben und erläutert werden.

#### 4.3.1 Methoden basierend auf der volumetrischen Feststoffkonzentration $c_v$

Takahashi, 1991 und Tognacca, 1999 versuchten den Murgangabfluss mit Hilfe der Berücksichtigung der volumetrischen Feststoffkonzentration zu berechnen. Diese Methoden sind vor allem in Japan und auch im Alpenraum sehr gebräuchlich (Gostner, 2002).

Beide Methoden berechnen aus einem Reinwasser-Hydrographen über die volumetrische Feststoffkonzentration  $c_v$  eine mögliche Murgang-Ganglinie.

Dabei gehen die Methoden davon aus, dass der Wasseranteil in einem Bachlauf für einen eventuellen Murgang begrenzend sein kann. Die Methoden stützen sich auf die Bestimmung des Transportvermögens des Wasser-Feststoff-Gemisches oder auf die Erhöhung des Abflusses um einen konstanten Geschiebeanteil (Rickenmann, 2014).

##### 4.3.1.1 Methode nach TAKAHASHI

Takahashi, 1991 entwickelte erstmals den Ansatz basierend auf der volumetrischen Feststoffkonzentration, welche den Murgangabfluss  $Q$  als Summe des Wasserabflusses  $Q_{RW}$  und des Geschiebeabflusses  $Q_G$  bestimmt:

$$Q = Q_W + Q_G$$

Für die Bestimmung des Geschiebeabflusses berücksichtigt Takahashi, 1991 zusätzlich zur volumetrischen Feststoffkonzentration  $c_v$  die Grenzkonzentration  $c^*$  des Murganges und erhält somit folgende Formel:

$$Q_G = \frac{c_v}{c^* - c_v} * Q_W$$

Nach Einsetzen in die obige Formel für  $Q$ , entsprechendes Erweitern und Zusammenfassen ergibt sich:

$$Q = Q_W + Q_G = \frac{c^*}{c^* - c_v} * Q_W$$

Verschiedene Autoren haben unterschiedliche Grenzkonzentrationen der Murgänge ( $c^*$ ) beschrieben (in Gostner, 2002):

**Tabelle 4.1: verschiedene Grenzkonzentrationen von Murgängen.**

| Autor                      | Material           | $c^*$   |
|----------------------------|--------------------|---------|
| Tognacca, 1999             |                    | 0,6-0,7 |
| Armanini, 1999             |                    | 0,6-0,7 |
| Weber und Rickenmann, 2000 | Kiesgrubenmaterial | 0,85    |
| Weber und Rickenmann, 2000 | Wildbachmaterial   | 0,81    |
| Jäggi und Pellandini, 1993 |                    | 0,63    |

Somit lässt sich aus dem Ansatz nach Takahashi folgende Formel zur Bestimmung des Murgangsintensitätsfaktors IF ableiten:

$$IF = \frac{c^*}{c^* - c_v}$$

#### **4.3.1.2 Methode nach TOGNACCA**

Die Methode nach Tognacca, 1999 basiert auf dem Ansatz nach Takahashi. Tognacca, 1999 ersetzt die Grenzkonzentration  $c^*$  mit der Zahl 1 und vereinfacht somit die Formel auf einen Ansatz, welcher einzig von der volumetrischen Feststoffkonzentration  $c_v$  abhängt.

$$Q = \frac{1}{1 - c_v} * Q_w$$

Daraus lässt sich folgender Ansatz zur Ermittlung des Murgangsintensitätsfaktors IF bestimmen:

$$IF = \frac{1}{1 - c_v}$$

#### **4.3.1.3 Vergleich beider Methoden**

Setzt man in die Formel von Takahashi die Grenzkonzentration  $c^*$  gleich 1, so reduzieren sich die beiden Ansätze auf dieselbe Formel. Da allerdings eine Grenzkonzentration  $c^*$  in der Natur nicht möglich ist, da ansonsten der Murgang aus reinem Geschiebe ohne Wasser bestehen würde, sind die Ansätze unterschiedlich. Zudem verglich Gostner, 2002 die beiden Ansätze, indem er ein  $c^*$  von 0,7 und ein  $c_v$  von 0,6 annahm. Dabei konnte er feststellen, dass die Unterschiede umso größer werden, je mehr sich die volumetrische Feststoffkonzentration  $c_v$  der Grenzkonzentration des Murganges  $c^*$  nähert. Beispielsweise ergibt sich unter diesen Annahmen nach der Formel von Tognacca ein Gesamtabfluss, der das 2,5-fache des Reinwasserabflusses beträgt; bei der Formel von Takahashi ergibt sich unter gleichen Voraussetzungen schon der 7-fache Reinwasserabfluss.

Weiters fand Gostner, 2002 eine Unstimmigkeit von Takahashi: Wenn der Reinwasserabfluss 1/7 und die Feststofffracht folglich 6/7 des Gesamtabflusses betragen, würde sich eine volumetrische Feststoffkonzentration des Murganges von 0,86 errechnen, obwohl bei der Berechnung von einem  $c_v$  von 0,6 ausgegangen wurde (Gostner, 2002).

Die Formel von Tognacca beschreibt eher den Murkörper und unterschätzt wahrscheinlich die maximalen Murabflüsse, während sich Takahashi eher auf die Beschreibung der Murfront konzentriert und den Murkörper nur unzureichend beschreibt (Gostner, 2002).

#### **4.3.1.4 Kritische Anmerkungen**

Nach Chen und Chuang, 2014 ist dieser Ansatz nur für Murgänge zulässig, welche durch das Mischen von Wasser und Sediment im Gerinne entstehen. Zusätzlich ist die Bestimmung der volumetrischen Feststoffkonzentration mit großen Unsicherheiten behaftet.

In der Literatur (ÖNORM-REGEL 24800, 2009; Costa, 1984) werden volumetrische Feststoffkonzentrationen von 20-86 % beschrieben. Daraus resultieren auch große Schwan-

kungen der Murgangsintensitätsfaktoren, welche wiederum zu großen Schwankungen des Maximalabflusses von Murgängen führen.

Mehrere Autoren (Rickenmann, 2014, Chen und Chuang, 2014) weisen zudem daraufhin, dass mit der volumetrischen Methode die Murgang-Spitzenabflüsse (vor allem von Rutschungen ausgelöste Murgänge) stark unterschätzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Spitzenabfluss von Murgängen nicht einfach die, um den Geschiebeanteil erhöhte Abflussspitze des Reinwasser-Hydrographs darstellt (Rickenmann, 2014). Aufgrund dieser Erkenntnis entwickelte Hübl, s.a. eine neue Methode, welche basierend auf dem volumetrischen Geschiebeanteil einen neuen Anpassungsfaktor berücksichtigt.

#### 4.3.2 Methode nach HÜBL

Die Methode nach Hübl, s.a. basiert ähnlich wie die Methode nach Takahashi und Tognacca auf der Adaptierung des Reinwasserabflusses. Während die volumetrischen Methoden (Takahashi/Tognacca) eine gesamte Murgang-Ganglinie beschreiben, kann mit der Methode nach Hübl einzig der Maximalabfluss eines Murganges berechnet werden. Für eine dementsprechende Anpassung des Reinwasser-Spitzenabflusses führt Hübl, s.a. zwei Anpassungsfaktoren ein:

- Mengenfaktor (BF)
- Skalierungsfaktor (SF).

#### Was ist der Mengenfaktor BF?

Der Mengenfaktor ist ähnlich den Ansätzen nach Tognacca und Takahashi und dient zur Erhöhung der Abflussfracht. Die Abflussfrachten von Wildbächen setzen sich nach Hübl, s.a. aus einer Wasserfracht ( $V_W$ ) und einer Geschiebefracht ( $V_G$ ) zusammen. Um die Gesamtfracht eines Ereignisses ( $V_{WG}$ ) zu erhalten, kann die Wasserfracht mit einem dimensionslosen Mengenfaktor (BF) multipliziert werden.

$$V_{WG} = V_W * BF$$

$$BF = \frac{V_W + V_G}{V_W} = 1 + \frac{V_G}{V_W}$$

Zumeist wird das Verhältnis von der Geschiebefracht zur Gesamtfracht durch die volumetrische Feststoffkonzentration  $c_v$  ausgedrückt, welche sich aus Ablagerungen von Murgängen mithilfe einfacher Laboruntersuchungen ermitteln lässt (Hübl, s.a.). Dabei wird jedoch eine konstante Feststoffkonzentration  $c_v$  während des gesamten Ereignisses angenommen, was eine starke Vereinfachung eines realen Murganges ist (Hübl, s.a.).

$$c_v = \frac{V_G}{V_W + V_G}$$

$$c_v * V_W + c_v * V_G = V_G$$

$$c_v * V_W = V_G * (1 - c_v)$$

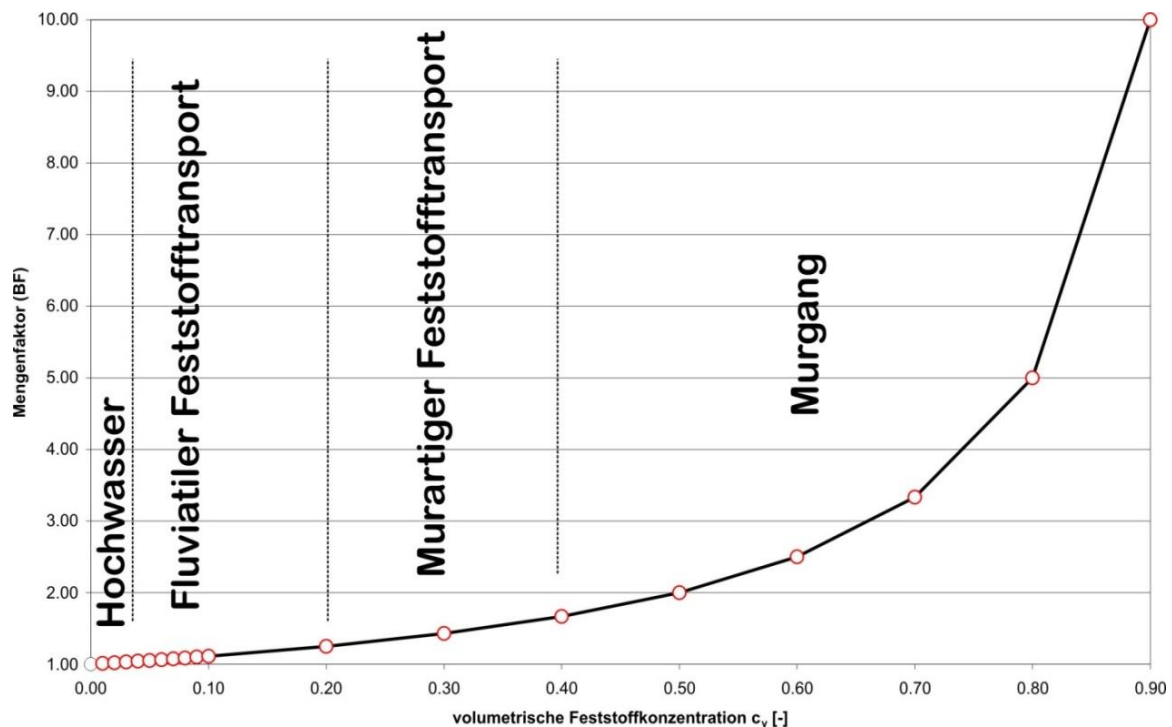
$$c_v = \frac{V_G}{V_W} * (1 - c_v)$$

$$\frac{V_G}{V_W} = \frac{c_v}{(1 - c_v)}$$

Somit lässt sich der Mengenfaktor (BF) durch die volumetrische Feststoffkonzentration des Abflusses ausdrücken (Hübl, s.a.):

$$BF = \frac{V_W + V_G}{V_W} = 1 + \frac{V_G}{V_W} = 1 + \frac{c_v}{1 - c_v}$$

Je nach Feststoffkonzentration ergeben sich somit unterschiedliche Abflussfrachten, die ihr theoretisches Maximum bei einer volumetrischen Feststoffkonzentration zwischen 0,8 und 0,9 erreichen (vgl. Abbildung 4.2).



**Abbildung 4.2:** Erhöhung des Mengenfaktors (BF) (und folglich des Spitzenabflusses) bei steigender Feststoffkonzentration (aus Hübl, s.a.).

### Was ist der Skalierungsfaktor?

Abflüsse von murartigen Feststofftransporten und Murgängen folgen meist nicht dem zeitlichen Verlauf einer Hochwasserganglinie einer bestimmten Dauer ( $t_w$ ). Eine Murgang-Ganglinie ist meist charakterisiert durch einen sehr abrupten Anstieg mit sehr hohen Abflüssen und einem schnellen Abfall der Ganglinie. Dies wiederum führt dazu, dass die gesamte Fracht aus Wasser und Feststoffen in kürzerer Zeit ( $t_{wG}$ ) den potentiellen Schadraum erreicht. Die Murgang-Ganglinie wird somit im Vergleich zur Hochwasser-Ganglinie gestaucht (vgl. Abbildung 4.3). Diese Stauchung der Murgang-Ganglinie versucht der Skalierungsfaktor (SF) als Quotient aus der Dauer des Hochwassers ( $t_w$ ) zur kürzeren Prozessdauer des Murganges ( $t_{wG}$ ) darzustellen:

$$SF = \frac{t_w}{t_{wG}}$$

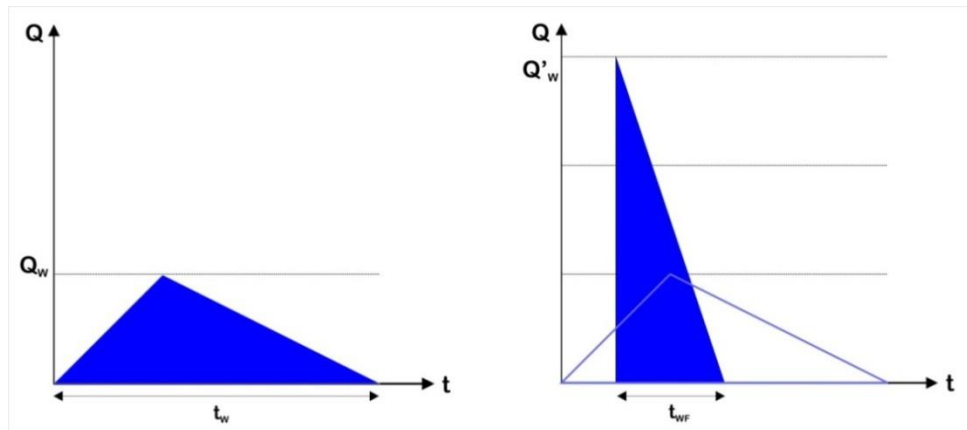


Abbildung 4.3: Modellvorstellung Skalierungsfaktor (aus Hübl, s.a.).

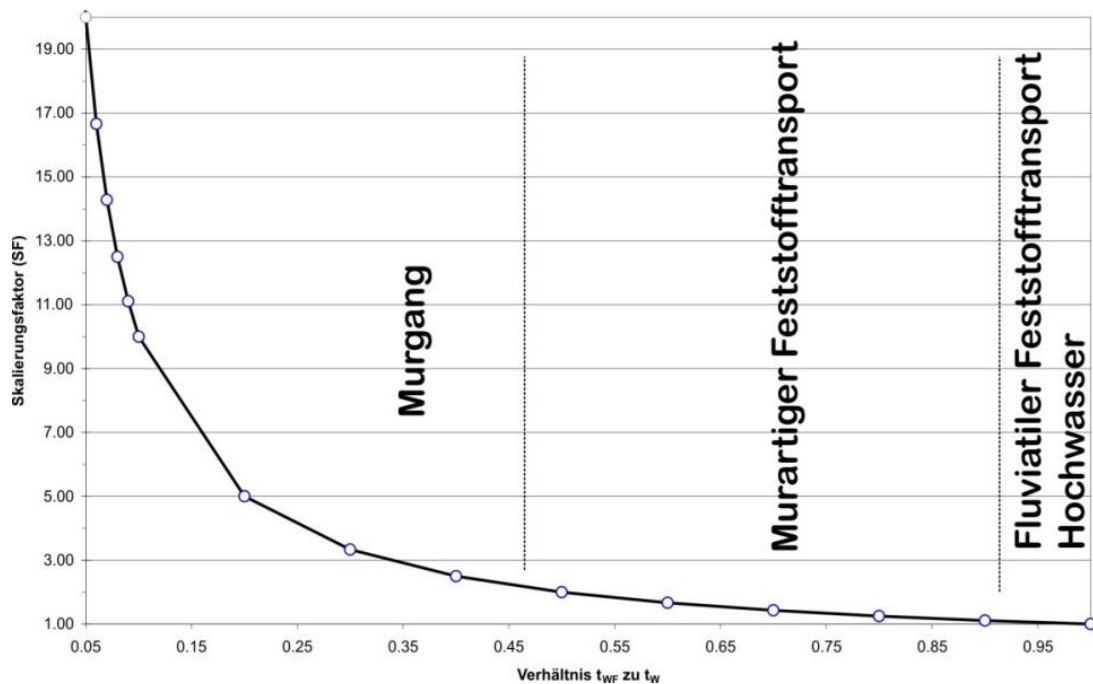


Abbildung 4.4: Erhöhung des Skalierungsfaktors (und folglich des Spitzenabflusses) durch die verkürzte Prozessdauer: Umso kürzer die Dauer des Murganges, desto größer ist der Skalierungsfaktor (aus Hübl, s.a.).

#### Berechnung des Murgang-Spitzenabflusses:

Der Spitzenabfluss eines Murganges errechnet sich somit durch die Multiplikation beider Faktoren, die einerseits die größere Geschiebefracht (BF) und zusätzlich eine kürzere Ereignisdauer (SF) berücksichtigen:

$$Q_{\text{Murgang}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = Q_{\text{Reinwasser}} * BF * SF = Q_{\text{Reinwasser}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] * \frac{1}{1 - c_v} * \frac{t_W}{t_{WG}}$$

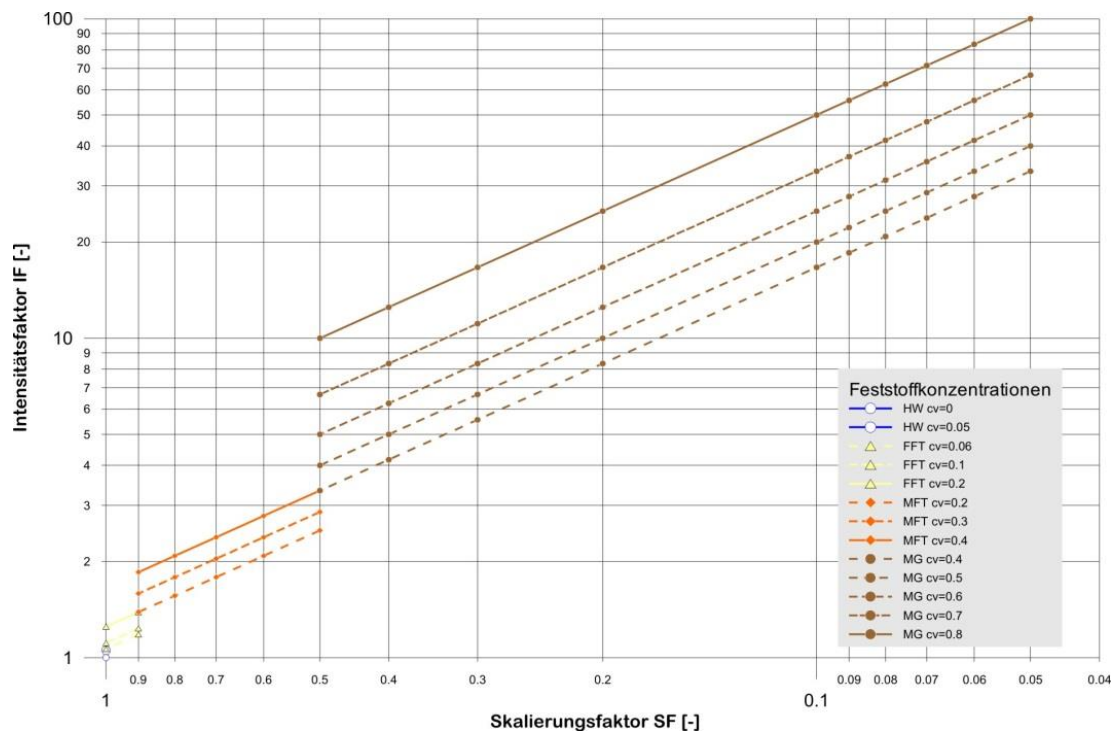
Somit ergibt sich folgender Ansatz zur Berechnung des Murgangsintensitätsfaktors:

$$IF = \frac{1}{1 - c_v} * \frac{t_W}{t_{WG}}$$

wobei:

- $c_v$  = volumetrische Feststoffkonzentration des Murganges [-]  
 $t_w$  = Dauer der zugrunde gelegten Hochwasser-Ganglinie  
 $t_{WG}$  = Dauer des Murganges

Die unterschiedlichen Verlagerungsprozesse (Hochwasser, fluvialer Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang) lassen sich durch unterschiedliche, volumetrische Feststoffkonzentrationen unterscheiden. Dadurch lassen sich Mischabflüsse der verschiedenen Prozesse, ausgedrückt durch die volumetrische Feststoffkonzentration, abschätzen (Hübl, s.a.). Wie Abbildung 4.5 darstellt, weisen die Intensitätsfaktoren gerade für den Prozess Murgang, aufgrund der unterschiedlichen Feststoffkonzentrationen, eine enorme Bandbreite (1,4-100) auf.



**Abbildung 4.5: Intensitätsfaktor für den Spitzenabfluss eines Wasser-Feststoffgemisches unter Berücksichtigung einer verkürzten Ereignisdauer, sowie veränderlicher, volumetrischer Feststoffkonzentration (aus Hübl, s.a.).**

### Kritische Anmerkungen

Neben den großen Unsicherheiten bei der Bestimmung der volumetrischen Feststoffkonzentration (vgl. kritische Anmerkungen in Kapitel 4.3.1) ist zusätzlich das Verhältnis der Dauer des Murganges zur Dauer des Hochwasserabflusses zumeist unbekannt. Eine diesbezügliche Abschätzung ist somit aufgrund der geringen Datenmengen kritisch zu betrachten.

#### 4.3.3 Methode nach ZHANG

Bei der Methode nach Zhang, 1993 wird angenommen, dass die Größe des Murganges einzig von der Wassermenge, welche zur Bildung des Murganges führt, abhängt. Zur Bestimmung des Murgangabflusses schlägt Zhang, 1993 folgende Formel vor:

$$Q = Q_{RW} + \beta * Q_{RW} = (1 + \beta) * Q_{RW}$$

wobei:

$$\begin{aligned} Q &= \text{Abfluss des Murganges [m}^3\text{/s]} \\ Q_{RW} &= \text{Abfluss des Reinwassers [m}^3\text{/s]} \\ \beta &= \text{Murgangkoeffizient [-]} \end{aligned}$$

Aus dieser Formel lässt sich folgender Ansatz zur Berechnung des Murgangsintensitätsfaktors IF ableiten:

$$IF = 1 + \beta$$

wobei:

$$\beta = \frac{1 - \alpha}{[\alpha - \xi * (1 - \alpha)]}$$

mit:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{volumetrischer Wasseranteil des Murgangs [-]} \\ \xi &= \text{volumetrischer Wasseranteil im Geschiebe} \\ &\quad \text{(vor der Entstehung des Murganges) [-]} \end{aligned}$$

#### 4.3.4 Methode nach HAMPEL und TAKAHASHI

Die Ansätze nach Hampel, 1977 und Takahashi, 1978 basieren nach Hungr et al., 1984 auf folgenden Annahmen:

- Die Murgangswelle entsteht bei der Vermischung von gesättigtem Material mit dem Gerinneabfluss.
- Der Spitzenabfluss dauert so lange, sodass ein longitudinaler Wassertransport während des gesamten Murganges vernachlässigt werden kann.

Unter diesen Annahmen steigt die Porosität des Murgang-Materials ( $n_0$ ) bis zum Erreichen der Schwallporosität ( $n_1$ ) um einen Betrag gleich dem Verhältnis des Reinwasserabflusses zum Murgangabflusses. Folglich ergibt sich nach Hampel, 1977 und Takahashi, 1978 (Hungr et al., 1984) folgende Formel zur Berechnung des Abflusses eines Murganges:

$$Q = \frac{Q_W}{n_1 - n_0}$$

Aus dieser Formel ergibt sich folgender Ansatz zur Berechnung des Murgangsintensitätsfaktors IF:

$$IF = \frac{1}{n_1 - n_0}$$

wobei:

$$\begin{aligned} n_1 &= \text{Porosität der Murwelle [-]} \\ n_0 &= \text{Porosität des Materials [-]} \end{aligned}$$

Hungr et al., 1984 beschreibt jedoch, dass diese Methode die Spitzenabflüsse von Murgängen stark unterschätzt. Dies ist nach Hungr et al. 1984 wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der kurze Schub des Murganges eine höhere Geschwindigkeit als das Reinwasser aufweist, und so entlang des Fließweges zusätzliches Wasser aufnimmt und somit der obigen zweiten Annahme widerspricht.

#### 4.3.5 Critical-Wave-Method

Die sog. „critical-wave-method“ versucht den Spitzenabfluss von Murgängen zu beschreiben, welche durch einen Dammbruch ausgelöst werden (Chen et al., 2007). Hierfür verwenden die Autoren folgende Formel:

$$Q_M = (1 + \phi) * Q_W$$

wobei:

- $Q_M$  = Murgang-Spitzenabfluss [m³/s]
- $Q_W$  = Reinwasser-Spitzenabfluss [m³/s]
- $\phi$  = Korrektur-Koeffizient [-]

Folglich ergibt sich aus obiger Formel folgender Ansatz zur Ermittlung des Murgangsintensitätsfaktors IF:

$$IF = (1 + \phi)$$

mit:

$$\phi = \frac{(\gamma_c - \gamma_w)}{(\gamma_H - \gamma_c)}$$

wobei:

- $\gamma_c$  = Dichte des Murganges [kg/m³]
- $\gamma_w$  = Dichte des Wassers [kg/m³]
- $\gamma_H$  = Dichte des Materials [kg/m³]

#### 4.3.6 Rain-Flood-Method

Die „rain-flood-method“ geht davon aus, dass ein Murgang sich aus einem Hochwasser einer bestimmten Jährlichkeit entwickelt (Chen et al., 2012). Abhängig von den Charakteristika der Murganges und des Gerinnes kann der Spitzenabfluss eines Murganges, basierend auf der oben beschriebenen „critical-wave-method“, durch Erweiterung um den sog. „blocking coefficient“  $D_C$ , wie folgt berechnet werden (Zhou et al., 1991 [zit. in Chen et al., 2012] und Wei et al., in. prep.):

$$Q_M = (1 + \phi) * D_C * Q_W$$

wobei:

- $\phi$  = Korrektur-Koeffizient [-]
- $D_C$  = „blocking coefficient“ [-]

Abhängig von der Höhe, Dichte und des Typs eines möglichen Dammes im Gerinne schwankt der blocking coefficient zwischen <1,0 und >5,0 (Chen et al., 2012). Nach China,

2006 (zit. in Wei et al., in. prep.) kann der „blocking coefficient“ je nach Verklausung des Gerinnes wie folgt bestimmt werden:

- Leicht blockiertes Gerinne:  $D_c < 1.4$
- Mittlere Verklausung:  $D_c = 1.5-2.5$
- Gravierende Verklausung:  $D_c = 2.5-3.0$

Aus obiger Formel lässt sich folgender Ansatz zur Berechnung des Murgangsintensitätsfaktors ableiten:

$$IF = (1 + \phi) * D_c$$

mit:

$$\phi = \frac{(\gamma_c - \gamma_w)}{(\gamma_H - \gamma_c)}$$

wobei:

- $\gamma_c$  = Dichte des Murganges [kg/m<sup>3</sup>]
- $\gamma_w$  = Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]
- $\gamma_H$  = Dichte des Materials [kg/m<sup>3</sup>]

#### 4.3.7 Methode nach WEI et al., in. prep.

Wei et al., in. prep. untersuchten 30 Murgänge, welche im Auswirkungsbereich des Wenchuan Erdbebens im südlichen Teil Chinas liegen. Bei ihren Untersuchungen versuchten sie auf Basis der oben beschriebenen „rain-flood-method“ Murgang-Spitzenabflüsse nachzurechnen. Bei ihren Untersuchungen ersetzten sie jedoch den „bulking factor“  $D_c$  durch einen neuen, von ihnen ermittelten Zusammenhang. Somit konnten sie folgende Formel zur Berechnung von Murgang-Spitzenabflüssen finden:

$$Q_M = K * (1 + \phi) * Q_W$$

wobei:

$$K = 1,08 * \frac{\gamma_c^{0,64}}{J^{0,12} * N^{0,2}}$$

mit:

- $\gamma_c$  = Dichte des Murganges [kg/m<sup>3</sup>]
- $J$  = Mittleres Gefälle [‰]
- $N$  = Gerinnebett-Rauigkeit [-]

Somit konnten sie folgenden Ansatz zur Bestimmung des Murgangsintensitätsfaktors IF ermitteln:

$$IF = 1,08 * (1 + \phi) * \frac{\gamma_c^{0,64}}{J^{0,12} * N^{0,2}}$$

#### 4.3.8 Methode basierend auf der Rutschungsfläche

Chen und Chuang, 2014 konnten bei Ihren Untersuchungen von drei Murgängen in Taiwan, welche von Rutschungen ausgelöst wurden, folgenden Zusammenhang des Murgangsintensitätsfaktors mit dem Anteil der Rutschungsflächen im Einzugsgebiet feststellen:

$$IF = 0,0028 * R_L^{2,4} \text{ mit } R^2 = 0,96$$

wobei:

$R_L$  = Verhältnis von Rutschungsflächen zur Fläche des Einzugsgebiets [-]

#### 4.3.9 Methode nach GREGORETTI

Auch Gregoretti et al., 2012 beschäftigten sich mit der Berechnung von Spitzenabflüssen von Murgängen und legten der Berechnung den Reinwasserabfluss zugrunde. Sie berechneten den Maximalabfluss eines entwickelten Murganges nach folgender Formel:

$$Q_M = \frac{RC}{1 - (1 - S) * c_F - c_F * \frac{S}{c}} * Q_W$$

wobei:

**RC** = Reduktions-Koeffizient [0,73 oder  $1 - c_v/2$ ]

**S** = Sättigungsgrad des abgelagerten Materials [-]

**c** = trockene Sediment-Bett-Konzentration (dry sediment bed volume concentration) [-]

**c<sub>v</sub>** = volumetrische Feststoffkonzentration des Murganges [-]

**c<sub>F</sub>** = volumetrische Feststoffkonzentration der Murfront [-]

Genauere Details und Annahmen zur Berechnungsmethode nach Gregoretti finden sich in Gregoretti et al., 2012.

Aus der oben angeführten Methode ergibt sich folgender Ansatz zur Berechnung des Murgangsintensitätsfaktors IF:

$$IF = \frac{RC}{1 - (1 - S) * c_F - c_F * \frac{S}{c}}$$

## 5 Das Untersuchungsgebiet

Das ausgewählte Untersuchungsgebiet zur Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren liegt im Oberlauf des Gadriabaches (auch Quadriabach genannt) im Südtiroler Vinschgau.

Der Gadriabach liegt in der Gemeinde Laas und Schlanders und stellt einen orographischen linken Zubringer der Etsch dar. Der durch die rege Murtätigkeit entstandene Murkegel hat nach den Berechnungen von Fischer, 1966 (zit. in Gius, 1987) eine Fläche von 10,68 km<sup>2</sup> und bildet somit den zweitgrößten Murkegel in den Alpen. Der Oberlauf gliedert sich in den Gadriabach und in den Strimmbach, welcher sich auf der Höhe des Rückhaltebeckens (ca. 1390 Meter ü.d.M.) als rechter Zubringer mit dem Gadriabach vereint.

Das in weiterer Folge als „Untersuchungsgebiet“ bezeichnete Gebiet beschränkt sich auf den Oberlauf des Gadriabaches bis zum Zusammenfluss mit den Strimmbach (rote Umrandung in nachfolgender Abbildung).

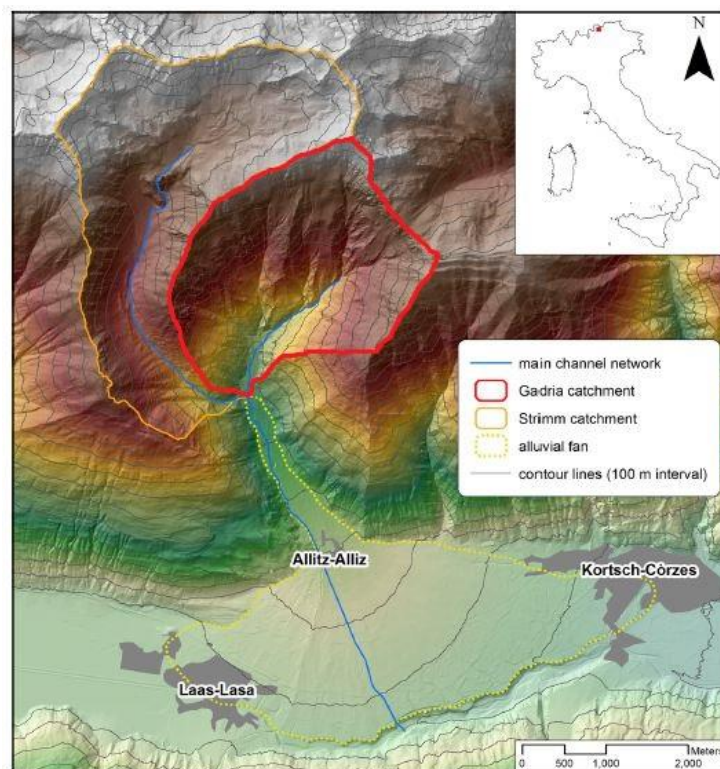


Abbildung 5.1: Lage des Einzugsgebiet (Comiti et al., 2014, modifiziert).

### 5.1 Auswahl des Untersuchungsgebiets

Der Gadriabach zählt zu den aktivsten, murfähigen Wildbächen in Südtirol. Aufzeichnungen über historische Ereignisse können bis in das 14. Jahrhundert zurückverfolgt werden (Fleisch, 2012). Insgesamt ereigneten sich seit dem 14. Jahrhundert 49 überlieferte Ereignisse, 48 allein nach 1822 (Abteilung Wasserschutzbauten, 2015b).

Aufgrund der so zahlreichen Murgänge wurde von der Abteilung Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen in Zusammenarbeit mit der Freien Universität Bozen eine umfangreiche Monitoring-Station aufgebaut. Aufgrund der zahlreichen Murgänge in Kombination

mit der installierten Messstation, welche detaillierte Informationen über die Niederschläge und Abflusstiefen der Murgänge liefert, stellt der Gadriabach ein nahezu optimales Untersuchungsgebiet dar.

## 5.2 Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet hat eine Fläche von 5,86 km<sup>2</sup> und erstreckt sich dabei von einer Seehöhe von 1413 Meter ü.d.M. (Lage der Messstation) bis 2945 Meter ü.d.M. (Weiße Riepl). Die mittlere Neigung des nach Süden exponierten Einzugsgebietes beträgt 38°. Das Hauptgerinne hat eine Länge von 1821 Metern mit einer durchschnittlichen Neigung von 23,3 % und wird von mehreren kleinen, seitlichen Nebengerinnen gespeist.

Wie in Abbildung 5.2 dargestellt, entspringen die seitlichen Nebengerinne (Tschungel Greben; Möslgreben; Hintermitt) mit geringen Basisabflüssen meist direkt unterhalb des steilen Felsbandes im oberen Bereich des Untersuchungsgebiets und durchlaufen steile Hangbereiche mit zahlreichen Lockersedimenten und Erosionsflächen. Geomorphologisch interessant sind zudem die ausgeprägten, flacheren Kames-Terrassen unmittelbar unterhalb der steilen Felsbereiche im hinteren Untersuchungsgebiet, welche aus stark verwittertem Gesteinsmaterial bestehen. Durch die sehr instabilen, geologischen Verhältnisse konnten die oben beschriebenen steilen Rinnen entstehen, welche eine unerschöpfliche Menge an Lockermaterial aufweisen (Comiti et al., 2014).

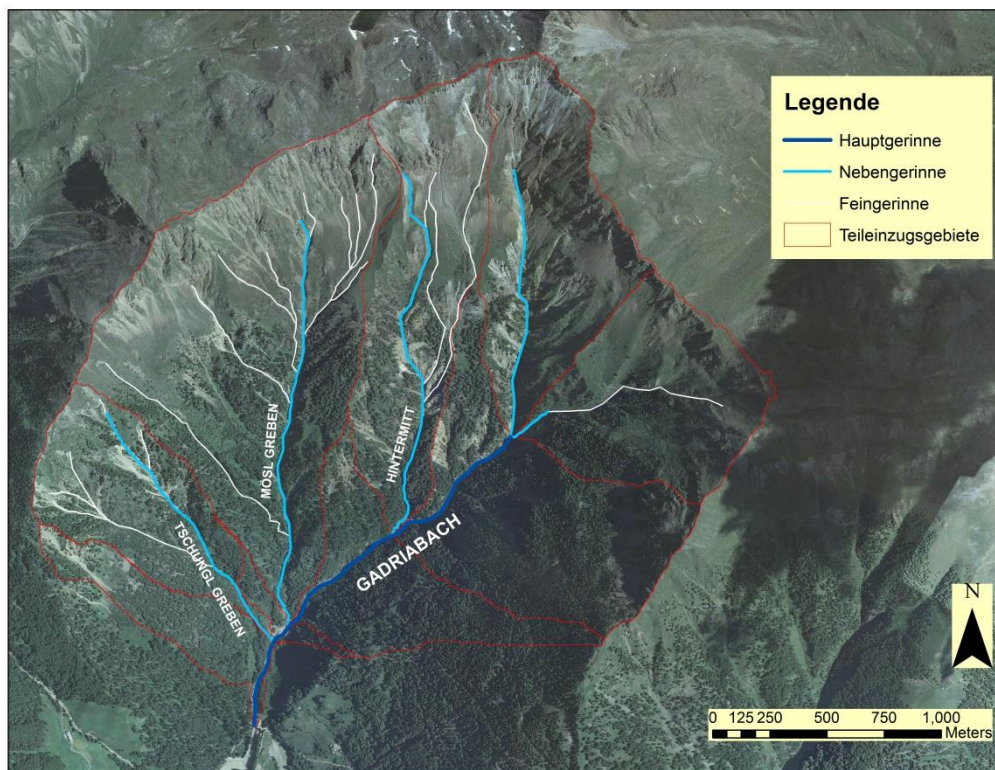


Abbildung 5.2: Gerinnestruktur des Untersuchungsgebiets.

### 5.2.1 Geologie des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet gehört zum Komplex des ostalpinen Kristallins und ist von verschiedenen geologischen Einheiten geprägt (Fleisch, 2012). Wie in Abbildung 5.3 dargestellt,

überwiegen im unteren Bereich des Untersuchungsgebiets Gneise (aplitische, pegmatitische Gneise; feinkörnige Paragneise; Muskovit-Granit-Gneise) mit Einschlüssen von Grünschiefern. Weiters zieht sich die Hauptmylonitzone durch den gesamten unteren Bereich des Untersuchungsgebiets.

Der obere Bereich des Einzugsgebietes ist geprägt von flaserigen Glimmerschiefern mit bandartigen Einschlüssen von aplitischen, pegmatitischen Gneisen und Marmoren. Weiters konnten im oberen Bereich eine Moräne, sowie Granat- und Quarzphyllite der Laaser Serie kartiert werden. Über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt, finden sich weiters ausgeprägte Flächen mit Hang- und Verwitterungsschutt. Gius, 1987 beobachtete zudem eine starke Verwitterung und Brüchigkeit der Gesteine.

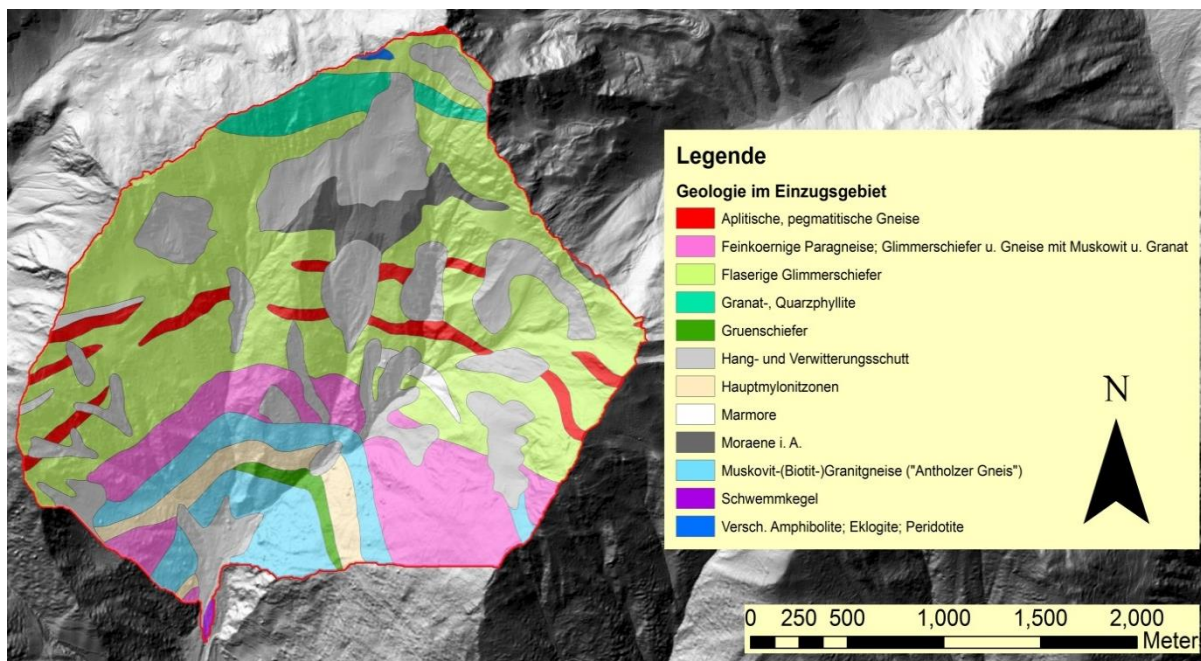


Abbildung 5.3: Geologische Verhältnisse im Einzugsgebiet.

### 5.2.2 Klimatische Bedingungen und Wetterlagen im Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist geprägt von den inneralpinen klimatischen Bedingungen des Vinschgaues mit sehr geringen Jahresniederschlagssummen. Beispielsweise beträgt der jährliche Mittelwert über die gesamte Messdauer (1921-2014) der geographisch nächstgelegenen Niederschlagsstation in Schlanders 500 mm (Hydrographisches Amt, 2015). Die geringe Niederschlagsmenge und Niederschlagshäufigkeit führt Fleisch, 2012 auf die große Distanz zu randalpinen Stauzonen zurück. Durch die umgebenden Bergketten mit einer Höhe bis zu 3000 Metern wird der Vinschgau zusätzlich abgeschirmt. Daraus folgt eine geringe Bewölkung, geringer Niederschlag und eine lange Sonnenscheindauer (Fleisch, 2012). Nach Fliri 1975 (zit. in Fleisch, 2012) gehört der Vinschgau mit seinen geringen Niederschlägen zu dem am deutlichsten ausgeprägten, interalpin-kontinentalen Niederschlagstypen Tirols.

Comiti et al., 2014 beschreiben, dass mit zunehmender Seehöhe die jährlich mittlere Niederschlagssumme ansteigt. Beispielsweise beträgt der jährliche, mittlere Niederschlag der Niederschlagsstation auf einer Höhe von 1754 Meter ü.d.M. 662 mm. Auf der Höhe der größten Sedimentquellen (2000-2500 Metern ü.d.M.) schätzen Comiti et al., 2014 eine mittlere jähr-

liche Niederschlagssumme von 800-900 mm. Zudem konnten Comiti et al., 2014 beobachten, dass mit zunehmender Seehöhe auch die Regenintensität zunimmt.

Da das Untersuchungsgebiet ein nach Süden offenes Trogtal darstellt, ist es oft von starken Niederschlägen betroffen, welche durch aufsteigende Südwinde entstehen. Bei den teils heftigen, konvektiven Niederschlägen im oberen Bereich spielt meist Hagel eine wichtige Rolle (Gius, 1987). Auch Fleisch, 2012 beschreibt, dass meist Hagel zur Auslösung der Murgänge führt.

### 5.2.3 Wildbachklassifikation nach Aulitzky und Stiny

Gius, 1987 klassifizierte den Gadriabach als einen gemischten Wildbach, wo Altschutt und Jungschutt in schwer trennbarer Weise an der Geschiebeführung beteiligt sind. Nach der Aulitzky-Klassifikation stellt der Gadriabach eine Zwischenform des Obertagwasser-Angriffsbaches und des Untertagwasser-Hangbruch-Transportbaches dar (Gius, 1987).

### 5.2.4 Landnutzung und Vegetation

Das Einzugsgebiet des oberen Gadriabaches ist von verschiedenen Landnutzungsformen geprägt (vgl. Abbildung 5.4). Mit einem Flächenanteil von knapp 40 % ist der Wald die bedeutendste Landnutzungsform im Einzugsgebiet. Dabei dominieren bis auf eine Höhe von ca. 2050 Meter ü.d.M. montane bis subalpine Fichtenwälder, darüber bilden Lärchen-Zirbenwälder die vorherrschende Waldgesellschaft. Während im nord-nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets flächige Fichten- und Lärchen-Zirbenwälder stocken, sind im südlich-südöstlich exponierten, trockeneren Bereich des Einzugsgebietes zusätzlich Lärchen- und Kiefernwälder vorherrschend.

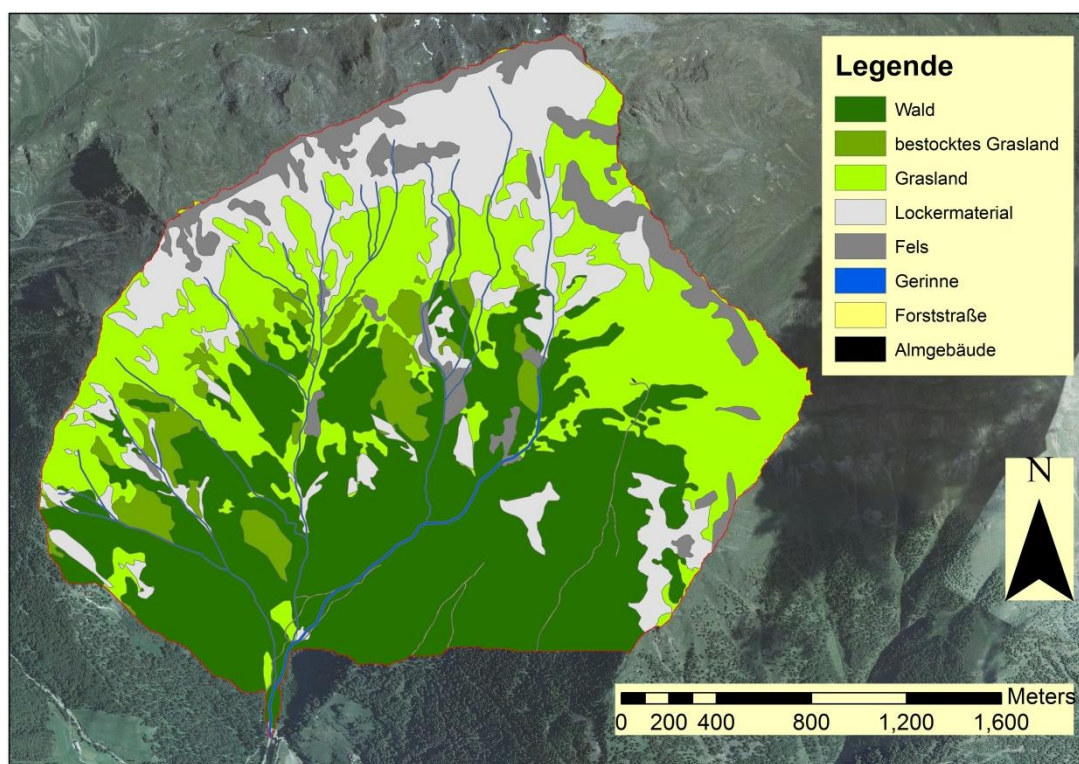


Abbildung 5.4: Landbedeckung im Einzugsgebiet

Ausgedehnte steppenähnliche Graslandschaften im nach Süden exponierten Teil des EZG und die Weideflächen im Bereich der Rothütte bilden mit knapp 34 % neben den Lockermaterialflächen mit ca. 18 % weitere wichtige Formen der Landbedeckung. Die verbleibenden 8 % des Untersuchungsgebiets nehmen die steilen Felsflächen unterhalb des Weißen Riepl zusammen mit dem Gerinne und den anthropogen beeinflussten Flächen (Almhütte und Forststraße) ein.



**Abbildung 5.5: Überblick über das obere Einzugsgebiet.**  
(Abteilung Wasserschutzbauten, 2015)



**Abbildung 5.6: Messstation und Einzugsgebiet im Hintergrund.**  
(Abteilung Wasserschutzbauten, 2015)

### 5.2.5 Disposition des Einzugsgebiets in Bezug auf die Auslösung von Murgängen

Die steilen Gerinne kombiniert mit einem hohen Geschiebepotential aus den ausgedehnten Schutt- und Erosionsflächen haben eine hohe Disposition in Bezug auf die Auslösung von Murgängen. Durch die spärliche Vegetation werden die meist starken, konvektiven Niederschläge zudem schnell abflusswirksam. Die Kombination dieser Faktoren führt zu einer hohen Disposition zur Auslösung von Murgängen, was durch die hohe Muraktivität des Gadriabaches bestätigt wird (Comiti et al., 2014; Fleisch, 2012). Auch Macconi, 2015 bestätigt, dass die Murgänge in der Regel bei starken, konvektiven Gewittern oder (eher selten) durch starke Dauerregen mit Intensitätsspitzen durch die Mobilisierung von Material im Gewässernetz und von den Geschiebeherden ausgelöst werden. Nach Comiti et al., 2014 liefert der Gadriabach jährlich 1-2 Murgänge mit einem Volumen von 700-40.000 m<sup>3</sup>.

## 5.3 Beschreibung der Messstation

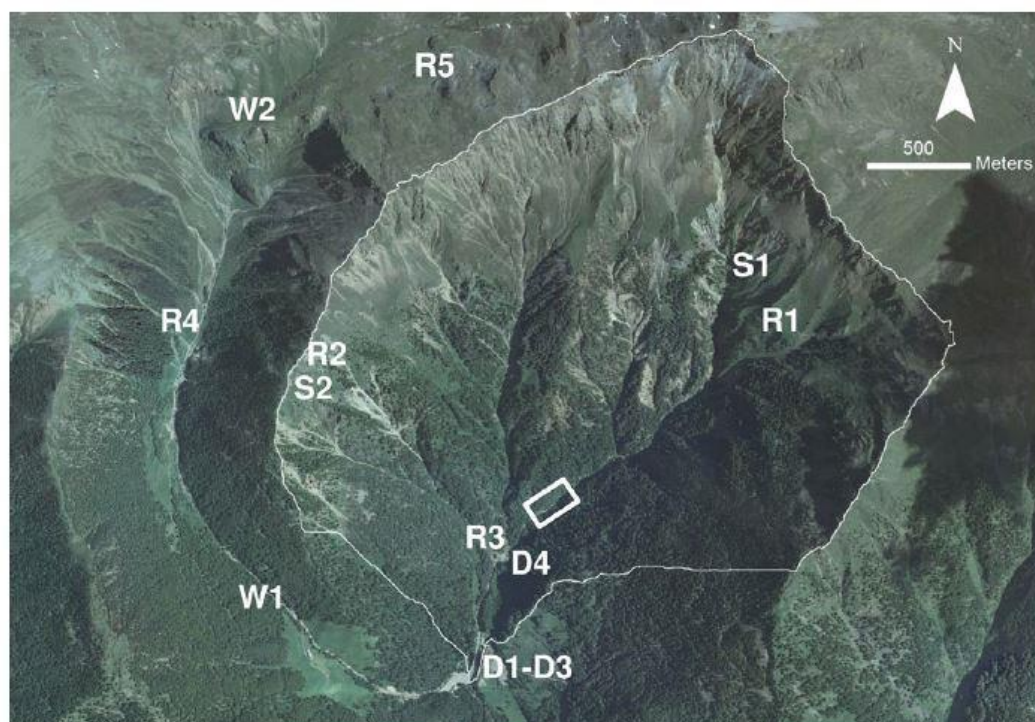
Die im Jahr 2011 von der Abteilung Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol errichtete Messstation im Einzugsgebiet des oberen Gadriabaches wurde sowohl für das Monitoring von Murgängen als auch zum Testen von Frühwarnsystemen konzipiert. Die Monitoring-Station ist Teil von mehreren EU-Projekten (EU Interreg IV B South East Europe – Projekt Monitor II; SEDALP) als auch von wissenschaftlichen Projekten der Abteilung Wasserschutzbauten (GESTO, KINOFLOW). Weiters wurden einige Messgeräte von der Freien Universität Bozen installiert.

Die Monitoring-Station besteht aus mehreren Standorten, verteilt über das Einzugsgebiet des oberen Gadriabaches. Der Hauptstandort befindet sich in unmittelbarer Nähe des Rück-

haltebeckens beim Zusammenfluss vom Gadriabach mit dem Strimmbach. Mittels fünf Niederschlagsmessstationen, fünf Geophonen, drei Kameras, drei Radar-Sensoren sowie Piezometern und Sonden zur Messung der Bodenfeuchte können verschiedene Messungen und Auswertungen durchgeführt werden (Comiti et al., 2014). Eine Übersicht der installierten Messeinrichtungen findet sich in Tabelle 5.1. Die Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 visualisieren zudem die Lage und dem Aufbau der Messstationen.

**Tabelle 5.1: Installierte Messeinrichtungen im Untersuchungsgebiet (Comiti et al., 2014).**

| Typ des Instruments                          | Modell                 | Standort       | Anzahl | Zeitintervall |
|----------------------------------------------|------------------------|----------------|--------|---------------|
| Pluviometer                                  | Lambrecht 1518         | R1, R2, R3, R4 | 4      | 1 min         |
| Pluviometer                                  | Campbell Arg 100       | R5             | 1      | 10 min        |
| Radar (Abflusstiefe)                         | Vegapulse 68           | D2, D3, D4     | 3      | 1 s           |
| Geophon                                      | Pasi 10 HZ SIS-902-050 | D2, D3, D5     | 5      | 1 s           |
| Video-Kamera                                 | Mobotix M12            | D1, D2         | 3      | 10 fps        |
| Datensammler (Wasserstand-Druck, Temperatur) | Keller DCX-22 VG       | W1, W2, S2     | 8      | 10 min        |
| Piezometer                                   | OTR OG200/R            | S1             | 6      | 10 min        |
| Sonden zur Messung der Bodenfeuchte          | Spectrum SM100         | S2             | 28     | 10 min        |



**Abbildung 5.7: Lage der Messstation im Einzugsgebiet (Comiti et al., 2014).**

### 5.3.1 Messung des Niederschlags

Die Niederschlagsmessung erfolgt mittels dreier Niederschlagsstationen im Untersuchungsgebiet und zwei Niederschlagstationen im angrenzenden Einzugsgebiet des Strimmbaches. Aufgrund der abgestimmten, räumlichen Verteilung der Niederschlagsstationen im eher kleinen Untersuchungsgebiet sind sogar Annahmen über die flächige Verteilung der Niederschläge ableitbar. Weiters sind durch die Auswertung der Radardaten der Radar-Station am Valluga (Grenze Tirol/Voralberg) flächige Niederschlagsdaten verfügbar (Comiti et al., 2014).

### 5.3.2 Messung der Fließtiefen

Die drei Radarsensoren messen die Abflusstiefe, welche zur Berechnung der Querschnittsfläche des Murgangs und der Fließgeschwindigkeit dient. Mittels der installierten Geophone kann die Fließgeschwindigkeit und Magnitude eines möglichen Murganges berechnet werden. Auf Grundlage der Abflusstiefe wird weiters das Volumen aus der Integration des Durchflusses (als Funktion der Abflusstiefe) über die gesamte Dauer des Murganges bestimmt (Comiti et al., 2014).

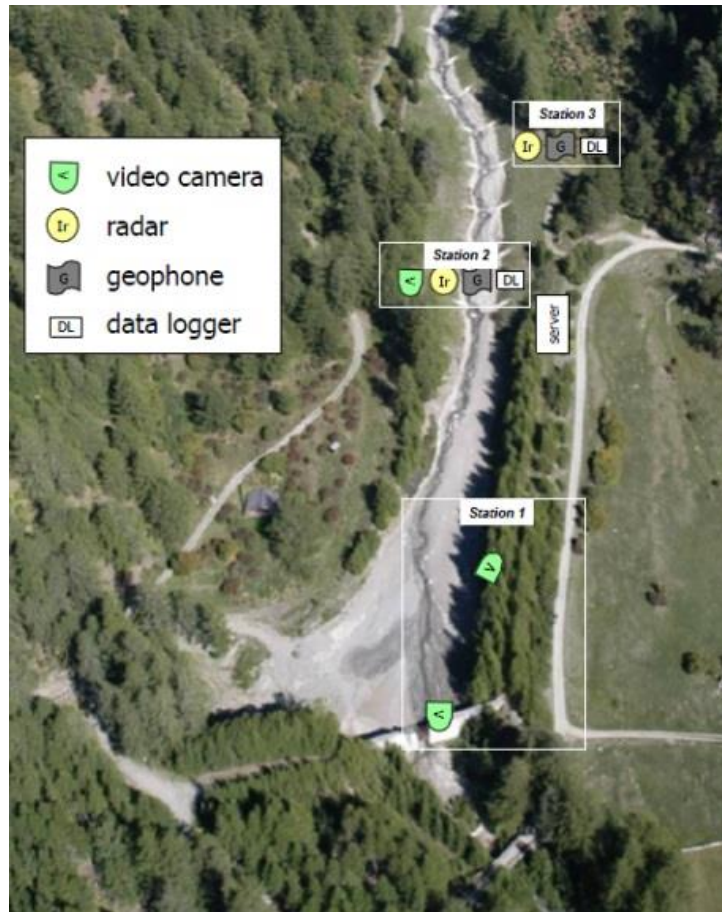


Abbildung 5.8: Aufbau der Messstation in der Nähe des Rückhaltebeckens (Marchi et al., s.a.).

### 5.3.3 Messung des Geschiebeanteils im Murgang

Zur Berechnung des Geschiebeanteils der Murgänge werden Vermessungen mit dem terrestrischen Laser-Scanner RIEGL LMS-Z620 des abgelagerten Geschiebes im Rückhaltebecken erstellt. Der Geschiebeanteil errechnet sich aus der Differenz zwischen den digitalen Geländemodellen vor dem Murgang und jenem nach dem Murgang (Comiti et al., 2014).

Detailliertere und genauere Informationen zum Aufbau und der Funktionsweise der Messstation finden sich in Comiti et al., 2014.

## 6 Methodik

Die vorliegende Arbeit versucht Murgangsintensitätsfaktoren von drei Murgängen im Einzugsgebiet des Gadriabaches (Vinschgau/Südtirol) zu bestimmen.

Zusätzlich versucht die Arbeit mittels umfassender Recherchen in einschlägiger Fachliteratur Daten von Murgangsintensitätsfaktoren, sowie Murgang-Spitzenabflüssen und korrespondierenden Reinwasser-Spitzenabflüssen zu sammeln. Die verschiedenen Daten sind das Ergebnis einer intensiven Literaturrecherche mit mehreren wissenschaftlichen Datenbanken (Scopus, ScienceDirect, Web of Science Core Collection, google scholar), sowie der Auswertung einschlägiger Fachliteratur. Basierend auf diesen Daten werden Murgangsintensitätsfaktoren von Ereignissen aus aller Welt bestimmt.

Die Auswertungen der Literaturlisten werden anschließend mit den drei Murgangsintensitätsfaktoren des Gadriabaches verglichen und bilden die Grundlage weiterer Untersuchungen.

Abschließend werden Untersuchungen zur Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf das Ausbreitungsverhalten alpiner Murgänge an einem konkreten Beispiel angestellt. Dabei werden mehrere Murgänge mit unterschiedlichen Murgangsintensitätsfaktoren mit der Simulationssoftware Flo2D modelliert und die jeweiligen Ausbreitungsflächen verglichen. Auf Basis dieser Simulationen können somit erste Ergebnisse der Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf das Ausbreitungsverhalten alpiner Murgänge abgeleitet und die Auswirkungen quantifiziert werden.

### 6.1 Berechnung von Murgangsintensitätsfaktoren

Durch Umformung des in Kapitel 4 beschriebenen Zusammenhangs des Murgang-Spitzenabflusses  $Q_M$  und des Reinwasser-Spitzenabflusses  $Q_W$ ,

$$Q_M = IF * Q_W$$

ergibt sich zur Berechnung des Murgangsintensitätsfaktors IF folgende Formel:

$$IF = \frac{Q_M}{Q_W}$$

**wobei:**

- IF = Murgangsintensitätsfaktor [-]
- $Q_M$  = Murgang-Spitzenabfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $Q_W$  = Reinwasser-Spitzenabfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Aus der oben angeführten Formel lässt sich erkennen, dass man für die Berechnung des Murgangsintensitätsfaktors den Spitzenabfluss des Murganges sowie den Spitzenabfluss des Hochwassers/Reinwassers benötigt.

#### 6.1.1 Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses

Zur Bestimmung des Spitzenabflusses von Murgängen gibt es mehrere Möglichkeiten. Zumeist werden die Spitzenabflüsse durch Multiplikation der beobachteten Querschnittsflächen und der rückgerechneten Abflussgeschwindigkeiten berechnet (Chen et al., 2012):

$$Q_M = A \cdot v$$

wobei:

- $Q_M$  = Murgang-Spitzenabfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $A$  = beobachtete Durchflussfläche [ $\text{m}^2$ ]
- $v$  = Fließgeschwindigkeit des Murganges [ $\text{m/s}$ ]

Einerseits kann die Durchflussfläche durch Vermessung der maximalen Anschlaglinien und anschließende Rückrechnung bestimmt werden. Andererseits kann bei bekanntem Querschnitt und gemessener Abflusstiefe die Durchflussfläche berechnet werden.

Auch für die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit von beobachteten Murgängen gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei Murgang-Messstationen werden die Fließgeschwindigkeiten meist über das Verhältnis der Distanz zwischen zwei Messeinrichtungen (Geophon, Pegel, Radar, Ultraschall) und der vergangenen Zeit berechnet (Arai et al., 2013). Für detailliertere Beschreibungen weiterer Methoden, wie zum Beispiel die Methode zur Rückrechnung der Geschwindigkeit anhand der Kurvenerhöhung, wird auf Rickenmann, 1999; Prochaska et al., 2008 und Scheidl et al., 2015 verwiesen.

### 6.1.2 Bestimmung des Reinwasser-Abflusses

Da im Ereignisfall ein Murgang auftritt, ist eine direkte Messung des maximalen Reinwasser-Abflusses für das entsprechende Murgangsereignis nicht möglich.

Somit wird der maximale Reinwasserabfluss zumeist mit empirischen Abflussformeln oder Niederschlags-Abfluss-Modellen rückgerechnet. Dabei zählen neben topographischen, geologischen und geomorphologischen Charakteristika des Einzugsgebiets die Vegetation und Landnutzung, sowie die Niederschlagsdaten zu den grundlegendsten Ausgangsdaten.

### 6.1.3 Problematik und Schwierigkeiten

Die Bestimmung von maximalen Murgang- und Hochwasserabflüssen ist mit mehreren Schwierigkeiten verbunden. Neben den Unsicherheiten bei der Bestimmung von Murgang-Geschwindigkeiten zählt die Kalibrierung von Niederschlags-Abfluss-Modellen zu den grundlegendsten Schwierigkeiten. Einerseits ist dies darauf zurückzuführen, dass nur wenige Einzugsgebiete über Niederschlagsstationen verfügen. Andererseits werden die meisten Abfluss-Messstationen in murfähigen Gerinnen durch Murgänge zerstört, sodass meist keine direkten Abflussdaten vorhanden sind. Ein weiterer Grund der geringen Abfluss-Datensätze ist auf die beschränkte Anzahl von Murgang-Monitoring-Stationen und deren geomorphologischen und hydrologischen Charakteristika zurückzuführen. So liefern Einzugsgebiete, in denen es zu regelmäßigen Murgängen kommt, zumeist wenig, in Extremfällen sogar gar keinen Reinwasserabfluss (beispielsweise Kalkgebiete).

Aufgrund fehlender Daten über Niederschläge und Abflüsse ist eine notwendige Kalibrierung von Niederschlag-Abfluss-Modellen meist nicht möglich. Somit sind die Ergebnisse meist mit teils großen Unsicherheiten behaftet. Trotz dieser Probleme und Schwierigkeiten bei der Ermittlung von Spitzenabflüssen von Murgängen und Hochwässern konnten in der Literatur zahlreiche Murgangsintensitätsfaktoren gefunden werden. Allerdings sollten die auftretenden Unsicherheiten bei deren Verwendung berücksichtigt werden.

## 6.2 Angewandtes Niederschlags-Abfluss-Modell

Für die hydrologische Simulation der zu untersuchenden Murgänge wurde das Modell ZEMOKOST (Version ZEMOKOST 2.0) verwendet.

Das Programm ZEMOKOST wurde vom Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des BFW entwickelt und in Zusammenarbeit mit den Praktikern der Wildbach- und Lawinerverbauung getestet. ZEMOKOST ist als excelbasiertes Niederschlags-Abfluss-Modell ein Bindeglied zwischen schneller Abschätzung anhand gängiger Faustformeln und aufwändigen Modellen. Auf Grundlage von einfach zu erhebenden Eingangsgrößen können Hochwasserganglinien berechnet und visualisiert werden (Kohl und Stepanek 2005). ZEMOKOST (**Z**eller **M**odifiziert von **K**ohl und **S**tepanek) basiert auf der Laufzeitmethode von Zeller, 1974 und 1981 (zit. in Hemund et al., 2011). Diese geht davon aus, dass die maximale Abflussspitze dann erreicht wird, wenn die Niederschlagsdauer jener Zeit entspricht, die ein Wassertropfen vom entferntesten Punkt des Einzugsgebiets bis zur Mündung benötigt, und die maximal mögliche Intensität in dieser Zeit auftritt (Kohl und Markart, 2010). ZEMOKOST erzeugt für definierte Teileinzugsgebiete Abflussganglinien, welche auf Basis ihrer Fließzeiten (Laufzeiten) an der Oberfläche und im Gerinne bestimmt werden. Dabei ergibt sich die abflusswirksame Regenmenge aus dem Produkt der gesamten Niederschlagsmenge und dem Abflussbeiwert (Kohl und Stepanek, 2005). Als grundlegendste Formel im Niederschlags-Abflussmodell gilt:

$$Q_W = C * i_t * F$$

wobei:

|       |   |                                  |
|-------|---|----------------------------------|
| $Q_W$ | = | Hochwasser-Spitzenabfluss [m³/s] |
| $C$   | = | (Spitzen-) Abflussbeiwert [%]    |
| $i_t$ | = | Niederschlagsintensität [mm/min] |
| $F$   | = | Fläche des Einzugsgebiets [m²]   |

Das Modell ZEMOKOST ist in der Lage, sowohl Abflüsse aus Bemessungsniederschlägen als auch aus direkt gemessenen Niederschlägen (beispielsweise Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet) zu berechnen (Kohl und Stepanek, 2005). Die Niederschlagsintensität von Bemessungsabflüssen berechnet sich aus dem Quotienten der Niederschlagsmenge und der Zeit des Niederschlagsereignisses. Die Niederschlagsmenge wird dabei auf Grundlage der Methode nach Lorenz und Skoda, 2000 als Funktion der Dauerstufe  $D$  und der Wiederkehrszeit  $T$  unter Berücksichtigung der Ausgleichsparameter  $u_1$  und  $w$  angegeben:

$$hN(D, T) = u_1(D) + w(D) * \ln(T)$$

Die Konzentrationszeit  $t_c$  ergibt sich als Summe der Anlaufzeit  $t_{AN}$ , der Laufzeit an der Oberfläche  $t_{OB}$  und der Gerinnelaufzeit  $t_G$  (Stepanek et al., 2004):

$$t_c = t_{AN} + t_{OB} + t_G$$

wobei:

|          |   |                                  |
|----------|---|----------------------------------|
| $t_c$    | = | Konzentrationszeit [min]         |
| $t_{AN}$ | = | Anlaufzeit [min]                 |
| $t_{OB}$ | = | Laufzeit an der Oberfläche [min] |
| $t_G$    | = | Gerinnelaufzeit [min]            |

Die Laufzeiten an der Oberfläche werden mit dem Ansatz von Izzard, 1946 berechnet:

$$t_{OB} = \frac{527 * c_1 * L_{OB}^{\frac{1}{3}}}{J_{OB}^{\frac{1}{3}} * (C * i_T)^{\frac{2}{3}}}$$

**wobei:**

- c<sub>1</sub>** = Oberflächenrauigkeit [-]
- L<sub>OB</sub>** = projizierten Fließweg an der Oberfläche [m]
- J<sub>OB</sub>** = Hangneigung [%]

Die Laufzeit an der Oberfläche wird im Modell als Retentionskoeffizient k verwendet, womit unter Berücksichtigung einer nicht konstanten Oberflächenrauigkeit der Standorte, naturnahe Abflusswellen erzeugt werden (Kohl und Markart, 2010). ZEMOKOST transferiert als Hydrotop-Modell den Abfluss der einzelnen Teileinzugsgebiete (Hydrotopen) zum Gebietsauslass (Kohl, 2011). Für die Berechnung der Fließgeschwindigkeiten im Gerinne wird der Ansatz von Rickenmann, 1996 verwendet (Kohl und Stepanek, 2005):

$$v_g = \frac{0,96 * g^{0,36} * Q_W^{0,29} * J_G^{0,35}}{D_{90}^{0,23}}$$

**wobei:**

- v<sub>g</sub>** = Fließgeschwindigkeit im Gerinne [m/s]
- J<sub>G</sub>** = Gerinneneigung [°]
- D<sub>90</sub>** = 90-Perzentile der Korndurchmesser-Verteilung [m]

Der Ansatz nach Rickenmann ist bis zu einem Gefälle von 63 % gültig und ist somit gut auf steile Untersuchungsgebiete anwendbar (Rickenmann, 1996).

Da sich der mittlere Fließweg als Summe des Oberflächenfließweges und des Fließweges im Gerinne ergibt, müssen die beiden Eingangsgrößen aufeinander abgestimmt sein (Kohl, 2011). Zusätzlich zur Gerinnelaufzeit und der Oberflächenlaufzeit wird die Anlaufzeit im Modell berücksichtigt, welche jene Zeit angibt, die vom Einsetzen des Niederschlags bis zur Bildung des ersten Oberflächenabflusses vergeht. Neben dem Sättigungsbeiwert ist zur Berechnung der Anlaufzeit der sog. Systemzustandsindex (SZI), welcher ein Maß der Vorbefeuchtung des Einzugsgebietes dargestellt, von großer Bedeutung (Kohl und Markart, 2010).

Weiters ist ZEMOKOST in der Lage den Interflow zu berechnen. Bei kurzen (konvektiven) Starkregen, wie im Untersuchungsgebiet beobachtet, ist der Beitrag des Interflow zum Gesamtabfluss jedoch vernachlässigbar (Zeller, 1974, 1981; zit. in Kohl und Stepanek, 2005).

Stepanek et al., 2004 beschreiben, dass die Konzentrationszeit und somit die maßgebliche Regendauer nicht immer vom entferntesten Teileinzugsgebiet bestimmt wird.

### 6.2.1 Vor- und Nachteile von ZEMOKOST im Vergleich zu anderen Niederschlag-Abfluss-Modellen

ZEMOKOST hat im Vergleich mit anderen Niederschlag-Abfluss-Modellen folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- Eingangsdaten einfach und nachvollziehbar zu erheben (ArcGIS)
- Unkomplizierte Handhabung aufgrund übersichtlicher Eingangsmaske und Bedienungsanleitung
- Aufgrund der schnellen Rechenzeiten und einfacher Anpassung der Eingangsparameter gut geeignet für Sensitivitätsanalysen
- Eingabe von gemessenen Niederschlagsganglinien möglich

Allerdings sind folgende Nachteile zu erwähnen:

- Kein rasterbasiertes Modell: Geländetopologie des Einzugsgebiets und der Gerinne wird nur über Mittelwerte abgebildet
- Aufgrund des fehlenden Rasters ist eine Implementierung von flächigen Niederschlägen nicht möglich, jedoch können unterschiedliche Niederschlagsverteilungen für verschiedene Teileinzugsgebiete festgelegt werden → „quasi-flächige Niederschlagsverteilung“

## 6.2.2 Bestimmung der Eingangsdaten

Die in dieser Arbeit verwendeten Eingangsdaten wurden auf Grundlage folgender Datengrundlagen bestimmt:

- Orthophoto aus dem Jahr 2011 der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol
- Digitales Geländemodell (2,5 x 2,5 Meter) der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol
- Shapefile der Landnutzung der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol
- Shapefile der Waldtypisierung (Abteilung Forstwirtschaft)
- Shapefile der Gewässer der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol
- Bodenproben aus der Arbeit von Gius, 1987
- Niederschlagsdaten der drei installierten Messstationen im Untersuchungsgebiet (Abteilung Wasserschutzbauten)

## 6.2.3 Überblick der notwendigen Eingangsparameter

Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen, für die Modellierung mit ZEMOKOST notwendigen Eingangsparameter.

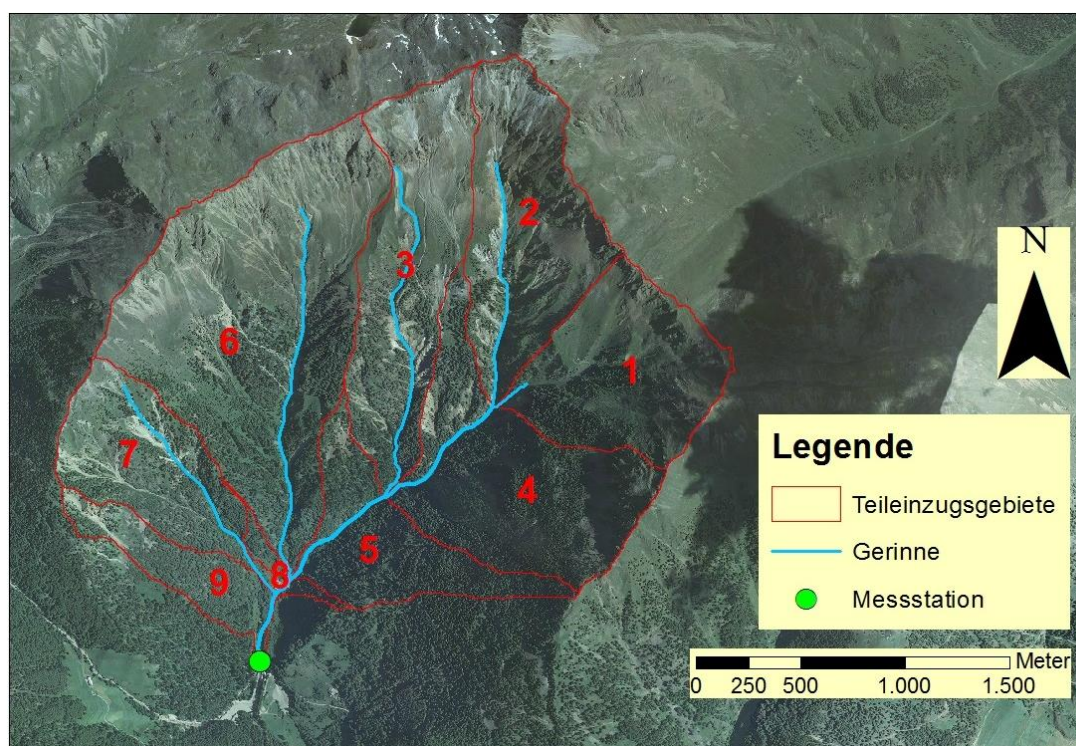
**Tabelle 6.1: Notwendige Eingangsparameter (Hemund et al., 2011, modifiziert).**

| Parametergruppe     | Parameter                                              | Einheit            | Verwendung                    | Quelle               |
|---------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| Topologie-Parameter | Teileinzugsgebietsfläche                               | [km <sup>2</sup> ] | Oberflächenlaufzeit           | ArcGIS               |
|                     | Teileinzugsgebietsnummer sowie Gerinneknoten           | [-]                | In allen Berechnungen wichtig | Festlegung           |
|                     | Durchschnittlich max. projizierter Oberflächenfließweg | [m]                | Oberflächenlaufzeit           | ArcGIS               |
|                     | Durchschnittliche Hangneigung                          | [-]                | Oberflächenlaufzeit           | ArcGIS               |
|                     | Flächenanteil der Abflussbeiwerte                      | [-]                | Oberflächenlaufzeit           | Einschätzung/ArcGIS  |
|                     | Flächenanteil der Rauigkeitsbeiwerte                   | [-]                | Oberflächenlaufzeit           | Einschätzung/ArcGIS  |
| Gerinne-Parameter   | Gerinnelänge                                           | [m]                | Gerinnelaufzeit               | ArcGIS               |
|                     | Durchschnittliche Gerinneneigung                       | [-]                | Mittlere Fließgeschwindigkeit | ArcGIS               |
|                     | Rauigkeitsfaktor $D_{90}$                              | [m]                | Mittlere Fließgeschwindigkeit | Literatur            |
| Niederschlag        | Niederschlagsintensität                                | [mm/h]             | Oberflächenlaufzeit/Abfluss   | Niederschlagsstation |
|                     | Ganglinie                                              | [-]                | Oberflächenlaufzeit/Abfluss   | Niederschlagsstation |
|                     | räumliche Verteilung                                   | [-]                | Oberflächenlaufzeit/Abfluss   | Niederschlagsstation |

Die Bestimmung der Eingangsparameter erfolgt vielfach über das Geographische Informationssystem ArcGIS. Das Tutorial – Arc Hydro Tools 2.0 sowie Kohl, 2011 stellen hierzu gute und hilfreiche Anleitungen dar.

### 6.2.3.1 Topologie-Parameter

Das 5,86 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet wurde aufgrund topographischer Bedingungen in neun Teileinzugsgebiete unterteilt (vgl. Abbildung 6.1).



**Abbildung 6.1: Festgelegte Teileinzugsgebiete.**

Auf Grundlage des Digitalen Geländemodells der Autonomen Provinz Bozen wurden mit dem geographischen Informationssystem ArcGIS (ArcMap 10.2.2) die Flächen und die mittlere Hangneigung in % berechnet. Da ZEMOKOST auf den Unter-Oberlieger-System basiert, wurden die Teileinzugsgebiete und das Gerinnesystem hierarchisch nummeriert, sowie mittels eines Quell- und Mündungsknotens verknüpft.

Die maximalen projizierten Oberflächenfließwege sind jene mittlere Hanglänge, welche die gemittelte Distanz von Wasserscheidepunkten zum Gerinne darstellt (Kohl, 2011). Die Berechnung erfolgte gemäß der Anleitung von Kohl, 2011. Hierzu wurde auf Grundlage des Shapefiles *gewässer\_2d.shp* und unter Berücksichtigung des Orthophotos 2011 ein differenzierteres Fein-Gerinnesystem digitalisiert.

Sehr wichtige und sensitive Eingangsgrößen für das Modell ZEMOKOST sind die Abfluss- und Rauigkeitsbeiwerte (Hemund et al., 2011). Für eine nachvollziehbare Bestimmung dieser Eingangsparameter wurde von Markart et al., 2004b eine „Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0)“ entwickelt. Sie basiert auf 800 Starkregensimulationen, welche vom BFW (Bundesamt und Forschungszentrum für Wald) in Kooperation mit dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) durchgeführt wurden (KOHL, 2014).

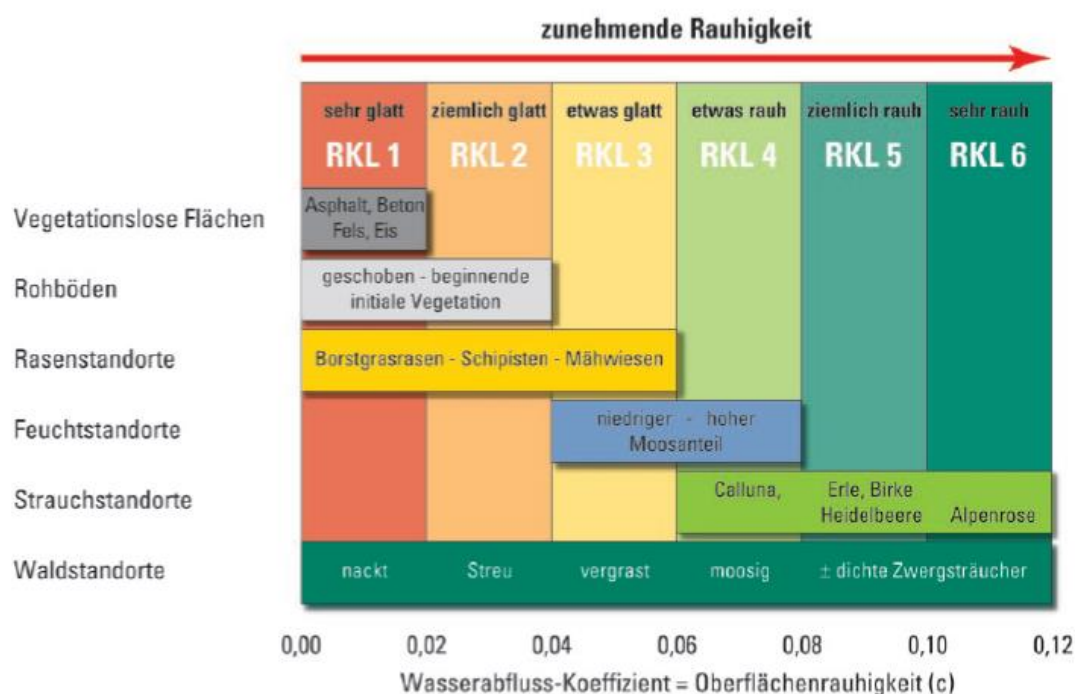
Der Abflussbeiwert, als Verhältnis von Niederschlag zu Abfluss, gibt an, welcher Anteil vom Niederschlag in den Abfluss übergeht. Je größer die Abflussbeiwertklasse, desto größer ist der resultierende Oberflächenabfluss. Wie in Abbildung 6.2 dargestellt, kann die kartierte

Vegetationseinheit unter Berücksichtigung des Bodens, der Nutzung und von Feuchtezeiger in sieben Abflussbeiwertklassen eingeteilt werden (Markart et al., 2004b).

| Vegetationseinheit            | Boden                       | Nutzung                                                              | Hydrologische Eigenschaften | AKL |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----|
| Hydrologische Vegetationsform | Grob-Boden<br>locker        | Keine Nutzung/Belastung<br>keine Vernässung<br>Kein Kleingerinnenetz | tr-mf                       | 0   |
|                               |                             |                                                                      |                             | 1   |
|                               |                             |                                                                      |                             | 2   |
|                               |                             |                                                                      |                             | 3   |
|                               | Fein-Boden<br>bindig, dicht | Intensive Belastung<br>Intensiweide<br>ausgeprägtes Feingerinnenetz  | n                           | 4   |
|                               | dicht                       | Asphalt, Beton, Fels, Eis                                            | n                           | 5   |
|                               |                             |                                                                      |                             | 6   |

**Abbildung 6.2: Schema für die Abschätzung von Abflussbeiwertklassen [tr-mf: trocken-mäßig frisch; n: nass] (aus Kohl und Markart 2010, modifiziert).**

Die Rauigkeitsbeiwertklasse (RKL) hingegen dient als Parameter der Oberflächenrauigkeit zur Berechnung eines durchschnittlichen Fließwiderstandes (Kohl, 2011). Umso rauer die Oberfläche, desto größer die Rauigkeitsbeiwertklasse. Die verschiedenen Vegetationseinheiten können in sechs verschiedene Klassen eingeteilt werden (vgl. Abbildung 6.3).



**Abbildung 6.3: Rauigkeitsklassifizierung nach unterschiedlichen Oberflächen- und Vegetationstypen (aus Markart et al., 2004b).**

In der Provisorischen Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0) sind Beispiele verschiedener alpiner Vegetationseinheiten mit den korrespondierenden Abfluss- und Rauigkeitsbeiwerten angeführt.

Für die Zuweisung der Abfluss- und Rauigkeitsbeiwertklassen wurde das Untersuchungsgebiet auf Grundlage des Shapefiles der Landbedeckung in verschiedene Einheiten unterteilt. Gemäß der Anleitung von Markart et al., 2004b wurden auf Grundlage des Shapefiles der Walddtypisierung Südtirol, des Orthophotos 2011, sowie der Bodenproben von Gius, 1987 unterschiedliche Abflussbeiwertklassen und Rauigkeitsbeiwertklassen festgelegt.

Zur Abschätzung der Sensitivität wurden für eine bestimmte Vegetationseinheit, unter Berücksichtigung der standörtlichen Gegebenheiten, die entsprechende untere und obere Grenze der Abflussbeiwertklasse (AKL) sowie Rauigkeitsbeiwertklasse (RKL) bestimmt. Somit ergibt sich, wie in Tabelle 6.2 dargestellt, eine glatte und raue Variante der AKL-RKL. Zusätzlich wurde noch eine Variante MP festgelegt, welche die eigene Einschätzung wieder spiegelt.

**Tabelle 6.2: Verwendete Rauigkeits- und Abflussbeiwertklassen.**

| Kategorie                  | glatt |     | rau |     | MP  |     |
|----------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                            | AKL   | RKL | AKL | RKL | AKL | RKL |
| <b>Forststraße</b>         | 6     | 1   | 6   | 1   | 6   | 1   |
| <b>Fels</b>                | 6     | 1   | 6   | 1   | 6   | 1   |
| <b>Almgebäude</b>          | 6     | 1   | 6   | 1   | 6   | 1   |
| <b>Gerinne</b>             | 5     | 2   | 5   | 2   | 5   | 2   |
| <b>Grasland beweidet</b>   | 5     | 2   | 3   | 3   | 4   | 3   |
| <b>Grasland normal</b>     | 5     | 1   | 4   | 3   | 5   | 2   |
| <b>Lockermaterial</b>      | 4     | 6   | 5   | 2   | 4   | 6   |
| <b>dichter Wald</b>        | 3     | 3   | 2   | 4   | 2   | 4   |
| <b>mittlerer Wald</b>      | 3     | 3   | 2   | 4   | 3   | 3   |
| <b>bestocktes Grasland</b> | 3     | 3   | 2   | 3   | 3   | 3   |

Die Flächen der unterschiedlichen Vegetationseinheiten wurden im ArcGIS erhoben und anschließend mit den Abflussbeiwert- und Rauigkeitsbeiwertklassen kombiniert. Die Fläche jeder einzelnen Abflussbeiwert- und Rauigkeitsbeiwertklasse wurde anschließend ins ZEMOKOST übertragen.

#### 6.2.3.2 Gerinne-Parameter

Auf Grundlage des Shapefiles *gewässer\_2d.shp* und des Orthophotos 2011 wurden für die jeweiligen Teileinzugsgebiete die Gerinnelängen und deren mittleres Gefälle (Differenz aus höchstem und tiefstem Punkt des Gerinnes dividiert durch die Länge) bestimmt (vgl. Tabelle 6.3).

Der Rauigkeitsfaktor  $D_{90}$  wurde im Zuge der Masterarbeit von Fleisch, 2012 am Institut für Alpine Naturgefahren (BOKU Wien) erhoben und aus dem Report 144 (Hübl et al., 2012) entnommen. Da eine Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen  $D_{90}$  ergab, dass der  $D_{90}$  nur einen geringen Einfluss auf die Abflussganglinie hat, wurde dieser Wert für alle Gerinneabschnitte übernommen.

**Tabelle 6.3: Verwendete Eingangsdaten.**

| T_EZG | Fläche         |                 | Hangneigung<br>[-] | Hanglänge<br>[m] | Gerinne<br>[m] | Neigung<br>[-] | D <sub>90</sub><br>[m] |
|-------|----------------|-----------------|--------------------|------------------|----------------|----------------|------------------------|
|       | m <sup>2</sup> | km <sup>2</sup> |                    |                  |                |                |                        |
| 1     | 654469         | 0,65            | 0,74               | 363              | 207            | 0,68           | 0,28                   |
| 2     | 739750         | 0,74            | 0,92               | 287              | 1199           | 0,56           | 0,28                   |
| 3     | 779652         | 0,78            | 0,76               | 221              | 1733           | 0,53           | 0,28                   |
| 4     | 846770         | 0,85            | 0,74               | 513              | 713            | 0,30           | 0,28                   |
| 5     | 451785         | 0,45            | 0,66               | 380              | 628            | 1,80           | 0,28                   |
| 6     | 1580556        | 1,58            | 0,83               | 280              | 1844           | 0,54           | 0,28                   |
| 7     | 501959         | 0,50            | 0,9                | 137              | 1258           | 0,63           | 0,28                   |
| 8     | 51368          | 0,05            | 0,59               | 185              | 86             | 0,21           | 0,28                   |
| 9     | 252499         | 0,25            | 0,68               | 327              | 394            | 0,16           | 0,28                   |

### 6.2.3.3 Niederschlags-Parameter

Für die hydrologische Nachberechnung der drei beobachteten Murgangereignisse im Untersuchungsgebiet wurden die effektiv gemessenen Niederschlagsdaten der drei Niederschlagsstationen im Untersuchungsgebiet verwendet.

Die Verwendung von verfügbaren, flächigen Niederschlagsdaten (INCA-Daten) des Wetterradars auf der Valluga war aufgrund einiger unbekannter Schwierigkeiten leider nicht möglich. Das Hauptproblem bestand darin, dass über dem Einzugsgebiet keine Gewitterzelle gemessen wurde, welche mit den aufgezeichneten Werten der Niederschlagsstationen im Untersuchungsgebiet übereinstimmt. Gründe hierfür können eine fehlerhafte Georeferenzierung oder die Abschattung durch den Alpenhauptkamm (Gewitterzelle liegt unterhalb des Messbereichs) sein. Da mit dem Programm ZEMOKOST eine flächige Niederschlagsverteilung jedoch maximal durch verschiedene Niederschlagsganglinien der unterschiedlichen Teileinzugsgebiete möglich ist, ist die Verwendung von punktuellen Daten der Niederschlagsstationen vertretbar.

Durch die flächige Aufteilung von drei Niederschlagsstationen im relativ kleinen Einzugsgebiet sind die drei Niederschlagsstationen in der Lage, ein „quasi-flächiges“ Niederschlagsgeschehen abzubilden. Für die unterschiedlichen Teileinzugsgebiete wurden somit unter Berücksichtigung der geographischen Lage der Niederschlagsstation unterschiedliche Niederschlagsverteilungen verwendet. Die verwendeten Niederschlagsverteilungen der jeweiligen Murgänge sind in Anhang 2 angeführt.

### 6.2.3.4 Zusätzliche, vertiefende Parameter

Auf die Berücksichtigung der natürlichen Retention (Schneefelder, Schuttkegel) und des Basisabflusses sowie der Eingliederung von Maßnahmen (z.B. Zu- und Ableitungen im Untersuchungsgebiet) wurde verzichtet. Da es im Einzugsgebiet meist zu kurzen, konvektiven Gewittern kommt und hierbei der Zwischenabfluss vernachlässigbar ist (Zeller, 1974, 1981; zit. in Kohl und Stepanek, 2005), wurde dieser in der vorliegenden Arbeit nicht implementiert.

### 6.3 Validierung der Reinwasser-Spitzenabflüsse

Das Hauptproblem der Bestimmung der Hochwasser-Spitzenabflüsse bestand darin, die Ergebnisse aus dem Modell ZEMOKOST zu plausibilisieren. Eine Kalibrierung im hydrologischen Sinne war aufgrund fehlender Reinwasserabflussmessungen im Untersuchungsgebiet nicht möglich. Zur Plausibilisierung der Resultate wurden in vorliegender Arbeit drei verschiedene Methoden angewandt:

- Methode 1: Plausibilisierung des Modells ZEMOKOST über den volumetrischen Wasseranteil im Murgang
- Methode 2: Eichung des Modells mittels der Eingangsdaten und Ergebnisse zur Bestimmung des Bemessungsabflusses mit dem Programm BASIN 30 (Abteilung Wasserschutzbauten)
- Methode 3: Berechnung der Hochwasser-Spitzenabflüsse auf Grundlage der Wasserfracht unter der Annahme einer vereinfachten, dreiecksförmigen Hochwasserganglinie.

#### 6.3.1 Methode 1

##### Plausibilisierung des Modells ZEMOKOST über den volumetrischen Wasseranteil im Murgang

Diese Methode versucht das Niederschlag-Abfluss-Modell über die Wasserfracht im Murgang zu plausibilisieren. Dabei wird unter Verwendung verschiedener Abfluss- und Rauigkeitsbeiwertklassen, sowie verschiedener Klassenwerte (o; u; m) und verschiedener Systemzustandsindizes versucht das Modell so zu eichen, dass die modellierte Hochwasserfracht mit der Wasserfracht im Murgang übereinstimmt. Zur Berechnung des Hochwasser-Spitzenabflusses muss zum modellierten Hochwasser-Spitzenabfluss der Basisabfluss addiert werden.

##### Berechnung der Wasserfracht der drei beobachteten Murgänge im Untersuchungsgebiet:

Die Wasserfracht  $V_W$  des Murganges berechnet sich aus der Gesamtfracht  $V_{WG}$  des Murganges reduziert um die Geschiebefracht  $V_G$ .

$$V_W = V_{WG} - V_G$$

**wobei:**

- $V_W$  = Wasserfracht des Murganges [ $m^3$ ]
- $V_{WG}$  = Gesamtfracht des Murganges [ $m^3$ ]
- $V_G$  = Geschiebefracht des Murganges [ $m^3$ ]

Die Gesamtfracht der Murgänge wurde im Zuge der Arbeit von Comiti et al., 2014 und SEDALP, 2015 berechnet. Die Geschiebefracht errechnet sich aus der in Kapitel 5.3 beschriebenen Differenz der zwei Geländemodelle.

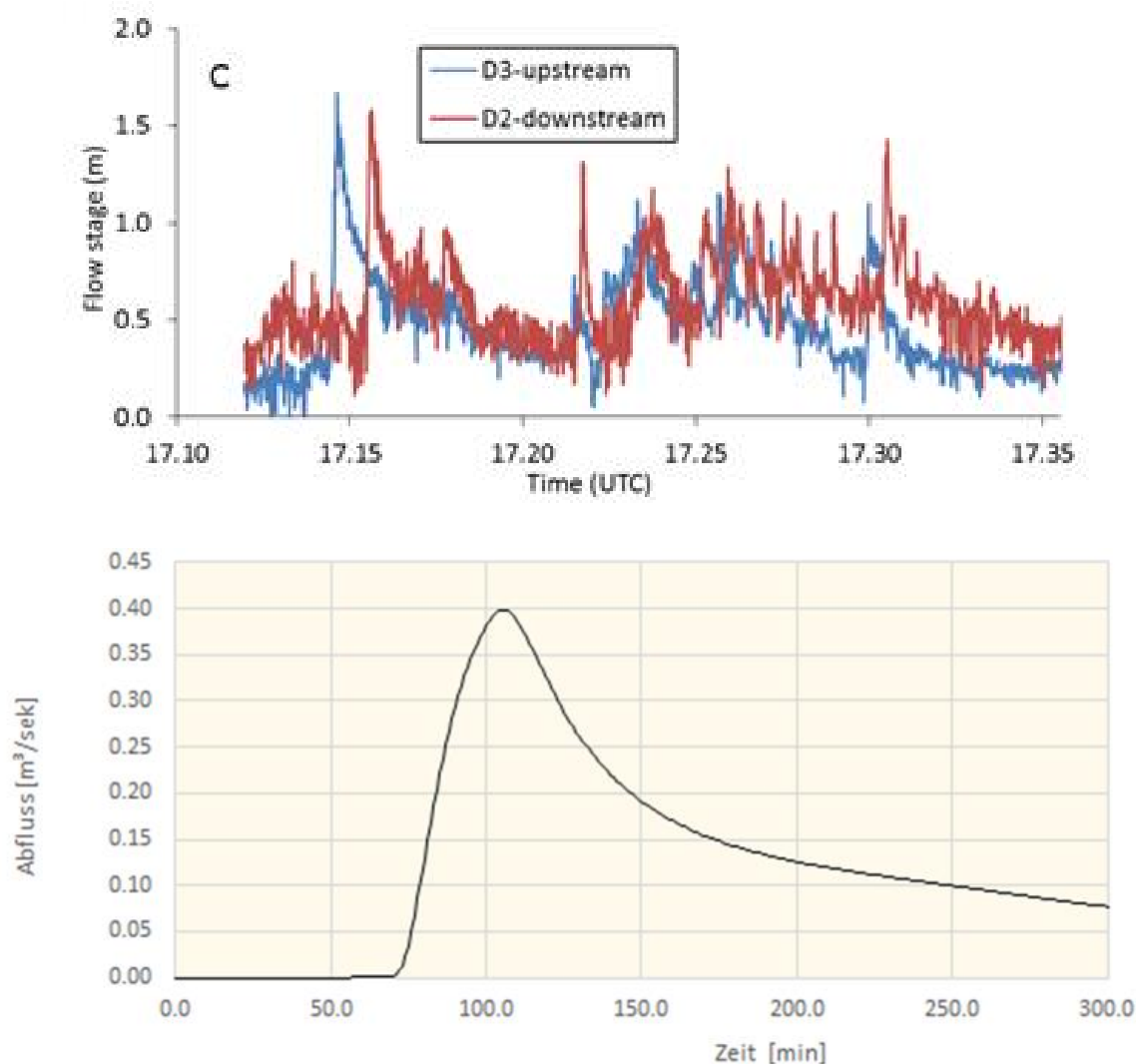
Somit lassen sich unter obiger Formel folgende Wasserfrachten  $V_W$  und volumetrische Feststoffkonzentrationen berechnen:

**Tabelle 6.4: Berechnete Wasserfrachten und volumetrische Feststoffkonzentrationen der beobachteten Murgänge.**

| Murgang | Murfracht<br>[m³] | Geschiebefracht<br>[m³] | Wasserfracht<br>[m³] | $c_v$<br>[-] |
|---------|-------------------|-------------------------|----------------------|--------------|
| 2011    | 2400              | 2000                    | 400                  | 0,83         |
| 2013    | 10000             | 8000                    | 2000                 | 0,80         |
| 2014    | 13000             | 10500                   | 2500                 | 0,81         |

Anmerkung: Aufgrund der Unsicherheiten in der Bestimmung der Wasserfracht kann die Fracht des Basisabflusses vernachlässigt werden und wird somit bei der Berechnung der Wasserfracht nicht berücksichtigt.

Ein hydrologischer Abflussprozess hat im Vergleich mit einem Murgang eine längere Nachlaufzeit nach dem Erreichen der Hochwasserspitze und somit auch eine längere Gesamtlaufzeit. Wie aus Abbildung 6.4 ersichtlich, hat die Murgangganglinie eine Dauer von ca. 25 Minuten, während die modellierte Ganglinie des Reinwasserabflusses eine Laufzeit von über 300 Minuten aufweist.

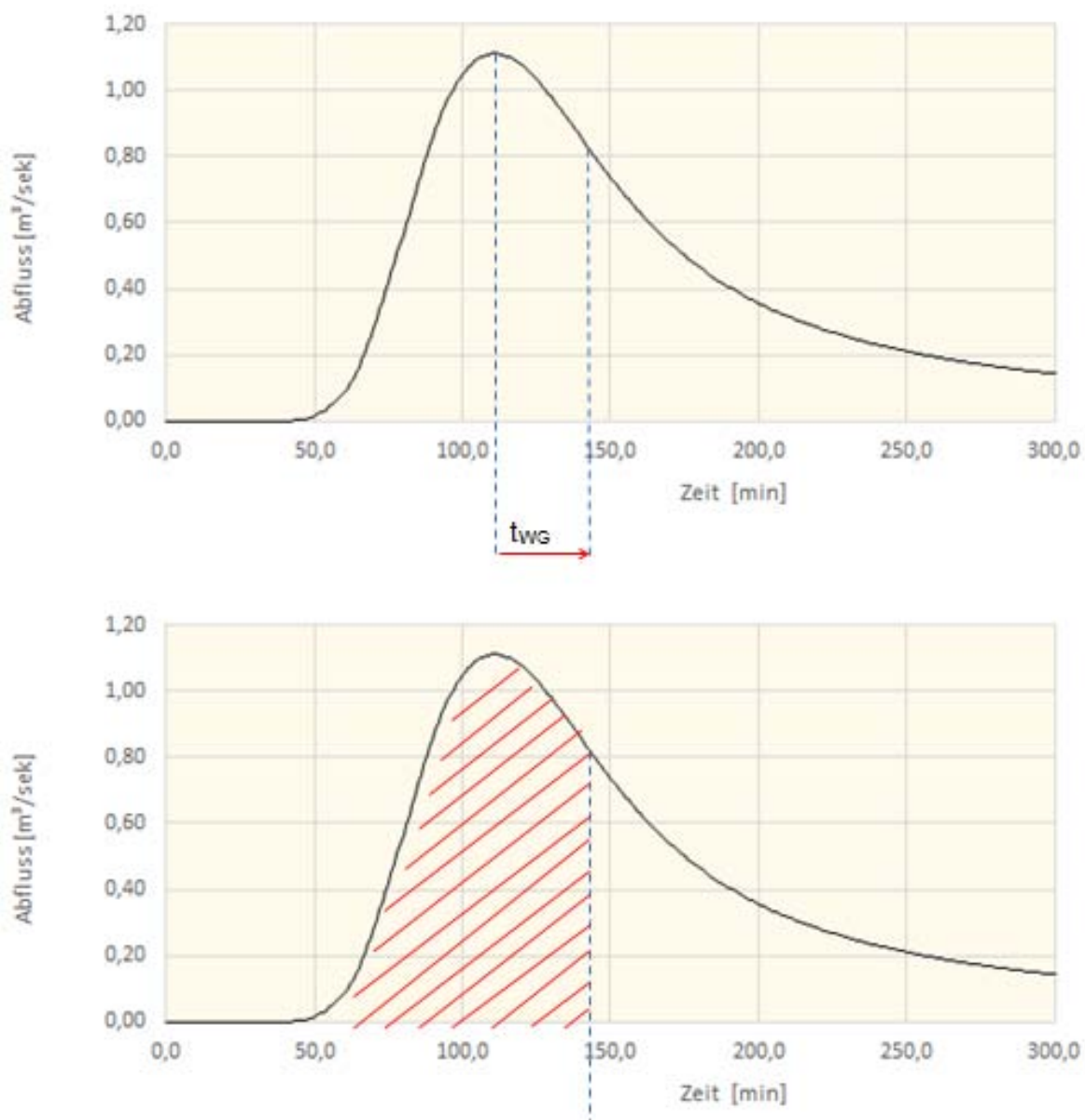


**Abbildung 6.4: Vergleich einer Reinwasserganglinie (unten) mit einer Murgangganglinie (oben - Comiti et al., 2014).**

Ein Vergleich der Wasserfracht im Murgang mit der gesamten Fracht aus der Reinwassermodellierung wäre somit fehlerhaft und realitätsfern, da nicht die gesamte Reinwasserfracht aus dem Modell im Murgang vorhanden ist. Aus diesem Grund ist es notwendig, nur die Wasserfracht bis zu einem gewissen Punkt der Reinwasserganglinie mit der Wasserfracht des Murgangs zu vergleichen (vgl. Abbildung 6.5).

Dabei wurde folgende Annahme getroffen: Die Spitze des modellierten Hochwassers verursacht die Spitze des Murganges.

Im Murgang wäre somit jenes Wasser enthalten, welches bis zum Zeitpunkt der Spitze des Hochwasserabflusses zuzüglich der Dauer des Murganges  $t_{WG}$  in das Gerinne entwässert. In den folgenden Ausführungen wird dieses Wasservolumen als „Fracht\*“ bezeichnet.



**Abbildung 6.5: Festlegung des Vergleichsvolumens.**

### 6.3.2 Methode 2

#### Eichung des Modells mittels der Eingangsdaten und Ergebnisse zur Bestimmung des Bemessungsabflusses mit dem Programm BASIN 30 (Abteilung Wasserschutzbauten – Autonome Provinz Bozen – Südtirol)

##### 6.3.2.1 Vorgehensweise

Die Abteilung Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol hat unter Verwendung des intern entwickelten Niederschlag-Abfluss-Modells BASIN 30 eine Modellierung der Bemessungsabflüsse des Gadriabaches durchgeführt.

Ziel dieser Methode ist es, das Modell ZEMOKOST mit der von BASIN 30 verwendeten Niederschlagsverteilung an die ermittelten Abflüsse anzupassen. Somit sollen eine örtliche Anpassung des Modells ZEMOKOST gewährleistet und zusätzliche Vergleichsdaten generiert werden.

Die Plausibilisierung des Modells ZEMOKOST und deren Resultate soll durch die Anpassung der Abfluss- und Rauigkeitsbeiwertklassen, der Klassenwerte ( $u$ ;  $o$ ;  $m$ ) und des Systemzustandes erfolgen.

Die Reinwasser-Spitzenabflüsse der einzelnen Murgänge können anschließend mit dem angepassten Modell durch Verwendung der gemessenen Niederschläge und der Addition des Basisabflusses berechnet werden.

##### 6.3.2.2 Anpassung des Modells ZEMOKOST

Bei der Modellierung des HQ100 mit dem Programm BASIN 30 konnte folgende Niederschlags-Abfluss-Beziehung ermittelt werden:

**Tabelle 6.5: Berechnete Niederschlags-Abfluss-Beziehung mit dem Programm BASIN 30 (Abteilung Wasserschutzbauten, 2015).**

| PORTATA E PRECIPITAZIONE |                                       |                          |                 |                        |                             |                 |
|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Tempo<br>(h)             | Portate ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) |                          |                 | Precipitazione<br>(mm) |                             | Storage<br>(mm) |
|                          | Gesamt<br>/ Totale                    | Direkt<br>/ Di-<br>retta | Basis /<br>Base | Gesamt<br>/ Totale     | Effektiv<br>/ Effi-<br>cace |                 |
| 0,00                     | 0,298                                 | 0                        | 0,298           | 0,4                    | 0                           | 0               |
| 0,08                     | 0,297                                 | 0                        | 0,297           | 0,4                    | 0                           | 0               |
| 0,17                     | 0,297                                 | 0                        | 0,297           | 0,4                    | 0                           | 0               |
| 0,25                     | 0,296                                 | 0                        | 0,296           | 0,4                    | 0                           | 0               |
| 0,33                     | 0,296                                 | 0                        | 0,296           | 0,5                    | 0                           | 0               |
| 0,42                     | 0,295                                 | 0                        | 0,295           | 0,5                    | 0                           | 0               |
| 0,50                     | 0,295                                 | 0                        | 0,295           | 0,5                    | 0                           | 0               |
| 0,58                     | 0,294                                 | 0                        | 0,294           | 0,5                    | 0                           | 0               |
| 0,67                     | 0,294                                 | 0                        | 0,294           | 0,6                    | 0                           | 0               |
| 0,75                     | 0,293                                 | 0                        | 0,293           | 0,6                    | 0                           | 0               |
| 0,83                     | 0,293                                 | 0                        | 0,293           | 0,7                    | 0                           | 0               |
| 0,92                     | 0,292                                 | 0                        | 0,292           | 0,7                    | 0                           | 0               |
| 1,00                     | 0,296                                 | 0                        | 0,296           | 0,8                    | 0                           | 0               |

|      |       |       |       |     |     |   |
|------|-------|-------|-------|-----|-----|---|
| 1,08 | 0,308 | 0     | 0,308 | 0,9 | 0   | 0 |
| 1,17 | 0,325 | 0,001 | 0,324 | 1,1 | 0   | 0 |
| 1,25 | 0,353 | 0,006 | 0,347 | 1,5 | 0,1 | 0 |
| 1,33 | 0,417 | 0,03  | 0,387 | 2,4 | 0,1 | 0 |
| 1,42 | 0,67  | 0,119 | 0,552 | 7,2 | 0,8 | 0 |
| 1,50 | 0,905 | 0,304 | 0,601 | 1,8 | 0,3 | 0 |
| 1,58 | 1,507 | 0,872 | 0,635 | 1,3 | 0,3 | 0 |
| 1,67 | 3,178 | 2,517 | 0,661 | 1   | 0,2 | 0 |
| 1,75 | 4,807 | 4,124 | 0,683 | 0,9 | 0,2 | 0 |
| 1,83 | 5,649 | 4,948 | 0,702 | 0,8 | 0,2 | 0 |
| 1,92 | 4,453 | 3,735 | 0,718 | 0,7 | 0,2 | 0 |
| 2,00 | 3,893 | 3,16  | 0,733 | 0,6 | 0,2 | 0 |
| 2,08 | 4,242 | 3,495 | 0,747 | 0,6 | 0,2 | 0 |
| 2,17 | 4,58  | 3,82  | 0,759 | 0,6 | 0,1 | 0 |
| 2,25 | 4,51  | 3,739 | 0,771 | 0,5 | 0,1 | 0 |
| 2,33 | 4,36  | 3,578 | 0,782 | 0,5 | 0,1 | 0 |
| 2,42 | 4,003 | 3,212 | 0,792 | 0,5 | 0,1 | 0 |
| 2,50 | 4,063 | 3,262 | 0,801 | 0,4 | 0,1 | 0 |
| 2,58 | 4,134 | 3,324 | 0,81  | 0,4 | 0,1 | 0 |
| 2,67 | 4,3   | 3,482 | 0,819 | 0,4 | 0,1 | 0 |
| 2,75 | 4,17  | 3,344 | 0,827 | 0,4 | 0,1 | 0 |
| 2,83 | 4,127 | 3,292 | 0,834 | 0,4 | 0,1 | 0 |
| 2,92 | 3,869 | 3,027 | 0,842 | 0,4 | 0,1 | 0 |
| 3,00 | 3,741 | 2,9   | 0,84  | 0   | 0   | 0 |

Aus Tabelle 6.5 ist ein Maximalabfluss des HQ100 von 5,7 m<sup>3</sup>/s bei einer Laufzeit von 1,83 Stunden zu entnehmen. Der Basisabfluss beträgt 0,7 m<sup>3</sup>/s. In Abbildung 6.6 sind die berechneten Ganglinien des HQ100 graphisch dargestellt.

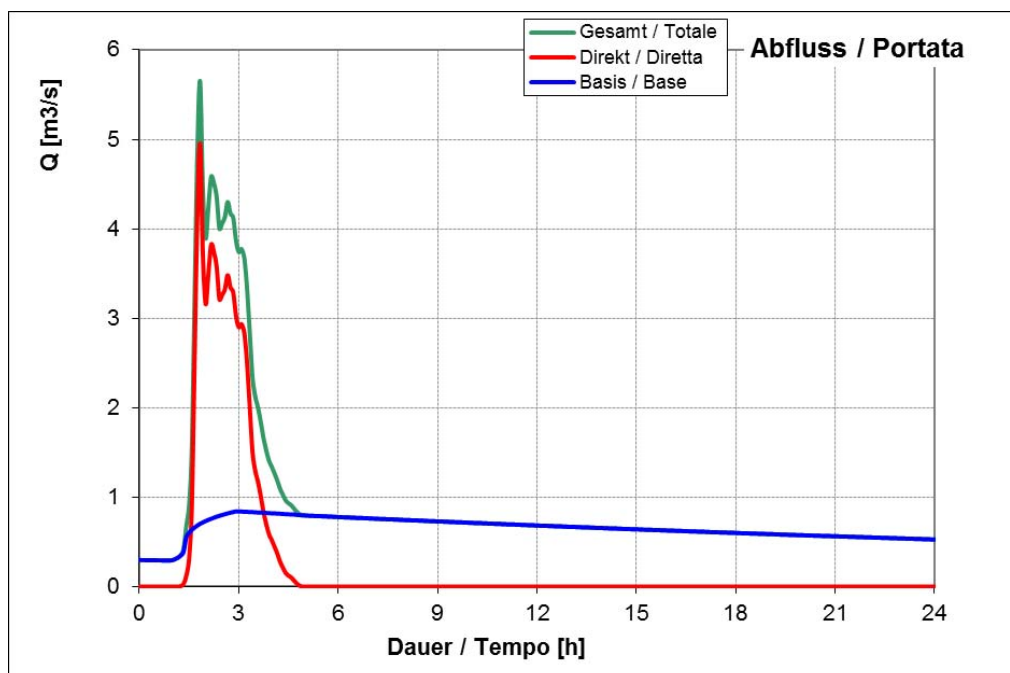


Abbildung 6.6: Graphische Darstellung der HQ100-Ganglinien (Abteilung Wasserschutzbauten, 2015).

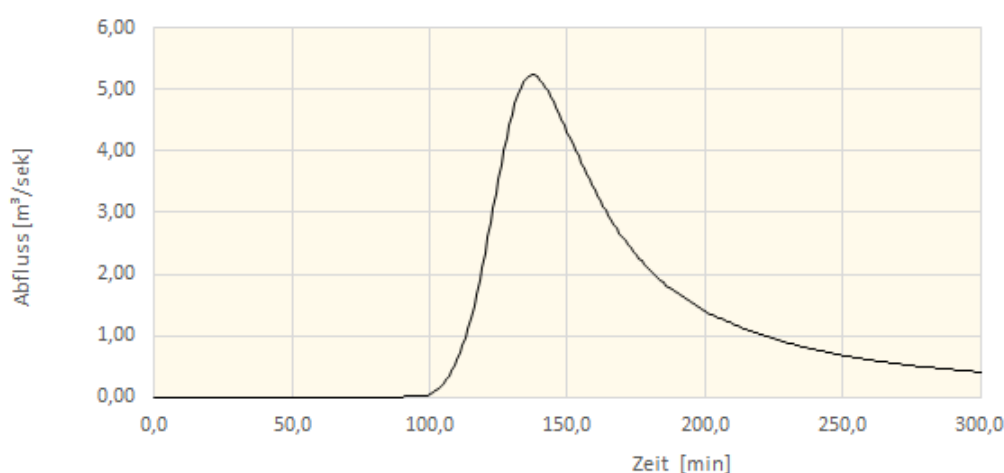
Für eine Plausibilisierung des ZEMOKOST-Modells wurden die oben angeführten Niederschläge in das entsprechende Format (mm/5min → mm/h) umgerechnet und das Modell mittels der Verwendung verschiedener Eingangsparameter bestmöglich an die Niederschlag-Abfluss-Beziehung angepasst.

Die in Tabelle 6.6 dargestellten Abflussbeiwertklassen (verwendeter Klassenbereich: u) und Rauigkeitsbeiwertklassen (verwendeter Klassenbereich: m) in Kombination mit einem Systemzustandsindex von 0 lieferte die beste Übereinstimmung.

**Tabelle 6.6: Verwendete Abfluss- und Rauigkeitsbeiwertklassen.**

| Kategorie           | AKL | RKL |
|---------------------|-----|-----|
| Forststraße         | 6   | 1   |
| Fels                | 6   | 1   |
| Almgebäude          | 6   | 1   |
| Gerinne             | 5   | 2   |
| Grasland (beweidet) | 5   | 2   |
| Grasland (normal]   | 5   | 1   |
| Lockermaterial      | 4   | 6   |
| dichter Wald        | 3   | 3   |
| mittlerer Wald      | 3   | 3   |
| bestocktes Grasland | 3   | 3   |

Die damit errechnete Abflussganglinie mit einem Reinwasser-Spitzenabfluss von 5,2 m³/s ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Der Vergleichswert aus der N-A-Modellierung mit BASIN 30 der Abteilung Wasserschutzbauten ergab einen Reinwasserabfluss von 5,7 m³/s bei einem Basisabfluss von 0,7 m³/s. Die Differenz von 0,2 [5,2-(5,7-0,7)] m³/s kann vernachlässigt werden.



**Abbildung 6.7: Kalibrierte Ganglinie mit der N-A-Beziehung von BASIN 30.**

### 6.3.3 Methode 3

#### **Berechnung der Hochwasser-Spitzenabflüsse auf Grundlage der Wasserfracht unter der Annahme einer vereinfachten, dreiecksförmigen Hochwasserganglinie**

Die Methode 3 basiert auf rein geometrischen Beziehungen. Dabei wurde angenommen, dass sich das Wasservolumen, wie in Abbildung 6.8 dargestellt, auf eine dreiecksförmige

Ganglinie über die Dauer des Murganges verteilt. Dies stellt natürlich eine enorme Vereinfachung der Realität dar, ist jedoch zur Plausibilisierung der Abflüsse ausreichend genau und stellt eine zusätzliche Vergleichsmethode dar.

### 6.3.3.1 Beschreibung der Methode

Der Gesamtabfluss eines hydrologischen Ereignisses errechnet sich aus der Integration des Abflusses über die Dauer des hydrologischen Ereignisses. Mit anderen Worten ausgedrückt, entspricht sie der Fläche unterhalb der Ganglinie. Stark vereinfachend kann die Ganglinie eines hydrologischen Ereignisses als Dreieck angenommen werden. Somit entspricht die Wasserfracht  $V_w$  der Fläche des grünen Dreiecks in Abbildung 6.8.

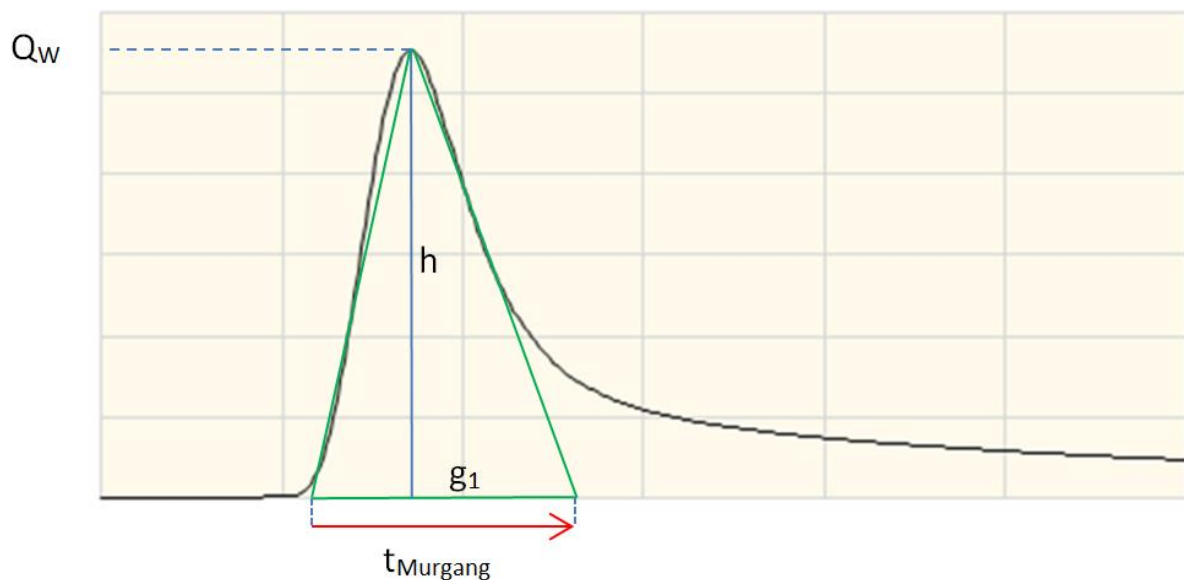


Abbildung 6.8: Dreiecksförmige Annäherung der Ganglinie.

Die Grundlinie ( $g_1$ ) des Dreiecks entspricht der Zeit des Murgangs  $t_{Murgang}$  [s] und die Höhe ( $h$ ) des Dreiecks entspricht dem Reinwasser-Spitzenabfluss  $Q_w$  [ $m^3/s$ ]. Die Fläche ( $A$ ) eines Dreiecks errechnet sich bekanntlich nach folgender Formel:

$$A = \frac{g_1 * h}{2}$$

durch sinngemäßes Ersetzen erhält man somit:

$$Wasserfracht = \frac{Q_w * t_{Murgang}}{2}$$

Formt man diese Formel auf den Reinwasser-Spitzenabfluss [ $m^3/s$ ] um, so kann der maximale Reinwasserabfluss berechnet werden:

$$Q_w \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{Wasserfracht (V_w) [m^3] * 2}{t_{Murgang} [s]}$$

## 7 Auswertungen

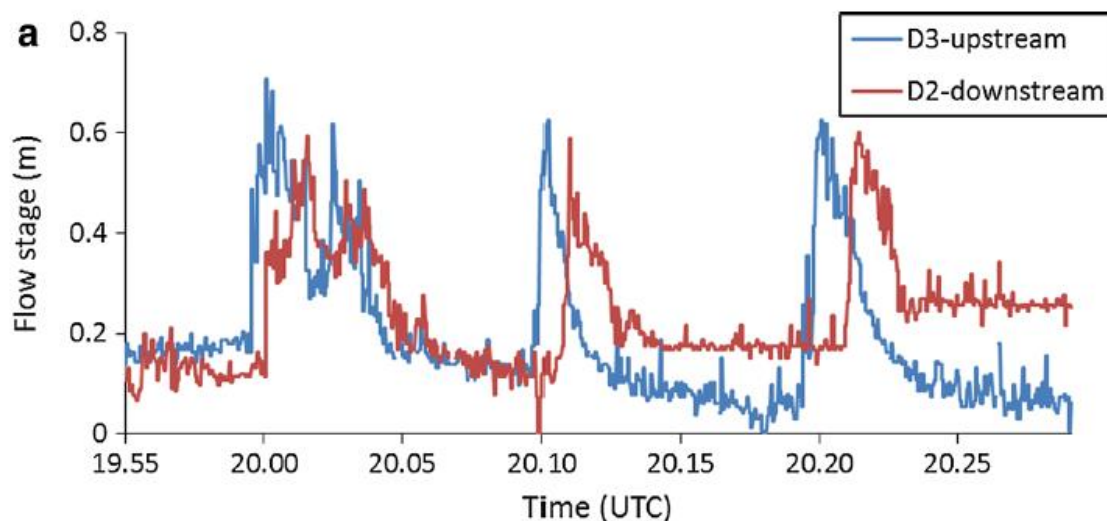
Im folgenden Kapitel „Auswertungen“ werden drei neue Murgangsintensitätsfaktoren im Einzugsgebiet des Gadriabaches (Vinschgau/Südtirol) bestimmt, sowie die in einschlägiger Fachliteratur beschriebenen Murgangsintensitätsfaktoren zusammengetragen. Zudem wird versucht die Problematik und die Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren zu erläutern.

### 7.1 Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren im Einzugsgebiet des Gadriabaches (Vinschgau/Südtirol)

Im folgenden Kapitel wird versucht mit Hilfe der drei, in Kapitel 6.3 beschriebenen Methoden die Murgangsintensitätsfaktoren von drei beobachteten Ereignissen am Gadriabach zu bestimmen.

#### 7.1.1 Murgang 2011

Der Murgang 2011 ereignete sich am 5. August 2011 (ca. 20:00 Uhr UTC) mit einem Gesamtvolumen von ca. 2400 m<sup>3</sup> und einem Spitzenabfluss von 11 m<sup>3</sup>/s (Comiti et al., 2014). Der in Abbildung 7.1 dargestellte, ca. 25 Minuten lang andauernde Murgang bestand aus drei relativ kleinen, aus temporären und lokalen Verklausungen entstandenen Schüben mit einem abrupten Anstieg der Murgangs-Ganglinie gefolgt von einem schnellen Abflachen der Ganglinie (Comiti et al., 2014; Macconi, 2015). Comiti et al., 2014 beschreibt den ersten Schub als sehr flüssig und turbulent und klassifizierte ihn als *debris flood*. Der zweite und dritte, nicht turbulente Murschub hingegen war geprägt von der Ausbildung einer typischen Murfront mit großen Blöcken und hohen Feststoffkonzentrationen. Für den ersten Schub berechneten Comiti et al., 2014 eine Front-Fließgeschwindigkeit von 2.6 m/s, für die zweiten und dritten Murwelle hingegen 1.7 und 1.0 m/s.



**Abbildung 7.1:** Graphische Darstellung der gemessenen Murgangsganglinie für das Ereignis 2011 mit den zwei Radarsensoren (D3; D2) (aus Comiti et al., 2011).

Der Murgang 2011 verursachte im Untersuchungsgerinne dabei Abtragungen/Aufschüttungen von -12.2 bis 15.1 m<sup>3</sup>/m. Die Wetterlage, welche zum Murgang 2011

führte, war geprägt von sehr geringen Niederschlägen (9,4 mm von 14:25 Uhr bis 19:40 Uhr mit einer maximalen Intensität von 0,9 mm in 10 min). Aufgrund technischer Probleme waren nur zwei Niederschlagsmessstationen im Einzugsgebiet in Betrieb, welche einen Niederschlag von 7,6 mm und 0,2 mm in 30 Minuten (19:40-20:10 Uhr) aufzeichneten. Die Auswertung von Comiti et al., 2014 der Niederschlagsmessstation der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol nahe dem Rückhaltebecken ergab eine Niederschlagsmenge von 15,4 mm in 24 h (5. August 2011 9:00 Uhr – 6. August 2011 9:00 Uhr). Allerdings herrschten vor dem Ereignis nasse Bodenbedingungen vor (Comiti et al., 2014).

#### 7.1.1.1 Methode 1

Unter Abänderung der Abfluss- und Rauigkeitsbeiwertklassen, der Klassengrenzen (u, m, o) sowie des Systemzustandes wurde versucht die berechnete Reinwasserfracht von 400 m<sup>3</sup> zu modellieren. Die verwendeten Niederschlagseingangsdaten sind im Anhang 2 beigefügt. Das Ergebnis waren neun Modellierungen mit unterschiedlichen Eingangsparametern:

**Tabelle 7.1: Unterschiedliche Modellierungen für das Ereignis 2011.**

| Modellierung | Qmax [m <sup>3</sup> /s] | Fracht [m <sup>3</sup> ] | Fracht* [m <sup>3</sup> ] | AKL-RKL | Klassenwerte | Klassenwerte | Systemzustand |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------|--------------|--------------|---------------|
| M1           | 0,0                      | 577                      | 60                        | glatt   | m            | m            | 0             |
| M2           | 1,2                      | 5717                     | 2845                      | glatt   | o            | u            | 0             |
| M3           | 0,1                      | 2236                     | 556                       | glatt   | o            | u            | 2             |
| M4           | 0,0                      | 1198                     | 186                       | glatt   | o            | u            | 3             |
| M5           | 0,0                      | 517                      | 64                        | MP      | m            | m            | 0             |
| M6           | 0,8                      | 5684                     | 2331                      | MP      | o            | u            | 0             |
| M7           | 0,1                      | 2160                     | 434                       | MP      | o            | u            | 2             |
| M8           | 0,0                      | 1147                     | 148                       | MP      | o            | u            | 3             |
| M9           | 0,0                      | 632                      | 63                        | rau     | o            | u            | 0             |

Zur Berechnung der *Fracht\** [m<sup>3</sup>] wurde auf Basis der aufgezeichneten Murgangganglinien eine Murgangsdauer von 25 Minuten festgelegt.

Der Systemzustand variiert von 0 (normale Vorfeuchte-Bedingungen) – 6 (trockenes Einzugsgebiet vor dem Regenereignis). Negative Werte wurden aufgrund der geringen Niederschläge vor dem Ereignis ausgeschlossen.

#### Ausgewählte Spitzenabflüsse

Um die relativ großen Abweichungen der modellierten Wasserfracht einzuschränken, wurde eine Abweichung des Volumens von 20 % zugelassen, d.h. alle Modellierungen mit einer Fracht von 400 m<sup>3</sup> ± 80 m<sup>3</sup> wurden für die weiteren Untersuchungen verwendet. Somit minimierten sich die Modellierungen auf eine einzige Modellierung (M7) mit einer Wasserfracht 434 m<sup>3</sup> und einem Reinwasserspitzenabfluss von 0,1 m<sup>3</sup>/s. Zur Berechnung des Gesamt-Spitzenabflusses muss jedoch zum modellierten Hochwasser-Spitzenabfluss der Basisabfluss addiert werden (Tabelle 7.2). Dieser wurde mit 0,5 m<sup>3</sup>/s festgelegt.

Anmerkung: Der Basisabfluss von 0,5 m<sup>3</sup>/s ist der Mittelwert aus den Basisabflussdaten der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit dem Programm BASIN 30 (Abteilung Wasserschutzbauten), welches zur Berechnung von Bemessungsabflüssen dient. Zusätzlich wurde der Basisabfluss anhand einer Abschätzung des Abflusses vor den Murgängen aus den Video-Aufnahmen plausibilisiert.

**Tabelle 7.2: Berechneter Spitzenabfluss.**

|              | [m³/s] |
|--------------|--------|
| Abfluss      | 0,1    |
| Basisabfluss | 0,5    |
| Gesamt       | 0,6    |

**7.1.1.2 Methode 2**

Auf Basis des plausibilisierten Modells wurden mit den effektiven Niederschlägen (siehe Anhang 2) die Reinwasserganglinien des Ereignisses nachgerechnet.

Das kalibrierte Modell liefert mit den effektiven Niederschlägen aus dem Jahr 2011 keinen Abfluss. Allerdings tritt ein Basisabfluss von 0,5 m³/s auf.

**7.1.1.3 Methode 3**

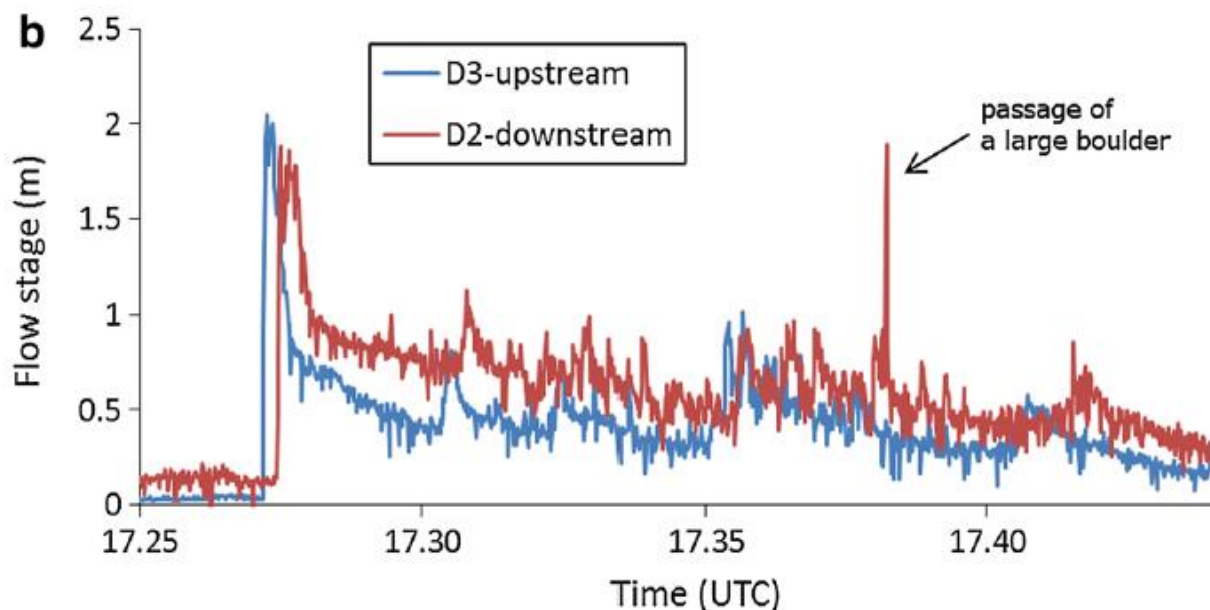
Unter Verwendung der in Tabelle 6.4 berechneten Wasserfrachten und der festgelegten Murgangsdauer aus der gemessenen Ganglinie konnte folgender maximaler Reinwasserabfluss berechnet werden:

**Tabelle 7.3: Berechnete Reinwasser-Spitzenabflüsse für das Ereignis 2011 mit Methode 3.**

| Murgang | Wasserfracht ( $V_W$ )<br>[m³] | Dauer des Murgangs ( $t_{\text{Murgang}}$ )<br>[s] | Errechneter Reinwasserspitzenabfluss ( $Q_W$ )<br>[m³/s] |
|---------|--------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 2011    | 400                            | 1500 (25minx60)                                    | 0,5                                                      |

**7.1.2 Murgang 2013**

Der Murgang 2013 mit einem Gesamtvolumen von ca. 10.000 m³ und einem Murgang-Spitzenabfluss von 80-90 m³/s ereignete sich am 18. Juli 2013 (ca. 17:25 Uhr UTC). Dabei erodierte der Murgang im Bachbett durchschnittlich 3,6 m³/m (maximal 13,6 m³/m).

**Abbildung 7.2: Ganglinie des Murganges 2013 (Comiti et al., 2014).**

Der Murgang bestand aus einer, bis zu zwei Meter tiefen, granularen Abflussfront mit einer Geschwindigkeit von 5,7 m/s, gefolgt von einem flüssigeren Murkörper mit einer Geschwindigkeit von 1–4 m/s. Ähnlich wie der Murgang 2011 ist die Ganglinie geprägt von einem abrupten Anstieg und einer schnellen Abflachung nach Durchfluss der Murfront (Comiti et al., 2014). Comiti et al., 2014 beschreiben weiters einen tiefen, klaren Abfluss vor dem Durchgang der Murfront.

Aus den Auswertungen von Comiti et al., 2014 geht hervor, dass der Murgang 2013 von einem kurzen Wolkenbruch mit intensiven Regenfällen ausgelöst wurde. Beispielsweise wurden an der Niederschlagsstation R1 (Rothütte) 23 mm in 33 Minuten aufgezeichnet. Berücksichtigt man jedoch nur den Regen bis zum Durchgang der Murfront, reduziert sich die Regenintensität auf 17 mm/15min mit einer mittleren Intensität von 69 mm/h (Comiti et al., 2014). Bemerkenswerterweise liefert die zweite Messstation im Untersuchungsgebiet lediglich einen Niederschlag von ca. 3 mm in 33 Minuten. Dies lässt wiederum auf eine lokal beschränkte Gewitterzelle schließen. Die Auswertung der Niederschlagssumme vom 12.07.2013 00:00 Uhr – 18.07.2013 17:25 Uhr für die Station R3 mit einer Niederschlagssumme von 10,4 mm (Station R1: 12,4 mm) ergab eine geringe Vorfeuchte des Untersuchungsgebiets. Auffallend ist zudem die kurze Zeitperiode von 18 Minuten zwischen Beginn des Niederschlages (17:09 Uhr) und der Durchgang der Murfront an der Messstation (17:27 Uhr).

### 7.1.2.1 Methode 1

Identisch der Auswertungsmethode für den Murgang 2011 wurden auch für das Ereignis 2013 verschiedene Modellierungen zur Berechnung des Reinwasser-Spitzenabflusses durchgeführt (vgl. Tabelle 7.4). Dabei wurde versucht, bei gegebener Niederschlagsverteilung durch Abänderung der Abfluss- und Rauigkeitsbeiwertklassen, des Systemzustandes und der Klassengrenze die modellierte Wasserfracht an eine Wasserfracht von 2000 m<sup>3</sup> anzupassen.

**Tabelle 7.4: Ergebnisse aller Modellierungen zum Ereignis 2013.**

| Modellierung | Qmax [m³/s] | Fracht [m³] | Fracht* [m³] | AKL-RKL | Klassenwerte [AKL] | Klassenwerte [RKL] | Systemzustand |
|--------------|-------------|-------------|--------------|---------|--------------------|--------------------|---------------|
| M1           | 3,7         | 18411       | 5648         | glatt   | m                  | m                  | 0             |
| M2           | 2,3         | 12988       | 3261         | glatt   | m                  | m                  | 2             |
| M3           | 1,6         | 10493       | 1965         | glatt   | m                  | m                  | 3             |
| M4           | 1,1         | 4331        | 1814         | glatt   | m                  | m                  | 4             |
| M5           | 4,3         | 15753       | 4993         | glatt   | o                  | u                  | 4             |
| M6           | 3,3         | 13056       | 3802         | glatt   | o                  | u                  | 5             |
| M7           | 2,6         | 10689       | 2893         | glatt   | o                  | u                  | 6             |
| M8           | 1,2         | 10636       | 2325         | glatt   | u                  | o                  | 0             |
| M9           | 0,8         | 8509        | 1733         | glatt   | u                  | o                  | 1             |
| M10          | 0,8         | 8437        | 3590         | rau     | m                  | m                  | 0             |
| M11          | 1,8         | 6735        | 2567         | rau     | m                  | m                  | 1             |
| M24          | 0,8         | 5284        | 1764         | rau     | m                  | m                  | 2             |
| M12          | 5,6         | 14648       | 8175         | rau     | o                  | u                  | 0             |
| M13          | 3,2         | 10049       | 5211         | rau     | o                  | u                  | 2             |
| M14          | 2,2         | 8201        | 4006         | rau     | o                  | u                  | 3             |
| M15          | 1,4         | 6502        | 2914         | rau     | o                  | u                  | 4             |
| M25          | 0,9         | 4976        | 1976         | rau     | o                  | u                  | 5             |
| M16          | 0,2         | 3790        | 873          | rau     | u                  | o                  | 0             |
| M17          | 1,1         | 11472       | 3419         | MP      | m                  | m                  | 0             |
| M18          | 0,7         | 9199        | 2377         | MP      | m                  | m                  | 1             |
| M26          | 0,4         | 7208        | 1609         | MP      | m                  | m                  | 2             |
| M19          | 4,4         | 19482       | 8568         | MP      | o                  | u                  | 0             |
| M20          | 2,3         | 14082       | 5228         | MP      | o                  | u                  | 2             |
| M21          | 0,8         | 8249        | 2653         | MP      | o                  | u                  | 4             |
| M22          | 0,5         | 7234        | 1716         | MP      | o                  | u                  | 5             |
| M23          | 0,1         | 5014        | 880          | MP      | u                  | o                  | 0             |

Zur Berechnung der *Fracht\** [m<sup>3</sup>] wurde auf Basis der aufgezeichneten Murgangganglinien eine Murgangsdauer von 20 Minuten festgelegt. Der *Systemzustand* variiert von 0 (normale Vorfeuchte-Bedingungen) – 6 (trockenes Einzugsgebiet vor dem Regenereignis). Negative Werte wurden aufgrund der geringen Niederschläge vor dem Ereignis ausgeschlossen.

### Festgelegte Spitzenabflüsse

Für die exaktere Anpassung der modellierten Wasserfracht an die Wasserfracht des Murganges wurde eine Abweichung von 20 % ( $2000 \pm 400 \text{ m}^3$ ) zugelassen und anschließend aus den acht Modellierungen das Minimum, das Maximum sowie der Mittelwert bestimmt und jeweils ein Basisabfluss von 0,5 m<sup>3</sup>/s addiert (vgl. Tabelle 7.5 und Abbildung 7.6).

**Tabelle 7.5: Ausgewählte Reinwasser-Modellierungen.**

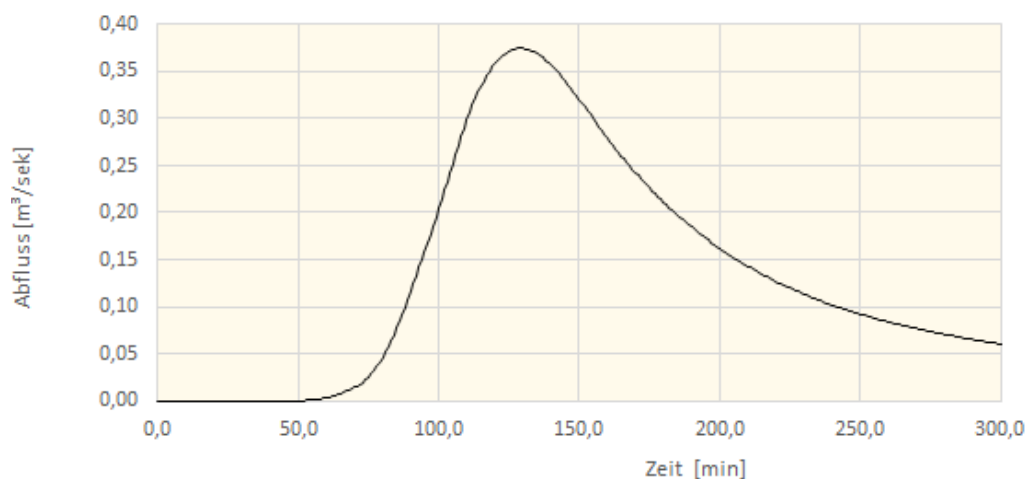
| Modellierung | Qmax [m <sup>3</sup> /s] | Fracht [m <sup>3</sup> ] | Fracht* [m <sup>3</sup> ] | AKL-RKL | Klassenwerte [AKL] | Klassenwerte [RKL] | Systemzustand |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------|--------------------|--------------------|---------------|
| M3           | 1,6                      | 10493                    | 1965                      | glatt   | m                  | m                  | 3             |
| M8           | 1,2                      | 10636                    | 2325                      | glatt   | u                  | o                  | 0             |
| M9           | 0,8                      | 8509                     | 1733                      | glatt   | u                  | o                  | 1             |
| M24          | 0,8                      | 5284                     | 1764                      | rau     | m                  | m                  | 2             |
| M25          | 0,9                      | 4976                     | 1976                      | rau     | o                  | u                  | 5             |
| M18          | 0,7                      | 9199                     | 2377                      | MP      | m                  | m                  | 1             |
| M26          | 0,4                      | 7208                     | 1609                      | MP      | m                  | m                  | 2             |
| M22          | 0,5                      | 7234                     | 1716                      | MP      | o                  | u                  | 5             |

**Tabelle 7.6: Berechneter Minimal-, Maximal-, und Mittelwert.**

|                    | MINIMAL<br>[m <sup>3</sup> /s] | MAXIMAL<br>[m <sup>3</sup> /s] | MITTELWERT<br>[m <sup>3</sup> /s] |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Reinwasser-Abfluss | 0,4                            | 1,6                            | 0,9                               |
| Basisabfluss       | 0,5                            | 0,5                            | 0,5                               |
| GESAMT             | 0,9                            | 2,1                            | 1,4                               |

#### 7.1.2.2 Methode 2

Auf Basis des plausibilisierten Modells wurden mit den effektiven Niederschlägen (siehe Anhang 2) die Reinwasserganglinien des Ereignisses nachgerechnet:



**Abbildung 7.3: Modellierter Reinwasser-Ganglinie für das Ereignis 2013 mit Methode 2.**

Der generierte Abfluss aus den EZG für das Ereignis 2013 beträgt  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ; addiert man einen Basisabfluss von  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , so ergibt sich ein **Spitzenabfluss von  $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$** .

### 7.1.2.3 Methode 3

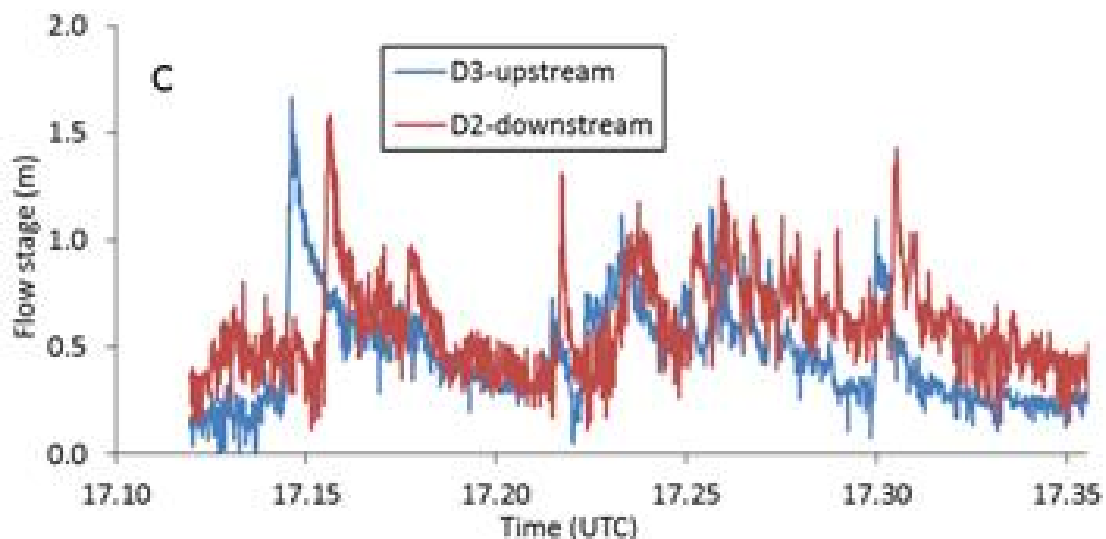
Unter Verwendung der in Tabelle 6.4 berechneten Wasserfrachten und der festgelegten Murgangsdauer aus der gemessenen Ganglinie konnte folgender maximaler Reinwasserabfluss berechnet werden:

**Tabelle 7.7: Berechneter Reinwasserspitzenabfluss für das Ereignis 2013.**

| Murgang | Wasserfracht ( $V_W$ )<br>[m <sup>3</sup> ] | Dauer des Murgangs ( $t_{\text{Murgang}}$ )<br>[s] | Errechneter Reinwasserspitzenabfluss ( $Q_W$ )<br>[m <sup>3</sup> /s] |
|---------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 2013    | 2000                                        | 1200 (20minx60)                                    | 3,3                                                                   |

### 7.1.3 Murgang 2014

Der Murgang 2014 ereignete sich am 14. Juli 2014 (ca. 17:15 Uhr UTC) mit einem geschätzten Volumen von  $13.000 \text{ m}^3$  und einem Murgang-Spitzenabfluss von ca.  $37,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der Murgang war charakterisiert von mehreren Schüben mittlerer Fließtiefe, wobei der erste Schub die größte Abflusstiefe aufwies (vgl. Abbildung 7.4). Aufgrund der Video-Aufzeichnungen des Ereignisses konnte ein, der Murfront vorauslaufender, flüssiger und turbulenter Schub beobachtet werden. Die Geschwindigkeiten der Schübe waren geringer als jene vom Murgangsereignis 2013 ( $1,4 \text{ m/s}$  – erster Schub;  $1,5\text{--}5,3 \text{ m/s}$  – folgende Schübe) (SEDALP, 2015).



**Abbildung 7.4: Beobachtete Ganglinie des Murganges 2014 (SEDALP, 2015).**

Die drei Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet konnten für das Murgangsereignis 2014 ein Regenereignis von ca. 1,5 Stunden (15:57–17:34 Uhr) mit unterschiedlichen Regenintensitäten (R1:  $14,1 \text{ mm}$ ; R3:  $18,1 \text{ mm}$ ; R2:  $8,0 \text{ mm}$ ) aufzeichnen. Die maximale Intensität war dabei bei der Station R3 mit  $10,5 \text{ mm}$  in 27 Minuten zu verzeichnen. Die Auswertung der Niederschlagssumme vom 08.07.2014 (00:00 Uhr) bis zum 14.07.2014 (15:57 Uhr) ergab eine Niederschlagssumme von  $35,4 \text{ mm}$  in ca. 6,5 Tagen, wobei der höchste Wert mit  $18,4 \text{ mm}$  am 12.07.2014 (2 Tage vor dem Ereignis) zu verzeichnen war.

### 7.1.3.1 Methode 1

Die Wasserfracht für das Ereignis im Jahr 2014 wurde mit 2500 m<sup>3</sup> bestimmt. Somit wurde versucht das Modell an diese Wasserfracht anzueichen (vgl. Tabelle 7.8).

**Tabelle 7.8: Gesamtheit der durchgeführten Modellierungen für das Ereignis 2014.**

| Modellierung | Qmax [m <sup>3</sup> /s] | Fracht [m <sup>3</sup> ] | Fracht* [m <sup>3</sup> ] | AKL-RKL | Klassenwerte [AKL] | Klassenwerte [RKL] | Systemzustand |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------|--------------------|--------------------|---------------|
| M1           | 1,5                      | 21065                    | 6294                      | MP      | m                  | m                  | 0             |
| M2           | 1,4                      | 20739                    | 6144                      | MP      | m                  | m                  | 3             |
| M3           | 1,4                      | 20577                    | 6137                      | MP      | m                  | m                  | 5             |
| M4           | 1,4                      | 20432                    | 6046                      | MP      | m                  | m                  | 6             |
| M5           | 0,4                      | 13364                    | 2877                      | MP      | u                  | o                  | 3             |
| M6           | 0,4                      | 13206                    | 2856                      | MP      | u                  | o                  | 4             |
| M7           | 0,4                      | 12738                    | 2787                      | MP      | u                  | o                  | 6             |
| M8           | 2,6                      | 25799                    | 8698                      | glatt   | m                  | m                  | 6             |
| M9           | 0,8                      | 17561                    | 3006                      | glatt   | u                  | o                  | 6             |
| M10          | 1,5                      | 15481                    | 4035                      | rau     | m                  | m                  | 6             |
| M11          | 0,5                      | 9893                     | 1940                      | rau     | u                  | o                  | 4             |
| M12          | 0,5                      | 10006                    | 1955                      | rau     | u                  | o                  | 3             |
| M13          | 3,9                      | 22442                    | 8865                      | rau     | o                  | u                  | 6             |

Zur Berechnung der *Fracht\** [m<sup>3</sup>] wurde auf Basis der aufgezeichneten Murgangganglinien eine Murgangsdauer von 26 Minuten festgelegt.

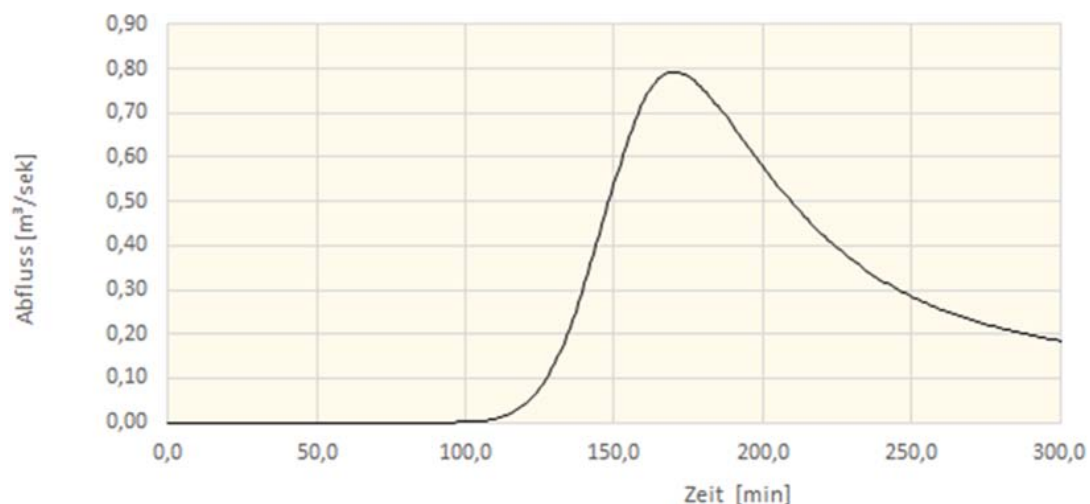
Der Systemzustand variiert von 0 (normale Vorfeuchte-Bedingungen) – 6 (trockenes Einzugsgebiet vor dem Regenereignis). Negative Werte wurden aufgrund der geringen Niederschläge vor dem Ereignis ausgeschlossen.

### Festgelegte Spitzenabflüsse

Aus den 13 Modellierungen wurden drei Modellierungen (M5; M6; M7) ausgewählt, welche sich einer Fracht von 2500 ± 500 (20 %) m<sup>3</sup> nähern. Der Spitzenabfluss, welcher bei diesen Modellierungen errechnet wurde, beträgt 0,4 m<sup>3</sup>/s. Addiert man einen Basisabfluss von 0,5 m<sup>3</sup>/s, so erhält man einen **Gesamt-Spitzenabfluss von 0,9 m<sup>3</sup>/s**.

### 7.1.3.2 Methode 2

Auf Basis des plausibilisierten Modells wurden mit den effektiven Niederschlägen (siehe Anhang 2) die Reinwasserganglinien des Ereignisses nachgerechnet:



**Abbildung 7.5: Modellierter Reinwasser-Ganglinie für das Ereignis 2014 mit Methode 2.**

Der generierte Abfluss aus den EZG für das Ereignis 2014 beträgt 0,8 m³/s; addiert man einen Basisabfluss von 0,5 m³/s, so ergibt sich ein **Spitzenabfluss von 1,3 m³/s**.

### 7.1.3.3 Methode 3

Unter Verwendung der in Tabelle 6.4 berechneten Wasserfrachten und der festgelegten Murgangsdauer aus der gemessenen Ganglinie konnte folgender maximaler Reinwasserabfluss berechnet werden:

**Tabelle 7.9: Berechneter Reinwasser-Spitzenabfluss für das Ereignis 2014.**

| Murgang | Wasserfracht ( $V_W$ )<br>[m³] | Dauer des Murgangs ( $t_{\text{Murgang}}$ )<br>[s] | Errechneter Reinwasserspitzenabfluss ( $Q_W$ )<br>[m³/s] |
|---------|--------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 2014    | 2500                           | 1560 (26minx60)                                    | 3,2                                                      |

### 7.1.4 Methodenübersicht und Berechnung der Murgangsintensitätsfaktoren

In der folgenden Tabelle werden die berechneten Reinwasser-Spitzenabflüsse der drei unterschiedlichen Methoden dargestellt und verglichen:

**Tabelle 7.10: Überblick und Vergleich der drei angewandten Methoden.**

| Murgang | Anzahl der Schübe | Murgang-Spitzenabfluss<br>[m³/s] | Reinwasser-Spitzenabfluss [m³/s] |         |            |           |           |
|---------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------|------------|-----------|-----------|
|         |                   |                                  | Methode 1                        |         |            | Methode 2 | Methode 3 |
|         |                   |                                  | Minimum                          | Maximum | Mittelwert |           |           |
| 2011    | 3                 | 11                               | 0,6                              |         |            | 0,5       | 0,5       |
| 2013    | 1                 | 80-90                            | 0,9                              | 2,1     | 1,4        | 0,9       | 3,3       |
| 2014    | 4                 | 37,8                             | 0,9                              |         |            | 1,3       | 3,2       |

Aus den Reinwasser-Spitzenabflüssen aus Tabelle 7.10 wurden zur weiteren Berechnung jeweils das Minimum, das Maximum und der Mittelwert bestimmt. Mit dieser Vorgehensweise sind die Ergebnisse der einzelnen Methoden gleich gewichtet. Zudem ist die Berechnung der oberen und unteren Grenze möglich.

**Tabelle 7.11: Berechneter Minimal-, Maximal- und Mittelwert.**

| Murgang | Murgang-Spitzenabfluss<br>[m³/s] | Reinwasser-Spitzenabfluss<br>[m³/s] |         |            |
|---------|----------------------------------|-------------------------------------|---------|------------|
|         |                                  | Minimum                             | Maximum | Mittelwert |
| 2011    | 11                               | 0,50                                | 0,60    | 0,53       |
| 2013    | 80-90                            | 0,90                                | 3,30    | 1,87       |
| 2014    | 37,8                             | 0,90                                | 3,20    | 1,80       |

#### 7.1.4.1 Berechnung der Murgangsintensitätsfaktoren

Durch Division des Murgang-Spitzenabflusses durch den Reinwasser-Spitzenabfluss ergeben sich folgende Murgangsintensitätsfaktoren:

Tabelle 7.12: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren für die Murgänge 2011, 2013 und 2014.

| Murgang | Murgangsintensitätsfaktor<br>[-] |         |            |
|---------|----------------------------------|---------|------------|
|         | Minimum                          | Maximum | Mittelwert |
| 2011    | 18                               | 22      | 21         |
| 2013    | 24-27                            | 89-100  | 45 (42-48) |
| 2014    | 12                               | 42      | 21         |

Anmerkungen zu Tabelle 7.12:

- Die Murgangsintensitätsfaktoren wurden auf ganze Zahlen gerundet.
- Der Mittelwert von 45 für den Murgang 2013 wurde als Mittelwert zwischen den Murgangsintensitätsfaktor 42 und 48 berechnet.

#### 7.1.4.2 Beschreibung der Ergebnisse

**Murgang 2011:** Der berechnete Murgangsintensitätsfaktor schwankt zwischen 18-22 und hat somit eine relativ kleine Bandbreite. Der Mittelwert ergibt einen Murgangsintensitätsfaktor von 21.

**Murgang 2013:** Der Murgangsintensitätsfaktor ergibt aufgrund der Schwankung des Reinwasser-Spitzenabflusses sowie des Murgang-Spitzenabflusses eine enorme Bandbreite (24-100) mit einem arithmetischen Mittel von 50.

**Murgang 2014:** Der Murgangsintensitätsfaktor für den Murgang im Jahr 2014 liegt zwischen 12-42. Der Murgangsintensitätsfaktor, berechnet aus den gemittelten Reinwasser-Spitzenabflüssen der drei unterschiedlichen Methoden beträgt 21.

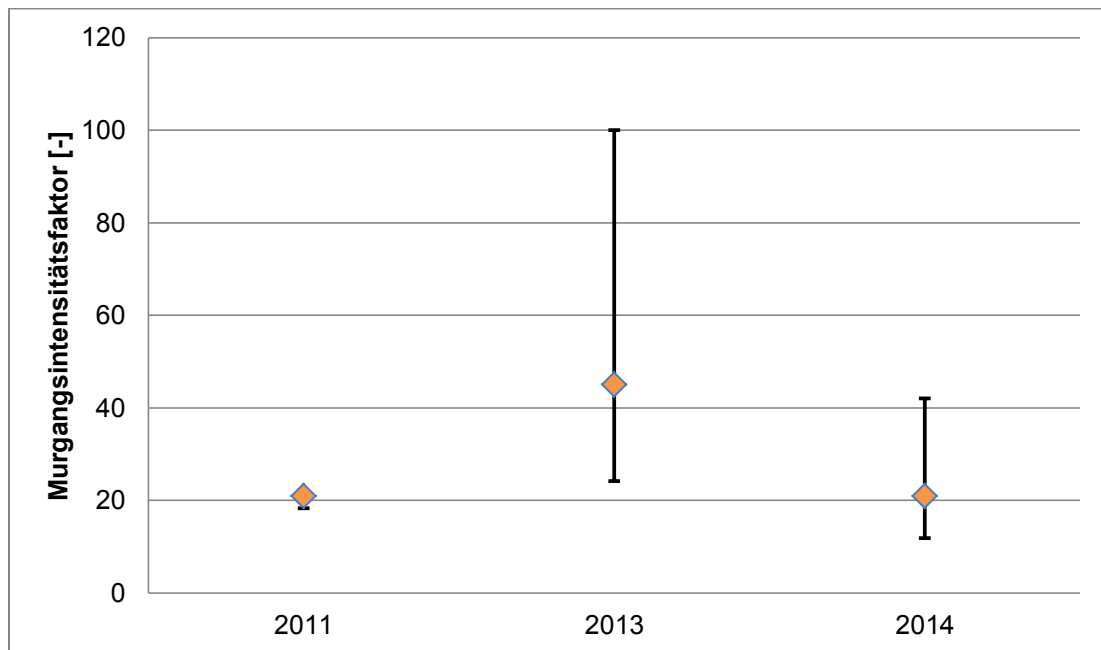


Abbildung 7.6: Graphische Darstellung der berechneten Murgangsintensitätsfaktoren mit den dazugehörigen Fehlerbalken.

## 7.2 Auswertung Literaturdaten

Im folgenden Kapitel werden die Datengrundlagen, welche die Basis zur Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren bilden, aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und dargestellt.

### 7.2.1 Ausgangsdaten

Zimmermann und Rickenmann, 1992 untersuchten nach den starken Unwettern im Jahr 1987 und 1990 in der Schweiz mehrere Murgänge und bestimmten neben anderen Parametern auch den Maximalabfluss der Murgänge. Den Maximalabfluss berechneten die Autoren dabei als Produkt der Fließgeschwindigkeit und des geschätzten Abflussquerschnittes (Schlammspuren). Der maximale Reinwasserabfluss wurde anhand Niederschlagsintensitäten und Abflusskoeffizienten grob bestimmt und mittels Auswertung von Fotos auf die Plausibilität geprüft (Zimmermann und Rickenmann, 1992):

| Murgangereignis,<br>Datum:                                 | Val Varuna<br>18.7.87 |      | Val da Plaunca<br>18.7.87 |      | Val Zavrágia<br>18.7.87 |      | Minstigertal<br>24.8.87 |     |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|------|---------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|-----|
|                                                            | Wert                  | DQ   | Wert                      | DQ   | Wert                    | DQ   | Wert                    | DQ  |
| Murenfracht [m <sup>3</sup> ]                              | 200'000               | **** | 250'000                   | **** | 30'000                  | **   | 30'000                  | *** |
| Max. Fließgeschwindigkeit<br>am Kegelhals [m/s]            | 8                     | **   | 10                        | *    | 8                       | ***  | 14                      | **  |
| Abflusstiefe am<br>Kegelhals [m]                           | 6                     | ***  | ?                         |      | 6                       | **** | 10                      | *** |
| Maximalabfluss [m <sup>3</sup> /s]                         | 400-800               | **   | 400-900                   | *    | 500-700                 | **** | 150-250                 | *** |
| Abflussspitze Reinwasser,<br>geschätzt [m <sup>3</sup> /s] | 7                     | *    | 9                         | *    | 30                      | **   | 17                      | **  |
| Anzahl Schübe                                              | ca. 10                | **   | >5                        | *    | <=6                     | **   | 1                       | *** |
| Max. Fracht pro Schub [m <sup>3</sup> ]                    | 50'000                | **   | 80'000                    | **   | <30'000                 | **   | <30'000                 | *** |
| Max. Erosionstiefe [m]                                     | 11                    | **** | 12                        | **** | 2                       | **   | 4                       | **  |
| Max. Erosionsquerschnitt [m <sup>2</sup> ]                 | 650                   | **** | 550                       | **** | 20                      | **   | 55                      | **  |
| Historische<br>Ereignisse                                  | ca. 10<br>in 150 J.   | **** | keine<br>bekannt          | ***  | ca. 7<br>in 150 J.      | ***  | unsicher,<br>unbekannt  | *   |

Legende: DQ = Datenqualität: \*\*\*\* = sehr gut, \*\*\* = zuverlässig, \*\* = grobe Schätzung,  
\* = sehr grobe Schätzung/unsichere Spuren

**Abbildung 7.7: Typische Murgangsparameter der größten Ereignisse im Sommer 1987 in der Schweiz (aus Zimmermann und Rickenmann, 1992).**

Wie in Tabelle 7.13 ersichtlich, schwanken die Murgangsintensitätsfaktoren in einer Größenordnung von 9-114. Dabei stellt der Faktor 114 das Maximum dar.

**Tabelle 7.13: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren auf der Datenbasis von Zimmermann und Rickenmann, 1992.**

| Ereignis       | Maximalabfluss<br>Murgang<br>[m³/s] | Abflussspitze<br>Reinwasser<br>geschätzt [m³/s] | Murgangsintensitätsfaktor<br>[-] |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|
| Val Varuna     | 400                                 | 7                                               | <b>57</b>                        |
| Val Varuna     | 800                                 | 7                                               | <b>114</b>                       |
| Val da Plaunca | 400                                 | 9                                               | <b>44</b>                        |
| Val da Plaunca | 900                                 | 9                                               | <b>100</b>                       |
| Val Zavrugia   | 500                                 | 30                                              | <b>17</b>                        |
| Val Zavrugia   | 700                                 | 30                                              | <b>23</b>                        |
| Minstigertal   | 150                                 | 17                                              | <b>9</b>                         |
| Minstigertal   | 250                                 | 17                                              | <b>15</b>                        |

Weiters beschreibt Rickenmann et al., 2003 diverse Murexperimente im Testgebiet „Chemolgan“ in Kazachstan (vgl. Abbildung 7.8). Dabei wurden kontrollierte Wassermengen durch ein steiles, erodierbares Gerinne abgelassen und mehrere Murparameter, darunter auch der Maximalabfluss, gemessen (Rickenmann et al., 2003). Der so gemessene Maximalabfluss des Murgangs kann mit dem, zum Murgang geführten Reinwasser-Spitzenabfluss verglichen werden.

|                                                                                                 |        |                  |                    |                     |              |        |             |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|--------------------|---------------------|--------------|--------|-------------|---------|
| Year of experiment                                                                              | 1972   | 1973             | 1973a              | 1973b               | 1975         | 1976   | 1978        | 1991    |
| Month/day                                                                                       | 08/27  | 08/22            |                    |                     | 08/19        | 09/08  | 09/09       | 09/12   |
| <i>Lake outflow</i>                                                                             |        |                  |                    |                     |              |        |             |         |
| No. of waves                                                                                    | 1      | 3                | part 1:<br>28 min. | part 2:<br>210 min. | 2            | 1      | 1           | 1       |
| Peak water discharge, $Q_{p,w}$ [m³/s]                                                          | 16     | 16 / 16<br>/ 12  |                    | 2                   | 28 / 16      | 5      | 9           | 22      |
| Water volume, $V_w$ [m³]                                                                        | 11,800 | 40,600           | 15,000             | 25,600              | 15,030       | 12,000 | 3,600       | 28,000  |
| <i>Net erosion</i>                                                                              |        |                  |                    |                     |              |        |             |         |
| Erosion volume of solids (without pore space), $V_E$ [m³], passing no. 32                       | 19,800 | 71,300           |                    |                     | 45,000       | 11,466 | 9000        |         |
| Erosion volume of solids (without pore space), $V_E$ [m³], passing no. 42                       | 26,200 | 83,500           | 42,000             | 41,500              | 49,500       | 9000   | 12,300      | 127,000 |
| Water volume including entrained soil moisture [m³] (at no. 42)                                 | 15,600 | 52,600           | 20600              | 32,000              | 22,000       | 13,300 | 5400        | 46,000  |
| <i>Debris flow characteristics</i>                                                              |        |                  |                    |                     |              |        |             |         |
| Peak debris-flow discharge, $Q_{p,DF}$ [m³/s]                                                   | 100    | 100 /<br>80 / 75 |                    |                     | 430 /<br>320 | 45     | 130 /<br>40 | 190     |
| Mixture volume [m³] (at no. 42)                                                                 | 41,800 | 136,100          | 63,300             | 72,800              | 71,500       | 22,300 | 17,700      | 173,000 |
| Mean volume concentration of solids (incl. moisture, at no. 42), $C_s$                          | 0.63   | 0.61             | 0.66               | 0.57                | 0.69         | 0.40   | 0.69        | 0.73    |
| Ratio of mean solid volume concentration to natural packing density of soil material, $C_s/C^*$ | 0.77   | 0.75             | 0.81               | 0.70                | 0.85         | 0.49   | 0.85        | 0.90    |

**Abbildung 7.8: Parameter der Murgang-Experimente in Testgebiet Chemolgan/Kazachstan (aus Rickenmann et al., 2003).**

Die mit diesen Eingangsdaten berechneten Murgangsintensitätsfaktoren sind in Tabelle 7.14 dargestellt. Auffällig ist dabei, dass sie eine geringe Schwankung (4-20) aufweisen und generell niedriger als die zuvor berechneten Werte sind.

**Tabelle 7.14: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren auf Basis der Daten von Rickenmann et al., 2003.**

| Ereignis       | Maximalabfluss Murgang [m³/s] | Abflussspitze Reinwasser geschätzt [m³/s] | Murgangsintensitätsfaktor [-] |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
| Chemolgan 1972 | 100                           | 16                                        | 6                             |
| Chemolgan 1973 | 100                           | 16                                        | 6                             |
| Chemolgan 1973 | 80                            | 16                                        | 5                             |
| Chemolgan 1973 | 75                            | 12                                        | 6                             |
| Chemolgan 1975 | 430                           | 28                                        | 15                            |
| Chemolgan 1975 | 320                           | 16                                        | 20                            |
| Chemolgan 1976 | 45                            | 5                                         | 9                             |
| Chemolgan 1978 | 130                           | 9                                         | 14                            |
| Chemolgan 1978 | 40                            | 9                                         | 4                             |
| Chemolgan 1991 | 190                           | 22                                        | 9                             |

Ähnliche Experimente führte König, 2006 im Rahmen seiner Diplomarbeit am Schesatobel durch. Dabei wurden kontrollierte Wassermassen aus einem künstlich angelegten See in ein Gerinne abgelassen und so künstliche Murgänge erzeugt. Die Auswertungen dieser Messungen sind in Tabelle 7.15 dargestellt.

**Tabelle 7.15: Auswertung der Messungen am Schesatobel (Vorarlberg).**

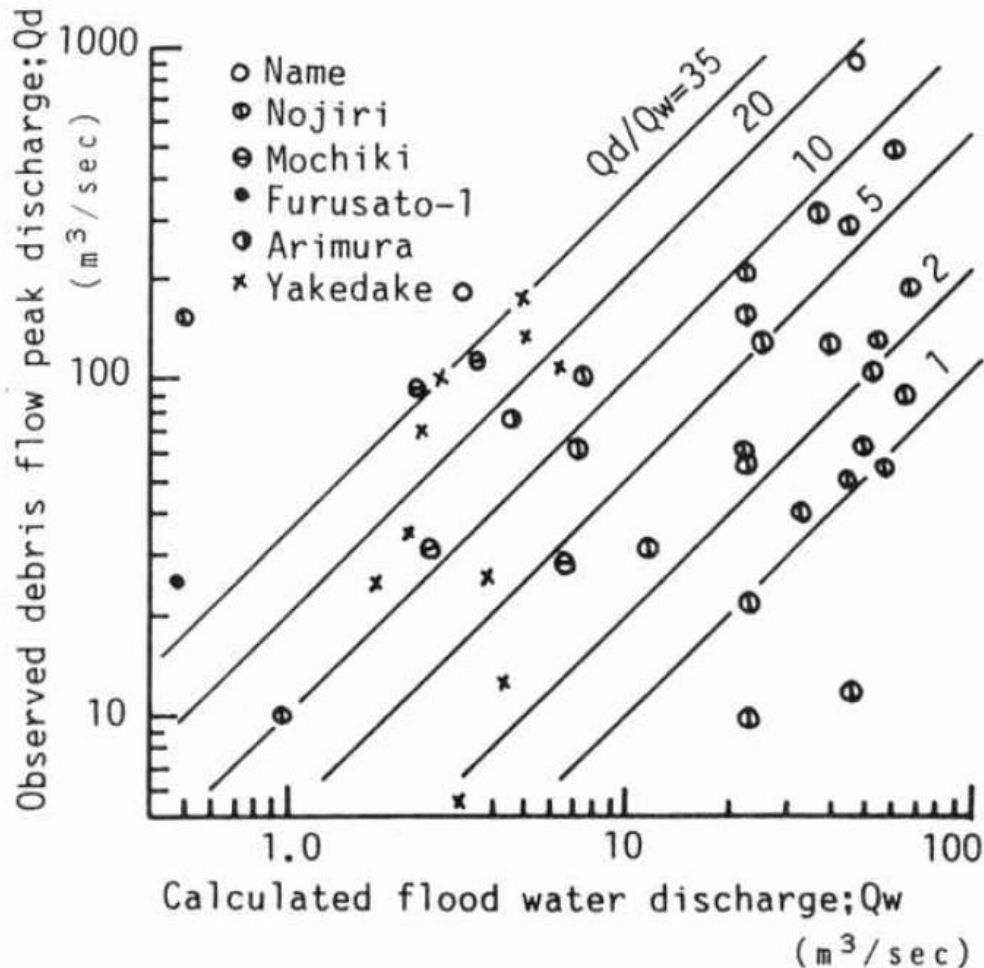
| Ereignis         | Maximalabfluss Murgang [m³/s] | Abflussspitze Reinwasser geschätzt [m³/s] | Murgangsintensitätsfaktor [-] |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
| Schesatobel 2006 | 6                             | 0,8                                       | 8                             |
| Schesatobel 2006 | 5                             | 0,8                                       | 6                             |
| Schesatobel 2006 | 8                             | 1                                         | 8                             |

Hübl, 2009 beschreibt für das Einzugsgebiet des Lattenbaches in Tirol kurzzeitige Abflussspitzen von 200-350 m³/s bei einem Reinwasserabfluss von etwa 5 m³/s. Beim Ereignis im Einzugsgebiet des Wartschenbaches am 16. August 1997 konnte ein maximaler Abfluss von etwa 105 m³/s mit einem theoretischen Reinwasserabfluss von ca. 13 m³/s beobachtet werden (Hübl, s.a.). Die daraus berechneten Murgangsintensitätsfaktoren sind in Tabelle 7.16 dargestellt und schwanken von 8-70.

**Tabelle 7.16: Murgangsintensitätsfaktoren basierend auf der Datengrundlage von Hübl, 2009 und Hübl, s.a.**

| Ereignis      | Maximalabfluss Murgang [m³/s] | Abflussspitze Reinwasser geschätzt [m³/s] | Murgangsintensitätsfaktor [-] |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
| Lattenbach    | 200                           | 5                                         | 40                            |
| Lattenbach    | 350                           | 5                                         | 70                            |
| Wartschenbach | 105                           | 13                                        | 8                             |

Mizuyama et al., 1992 untersuchte in China mehrere Murgänge, wobei er auch die Spitzenabflüsse der Murgänge anhand Anschlagmarken und die korrespondierenden Hochwasserabflüssen mittels einer rationellen Gleichung, basierend auf den Regendaten, berechnete. Wie in Abbildung 7.9 dargestellt, reichen die Murgangsintensitätsfaktoren von  $<1$  bis hin zu einer Größenordnung von 35 und mehr. Nach Mizuyama et al., 1992 sind solche hohe Faktoren darauf zurückzuführen, dass Rutschungen in das Gerinne rutschen und der Ausbruch von rutschungsinduzierten Dämmen zu solch hohen Faktoren führt.



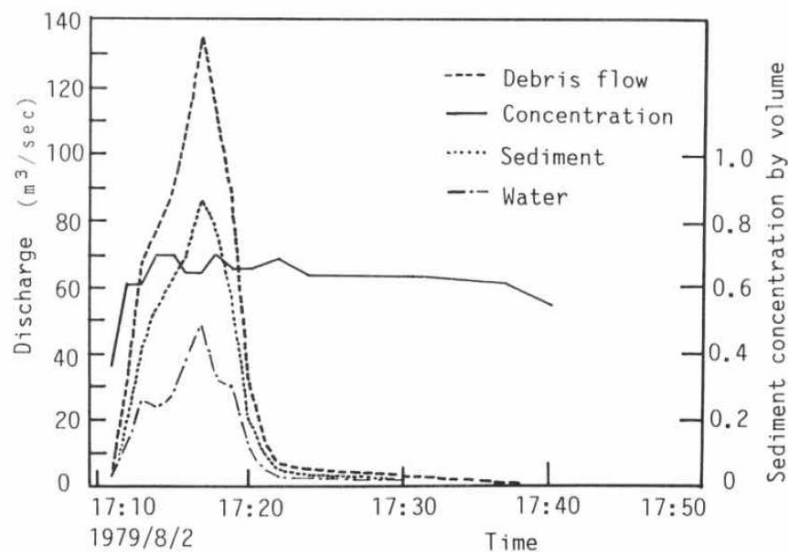
**Abbildung 7.9: Murgangsintensitätsfaktoren nach Mizuyama et al., 1992.**

Mizuyama et al., 1992 zeigt allerdings auch die Grenzen der sog. hydrologischen Methode auf. So schränkt er die Anwendbarkeit der Methode auf Murgänge ein, welche durch permanente Erosion und Sedimentaufnahme in einem Gerinne entstehen. Die Ganglinien eines rutschungsinduzierten Murgangs können durch die hydrologische Methode nur begrenzt dargestellt werden (Mizuyama et al., 1992).

Weiters konnte auf Grundlage eines Murgangs-Hydrographen und der dazugehörigen Reinwasser-Abflussganglinie ein zusätzlicher Murgangsintensitätsfaktor bestimmt werden (Mizuyama et al., 1992):

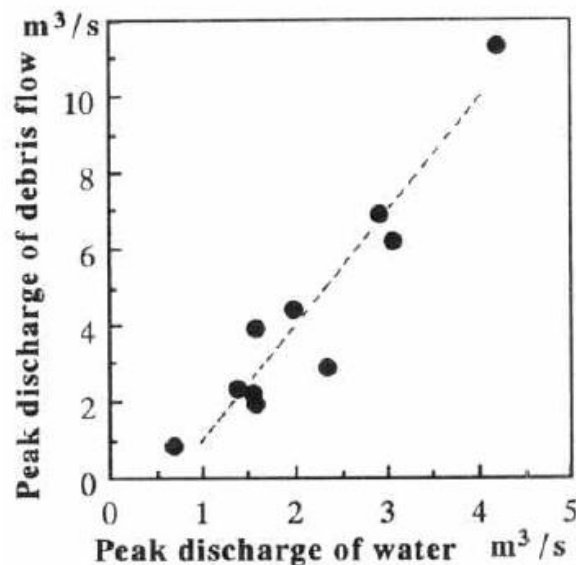
**Tabelle 7.17: Maximalabflüsse und Murgangsintensitätsfaktoren aus dem Hunshui Gully, China.**

| Ereignis      | Maximalabfluss<br>Murgang<br>[m <sup>3</sup> /s] | Abflussspitze<br>Reinwasser<br>geschätzt [m <sup>3</sup> /s] | Murgangsintensitätsfaktor<br>[-] |
|---------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Hunshui Gully | 135                                              | 49                                                           | 2,8                              |



**Abbildung 7.10: Ganglinie des Murganges und der dazugehörigen Reinwasser-Ganglinie aus dem Hunshui Gully, China (aus Mizuyama et al., 1992).**

Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996) beschreibt, dass das Verhältnis zwischen Maximalabfluss des Murganges und Maximalabfluss des Hochwassers kleiner wie 10 ist (vgl. Abbildung 7.11).



**Abbildung 7.11: Beziehungen zwischen dem beobachteten Spitzenabfluss der Muren und der geschätzten Hochwasser (aus Ou et al., 1991 zit. in Tsuchiya et al., 1996).**

Auch Chen et al., 2007 berechnete Murgangsintensitätsfaktoren für die Murgänge im Midui Gully. Dabei wurde der Tonanteil des Murganges an verschiedenen Stellen entlang des Ge-

rinnes gemessen und somit die Dichte des Murganges und der Murgangsintensitätsfaktor berechnet. Die so ermittelten Murgangsintensitätsfaktoren liegen je nach Tonanteil und Dichte des Murganges zwischen 1,56 und 2,07. [ $Q_W = 1175 \text{ m}^3/\text{s}$  /  $Q_M = 2472,8 \text{ m}^3/\text{s}$  – Moränen-dammbruch].

Kanji et al., s.a. beschreiben in ihrer Arbeit einen Murgang im „Main Tributary of Pedras Stream at the Petrobras Refinery“ vom 9. März 1996 mit einem berechneten Murgangabfluss von  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  mit einem Hochwasserabfluss von  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Daraus errechnet sich ein Murgangsintensitätsfaktor von 22,5 (vgl. Tabelle 7.18).

**Tabelle 7.18: Murgangsintensitätsfaktoren für zwei verschiedene Gerinne.**

| Ereignis                           | Maximalabfluss<br>Murgang<br>[ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | Abflussspitze<br>Reinwasser<br>geschätzt [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | Murgangsintensitätsfaktor<br>[-] |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Midui Gully                        | 2472,8*                                                | 1175*                                                              | 2,1                              |
| Main Tributary of<br>Pedras Stream | 90                                                     | 4                                                                  | 22,5                             |

\* = Abflussspitzen infolge eines Dammbruchs.

Die Auswertung der Daten von Murgängen, welche von Wei et al., in. prep. erhoben wurden, ergaben Murgangsintensitätsfaktoren in einer Größenordnung zwischen 5 und 10 (vergleiche dazu Tabelle 7.19).

**Tabelle 7.19: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren auf Basis der Daten von Wei et al., in. prep. für unterschiedliche Murgänge.**

| Ereignis  | Maximalabfluss<br>Murgang<br>[ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | Abflussspitze<br>Reinwasser<br>geschätzt [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | Murgangsintensitätsfaktor<br>[-] |
|-----------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Bayi      | 657                                                    | 90,8                                                               | 7                                |
| Dagan     | 321                                                    | 38,5                                                               | 8                                |
| Xiaogan   | 504                                                    | 60,5                                                               | 8                                |
| Xiaowan   | 277                                                    | 27,2                                                               | 10                               |
| Yangjia   | 1097                                                   | 210,2                                                              | 5                                |
| Gangouzi  | 802                                                    | 82                                                                 | 10                               |
| Huangnidi | 983                                                    | 138                                                                | 7                                |
| Guanmen   | 613                                                    | 117                                                                | 5                                |
| Xijia     | 334,3                                                  | 38,8                                                               | 9                                |
| Huashiban | 266                                                    | 35                                                                 | 8                                |

Am 21. Juli 2012 ereignete sich in St. Lorenzen (Steiermark) ein großer und außergewöhnlicher Murgang (Janu et al., s.a.). Aus der durchgeführten Ereignisdokumentation gehen folgende Daten hervor:

Der Abfluss blieb vom 20. Juli 2012 – 15:00 Uhr bis zum Murgang am 21. Juli 2012 – 04:05 Uhr bei nahezu gleichbleibenden Niederschlägen konstant bei ca.  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Am 21. Juli 2012 – 04:05 Uhr ereignete sich der gewaltige Murgang mit einem Spitzenabfluss von ca.  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Dauer von lediglich 1,5 Minuten (vgl. Abbildung 7.12).

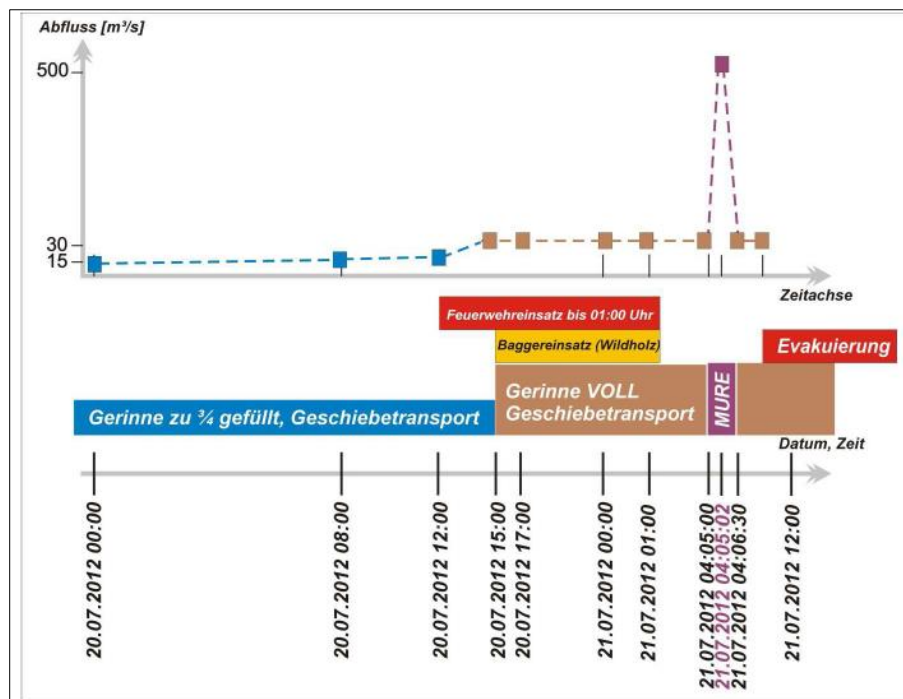


Abbildung 7.12: Rekonstruierte Ganglinie vom Murgang am Lorenzerbach am 21. Juli 2012 (Janu et al., s.a.).

Unter Verwendung der oben beschriebenen Abflussdaten errechnet sich für den Murgang am Lorenzerbach (Paltental-Steiermark) ein Murgangsintensitätsfaktor von 16,7:

Tabelle 7.20: Berechneter Murgangsintensitätsfaktor für das Ereignis am Lorenzerbach 2012.

| Ereignis     | Maximalabfluss Murgang [m³/s] | Abflussspitze Reinwasser geschätzt [m³/s] | Murgangsintensitätsfaktor [-] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
| Lorenzerbach | 500                           | 30                                        | 16,7                          |

Weitere umfangreiche Untersuchungen führten Chen und Chuang, 2014 durch, indem sie für drei Murgänge in Taiwan ebenfalls Murgangsintensitätsfaktoren berechneten und diese anschließend mit Literaturdaten verglichen.

Chen und Chuang, 2014 berechneten für Murgänge in drei verschiedenen Gerinnen folgende Murgangsintensitätsfaktoren:

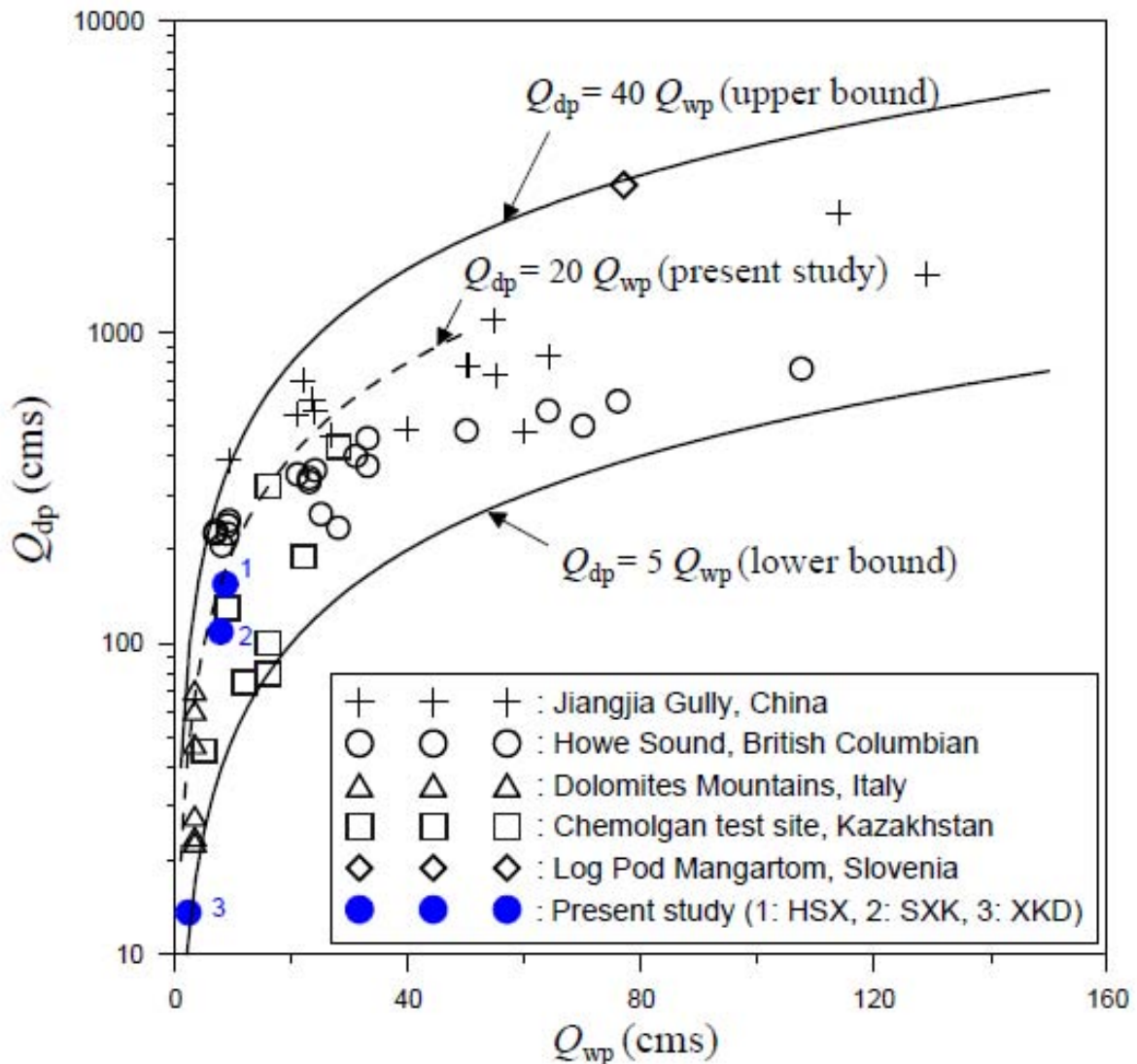
Tabelle 7.21: Auswertungen der Messungen von Chen und Chuang, 2014.

| Ereignis  | Maximalabfluss Murgang [m³/s] | Abflussspitze Reinwasser geschätzt [m³/s] | Murgangsintensitätsfaktor [-] |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
| XKD Gully | 11,4                          | 1,9                                       | 6                             |
| HSX Gully | 109,2                         | 7,8                                       | 14                            |
| SXK Gully | 122,4                         | 6,8                                       | 18                            |

- **XKD Gully:** 6 [Bandbreite: 4-7]
- **HSX Gully:** 14 [Bandbreite: 11-18]
- **SXK Gully:** 18 [Bandbreite: 16-23]

Zusätzlich versuchten Chen und Chuang, 2014 in ihrer Arbeit bereits bekannte Murgangsintensitätsfaktoren mit den Werte aus den eigenen Berechnungen zu vergleichen und konnten dabei erstmals untere und obere Grenzen beobachten:

- **untere Grenze:** IF = 5
- **obere Grenze:** IF = 40



**Abbildung 7.13: Zusammenhang zwischen dem Maximalabfluss eines Murganges  $Q_{dp}$  und dem Maximalabfluss eines Hochwassers  $Q_{wp}$  (Chen und Chuang, 2014).**

Zusätzlich untersuchten Tubino und Lanzoni, 1993 bei Laborversuchen den Zusammenhang zwischen dem Reinwasserabfluss und dem Sedimentabfluss. Da die Vorgehensweise der Berechnung des Sedimentabflusses jedoch nicht genau nachvollziehbar ist und aus den Ausführungen nicht klar hervorgeht, ob es sich beim Sedimentabfluss um den Sedimentabfluss der Front handelt, wurden die Daten in Zuge dieser Arbeit nicht verwendet.

### 7.2.2 Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren und die daraus resultierenden Unsicherheiten

Mehrere Gründe führen zu Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren:

#### **7.2.2.1 Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses**

Aufgrund begrenzter Messanlagen in Wildbacheinzugsgebieten ist eine direkte Messung von Murgang-Spitzenabflüssen nur bedingt möglich. Durch die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Durchflussfläche und der Geschwindigkeit des Murgangs kommt es selbst bei installierten Messstationen zu Ungenauigkeiten.

#### **7.2.2.2 Bestimmung des Reinwasser-Spitzenabflusses**

Die Bestimmung von Reinwasser-Abflussspitzen, welche von den Niederschlagsereignissen generiert worden wären (sofern es nicht zum Murgang gekommen wäre), ist im Vergleich zur Bestimmung von Murgang-Spitzenabflüssen noch problematischer. Aufgrund des Auftretens des Murganges ist eine direkte Reinwasser-Abflussmessung nicht möglich.

Somit kann der Reinwasser-Spitzenabfluss lediglich nachberechnet werden. Zur plausiblen Nachberechnung werden in der Literatur meist empirische Formeln oder Niederschlags-Abfluss-Modelle verwendet. Um jedoch realistische Werte mit N-A-Modellen berechnen zu können, bedarf es meist einer Kalibrierung mit Messwerten. Die Erfassung von Abfluss-Messwerten in murfähigen Wildbächen ist jedoch zumeist nicht möglich, da die Messstation (gerade bei hochfrequenten Wildbächen) immer wieder von Murgängen zerstört würde. Somit ist die Grundlage zur Plausibilisierung von N-A-Modellen meist sehr spärlich.

Durch die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Reinwasser- und Murgang-Spitzenabflüssen, kommt es somit auch zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren.

#### **7.2.3 Unsicherheiten der berechneten Murgangsintensitätsfaktoren**

Wie in Abbildung 7.6 ersichtlich, schwanken die in dieser Arbeit berechneten Murgangsintensitätsfaktoren teils stark. Aufgrund fehlender Reinwasser-Abflussdaten war eine Kalibrierung des Niederschlag-Abfluss-Modells nicht möglich. Mittels der drei verschiedenen Methoden wurde jedoch versucht den Reinwasser-Spitzenabfluss bestmöglichst zu plausibilisieren.

Aufgrund der Ungenauigkeiten (z.B. Schätzung des Basisabflusses; Berechnung der Murgangs- und Geschiebefrachten) und mehrerer Annahmen (z.B. Niederschlagsverteilung) im Zuge der Berechnungen sind die bestimmten Murgangsintensitätsfaktoren mit Unsicherheiten behaftet, welche bei weiterer Verwendung berücksichtigt werden müssen. Trotz der zahlreichen Ungenauigkeiten und Annahmen ist aber ein Vergleich der Größenordnung mit den Werten aus der Literatur vertretbar.

## 8 Ergebnisse

Die Bandbreite, der in der Literatur beschriebenen Murgangsintensitätsfaktoren schwankt sehr stark (Hübl, 2009; Rickenmann, 2014). So beschreibt zum Beispiel Hübl, s.a. Werte von 3,5-100, abhängig von der Feststoffkonzentration des Murganges. Auch Rickenmann, 2014 beschreibt, dass Murgangabflüsse 10-100 Mal größer sein können als der Spitzenabfluss eines Hochwassers im gleichen Gebiet mit den gleichen Niederschlagsbedingungen.

Im folgenden Kapitel werden die, in den eigenen Berechnungen bestimmten Murgangsintensitätsfaktoren mit denen aus der Literatur zusammengeführt und verglichen. Weiters soll versucht werden, die Bandbreite einzuschränken und mögliche Abhängigkeiten mit typischen Murgangs-Parametern zu finden. Abschließend sollen kurz die Ergebnisse der Auswirkungen unterschiedlicher Murgangsintensitätsfaktoren auf die Ausbreitung alpiner Murgänge graphisch dargestellt werden.

### 8.1 Zusammenführung der im Zuge der eigenen Berechnungen ermittelten Murgangsintensitätsfaktoren mit den Literaturdaten

Die Zusammenführung der Literaturdaten mit den Murgangsintensitätsfaktoren aus den eigenen Berechnungen im Untersuchungsgebiet Gadriabach ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die bestimmten Murgangsintensitätsfaktoren im Bereich der Literaturwerte liegen.

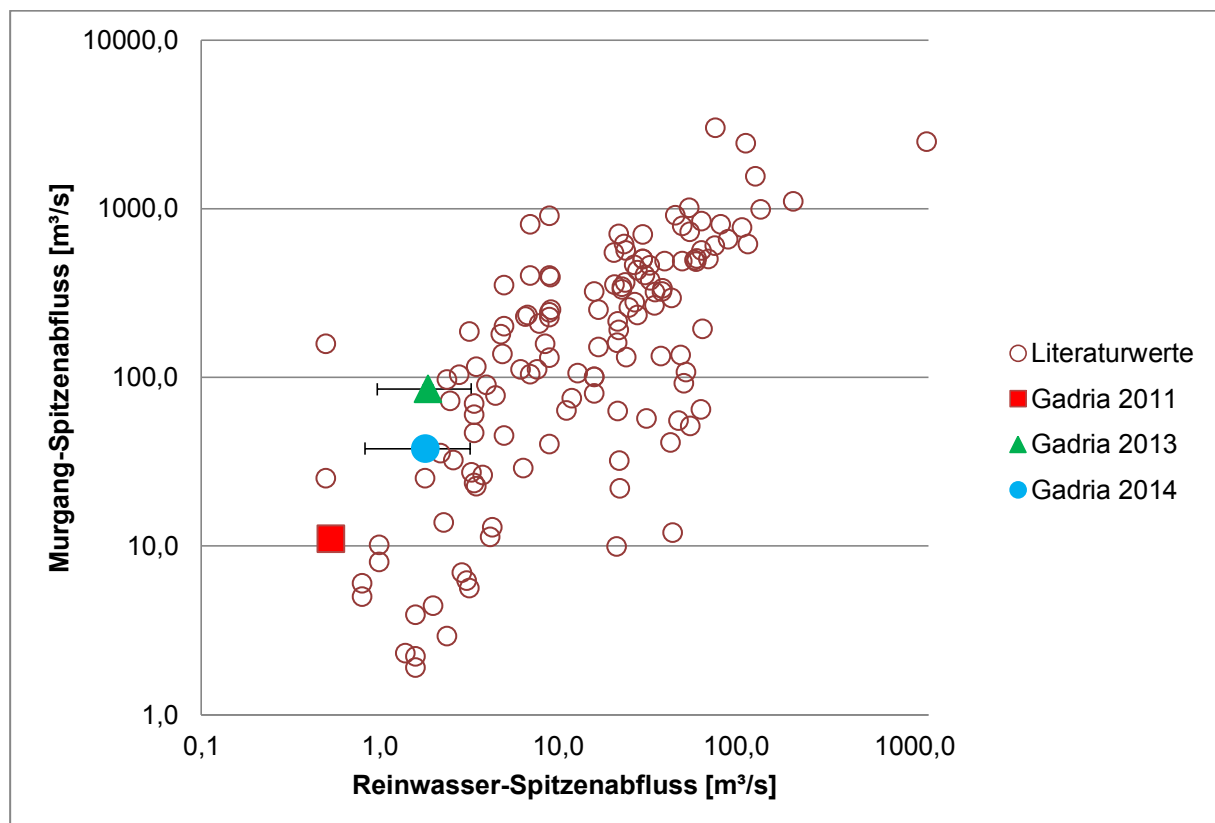


Abbildung 8.1: Vergleich der berechneten Murgangsintensitätsfaktoren (inkl. Fehlerbalken) mit den Werten aus der Literatur.

### 8.1.1 Einschränkung der Daten

Die errechneten Werte von Četina et al., 2006 und Mikoš et al., 2007 für das Ereignis in Log Pod Mangartom (Slowenien) sowie die Daten von VanDine, 1985 im Howe Sound (British Columbia) basieren auf dem Vergleich des Murgang-Spitzenabfluss mit einen 100- bzw. 200-jährlichen Hochwasserereignis. Da jedoch der Murgangsintensitätsfaktor den Spitzenabfluss eines Murganges mit den theoretischen, maximalen Reinwasserabfluss desselben Niederschlagsereignisses vergleicht, können diese Daten für die weiteren Untersuchungen nicht verwendet werden.

Wie in Abbildung 8.2 ersichtlich, weichen die blauen Datenpunkte von den übrigen Literaturwerten teils stark ab. Interessanterweise stammen diese Daten ausschließlich aus dem selben Einzugsgebiet „Nojiri“ (Mizuyama et al., 1992). Fünf der insgesamt 20 Datenpunkte weisen zudem höhere Reinwasser-Spitzenabflüsse wie Murgang-Spitzenabflüsse auf. Da es in der Natur nicht möglich ist, dass der Reinwasser-Spitzenabfluss höher ist wie der korrespondierende Murgang-Spitzenabfluss werden diese Daten als nicht vertrauenswürdig eingestuft und somit für die näheren Untersuchungen nicht berücksichtigt.

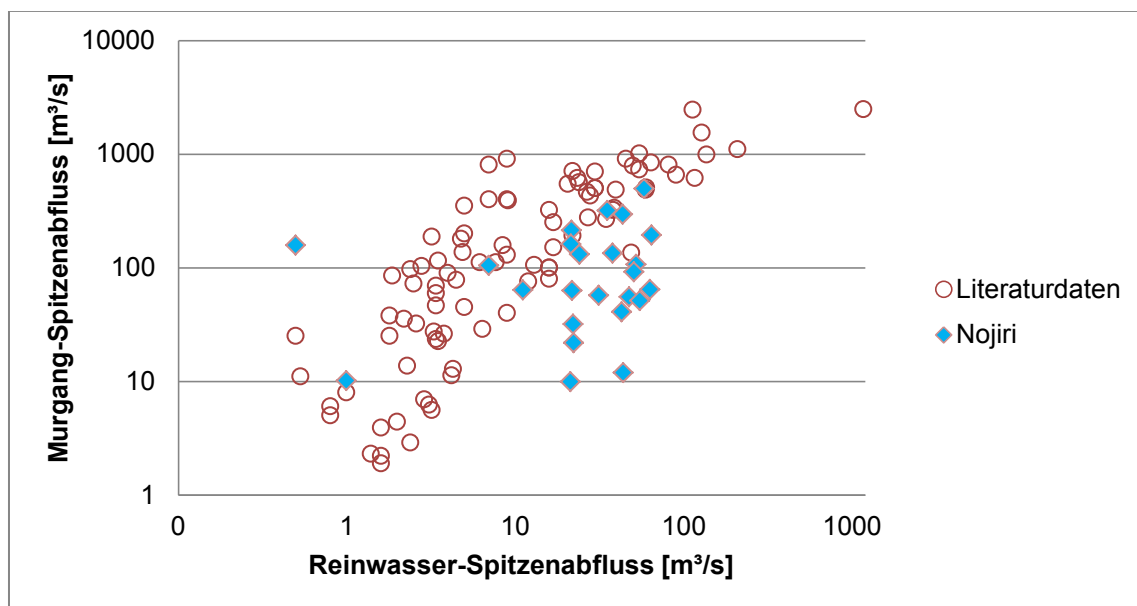


Abbildung 8.2: Vergleich der Literaturdaten mit den Daten aus dem Einzugsgebiet Nojiri (Mizuyama et al., 1992).

## 8.2 Beschreibung der Ergebnisse

Die Datengrundlage besteht somit aus 92 Murgangsintensitätsfaktoren mit einer Bandbreite des Reinwasserabflusses von 0,5-1175 m³/s und der Murgang-Spitzenabflüsse von 0,8-2473 m³/s.

Die Berechnung der Murgangsintensitätsfaktoren ergab eine daraus resultierende Bandbreite von 1-114. Allerdings liegen bereits knapp 58 % der Daten unter einem Murgangsintensitätsfaktor von 15 und sogar ca. 84 % unter einem Wert von 30 (vgl. Abbildung 8.3).

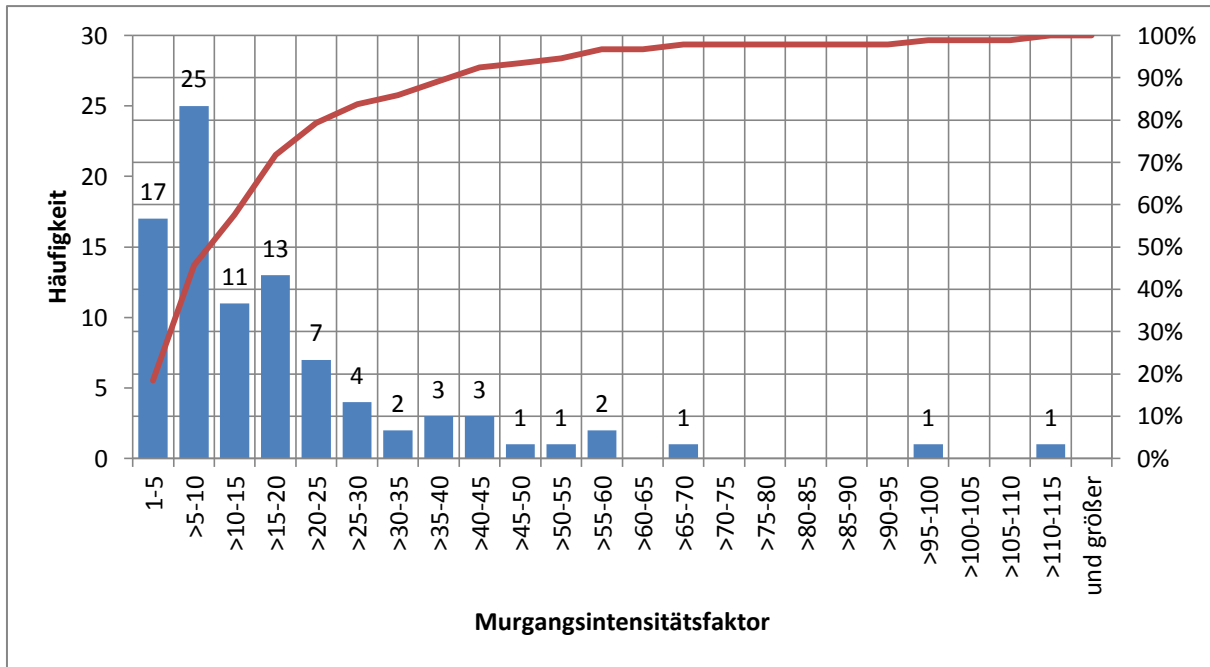


Abbildung 8.3: Verteilung der Murgangsintensitätsfaktoren.

Rickenmann et al., 2003 konnten auf Basis der Daten aus dem Testgebiet „Chemolgan“ einen Zusammenhang zwischen dem Reinwasser-Spitzenabfluss und dem Murgang-Spitzenabfluss herstellen:

$$Q_M = \sim 11 * Q_W$$

Durch die im Zuge dieser Arbeit berechneten Trendlinie mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,7 kann dieser Zusammenhang bestätigt werden (vgl. Abbildung 8.4).

Zusätzlich kann in Abbildung 8.4 beobachtet werden, dass mit zunehmendem Reinwasser-Spitzenabfluss eines Einzugsgebiets auch der Murgang-Spitzenabfluss steigt.

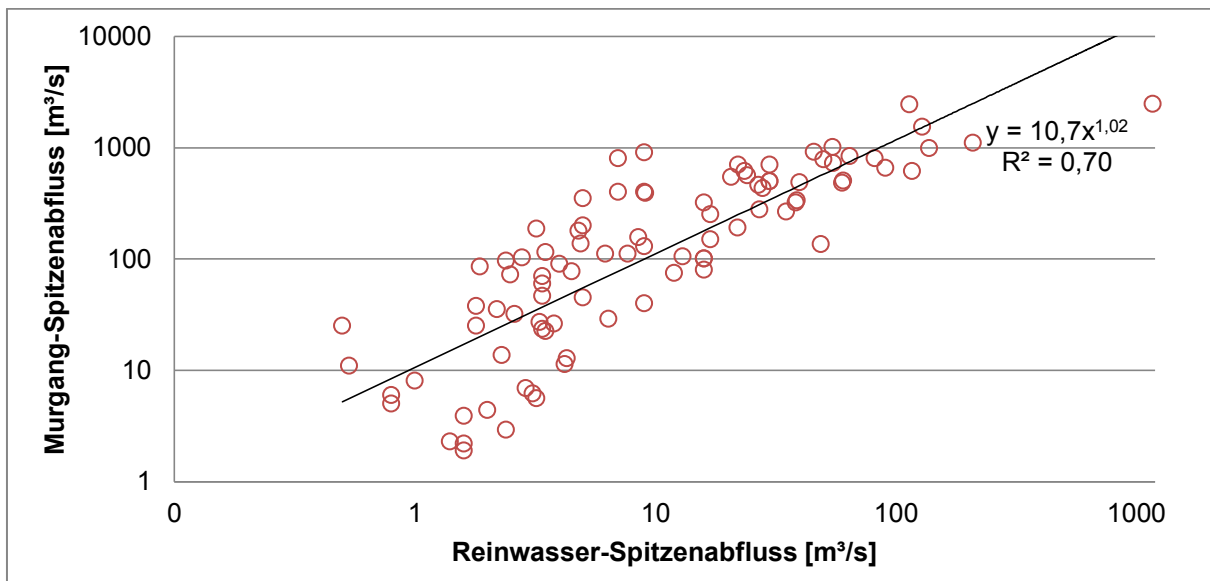


Abbildung 8.4: Doppel-logarithmische Darstellung der Ausgangsdaten und der berechneten Trendlinie.

### 8.2.1 Daten aus den Alpen

Weiters wurden die Daten, welche aus dem Alpenraum stammen, herausgefiltert und getrennt untersucht. Auf einer Datengrundlage von 24 Werten konnte folgende Trendlinie mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,72 bestimmt werden (vgl. Abbildung 8.5):

$$Q_M = 14,7 * Q_W^{1,18}$$

Im Vergleich zur Trendlinie mit den weltweit beobachteten Werten ergibt diese Trendlinie deutlich höhere Murgang-Spitzenabflüsse. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass 10 der 24 Datenpunkte auf grobe Schätzungen von Zimmermann und Rickenmann, 1992 und Hübl, 2009 basieren.

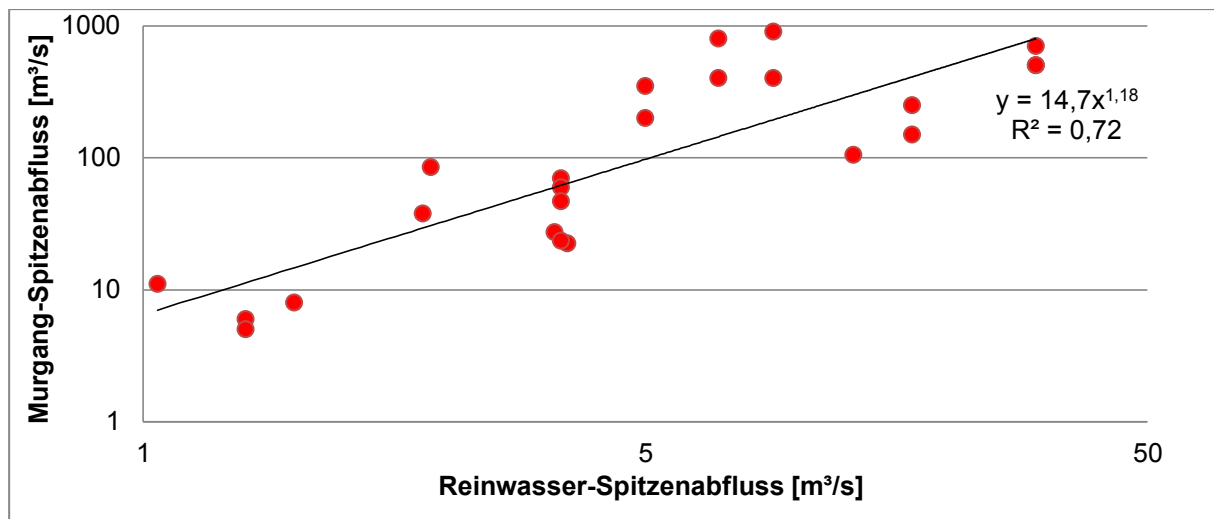


Abbildung 8.5: Datenwerte aus dem Alpenraum und die dazugehörige Trendlinie.

Wie in Abbildung 8.6 ersichtlich, schwanken die Daten in einem Bereich von 5-114, wobei jedoch knapp 71 % der Daten bis einem Murgangsintensitätsfaktor von 25 liegen.

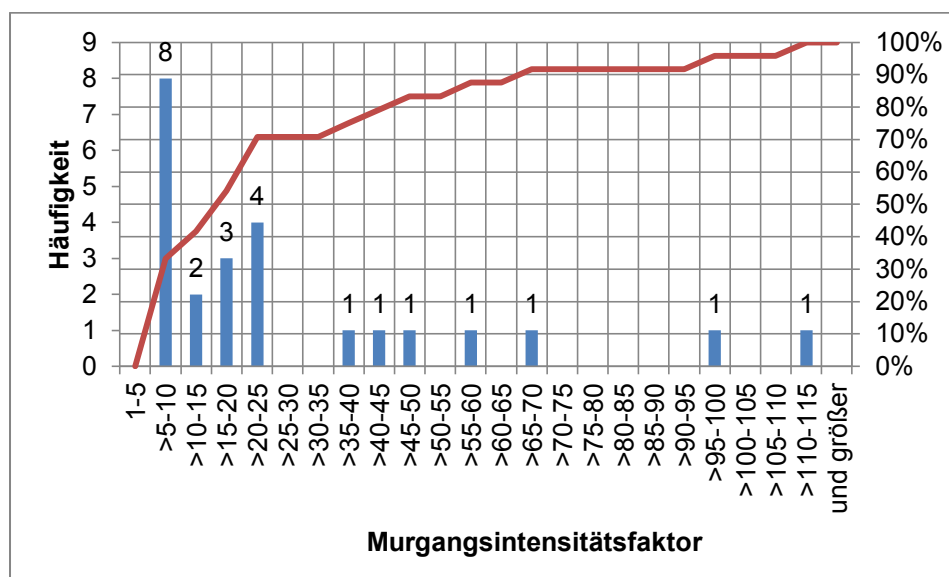


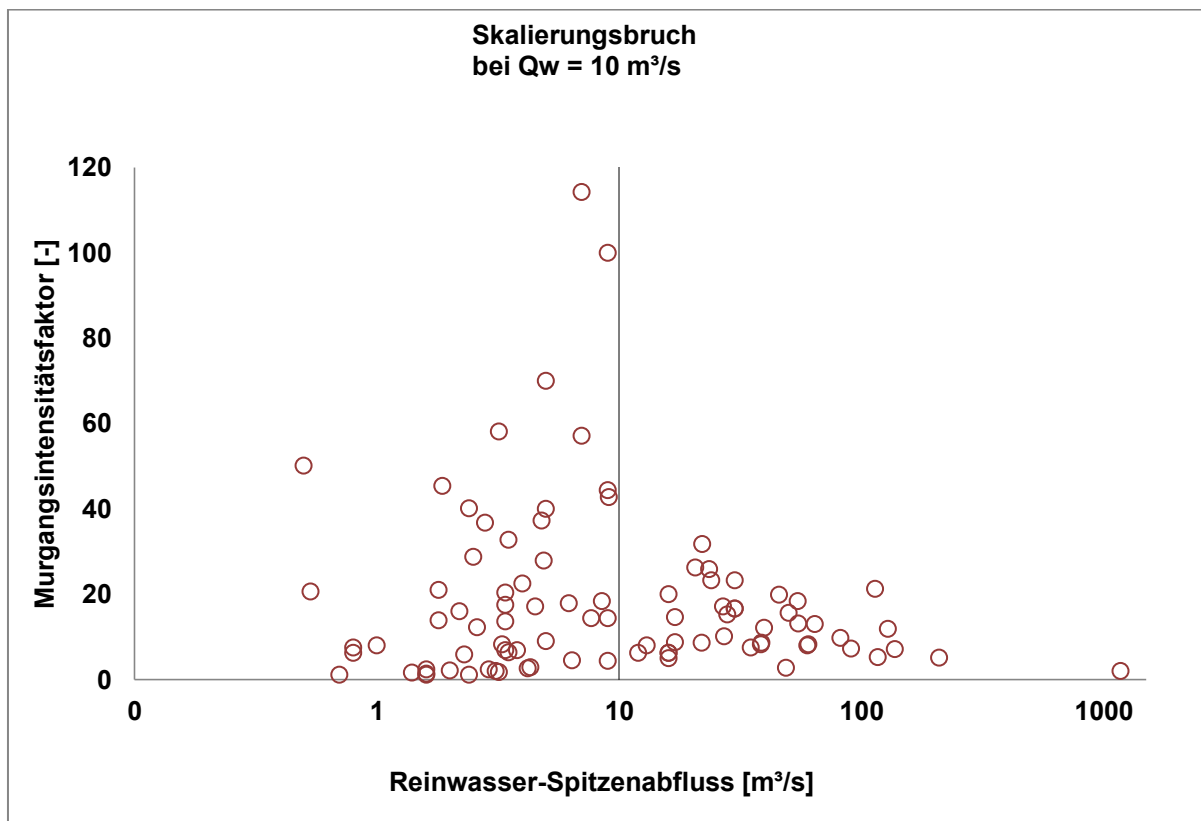
Abbildung 8.6: Häufigkeitsverteilung der Datenpunkte aus dem Alpenraum.

### 8.2.2 Bestimmung von unteren und oberen Grenzen

Chen und Chuang, 2014 konnten den Murgangsintensitätsfaktor in Zuge ihrer Arbeit eingrenzen und eine obere und untere Grenze definieren (vgl. Abbildung 7.13):

- $Q_M = 5 * Q_W$  (untere Grenze)
- $Q_M = 40 * Q_W$  (obere Grenze)

Aufgrund der enormen Bandbreite des Murgangsintensitätsfaktors wurde auch in dieser Arbeit versucht, den Murgangsintensitätsfaktor genauer zu analysieren und obere und untere Grenzen zu bestimmen. Dabei konnte interessanterweise ein Skalierungsbruch bei einem Reinwasser-Spitzenabfluss von ca. 10 m³/s beobachtet werden:



**Abbildung 8.7: Beziehung zwischen Reinwasser-Spitzenabfluss und dem Murgangsintensitätsfaktor mit einem Skalierungsbruch bei  $Q_W = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

Der Murgangsintensitätsfaktor bis zu einem Reinwasser-Spitzenabfluss von 10 m³/s weist eine enorme Bandbreite von 1-114 auf (vgl. Abbildung 8.7). Allerdings können mit Hilfe des Histogramms genauere Aussagen getroffen werden (vgl. Abbildung 8.8). Beispielsweise liegen bis zu einem Murgangsintensitätsfaktor (IF) von 15 knapp 53 % der Daten, bis zu einem IF = 35 bereits 75 % der Daten.

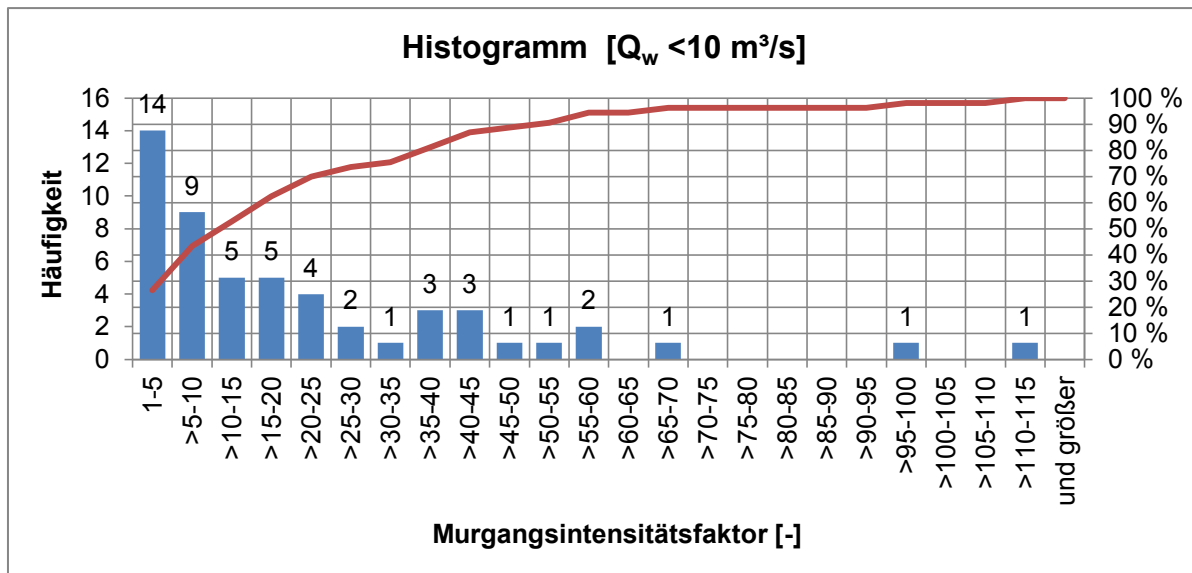


Abbildung 8.8: Histogramm bis einen Reinwasser-Spitzenabfluss von 10 m³/s. *[Anmerkung: Die Murgangsintensitätsfaktoren in der Klasse von 95-100 und 110-115 stammen aus groben Abschätzungen von Hübl, 2009 bzw. Zimmermann und Rickenmann, 1992].*

Der Vergleich einer linearen mit einer quadratischen Grenzfunktion hat ergeben, dass eine quadratische Funktion das Verhalten des Murgangsintensitätsfaktors in diesem Bereich besser beschreibt. Wie in Abbildung 8.10 dargestellt, konnte eine obere und untere Grenze durch folgenden Zusammenhang ausgedrückt werden:

$$Q_M = 0,5 * Q_w^2 \quad (\text{untere Grenze})$$

$$Q_M = 25 * Q_w^2 \quad (\text{obere Grenze})$$

Ab einem Reinwasser-Spitzenabfluss von 10 m³/s schwankt der Murgangsintensitätsfaktor hingegen in einem Bereich von 5 und 32. Mit Hilfe des Histogramms ist es auch hier möglich weitere Einschränkungen zu treffen; so liegen knapp 50 % der Daten unterhalb eines Murgangsintensitätsfaktors von 10 und bereits 85 % der Daten unterhalb eines IF von 20 (vgl. Abbildung 8.9). Weiters kann beobachtet werden, dass knapp 80 % der Daten im Bereich eines Murgangsintensitätsfaktors von 5-20 liegen.

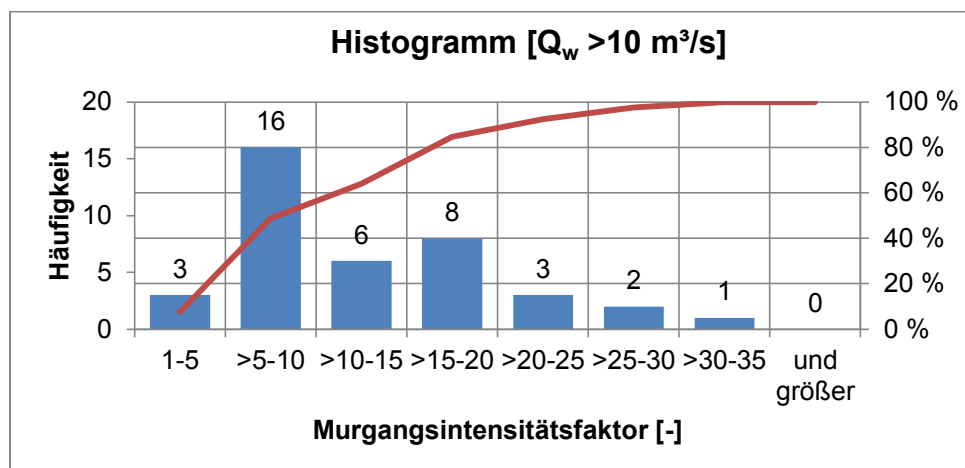


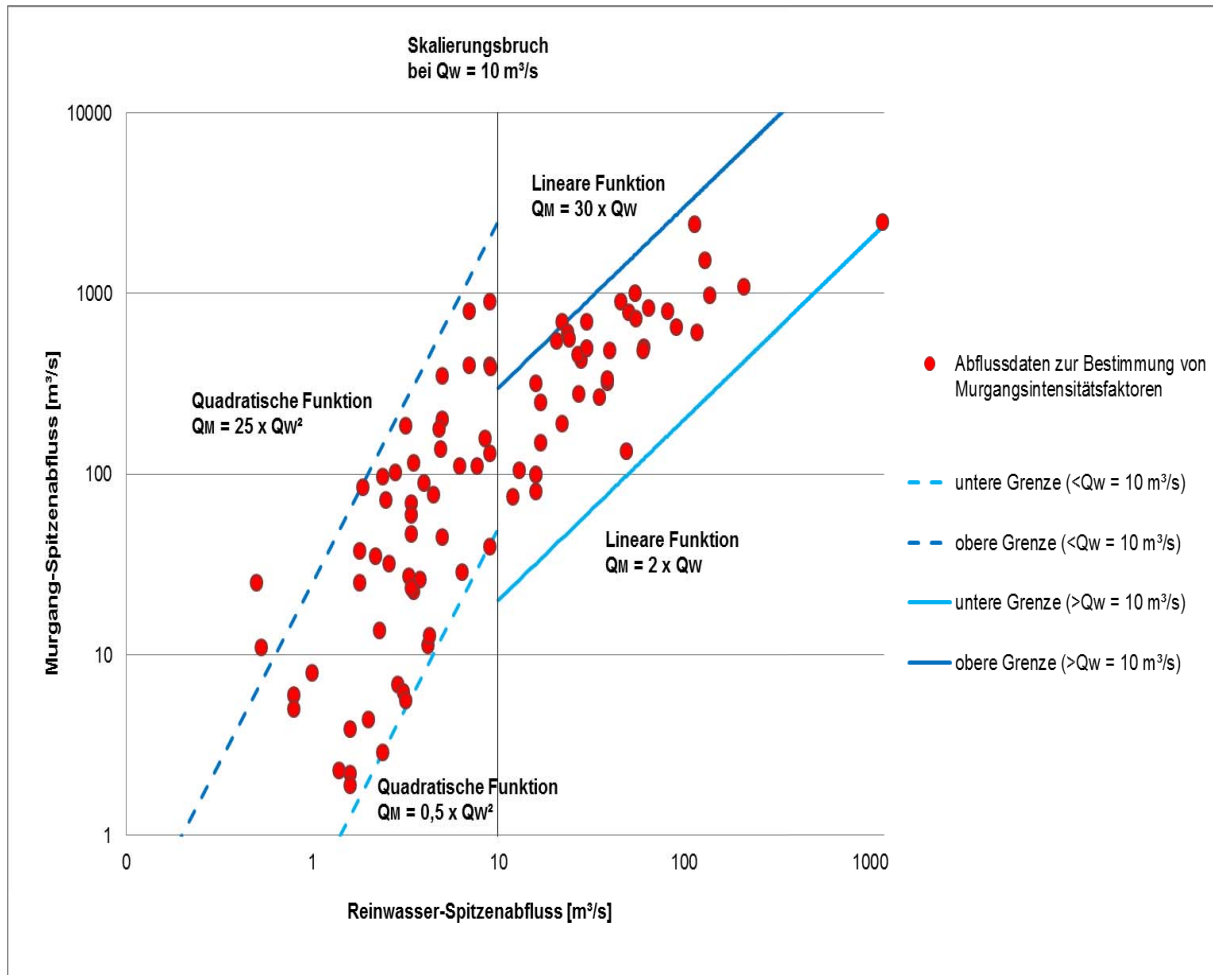
Abbildung 8.9: Histogramm für den Bereich Q<sub>w</sub> > 10 m³/s.

Der Zusammenhang zwischen dem Murgang-Spitzenabfluss und dem Reinwasser-Spitzenabfluss wird in diesem Bereich jedoch durch eine lineare Funktion beschrieben (vgl. Abbildung 8.10). Aus den Auswertungen ergaben sich folgende untere und obere Grenzen ( $Q_W > 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ):

$$Q_M = 2 * Q_W \quad (\text{untere Grenze})$$

$$Q_M = 30 * Q_W \quad (\text{obere Grenze})$$

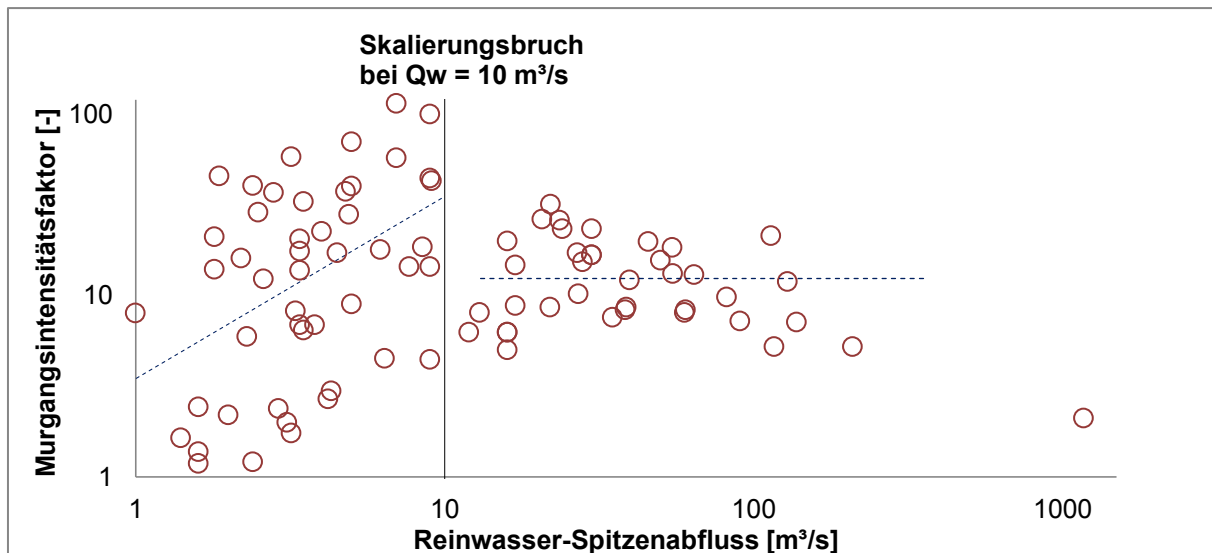
Somit ist es gelungen den Murgangsintensitätsfaktor in Vergleich zu Chen und Chuang, 2014 näher einzugrenzen.



**Abbildung 8.10: Berechnete untere und obere Grenzen mit einem Skalierungsbruch bei  $Q_W = 10 \text{ m}^3/\text{s}$  (in doppel-logarithmischer Darstellung).**

Berechnete untere und obere Grenzen mit einem Skalierungsbruch bei  $Q_W = 10 \text{ m}^3/\text{s}$  (in doppel-logarithmischer Darstellung).

Weiters konnte beobachtet werden, dass der Murgangsintensitätsfaktor bis zu einem Reinwasser-Spitzenabfluss von ca.  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  stetig zunimmt. Ab einem Reinwasser-Spitzenabfluss von ca.  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  bleibt er jedoch nahezu konstant (vgl. hierzu Abbildung 8.11).



**Abbildung 8.11:** Darstellung des Reinwasser-Spitzenabflusses und des Murgangsintensitätsfaktors.

### 8.3 Vergleich der gemessenen Murgangsintensitätsfaktoren mit den vorgeschlagenen Methoden in der Literatur

Weiters wurde versucht, die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Ansätze zur Berechnung der Murgangsintensitätsfaktoren mit den beobachteten Daten zu vergleichen. Die meisten der verwendeten Eingangsparameter für diese Ansätze (z.B. Sättigung des Materials; Gerinnrauigkeit, Dichte des Murgangsmaterials, ...) sind jedoch unbekannt. Somit war es lediglich möglich die Ansätze von Takahashi, 1991 und Tognacca, 1999 mit den beobachteten Daten zu vergleichen:

Takahashi 1991

$$IF = \frac{c^*}{c^* - c_v}$$

Tognacca 1999

$$IF = \frac{1}{1 - c_v}$$

Für den nachfolgenden Vergleich wurden auf Basis der beschriebenen, volumetrischen Feststoffkonzentrationen Murgangsintensitätsfaktoren mit den oben angeführten Formeln berechnet und anschließend mit den, in der Originalliteratur beschriebenen Murgangsintensitätsfaktoren verglichen.

Da Chen und Chuang, 2014 maximale volumetrische Feststoffkonzentrationen  $c_v$  von 0,9 beschreiben, wurde zum Vergleich der Formel von Takahashi eine Grenzkonzentration  $c^*$  des Murganges von 0,9 verwendet.

Der Vergleich der beiden Methoden mit den beobachteten Daten hat ergeben, dass die Murgangsintensitätsfaktoren teils sowohl von der Formel von Takahashi als vom Ansatz von Tognacca unterschätzt werden (vgl. Abbildung 8.12). Wie bereits Chen und Chuang, 2014 feststellten, kann mit der Formel von Tognacca bei Annahme einer volumetrischen Feststoffkonzentration von 0,9 ein maximaler Murgangsintensitätsfaktor von 10 ermittelt werden.

Bis zu einem Murgangsintensitätsfaktor von 4 stimmen die berechneten Werte mit den beobachteten Daten ziemlich gut überein. Ab einem Murgangsintensitätsfaktoren >4 werden die Werte jedoch mit der Methode nach Tognacca deutlich unterschätzt. Beide Methoden unterschätzen vor allem Intensitätsfaktoren von Murgängen mit einer volumetrischen Feststoffkonzentration >0,4.

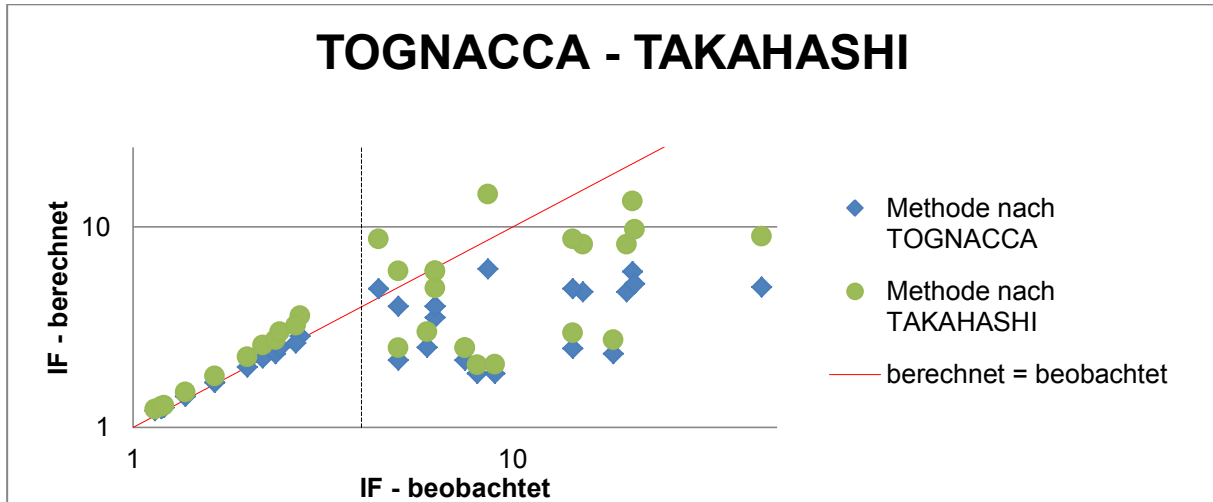


Abbildung 8.12: Vergleich der beobachteten und berechneten Murgangsintensitätsfaktoren.

Auf Grundlage der geschätzten Volumen und dem Reinwasser-Spitzenabfluss einiger Murgänge ist es weiters möglich Murgangsintensitätsfaktoren mit dem Ansatz von Mizuyama (siehe Kapitel 3.3.1) zu bestimmen:

$$IF = \frac{Q_{MIZUYAMA}}{Q_{W-BEOBACHTET}}$$

Abbildung 8.13 zeigt zu erwartende Unterschiede zwischen den Ansätzen für granulare und schlammartige Murgänge.

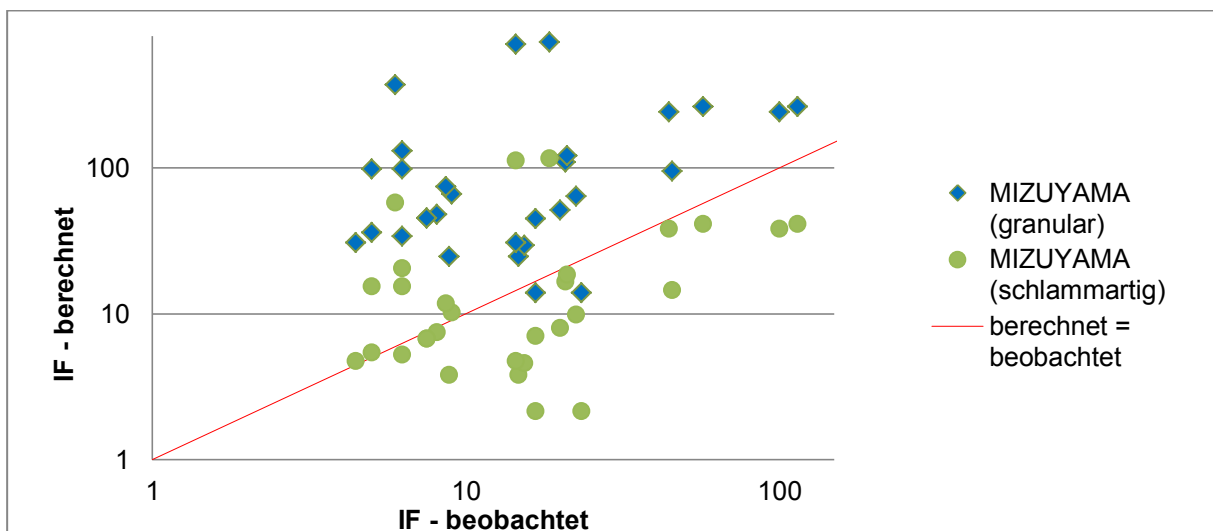


Abbildung 8.13: Vergleich der mit dem Ansatz von Mizuyama berechneten und den beobachteten Murgangsintensitätsfaktoren.

Während die Formel für granulare Murgänge die meisten Murgangsintensitätsfaktoren und somit auch die Murgang-Spitzenabflüsse überschätzt, liefert die Formel für schlammartige Murgänge plausible Werte. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass bei der Auswertung nicht in granulare und schlammstromartige Murgänge unterschieden wurde, und die Angaben der Volumina teils auf Schätzungen beruhen.

#### **8.4 Abhängigkeiten des Murgangsintensitätsfaktors**

Die Murgangsintensitätsfaktoren variieren aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten (hydrogeologische Verhältnisse, Einzugsgebietsgröße, Rutschungsflächen, topographische und geologische Eigenschaften) von einem Einzugsgebiet auf ein anderes sehr stark (Chen und Chuang, 2014). Um jedoch trotzdem mögliche Gemeinsamkeiten und Zusammenhänge zu finden, wurden Zusatzinformationen in der entsprechenden Literatur gesucht und auf mögliche Abhängigkeiten hin analysiert.

Folgende Abhängigkeiten konnten in der Literatur gefunden und teils mit eigenen Beobachtungen verglichen werden:

- Reinwasser-Spitzenabfluss
- Dichte des Murganges
- Tonanteil im Murgang
- Porosität des Bodens – Wasseranteil im Boden
- Feststoffkonzentration des Murganges
- Fläche des Einzugsgebiets
- Anteil der Rutschflächen im Einzugsgebiet
- Mobilisierungsintensität des Geschiebes – Systemzustand

Weiters wurden die Murgangsintensitätsfaktoren mit folgenden charakteristischen Größen der Murgänge verglichen und mögliche Tendenzen abgeleitet:

- Murschübe
- Bachgefälle
- Volumen des Murganges
- Gefälle des Einzugsgebiets
- Niederschlagsereignis
- Geologie

Allerdings ist bereits einleitend anzumerken, dass diesbezügliche Daten nur lückenhaft vorhanden sind und die folgenden, eigenen Auswertungen auf geringe Datenmengen basieren. Somit können maximal Tendenzen abgeleitet werden, welche teils mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

##### **8.4.1 Reinwasser-Spitzenabfluss**

Mizuyama et al., 1992 und Chen und Chuang, 2014 konnten bei Ihren Untersuchungen feststellen, dass mit zunehmendem Reinwasserabfluss auch der Murgangsintensitätsfaktor steigt. Wie in Abbildung 8.14 ersichtlich, kann dies durch die eigenen Auswertungen nur beschränkt bestätigt werden.

Die Analyse von 92 Datenpunkten hat ergeben, dass der Murgangsintensitätsfaktor bis zu einem Reinwasser-Spitzenabfluss von ca. 10 m³/s stetig zunimmt; sich jedoch ab einem Reinwasser-Spitzenabfluss von ca. 10 m³/s konstant hält.

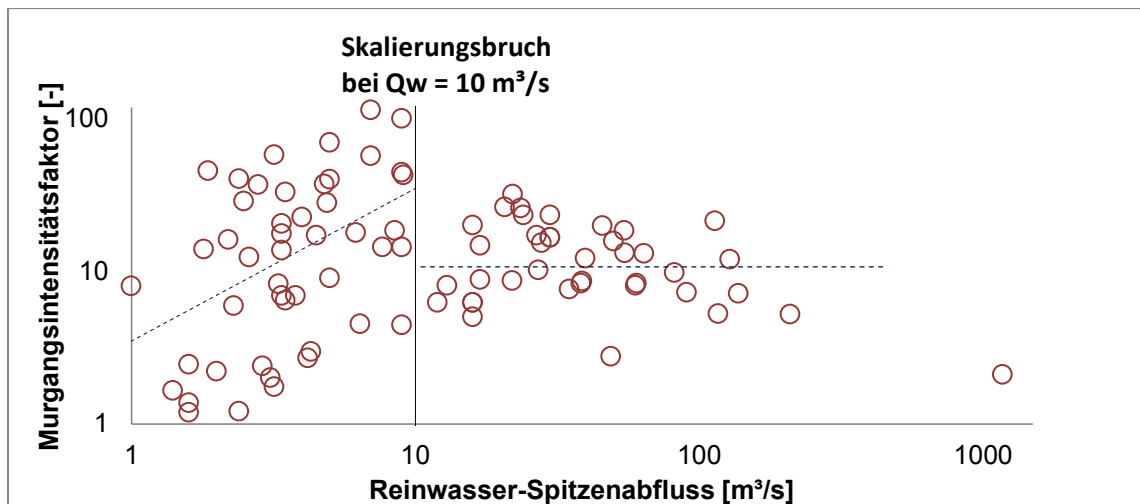


Abbildung 8.14: Darstellung des Reinwasser-Spitzenabflusses und des Murgangsintensitätsfaktors.

#### 8.4.2 Dichte des Murganges

Mehrere Ansätze beschreiben den Murgangsintensitätsfaktor als Funktion der Dichte des Murganges und der Dichte des beteiligten Geschiebes.

Yablonskiy, 1991 (zit. in Yablonskiy et al., 1992) konnte bei der Auswertung mehrerer Murgänge feststellen, dass mit zunehmender Dichte des Murganges auch der Murgangsintensitätsfaktor steigt. Wie in Abbildung 8.15 dargestellt, steigt der Murgangsintensitätsfaktor ( $n$  in Abbildung) bis zu einer Dichte von ca. 1600 kg/m³ leicht an, während er ab einer Dichte von ca. 1600 kg/m³ stärker zunimmt.

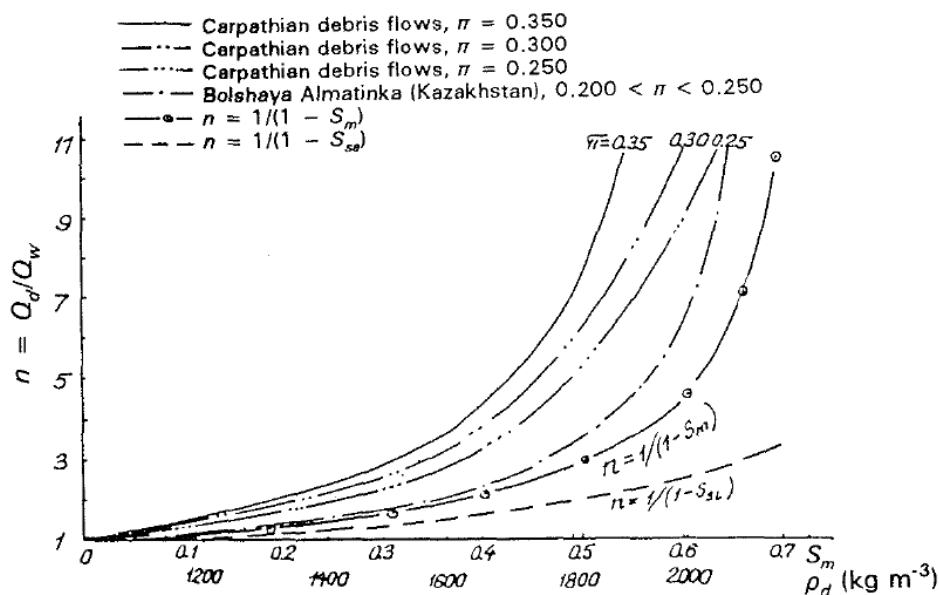


Abbildung 8.15: Zusammenhang zwischen den Murgangsintensitätsfaktor ( $Q_d/Q_w$ ) und der Dichte des Murganges  $\rho_d$ ;  $\pi$  = Porosität in % [aus Yablonskiy et al. 1992].

Auch Chen et al., 2007 beschreibt höhere Murgangsintensitätsfaktoren bei höheren Dichten und höheren Tonanteil des Murganges. Zudem konnten Wei et al., in. prep. feststellen, dass die Dichte, neben dem mittleren Gefälle und der Rauigkeit größere Einflüsse auf den Murgangsintensitätsfaktor hat, wie beispielsweise die Einzugsgebietsfläche oder die Gerinnelänge.

Weiters konnte Yablonskiy, 1991 feststellen, dass die Porosität des Ausgangsmaterials ( $\pi$  in Abbildung) einen großen Einfluss auf den Murgangsintensitätsfaktor hat. Wie aus Abbildung 8.15 ersichtlich, steigt der Murgangsintensitätsfaktor mit größeren Porositäten bereits bei kleineren Dichten des Murganges rascher an. Wie bereits einige Ansätze zur Bestimmung des Murgangsintensitätsfaktors berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.3), muss somit zusätzlich zum Gerinneabfluss auch das im Rutschungsvolumen vorhandene Wasser (inkl. Grundwasser) einbezogen werden (Chen und Chuang, 2014).

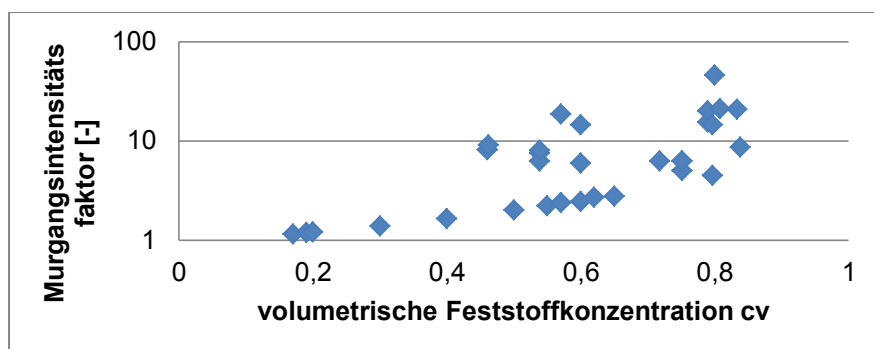
### 8.4.3 Feststoffkonzentration des Murganges

Die Feststoffkonzentration (meist volumetrische) bildet die Grundlage vieler Formeln zur Bestimmung des Murgangsintensitätsfaktors. Bereits Costa, 1984 schätzte unter gewissen Annahmen mehrere Murgangsintensitätsfaktoren abhängig von der Sedimentkonzentration (Gewicht) des Murganges. Dabei ergaben sich mit zunehmender Sedimentkonzentration eines Murganges auch höhere Murgangsintensitätsfaktoren:

**Tabelle 8.1: Zusammenhang Feststoffkonzentration und Murgangsintensitätsfaktor.**

| Gewichtsanteil des Sediments [%] | Murgangsintensitätsfaktor [-] |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 50                               | 1,38                          |
| 55                               | 1,46                          |
| 60                               | 1,57                          |
| 65                               | 1,70                          |
| 70                               | 1,88                          |
| 75                               | 2,13                          |
| 80                               | 2,51                          |
| 85                               | 3,14                          |
| 90                               | 4,40                          |

Auch im Zuge der eigenen Auswertungen konnte beobachtet werden, dass der Murgangsintensitätsfaktor mit steigender volumetrischer Feststoffkonzentration steigt (vgl. Abbildung 8.16):



**Abbildung 8.16: Zusammenhang des Murgangsintensitätsfaktors mit der volumetrischen Sedimentkonzentration einiger Murgänge.**

#### 8.4.4 Fläche des Einzugsgebietes

Hydraulic Division, 1971 (zit. in Costa, 1984) untersuchte mehrere murfähige Gerinne und konnte dabei beobachten, dass der Murgangsintensitätsfaktor mit steigender Fläche des Einzugsgebietes leicht abnimmt. Diese Feststellung konnte jedoch durch die eigenen Auswertungen nicht bestätigt werden.

Die eigenen Auswertungen haben ergeben, dass mit zunehmender Fläche des Einzugsgebiets auch tendenziell der Murgangsintensitätsfaktor leicht steigt (vgl. Abbildung 8.17).

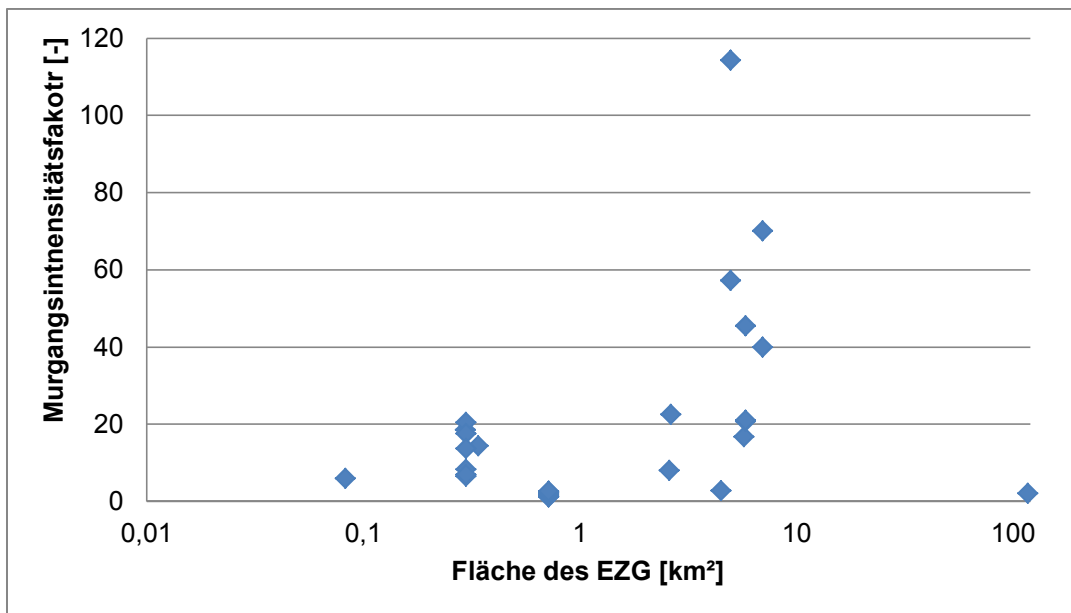


Abbildung 8.17: Kein eindeutiger Zusammenhang des Murgangsintensitätsfaktors mit der Fläche des Einzugsgebiets.

#### 8.4.5 Anteil der Rutschflächen im Einzugsgebiet

Chen und Chuang, 2014 untersuchten den Zusammenhang zwischen dem Murgangsintensitätsfaktor und dem flächenmäßigen Anteil von Rutschungen im Einzugsgebiet und fanden folgenden Zusammenhang mit einem Regressionskoeffizienten von  $R^2 = 0,96$ . Allerdings ist dabei anzumerken, dass die Funktion auf Grundlage von lediglich drei Datenpunkten errechnet wurde (vgl. Abbildung 8.18).

$$IF = 0,0028 * R_L^{2,4}$$

wobei:

$$R_L = \text{Fläche des Einzugsgebiets/Rutschungsflächen [\%]}$$

Aus diesem Zusammenhang ist ersichtlich, dass der Murgangsintensitätsfaktor IF mit steigendem Anteil der Rutschflächen im Einzugsgebiet ansteigt.

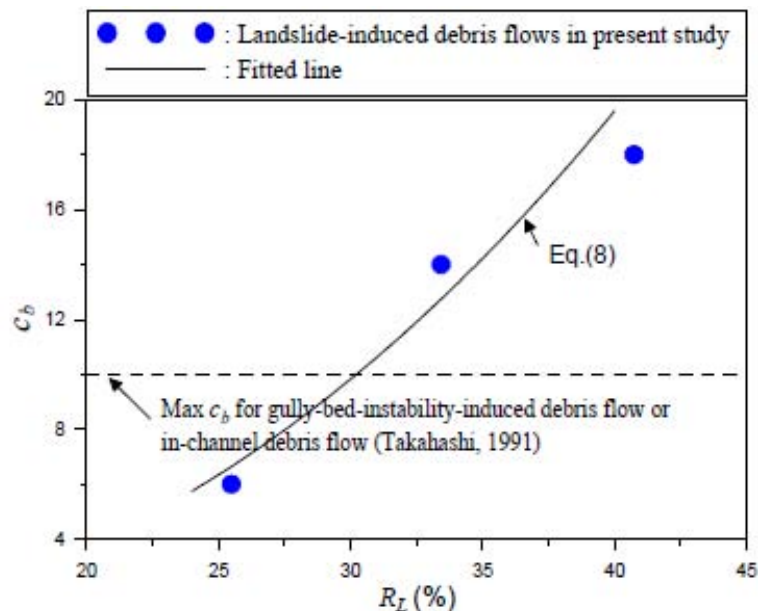


Abbildung 8.18: Zusammenhang zwischen dem Murgangsintensitätsfaktor und der anteilmäßigen Rutschflächen ( $R_L$ ) im Einzugsgebiet (Chen und Chuang, 2014).

#### 8.4.6 Mobilisierungsintensität des Geschiebes - Systemzustand

Chen und Chuang, 2014 beschreiben, dass große Sediment-Verfügbarkeiten (sediment supplementation) zu großen Murgangsintensitätsfaktoren führen können. Auch Hübl, 2009 schätzt bei großen Mobilisierungsintensitäten und größeren Systemzuständen höhere Murgangsintensitätsfaktoren (vgl. Abbildung 8.19). Beispielsweise beschreiben Chen und Chuang, 2014 höhere Murgangsintensitätsfaktoren von rutschungsinduzierten Murgängen wie von Murgängen, welche durch permanente Geschiebeaufnahme entlang des Gerinnes entstehen.

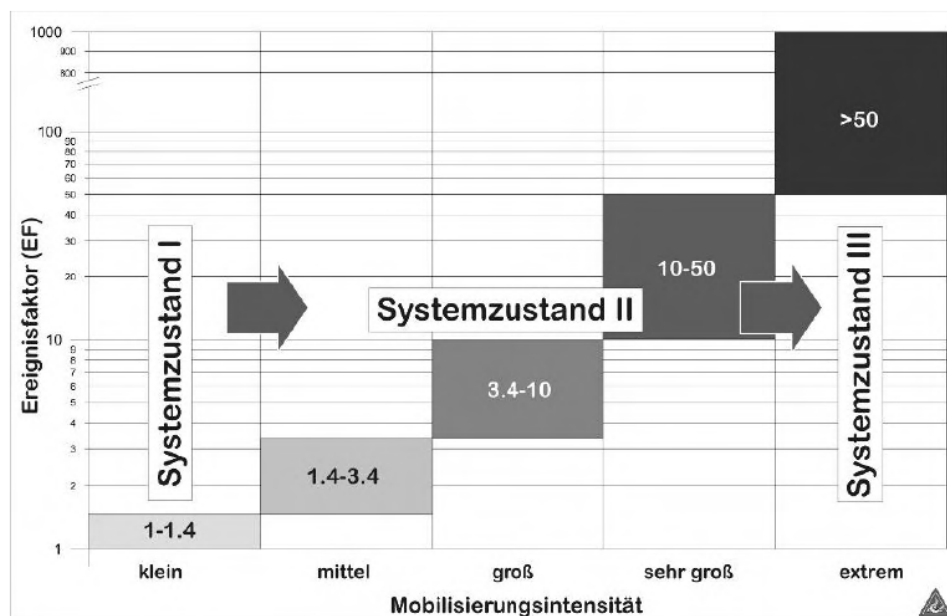


Abbildung 8.19: Verschiedene Murgangsintensitätsfaktoren (hier als Ereignisfaktor bezeichnet), abhängig vom Systemzustand und der Mobilisierungsintensität (aus Hübl, 2009).

Im Zuge der Auswertungen dieser Arbeit wurde versucht den Auslösemechanismus der untersuchten Murgänge zu bestimmen. Allerdings waren in der Originalliteratur nur sehr wenige Hinweise enthalten. Trotzdem ist es bei 24 Murgängen gelungen, ein wahrscheinliches Auslöseszenarium festzulegen. Da die Murgänge meist jedoch nicht beobachtet wurden, sind die Auslöseszenarien mit Unsicherheiten behaftet.

Um eine Aussage über die Mobilisierungsdauer der Murgänge treffen zu können, wurden die verschiedenen Auslösemechanismen in zwei Gruppen zusammengefasst und anschließend der minimale, maximale und mittlere Wert aus den Murgangsintensitätsfaktoren berechnet:

- Permanente Geschiebeaufnahme im Gerinne (mittlere - große Mobilisierungsintensität)
- Verklauung-Rutschung-Bodenverflüssigung (sehr große - extreme Mobilisierungsintensität)

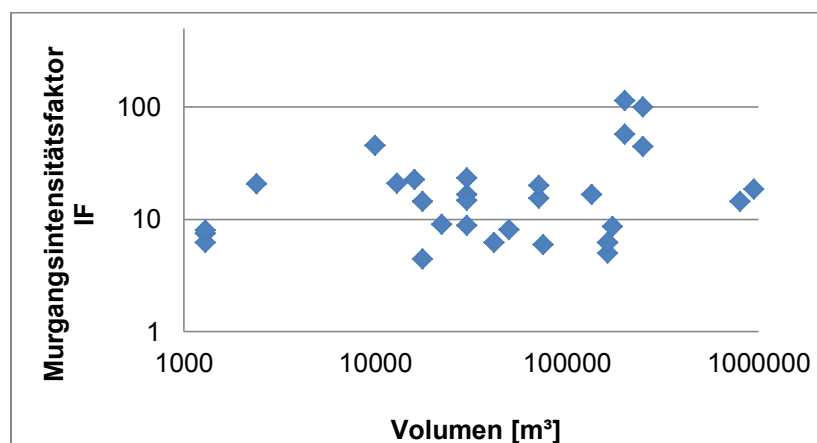
Die Auswertung ergab einen mittleren Murgangsintensitätsfaktor von 9 bei einer mittleren – großen Mobilisierungsintensität und einen mittleren IF von 30 bei sehr großen bis extremen Mobilisierungsintensitäten. Wie in Tabelle 8.2 ersichtlich, kann somit ein vermutlich, tendenzieller Zusammenhang der Mobilisierungsintensität des Geschiebes und des Murgangsintensitätsfaktors bestätigt werden.

**Tabelle 8.2: Zusammenhang Mobilisierungsintensität und Murgangsintensitätsfaktor.**

| Klassifizierung                         | Murgangsintensitätsfaktor |         |            |
|-----------------------------------------|---------------------------|---------|------------|
|                                         | MINIMUM                   | MAXIMUM | MITTELWERT |
| permanente Geschiebeaufnahme            | 4                         | 20      | 9          |
| Verklauung-Rutschung-Bodenverflüssigung | 2                         | 100     | 30         |

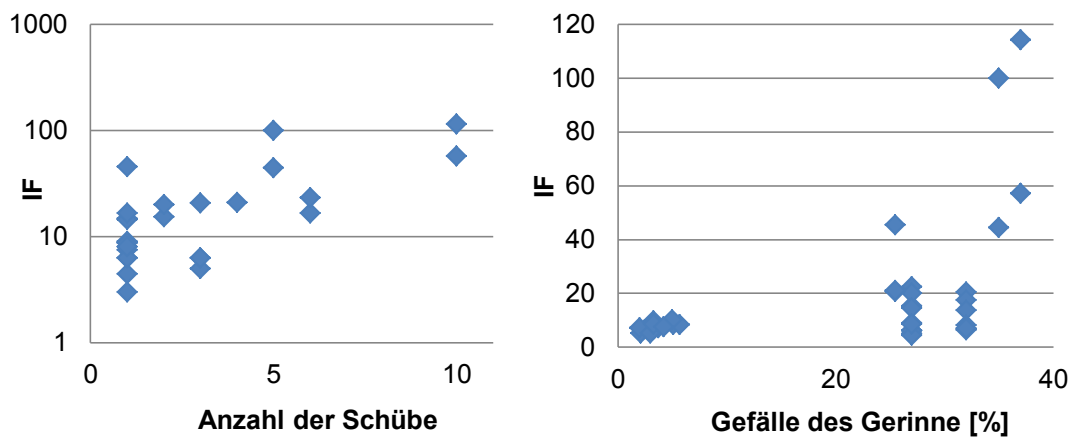
#### 8.4.7 Weitere Auswertungen mit verschiedenen Parametern

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Parametern wurden weitere Abhängigkeiten mit wichtigen murgangspezifischen Größen (Gefälle des Gerinnes, Gefälle des Einzugsgebiets, Volumen des Murganges, Anzahl der Schübe, Niederschlagsereignis, Geologie des Einzugsgebiets) durchgeführt. Dabei konnte beispielsweise gezeigt werden, dass das Volumen des Murganges keinen beachtlichen Einfluss auf die Größe des Murgangsintensitätsfaktors hat (vgl. Abbildung 8.20).



**Abbildung 8.20: Zusammenhang des Murgangsintensitätsfaktors mit der gesamten Fracht des Murganges.**

Aufgrund der geringen Datenmengen weiterer Parameter ist sogar die Ableitung von Tendenzen mit großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten behaftet. Vor allem konkrete Angaben über das auslösende Niederschlagsereignis und der Geologie des Einzugsgebiets fehlen zumeist, oder können aufgrund der großen Differenzen nicht verglichen werden. Abbildung 8.21 zeigt Vergleiche mit weiteren Parametern ohne feststellbare Tendenzen.



**Abbildung 8.21: Weitere untersuchte Abhängigkeiten ohne feststellbare Tendenzen: Links: Anzahl der Murschübe; Rechts: Gefälle des Gerinnes.**

## 8.5 Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf das Ausbreitungsverhalten alpiner Murgänge

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf das Ausbreitungsverhalten alpiner Murgänge dargestellt und erläutert.

Ziel dieser Auswertungen war es, mehrere Murgänge mit verschiedenen Murgangsintensitätsfaktoren mit der Simulationssoftware Flo2D zu modellieren und anschließend die Ausbreitungsflächen zu vergleichen. Auf Grundlage dieses Vergleichs wurden anschließend erste Ergebnisse der Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf das Ausbreitungsverhalten abgeleitet.

### 8.5.1 Auswahl des Untersuchungsgerinnes

Die Untersuchungen zur Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors auf alpine Murgänge wurden am unteren Gerinneabschnitt des „Pleiferbaches“ im Langtauerental (Obervinschgau; Südtirol) durchgeführt.

Ausschlaggebend für die Auswahl dieses Gerinnes war das ausgeprägte, mäßig eingeschnittene Gerinne mit einem mittleren Gefälle von ca. 32 % und einem ausgeprägten, mäßig steilen Schwemmkegel. Aufgrund des natürlichen, unverbauten Zustands des Gerinnes und des Vorhandenseins eines Flo2D Projektes eignete sich der Pleiferbach zusätzlich für erste überblicksmäßige Untersuchungen.

Das zu Grunde liegende FLO2D-Projekt wurde vom Planungsbüro „ARE“ des Dipl. Ing. Platzer Matthias erstellt und dankeswerterweise für die vorliegenden Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

### 8.5.2 Festlegung der Murgang-Ganglinien mit unterschiedlichen Murgangsintensitätsfaktoren

Zur Überprüfung der Relevanz des Murgangsintensitätsfaktors wurden drei verschiedene Murgang-Ganglinien verwendet. Die Ausgangs-Ganglinie stellte dabei das im Zuge der Erstellung des Gefahrenzonenplans berechnete 100-jährliche Hochwasser mit einem Spitzenabfluss von  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  dar.

Dieser Reinwasser-Hydrograph wurde anschließend durch die Verwendung von drei Murgangsintensitätsfaktoren in drei verschiedene Murgangs-Ganglinien transformiert. Hierzu wurden Murgangsintensitätsfaktoren von 1, 10 und 20 gewählt.

Zur Berechnung des Murgang-Spitzenabflusses wurde der Reinwasser-Spitzenabfluss von  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  mit den festgelegten Murgangsintensitätsfaktoren multipliziert und anschließend die Form der Ganglinie so abgeändert, dass das Volumen der drei angenommenen Murgänge konstant blieb. Alle übrigen Parameter, welche Flo2D zur Modellierung von Murgängen verwendet, wurden bei den drei Modellierungen nicht verändert. Somit ist gewährleistet, dass die Auswirkungen einzig auf die Änderung des Spitzenabflusses und den Verlauf der Ganglinie zurückzuführen sind.

Die in Abbildung 8.22 dargestellten Murgang-Ganglinien bildeten somit die Eingangs-Ganglinien für die Modellierungen mit der Modellierungssoftware Flo2D.

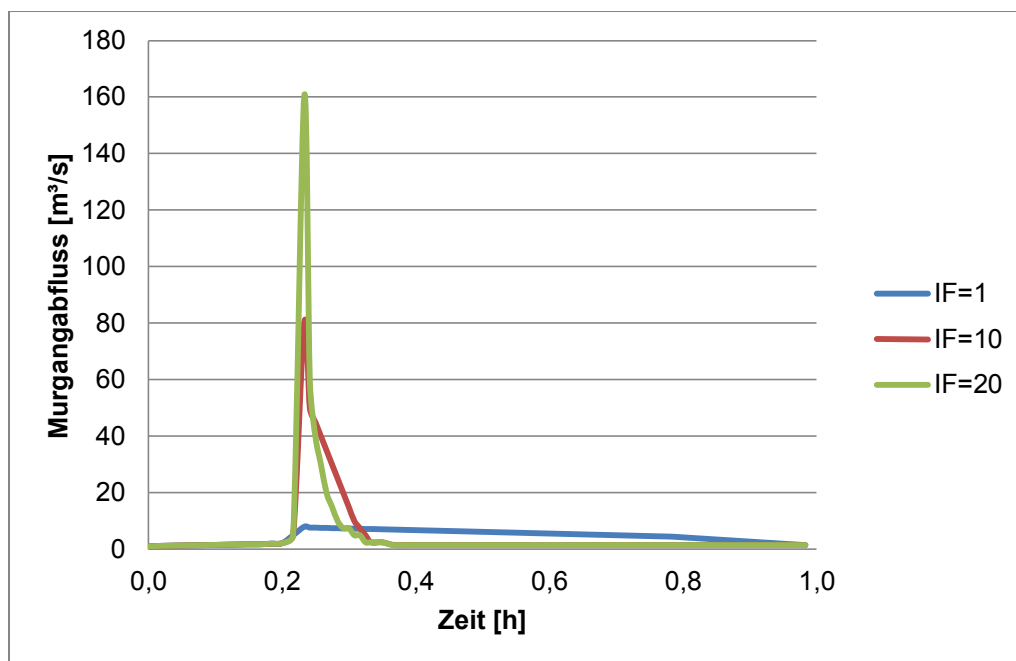


Abbildung 8.22: Festgelegte Murgang-Ganglinien mit drei verschiedenen Murgangsintensitätsfaktoren.

### 8.5.3 Kurze Beschreibung der verwendeten Simulationssoftware

Flo2D ist eines der meist verwendeten Modelle zur Simulation von Murgängen. Dieses Programm wurde von O'Brien et al., 1993 entwickelt und basiert auf einem gemischten Ansatz einer Bingham'schen Flüssigkeit und dispersiver bzw. turbulenter Reibungsterme. Der verwendete, turbulente Reibungsterm und der Reibungsterm nach Bagnold/Takahashi wer-

den zusammengefasst und mittels eines CHEZY-ähnlichen Koeffizienten im Modell berücksichtigt. Rickenmann, 2014 beschreibt weiters, dass dieses Modell, gemeinsam mit anderen numerisch, rasterbasierten Modellen geeignet ist, das Ausbreitungsverhalten auf dem Kegel zu simulieren.

#### 8.5.4 Ergebnisse der Modellierungen mit unterschiedlichen Murgangsintensitätsfaktoren



Abbildung 8.23: Modelliertes Murgangs-Szenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 1.

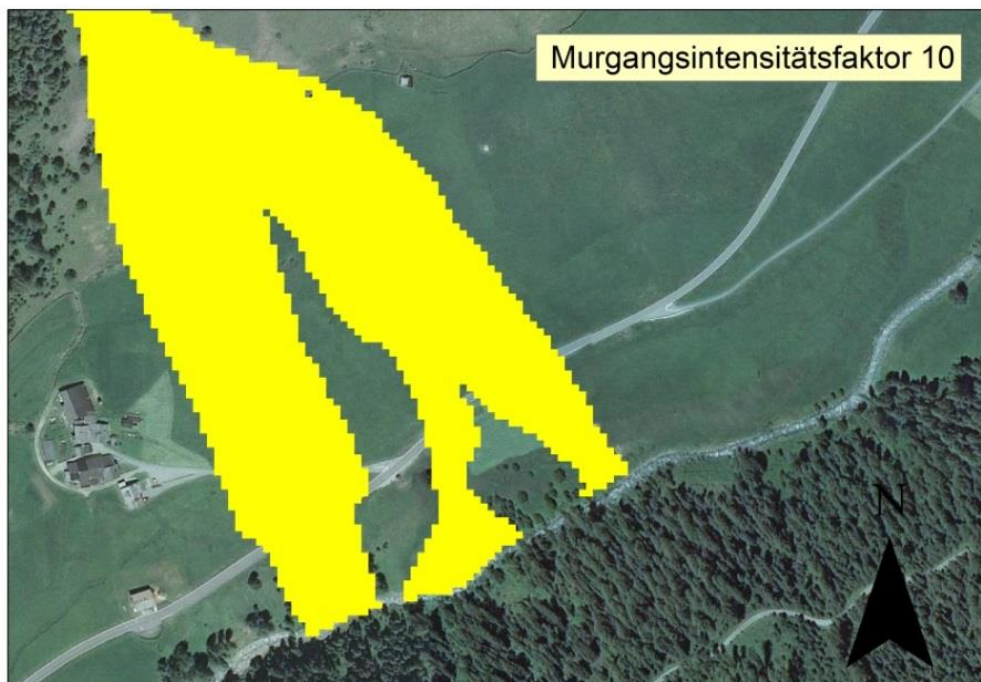
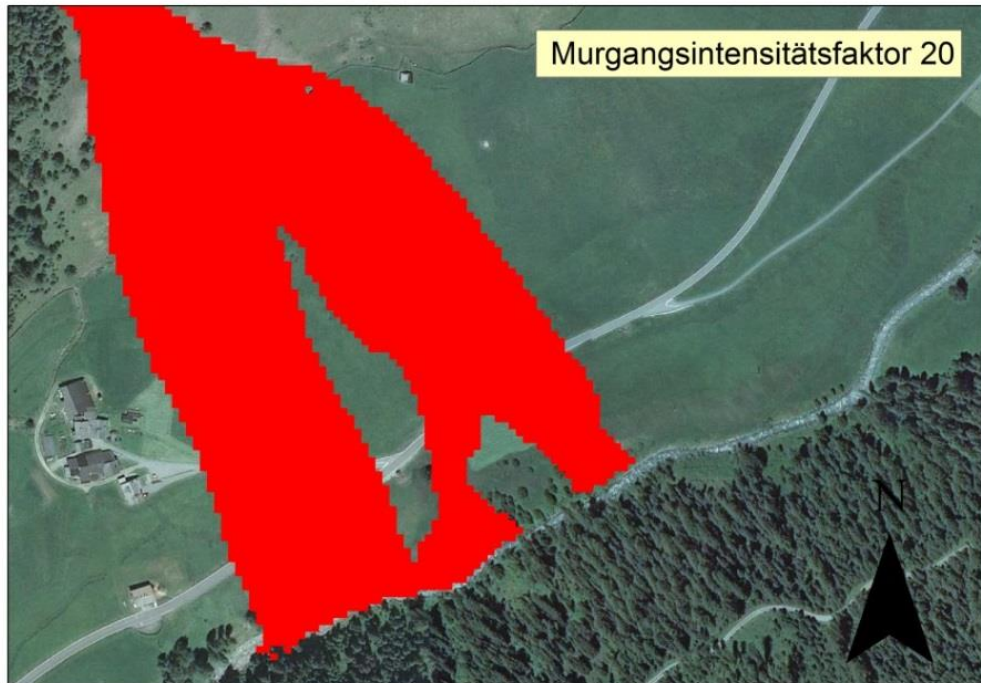


Abbildung 8.24: Modelliertes Murgang-Szenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 10.



**Abbildung 8.25: Modelliertes Murgangs-Szenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 20.**

Die Auswertung der Modellierungen mit unterschiedlichen Murgangsintensitätsfaktoren hat ergeben, dass die Ausbreitungsfläche auf dem Schwemmkegel des Pleiferbaches mit steigendem Murgangsintensitätsfaktor steigt (vgl. Abbildung 8.23; Abbildung 8.24 und Abbildung 8.25).

Während der Unterschied zwischen den Ausbreitungsflächen mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 1 und 10 beachtlich ist, konnten zwischen den Flächen mit einem IF von 10 und einem IF von 20 deutlich kleinere Unterschiede beobachtet werden. Die Ausbreitungsfläche mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 10 ist beispielsweise ca. 2,7 Mal größer wie die Fläche mit einem angenommenen Murgangsintensitätsfaktor von 1 bei gleichem Volumen (vgl. Tabelle 8.3).

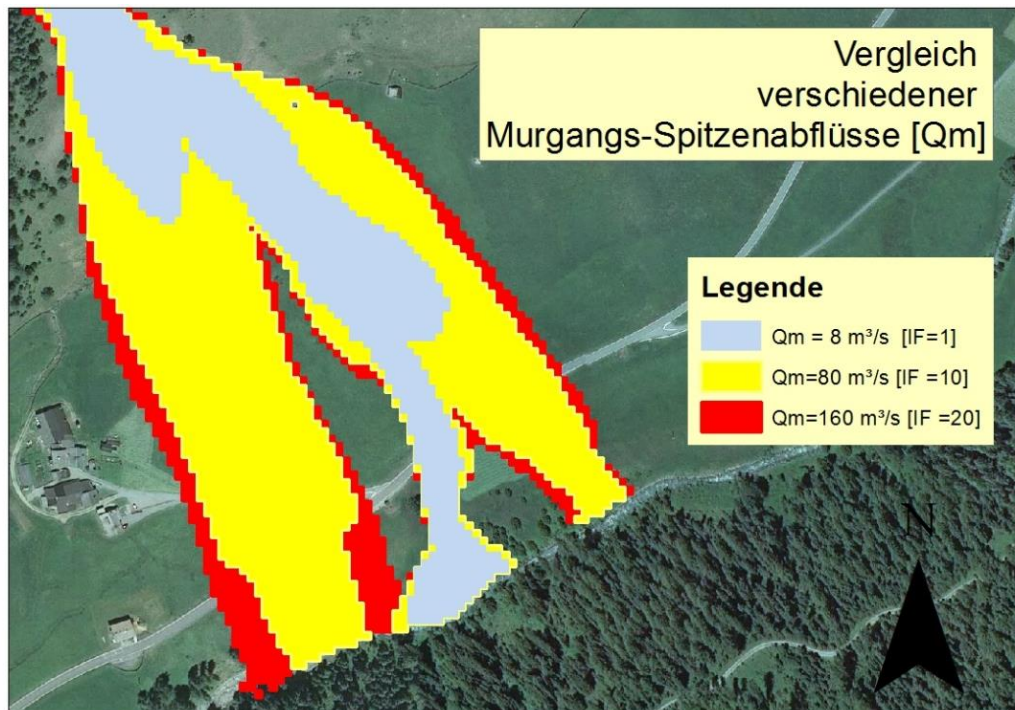
Somit konnte anhand des Pleiferbaches gezeigt werden, dass der Murgangsintensitätsfaktor und somit der Verlauf der Ganglinie große Auswirkungen auf das Ausbreitungsverhalten alpiner Murgänge hat. Die Auswertungen von Whipple, 1992 bestätigen zudem, dass der Verlauf der Eingangsganglinie sehr prägend für das Ausbreitungsverhalten von Murgängen ist.

**Tabelle 8.3: Berechnung der Flächen und der dazugehörigen Flächenverhältnisse (bezogen auf das Murgangsszenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 1).**

| IF<br>[-] | Ablagerungsfläche<br>[m <sup>2</sup> ] | Faktor<br>[-] |
|-----------|----------------------------------------|---------------|
| 1         | 30350                                  | 1.0           |
| 10        | 81650                                  | 2.7           |
| 20        | 94500                                  | 3.1           |

## 9 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses ist eine grundlegende Voraussetzung für die Dimensionierung von Schutzbauwerken sowie für die Ausweisung von Gefahrenzonen. Wie in Abbildung 9.1 dargestellt, haben unterschiedliche Murgang-Spitzenabflüsse, selbst bei gleichen Volumina, große Auswirkungen auf das Ausbreitungsverhalten von Murgängen.



**Abbildung 9.1: Murgangsszenarien mit unterschiedlichen Murgangsintensitätsfaktoren und Spitzenabflüssen, aber gleichen Murfrachten.**

Um eine möglichst hohe Sicherheit für Infrastrukturen in potentiell gefährdeten Bereichen zu gewährleisten, ist eine möglichst genaue Abschätzung des Murgangs-Spitzenabflusses grundlegend. Allerdings bereitet die Bestimmung von maximalen Abflüssen auch nach heutigem Erkenntnisstand große Schwierigkeiten und Unsicherheiten (Hübl, s.a.).

Aufgrund der großen Schwierigkeiten und teils lokalen Gegebenheiten existiert weltweit eine Vielzahl an Methoden zur Abschätzung von Murgangs-Spitzenabflüssen. Im alpinen Raum sind vor allem die Methode von Mizuyama und die Methode der Murgangsintensitätsfaktoren, basierend auf dem Reinwasser-Spitzenabfluss, sehr gebräuchlich.

Während der Spitzenabfluss eines Murganges mit der Formel nach Mizuyama eine Funktion der Murfracht ist, errechnet sich der Spitzenabfluss mit der Methode der Murgangsintensitätsfaktoren aus der Multiplikation vom Reinwasser-Spitzenabfluss mit dem sog. Murgangsintensitätsfaktor. Der benötigte Reinwasser-Spitzenabfluss kann dabei mit Hilfe von Niederschlag-Abfluss-Modellen berechnet oder mit empirischen Ansätzen geschätzt werden.

Da die Bestimmung einer möglichen Murfracht jedoch meist mit großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden ist, versuchten mehrere Wissenschaftler aus aller Welt den Spitzenabfluss eines Murganges mittels Murgangsintensitätsfaktoren zu beschreiben (vgl. Tabelle 9.1). Die grundlegende Annahme der Methode des Murgangsintensitätsfaktors ist, dass

ein n-jährliches Hochwasserereignis einen n-jährlichen Murgang generiert. Dies stellt zum Teil jedoch eine starke Vereinfachung realer Verhältnisse dar.

**Tabelle 9.1: Überblick über verschiedene Methoden zur Bestimmung des Murgangsintensitätsfaktors.**

| Autor                                                            | Formel                                                                                |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Zhang, 1993                                                      | $IF = 1 + \frac{1 - \alpha}{[\alpha - \xi * (1 - \alpha)]}$                           |
| Hampel, 1977 und Takahashi, 1978<br>(zit. in Hungr et al., 1984) | $IF = \frac{1}{n_1 - n_0}$                                                            |
| Chen et al., 2007                                                | $IF = (1 + \phi)$<br>mit $\phi = \frac{(\gamma_c - \gamma_w)}{(\gamma_H - \gamma_c)}$ |
| Chen et al., 2012                                                | $IF = (1 + \phi) * D_C$                                                               |
| Wei et al., in. prep.                                            | $IF = 1,08 * (1 + \phi) * \frac{\gamma_c^{0,64}}{j^{0,12} * N^{0,2}}$                 |
| Tognacca, 1999                                                   | $IF = \frac{1}{1 - c_v}$                                                              |
| Takahashi, 1991                                                  | $IF = \frac{c^*}{c^* - c_v}$                                                          |
| Hübl, s.a.                                                       | $IF = \frac{1}{1 - c_v} * \frac{t_W}{t_{WG}}$                                         |
| Chen und Chuang, 2014                                            | $IF = 0,0028 * R_L^{2,4}$                                                             |
| Gregoretti et al., 2012                                          | $IF = \frac{RC}{1 - (1 - S) * c_F - c_F * \frac{S}{c}}$                               |

Viele, der in Tabelle 9.1 dargestellten Ansätze basieren auf schwierig zu erhebenden Eingangsparametern (z.B. Porosität des Ausgangsmaterials). Zusätzlich basieren einige Formeln auf empirischen Ansätzen, welche bei Verwendung auf das zu untersuchende Einzugsgebiet geeicht werden müssten.

Die am meisten verwendeten Formeln sind somit die vereinfachten Ansätze von Takahashi/Tognacca, welche einzig auf die volumetrische Feststoffkonzentration des Murganges beruhen. Im Zuge eigener Untersuchungen konnte jedoch festgestellt werden, dass diese Methoden vor allem Spitzenabflüsse von Murgängen mit einer volumetrischen Feststoffkonzentration >0,4 unterschätzen.

Mehrere Autoren beschränken die Verwendung dieser Ansätze zudem auf Murgänge, welche sich im Gerinne durch permanente Geschiebeaufnahme entwickeln (Chen und Chuang, 2014). Spitzenabflüsse von rutschungsinduzierten Murgängen werden meist vielfach unterschätzt. Vor allem bei Murgängen, welche von Rutschungen oder durch den Bruch von Verklausungen im Gerinne entstehen, kommt es meist zu Murgang-Spitzenabflüssen, welche ein Vielfaches des zugrundeliegenden Reinwasser-Spitzenabflusses sind.

Die ÖNORM-REGEL 24800, 2009 beschreibt sogar Murgangsintensitätsfaktoren in einer Größenordnung von 1,4 bis 100. Allerdings basieren diese Festlegungen auf sehr beschränkten Datengrundlagen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es somit eine bessere Datengrundlage für die Bestimmung des Murgangsintensitätsfaktors zu schaffen und die große Bandbreite näher einzuschränken. Hierzu wurden für drei Murgänge im Gadriabach Murgangsintensitätsfaktoren bestimmt (vgl. Tabelle 9.2) und diese anschließend mit den, in der Literatur beschriebenen, Murgangsintensitätsfaktoren verglichen.

**Tabelle 9.2: Bestimmte Murgangsintensitätsfaktoren für die Ereignisse am Gadriabach.**

| Murgang | Murgang-Spitzenabfluss | Reinwasser-Spitzenabfluss<br>Mittelwert der 3 Methoden | Murgangsintensitätsfaktor |
|---------|------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|
| 2011    | 11 m³/s                | 0,5 m³/s                                               | 21                        |
| 2013    | 85 m³/s                | 1,9 m³/s                                               | 45                        |
| 2014    | 37,8 m³/s              | 1,8 m³/s                                               | 21                        |

Aufgrund der fehlenden Reinwasser-Abflussmessungen im Untersuchungsgebiet war eine Kalibrierung des Niederschlag-Abfluss-Modells nicht möglich, wodurch es zu teils großen Unsicherheiten in der Bestimmung des Reinwasser-Spitzenabflusses und somit auch bei Berechnung der entsprechenden Murgangsintensitätsfaktoren kam. Allerdings wurden die ermittelten Reinwasser-Spitzenabflüsse mit drei verschiedenen Methoden plausibilisiert und somit die aufgetretene Unsicherheit eingeschränkt.

Die Zusammenführung und Auswertung der Literaturdaten und der Werte aus den eigenen Berechnungen ergab eine enorme Bandbreite des Murgangsintensitätsfaktors von 1-114. Die zu Grunde liegenden Literaturwerte basieren größtenteils auf Berechnungen, allerdings finden sich zum Teil auch Werte aus groben Abschätzungen wieder, deren Verwendung zur Ermittlung von unteren und oberen Grenzen jedoch als vertretbar erachtet wird.

Auf Basis der 92 ermittelten Murgangsintensitätsfaktoren konnte eine Trendlinie mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,7 bestimmt werden,

$$Q_M = 10,7 * Q_W^{1,02}$$

welche den von Rickenmann et al., 2003 beschriebenen Zusammenhang von  $Q_M = \sim 11 * Q_W$  bestätigt.

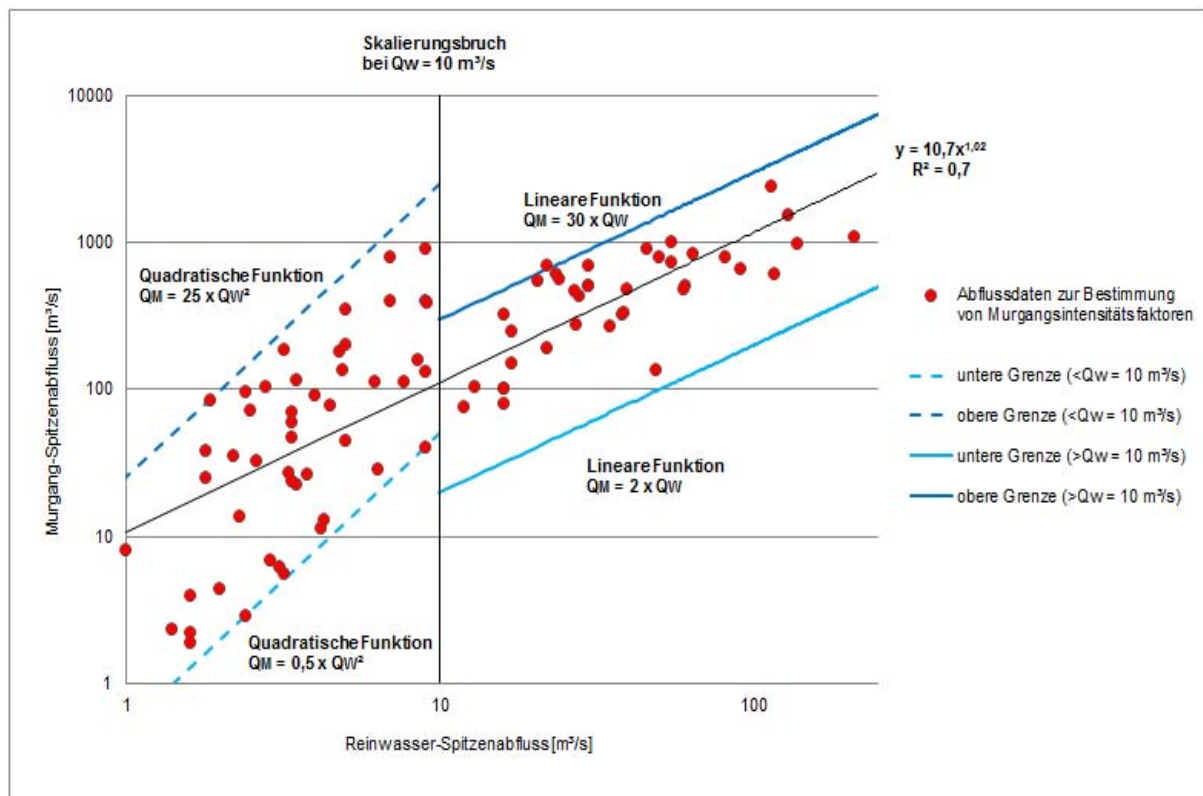
Betrachtet man nur Daten von Murgängen, welche im Alpenraum beobachtet wurden, ergibt sich folgender Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,72:

$$Q_M = 14,7 * Q_W^{1,18}$$

Auf Basis von 24 Daten konnte somit gezeigt werden, dass im Alpenraum vermutlich höhere Murgangsintensitätsfaktoren zu erwarten sind. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die Ausgangsdaten aus teils groben Abschätzungen stammen.

Für eine realitätsnahe Abschätzung des Murgangsintensitätsfaktors ist es jedoch zusätzlich wichtig die Verteilung der Datenpunkte innerhalb oberer und unterer Grenzen zu beachten.

Im Zuge der Analyse oberer und unterer Grenzen konnte bei einem Reinwasser-Spitzenabfluss von  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  ein Skalierungsbruch erkannt werden (vgl. Abbildung 9.2). Während die Grenzfunktionen unterhalb einem Reinwasser-Spitzenabfluss von  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  einer quadratischen Funktion folgen, wird der Zusammenhang über einen Reinwasser-Spitzenabfluss von  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  mit einer linearen Funktion beschrieben.



**Abbildung 9.2: Beobachtete Trendlinie sowie untere und obere Grenze des Murgangsintensitätsfaktors.**

Da es in der Literatur keinen Hinweis auf einen Skalierungsbruch gibt, können über dessen Ursache nur Vermutungen angestellt werden.

Denkbar wäre beispielsweise, dass die Daten unterhalb des Skalierungsbruches aus sehr trockenen Einzugsgebieten mit hohen Versickerungsraten (z.B. Kalkgebieten) stammen, so dass bei einem Hochwasser ein Teil des Wassers versickern kann. Kommt es jedoch zur Auslösung eines Murganges, wird das Wasser im Murgang gebunden und führt zu hohen Murgang-Spitzenabflüssen. Somit wäre das Verhältnis zwischen Reinwasser-Spitzenabfluss und Murgang-Spitzenabfluss sehr hoch, womit sich hohe Murgangsintensitätsfaktoren ergeben.

Eine weitere mögliche Erklärung könnte sein, dass die auftretenden Unsicherheiten bei der Bestimmung von Reinwasser-Spitzenabflüssen bis  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  zu den festgestellten, größeren Unterschieden der berechneten Murgangsintensitätsfaktoren führen.

Die Auswertungen ergaben folgende untere und obere Grenzen und die dazugehörigen Verteilungen:

**Tabelle 9.3: Grenzen und Verteilungen abhängig vom Reinwasser-Spitzenabfluss.**

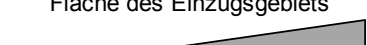
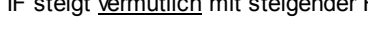
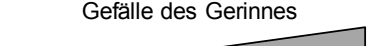
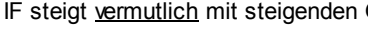
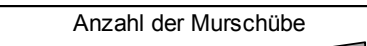
| Reinwasser-Spitzenabfluss | untere Grenze | obere Grenze | 50 % der Daten bis IF von | 90 % der Daten bis IF von |
|---------------------------|---------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| <10 m³/s                  | QM = 0,5 QW²  | QM = 25 QW²  | 14                        | 50                        |
| >10 m³/s                  | QM = 2 QW     | QM = 30 QW   | 10                        | 23                        |

Somit ist es vor allem im Bereich eines Reinwasser-Spitzenabflusses >10 m³/s gelungen, die von Chen und Chuang, 2014 beschriebene Obergrenze von 40 näher einzuschränken.

Zusätzlich wird der Murgangsintensitätsfaktor von den örtlichen Gegebenheiten (z.B. erwartete Feststoffkonzentration; Mobilisierungsintensität des Geschiebes; ...) beeinflusst, wodurch sich die Murgangsintensitätsfaktoren von verschiedenen Einzugsgebieten unterscheiden können. Somit ist eine Anpassung des Murgangsintensitätsfaktors an die örtlichen Gegebenheiten des zu untersuchenden Wildbaches notwendig.

Auf Basis von Zusatzinformationen zu den entsprechenden Murgangsintensitätsfaktoren wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit versucht, mögliche Abhängigkeiten mit typischen Murgang-Parametern abzuleiten. Aufgrund der geringen, und teilweise unsicheren Ausgangsdaten war es jedoch nur möglich vermutliche Tendenzen zu bestimmen.

Die Ergebnisse dieser Auswertungen wurden in Abbildung 9.3 zusammengefasst:

| Parameter                                                                                                                         | Murgangsintensitätsfaktor IF                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reinwasser-Spitzenabfluss $Q_W$<br>            | IF steigt bis $Q_W = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ , dann kein Einfluss<br> |
| volumetrische Feststoffkonzentration $c_v$<br> | IF steigt mit steigender $c_v$<br>                                     |
| Dichte des Murgangs<br>                        | IF steigt mit steigender Dichte<br>                                    |
| Mobilisierungsintensität des Geschiebes<br>    | IF steigt mit steigender Mobilisierungsintensität<br>                  |
| Fläche des Einzugsgebiets<br>                  | IF steigt <u>vermutlich</u> mit steigender Fläche<br>                  |
| Gefälle des Gerinnes<br>                       | IF steigt <u>vermutlich</u> mit steigenden Gefälle<br>                 |
| Murfracht<br>                                  | kein Einfluss feststellbar                                                                                                                                 |
| Anzahl der Murschübe<br>                       | kein Einfluss feststellbar                                                                                                                                 |

**Abbildung 9.3: Abhängigkeiten des Murgangsintensitätsfaktors von typischen Murgangs-Parametern.**

Die Abschätzung eines realistischen Murgangsintensitätsfaktors sollte somit auf Basis der berechneten Trendlinien und festgestellten Grenzen unter der Berücksichtigung der abgeleiteten Tendenzen erfolgen.

Ein Plausibilitätscheck mit anderen Methoden zur Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses kann die Genauigkeit der Abschätzung zudem erhöhen, sodass zuverlässige Eingangsparameter für die Dimensionierung von Schutzbauwerken und Erstellung von Gefahrenzonenplänen bestimmt werden können.

## 10 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Methode des Murgangsintensitätsfaktors ermöglicht dem Praktiker trotz Unsicherheiten und Annahmen eine datenbasierte Bestimmung des Murgang-Spitzenabflusses und erweitert somit die Anzahl der Methoden zur Beurteilung von Murgängen.

Der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, auf Basis bestimmter Murgangsintensitätsfaktoren aus aller Welt, den Murgangsintensitätsfaktor mit Hilfe von Trendlinien sowie oberen und unteren Grenzen einzuschränken und somit anwendbare Abschätzungshilfen für die Praxis zu liefern. Zudem kann die Arbeit als Grundlage für zukünftige Untersuchungen dienen.

### Was könnte im Zuge zukünftiger Arbeiten gemacht werden?

Durch weiterführende Bestimmungen von Murgangsintensitätsfaktoren (z.B. Ereignis am Lattenbach (Tirol), Ereignis am Gadriabach 2015) könnte die Ausgangs-Datenlage erweitert werden und somit vor allem die Trendlinie für den alpinen Raum mit zusätzlichen Daten hinterlegt werden. Zusätzlich könnten vermutlich die Hüllkurven näher eingeschränkt werden und die Abhängigkeiten des Murgangsintensitätsfaktors mit typischen Murgang-Parametern näher untersucht werden.

Aufgrund der umfangreichen Monitoring-Station (Radarsensoren, drei Niederschlagsmessstationen, Bestimmung des Geschiebeanteils des Murganges) und der hohen Frequenz an Murgangereignissen liefert der Gadriabach hierfür nahezu optimale Voraussetzungen. Die Installation von hydrologischen Abflussmessstationen in den entsprechenden Einzugsgebieten zur Kalibrierung des Niederschlag-Abfluss-Modelles wäre allerdings sicherlich hilfreich und würde die Datenqualität zusätzlich erhöhen.

Mittels zusätzlicher Murgangsintensitätsfaktoren wäre es zudem interessant, die verschiedenen Berechnungsansätze und Zusammenhänge zu vergleichen und zu überprüfen. Ein Vergleich erscheint jedoch aufgrund der zahlreichen, unbekannten Parameter in den verschiedenen Formeln als sehr schwierig.

Eigenen Auswertungen und Whipple, 1992 zufolge reagiert das Ausbreitungsverhalten von Murgängen sehr sensibel auf unterschiedliche Eingangshydrographen. In Hinblick auf die Bestimmung möglicher Murgang-Ganglinien und deren Auswirkungen auf das Ausbreitungsverhalten alpiner Murgänge wäre es folglich sinnvoll aus beobachteten Murgangsverläufen typische Ganglinien abzuleiten. Auf Basis dieser Auswertungen könnten die Auswirkungen des Murgangsintensitätsfaktors durch zusätzliche Modellierungen von Murgängen in unterschiedlichen Topographien untersucht werden.

Die Bestimmung eines angepassten Murgangsintensitätsfaktors und die Verwendung typischer Murgangganglinien würde folglich die Genauigkeit der Bemessungsparameter und somit die Zuverlässigkeit zukünftiger Gefahrenabschätzungen erhöhen.



# Anhang

## Anhang 1: Methoden zur Bestimmung von Murgang-Abflüssen

### Methode nach HUNGR

Die Methode nach Hungr et al., 1984 nimmt an, dass der Spitzenabfluss eines Murgangs durch einen Ausbruch von im Gerinne aufgestauten Material entsteht.

Der Abfluss kann mittels der „Dammbruch-Formel“ geschätzt werden, welche die Viskosität vernachlässigt und annimmt, dass die Welle ohne signifikante Verluste bis in den Ablagerungsbereich vordringt (Hungr et al., 1984).

$$Q = \frac{8}{27} * b * g^{\frac{1}{2}} * h_1^{\frac{3}{2}}$$

wobei:

- Q** = Abfluss des Murganges [m³/s]
- g** = Erdbeschleunigung [9,81 m/s²]
- b** = Breite des kurzzeitigen Gerinne-Aufstaus [m]
- h<sub>1</sub>** = Höhe des kurzzeitigen Gerinne-Aufstaus [m]

### Rückwärtsgerichtete Indikationsmethode

Bei der rückwärtsgerichteten Indikationsmethode werden Zeugenaussagen (lebende und stumme Zeugen) über historische Ereignisse ausgewertet. Mittels Spuren, beispielsweise Anschlaglinien, werden die Maximalabflüsse rückgerechnet und die Jährlichkeit des Ereignisses geschätzt (Zhang, 1993).

Weiters ist es möglich Spitzenabflüsse von beobachteten Murgängen über die Multiplikation der maximalen Durchflussfläche mit der Fließgeschwindigkeit, oder mittels Nachmodellierung vergangener Ereignisse zu bestimmen.

### Methoden nach MASSAD

Massad et al., 1997 (zit. in Kanji et al., s.a.) beschreibt zwei Methoden zur Bestimmung des maximalen Abflusses eines Murganges:

$$Q_M = \frac{2}{(1 - c_v)} * F_1 * I$$

wobei:

- Q<sub>M</sub>** = Maximalabfluss des Murganges [m³/s]
- c<sub>v</sub>** = volumetrische Feststoffkonzentration [-]
- F<sub>1</sub>** = Einzugsgebietsgröße [km²]
- I** = aufsummierte Regenintensität der Stunde vor dem Murgang [mm/h]

Die zweite Methode nach Massad wurde auf Basis von Daten aus Chile von Araya Moya, 1994 erstellt und durch Kanji et al., s.a. durch einige Nachrechnungen auf folgende Form weiterentwickelt:

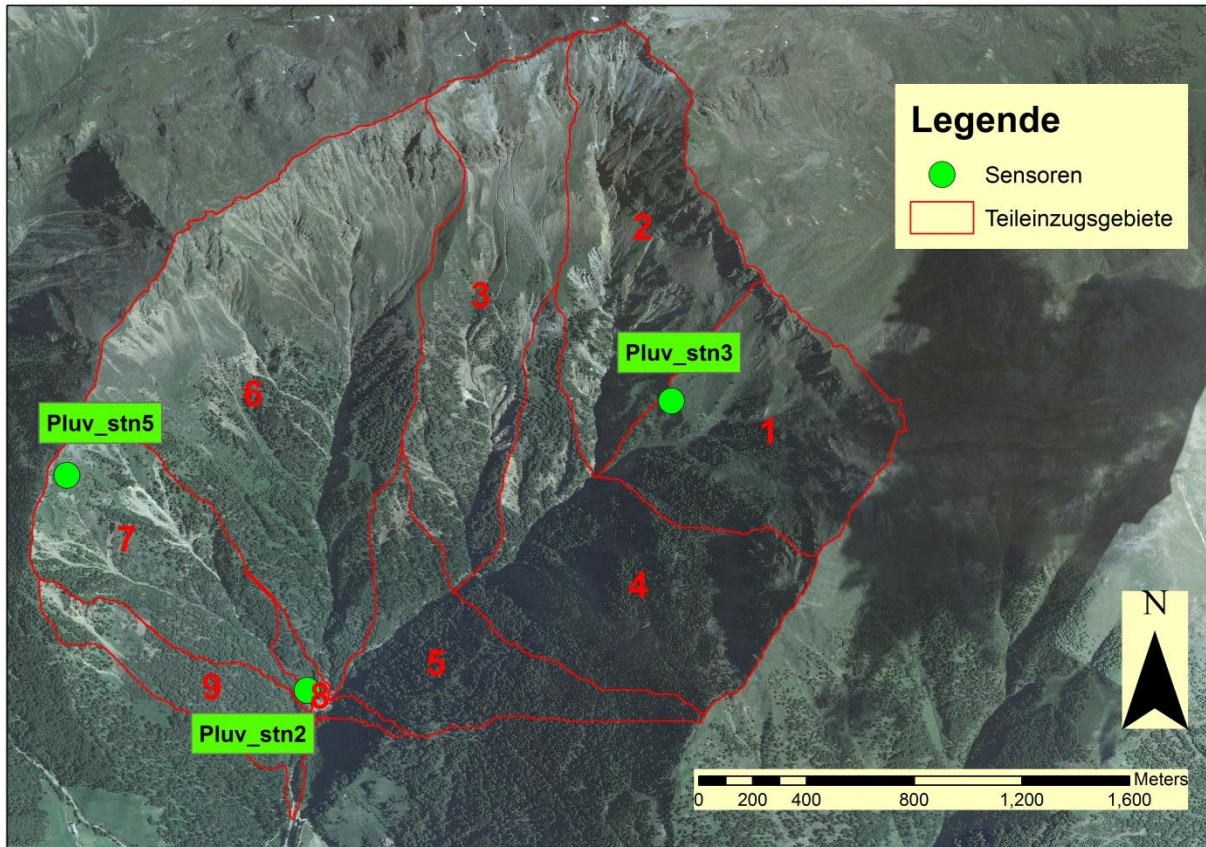
$$Q_M = 1,4 * \frac{1}{1 - c_v} * 0,85 * F_1 * I * \frac{H_1^{0,19}}{L_2^{0,59}}$$

**wobei:**

- H** = Maximale Höhendifferenz des Gerinnes [m]  
**L<sub>2</sub>** = Gesamtlänge des Gerinnes [km]

## Anhang 2: Verwendete Niederschlagsverteilungen

Zur Aufzeichnung des Niederschlages wurden von der Abteilung Wasserschutzbauten der Autonomen Provinz Bozen im Untersuchungsgebiet drei Messstationen installiert. Durch ihre flächige Verteilung im eher kleinen Einzugsgebiet, wird das Untersuchungsgebiet gut abgedeckt. Allerdings sind aufgrund technischer Probleme nicht für jeden Murgang Werte aus den drei verschiedenen Niederschlagsstationen verfügbar. Unter Berücksichtigung der geographischen Lage der Teileinzugsgebiete im Bezug zur Niederschlagsmessstation (Abbildung A.1) werden anschließend für jedes Teileinzugsgebiet entsprechende Niederschlagsverteilungen zugewiesen.



**Abbildung A. 1:** Räumliche Lage der Niederschlagsstationen in Bezug zu den Teileinzugsgebieten.

Leider werden von der Abteilung Wasserschutzbauten und von Comiti et al., 2014 teils unterschiedliche Bezeichnungen der Niederschlagsstationen verwendet. Die Vertauschung der Namen einiger Niederschlagsstationen erschwerte zudem die Zuordnung. Da in der vorliegenden Arbeit beide Bezeichnungen verwendet werden, ist in nachfolgender Tabelle ein entsprechender Vergleich angeführt:

**Tabelle A.1:** Vergleich der Bezeichnungen der Niederschlagsstationen.

| Abteilung Wasserschutzbauten | Comiti et al., 2014 |
|------------------------------|---------------------|
| Pluv_stn3                    | R1                  |
| Pluv_stn2                    | R2                  |
| Pluv_stn5                    | R3                  |

## Umrechnung der gemessenen Niederschlagsdaten

Die Niederschläge werden von den Niederschlagsstationen in der Einheit **mm/min** gemessen und aufgezeichnet. ZEMOKOST verlangt die Eingabe der Niederschlagswerte allerdings in **mm/h**. Zur Umrechnung wurde folgende Beziehung verwendet:

$$\frac{mm}{h} = \frac{mm}{min} * 60$$

Anmerkung: Für die Verwendung der Daten im ZEMOKOST müssen die nachfolgenden Niederschlagsverteilungen noch in mm/h umgerechnet werden.

## Niederschlagsverteilung für das Murgangereignis 2011

2011 waren zwei Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet im Betrieb (Pluv\_stn2; Pluv\_stn3). Den Teileinzugsgebieten wurden entsprechend ihrer räumlichen Lage zu den Niederschlagsstationen Niederschlagsverteilungen zugewiesen. Dabei wurde angenommen, dass die Niederschlagsstation PLUV\_stn3 für die Teileinzugsgebiete 1-4 charakteristisch ist, während die Niederschlagsstation PLUV\_stn2 die Teileinzugsgebiete 5-9 abbildet:

**Tabelle A.2: Niederschlagsverteilung für das Ereignis 2011.**

|                  | EZG_1     | EZG_2     | EZG_3     | EZG_4     | EZG_5     | EZG_6     | EZG_7     | EZG_8     | EZG_9     |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | Pluv_stn3 | Pluv_stn3 | Pluv_stn3 | Pluv_stn3 | Pluv_stn2 | Pluv_stn2 | Pluv_stn2 | Pluv_stn2 | Pluv_stn2 |
|                  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  |
| 05.08.2011 19:43 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 05.08.2011 19:44 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       |
| 05.08.2011 19:45 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 19:46 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 19:47 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 19:48 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 19:49 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 19:50 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 05.08.2011 19:51 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       |
| 05.08.2011 19:52 | 0         | 0         | 0         | 0         | 1,1       | 1,1       | 1,1       | 1,1       | 1,1       |
| 05.08.2011 19:53 | 0         | 0         | 0         | 0         | 1,6       | 1,6       | 1,6       | 1,6       | 1,6       |
| 05.08.2011 19:54 | 0         | 0         | 0         | 0         | 1,5       | 1,5       | 1,5       | 1,5       | 1,5       |
| 05.08.2011 19:55 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,9       | 0,9       | 0,9       | 0,9       | 0,9       |
| 05.08.2011 19:56 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,8       | 0,8       | 0,8       | 0,8       | 0,8       |
| 05.08.2011 19:57 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,6       | 0,6       | 0,6       | 0,6       | 0,6       |
| 05.08.2011 19:58 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 19:59 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 20:00 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 20:01 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 20:02 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 05.08.2011 20:03 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 05.08.2011 20:04 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 05.08.2011 20:05 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 05.08.2011 20:06 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

## Niederschlagsverteilung für das Murgangereignis 2013

Wie 2011 waren auch im Jahr 2013 aufgrund technischer Probleme nur zwei Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet im Betrieb (Pluv\_stn2; Pluv\_stn3). Identisch wie beim Murgang 2011 wurde angenommen, dass die Niederschlagsstation PLUV\_stn3 für die Teileinzugsgebiete 1-4 charakteristisch ist, während die Niederschlagsstation PLUV\_stn2 die Niederschlagsverteilung der Teileinzugsgebiete 5-9 abbildet:

Tabelle A.3: Verwendete Niederschlagsverteilung für das Murgangereignis 2013.

|                  | EZG_1     | EZG_2     | EZG_3     | EZG_4     | EZG_5     | EZG_6     | EZG_7     | EZG_8     | EZG_9     |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | PLUV_stn3 | PLUV_stn3 | PLUV_stn3 | PLUV_stn3 | PLUV_stn2 | PLUV_stn2 | PLUV_stn2 | PLUV_stn2 | PLUV_stn2 |
|                  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  |
| 18.07.2013 17:00 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:01 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:02 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:03 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:04 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:05 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:06 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:07 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:08 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:09 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:10 | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:11 | 0,4       | 0,4       | 0,4       | 0,4       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:12 | 0,7       | 0,7       | 0,7       | 0,7       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:13 | 1,1       | 1,1       | 1,1       | 1,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:14 | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 0,4       | 0,4       | 0,4       | 0,4       | 0,4       |
| 18.07.2013 17:15 | 1,6       | 1,6       | 1,6       | 1,6       | 0,8       | 0,8       | 0,8       | 0,8       | 0,8       |
| 18.07.2013 17:16 | 1,9       | 1,9       | 1,9       | 1,9       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       |
| 18.07.2013 17:17 | 1,5       | 1,5       | 1,5       | 1,5       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:18 | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:19 | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:20 | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 1,4       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:21 | 1,6       | 1,6       | 1,6       | 1,6       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:22 | 1,3       | 1,3       | 1,3       | 1,3       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:23 | 1,2       | 1,2       | 1,2       | 1,2       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:24 | 1,1       | 1,1       | 1,1       | 1,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:25 | 0,7       | 0,7       | 0,7       | 0,7       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       |
| 18.07.2013 17:26 | 0,5       | 0,5       | 0,5       | 0,5       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:27 | 0,6       | 0,6       | 0,6       | 0,6       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:28 | 0,5       | 0,5       | 0,5       | 0,5       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:29 | 0,4       | 0,4       | 0,4       | 0,4       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       |
| 18.07.2013 17:30 | 0,3       | 0,3       | 0,3       | 0,3       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:31 | 0,3       | 0,3       | 0,3       | 0,3       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:32 | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:33 | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:34 | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:35 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:36 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:37 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:38 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:39 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:40 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:41 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:42 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:43 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:44 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:45 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:46 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:47 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:48 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:49 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:50 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:51 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:52 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:53 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:54 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:55 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:56 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:57 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 17:58 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18.07.2013 17:59 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 18.07.2013 18:00 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |

### Niederschlagsverteilung für das Murgangsereignis 2014:

2014 waren alle drei Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet im Betrieb (Pluv\_stn2; Pluv\_stn3; Pluv\_stn5). Dabei wurde angenommen, dass die Niederschlagsstation PLUV\_stn3 für die Teileinzugsgebiete 1-4 charakteristisch ist, während die Niederschlagsstation PLUV\_stn2 die Niederschlagsverteilung der Teileinzugsgebiete 5, 8 und 9 abbildet. Die zusätzliche Niederschlagsstation PLUV\_stn5 befindet sich im Teileinzugsgebiet 7; somit wurden die Daten dieser Niederschlagsstation für die Teileinzugsgebiete 6 und 7 verwendet (vgl. Tabelle A.4).

**Tabelle A.4: Verwendete Niederschlagsverteilung für das Murgangsereignis 2014.**

|                  | EZG_1     | EZG_2     | EZG_3     | EZG_4     | EZG_5     | EZG_6     | EZG_7     | EZG_8     | EZG_9     |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | PLUV_stn3 | PLUV_stn3 | PLUV_stn3 | PLUV_stn3 | PLUV_stn2 | PLUV_stn5 | PLUV_stn5 | PLUV_stn2 | PLUV_stn2 |
|                  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  | [mm/min]  |
| 15.07.2014 15:47 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:48 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:49 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:50 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:51 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:52 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:53 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:54 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:55 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:56 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:57 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:58 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 15:59 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:00 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:01 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:02 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:03 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:04 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:05 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:06 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:07 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:08 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:09 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:10 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:11 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:12 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:13 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:14 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:15 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:16 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:17 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:18 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:19 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:20 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:21 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:22 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:23 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:24 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:25 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:26 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:27 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       |
| 15.07.2014 16:28 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0,1       | 0,1       | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:29 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15.07.2014 16:30 | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |

|                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 15.07.2014 16:31 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0   | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 16:32 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 16:33 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0   | 0   | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 16:34 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,4 |
| 15.07.2014 16:35 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0   | 0   | 0,3 | 0,3 |
| 15.07.2014 16:36 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,9 | 0,1 | 0,1 | 0,9 | 0,9 |
| 15.07.2014 16:37 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0,6 |
| 15.07.2014 16:38 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 0,5 |
| 15.07.2014 16:39 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0   | 0   | 0,5 | 0,5 |
| 15.07.2014 16:40 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,3 |
| 15.07.2014 16:41 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0   | 0   | 0,4 | 0,4 |
| 15.07.2014 16:42 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0   | 0   | 0,4 | 0,4 |
| 15.07.2014 16:43 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0   | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 16:44 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0   | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 16:45 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0   | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 16:46 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:47 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0   | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 16:48 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:49 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:50 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:51 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 16:52 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:53 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:54 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 16:55 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 16:56 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:57 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 16:58 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 16:59 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:00 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:01 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:02 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:03 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 17:04 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 17:05 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 17:06 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 17:07 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 17:08 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 15.07.2014 17:09 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,9 | 0,2 | 0,2 | 0,9 | 0,9 |
| 15.07.2014 17:10 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 1   | 0,1 | 0,1 | 1   | 1   |
| 15.07.2014 17:11 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| 15.07.2014 17:12 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,2 | 0,2 | 0,8 | 0,8 |
| 15.07.2014 17:13 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,7 |
| 15.07.2014 17:14 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,6 |
| 15.07.2014 17:15 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 |
| 15.07.2014 17:16 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 15.07.2014 17:17 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,6 |
| 15.07.2014 17:18 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| 15.07.2014 17:19 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| 15.07.2014 17:20 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 17:21 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 17:22 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0   | 0   | 0,4 | 0,4 |
| 15.07.2014 17:23 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| 15.07.2014 17:24 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0   | 0   | 0,3 | 0,3 |
| 15.07.2014 17:25 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,3 |
| 15.07.2014 17:26 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,7 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 0,7 |
| 15.07.2014 17:27 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,3 |
| 15.07.2014 17:28 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 17:29 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 17:30 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:31 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 17:32 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:33 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:34 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 |
| 15.07.2014 17:35 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:36 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:37 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:38 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:39 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:40 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:41 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:42 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:43 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15.07.2014 17:44 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

## Anhang 3: Zusammenfassende Auflistung der erhobenen Murgangsintensitätsfaktoren

**Tabelle A.5: Auflistung aller erhobenen Murgangsintensitätsfaktoren.**

| Quelle                                         | Ereignis         | Q <sub>M</sub> | Q <sub>W</sub> | IF  | Anmerkungen |
|------------------------------------------------|------------------|----------------|----------------|-----|-------------|
|                                                |                  | [m³/s]         | [m³/s]         | [-] |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Val Varuna       | 400            | 7              | 57  |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Val Varuna       | 800            | 7              | 114 |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Val da Plaunca   | 400            | 9              | 44  |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Val da Plaunca   | 900            | 9              | 100 |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Val Zavaglia     | 500            | 30             | 17  |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Val Zavaglia     | 700            | 30             | 23  |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Minstigtal       | 150            | 17             | 9   |             |
| Zimmermann und Rickenmann, 1992                | Minstigtal       | 250            | 17             | 15  |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1972   | 100            | 16             | 6   |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1973   | 100            | 16             | 6   |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1973   | 80             | 16             | 5   |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1973   | 75             | 12             | 6   |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1975   | 430            | 28             | 15  |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1975   | 320            | 16             | 20  |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1976   | 45             | 5              | 9   |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1978   | 130            | 9              | 14  |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1978   | 40             | 9              | 4   |             |
| Rickenmann et al., 2003                        | Chemolgan 1991   | 190            | 22             | 9   |             |
| Hübl, 2009                                     | Lattenbach       | 200            | 5              | 40  |             |
| Hübl, 2009                                     | Lattenbach       | 350            | 5              | 70  |             |
| Hübl, s.a.                                     | Wartschenbach    | 105            | 13             | 8   |             |
| König, 2006                                    | Schesatobel 2006 | 6              | 0,8            | 8   |             |
| König, 2006                                    | Schesatobel 2006 | 5              | 0,8            | 6   |             |
| König, 2006                                    | Schesatobel 2006 | 8              | 1,0            | 8   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Bayi             | 657            | 90,8           | 7   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Dagan            | 321            | 38,5           | 8   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Xiaogan          | 504            | 60,5           | 8   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Xiaowan          | 277            | 27,2           | 10  |             |
| Wei et al., in prep.                           | Yangjia          | 1097           | 210,2          | 5   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Gangouzi         | 802            | 82,0           | 10  |             |
| Wei et al., in prep.                           | Huangnidi        | 983            | 138,0          | 7   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Guanmen          | 613            | 117,0          | 5   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Xijia            | 334,3          | 38,8           | 9   |             |
| Wei et al., in prep.                           | Huashiban        | 266            | 35,0           | 8   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 0,8            | 0,7            | 1   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 2,3            | 1,4            | 2   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 2,2            | 1,6            | 1   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 1,9            | 1,6            | 1   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 2,9            | 2,4            | 1   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 3,9            | 1,6            | 2   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 4,4            | 2,0            | 2   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 6,9            | 2,9            | 2   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 6,2            | 3,1            | 2   |             |
| Ou et al., 1991 (zit.in Tsuchiya et al., 1996) | Ichinosawa       | 11,3           | 4,2            | 3   |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Hunshui Gully    | 135            | 49             | 3   |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Name             | 908,0          | 45,7           | 20  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Name             | 186,0          | 3,2            | 58  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Mochiki          | 115,0          | 3,5            | 33  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Mochiki          | 96,5           | 2,4            | 40  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Mochiki          | 32,1           | 2,6            | 12  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Mochiki          | 28,8           | 6,4            | 5   |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Fusurato         | 25,1           | 0,5            | 50  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Arimura          | 77,5           | 4,5            | 17  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 179,0          | 4,8            | 37  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 137,0          | 4,9            | 28  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 103,0          | 2,8            | 37  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 111,0          | 6,2            | 18  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 72,0           | 2,5            | 29  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 35,4           | 2,2            | 16  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 25,1           | 1,8            | 14  |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 26,2           | 3,8            | 7   |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 12,8           | 4,3            | 3   |             |
| Mizuyama et al., 1992                          | Yakedake         | 5,6            | 3,2            | 2   |             |

|                                                                         |                                 |        |       |     |                     |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|-------|-----|---------------------|
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 389,0  | 9,1   | 43  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 545,0  | 20,7  | 26  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 703,0  | 22,1  | 32  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 612,0  | 23,6  | 26  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 561,0  | 24,1  | 23  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 462,0  | 26,9  | 17  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 485,0  | 39,8  | 12  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 786,0  | 50,2  | 16  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 1009,0 | 54,7  | 18  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 727,0  | 55,0  | 13  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 838,0  | 64,3  | 13  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 483,0  | 60,0  | 8   |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 2430,0 | 114,0 | 21  |                     |
| Wu et al., 1990 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                         | Jiangjia Gully, China           | 1540,0 | 129,0 | 12  |                     |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 600,0  | 76,0  | 8   | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 501,0  | 70,0  | 7   | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 563,0  | 64,0  | 9   | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 486,0  | 50,0  | 10  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 459,0  | 32,9  | 14  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 402,0  | 30,9  | 13  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 373,0  | 33,1  | 11  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 233,0  | 28,1  | 8   | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 258,0  | 25,1  | 10  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 331,0  | 23,0  | 14  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 342,0  | 23,0  | 15  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 364,0  | 24,0  | 15  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 353,0  | 20,9  | 17  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 207,0  | 7,9   | 26  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 227,0  | 6,6   | 34  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 232,0  | 6,8   | 34  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 226,0  | 9,0   | 25  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 242,0  | 9,0   | 27  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 250,0  | 9,2   | 27  | Vergleich mit HQ200 |
| VanDine, 1985 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                           | Howe Sound, British Columbia    | 766,0  | 108,0 | 7   | Vergleich mit HQ200 |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                      | Dolomites Mountains, Italy      | 69,5   | 3,4   | 20  |                     |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                      | Dolomites Mountains, Italy      | 59,7   | 3,4   | 18  |                     |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                      | Dolomites Mountains, Italy      | 46,6   | 3,4   | 14  |                     |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                      | Dolomites Mountains, Italy      | 27,2   | 3,3   | 8   |                     |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                      | Dolomites Mountains, Italy      | 22,5   | 3,5   | 6   |                     |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014)                      | Dolomites Mountains, Italy      | 23,5   | 3,4   | 7   |                     |
| Četina et al., 2006; Mikoš et al., 2007 (zit. in Chen und Chuang, 2014) | Log Pod Mangartom, Slovenia     | 3000,0 | 77,0  | 39  | Vergleich mit HQ100 |
| Chen und Chuang, 2014                                                   | XKD Gully                       | 11,4   | 1,9   | 6   |                     |
| Chen und Chuang, 2014                                                   | HSX Gully                       | 109,2  | 7,8   | 14  |                     |
| Chen und Chuang, 2014                                                   | SXK Gully                       | 122,4  | 6,8   | 18  |                     |
| Chen et al., 2007                                                       | Midui Gully                     | 2472,8 | 1175  | 2   |                     |
| Kanji et al., s.a.                                                      | Main Tributary of Pedras Stream | 90     | 4     | 23  |                     |
| Janu et al., s.a.                                                       | Lorenzertbach                   | 500    | 30    | 17  |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 493,0  | 58,5  | 8   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 293,0  | 43,6  | 7   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 318,0  | 35,3  | 9   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 213,0  | 21,7  | 10  |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 192,0  | 65,1  | 3   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 160,0  | 21,6  | 7   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 131,0  | 24,3  | 5   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 133,0  | 38,1  | 3   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 107,0  | 52,5  | 2   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 91,7   | 51,1  | 2   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 64,3   | 63,7  | 1   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 55,0   | 47,6  | 1   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 51,2   | 55,4  | 1   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 40,9   | 43,0  | 1   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 56,7   | 31,5  | 2   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 62,7   | 21,8  | 3   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 11,9   | 44,2  | 0   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 9,9    | 21,4  | 0   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 21,8   | 22,3  | 1   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 31,9   | 22,2  | 1   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 63,1   | 11,2  | 6   |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 104,0  | 7,0   | 15  |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 10,1   | 1,0   | 10  |                     |
| Mizuyama et al., 1992                                                   | Nojiri                          | 157,0  | 0,5   | 314 |                     |
| Auswertungen im Zuge der vorliegenden Arbeit                            | Gadria 2011                     | 11,0   | 0,5   | 21  |                     |
| Auswertungen im Zuge der vorliegenden Arbeit                            | Gadria 2013                     | 85     | 1,9   | 45  |                     |
| Auswertungen im Zuge der vorliegenden Arbeit                            | Gadria 2014                     | 37,8   | 1,8   | 21  |                     |

## Anhang 4: Ausgangsdaten für die Analyse der Abhängigkeiten

Tabelle A.6: Ausgangsdaten für die Auswertung von Abhängigkeiten.

| Autor                                              | Ereignis                        | Reinwasser-Abfluss<br>m³/s | Murgang-Abfluss<br>m³/s | Murgangintensitätsfaktor<br>[.] | Volumen<br>m³ | cv<br>[.] | EZGB-Fläche<br>km² | Schübe | Bachgefälle<br>[%] | Auslöser                       |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------|-----------|--------------------|--------|--------------------|--------------------------------|
| Hübl, s.a.                                         | Wartschenbach                   | 13                         | 105                     | 8                               | 50000         | 0.46      | 2,6 *              |        |                    | permanente Geschiebeaufnahme * |
| Hübl, 2009                                         | Lattenbach                      | 5                          | 200                     | 40                              |               |           | 7 *                |        |                    |                                |
| Hübl, 2009                                         | HSX Gully                       | 5                          | 350                     | 70                              |               |           | 7 *                |        |                    |                                |
| Chen und Chang, 2014                               | Chen und Chang, 2014            | 7.8                        | 109.2                   | 14                              | 800000        | 0.6       | 0.341              |        |                    | Rutschung                      |
| Chen und Chang, 2014                               | SXK Gully                       | 6.8                        | 122.4                   | 18                              | 950000        | 0.57      | 0.297              |        |                    | Rutschung                      |
| Chen und Chang, 2014                               | XKD Gully                       | 1.9                        | 11.4                    | 6                               | 75000         | 0.6       | 0.083              |        |                    | Rutschung                      |
| Kanji et al., s.a.                                 | Main Tributary of Pedras Stream | 4                          | 90                      | 23                              | 16000         |           | 2.64               |        | 27                 | Dammbruch                      |
| Chen et al., 2007                                  | Midui Gully                     | 1175                       | 2472.8                  | 2                               |               |           | 117.5              |        |                    |                                |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Vauna                           | 7                          | 400                     | 57                              | 200000        |           | 5 **               |        | 37 **              | Rutschung/Verflüssigung ***    |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Vauna                           | 7                          | 800                     | 114                             | 200000        |           |                    |        | 37 **              | Rutschung/Verflüssigung ***    |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Val Plaurica                    | 9                          | 400                     | 44                              | 250000        |           |                    |        | 35 **              | Rutschung/Verflüssigung ***    |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Val Plaurica                    | 9                          | 900                     | 100                             | 30000         |           |                    |        | 35 **              |                                |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Val Zavrägia                    | 30                         | 500                     | 17                              | 30000         |           |                    |        |                    |                                |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Val Zavrägia                    | 30                         | 700                     | 23                              | 30000         |           |                    |        |                    |                                |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Minsigertal                     | 17                         | 150                     | 9                               | 30000         |           |                    |        |                    |                                |
| Zimmermann und Rickemann, 1992                     | Minsigertal                     | 17                         | 250                     | 15                              | 30000         |           |                    |        |                    |                                |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1972                  | 16                         | 100                     | 6                               | 41800         | 0.72      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1973                  | 16                         | 80                      | 5                               | 163100        | 0.75      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1973                  | 12                         | 75                      | 6                               | 163100        | 0.75      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1973                  | 16                         | 100                     | 6                               | 163100        | 0.75      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1975                  | 28                         | 430                     | 15                              | 71500         | 0.79      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1975                  | 16                         | 320                     | 20                              | 71500         | 0.79      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1976                  | 5                          | 45                      | 9                               | 22300         | 0.46      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1978                  | 9                          | 40                      | 4                               | 17700         | 0.80      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1978                  | 9                          | 130                     | 14                              | 17700         | 0.80      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Rickennan et al., 2003                             | Chernogan 1991                  | 22                         | 190                     | 9                               | 173000        | 0.84      |                    |        | 27                 | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Mizuyama et al., 1992                              | Hunshui Gully                   | 49                         | 135                     | 3                               |               |           |                    |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 0.7                        | 0.8                     | 1                               |               | 0.65      | 4.5                |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 1.6                        | 1.9                     | 1                               |               | 0.19      | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 2.4                        | 2.9                     | 1                               |               | 0.2       | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 1.6                        | 2.2                     | 1                               |               | 0.3       | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 1.4                        | 2.3                     | 1                               |               | 0.4       | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 3.1                        | 6.2                     | 2                               |               | 0.5       | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 2.0                        | 4.4                     | 2                               |               | 0.55      | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 2.9                        | 6.9                     | 2                               |               | 0.57      | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 1.6                        | 3.9                     | 2                               |               | 0.6       | 0.72               |        |                    |                                |
| Ou et al., 1991 (zit. in Tsuchiya et al., 1996)    | Ichnosawa                       | 4.2                        | 11.3                    | 3                               |               | 0.62      | 0.72               |        |                    |                                |
| König, 2006                                        | Schesatobel 2006                | 0.8                        | 6                       | 8                               | 1300          | 0.54      |                    | 3      |                    | permanente Geschiebeaufnahme   |
| König, 2006                                        | Schesatobel 2006                | 0.8                        | 5                       | 6                               | 1300          | 0.54      |                    | 3      |                    | permanente Geschiebeaufnahme   |
| König, 2006                                        | Schesatobel 2006                | 1                          | 8                       | 8                               | 1300          | 0.54      |                    | 3      |                    | permanente Geschiebeaufnahme   |
| Janu et al., s.a                                   | Lorenzobach                     | 30                         | 500                     | 17                              | 135000        |           | 5.76               | 1      |                    |                                |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014) | Dolomites Mountains, Italy      | 3.4                        | 69.5                    | 20                              |               |           | 0.3 ****           |        | 32 ****            |                                |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014) | Dolomites Mountains, Italy      | 3.4                        | 59.7                    | 18                              |               |           | 0.3 ****           |        | 32 ****            |                                |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014) | Dolomites Mountains, Italy      | 3.4                        | 46.6                    | 14                              |               |           | 0.3 ****           |        | 32 ****            |                                |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014) | Dolomites Mountains, Italy      | 3.3                        | 27.2                    | 8                               |               |           | 0.3 ****           |        | 32 ****            |                                |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014) | Dolomites Mountains, Italy      | 3.5                        | 22.5                    | 6                               |               |           | 0.3 ****           |        | 32 ****            |                                |
| Berti et al., 1999 (zit. in Chen und Chuang, 2014) | Dolomites Mountains, Italy      | 3.4                        | 23.5                    | 7                               |               |           | 0.3 ****           |        | 32 ****            |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Bayl                            | 90.8                       | 657                     | 7                               |               |           |                    |        | 3.7                |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Degan                           | 38.5                       | 321                     | 8                               |               |           |                    |        | 5.1                |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Xiaogan                         | 60.5                       | 504                     | 8                               |               |           |                    |        | 5.7                |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Xiaowan                         | 27.2                       | 277                     | 10                              |               |           |                    |        | 5                  |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Yanqia                          | 210.2                      | 1097                    | 5                               |               |           |                    |        | 2.1                |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Gangouzi                        | 82.0                       | 802                     | 10                              |               |           |                    |        | 3.3                |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Huangnidi                       | 138.0                      | 983                     | 7                               |               |           |                    |        | 2                  |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Guamen                          | 117.0                      | 613                     | 5                               |               |           |                    |        | 3                  |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Xijia                           | 38.8                       | 334.3                   | 9                               |               |           |                    |        | 3.3                |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Huashiban                       | 35.0                       | 266                     | 8                               |               |           |                    |        | 4.2                |                                |
| Wei et al., in prep.                               | Gadria 2011                     | 0.5                        | 11.0                    | 21                              |               |           |                    |        | 25.5               | Verkläusung                    |
| Wei et al., in prep.                               | Gadria 2013                     | 1.9                        | 85                      | 45                              |               |           |                    |        | 25.5               | Verkläusung                    |
| Wei et al., in prep.                               | Gadria 2014                     | 1.8                        | 37.8                    | 21                              |               |           |                    |        | 25.5               | Verkläusung                    |
| Anmerkung:                                         |                                 |                            |                         |                                 |               |           |                    |        |                    |                                |
| * Hübl et al., 2002                                |                                 |                            |                         |                                 |               |           |                    |        |                    |                                |
| ** Rickennan und Zimmermann, 1993                  |                                 |                            |                         |                                 |               |           |                    |        |                    |                                |
| *** Bundesamt für Wasserwirtschaft, 1991           |                                 |                            |                         |                                 |               |           |                    |        |                    |                                |
| **** Berti et al., 1999                            |                                 |                            |                         |                                 |               |           |                    |        |                    |                                |

## Literaturverzeichnis

- ABTEILUNG WASSERSCHUTZBAUTEN, 2015. Daten der Messstation am Gadriabach - Vinschgau. Autonome Provinz Bozen - Südtirol.
- ABTEILUNG WASSERSCHUTZBAUTEN, 2015b. Ereignischronik Gadriabach. Autonome Provinz Bozen – Südtirol.
- ARAI, M.; HÜBL, H. and KAITNA, R., 2013. Occurrence conditions of roll waves for the three grain-fluid models and comparison with results from experiments and field observation. *Geophysical Journal International*, 195, Issue 3, S.1464-1480.
- ARAYA MOYA, V., 1994. Génesis de aluviones en la costa de zonas desérticas. 1st Panamer Symposium Landslides, Guayaquil, S. 186-200.
- ARMANINI, A., 1999. Dinamica delle colate di detriti. Atti del Convegno „Previsione e prevenzione di movimenti franose rapidi“, Trento 17-18-19 giugno 1999, GEAM, Torino, S. 207-221.
- BERGMEISTER, K.; SUDA, J.; HÜBL, J. und RUDOLF-MIKLAU, F., 2008. Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Beton-Kalender 2008: Konstruktiver Wasserbau - Erdbebensicheres Bauen. Berlin: Ernst & Sohn.
- BERTI, M.; GENEVOIS, R.; SIMONI, A. and TECCA, P.R., 1999. Field observation of a debris flow event in the Dolomites. *Geomorphology*, 29, S.265-271.
- BOVIS, M. J. and JAKOP, M., 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, S. 1039-1054.
- ČETINA, M.; RAJAR, R.; HOJINK, T.; ZAKRAJŠEK, M.; KRZYK, M. and MIKOŠ, M., 2006. Case Study: Numerical Simulation of Debris Flow below Stože, Slovenia. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, S.121-130.
- CHEN, J. C. and CHUANG, M. R., 2014. Discharge of landslide-induced debris flows: case studies of Typhoon Morakot in southern Taiwan. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 14, S. 1719-1730.
- CHEN, X.; CUI, P.; YOU, Y. and LIU, J., 2012. Post-earthquake changes and prediction of debris flow scales in Subao River Valley, Beichuan County, Sichuan Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 65, S. 995-1003.
- CHEN, X. Q.; CUI, P.; CHEN, N. S. and GARDNER, J., 2007. Calculation of discharge of debris flows caused by moraine-dam failure at Midui gully, Tibet, China. *Iranian Journal of Science & Technology*, 31 (B2), S. 195-207.
- CHINA, 2006. Industry standard of geology and mineral resources of the People's Republic of China DZ/T 020-2006, Debris flow disaster prevention engineering exploration norms.
- COMITI, F.; MARCHI, L.; MACCONI, P.; ARATTANO, M.; BERTOLDI, G.; BORGA, M.; BRARDINONI, F.; CAVALLI, M.; D'AGOSTINO, V.; PENNA, D. and THEULE, J., 2014. A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadia basin. *Natural hazards*, 73, S. 1175-1198.
- COSTA, J. E., 1984. Physical Geomorphology of Debris Flows. In: COSTA, J.E. and FLEISHER, P.J., Hrsg. *Developments and Applications of Geomorphology*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, S. 268-317.

- COSTA, J. E. and SCHUSTER, R. L., 1988. The formation and failure of natural dams. Geological Society of America Bulletin, 100, S. 1054-1068.
- DVWK, 1984. Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft. Hamburg: Parey.
- DYCK, S. und PESCHKE, G., 1995. Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- FISCHER, K., 1966. Die Murkegel des Vinschgaues. In: Der Schlern, 40, S. 24-33.
- FLEISCH, M., 2012. Physikalische Modellversuche zur Optimierung der Geschieberückhaltesperre am Gadriabach (Vinschgau/Südtirol). Masterarbeit. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- FLEISCHER, G., 2011. Hochwasser und Murgänge in kleinen alpinen Einzugsgebieten - Bedingungen, Ereignisdatenzusammenhang und menschliche "Ohnmacht". In: Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 113-128.
- FLIRI, F., 1975. Das Klima der Alpen im Raume von Tirol. Innsbruck: Univ. Verlag Wagner.
- GIUS, S., 1987. Beurteilung des Bachzustandes und der Gefährdungssituation im Gadriabach zum Zweck der Herstellung eines generellen Projektes. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien.
- GOSTNER, W., 2002. Integrale Analyse eines murfähigen Wildbaches anhand einer Fallstudie. Abschlussarbeit zum Nachdiplomstudium. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- GREGORETTI, C.; ADAMS, M. S.; HAGEN, K.; LAIGLE, D.; LIÉBAULT, F.; DEGETTO, M. ANDRICH, A. and TIRANTI, D., 2012. Forecast System Guidelines - Debris Flow. Guidelines for the implementation of Forecast System against debris flow hazard (WP6). Projekt Alpine Space - Paramount.
- HAEBERLI, D.; RICKENMANN, D. und ZIMMERMANN, M., 1991. Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen. Murgänge. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, 4, S. 77-88.
- HAMPEL, R., 1977. Geschiebewirtschaft in Wildbächen. Zeitschrift des Vereins der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs, 4, S. 3-34.
- HEGG, C.; RICKENMANN, D. und FORSTER, F., 2001. Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten. Bulletin angewandte Geologie, 6, S. 85-97.
- HEMUND, C.; MARKART, G.; KOHL, B.; DOBMANN, J. und WEINGARTNER, R., 2011. Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten bei konvektiven Starkregen - Evaluation der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) für Schweizerische Einzugsgebiete. BFW-Dokumentation 12, Wien.
- HÜBL, J., 2012. Anwendungsbereich und Grenzen der Prozessmodellierung von gravitativen Naturgefahren in Praxis und Wissenschaft. Wildbach- und Lawinenverbau, 1, 76. Jg (H.169), S.18-27.
- HÜBL, J.; FLEISCH, M.; CHIARI, M. und KAITNA, R., 2012. Physikalische Modellversuche zur Optimierung der Geschieberückhaltesperre am Gadriabach (Vinschgau, Südtirol). IAN Report 144, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur. Wien.
- HÜBL, J.; GANAHL, E.; MOSER, M. und SCHNETZER, I., 2002. Dokumentation Wartschenbach. WSL Report 52. Universität für Bodenkultur. Wien. (unveröffentlicht).

- HÜBL, J.; HOCHSCHWARZER, M., SEREINIG, N. und WÖHRER-ALGE M., 2011. Alpine Naturgefahren. Ein Handbuch für Praktiker. Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Voralberg.
- HÜBL, J., s.a. Abschätzung von Spitzenabflüssen in Wildbächen. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur. Wien. (Institutsinterner Bericht, unveröffentlicht).
- HÜBL, J., 2009. Hochwässer in Wildbacheinzugsgebieten. Wiener Mitteilungen, 216, S. 45-58.
- HUNGR, O.; MORGAN, G. C. and KELLERHALS, R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal, 21, S. 663-677.
- HYDRAULIC DIVISION, 1971. Hydrology Manual. Hydraul Div LA County Flood Control District. Los Angeles. California.
- HYDROGRAPHISCHES AMT, 2015. Monatliche und jährliche Niederschlagsmengen der Station Schlanders. Autonome Provinz Bozen – Südtirol.
- IZZARD, C. F., 1946. Hydraulics of runoff from developed surfaces. Proc. Highway Research Board, 26, S. 129-150.
- JÄGGI, M. and PELLANDINI, S., 1993. Torrent check dams as a control measure for debris flows. In: ARMANINI, A. and MASANORI, M., (eds.). Recent Developments on debris flows, Berlin: Springer Verlag.
- JANU, S.; MEHLHORN, S. und MOSER, M., s.a. Ereignisdokumentation und Analyse des Ereignisses vom 21. Juli 2012 in St. Lorenzen. Unter Mitarbeit von Institut für Alpine Naturgefahren (BOKU), M. Fischlschweiger und Geologische Bundesanstalt, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Lebensministerium: Wildbach- und Lawinenverbauung.
- KANJI, M. A.; MASSAD, F. and CRUZ, P. T., 2000. Debris flows in areas of residual soils: occurrence and characteristics. Introductory Report Lecture, International Workshop on Occurrence and Mechanism of Flows in Natural Slopes and Earth fills. Iw-Flows 2003. Sorrento: Associazione Geotecnica Italiana 2, S.1-11.
- KARNER, W., 2014. Abschätzung der Oberflächenabflussbeiwerte im zeitgeschichtlichen Vergleich am Wartschenbach. Masterarbeit. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur, Wien.
- KLEBINDER, K.; KOHL, B.; MARKART, G.; MEIßL, G., und SORTIER, B., 2014. Hochwasserabfluss in alpinen Einzugsgebieten - hydrologische Standortsfaktoren und deren Bewertung. In: Bericht 4. Umweltökologisches Symposium am LFZ Raumberg-Gumpenstein, S. 37-42.
- KOHL, B., 2011. Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Dissertation. Leopold Franzens Universität - Innsbruck.
- KOHL, B. und MARKART, G., 2010. Von der Starkregensimulation zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen kleiner Einzugsgebiete. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, (28.10), S. 157-170.
- KOHL, B. und STEPANEK, L., 2005. ZEMOKOST - neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. BFW-Praxisinformation, 8, S. 21-22.

- KÖNIG, U., 2006. Real Scale Murenversuche im Schesatobel. Diplomarbeit. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur, Wien.
- LORENZ, P. und SKODA, G., 2000. Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ( $D < 12$  Stunden) mit inadäquaten Daten. In: Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 80, S. 1-24.
- MACCONI, P., 2015. Schriftliche Mitteilung (E-Mail) vom 15.06.2015. Abteilung Wasserschutzbauten. Autonome Provinz Bozen – Südtirol.
- MANIAK, U., 2010. Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 6. Auflage. Heidelberg-Dordrecht-London-New York: Springer Verlag.
- MARINGER, F., 2013. Hochwasserschutzkonzept Haidener Wildbäche. Masterarbeit. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur, Wien.
- MARKART, G.; KOHL, B. und KLEBINDER, K., 2014. Wildbachprozesse: Hochwasser, Wirkungen des Waldes und Maßnahmen in der Fläche. BFW-Praxisinformation, 34, S. 14-19.
- MARKART, G.; KOHL, B.; SCHAUER, T.; SORTIER, B.; BUNZA, G. und STERN, R., 2004a. Eine einfache Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen. Internationales Symposium INTERPRAEVENT Riva-Trient, Tagungspublikation, Band 2, S. 89-100.
- MARKART, G.; KOHL, B.; SORTIER, B.; SCHAUER, T.; BUNZA, G. und STERN, R., 2004b. Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation, Schriftenreihe des Bundesamt und Forschungszentrum für Wald 3, Wien.
- MASSAD, F.; CRUZ, P. T.; KANJI, M. A. and ARAUJO FILHO, H. A., 1997. Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments. 2nd Panamerican Symposium on Landslides and 20 Congr. Brasil. Estab. Encostas. Second Panamerican Symposium on Landslides, Proceedings, S. 213-222.
- MIKOŠ, M., FAZARINC, R., and MAJES, B., 2007. Delineation of risk area in Log pod Mangartom due to debris flow from the Stože landslide, Acta geographica Slovenica, 47, 171-198.
- MIZUYAMA, T.; KOBASHI, S. and OU, G., 1992. Prediction of debris flow peak discharge. Prédiction concernant le débit de crête de coulée de boue. Tagungspublikation - Internationales Symposium INTERPRAEVENT BERN, Band 4, S. 99-108.
- NAVRATIL, O.; LIÉBAULT, F.; BELLOT, H.; TRAVAGLINI, E.; THEULE, J.; CHAMBIN, G. and LAIGLE, D., 2013. High-frequency monitoring of debris-flow propagation along the Réal Torrent, Southern French Prealps. Geomorphology, 201, S. 157-171.
- O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. and FULLERTON, W. T., 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. Journal of Hydraulic Engineering, 119, S. 244-261.
- ÖNORM-REGEL 24800, 2009. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung.
- OU, G.; TANG, B.; KOBASHI, S. and MIZUYAMA, T., 1991. Prediction of debris flow peak discharge by statistical methods. Shin-sabo, 44 (2), S. 43-51.
- PFITSCHER, M., 2014. Eigenes Foto von der Verbauung am Stubenbach in der Ortschaft Pfunds.

- 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., 1996. Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung. In: ODDSON, B. Hrsg. *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse*, Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften. Boston-Berlin-Basel: Birkhäuser Verlag, S. 397-407.
- RICKENMANN, D.; HÜRLIMANN, M.; GRAF, C.; NÄF, D. und WEBER, D., 2001. Murgang-Beobachtungsstationen in der Schweiz. *Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air*, Jg. 93 (1/2), S. 1-7.
- RICKENMANN, D., 1999. Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 19, S. 47-77.
- RICKENMANN, D., 2001. Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenabschätzung. *Mitteilungen des Lehrstuhls und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen*, Band 124, S. 51-57. *Proceedings 31. IWASA, Internationales Wasserbau-Symposium, Aachen.*
- RICKENMANN, D., 2002. Über Murgänge in den Alpen. *Alpine debris flows. Wasser & Boden* 54 (4), S. 23-26.
- RICKENMANN, D., 2014. Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. *WSL Berichte. Heft 9*, 105 S.
- RICKENMANN, D.; WEBER, D. and STEPANOV, B., 2003. Erosion by debris flow in field and laboratory experiments. In: RICKENMANN, D., and Chen, L-C. *Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation: Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Rotterdam: Millpress, S.883-893.
- RICKENMANN, D. and ZIMMERMANN, M., 1993. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8, S.175-189.
- RIMBÖCK, A.; BARBEN, M.; GRUBER, H.; HÜBL, J.; MOSER, M.; RICKENMANN, D.; SCHÖBER, S. und SCHWALLER, G., 2013. *OptiMeth - Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden zur Beschreibung von Wildbachprozessen. Schriftenreihe 1, Handbuch 3. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT - Klagenfurt.*
- RINDERER, M. und RICKENMANN, D., 2009. Abfluss- und Geschiebetransportabschätzung in Wildbächen für Bemessungsfragen - Methoden aus heutiger Sicht und Unsicherheiten der Ergebnisse. *Fachtagung: Zukunftsfähiger(s) Wasserbau und Flussgebietsmanagement - Wasser und Feststofftransport in Fläche und Fluss. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft*, 123, S. 28-42. Technische Universität München.
- SCHEIDL, C.; MCARDELL, B. W. and RICKENMANN, D., 2015. Debris-flow velocities and superelevation in a curved laboratory channel. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, S. 1-13.
- SEDALP, 2015. WP5 Report – Sediment management in Alpine basins: integrating sediment continuum, risk mitigation and hydropower. *Alpine Space – Interreg*. S. 254.
- SPREAFICO, M.; WEINGARTNER, R.; BARBEN, M. und RYSER, A., 2003. Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. *Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque*, 4. S.117.

- STECHER, M., 2011. Erarbeitung von wirksamen Risikoreduktionsstrategien durch einen konzeptionellen Planungsansatz. Angewandt am Gadriabach im Vinschgau (Gemeinde Laas und Schlanders). Masterarbeit. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur, Wien.
- STEPANEK, L.; KOHL, B. und MARKART, G., 2004. Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss. Tagungspublikation: Internationales Symposium INTERPRAEVENT Riva-Trient, Band 1, S. 101-112.
- SUDA, J., und RUDOLF-MIKLAU, F., 2012. Bauen und Naturgefahren. Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz. Wien: Springer Verlag.
- TAKAHASHI, R., 1978. Mechanical characteristics of debris flow. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 104, S. 381-396.
- TAKAHASHI, T., 1991. Debris Flow. Rotterdam: A.A.Balkema.
- TOGNACCA, C., 1999. Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Dissertation. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- TSUCHIYA, S.; KIMURA, M.; OHSAKA, O. and TARUMI, M., 1996. Debris transport on the steep gully of the mountainous large-scale Ohya collapse, Shizuoka prefecture, Japan. Geschiebetransport in einem steilen Gully unterhalb dem riesigen Bergsturz Ohya, Präfektur Shizuoka, Japan. Tagungspublikation: Internationales Symposium INTERPRAEVENT - Garmisch-Partenkirchen, Band 1, S. 273-282.
- TUBINO, M. and LANZONI, S., 1993. Rheology of debris flow: Experimental observations and modelling problems. Excerpta of the Italian contributions to the field of hydraulic engineering, 7, S. 201-236.
- VANDINE, D.F., 1985. Debris flow and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera, Canadian Geotechnical Journal, 22, S.44-68.
- WANG, Y. C., 2001. Water damage to highway in Tibet. In: Chengdu: Sichuan Science & Technology Press, S. 123-144.
- WEBER, D. und RICKENMANN, D., 2000. Zum Fließverhalten granularer Murschübe, Tagungspublikation: Internationales Symposium INTERPRAEVENT - Villach, 3, S.345-356.
- WEI, B.; ZHAO, Q.; PENG, S.; HAN, G.; ZHANG, H. and LIU, Y., in. prep. The Amplification Coefficient for Peak Discharge of Debris Flows in Wenchuan Earthquake Affected Area. Journal of Mountain Science.
- WHIPPLE, K. X., 1992. Predicting debris-flow runout and deposition on fans: the importance of the flow hydrograph. Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions. (Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992). IAHS Publ. (209). S. 337-345.
- WU, J.S.; KAN, Z.C.; TIAN, L.C. and ZHANG, S.C., 1990. Observational investigation of debris flow in the Jianglia gully. Yunnan, Science Publishing Co, 1-251.
- WU, J. S.; TIAN, L. Q. and KANG, Z. C., 1993. Debris flow and its comprehensive treatment. Beijing: Science Press.
- YABLONSKIY, V. V., 1991. Connection of the scale of Carpathian debris flows with natural and anthropogenic factors of debris flow formation. Trudy UkrNIGMI, 240, S. 97-122.

- YABLONSKIY, V. V.; TISHENKO, A. S.; DEZIRON, A. V. and BOEVA, E. G., 1992. Debris flows in the Ukraine: some results of field and experimental studies. Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions (Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992). IAHS Publ. 209, S. 361-367.
- ZELLER, J., 1974, 1981. Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse. Elemente zur Abschätzung der Hochwasserabflüsse. 2. Auflage. Bericht der Eidg. Anstalt Wald, Schnee und Landschaft, 126, 109 S.
- ZHANG, S., 1993. A Comprehensive Approach to the Observation and Prevention of Debris Flows in China. Natural Hazards, 7, S. 1-23.
- ZHOU, B. F.; LI, D. J. and LUO, D. F., 1991. Guideline for debris flow prevention and control. Beijing: Science Press.
- ZIMMERMANN, M. und Rickenmann, D., 1992. Beurteilung von Murgängen in der Schweiz: Meteorologische Ursachen und charakteristische Parameter zum Ablauf. Tagungspublikation: Internationales Symposion INTERPRAEVENT - BERN, Band 2, S. 153-163.

## Internetquellen

- INTERPRAEVENT, s.a. (Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT).  
Verfügbar in: [http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_img/pressefotos/Hochwasser/Stubenbach\\_HW.jpg](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_img/pressefotos/Hochwasser/Stubenbach_HW.jpg)  
[Abfrage am 20.07.2015]
- KANTON WALLIS, s.a.  
Verfügbar in: [http://www.vs.ch/NavigData/DS\\_12/M26691/cartedangerprehome.jpg](http://www.vs.ch/NavigData/DS_12/M26691/cartedangerprehome.jpg)  
[Abfrage am 20.07.2015]
- KOHL, B., 2014. Neu überarbeitet: ZEMOKOST V2.0 - das Hydrologie-Programm des BFW. Wien: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft.  
Verfügbar in: <http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=9817>  
[Abfrage am 21.07.2015]
- MARCHI, L.; COMITI, F.; ARATTANO, M.; CAVALLI, M.; MACCONI, P. and PENNA, D.; s.a. A new debris-flow monitoring system in an Alpine catchment.  
Verfügbar in:  
[http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CDAQFjAE&url=http%3A%2F%2Fpresentations.copernicus.org%2FEGU2012-6104\\_presentation.pdf&ei=\\_X2ZVb6hEoeGywP9xJaoBA&usg=AFQjCNG0LT\\_LMa8m6wEeJCQEHoZaCqvllg&bvm=bv.96952980,d.bGQ](http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CDAQFjAE&url=http%3A%2F%2Fpresentations.copernicus.org%2FEGU2012-6104_presentation.pdf&ei=_X2ZVb6hEoeGywP9xJaoBA&usg=AFQjCNG0LT_LMa8m6wEeJCQEHoZaCqvllg&bvm=bv.96952980,d.bGQ)  
[Abfrage am 21.07.2015]
- PLANAT, s.a. (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT).  
Verfügbar in: [http://www.planat.ch/uploads/pics/p0241\\_08.jpg](http://www.planat.ch/uploads/pics/p0241_08.jpg)  
[Abfrage am 20.07.2015]
- WASSERWEHR GINSHEIM – GUSTAVSBURG, 2013. Entstehung von Hochwasser und dadurch verursachte Schäden. Ginsheim-Gustavsburg.

Verfügbar in: <http://www.wasserwehr-gigu.de/de/Hochwasserschutz/Entstehung-von-Hochwasser>

[Abfrage am 20.07.2015]

YOUTUBE, s.a.

Verfügbar in: <https://www.youtube.com/watch?v=OUtZVn2NwrY>

[Abfrage am 20.07.2015]

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2.1: Übersicht von charakteristischen Eigenschaften von Verlagerungsprozessen in Wildbacheinzugsgebieten (aus ÖNORM-REGEL 24800, 2009). ..... | 21 |
| Tabelle 4.1: verschiedene Grenzkonzentrationen von Murgängen. ....                                                                                    | 34 |
| Tabelle 5.1: Installierte Messeinrichtungen im Untersuchungsgebiet (Comiti et al., 2014). ...                                                         | 49 |
| Tabelle 6.1: Notwendige Eingangsparameter (Hemund et al., 2011, modifiziert). ....                                                                    | 55 |
| Tabelle 6.2: Verwendete Rauigkeits- und Abflussbeiwertklassen. ....                                                                                   | 58 |
| Tabelle 6.3: Verwendete Eingangsdaten. ....                                                                                                           | 59 |
| Tabelle 6.4: Berechnete Wasserfrachten und volumetrische Feststoffkonzentrationen der beobachteten Murgänge. ....                                     | 61 |
| Tabelle 6.5: Berechnete Niederschlags-Abfluss-Beziehung mit dem Programm BASIN 30 (Abteilung Wasserschutzbauten, 2015). ....                          | 63 |
| Tabelle 6.6: Verwendete Abfluss- und Rauigkeitsbeiwertklassen. ....                                                                                   | 65 |
| Tabelle 7.1: Unterschiedliche Modellierungen für das Ereignis 2011. ....                                                                              | 68 |
| Tabelle 7.2: Berechneter Spitzenabfluss. ....                                                                                                         | 69 |
| Tabelle 7.3: Berechnete Reinwasser-Spitzenabflüsse für das Ereignis 2011 mit Methode 3. ....                                                          | 69 |
| Tabelle 7.4: Ergebnisse aller Modellierungen zum Ereignis 2013. ....                                                                                  | 70 |
| Tabelle 7.5: Ausgewählte Reinwasser-Modellierungen. ....                                                                                              | 71 |
| Tabelle 7.6: Berechneter Minimal-, Maximal-, und Mittelwert. ....                                                                                     | 71 |
| Tabelle 7.7: Berechneter Reinwasserspitzenabfluss für das Ereignis 2013. ....                                                                         | 72 |
| Tabelle 7.8: Gesamtheit der durchgeführten Modellierungen für das Ereignis 2014. ....                                                                 | 73 |
| Tabelle 7.9: Berechneter Reinwasser-Spitzenabfluss für das Ereignis 2014. ....                                                                        | 74 |
| Tabelle 7.10: Überblick und Vergleich der drei angewandten Methoden. ....                                                                             | 74 |
| Tabelle 7.11: Berechneter Minimal-, Maximal- und Mittelwert. ....                                                                                     | 74 |
| Tabelle 7.12: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren für die Murgänge 2011, 2013 und 2014. ....                                                       | 75 |
| Tabelle 7.13: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren auf der Datenbasis von Zimmermann und Rickenmann, 1992. ....                                     | 77 |
| Tabelle 7.14: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren auf Basis der Daten von Rickenmann et al., 2003. ....                                            | 78 |
| Tabelle 7.15: Auswertung der Messungen am Schesatobel (Vorarlberg). ....                                                                              | 78 |
| Tabelle 7.16: Murgangsintensitätsfaktoren basierend auf der Datengrundlage von Hübl, 2009 und Hübl, s.a. ....                                         | 78 |
| Tabelle 7.17: Maximalabflüsse und Murgangsintensitätsfaktoren aus dem Hunshui Gully, China. ....                                                      | 80 |
| Tabelle 7.18: Murgangsintensitätsfaktoren für zwei verschiedene Gerinne. ....                                                                         | 81 |
| Tabelle 7.19: Berechnete Murgangsintensitätsfaktoren auf Basis der Daten von Wei et al., in prep. für unterschiedliche Murgänge. ....                 | 81 |
| Tabelle 7.20: Berechneter Murgangsintensitätsfaktor für das Ereignis am Lorenzerbach 2012. ....                                                       | 82 |
| Tabelle 7.21: Auswertungen der Messungen von Chen und Chuang, 2014. ....                                                                              | 82 |
| Tabelle 8.1: Zusammenhang Feststoffkonzentration und Murgangsintensitätsfaktor. ....                                                                  | 96 |
| Tabelle 8.2: Zusammenhang Mobilisierungsintensität und Murgangsintensitätsfaktor. ....                                                                | 99 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 8.3: Berechnung der Flächen und der dazugehörigen Flächenverhältnisse (bezogen auf das Murgangsszenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 1). ..... | 103 |
| Tabelle 9.1: Überblick über verschiedene Methoden zur Bestimmung des Murgangsintensitätsfaktors. ....                                                             | 105 |
| Tabelle 9.2: Bestimmte Murgangsintensitätsfaktoren für die Ereignisse am Gadriabach. ....                                                                         | 106 |
| Tabelle 9.3: Grenzen und Verteilungen abhängig vom Reinwasser-Spitzenabfluss.....                                                                                 | 108 |
| Tabelle A.1: Vergleich der Bezeichnungen der Niederschlagstationen.....                                                                                           | 114 |
| Tabelle A.2: Niederschlagsverteilung für das Ereignis 2011.....                                                                                                   | 115 |
| Tabelle A.3: Verwendete Niederschlagverteilung für das Murgangereignis 2013.....                                                                                  | 116 |
| Tabelle A.4: Verwendete Niederschlagverteilung für das Murgangereignis 2014.....                                                                                  | 117 |
| Tabelle A.5: Auflistung aller erhobenen Murgangsintensitätsfaktoren.....                                                                                          | 119 |
| Tabelle A.6: Ausgangsdaten für die Auswertung von Abhängigkeiten .....                                                                                            | 121 |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1.1: BILD A aus PLANAT, s.a.; BILD B aus INTERPRAEVENT, s.a.; BILD C aus Kanton Wallis, s.a.; Bild D: Pfitscher, 2014. ....                                                                                             | 13 |
| Abbildung 2.1: Prozesse der Abflussbildung (aus Wasserwehr Ginsheim–Gustavsburg, 2013).....                                                                                                                                       | 16 |
| Abbildung 2.2: Überblick verschiedener hydrologischer Methoden (aus Rimböck et al., 2013). ....                                                                                                                                   | 19 |
| Abbildung 2.3: Übersicht über die Systematik der Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten (aus Rimböck et al., 2013). ....                                                                                                 | 20 |
| Abbildung 2.4: Charakteristische Eigenschaften von Murgängen (aus Rickenmann, 1996 in Rickenmann, 2014). ....                                                                                                                     | 22 |
| Abbildung 2.5: Bild A: Front eines Schlammstromes (Youtube, s.a.); Bild B: Front eines granularen Murgangs (Abteilung Wasserschutzbauten, 2015). ....                                                                             | 23 |
| Abbildung 2.6: Längsschnitt eines Murschubes (aus Hübl et al., 2011). ....                                                                                                                                                        | 23 |
| Abbildung 3.1: Maximalabfluss eines Murganges in Abhängigkeit der Murfracht (aus Rickenmann, 2014). ....                                                                                                                          | 28 |
| Abbildung 3.2: Schema zur Intensitätsklassifizierung verschiedener Anbruchsformen (aus Hübl, s.a.). ....                                                                                                                          | 29 |
| Abbildung 3.3: Verschiedene Ausprägungen der Ganglinien und Spitzenabflüsse aufgrund unterschiedlicher Mobilisierungsintensitäten (aus Hübl, 2009). ....                                                                          | 30 |
| Abbildung 3.4: Schemaskizze Systemzustände von Wildbacheinzugsgebieten (aus Rimböck et al., 2013). ....                                                                                                                           | 30 |
| Abbildung 4.1: Systemskizze Murgangsintensitätsfaktor [Q: allgemein Abfluss] (aus Hübl, s.a.). ....                                                                                                                               | 33 |
| Abbildung 4.2: Erhöhung des Mengenfaktors (BF) (und folglich des Spitzenabflusses) bei steigender Feststoffkonzentration (aus Hübl, s.a.). ....                                                                                   | 37 |
| Abbildung 4.3: Modellvorstellung Skalierungsfaktor (aus Hübl, s.a.). ....                                                                                                                                                         | 38 |
| Abbildung 4.4: Erhöhung des Skalierungsfaktors (und folglich des Spitzenabflusses) durch die verkürzte Prozessdauer: Umso kürzer die Dauer des Murganges, desto größer ist der Skalierungsfaktor (aus Hübl, s.a.). ....           | 38 |
| Abbildung 4.5: Intensitätsfaktor für den Spitzenabfluss eines Wasser-Feststoffgemisches unter Berücksichtigung einer verkürzten Ereignisdauer, sowie veränderlicher, volumetrischer Feststoffkonzentration (aus Hübl, s.a.). .... | 39 |
| Abbildung 5.1: Lage des Einzugsgebiet (Comiti et al., 2014, modifiziert). ....                                                                                                                                                    | 44 |
| Abbildung 5.2: Gerinnestruktur des Untersuchungsgebiets. ....                                                                                                                                                                     | 45 |
| Abbildung 5.3: Geologische Verhältnisse im Einzugsgebiet. ....                                                                                                                                                                    | 46 |
| Abbildung 5.4: Landbedeckung im Einzugsgebiet. ....                                                                                                                                                                               | 47 |
| Abbildung 5.5: Überblick über das obere Einzugsgebiet. ....                                                                                                                                                                       | 48 |
| Abbildung 5.6: Messstation und Einzugsgebiet im Hintergrund. ....                                                                                                                                                                 | 48 |
| Abbildung 5.7: Lage der Messstation im Einzugsgebiet (Comiti et al., 2014). ....                                                                                                                                                  | 49 |
| Abbildung 5.8: Aufbau der Messstation in der Nähe des Rückhaltebeckens (Marchi et al., s.a.). ....                                                                                                                                | 50 |
| Abbildung 6.1: Festgelegte Teileinzugsgebiete. ....                                                                                                                                                                               | 56 |
| Abbildung 6.2: Schema für die Abschätzung von Abflussbeiwertklassen [tr-mf: trocken-mäßig frisch; n: nass] (aus Kohl und Markart 2010, modifiziert). ....                                                                         | 57 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 6.3: Rauigkeitsklassifizierung nach unterschiedlichen Oberflächen- und Vegetationstypen (aus Markart et al., 2004b).                                                                                                                                               | 57 |
| Abbildung 6.4: Vergleich einer Reinwasserganglinie (unten) mit einer Murgangganglinie (oben - Comiti et al., 2014).                                                                                                                                                          | 61 |
| Abbildung 6.5: Festlegung des Vergleichsvolumens.                                                                                                                                                                                                                            | 62 |
| Abbildung 6.6: Graphische Darstellung der HQ100-Ganglinien (Abteilung Wasserschutzbauten, 2015).                                                                                                                                                                             | 64 |
| Abbildung 6.7: Kalibrierte Ganglinie mit der N-A-Beziehung von BASIN 30.                                                                                                                                                                                                     | 65 |
| Abbildung 6.8: Dreiecksförmige Annäherung der Ganglinie.                                                                                                                                                                                                                     | 66 |
| Abbildung 7.1: Graphische Darstellung der gemessenen Murgangganglinie für das Ereignis 2011 mit den zwei Radarsensoren (D3; D2) (aus Comiti et al., 2011).                                                                                                                   | 67 |
| Abbildung 7.2: Ganglinie des Murganges 2013 (Comiti et al., 2014).                                                                                                                                                                                                           | 69 |
| Abbildung 7.3: Modellierter Reinwasser-Ganglinie für das Ereignis 2013 mit Methode 2.                                                                                                                                                                                        | 71 |
| Abbildung 7.4: Beobachtete Ganglinie des Murganges 2014 (SEDALP, 2015).                                                                                                                                                                                                      | 72 |
| Abbildung 7.5: Modellierter Reinwasser-Ganglinie für das Ereignis 2014 mit Methode 2.                                                                                                                                                                                        | 73 |
| Abbildung 7.6: Graphische Darstellung der berechneten Murgangsintensitätsfaktoren mit den dazugehörigen Fehlerbalken.                                                                                                                                                        | 75 |
| Abbildung 7.7: Typische Murgangsparameter der größten Ereignisse im Sommer 1987 in der Schweiz (aus Zimmermann und Rickenmann, 1992).                                                                                                                                        | 76 |
| Abbildung 7.8: Parameter der Murgang-Experimente in Testgebiet Chemolgan/Kazakhstan (aus Rickenmann et al., 2003).                                                                                                                                                           | 77 |
| Abbildung 7.9: Murgangsintensitätsfaktoren nach Mizuyama et al., 1992.                                                                                                                                                                                                       | 79 |
| Abbildung 7.10: Ganglinie des Murganges und der dazugehörigen Reinwasser-Ganglinie aus dem Hunshui Gully, China (aus Mizuyama et al., 1992).                                                                                                                                 | 80 |
| Abbildung 7.11: Beziehungen zwischen dem beobachteten Spitzenabfluss der Muren und der geschätzten Hochwasser (aus Ou et al., 1991 zit. in Tsuchiya et al., 1996).                                                                                                           | 80 |
| Abbildung 7.12: Rekonstruierte Ganglinie vom Murgang am Lorenzerbach am 21. Juli 2012 (Janu et al., s.a.).                                                                                                                                                                   | 82 |
| Abbildung 7.13: Zusammenhang zwischen dem Maximalabfluss eines Murganges $Q_{DP}$ und dem Maximalabfluss eines Hochwassers $Q_{WP}$ (Chen und Chuang, 2014).                                                                                                                 | 83 |
| Abbildung 8.1: Vergleich der berechneten Murgangsintensitätsfaktoren (inkl. Fehlerbalken) mit den Werten aus der Literatur.                                                                                                                                                  | 85 |
| Abbildung 8.2: Vergleich der Literaturdaten mit den Daten aus dem Einzugsgebiet Nojiri (Mizuyama et al., 1992).                                                                                                                                                              | 86 |
| Abbildung 8.3: Verteilung der Murgangsintensitätsfaktoren.                                                                                                                                                                                                                   | 87 |
| Abbildung 8.4: Doppel-logarithmische Darstellung der Ausgangsdaten und der berechneten Trendlinie.                                                                                                                                                                           | 87 |
| Abbildung 8.5: Datenwerte aus dem Alpenraum und die dazugehörige Trendlinie.                                                                                                                                                                                                 | 88 |
| Abbildung 8.6: Häufigkeitsverteilung der Datenpunkte aus dem Alpenraum.                                                                                                                                                                                                      | 88 |
| Abbildung 8.7: Beziehung zwischen Reinwasser-Spitzenabfluss und dem Murgangsintensitätsfaktor mit einem Skalierungsbruch bei $Q_w = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .                                                                                                               | 89 |
| Abbildung 8.8: Histogramm bis einen Reinwasser-Spitzenabfluss von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . <i>[Anmerkung: Die Murgangsintensitätsfaktoren in der Klasse von 95-100 und 110-115 stammen aus groben Abschätzungen von Hübl, 2009 bzw. Zimmermann und Rickenmann, 1992].</i> | 90 |
| Abbildung 8.9: Histogramm für den Bereich $Q_w > 10 \text{ m}^3/\text{s}$ .                                                                                                                                                                                                  | 90 |

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 8.10: Berechnete untere und obere Grenzen mit einem Skalierungsbruch bei $Q_w = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ (in doppel-logarithmischer Darstellung).....                   | 91  |
| Abbildung 8.11: Darstellung des Reinwasser-Spitzenabflusses und des Murgangsintensitätsfaktors. ....                                                                              | 92  |
| Abbildung 8.12: Vergleich der beobachteten und berechneten Murgangsintensitätsfaktoren. ....                                                                                      | 93  |
| Abbildung 8.13: Vergleich der mit dem Ansatz von Mizuyama berechneten und den beobachteten Murgangsintensitätsfaktoren.....                                                       | 93  |
| Abbildung 8.14: Darstellung des Reinwasser-Spitzenabflusses und des Murgangsintensitätsfaktors. ....                                                                              | 95  |
| Abbildung 8.15: Zusammenhang zwischen den Murgangsintensitätsfaktor ( $Q_d/Q_w$ ) und der Dichte des Murganges $\rho_d$ ; $\pi$ = Porosität in % [aus Yablonskiy et al. 1992]..   | 95  |
| Abbildung 8.16: Zusammenhang des Murgangsintensitätsfaktors mit der volumetrischen Sedimentkonzentration einiger Murgänge. ....                                                   | 96  |
| Abbildung 8.17: Kein eindeutiger Zusammenhang des Murgangsintensitätsfaktors mit der Fläche des Einzugsgebiets. ....                                                              | 97  |
| Abbildung 8.18: Zusammenhang zwischen dem Murgangsintensitätsfaktor und der anteilmäßigen Rutschflächen ( $R_L$ ) im Einzugsgebiet (Chen und Chuang, 2014)..                      | 98  |
| Abbildung 8.19: Verschiedene Murgangsintensitätsfaktoren (hier als Ereignisfaktor bezeichnet), abhängig vom Systemzustand und der Mobilisierungsintensität (aus Hübl, 2009). .... | 98  |
| Abbildung 8.20: Zusammenhang des Murgangsintensitätsfaktors mit der gesamten Fracht des Murganges.....                                                                            | 99  |
| Abbildung 8.21: Weitere untersuchte Abhängigkeiten ohne feststellbare Tendenzen: Links: Anzahl der Murschübe; Rechts: Gefälle des Gerinnes. ....                                  | 100 |
| Abbildung 8.22: Festgelegte Murgang-Ganglinien mit drei verschiedenen Murgangsintensitätsfaktoren. ....                                                                           | 101 |
| Abbildung 8.23: Modelliertes Murgang-Szenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 1. ....                                                                                     | 102 |
| Abbildung 8.24: Modelliertes Murgang-Szenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 10. ....                                                                                    | 102 |
| Abbildung 8.25: Modelliertes Murgang-Szenario mit einem Murgangsintensitätsfaktor von 20. ....                                                                                    | 103 |
| Abbildung 9.1: Murgangsszenarien mit unterschiedlichen Murgangsintensitätsfaktoren und Spitzenabflüssen, aber gleichen Murfrachten. ....                                          | 104 |
| Abbildung 9.2: Beobachtete Trendlinie sowie untere und obere Grenze des Murgangsintensitätsfaktors. ....                                                                          | 107 |
| Abbildung 9.3: Abhängigkeiten des Murgangsintensitätsfaktors von typischen Murgangs-Parametern.....                                                                               | 108 |
| Abbildung A. 1: Räumliche Lage der Niederschlagsstationen in Bezug zu den Teileinzugsgebieten.....                                                                                | 114 |