



**Universität für Bodenkultur Wien**  
**Department Bautechnik und Naturgefahren**  
**Institut für Alpine Naturgefahren (IAN)**

Peter Jordan Str. 82  
A-1190 WIEN

Tel.: +43-1-47654-87100  
Fax: +43-1-47654-87109



## **IAN REPORT 215**

### **Der Intensitätsfaktor von Wildbachprozessen**

**Grundlagen zur Bestimmung des Intensitätsfaktors für verschiedene  
Wildbachprozesse**



Im Auftrag von:



**Eigenforschung**

Wien, im Juli 2021



**IAN REPORT 215**  
Der Intensitätsfaktor von Wildbachprozessen  
Grundlagen zur Bestimmung des Intensitätsfaktors für verschiedene  
Wildbachprozesse

Im Auftrag von:



**Eigenforschung**

Projektleitung: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hübl Johannes

Mitarbeiter:

Universität für Bodenkultur  
Department Bautechnik und Naturgefahren  
Institut für Alpine Naturgefahren

Peter Jordan Str. 82

Tel.: +43-1-47654-87100

A – 1190 Wien

Fax: +43-1-47654-87109

Referenz (Literaturzitat): Hübl J. (2021): Der Intensitätsfaktor von Wildbachprozessen: Grundlagen zur Bestimmung des Intensitätsfaktors für verschiedene Wildbachprozesse, IAN Report 215; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien



<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>AUSGANGSSITUATION: .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>INTENSITÄTSFAKTOR FÜR DEN LEITPROZESS .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>SEDIMENTZUSCHLAGFAKTOR (ZF) .....</b>	<b>9</b>
4.1	Modell zur Bestimmung des Sedimentzuschlagfaktors .....	9
4.2	Beispiel zur Berechnung des Sedimentzuschlag- und Intensitätsfaktors .....	11
<b>5</b>	<b>PROZESSFAKTOR (PF) FÜR MUREN .....</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>METHODIK .....</b>	<b>16</b>
7.1	Abflussscheitelwert aus dimensionsloser Ganglinie nach SCS (SCS-DUH) ...	18
7.2	Abflussscheitelwert aus dimensionsloser Ganglinie nach Kreps .....	20
7.3	Modifikation des Verfahrens nach Kreps für Murgänge .....	23
7.4	Beispiel Murschub .....	27
7.5	Festlegung des Phänotyps eines Murgangs .....	28
7.6	Abfluss resultierend aus einem Einheitskubikmeter (Unit Volume, UV) .....	29
7.7	Ableitung einer empirischen Formel .....	31
7.8	Vergleich mit anderen empirischen Formeln .....	32
7.9	Plausibilisierung mit Daten aus dem Wildbach- und Lawinenkataster und publizierten Datensätzen .....	32
7.10	Prozessfaktor .....	33
<b>8</b>	<b>DATENGRUNDLAGE .....</b>	<b>34</b>
8.1	Datengrundlagen zu Literaturwerten .....	34
8.2	Datengrundlagen zu Messdaten aus IAN Monitoring Stationen .....	34
8.2.1	Abflusshöhe und Normalspannung Gatria .....	34
8.2.2	Abflusshöhe Lattenbach .....	36
8.2.3	Oberflächengeschwindigkeit .....	37
8.2.4	Abfluss und Murenfracht .....	39
8.3	Daten aus dem österreichischen Wildbach- und Lawinenkataster .....	39
8.4	Literaturangaben zu Murenfrachten und Scheitelabflüssen .....	39
<b>9</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>41</b>



9.1	Modellparameter mit Literaturwerten.....	41
9.1.1	Analyse der zeitlichen Kennwerte .....	43
9.1.2	Normalisierte Wasserspiegellinien aus der Literatur.....	44
9.1.3	Vergleich der publizierten mit den berechneten Abflüssen .....	44
9.1.4	Vergleich der publizierten Scheitelwerte mit den berechneten Hydrographen ..	45
9.1.5	Vergleich der Abflüsse aus einem UV .....	46
9.2	Modellparameter mit Messdaten .....	49
9.2.1	Analyse der zeitlichen Kennwerte .....	51
9.2.2	Vergleich der gemessenen mit den berechneten Abflüssen.....	52
9.2.3	Vergleich der gemessenen mit den berechneten Hydrographen.....	53
9.2.4	Vergleich der Abflüsse aus einem UV .....	55
9.2.5	Gemessene Murenfracht und Spitzenabflüsse.....	58
9.3	Modellparameter unter Verwendung aller Datensätze .....	59
9.3.1	Analyse der zeitlichen Kennwerte .....	59
9.3.2	Unit Volume und Murenvolumen .....	61
9.3.3	Murenfracht und Abfluss .....	63
9.3.4	Mit dem empirischen Ansatz berechnete Abflüsse .....	66
9.3.5	Vergleich mit publizierten empirischen Potenfunktionen .....	69
9.4	Plausibilisierung .....	70
9.5	Prozessfaktor .....	72
9.6	Beispiel .....	77
<b>10</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>88</b>
<b>11</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>89</b>
<b>Anhang</b>		
<b>1</b>	<b>METADATEN DER VERWENDETEN EINGANGSDATEN AUS VERÖFFENTLICHTEN ARTIKELN UND BEREITGESTELLTEN MESSDATEN VON WASSERSTANDSGANGLINIEN.....</b>	<b>93</b>
<b>2</b>	<b>DIMENSIONSLOSE WASSERSTANDSGANGLINIEN .....</b>	<b>95</b>
2.1	Rio Moscardo.....	95
2.2	Acquabona.....	101
2.3	Illgraben .....	103
2.4	Dunsmore .....	106
2.5	Arroyo Secco .....	107
2.6	Jesusita.....	108
2.7	Mt. St. Helens .....	108



2.8 Rio Rebaixer .....	110
<b>3 GEMESSENE WASSERSTANDSGANGLINIEN, PUBLIZIERTE SPITZENABFLÜSSE UND BERECHNETE ABFLUSSGANGLINIEN .....</b>	<b>113</b>
<b>4 METADATEN DER VERWENDETEN EINGANGSDATEN AUS ABFLUSSMESSUNGEN AM LATTENBACH UND DER GADRIA (IAN).....</b>	<b>115</b>
<b>5 GEMESSENE UND BERECHNETE ABFLUSSGANGLINIEN .....</b>	<b>116</b>
5.1 Lattenbach .....	116
5.2 Gadria .....	120



## Verwendete Abkürzungen

Q	Q	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>p</sub>	Q <sub>p</sub>	Scheitelabfluss [m <sup>3</sup> /s] (peak discharge)
Q <sub>w</sub>	Q <sub>w</sub>	Abfluss (Wasser) [m <sup>3</sup> ]
Q <sub>g</sub>	Q <sub>s</sub>	Abfluss (Geschiebe)
Q <sub>wg</sub>	Q <sub>b</sub>	Gesamtabfluss (Wasser und Geschiebe) [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>HW</sub>	Q <sub>FD</sub>	Abfluss Hochwasser [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>FFT</sub>	Q <sub>FST</sub>	Abfluss fluviatiler Feststofftransport [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>MFT</sub>	Q <sub>DFD</sub>	Abfluss murartiger Feststofftransport [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>MG</sub>	Q <sub>DF</sub>	Abfluss Mure [m <sup>3</sup> /s]
HQ <sub>100</sub>	HQ <sub>100</sub>	Basiswert Abfluss der Jährlichkeit 100 (Reinwasser) [m <sup>3</sup> /s]
BHQ	BHQ	Bemessungswert Abfluss (Leitprozess) [m <sup>3</sup> /s]
V	V	Volumen, Fracht [m <sup>3</sup> ]
V <sub>D</sub>	V <sub>D</sub>	Direktabflussfracht [m <sup>3</sup> ]
V <sub>w</sub>	V <sub>w</sub>	Volumen (Wasser) [m <sup>3</sup> ]
V <sub>g</sub>	V <sub>s</sub>	Volumen (Geschiebe)
V <sub>wg</sub>	V <sub>b</sub>	Gesamtvolumen (Wasser und Geschiebe) [m <sup>3</sup> /s]
V <sub>HW</sub>	V <sub>FD</sub>	Volumen Hochwasser [m <sup>3</sup> /s]
V <sub>FFT</sub>	V <sub>FST</sub>	Volumen fluviatiler Feststofftransport [m <sup>3</sup> /s]
V <sub>MFT</sub>	V <sub>DFD</sub>	Volumen murartiger Feststofftransport [m <sup>3</sup> /s]
V <sub>MG</sub>	V <sub>DF</sub>	Volumen Mure [m <sup>3</sup> /s]
V <sub>100</sub>	V <sub>100</sub>	Basiswert Fracht der Jährlichkeit 100 (Reinwasser) [m <sup>3</sup> /s]
BV	BV	Bemessungswert Fracht (Leitprozess) [m <sup>3</sup> /s]
LP	LP	Leitprozess (Bemessungsereignis)
LP <sub>HW</sub>	LP <sub>FD</sub>	Leitprozess Hochwasser
LP <sub>FFT</sub>	LP <sub>FST</sub>	Leitprozess fluviatiler Feststofftransport
LP <sub>MFT</sub>	LP <sub>DFD</sub>	Leitprozess murartiger Feststofftransport
LP <sub>MG</sub>	LP <sub>DF</sub>	Leitprozess Murgang
c <sub>v</sub>	c <sub>v</sub>	Feststoffkonzentration volumenbezogen [-] (volumetric sediment concentration)
c <sub>ρ</sub>	c <sub>ρ</sub>	Feststoffkonzentration dichtebezogen [-] (sediment concentration by weight)
ρ <sub>w</sub>	ρ <sub>w</sub>	Dichte Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>g</sub>	ρ <sub>g</sub>	Dichte Geschiebe [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>wg</sub>	ρ <sub>b</sub>	Dichte Wasser und Geschiebe [kg/m <sup>3</sup> ]
t <sub>p</sub>	t <sub>p</sub>	Dauer des Anstiegs der Ganglinie, Anstiegszeit (time to peak)
t <sub>r</sub>	t <sub>r</sub>	Dauer des Abfalls der Ganglinie, Abfallzeit, Abstiegszeit (recession time)
t <sub>b</sub>	t <sub>b</sub>	Gesamtabflussdauer (basetime)
t <sub>b,hydro</sub>	t <sub>b,hydro</sub>	Gesamtabflussdauer eines hydrologischen Prozesses
t <sub>b,MG</sub>	t <sub>b,DF</sub>	Gesamtabflussdauer eines Murenprozesses
X	X	Verhältniswert [-]
K <sub>SCS</sub>	K <sub>SCS</sub>	
ZF	ZF	Zuschlagfaktor
ZF <sub>v</sub>	ZF <sub>v</sub>	Sedimentzuschlagfaktor Volumen [-]
ZF <sub>ρ</sub>	ZF <sub>ρ</sub>	Sedimentzuschlagfaktor Dichte [-]
PF	PF	Prozessfaktor [-]
IF <sub>LP</sub>	IF <sub>LP</sub>	Intensitätsfaktor für den Leitprozess [-]
CF	CF	Konvertierungsfaktor [-] (conversion factor)
SF	SF	Formfaktor [-] (shape factor)
SF <sub>SCS</sub>	SF <sub>SCS</sub>	Formfaktor des SCS Verfahrens
SF <sub>K</sub>	SF <sub>K</sub>	Formfaktor nach Kreps [-] (shape factor)
SF <sub>MG</sub>	SF <sub>DF</sub>	Formfaktor für Murgang [-]
β		Multiplikator des Formfaktors nach Kreps



$PRF$		<i>Peak rate Faktor [-]</i>
$PRF_{MG}$	$PRF_{DF}$	<i>Peak rate für Murgang Faktor [-]</i>
$\theta_i$		<i>dimensionsloser Abfluss</i>
$\tau_i$		<i>dimensionslose Zeit</i>
$U_i$		<i>Ordinate der Einheitsganglinie</i>



# Der Intensitätsfaktor von Wildbachprozessen

## Grundlagen zur Bestimmung des Intensitätsfaktors für verschiedene Wildbachprozesse

### 1 Einleitung

Die Berechnung von Bemessungsabflüssen in Wildbächen stellt für PlanerInnen eine große Herausforderung dar, da in solchen kleinen und zumeist steilen Einzugsgebieten unterschiedliche Verlagerungsprozesse auftreten können, die entweder von Wasser (Systemzustand I) oder von Feststoffen (Systemzustand II) dominiert werden (Hübl, 2018).

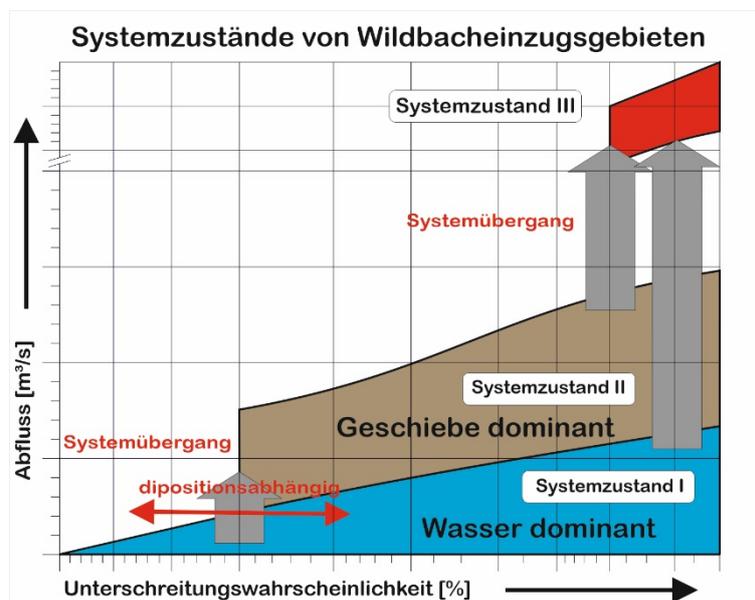


Abbildung 1: Systemzustände von Wildbacheinzugsgebieten

Messdaten von Wildbachereignissen sind nur spärlich vorhanden, da die Abflussmessung, speziell für den Systemzustand II, mit großem materiellem und somit finanziellem Aufwand verbunden ist. Weiters ist das äußerst unterschiedliche Verhalten der Einzugsgebiete zu berücksichtigen, da je nach Disposition, sogar bei gleicher Belastung, unterschiedliche Verlagerungsprozesse auftreten können. Analogieschlüsse sind deshalb von einem Einzugsgebiet auf ein anderes nur sehr beschränkt zulässig.

Das Kennzeichen von Wildbächen ist das mobilisierte und verlagerte Geschiebe aufgrund höherer Niederschläge. Zahlreiche Abhandlungen beschäftigen sich deshalb mit einer möglichst eindeutigen Klassifizierung von Wildbächen, wobei die „Produktion“ des Geschiebes das wesentlichste Kriterium darstellt. Bis heute in Verwendung ist die Einteilung der Wildwässer nach Stiny (1931).

- Jungschuttwildwässer
- Altschuttwildwässer



- Gemischte Wildwässer
- Besondere Wildwässer

Der aus der Geschiebemobilisierung resultierende Verlagerungsprozesses wird wesentlich vom zur Verfügung stehenden Feststoffvolumen, aber auch durch die Zeit, in der das Geschiebe mobilisiert werden kann („Mobilisierungsintensität“), beeinflusst. In Aulitzky (1984) wird durch die Einführung eines Entwicklungsfähigkeitsindex, der Werte von 1 bis 5 annehmen kann, darauf Bezug genommen. Die für die Mobilisierungsintensität des Geschiebes notwendige Information kann aus den geomorphologischen Indikatoren, wie der Anbruchsform eines Geschiebeherdes, und den für das „Versagen“ verantwortlichen Mobilisierungsmechanismus abgeleitet werden. Bleibt man bei den von Stiny (1910) geprägten Begriffen der Geschiebeherde, so kann ein Muschel- und Dammanbruch sehr große Feststoffmengen in kürzester Zeit bereitstellen. Der resultierende Verlagerungsprozess verläuft sodann weitgehend unabhängig vom zu Grunde liegendem hydrologischen Ereignis. Linienhafte Anbrüche im Gerinne, wie Feilen-, Keil- und Uferanbrüche können ebenfalls große Geschiebevolumina freisetzen, die Mobilisierungszeit dauert aber generell länger, da sie von der Form der hydrologischen Ganglinie beeinflusst werden. Eine Sonderform eines Anbruches kann durch die Verflüssigung eines Bodenkörpers (impulsive loading) eintreten, wenn dieser Körper durch eine Zusatzlast plötzlich beaufschlagt wird (Bovis and Dagg, 1992). Es sind deshalb hydrologisch-hydraulische und geologische Mobilisierungskriterien zu unterscheiden.

Aus der Kombination von mobilisierbarem Volumen und Mobilisierungszeit lässt sich die Intensität der Feststoffbereitstellung (Abbildung 1) abschätzen.

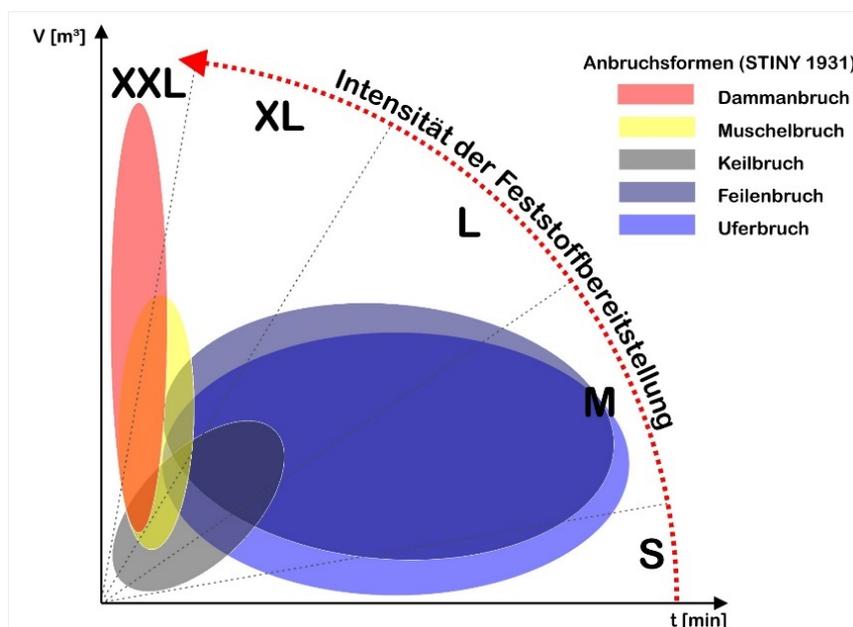


Abbildung 2: Mobilisierungsintensität von Geschiebeherden



Tabelle 1: Mobilisierungsintensität von Anbruchsformen in Wildbächen

Anbruch	Mobilisierbares Volumen	Mobilisierungszeit	Intensität
Uferanbruch	Klein bis mittel	Mittel bis langfristig	klein (S) – sehr groß (XL)
Feilenanbruch	Groß bis sehr groß	kurzfristig	klein (S) – sehr groß (XL)
Keilanbruch	Mittel bis groß	Mittel-langfristig	klein (S) – sehr groß (XL)
Muschelanbruch	Groß bis sehr groß	kurzfristig	groß (L) - extra groß (XXL)
Dammanbruch	Klein bis groß	kurzfristig	groß (L) - extra groß (XXL)

Die Intensität der Feststoffbereitstellung beeinflusst die weitere Entwicklung des Verlagerungsprozesses im Gerinne. Bei hoher Intensität (L, XL, XXL) werden sich geschiebedominante (Murgang und murartiger Feststofftransport), bei geringer bis mittlerer Intensität (S, M) hingegen wasserdominante Verlagerungsprozesse (fluviatiler Feststofftransport, Hochwasser) entwickeln.

Für die Transformation des in einem Einzugsgebiet gefallenen Niederschlages in den dazu korrespondierenden Abfluss gibt es zahlreiche hydrologische Berechnungsmodelle, die für den Prozesstyp „Hochwasser“ Gültigkeit besitzen. Das Ergebnis dieser Modelle sind Abflussganglinien (Hydrographen) und Abflussfrachten oder nur Abflussscheitelwerte, basierend auf unterschiedlicher Niederschlagsdauer und Eintrittswahrscheinlichkeit.

Zur Darstellung von Spitzenabflüssen aus feststoffführenden Verlagerungsprozessen ist jedoch die Feststoffmobilisierung (Fracht, Intensität) in der Berechnung zu berücksichtigen. Die Quantifizierung der bei einem Ereignis auftretenden Feststoffverlagerung beruht in der Praxis einerseits auf Expertenwissen, andererseits auf Transportmodellen, die eine Berechnung von fluviatilen Geschiebetransport bis hin zu Murgängen erlauben. Der vor Ort im Einzugsgebiet zu erhebende potentielle Feststoffeintrag wird derzeit und auch noch in Zukunft aber auf der Abschätzung des lokal mobilisierbaren Geschiebepotentials beruhen.

Die Berechnung des Spitzenabflusses aus Wasser und Feststoffen muss zusätzlich die Mobilisierungsintensität der Feststoffe berücksichtigen. Werden die Ganglinien bei fluviatilen Prozessen durch die Feststoffe nur geringfügig verändert, zeigen murartige Verlagerungsprozesse, vor allem Murgänge, nur eine sehr kurze, ausgeprägte Abflussspitze, die sich in der Darstellung einer Murenganglinie wiederfinden muss.

Zur entsprechenden Adaptierung der Spitzenabflüsse und der entsprechenden Ganglinien kann können Anpassungsfaktoren verwendet werden, die auf die in der Praxis verfügbaren Daten aufbauen (Hübl, 2007).



Im Leitfaden zur Festlegung und Harmonisierung von Bemessungsereignissen (BMLFUW, 2010) wird dazu folgender Grundgedanke formuliert:

... „man geht grundsätzlich von einem Basiswert (des Abflusses) aus, kann sich aber mit Zunahme der Unsicherheiten im Prozess und dessen „Modellierbarkeit“ durch Zuschläge einem Bemessungswert nähern, der einem Ereignis mit geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit entspricht.“

„Das Bemessungsereignis für eine bestimmte Jährlichkeit wird aufbauend auf den Basiswert ermittelt und berücksichtigt prozessbedingte Zuschläge für die Geschiebeführung, als auch Wildholz oder Ähnliches.“

Im Technischen Bericht der jeweiligen Projektunterlagen ist der „Festlegungsprozess“ des Bemessungsereignisses nachvollzieh- und prüfbar darzulegen (Abbildung 3).

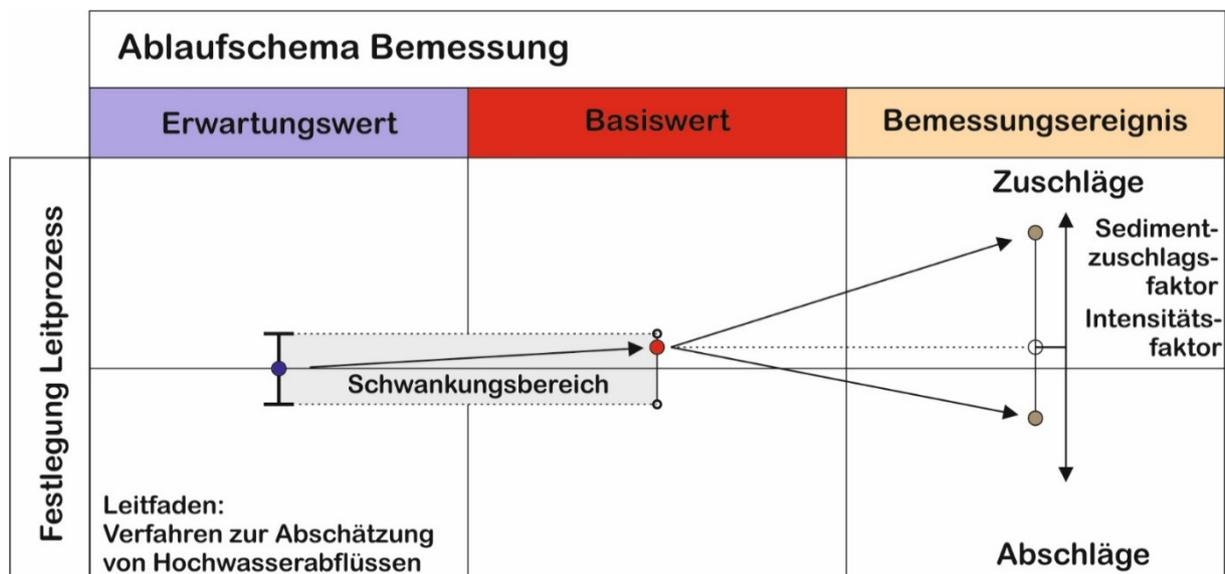


Abbildung 3: Ablaufschema zur Bestimmung des Bemessungsereignisses



## 2 Ausgangssituation:

Der geschiedebedingte Zuschlag zum berechneten Hochwasserabfluss wurde früher zumeist mit 20% des Abflusses angenommen. Um diesen Pauschalwert durch einen prozessbedingten Faktor zu ersetzen, ist eine nachvollziehbare Berechnungsmethode zu entwickeln.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Ganglinien von wasserdominanten Prozessen (Hochwasser) von feststoffdominanten Prozessen (Muren) markant (Abbildung 4, Abbildung 5). Augenscheinliche Unterschiede in der Form der Ganglinie sind die Basisdauer des Ereignisses, die Höhe des Scheitelabflusses und die oftmals beobachtete Ausbildung mehrerer, in rascher Abfolge auftretender Abflussspitzen, den sogenannten Murschüben, deren Entstehung noch nicht geklärt ist.

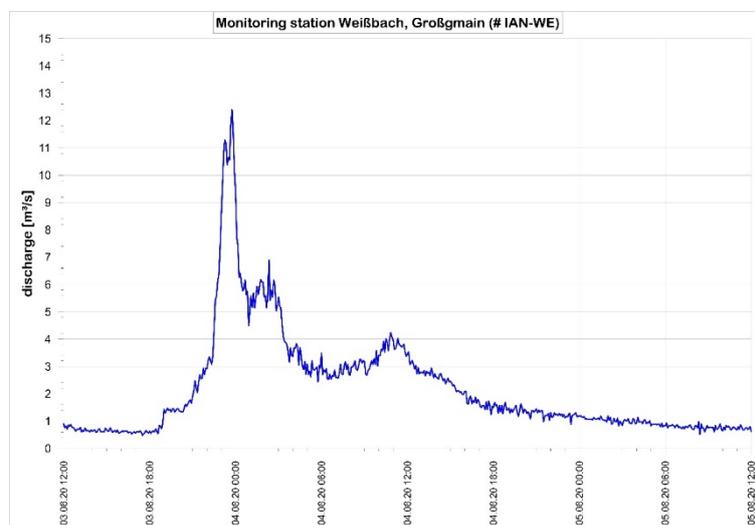


Abbildung 4: Typische Ganglinie eines Hochwassers (Weißbach, Großgmain), die Zeitachse umfasst 48 Stunden

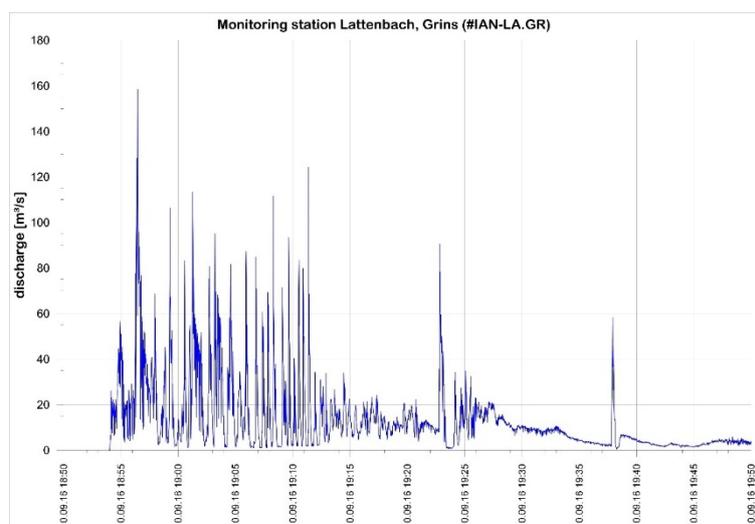


Abbildung 5: Typische Ganglinie einer Mure (Lattenbach, Grins), die Zeitachse umfasst 1 Stunde

Auf Basis dieser Gangliniencharakteristika können vier Leitprozesse (Hübl, 2006) charakterisiert werden (Abbildung 6).



- Hochwasser: je nach Größe des Einzugsgebiets eine Anstiegszeit von 10 Minuten bis Stunden und ein Mehrfaches davon für den Rückgang der Welle, üblicherweise die 3 bis 5-fache Anstiegszeit. Die Abflussfracht entspricht dem Direktabfluss, da der Basisabfluss in kleinen Einzugsgebieten zumeist vernachlässigbar klein ist. Die mitgeführten Feststoffe wirken sich auf die Ganglinie nicht aus.
- Fluvialer Feststofftransport: Die Form der Abflussganglinie entspricht der des Hochwassers, der Spitzenabfluss ist aber etwas höher, da die mitgeführten Feststoffe die Gesamtfracht erhöhen. Die Dauer der Ganglinie verändert sich gegenüber dem Prozess Hochwasser nicht.
- Murartiger Feststofftransport: Da die Feststoffe zeitlich schon sehr konzentriert abfließen ist mit einem noch höherem Spitzenabfluss zu rechnen, der sich in einer schmaleren Wellenform abbildet. Die maßgebliche Abflussdauer kann dadurch bereits gegenüber dem Prozess Hochwasser reduziert sein.
- Murgang: Beim Murgang wird nur ein Teil der Abflussfracht in einem Murschub wirksam. Dieser zeigt aber über einige Sekunden bis Minuten eine sehr hohe Feststoffkonzentration, die Dauer der Ganglinie ist daher drastisch reduziert und der Spitzenabfluss liegt weit über dem rein hydrologisch zu unterstellendem Abfluss. Wenn ein Murgang aus vielen Murschüben zusammengesetzt ist, ergibt sich ein intermittierendes Muster der Ganglinie.

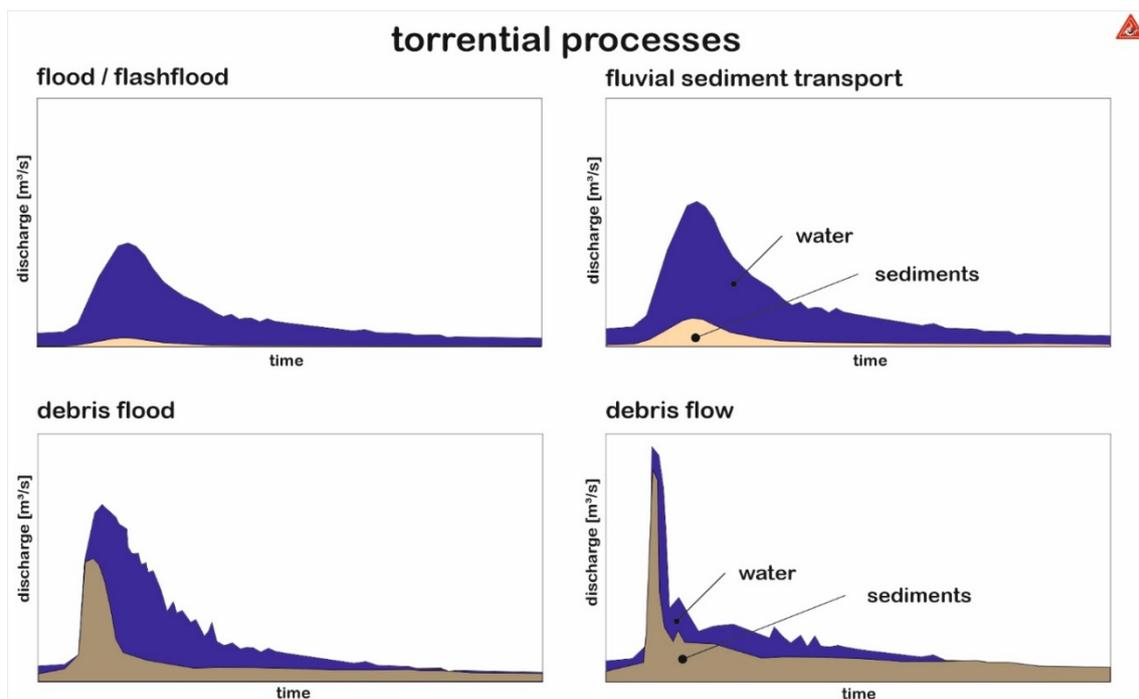


Abbildung 6: Typische Ganglinien der Verlagerungsprozesse in Wildbächen

Um diese prozessbedingte Veränderung der Ganglinie zu berücksichtigen, insbesondere aber um die Erhöhung des Scheitelabflusses des Spitzenabflusses zu erfassen, wird ein prozessspezifischer Zuschlag zum hydrologisch berechneten  $HQ_n$  vorgeschlagen. Dieser Ansatz (Tabelle 2) findet sich bei Hübl (2007), er wurde in weiterer Folge in die ONR 24800 (2009) übernommen und von dort fand er Eingang in den „LEITFADEN zur Festlegung und Harmonisierung von Bemessungsereignissen“ (BMLFUW, 2019).



Tabelle 2: Eigenschaften unterschiedlicher in Wildbacheinzugsgebieten auftretender Prozesse, basierend auf Aulitzky 1980/1984, Costa 1984, Pierson & Costa 1987, Hungr et al. 2001 (Hübl, 2006)

Verlagerungstyp	Hochwasser (flood)		Mure (landslide of flow type)	
Verlagerungsart	fluviatil		murartig	
Terminus (dt.)	Hochwasser	Fluviatiler Feststofftransport	Murartiger Feststofftransport	Murgang
Terminus (engl.)	Flood	Bedload transport	Debris flood (hyperconcentrated flow, immature debris flow)	Debris flow
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	schwach Feststofftransport	stark	Murgang
Fließverhalten	Newtonisch	Newtonisch	annähernd Newtonisch	Nicht-Newtonisch
Vol. Feststoffkonzentration (ca. Bereich)	Promillebereich	0-20 %	20-40 %	>40%
Größtkorn	mm-cm	-dm	-m	-m
Dichte (ca. 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>
Reinwasserabflussbestimmung möglich	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein
Pegelschlüssel erstellbar	Ja	Ja	Nein	Nein
$Q_{\text{gesamt}}/Q_{\text{Hochwasser}}$	1	1	1-2	2-10 (50)
Viskosität (ungefähr)	0.001-0.01 Pas	0.01-0.2 Pas	0.2-2 Pas	>2 Pas
Scherfestigkeit	Keine	Keine	Keine	Vorhanden
Maßgeblich wirkende Kräfte	Turbulenz, Schleppspannung	Turbulenz, Schleppspannung	Auftrieb, Turbulenz, Schleppspannung, dispersiver Druck	Auftrieb, dispersiver Druck, viskose und friktionale Kräfte
Verteilung der Feststoffe im Querschnitt	Feststoffe sohlennah (rollend, hüpfend, springend) und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe sohlennah (rollend, hüpfend, springend) und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe verteilt im Querschnitt
Ablagerungsform (stumme Zeugen)	Bankige Feinstoffrückstände	Sortierte Fächer und Lappen	Bänke und Lappen, zumeist korngestützt, Grobgeschiebe bis in Höhe Wasserspiegel abgelagert	Murköpfe, Murfiste (Levees) und zungenförmige Lappen, korn- oder matrixgestützt, zumeist scharfe Begrenzung der Ablagerungen, U-förmiges Abflussprofil
Sortierung der abgelagerten Feststoffe	Vorhanden	Vorhanden	Eher nicht vorhanden	Nicht vorhanden
Entmischung der Ablagerungen	ja	ja	ja/nein	nein
Schaden durch	Wasser und Schweb	Wasser, Schweb und Geschiebe	Feststoffe und Wasser	Feststoffe (und Wasser)



### 3 Intensitätsfaktor für den Leitprozess

Prinzipiell ist der Intensitätsfaktor vom betrachteten Systemzustand abhängig. Für wasserdominierte Prozesse bei denen die Form der Ganglinie durch die Feststoffe nicht verändert wird, ist die Berücksichtigung der Feststofffracht in der Berechnung des Intensitätsfaktors ausreichend. Die Anpassung erfolgt mit dem Sedimentzuschlagsfaktor ZF (Tabelle 3). Für feststoffdominierte Prozesse, deren Ganglinie von der hydrologischen maßgeblich abweicht, soll die Anpassung mit einem Prozessfaktor PF durchgeführt werden, der impliziert auch den Sedimentzuschlagfaktor beinhaltet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Berücksichtigung der Prozesse zur Ableitung eines Intensitätsfaktors

Leitprozess LP (lt. ONR)	Intensitätsfaktor (IF)	
	Vergößerung der Abflussfracht	Veränderung der Abflusscharakteristik
	Sedimentzuschlagfaktor (ZF)	Prozessfaktor (PF)
Hochwasser	(✓)	
Fluviatiler Feststofftransport	✓	
Murartiger Feststofftransport	✓	(✓)
Murgang	(✓)	✓

Der Intensitätsfaktor beschreibt allgemein den Abfluss des Leitprozesses ( $Q_{LP}$ ) im Verhältnis zum hydrologischen Abfluss ( $Q_{hydro}$ ), unabhängig von der unterstellten Jährlichkeit.

Wasserdominante Prozesse (z.B. fluviatiler Feststofftransport)	Geschiebe dominante Prozesse (z.B. Murgang)
$IF_{FFT} = \frac{Q_{LP}}{Q_{hydro}} = \frac{Q_{hydro} \cdot ZF}{Q_{hydro}}$	$IF_{MG} = \frac{Q_{LP}}{Q_{hydro}} = \frac{Q_{hydro} \cdot PF}{Q_{hydro}}$

Der Intensitätsfaktor des Bemessungsereignisses setzt den Bemessungsabfluss des 100 jährlichen Leitprozesse ins Verhältnis zum 100 jährlichen hydrologischen Abfluss (Basiswert) und kann durch weitere Faktoren, die sich aus der Situation vor Ort ergeben, angepasst werden.

$$BIF_{LP} = \frac{Q_{LP,100}}{HQ_{100}}$$

Somit errechnet sich der Bemessungsabfluss als Produkt des Bemessungs-Intensitätsfaktor mit dem 100-jährlichen Basiswert des hydrologischen Abflusses.

$$BHQ = BIF_{LP} \cdot HQ_{100}$$



## 4 Sedimentzuschlagfaktor (ZF)

### 4.1 Modell zur Bestimmung des Sedimentzuschlagfaktors

Der Sedimentzuschlagfaktor kann nur für fluviatile Ereignisse angewendet werden, da die grundsätzliche Form der Ganglinie nicht verändert wird. Berücksichtigung findet die erhöhte Gesamtabflussfracht, da in der Zeit des Ereignisabflusses zusätzlich die Geschiebefracht abgeführt werden muss.

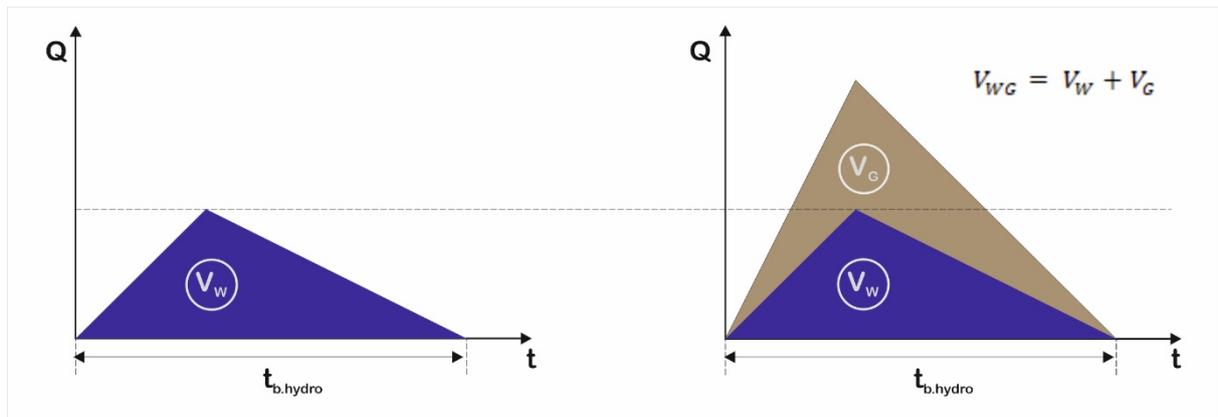


Abbildung 7: Erhöhung der Gesamtabflussfracht durch Berücksichtigung der Feststofffracht

Zur Berechnung der Gesamtabflussfracht wird die volumetrische Konzentration als empirischer Parameter eingeführt, der das Verhältnis der Geschiebefracht zur Gesamtracht darstellt. Dem Gedankenmodell wird vereinfacht eine dreiecksförmige Ganglinie unterstellt. Werden im Abfluss Massen [kg] aufgezeichnet, kann analog zum Volumensansatz der Sedimentzuschlagfaktor bestimmt werden.

per Volumen	per Masse
$V_{WG} = V_W + V_G$	$\rho_{WG} = \rho_G \cdot c_v + \rho_W \cdot (1 - c_v)$ $\rho_{WG} = \rho_G \cdot c_v + \rho_W - \rho_W \cdot c_v$ $\rho_{WG} = \rho_W + c_v \cdot (\rho_G - \rho_W)$
$c_v = \frac{V_G}{V_W + V_G} = \frac{V_G}{V_{WG}}$	$c_v = \frac{(\rho_{WG} - \rho_W)}{(\rho_G - \rho_W)}$ <p>Mit <math>\rho_G = 2,650 \text{ t/m}^3</math> und <math>\rho_W = 1 \text{ t/m}^3</math></p> $c_v = \frac{(\rho_{WG} - 1)}{1,650}$



$c_v \cdot V_w + c_v \cdot V_g = V_g$ $c_v \cdot V_w = V_g \cdot (1 - c_v)$ $V_g = V_w \cdot \left( \frac{c_v}{1 - c_v} \right)$ $V_{wg} = V_w + V_w \cdot \left( \frac{c_v}{1 - c_v} \right)$ $= V_w \cdot \left( 1 + \frac{c_v}{1 - c_v} \right)$ $V_g = V_{wg} \cdot c_v$	$V_{wg} = V_w \cdot \left( 1 + \frac{c_v}{1 - c_v} \right)$ $V_{wg} = V_w \cdot \left( 1 + \frac{\left( \frac{\rho_{WG} - 1}{1,650} \right)}{\left( 1 - \left( \frac{\rho_{WG} - 1}{1,650} \right) \right)} \right) =$ $= \frac{V_w}{\left( 1 - \left( \frac{\rho_{WG} - 1}{1,650} \right) \right)} \cdot \left( 1 - \left( \frac{\rho_{WG} - 1}{1,650} \right) + \left( \frac{\rho_{WG} - 1}{1,650} \right) \right) =$ $= \frac{V_w}{\left( 1 - \left( \frac{\rho_{WG} - 1}{1,650} \right) \right)} \cdot \frac{1}{1,65} \cdot (1,65 - \rho_{WG} + 1 + \rho_{WG} - 1) =$ $= \frac{V_w \cdot 1,650}{1,65 - \rho_{WG} + 1} = V_w \cdot \left( \frac{1,65}{2,65 - \rho_{WG}} \right)$ $V_{wg} = V_w \cdot \left( \frac{(\rho_G - \rho_W)}{\rho_G - \rho_{WG}} \right)$
$ZF_v = \left( 1 + \frac{c_v}{1 - c_v} \right)$	$ZF_\rho = \frac{(\rho_G - \rho_W)}{(\rho_G - \rho_{WG})}$ <p>Mit <math>\rho_G = 2,650 \text{ t/m}^3</math> und <math>\rho_W = 1 \text{ t/m}^3</math></p> $ZF_\rho = \frac{1,650}{(2,650 - \rho_{WG})}$
$V_{wg} = V_w \cdot ZF_v$ $V_{wg} = \frac{V_g}{c_v}$	$V_{wg} = V_w \cdot ZF_\rho$ $V_{wg} = \frac{V_g}{c_v}$

Die Erhöhung der Reinwasserabflussfracht bedingt bei gleichbleibender Basis der dreiecksförmigen Ganglinie einen höheren Abflussscheitel. Zur Abschätzung dieser Erhöhung gegenüber dem Reinwasserabfluss wird ebenfalls die dreiecksförmige Ganglinie herangezogen, wobei unterstellt wird, dass der höchste Geschiebetrieb auch beim höchsten Abfluss erfolgt. Es zeigt sich, dass auch der Abflussscheitel der Reinwasserganglinie mit dem Sedimentzuschlagfaktor zu multiplizieren ist, um den Gesamtsitzenabfluss zu erhalten. Prinzipiell ließe sich die gesamte Reinwasserganglinie mit diesem Zuschlagfaktor multiplizieren. Dies entspricht aber nicht mehr den Geschiebetransportansätzen.

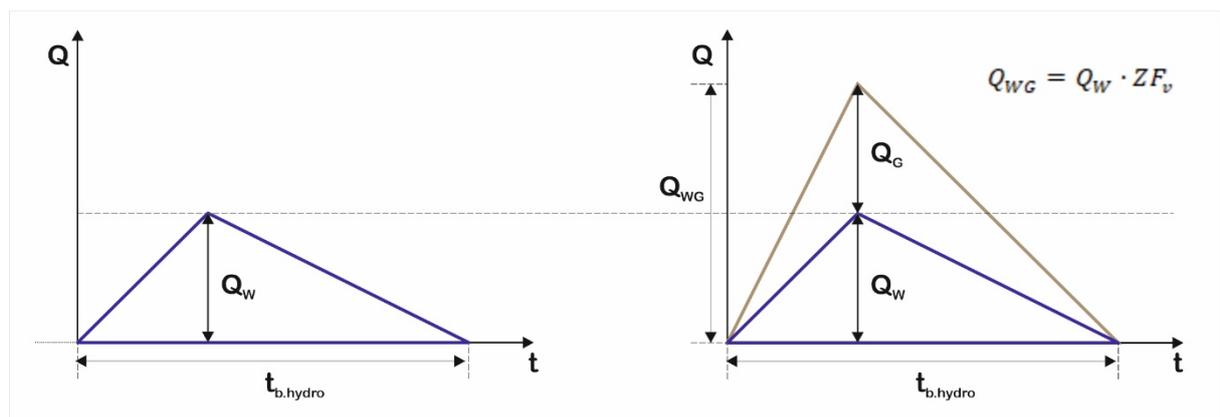




Abbildung 8: Erhöhung des Gesamtabflussscheitels durch Berücksichtigung des Geschiebetransports

$$V_W = \frac{t_b \cdot Q_W}{2}$$

$$Q_W = \frac{2 \cdot V_W}{t_b}$$

$$V_{WG} = V_W \cdot ZF_v = \frac{t_b \cdot Q_{WG}}{2}$$

$$Q_{WG} = \frac{2 \cdot V_{WG}}{t_b} = \frac{2 \cdot V_W \cdot ZF_v}{t_b}$$

$$Q_{WG} = Q_W \cdot ZF_v$$

$$Q_{wg} = Q_w \cdot \frac{1,650}{(2,650 - \rho_{WG})}$$

Der Bemessungsabfluss für fluviatile Abflüsse errechnet sich mit dem entsprechenden Sedimentzuschlagfaktor.

Dieser Zuschlagsfaktor berücksichtigt nur die mitgeführten Schwebstoffe und das transportierte Geschiebe, Veränderungen im Abflussprozess müssen davon getrennt betrachtet werden (Tabelle 4). Werden zusätzliche Prozessänderungen unterstellt, ist der Intensitätsfaktor abweichend vom Zuschlagsfaktor festzulegen.

$$BHQ = BIF \cdot HQ_{100}$$

Tabelle 4: Zuschlagfaktoren für fluviatile Prozesse

Volumetrische Feststoffkonzentration [-]	Zuschlagfaktor	Intensitätsfaktor
0,05	1,05	1,05-1,4
0,10	1,11	1,11-1,4
0,15	1,18	1,18-1,4
0,20	1,25	1,25-1,4

## 4.2 Beispiel zur Berechnung des Sedimentzuschlag- und Intensitätsfaktors

Gegeben:

Abflussfracht ( $V_W$ )	101318 m <sup>3</sup>
Feststofffracht ( $V_G$ )	31716 m <sup>3</sup>
Gesamtabflussfracht ( $V_{WG}$ )	133034 m <sup>3</sup>
Hochwasserspitze ( $Q_W$ )	10 m <sup>3</sup> /s.m
Korndurchmesser $d_{30}$	0,05 [m]
Korndurchmesser $d_{50}$	0,10 [m]
Korndurchmesser $d_{90}$	0,30 [m]
Gefälle	0,2 [-]



### Ergebnis mit empirischem Ansatz:

Volumetrische Feststoffkonzentration ( $c_v$ )	0,24
Sedimentzuschlagfaktor (ZF)	1,31
Intensitätsfaktor (IF)	1,31
Gesamtabflussspitze ( $Q_{WG}$ )	13,1 m <sup>3</sup> /s.m

### Ergebnis mit TomSed (1D Geschiebetransportmodell) und einer Reinwasserganglinie:

Volumetrische Feststoffkonzentration ( $c_v$ )	0,24
Gesamtabflussspitze ( $Q_{WG}$ )	13,2 m <sup>3</sup> /s.m
Sedimentzuschlagfaktor (ZF)	1,31
Intensitätsfaktor (IF)	1,32

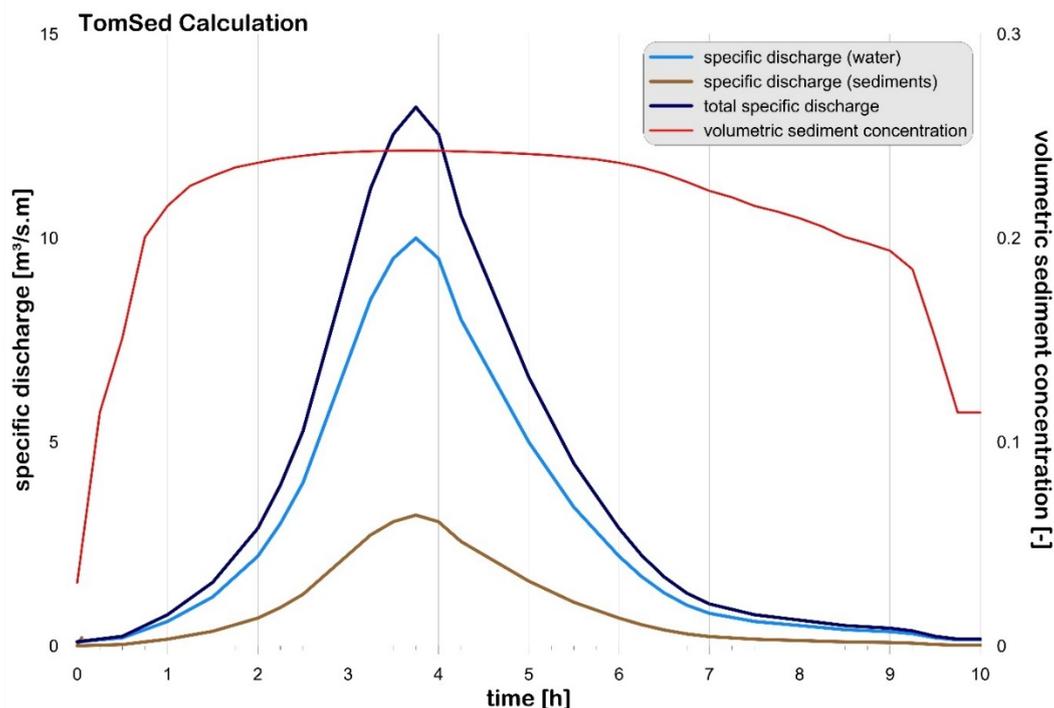


Abbildung 9: Ergebnisse einer Geschiebetransportberechnung bei gegebener Abflussganglinie mit TomSed

Die Scheitelwerte aus dem empirischen Ansatz und der Berechnung mit TomSed weichen nur sehr geringfügig voneinander ab. Für die Abschätzung des Scheitelwertes scheint daher die Berechnung mit dem empirischen Ansatz anwendbar.



## 5 Prozessfaktor (PF) für Muren

Murschübe und Murgänge weisen nur eine kurze Abflussdauer auf. Unter der Annahme, dass die Murenfracht ( $V_{MG}$ )  $10.000 \text{ m}^3$  bei einer volumetrischen Feststoffkonzentration von 0,7 beträgt, setzt sich dieser Murgang aus  $7000 \text{ m}^3$  Feststoffen ( $V_G$ ) und  $3000 \text{ m}^3$  Wasser ( $V_W$ ) zusammen. Diese Größenordnung einer Murenfracht tritt z.B. in fast 80 % aller dokumentierten Muren in Österreich auf. Dass bei diesen Ereignissen in Wildbacheinzugsgebieten aber nur eine Abflussfracht von  $3000 \text{ m}^3$  aus den Niederschlägen resultiert, ist unwahrscheinlich. Daraus ist ersichtlich, dass nicht die gesamte Abflussfracht im Murgang enthalten sein kann. Weiters ist in Videosequenzen von Murgängen zu Beginn des Murgangs zumeist keine Erhöhung der Wassertiefe erkennbar, der Anstieg der Abflusstiefe erfolgt innerhalb weniger Sekunden. Dies ist mit den üblichen hydrologischen Annahmen nicht vereinbar. Es darf also nicht der hydrologisch wirksame Abfluss und die damit verbundene Abflussfracht zur Bestimmung von Murenganglinien verwendet werden. Beispielhaft ist in Abbildung 10 der gemessene Murenabfluss mit dem simulierten hydrologischen Abfluss gemeinsam dargestellt. Die für fluviatile Ereignisse vorgeschlagene Methode des Sedimentzuschlagfaktors, die den Hydrographen des Wasserabflusses unterstellt, ist deshalb nicht anwendbar.

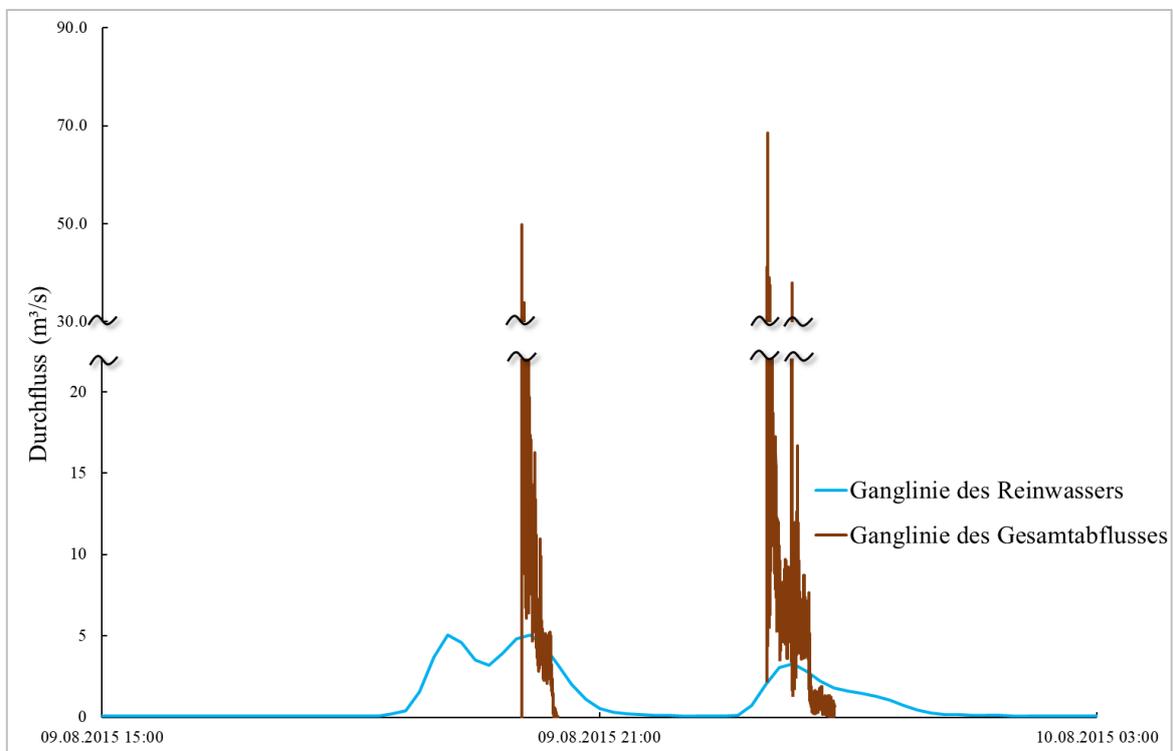


Abbildung 10: Hydrologische Abflussganglinie und gemessene Murenganglinien am Lattenbach (Tasser, 2021)



Unter der alleinigen Annahme, dass sich die Prozessdauer im Verhältnis  $t_{b.HW}$  zu  $t_{b.MG}$  bei gleichem Abflussvolumen verringert, würde sich die Abflussspitze um einen Faktor (Prozessfaktor) wie in Abbildung 11 vergrößern.

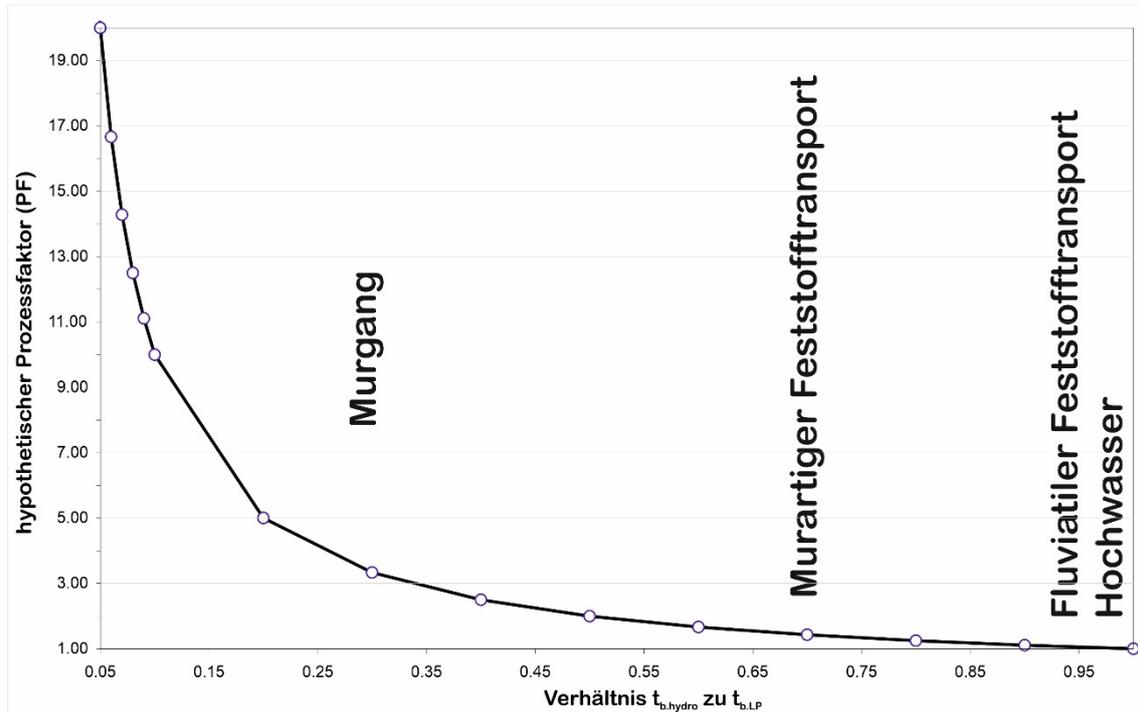


Abbildung 11: Erhöhung der Abflussspitze bei Verringerung der Abflussdauer bei gleichbleibender Abflussfracht

Für die dafür erforderlichen Annahmen fehlen aber entsprechende Grundlagen, sodass diese Annahme nur hypothetisch bleibt. Festgestellt werden kann nur, dass

- Murschübe von kurzer Dauer sind,
- nur ein Teil der Abflussfracht in einem Murgang oder Murschub enthalten ist (Abbildung 12),
- dass die Größe eines Murganges somit von der Größe des Einzugsgebietes unabhängig ist,
- dass die Abflussscheitelwerte von Murgängen größer sind als bei Reinwasserabflüssen
- und dass sich ein Intensitätsfaktor aus dem Verhältnis von Murgang- zu Reinwasserabflussspitze ergibt (Abbildung 13).

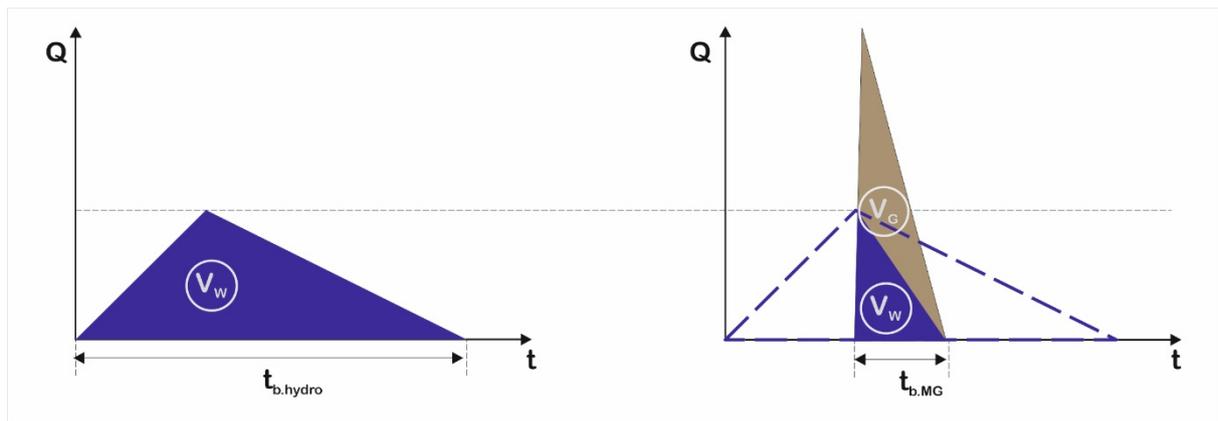


Abbildung 12: Veränderung der Ganglinie von Hochwasser (links) zu Murgang (rechts)

Der mögliche Prozessfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis vom hydrologischen ( $Q_{hydro}$ ) zum Murenabfluss ( $Q_{MG}$ ) bei gleichen hydrologischen Auslösebedingungen.

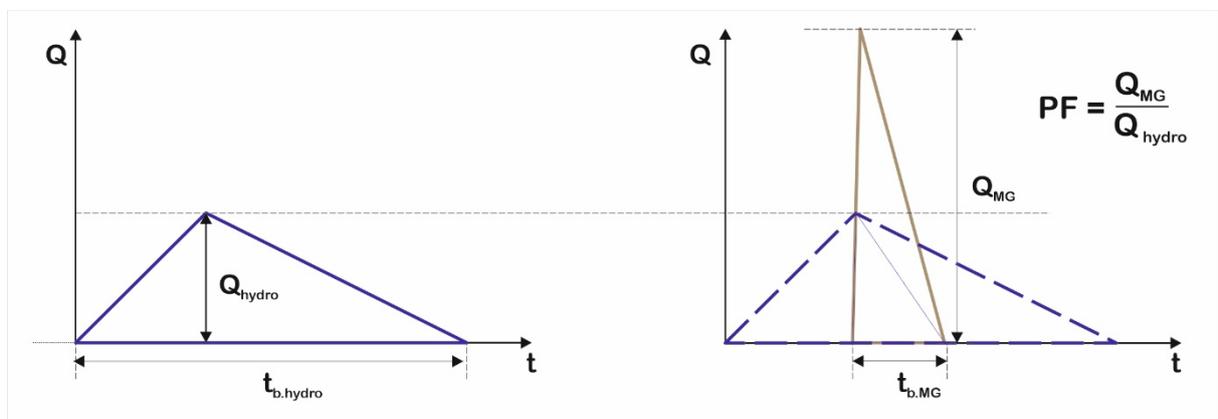


Abbildung 13: Prinzipskizze zum Prozessfaktor beim Murgang

## 6 Aufgabenstellung

Zur Bemessung von technischen Schutzmaßnahmen und als Grundlage für Simulationen für die Gefahrenanalyse soll ein einfaches Verfahren entwickelt werden, das nachvollziehbar und mit den üblicherweise vorhandenen Daten, wie z. B. dem mobilisierbaren Geschiebepotential, Spitzenabflüsse von Murgängen sowie Muren-Hydrographen ermittelt. Zugleich sollte eine Vergleichbarkeit der Kennwerte dieser Hydrographen und eine Kontrolle vorhandener Messdaten, bzw. publizierter Ganglinien ermöglicht werden.

Ziel des Verfahrens sollte eine Methode sein, die eine geschlossene Ableitung von Ganglinienform, Scheitelabfluss und Volumen von Murschüben zulässt.

Der Prozessfaktor sollte anschließend indirekt ermittelt werden, indem der berechnete Scheitelabfluss von Murschüben dem Spitzenwert des hydrologischen Abflusses aus einem Niederschlag-Abflussmodell gegenübergestellt wird. Dieses Verhältnis sollte in weiterer Folge mit publizierten Intensitätsfaktoren verglichen werden.



## 7 Methodik

Zur Entwicklung einer passenden Methodik ist vorab die Frage zu stellen, welche Eingangsdaten grundsätzlich vorhanden sind.

In zahlreichen Publikationen der letzten 20 Jahre finden sich graphisch dargestellte Wasserstandslinien (Ganglinie Murenabflusshöhe, stage curves) verschiedener Murgänge in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung. Die Qualität der Angaben lässt sich aber nicht feststellen. Bestenfalls werden in den Publikationen auch Angaben zur Murenfracht bzw. zu den Spitzenabflüssen angeführt. Generell nicht nachvollziehbar ist, ob die abgelagerten Murenfrachten geschätzt oder gemessen wurden. Trotzdem stellen diese Angaben eine auswertbare Grundlage für weitere Untersuchungen dar.

Aus diesen Ganglinien der Murenabflusshöhen lassen sich folgende Parameter ableiten:

- Abflusshöhenganglinie
- Phänotyp des Murgangs zur Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens
- Anstiegszeit
- Abfallszeit
- Spitzenabfluss (wenn angegeben)
- Murenfracht (wenn angegeben)

In den letzten Jahren wurden am Institut für alpine Naturgefahren die Messtationen am Lattenbach und der Gadoria mit einem Hochfrequenzradar bestückt, sodass zumindest Oberflächengeschwindigkeiten von Murgängen in hoher zeitlicher Auflösung (1 Sekunde) gemeinsam mit Abflusshöhen gemessen werden. Dadurch lassen sich die Murenabflüsse in sekundlicher Auflösung berechnen.

Aus den Messungen lassen sich folgende Parameter ableiten:

- Abflusshöhenganglinie
- Phänotyp des Murgangs zur Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens
- Abflussganglinie
- Anstiegszeit
- Abfallszeit
- Volumetrische Feststoffkonzentration
- Spitzenabflüsse
- Murenfracht

Von einigen Autoren wurden auch empirische Ansätze publiziert, die den Murenscheitelabfluss auf Basis der Murenfracht abschätzen lassen. Diese Funktionen können jedenfalls zu Vergleichszwecken herangezogen werden.



Weiters stehen Datensätze für Murenfrachten und Spitzenabflüssen aus dem Wildbach- und Lawinenkataster zur Verfügung, die im Rahmen von Ereignisdokumentationen erhoben wurden.

Zur Beschreibung der Form der Ganglinie stehen somit aus den Literaturdatensätzen und den Messdaten die Anstiegszeit, die Abfallzeit und deren Verhältnis zur Verfügung (Abbildung 14). Somit lässt sich ein dimensionsloser Unit Hydrograph für alle Ereignisse bestimmen. Dieser beruht auf dem annähernd dreiecksförmigen dimensionslosen Modell von Kreps (1951), das mit dem peak rate factor (PRF) aus dem SCS Verfahren erweitert wird. Zugleich wird als Variable das Verhältnis von Abfall- zu Anstiegszeit eingeführt, wodurch das Modell von Kreps an die unterschiedlichen Murenhydrographen besser angepasst werden kann. Die Umrechnung in die reale Ganglinie erfolgt unter Berücksichtigung der Murenfracht, wobei die volumetrische Konzentration als Variable eingeführt wird, die den Bezug zum vor Ort aufgenommenen mobilisierbaren Geschiebepotential herstellt.

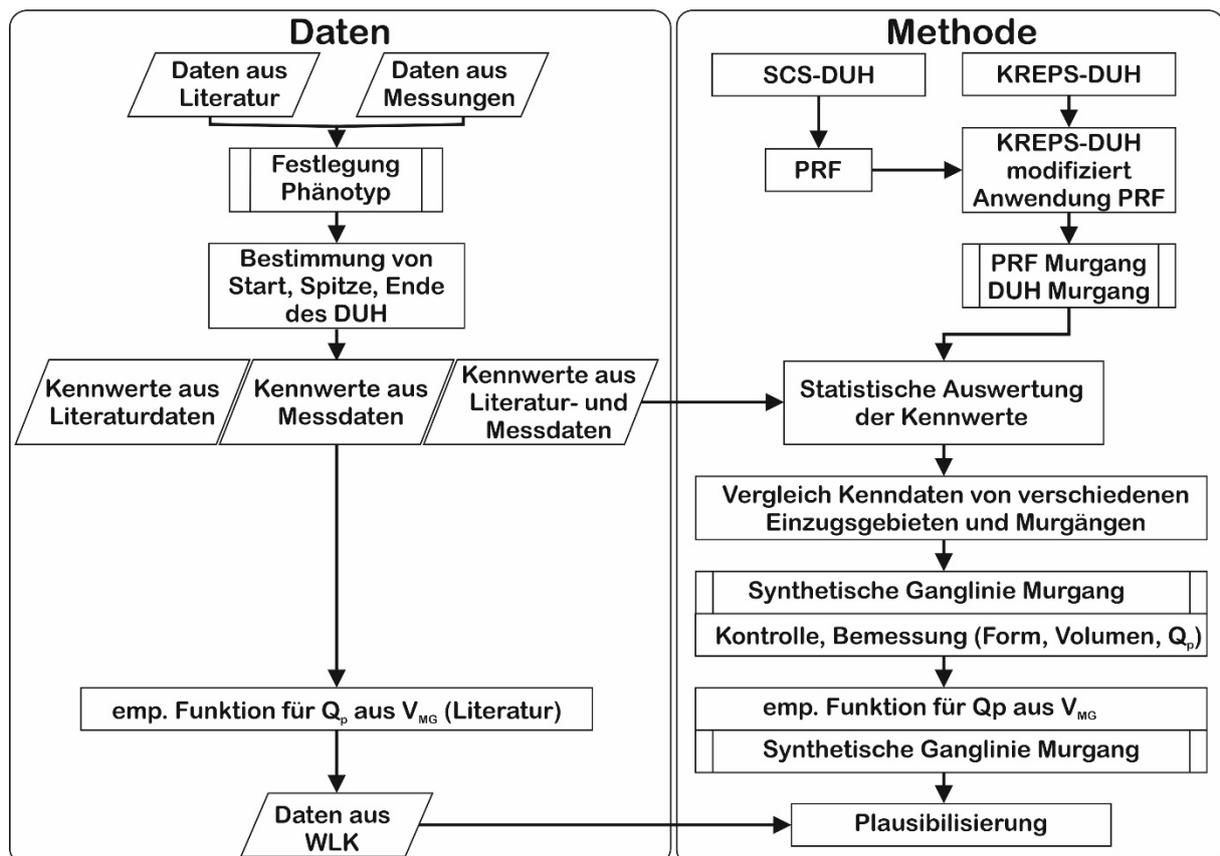


Abbildung 14: Methodik Ablaufdiagramm

Eine einfache statistische Analyse der Kennwerte der dimensionslosen Ganglinie soll die Häufigkeitsverteilung der Kennwerte liefern und einen Vergleich unterschiedlicher Ganglinienformen ermöglichen.



Der Vergleich der Kennwerte der Murenganglinien, sowohl für einzelne Schübe als auch für unterschiedliche Einzugsgebiete, erfolgt durch die Implementierung des Abflusses aus einem mobilisierten Einheitsvolumen von  $1 \text{ m}^3$ .

Die synthetische Murenganglinie kann einerseits zur Plausibilisierung von beschriebenen oder gemessenen Murenganglinien eingesetzt werden, wenn die Formen der Ganglinien ähnlich sind. Andererseits lässt sich mit angenommenen Kennwerten, die innerhalb der statistisch ermittelten Bandbreite liegen, eine Ganglinie für die Bemessung oder als Eingangsganglinie für weitere Simulationen ableiten.

Die Kennwerte des DUH können auch in Beziehung zur Murenfracht gesetzt werden, wodurch ein empirischer Zusammenhang zwischen Murensitzenabfluss und Murenfracht hergestellt werden kann. Diese Funktion lässt sich mit anderen publizierten Formeln vergleichen. Bei diesem Ansatz ist jedoch vorteilhaft, dass sowohl Form der Ganglinie, Fracht und Scheitelabfluss zusammenpassen. Dadurch kann durch Umformen der Ausgangsgleichungen aus der Murenfracht und dem Scheitelabfluss die Kennwerte der Form der Ganglinie bestimmt werden.

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse dieser Methode werden die zumeist angenommenen (geschätzten) Werte zur Murenfracht und zum Spitzenabfluss aus dem Wildbach- und Lawinenkataster als auch publizierte Angaben über diese Werte herangezogen.

### **7.1 Abflussscheitelwert aus dimensionsloser Ganglinie nach SCS (SCS-DUH)**

Eine dimensionslose Einheitsganglinie (DUH) wurde von Victor Mockus in den 1950er Jahren entwickelt (Mockus, 1949). Die Ordinaten des Abflusses werden als Verhältnis des Scheitelabflusses zum Abfluss des Zeitpunktes  $t$  ( $Q/Q_p$ ), die Abszissenwerte als Vielfaches der Zeit zum Erreichen des Scheitelabflusses ( $t/t_p$ ) angegeben. Die Form der dreiecksförmigen (*triangular*) dimensionslosen Einheitsganglinie (DUH) nach SCS (1972) beruht auf der Auswertung zahlreicher Messungen aus verschiedenen ländlichen Einzugsgebieten und stellt die Verhältnisse für ein „durchschnittliches“ Einzugsgebiet dar (Abbildung 15).

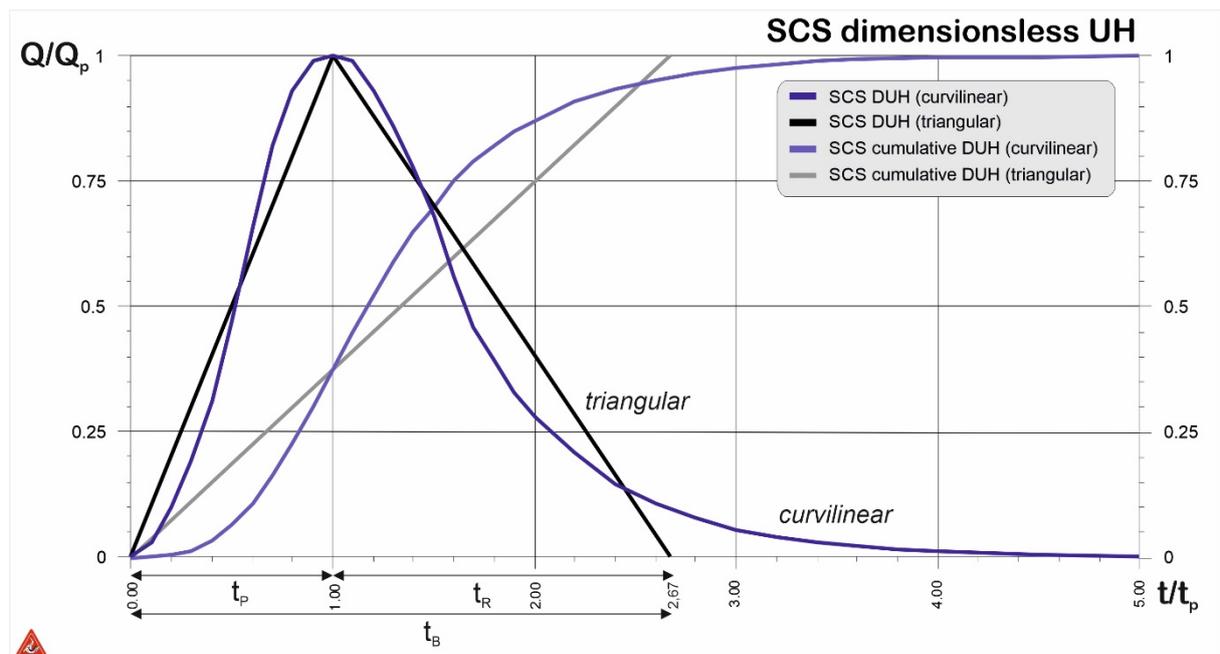


Abbildung 15: Dimensionsloser Unit Hydrograph (SCS-DUH)

Der Scheitelabfluss, der sich aufgrund der geometrischen Verhältnisse der dreiecksförmigen Einheitganglinie ergibt, leitet sich folgendermaßen ab:

$$V_D = \frac{1}{2} \cdot Q_p \cdot (t_p + t_r)$$

$$Q_p = \frac{2 \cdot V_D}{t_p + t_r}$$

Mit

$$\frac{2}{t_p + t_r} = \frac{K_{SCS}}{t_p}$$

ergibt sich für den Abflussscheitel

$$Q_p = \frac{K_{SCS}}{t_p} \cdot V_D$$

Dieser  $K_{SCS}$ -Faktor beschreibt die Art der Abflusskonzentration des Einzugsgebietes und beinhaltet somit die wesentlichen hydrologischen Charakteristiken des Einzugsgebietes (Auffüllen und Entleeren des Einzugsgebietes).

Bei dem triangularen DUH gilt

$$t_r = 1,67 \cdot t_p$$

$$K_{SCS} = \frac{2 \cdot t_p}{t_p \cdot \left(1 + \frac{t_r}{t_p}\right)} = \frac{2}{\left(1 + \frac{t_r}{t_p}\right)} = \frac{2}{\left(1 + \frac{1,67 \cdot t_p}{t_p}\right)} = 0,75$$

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Einheiten wird noch der Konvertierungsparameter CF eingeführt, der alle Dimensionsumrechnungen beinhaltet.



$$Q_p = \frac{K_{SCS} \cdot CF \cdot V_D}{t_p}$$

$$V_D = \frac{Q_p \cdot t_p}{K_{SCS} \cdot CF}$$

$V_D$  Direktabflussfracht [ $m^3$ ]

$K_{SCS}$  Parameter zur Charakterisierung der Abflusskonzentration [-]

$CF$  Konvertierungsparameter

Nach Fang et al. (2005) entspricht die Summe der Ordinaten ( $u_i$ ) der dimensionslosen SCS Ganglinie in etwa dem Kehrwert von  $K_{SCS}$  und kann als Formfaktor der Ganglinie ( $SF_{SCS}$ ) bezeichnet werden.

$$u_i = \frac{(\theta_{i-1} + \theta_i)}{2} \cdot (\tau_i - \tau_{i-1})$$

$$\sum_i u_i = \sum_i \frac{(\theta_{i-1} + \theta_i)}{2} \cdot (\tau_i - \tau_{i-1}) = \frac{1}{K_{SCS}} = SF_{SCS}$$

$\theta$   $Q/Q_p$

$\tau$   $t/t_p$

Der Quotient aus dem Konvertierungsfaktor und dem Formfaktor wird als sogenannter *peak rate factor* (PRF) in die Berechnung eingeführt.

$$PRF_{SCS} = \frac{CF}{SF_{SCS}}$$

Mit dem PRF lassen sich die Scheitelwerte und Frachten unter Berücksichtigung der Form der Ganglinie einfach in Beziehung setzen.

$$V_D = \frac{SF_{SCS}}{CF} \cdot Q_p \cdot t_p = \frac{1}{PRF} \cdot Q_p \cdot t_p$$

$$Q_p = \frac{CF}{SF_{SCS}} \cdot \frac{V_D}{t_p} = PRF \cdot \frac{V_D}{t_p}$$

## 7.2 Abflussscheitelwert aus dimensionsloser Ganglinie nach Kreps

Durch Vergleich verschiedener Hochwasserganglinien leitete Kreps (1957) ein allgemeines mittleres Verhältnis des Hochwasseranstieges zum Hochwasserabfall ab. Durch einen Formfaktor ( $SF_K$ ) kann die Form des abfallenden Astes der Ganglinie durch eine Änderung der Dauer berücksichtigt werden.

$$t_b = t_p \cdot (1 + 3 \cdot (SF_K - 0,5))$$

$$SF_K = 1,5 \cdot \beta$$

$$\beta = \frac{t_b + 0,5}{4,5} \quad (\beta \geq 0,556)$$

$$SF_K = 1,5 \cdot \left( \frac{t_b + 0,5}{4,5} \right) = 0,333 \cdot t_b + 0,167$$

$SF_K$  Formfaktor nach Kreps (1957)



$\beta$  Multiplikator des Formfaktors (um mindestens  $t_p = t_r$  zu erzielen)

Standardmäßig wird der Multiplikator ( $\beta$ ) mit 1 angenommen, wodurch die Dauer der dimensionslosen Ganglinie der 4-fachen Anstiegszeit entspricht (Tabelle 5).

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen dem Multiplikator  $\beta$  und dem Formfaktor auf die Dauer des Ereignisses

$t_p$	$\beta$	$SF_K$	$t_b$		$t_p$	$\beta$	$SF_K$	$t_b$
1	0,556	0,834	2,0		1	1	1,5	4,0
2	0,556	0,834	4,0		2	1	1,5	8,0
3	0,556	0,834	6,0		3	1	1,5	12,0
4	0,556	0,834	8,0		4	1	1,5	16,0

Die Stützstellen der sogenannten Regelganglinie sind in ihrer Größe vorgegeben, die zeitliche Positionierung wird jedoch über den Formfaktor angepasst (Tabelle 6).

Tabelle 6: DUH nach Kreps (1957)

$\theta$ time ratio ( $t/t_p$ )	$\tau$ peak ratio ( $Q/Q_p$ )
0	0
0,25	0,2
0,5	0,5
0,75	0,8
1	1
$1+(SF_K - 0,5) \cdot 0,25$	0,8
$1+(SF_K - 0,5) \cdot 0,55$	0,6
$1+(SF_K - 0,5) \cdot 1,00$	0,4
$1+(SF_K - 0,5) \cdot 1,80$	0,2
$1+(SF_K - 0,5) \cdot 2,40$	0,07
$1+(SF_K - 0,5) \cdot 3,00$	0

Mit dieser Regelganglinie erhält man einen fast linearen Anstieg der dimensionslosen Ganglinie bis zum Scheitelwert, der abfallende Ast ist jedoch mehrfach geknickt (Abbildung 16).

Die Summe der Ordinaten der Einheitganglinie entspricht bei Kreps direkt dem Formfaktor ( $SF_K$ ) und nicht wie beim SCS-DUH nach Fang (2005) dem Kehrwert der Summe der Ordinaten der dimensionslosen Einheitganglinie.

time ratio

$$\tau_i = t_i/t_p$$

peak ratio

$$\theta_i = Q_i/Q_p$$

DUH ordinate

$$u_i = \frac{(\theta_{i-1} + \theta_i)}{2} \cdot (\tau_i - \tau_{i-1})$$



shape factor

$$SF_K = \sum_i \frac{(\theta_{i-1} + \theta_i)}{2} \cdot (\tau_i - \tau_{i-1}) = \sum u_i$$

mass curve ratio

volume ratio

$$\sum_1^i \frac{u_i}{SF_K}$$

Tabelle 7: Beispiel für eine Regelganglinie nach Krepis mit  $\beta = 1$  und  $SF_K = 1,5$ 

i	$\tau_i$	$\theta_i$	$u_i$	$\frac{u_i}{\sum u_i}$	$\sum_1^i \frac{u_i}{SF_K}$
0	0	0	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.25	0.2	0.0250	0.0164	0.0164
2	0.5	0.5	0.0875	0.0576	0.0740
3	0.75	0.8	0.1625	0.1069	0.1809
4	1	1	0.2250	0.1480	0.3289
5	1.25	0.8	0.2250	0.1480	0.4770
6	1.55	0.6	0.2100	0.1382	0.6151
7	2	0.4	0.2250	0.1480	0.7632
8	2.8	0.2	0.2400	0.1579	0.9211
9	3.4	0.07	0.0900	0.0592	0.9803
10	4	0	0.0300	0.0197	1.0000
			<b>1.5200</b>	<b>1.0000</b>	

Die Differenz zwischen dem angenommenen Formfaktor nach Krepis und der Summe der Ordinaten der Einheitsganglinie ist minimal (Tabelle 8).

Tabelle 8: Vergleich der Formfaktoren nach Krepis mit der Summe der Ordinaten

$\beta$	$SF_K$	$\sum u_i$		$\beta$	$SF_K$	$\sum u_i$
0.556	0.834	0.835		1.5	2.25	2.254
0.8	1.2	1.201		3	4.5	4.508
1	1.5	1.502		6	9	9.017
1.25	1.875	1.878		10	22.5	22.544

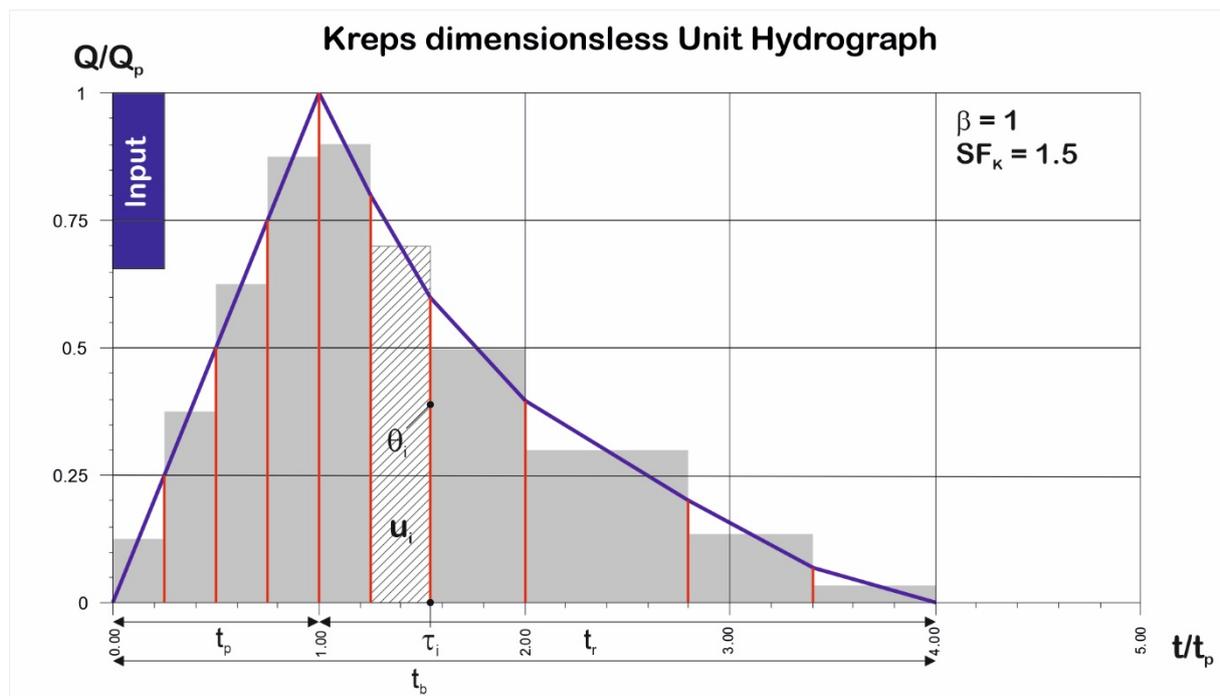


Abbildung 16: Dimensionsloser Unit Hydrograph (Kreps, 1957)

Der PRF ergibt sich aus dem Quotienten des Konvertierungsfaktor mit dem Formfaktor.

$$PRF_K = \frac{CF}{SF_K}$$

*CF* Konvertierungsfaktor Einheiten (Zeit)  
*PRF<sub>K</sub>* peak rate factor nach Kreps [-]

Mit Kenntnis der Anstiegsdauer und der Abflussfracht kann der Scheitelabfluss und sodann die Ordinaten der Ganglinie nach dem in Tabelle 6 angeführtem Schema ermittelt werden.

Der Scheitelabfluss ergibt sich mit

$$V_W = \frac{1}{PRF_K} \cdot Q_p \cdot t_p$$

$$Q_p = PRF_K \cdot \frac{V_W}{t_p}$$

Der Vorteil des DUH nach Kreps ist, dass er auch angewendet werden kann, wenn die Form der Ganglinie stark asymmetrisch ist, wie sie für Murgänge typisch ist.

### 7.3 Modifikation des Verfahrens nach Kreps für Murgänge

In den Alpen wurden in den letzten Jahren zahlreiche Messtationen errichtet, die die Höhe des Murenabflusses aufzeichnen. In der Regel unterblieb aber eine Erfassung des Abflusses aufgrund messtechnischer Schwierigkeiten. Da die Umrechnung von Wasserhöhen in Abfluss mittels eines Pegelschlüssels für Murgänge nicht möglich ist, beruht die Berechnung des Abflusses zumeist auf einer Auswertung der



Frontgeschwindigkeit der Schübe oder es wurden die Oberflächengeschwindigkeit über PIV Verfahren ermittelt.

Unter der Annahme, dass sich die Form der aufgezeichneten Murenspiegellagen nur wenig von der Form der tatsächlichen Murenganglinien unterscheidet, kann ein DUH von den normierten Wasserspiegellagen abgeleitet werden. Somit lässt sich das Verfahren nach Kreps auch auf die normierten Muren-Abflusshöhen anwenden, wodurch auch die publizierten Muren Spiegellagen ausgewertet werden können (Abbildung 17).

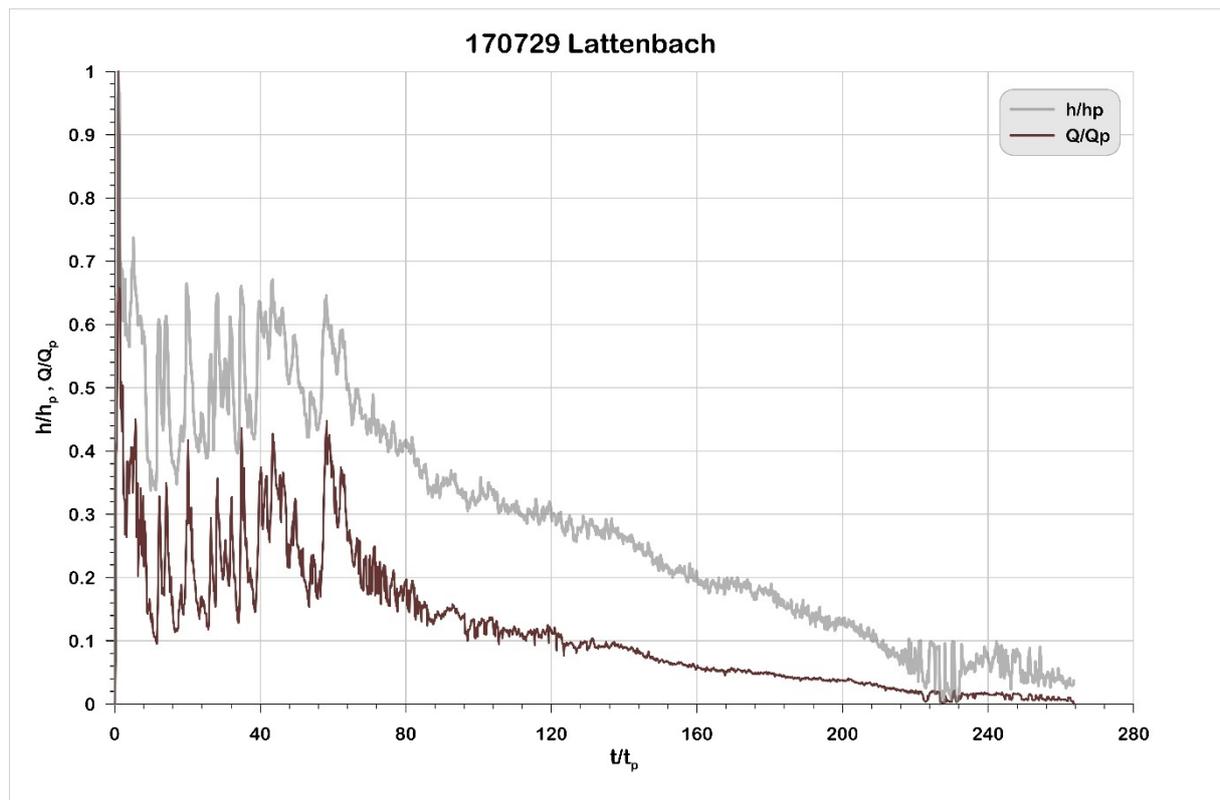


Abbildung 17: Normalisierte Abflusshöhen und Abflussganglinie (Lattenbach 29.7.2017)

Auf Grund der Asymmetrie von Murschüben wird anstelle des fixen  $\beta$ -Wertes das Verhältnis der Dauer des absteigenden Astes ( $t_r$ ) zu der des ansteigenden Astes ( $t_p$ ) für einen Murschub auf Basis von veröffentlichten oder gemessenen Wasserspiegellagen berechnet. Die Dauer des absteigenden Astes wird als ein Vielfaches der Dauer des ansteigenden Astes bestimmt und der Verhältniswert  $X$  bestimmt die Gesamtdauer des Murschubs.

Dadurch lässt sich für jeden Murschub (jedes Experiment) der Formfaktor  $SF_{df}$  individuell bestimmen. Dieser Formfaktor kann somit zahlreiche Formen eines Murschubs beschreiben. Wenn sich der Murgang jedoch aus mehreren Murschüben zusammensetzt, stößt das Verfahren an seine Grenzen.



Mit ( $t_b \geq t_p$ )

$$X = \frac{t_r}{t_p}$$

$$t_b = t_p + X \cdot t_p = t_p \cdot [1 + 3 \cdot (SF_{MG} - 0.5)]$$

$$t_p \cdot (1 + X) = t_p \cdot [1 + 3 \cdot (SF_{MG} - 0.5)]$$

$$1 + X = 1 + 3 \cdot SF_{MG} - 1.5$$

$$SF_{MG} = \frac{X + 1.5}{3}$$

$X$       *Verhältniszahl von  $t_r$  zu  $t_p$*   
 $SF_{MG}$     *Formfaktor für einen Murschub*

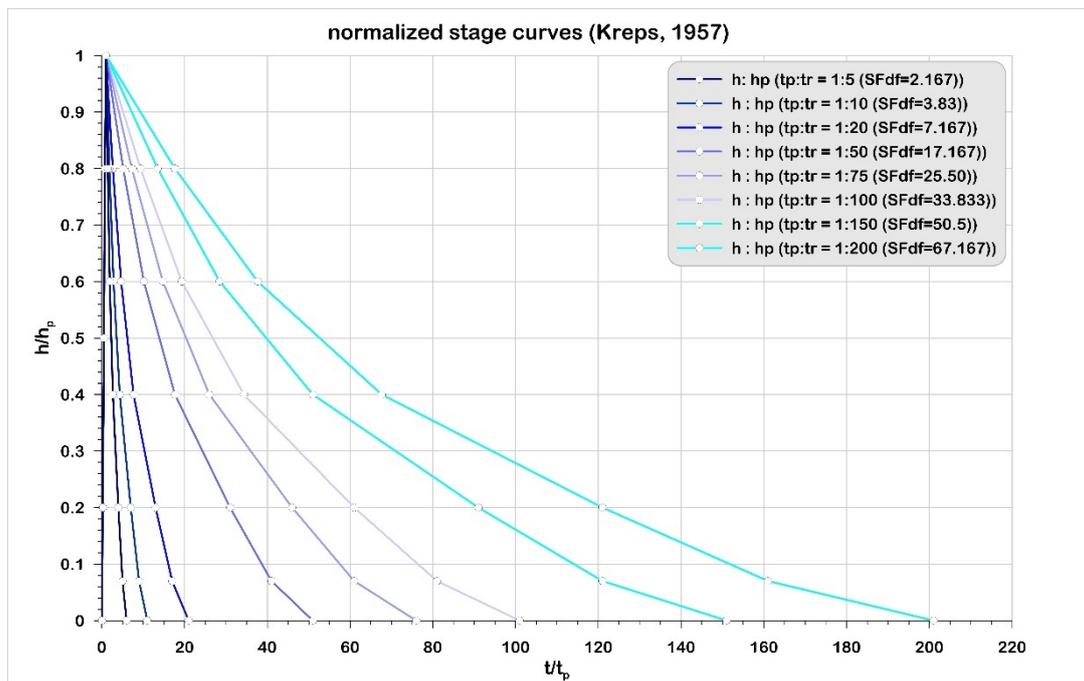


Abbildung 18: Dimensionslose Spiegellagen für verschiedene Formfaktoren  
 Der modifizierte Formfaktor ( $SF_{MG}$ ) kann somit bei Kenntnis der Abflussfracht zur Bestimmung des Scheitelwerts eines Murschubes verwendet werden.

$$PRF_{MG} = \frac{CF}{SF_{MG}}$$

$CF$       *Umrechnungsfaktor Einheiten (für Anstiegszeit)*  
 $PRF_{df}$     *peak rate factor für Murgang [-]*

$$V_{MG} = \frac{1}{PRF_{MG}} \cdot Q_{MG} \cdot t_p$$

$$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_{MG}}{t_p}$$

Als Abflussfracht wird die Murenfracht ( $V_{MG}$ ) anstelle des Direktabflussvolumens berücksichtigt. Dadurch ist auch der Sedimentzuschlagsfaktor im Formelwerk enthalten.

$$V_{MG} = \frac{V_G}{c_v} \rightarrow Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p}$$



Je nach gewähltem Zeitformat der Anstiegszeit ergeben sich folgende Rechenschritte:

Für $t_p$ in Minuten	Für $t_p$ in Sekunden
$CF = \frac{1}{60}$ $SF_{MG} = \frac{X + 1.5}{3}$ $PRF_{MG} = \frac{CF}{SF_{MG}} = \frac{1}{60} \cdot \frac{3}{X + 1.5} = \frac{0.05}{X + 1.5}$	$CF = 1$ $SF_{MG} = \frac{X + 1.5}{3}$ $PRF_{MG} = \frac{CF}{SF_{MG}} = 1 \cdot \frac{3}{X + 1.5} = \frac{3}{X + 1.5}$
$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_{MG}}{t_p}$	
$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p} = \frac{0.05}{X + 1.5} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p}$	$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p} = \frac{3}{X + 1.5} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p}$
$V_{MG} = \frac{Q_{MG} \cdot t_p}{PRF_{MG}}$	
$V_{MG} = \frac{Q_{MG} \cdot t_p \cdot (X + 1.5)}{0.05 \cdot PRF_{MG}}$	$V_{MG} = \frac{Q_{MG} \cdot t_p \cdot (X + 1.5)}{3 \cdot PRF_{MG}}$



## 7.4 Beispiel Murschub

Gegeben:

$$\begin{aligned} t_p &= 10 \text{ s} \\ t_r &= 50 \text{ s} \\ V_{MG} &= 1000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Tabelle 9: Beispiel für einen Murschub mit einer dimensionslosen Einheitsganglinie für  $X = 5$  und einem Formfaktor  $SF_{MG}$  von 2,17

i	$\tau_i$	$\theta_i$	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_1^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i = V \frac{u_i}{SF_{MG}}$
0	0.00	0	0.0000	0.0000	0.000	0.0	0.0	0.0
1	0.25	0.2	0.0250	0.0115	0.012	2.5	9.2	11.5
2	0.50	0.5	0.0875	0.0403	0.052	5.0	23.1	40.3
3	0.75	0.8	0.1625	0.0749	0.127	7.5	36.9	74.9
4	1.00	1	0.2250	0.1037	0.230	<b>10.0</b>	<b>46.2</b>	103.7
5	1.42	0.8	0.3750	0.1728	0.403	14.2	36.9	172.8
6	1.92	0.6	0.3500	0.1613	0.565	19.2	27.7	161.3
7	2.67	0.4	0.3750	0.1728	0.737	26.7	18.5	172.8
8	4.00	0.2	0.4000	0.1843	0.922	40.0	9.2	184.3
9	5.00	0.07	0.1350	0.0622	0.984	50.0	3.2	62.2
10	6.00	0	0.0350	0.0161	1.000	60.0	0.0	16.1
			<b>2.1700</b>	<b>1.0000</b>				<b>1000.0</b>

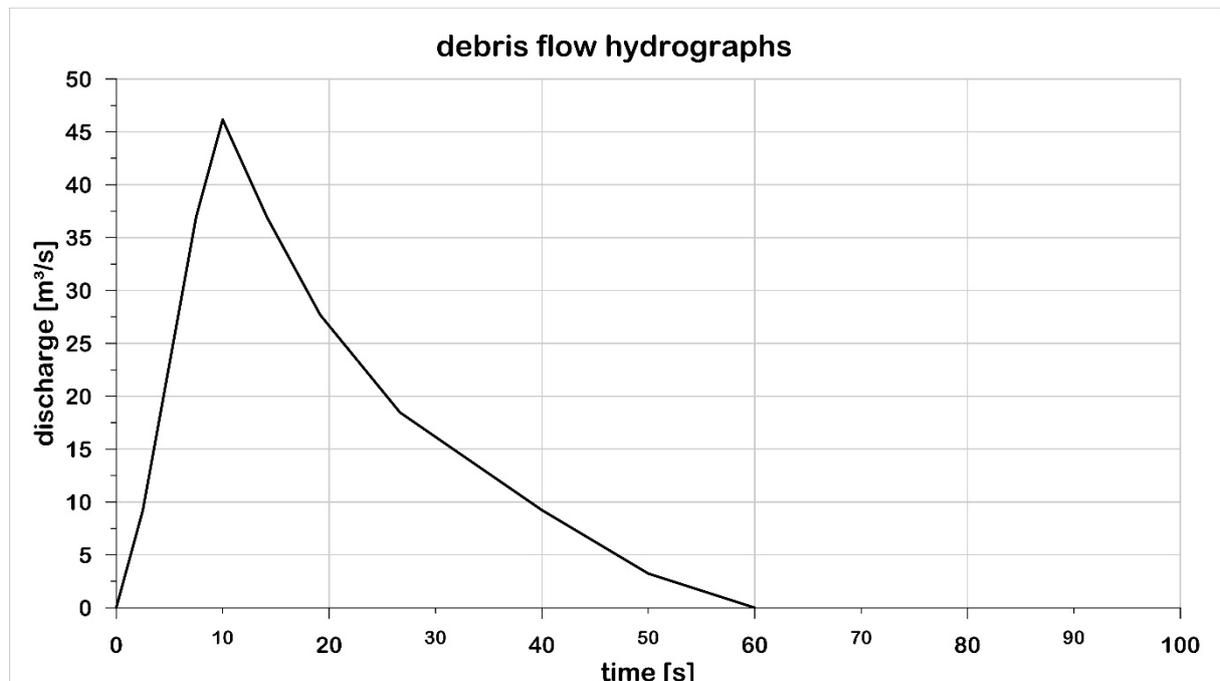


Abbildung 19: Murenganglinie für einen Murschub mit  $t_p = 5 \text{ s}$ ,  $X = 5$  und einer Murenfracht von  $1000 \text{ m}^3$



## 7.5 Festlegung des Phänotyps eines Murgangs

Die vorgeschlagene Methode benötigt als wesentliche Eingangswerte die zeitlichen Kennwerte einer Wasserspiegellagenkurve oder einer Abflussganglinie. Diese sind der Beginn des Anstiegs der Kurve beginnt, der Kulminationspunkt der Kurve und der Übergang in einen üblichen Verlauf. Hydrologisch ist dieser Vorgang der Abtrennung des Basisabflusses ähnlich. Der Unterschied besteht ab in der Ausprägung der Kurvenform, wodurch die Festlegung dieser Kennwerte erschwert wird. Ist der Anstiegspunkt meist noch relativ leicht festzulegen, ist der Endpunkt der Kurve zumeist schwierig zu ermitteln, da, wenn Wasserspiegellagen verwendet werden, eine Veränderung der Sohlage im Messquerschnitt nicht auszuschließen ist.

Zusätzlich erschwert die Form der Kurven diese Festlegung der Kennwerte, da diese einen eher dreiecksförmigen aber auch einen oszillierenden Verlauf aufweisen können. Deshalb wurden vorab charakteristische Phänotypen von Murgängen für die weitere Auswertung festgelegt. Auf Basis dieser Unterscheidung wurden die zeitlichen Kennwerte visuell festgelegt.

Der Phänotyp (altgriechisch φαίνω *phaíno* „ich erscheine“ und τύπος *týpos* „Gestalt“) oder das Erscheinungsbild ist in der Genetik die Menge aller Merkmale eines Organismus. Er bezieht sich nicht nur auf morphologische, sondern auch auf physiologische Eigenschaften und ggfs. auf Verhaltensmerkmale (<https://de.wikipedia.org/wiki/Phänotyp>)

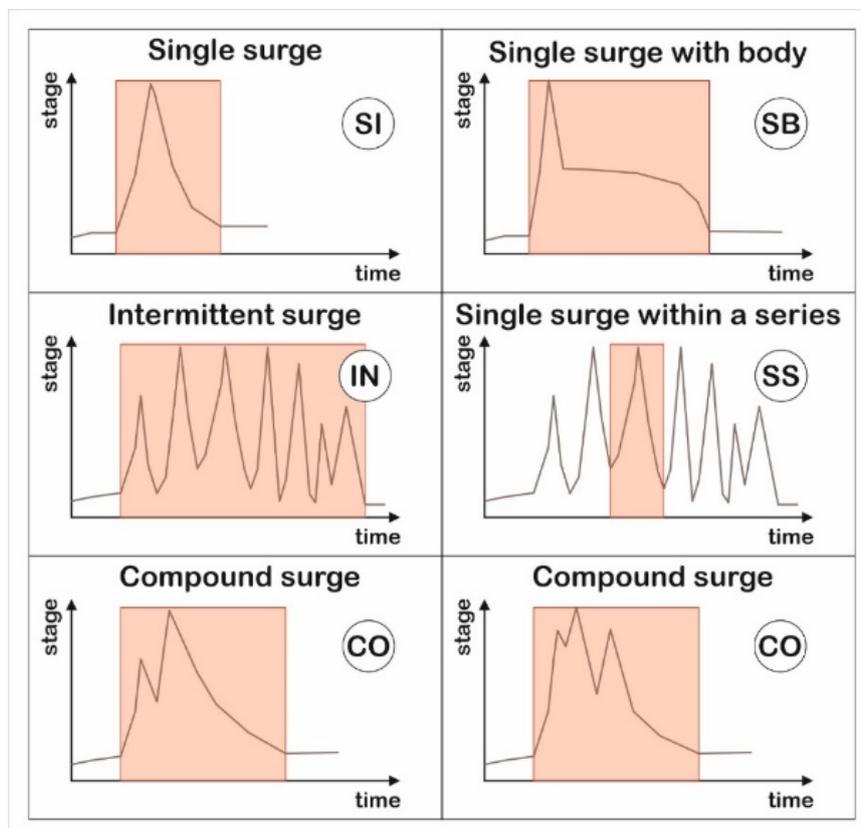


Abbildung 20: Schema zur zeitlichen Abgrenzung der Murschübe unter Festlegung von Phänotypen von Murgängen



- Single surge (SI): Ausgeprägte eingipfelige Kurve mit eindeutigem Beginn und Ende
- Single surge with body (SB): Einem ausgeprägten Gipfel folgt ein längerer flacher Verlauf der Kurve bevor sie sich absenkt
- Intermittent surge (IN): Mehrgipfelige Kurve, bei der eine Unterteilung in einzelne Schübe schwierig ist
- Intermittent surge within a series of surges (SS): zeitlicher Ausschnitt aus einer mehrgipfeligen Kurve mit der Ausprägung einer single surge
- Compound surge (CO): Mehrgipfelige Kurve, wobei die Gipfel sowohl vor als auch nach dem Spitzenwert auftreten können

## 7.6 Abfluss resultierend aus einem Einheitskubikmeter (Unit Volume, UV)

Zum Vergleich der Kennwerte der beobachteten und gemessenen Murschübe in den verschiedenen Einzugsgebieten wird der Abfluss, der aus einem Einheitsvolumen mobilisierten Geschiebes (Unit Volume, UV) resultiert herangezogen.

Aus dem oben angeführten Ansatz

$$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p}$$

ist erkennbar, dass

$$Q_{MG} \sim V_G$$

Es lässt sich daher der Abfluss, der durch ein Einheitsvolumen ausgelöst wird, bestimmen. Dieser bleibt für unterschiedliche Kombinationen aus Verhältniswert und Anstiegszeit konstant.

$$Q_{MG(UV)} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_G}{c_v \cdot t_p} = \frac{3}{X + 1.5} \cdot \frac{1}{c_v} \cdot \frac{1}{t_p}$$

Somit lässt sich der Scheitelabfluss von einem UV in Abhängigkeit der Anstiegsdauer ( $t_p$ ) in Sekunden und dem Verhältniswert (X) für Feststoffkonzentration (z.B. von 0.4 bis 0.8) darstellen.

$$c_v = 0.4 \quad Q_{MG(UV)} = \frac{1}{0.4} \cdot \frac{3}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{7.5}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{7.5}{t_p \cdot (X + 1.5)}$$

$$c_v = 0.5 \quad Q_{MG(UV)} = \frac{1}{0.5} \cdot \frac{3}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{6}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{6}{t_p \cdot (X + 1.5)}$$

$$c_v = 0.6 \quad Q_{MG(UV)} = \frac{1}{0.6} \cdot \frac{3}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{5}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{5}{t_p \cdot (X + 1.5)}$$

$$c_v = 0.7 \quad Q_{MG(UV)} = \frac{1}{0.7} \cdot \frac{3}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{4.2857}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{4.2857}{t_p \cdot (X + 1.5)}$$

$$c_v = 0.8 \quad Q_{MG(UV)} = \frac{1}{0.8} \cdot \frac{3}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{3.75}{(t_r + 1.5 \cdot t_p)} = \frac{3.75}{t_p \cdot (X + 1.5)}$$



Der Scheitelabfluss eines Murschubs mit bekannter Fracht ergibt sich mit:

$$Q_{MG} = Q_{MG(UV)} \cdot \frac{V_G}{c_v} = Q_{MG(UV)} \cdot V_{MG}$$

$$PRF_{MG} = Q_{MG(UV)} \cdot \frac{c_v \cdot t_p}{V_G}$$

Für eine festgelegte volumetrische Feststoffkonzentration werden Scheitelabflüsse von  $0.0001 \leq Q_{MG(UV)} \leq 2$  für den Bereich von  $1 \leq X \leq 250$  als Kurvenscharen aufgetragen. Für die Darstellung dieser Abflüsse mit dem Verhältniswert X als Abszisse und der Anstiegszeit  $t_p$  als Ordinate ist eine Umformung der Formel erforderlich.

Für eine volumetrische Feststoffkonzentration  $c_v$  von 0.7 und variable  $Q_{MG(UV)}$  und X:

Wenn auf Ordinate  $t_p$  bezogen:

$$Q_{MG(UV)} = \frac{4.2857}{t_p \cdot (X + 1.5)}$$

$$t_p = \frac{4.2857}{Q_{MG(UV)} \cdot (X + 1.5)}$$

Wenn auf Abszisse X bezogen:

$$t_p \cdot (Q_{MG(UV)} \cdot (X + 1.5)) = 4.2857$$

$$t_p \cdot Q_{MG(UV)} \cdot X + 1.5 \cdot t_p \cdot Q_{MG(UV)} = 4.2857$$

$$t_p \cdot X + 1.5 \cdot t_p = \frac{4.2857}{Q_{MG(UV)}}$$

$$X = \frac{4.2857}{t_p \cdot Q_{MG(UV)}} - 1.5$$

Tabelle 10: Berechnungsschema für die Kurvenscharen des Scheitelabflusses aus einem UV, mit X als Abszissenwert und  $t_p$  als Ordinatenwert

$t_p$ [s]		Discharge per Unit Volume [m <sup>3</sup> /s] ( $0.0001 \leq Q_{MG(UV)} \leq 2$ )				
		0.0001	0.00025	0.0005	0.00075	0.001
Verhältniswert X [-] ( $1 \leq X \leq 250$ )	1	17142.80	6857.12	3428.56	2285.71	1714.28
	2	12244.86	4897.94	2448.97	1632.65	1224.49
	3	9523.78	3809.51	1904.76	1269.84	952.38
	4	7792.18	3116.87	1558.44	1038.96	779.22
	5	6593.38	2637.35	1318.68	879.12	659.34
	6	5714.27	2285.71	1142.85	761.90	571.43
	7	5042.00	2016.80	1008.40	672.27	504.20
	8	4511.26	1804.51	902.25	601.50	451.13
	9	4081.62	1632.65	816.32	544.22	408.16

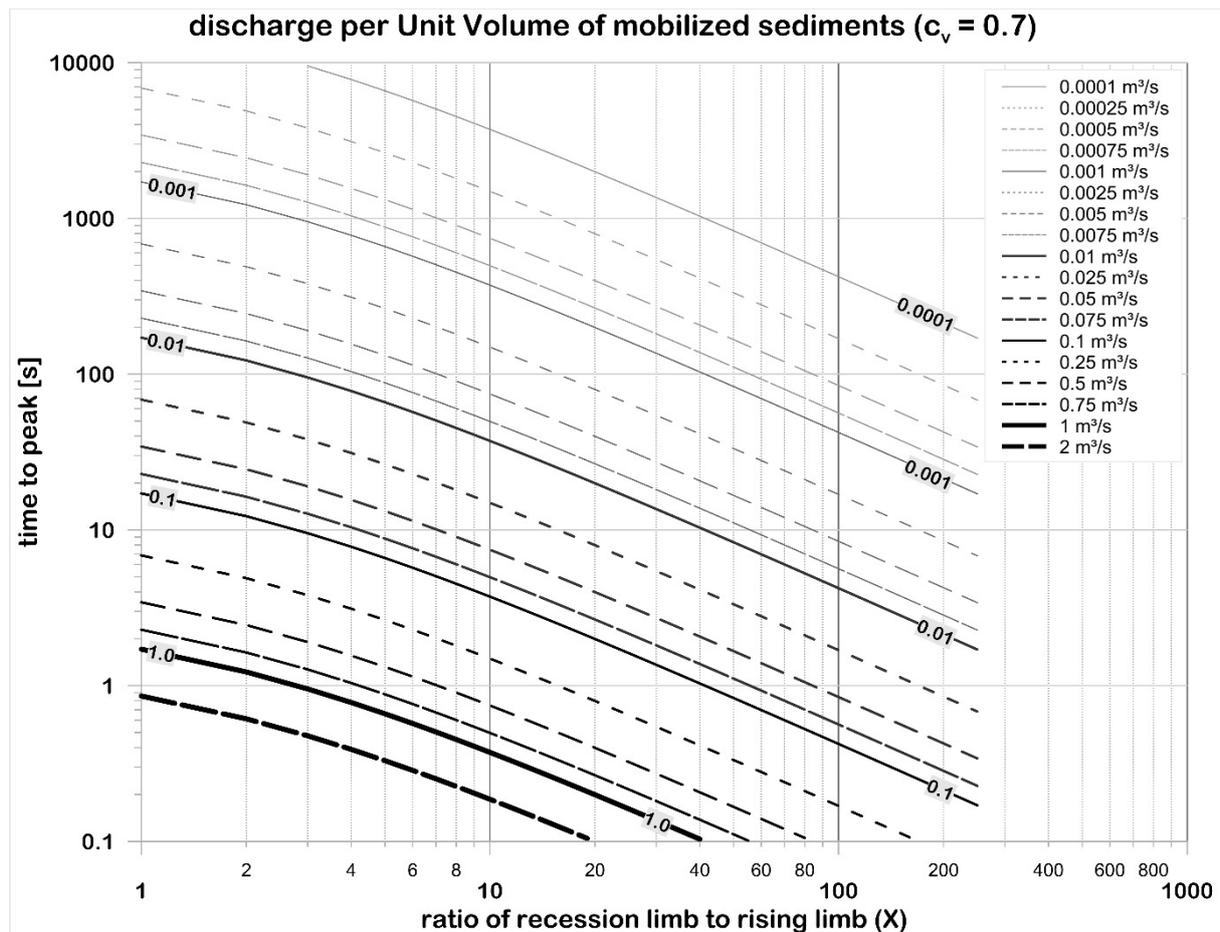


Abbildung 21: Kurvenscharen der Abflüsse aus  $1 m^3$  mobilisierten Feststoff ( $Q_{MG, UV}$ ) für eine volumetrische Feststoffkonzentration von 0.7

## 7.7 Ableitung einer empirischen Formel

Die Formel für den Scheitelabfluss

$$Q_{MG} = V_{MG} \cdot \frac{PRF_{MG}}{t_p}$$

lässt sich so umformen, dass der Quotient aus peak rate factor und time to peak als Potenzfunktion der Murenfracht dargestellt werden kann.

$$\frac{PRF_{MG}}{t_p} = a \cdot V_{MG}^b$$

Dadurch vereinfacht sich die Berechnung des Scheitelabflusses, da nur mehr die Kenntnis der Murenfracht notwendig ist.

$$Q_{MG} = V_{MG} \cdot a \cdot V_{MG}^b = a \cdot V_{MG}^{1+b}$$

Zur Ableitung der entsprechenden Ganglinien müssen die schon angeführten Formeln umgeformt werden. Die Werte für den time to peak sind dabei frei zu wählen. Der peak rate factor, der Formfaktor, der Verhältnisswert X und die Dauer des Ganglinienabschnitte errechnen sich dann mit

$$PRF_{MG} = t_p \cdot a \cdot V_{MG}^b$$



$$SF_{MG} = \frac{CF}{PRF_{MG}}$$

$$X = 3 \cdot SF_{MG} - 1.5$$

$$t_r = X \cdot t_p$$

$$t_b = t_p + t_r$$

Mit diesen Angaben können die Ganglinien von Murenereignissen, die den gleichen Scheitelabfluss aber variierende time to peaks aufweisen, berechnet und dargestellt werden.

### 7.8 Vergleich mit anderen empirischen Formeln

Da die publizierten empirischen Formeln (z.B. in Rickenmann, 1999) zur Abschätzung des Spitzenabflusses auf Basis der Murenfracht alle einer Potenzfunktion entsprechen (Tabelle 11), kann die im obigen Kapitel 7.7 abgeleitete Vorgangsweise angewendet werden, wenn eine ähnliche Form der Ganglinie unterstellt werden kann.

Tabelle 11: Empirische Formeln zur Bestimmung des Spitzenabflusses von Murgängen

Author(s)	Formula	remark
Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.135 \cdot V_{MG}^{0.780}$	granular debris flows
Mizuyama et al. (1992)	$Q_p = 0.0188 \cdot V_{MG}^{0.790}$	muddy debris flows
Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.00558 \cdot V_{MG}^{0.831}$	volcanic debris flow (Merapi)
Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0.00135 \cdot V_{MG}^{0.870}$	volcanic debris flow (Sakurajima)
Costa(1988)	$Q_p = 0.293 \cdot V_{MG}^{0.56}$	landslide dam failure
Costa (1988)	$Q_p = 0.0163 \cdot V_{MG}^{0.640}$	glacial dam failure
Ou et al. (1991)	$Q_p = 0.00732 \cdot V_{MG}^{0.884}$	frequent debris flows
Ou et al. (1991)	$Q_p = 1.166 \cdot V_{MG}^{0.514}$	rare debris flows
Ou et al. (1991)	$Q_p = 0.0188 \cdot V_{MG}^{0.790}$	muddy debris flows (entspricht Mizuyama)
Ou et al. (1991)	$Q_p = 0.135 \cdot V_{MG}^{0.780}$	granular debris flows (entspricht Mizuyama)
Ou et al. (1991)	$Q_p = 0.276 \cdot V_{MG}^{0.696}$	without experimental data (?)
Ikeda et al. (2019)	$Q_p = \alpha \cdot V_{MG}^{0.833}$	$0,01 \leq \alpha \leq 1$

### 7.9 Plausibilisierung mit Daten aus dem Wildbach- und Lawinenkataster und publizierten Datensätzen

Im Ereigniskataster (WLK) der Wildbach- und Lawinenverbauung werden die Daten von Ereignissen, die im Rahmen der Ereignisdokumentation aufgenommen wurden, zur Verfügung gestellt. Die Datensätze, die einen Eintrag für den Leitprozess, das



Murenvolumen und den Spitzenabfluss aufweisen, wurden herausgefiltert. Für eine größere Datenbasis wurden die Leitprozesse murartiger Feststofftransport und Murgang ausgewählt.

Ergänzt werden diese Daten durch publizierte Daten von Murenvolumen und Spitzenabfluss, die aus der Dokumentation der Ereignisse (1987) der Schweiz (Zimmermann und Rickenmann, 1992), aus den Murenversuchen in Chemolgan/Kasachstan (Rickenman et al., 2003) und von Chen und Chuang (2014) sowie Ikeda (2019) stammen.

### **7.10 Prozessfaktor**

Unter Anwendung der empirischen Formel in der Form

$$Q_{MG} = a \cdot V_{MG}^b$$

und dem Hüllkurvenansatz nach Wundt (1953)

$$Q_{hydro} = GF \cdot A_E^{0.6} \simeq HQ_{100}$$

lässt sich der Prozessfaktor

$$PF = \frac{Q_{MG}}{HQ_{100}}$$

berechnen.

$$PF = \frac{a \cdot V_{MG}^b}{GF \cdot A_E^{0.6}}$$

Dieser sollte für Einzugsgebietsflächen von 1 bis 30 km<sup>2</sup>, Gebietsfaktoren von 8 bis 14 und Murenfrachten von 100 bis 100000 m<sup>3</sup> Gültigkeit haben.



## 8 Datengrundlage

### 8.1 Datengrundlagen zu Literaturwerten

Veröffentlichte Wasserspiegelganglinien von Murgängen wurden im Rahmen von Bachelorarbeiten digitalisiert und aufbereitet (BA Vees). Messdaten in digitaler Form wurden von McArdell für den Illgraben, von Hürlimann für den Rio Rebaixer und von Comiti und Marchi für die Gadoria zur Verfügung gestellt. Die Spiegellagenkurven wurden, je nach deutlicher Ausprägung des Kurvenverlaufs, zeitlich in die unterschiedlichen Typen (Kapitel 7.5) zerlegt, und normalisiert. Zugleich wurde den ausgewählten Abschnitten eine Murenfracht und/oder ein Scheitelabfluss zugeordnet, wenn diese in der Literatur angeführt waren. Dabei ist aber anzumerken, dass diese Werte zumeist auf Annahmen/Schätzungen beruhen, die von der Realität aber abweichen können.

Zur Identifikation der Murschübe wurde eine 6 stellige Kennung eingeführt. Die ersten beiden Stellen betreffen das Einzugsgebiet, die mittleren 2 Stellen den Tag des Ereignisses und die letzten beiden Stellen den abgegrenzten Murschub. Die Metadaten der Murschübe sind im Anhang 1 aufgelistet.

### 8.2 Datengrundlagen zu Messdaten aus IAN Monitoring Stationen

Zur Identifikation wurde ebenfalls die 6 stellige Kennung herangezogen. Die Metadaten sind im Anhang 42 aufgelistet.

#### 8.2.1 Abflusshöhe und Normalspannung Gadoria

Die Messungen erfolgen bei zwei Bauwerken am Murkegel, das eine ist als Querbauwerk ausgeführt, das andere als in Fließrichtung orientierte Scheibe (Abbildung 22).

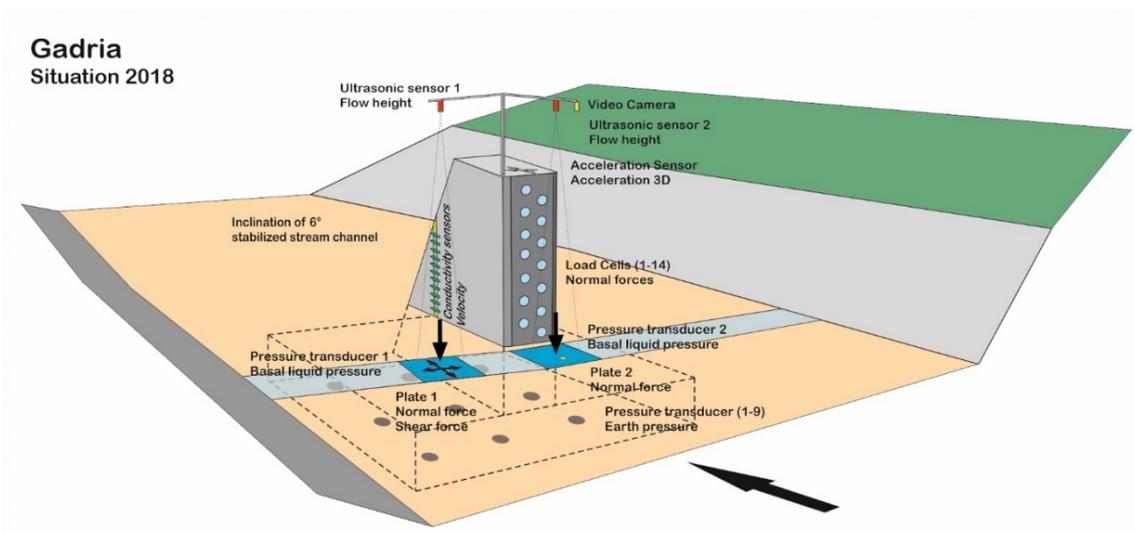


Abbildung 22: Sensorenübersicht Messbauwerk Gadoria



Im oberliegenden Querbauwerk sind zwei quadratische Kraftmessplatten mit je 1 m<sup>2</sup> installiert, diese schließen bündig mit dem Gerinnebett ab. Eine Kraftmessplatte befindet sich direkt vor der vertikalen, schmalen Seite des Monitoring Bauwerkes (Force plate FP 2) und die andere 2 m daneben (FP 1). Beide Platten messen die Kräfte in der normalen Richtung, FP 1 kann zusätzlich in zwei tangentialen Richtungen messen. Jede Platte wird gestützt von vier Lastbolzen mit einer maximalen Tragfähigkeit von 100 kN (Typ MB927-100-x-A, Batarow Sensorik GmbH), jeweils mit einer Nennauflösung von ± 0,5 kN. Die Kraftmessplatten wurden vor der Installation im Labor kalibriert und regelmäßig durch schrittweise Erhöhung der statischen Lasten im Feld getestet. Aus diesen Tests kann eine Genauigkeit von ±0,2 kN angegeben werden. Nach jedem Murgangereignis werden die Kraftmessplatten gereinigt und geprüft. Die Abtastfrequenz der Lastbolzen ist auf 2400 Hz eingestellt.

Seit 2017 wird mit einem lotrecht ausgerichteten Ultraschallsensor (Typ UM30, SICK) die Fließhöhen  $h(t)$  vor der Barriere über FP 2 (US 2) gemessen. Im Jahr 2018 wurde ein zweiter Sensor (Typ UB4000, Pepperl+Fuchs) über der FP 1 (US 1) installiert. Die Abtastfrequenz der einzelnen Sensoren wurde auf 100 Hz eingestellt.

Zwei Flüssigkeitsdrucksensoren wurden in der Mitte jeder Kraftmessplatte installiert. Jeder Sensor besteht aus einem Drucksensor (Modell PR 25Y, Keller Inc., Bereich ±1,5 bar). Die Druckaufnehmer messen ebenfalls mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz.

Die Dichte der repräsentativen Feststoffen wurde im Labor (Mittelwert) bestimmt.

$$\rho_G = 2650 \text{ kg/m}^3$$

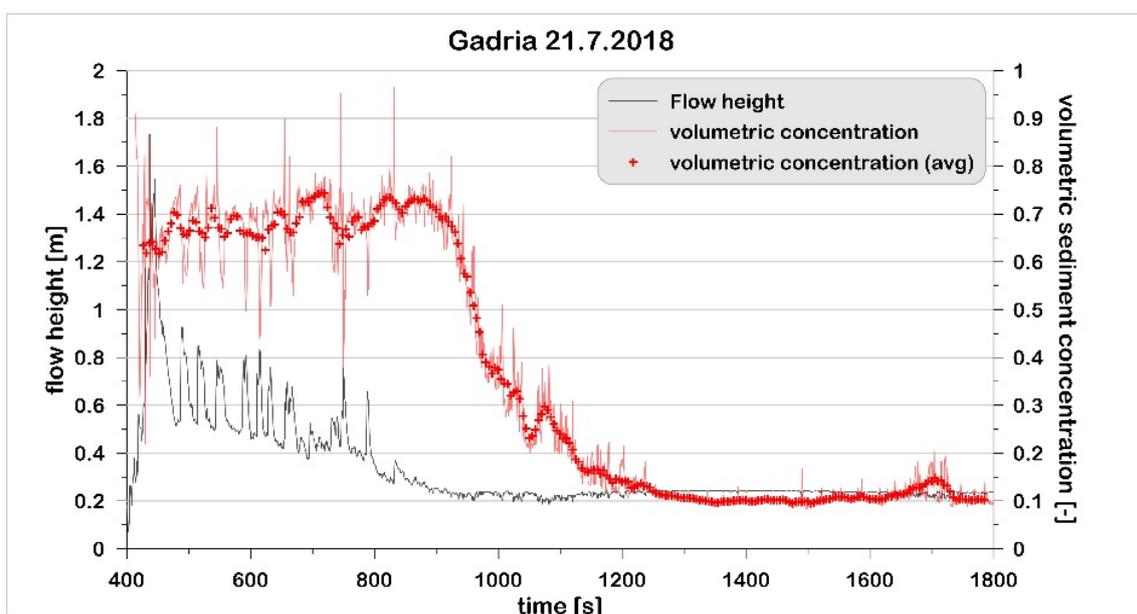


Abbildung 23: volumetrische Feststoffkonzentration während einem Murgang in der Gadria



Die zeitlich hoch aufgelösten Daten werden auf Sekundenwerte zusammengefasst (Median). Mit der Abflusshöhe und der Normalspannung kann die Dichte des Murgangs und daraus wieder die volumetrische Feststoffkonzentration abgeleitet werden.

**Ergänzen: Längsprofil**

**8.2.2 Abflusshöhe Lattenbach**

Die Abflusshöhen am Lattenbach werden an zwei Querschnitten im Mittellauf gemessen. Am oberen Querschnitt bei hm 13.25 sind 2 Radarsensoren im Abstand von 2 Metern platziert, am unteren Querschnitt bei hm 12.78 ein Radarsensor und ein 2D-Laser, der die Oberfläche abgreift. Die Messdaten werden insoweit angepasst, als dass ein Murgang mit Spiegelhöhe 0 beginnt und endet (Abbildung 24).

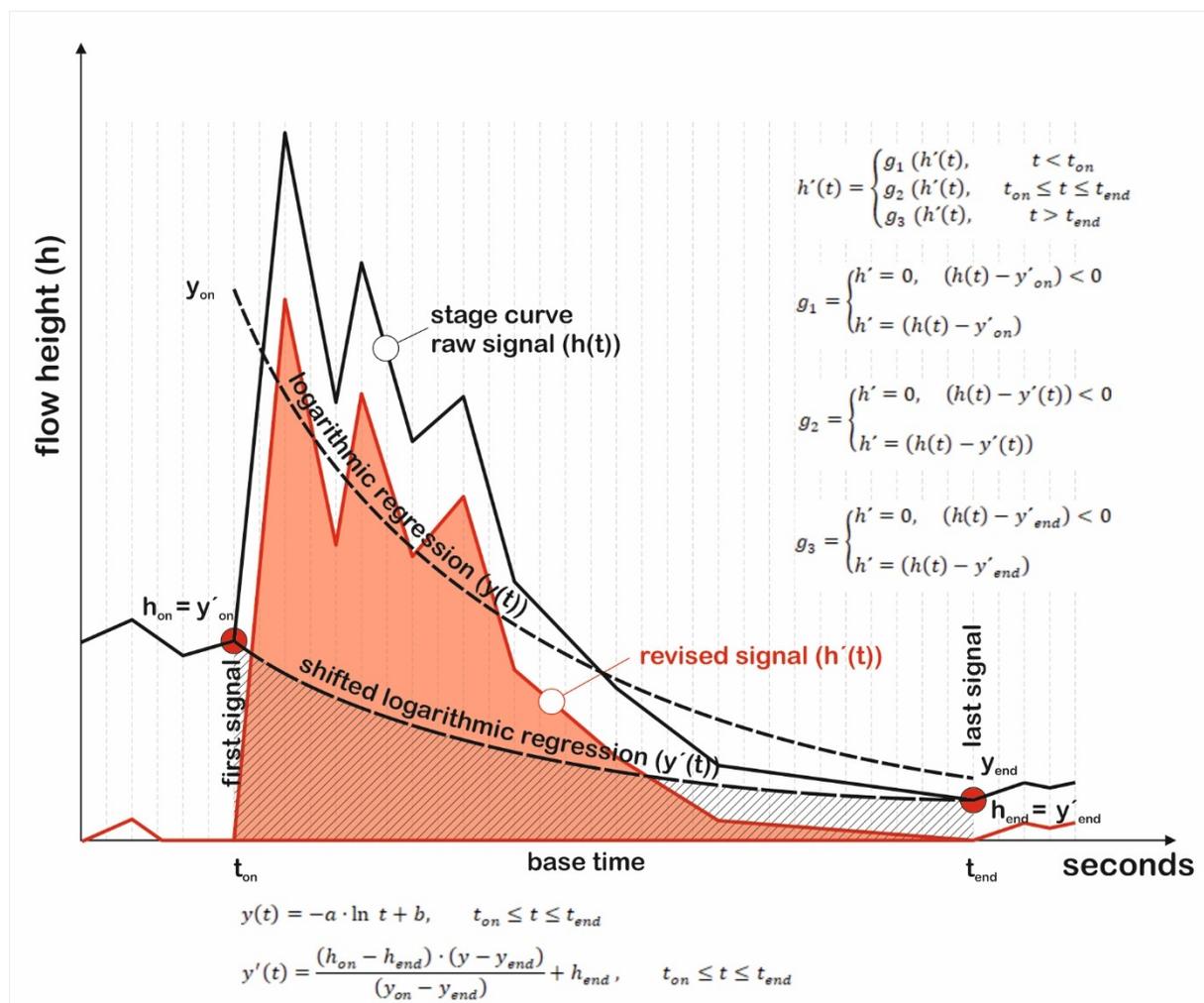


Abbildung 24: Schema zur Umformung der gemessenen Abflusshöhen in reale Murgangshöhen



### 8.2.3 Oberflächengeschwindigkeit

Zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeit von Murgängen wird ein gepulstes Doppler Hochfrequenzradar (HF-Radar) verwendet. Das HF-Radar sendet ein keulenförmiges elektromagnetisches Feld in gepulster Form aus, welches sich mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  fortbewegt. Die Sendefrequenz dieses Felds befindet sich im X-Band (10.425 [GHz]). Die Frequenz der gesendeten Pulse pro Sekunde wird als pulse repetition frequency (PRF) [Hz] bezeichnet, wobei das HF-Radar mit einer PRF von bis zu 90 [kHz] arbeiten kann.

Die Geschwindigkeit wird über den Doppler-Effekt berechnet. Durch den Vergleich des gesendeten Signals mit dem empfangenen Echosignal lässt sich die Dopplerverschiebung  $f_D$  definieren. Über diese Verschiebung kann die relative Radialgeschwindigkeit  $v_{rel}$  des Ziels direkt ermittelt werden.

$$f_D = f_r \pm f_0$$

$f_0$  Frequenz des gesendeten Signals

$f_r$  Frequenz des zugehörigen Echosignals

Die Gleichung der Dopplerverschiebung beinhaltet neben der Wellenlänge des gesendeten Signals  $\lambda$  auch die relative Radialgeschwindigkeit eines Ziels  $v_{rel}$ .

$$f_D = \frac{-2 \cdot v_{rel}}{\lambda}$$

Durch das gepulste Sendeverfahren wird ein Gebiet zu diskreten Zeitpunkten mit elektromagnetischen Wellenpaketen bestrahlt. Dies ermöglicht eine Einteilung des Gerinnes in mehrere Entfernungstore, den sogenannten Rangegates. Dabei entspricht eine Rangegatelänge  $r_{RG}$  genau der halben Pulslänge  $\tau$  [s]. Eine Rangegatelänge ist daher wie folgt definiert:

$$r_{RG} = \frac{c \cdot \tau}{2} [m]$$

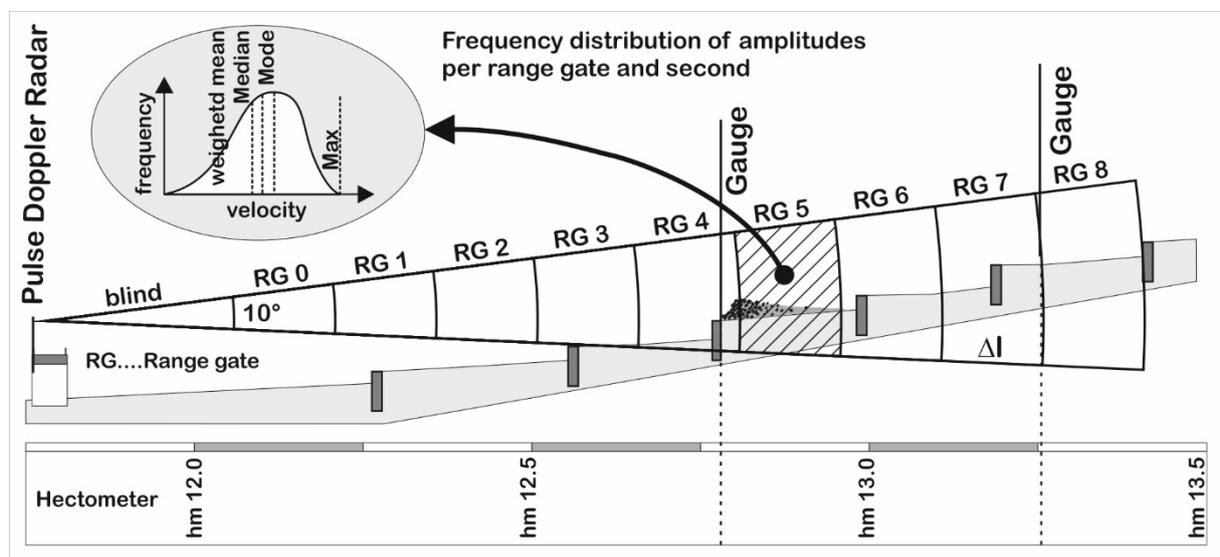




Abbildung 25: Messprinzip des HF Radars mit den Rangegates am Beispiel Lattenbach (ergänzen mit Gefälle)

Nach interner Signalverarbeitung durch Doppler-Filter werden vier Doppler Frequenzspektren (Frames) pro Sekunde ( $d_t = 0,25$  [s]) ausgegeben. Ein Doppler Frequenzspektrum setzt sich aus 1024 Geschwindigkeitsklassen (Channels) mit einer Breite von  $0,029$  [m/s] und zugehöriger Echointensitäten (Häufigkeiten) zusammen. Für einen beispielsweise 30 Minuten langen Murgang wird für jedes Rangegate eine Rohdatenmatrix von 7200 Zeilen (Frames) und 1024 Spalten (Channels) aufgespannt, wobei jede Zelle die Häufigkeiten der Echointensitäten enthält.

Die eigens zur Rohdatenauswertung entwickelte Radarsoftware bietet die Möglichkeit zur Berechnung von drei statistischen Lageparametern. Neben dem Modus und Median kann auch ein Maximalwert der gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten exportiert werden (Abbildung 26).

- Median: Pro Frame wird die Summe der Häufigkeiten aus allen Channels gebildet. Der erste Channel, der 50% der Summe überschreitet wird als Median ausgegeben.
- Modus: Pro Frame werden alle Channels auf ihre Häufigkeit abgefragt. Der Channel mit der höchsten Häufigkeit wird als Modus ausgegeben.
- Maximalwert: Es kann ein Schwellenwert für die Häufigkeit eingegeben werden. Ausgehend von Channel 1 werden alle weiteren Channels auf den Schwellenwert abgefragt. Unterschreitet ein Channel den Schwellenwert, bildet dieser den Maximalwert des jeweiligen Frames.

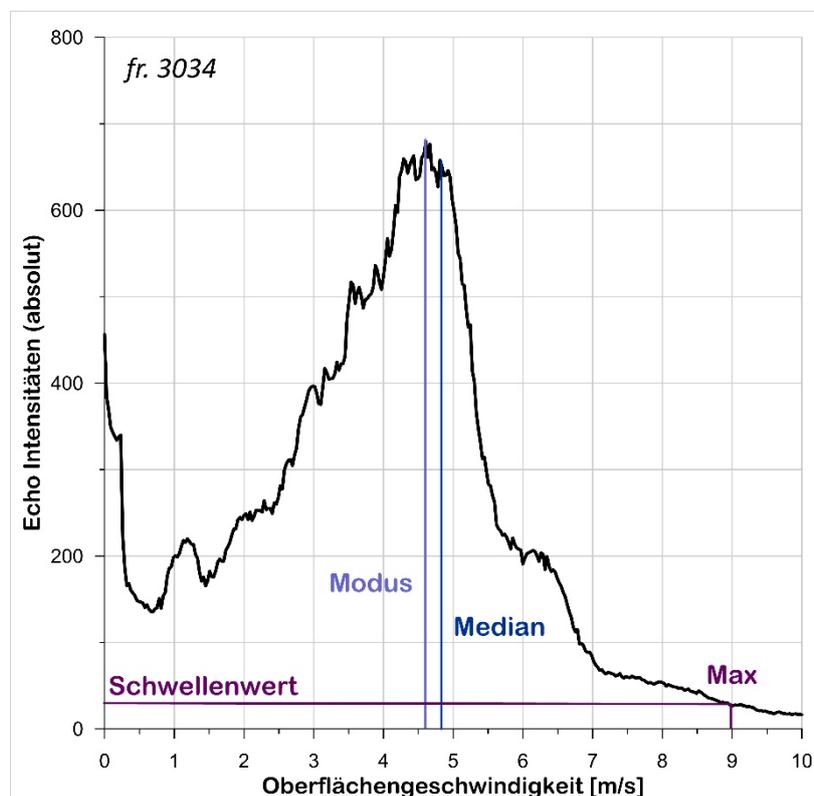


Abbildung 26: Doppler Frequenzspektrum (Frame) eines Murschubes in der Gatria vom 2. August 2020



### 8.2.4 Abfluss und Murenfracht

Die Berechnung des Abflusses erfolgt mit der mit der Abflusshöhe korrespondierenden Querschnittsfläche und dem Modalwert der Oberflächengeschwindigkeit des entsprechenden Rangegates. Die über die Dauer des Murganges ermittelten sekundlichen Abflüsse werden zur Murenfracht aufsummiert und mit der dokumentierten Fracht abgeglichen.

$$v_{df}(t) = v_{mod}(t)$$

$$V_{MG} = \sum_{t=t_0}^{t_b} v_{df}(t) \cdot A_Q(t)$$

### 8.3 Daten aus dem österreichischen Wildbach- und Lawinenkataster

Insgesamt stehen 140 Datensätze für die Auswertung zur Verfügung, davon wurden 66 als Murgang und 74 als murartiger Feststofftransport klassifiziert (Anhang 55). Die Murenfrachten schwanken zwischen 50 und 120000 m<sup>3</sup>, die Spitzenabflüsse zwischen 1 und 500 m<sup>3</sup>/s. Der Mittelwert der Frachten liegt bei rund 10000 m<sup>3</sup>, der Median nur bei 3650 m<sup>3</sup>. Der Mittelwert der Scheitelabflüsse beträgt 37 m<sup>3</sup>/s, der Median 21 m<sup>3</sup>/s.

### 8.4 Literaturangaben zu Murenfrachten und Scheitelabflüssen

Im Rahmen der Masterarbeit von Pfitscher (2016) wurden veröffentlichte Daten zu Murgängen, sowohl aus Ereignissen als auch aus 1:1 Versuchen zusammengestellt. Eine Auswahl davon wurde für die Plausibilisierung herangezogen.

Tabelle 12: Murenkennwerte (entnommen aus Pfitscher, 2016)

Ereignis	V <sub>MG</sub> [m <sup>3</sup> ]	Q <sub>p</sub> von [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>p</sub> bis [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>p,mean</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Autoren
HSX Gully	800000	109	110	109.5	Chen und Chuang, 2014
SXK Gully	950000	122	123	122.5	Chen und Chuang, 2014
XKD Gully	75000	11	11	11	Chen und Chuang, 2014
Varuna (18.07.1987)	200000	400	800	600	Zimmermann und Rickenmann, 1992
Val Plauunca (18.07.1987)	250000	400	900	650	Zimmermann und Rickenmann, 1992
Val Zavrugia (18.07.1987)	30000	500	700	600	Zimmermann und Rickenmann, 1992
Minstigtal (24.08.1987)	30000	150	250	200	Zimmermann und Rickenmann, 1992
Chemolgan 1972	41800	100	120	110	Rickenman et al., 2003
Chemolgan 1973 release 1-3	63300	75	100	87.5	Rickenman et al., 2003
Chemolgan 1973 release 4	72800	18	18	18	Rickenman et al., 2003
Chemolgan 1975	71500	320	430	375	Rickenman et al., 2003



Chemolgan 1976	22300	45	45	45	Rickenman et al., 2003
Chemolgan 1978	17700	40	130	85	Rickenman et al., 2003
Chemolgan 1991	173000	190	190	190	Rickenman et al., 2003

Eine weitere Datenquelle stellt die Publikation von Ikeda (2019) dar, die eine Zusammenstellung von Spitzenabflüssen und Murenvolumina aus verschiedenen Einzugsgebieten, vorwiegend aus Japan, beinhaltet (Anhang 56). Diese bilden auch die Grundlage einer empirischen Funktion mit variablen Koeffizienten vor allem für große Murenvolumina.



## 9 Ergebnisse

### 9.1 Modellparameter mit Literaturwerten

Insgesamt konnten 72 Murschübe hinsichtlich der Form der Ganglinie analysiert und daraus die Formkennwerte ( $t_p$ ,  $t_r$ ,  $t_b$ ,  $X$ ) abgeleitet werden. Davon

- 21 vom Rio Moscardo an 11 Ereignistagen,
- 7 von Acquabona an 3 Ereignistagen,
- 7 vom Illgraben an 5 Ereignistagen,
- 3 von Dunsmore an 2 Ereignistagen,
- jeweils 1 von Arroyo Secco und Jesusita von einem Tag,
- 5 vom Mt. St. Helens von einem Tag,
- 5 vom Rio Rebaixer an 5 Ereignistagen
- und 22 von der Gatria an 4 Ereignistagen.

Jeder Murschub wurde einem Phänotyp zugeordnet und mit den Formkennwerten der Einheitsganglinie der peak rate factor berechnet, mit der Vereinfachung, dass für alle Ereignisse die volumetrische Feststoffkonzentration mit 0,7 angenommen wurde. In Tabelle 13 sind weiters die angegebenen Murenfrachten ( $V_{MG}$ ) und Scheitelwerte ( $Q_{rec}$ ) angeführt sowie der daraus berechnete Scheitelwert ( $Q_{calc}$ ), wenn eine Murenfracht veröffentlicht war.

Tabelle 13: Ergebnisse der Auswertungen der dimensionslosen Spiegellagenkurven aus der Literatur und zur Verfügung gestellten digitalen Datensätzen, ergänzt durch publizierte Abflüsse und Frachten

Kennung	$t_p$ [s]	$t_r$ [s]	$t_b$ [s]	$X (t_r/t_p)$ [-]	$c_v$ [-]	Typus	$V_{MG}$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_{rec}$ [m <sup>3</sup> /s]	PRF <sub>MG</sub> (CF=1)	$Q_{calc}$ [m <sup>3</sup> /s]
4.1.1	33	85	118	3	0.7	SS	500	11.3	0.7361	11.2
4.1.2	17	291	308	17	0.7	SS	1150		0.1611	10.9
4.1.3	33	435	468	13	0.7	CO	1750	11.3	0.2043	10.8
4.1.4	19	132	151	7	0.7	SI	250	4.8	0.3551	4.7
4.1.5	39	221	260	6	0.7	SI	420	3.8	0.4186	4.5
4.2.1	5	173	178	35	0.7	SS	3600	80	0.0831	59.8
4.2.2	12	92	104	8	0.7	SS	850		0.3273	23.2
4.2.3	14	131	145	9	0.7	SS	1000		0.2763	19.7
4.2.4	5	443	448	89	0.7	CO	5450	80	0.0333	36.3
4.2.5	19	256	275	13	0.7	SS	1750		0.2004	18.5
4.2.6	17	272	289	16	0.7	SS	300		0.1714	3
4.3.1	11	348	359	32	0.7	SI	3200	26	0.0905	26.3
4.3.2	68	84	152	1	0.7	SS	1300		1.0968	21
4.3.3	57	199	256	3	0.7	SS	2000		0.6011	21.1
4.3.4	68	340	408	5	0.7	CO	3300		0.4615	22.4
4.3.5	5	187	192	37	0.7	SI	1200		0.0771	18.5
4.3.6	20	248	268	12	0.7	SI	500		0.2158	5.4



4.4.1	95	226	321	2	0.7	SI	3500	27	0.7734	28.5
4.4.2	36	266	302	7	0.7	SI	2650		0.3375	24.8
4.4.3	40	216	256	5	0.7	SI	850		0.4348	9.2
4.4.4	57	387	444	7	0.7	SI	850		0.3619	5.4
4.4.5	250	710	960	3	0.7	IN	4750		0.6912	13.1
10.1.1	20	1407	1426	72	0.7	SB	19000	88	0.0410	39.7
10.2.1	264	621	885	2	0.7	SI	3250	24	0.7796	9.6
10.3.1	72	265	337	4	0.7	SI			0.5806	
10.3.2	14	1061	1075	76	0.7	IN			0.0385	
10.3.3	14	22	36	2	0.7	SS			0.9793	
10.4.1	95	1058	1154	11	0.7	SI	5600	14	0.2384	14
10.6.1	25	339	364	13	0.7	SI	6500	16	0.2004	51.7
10.7.1	12	338	350	28	0.7	SI	3800	10	0.1011	32
10.8.1	30	276	306	9	0.7	SI			0.2798	
10.9.1	61	169	230	3	0.7	SS	13000	132	0.7025	149.7
10.9.2	14	70	84	5	0.7	SS	800	0	0.4615	26.4
10.9.3	8	53	61	7	0.7	SS	1000	0	0.3692	46.2
10.9.4	15	45	60	3	0.7	SS	1500	0	0.6667	66.7
10.9.5	54	245	299	5	0.7	SS	13500	136	0.4969	124.2
10.9.6	26	207	233	8	0.7	SS	12000	151	0.3171	146.3
10.10.1	84	758	842	9	0.7	CO	65800	255	0.2851	223.3
10.10.2	168	566	734	3	0.7	CO	49800	134	0.6161	182.6
10.11.1	129	308	437	2	0.7	CO	3000	25	0.7717	17.9
10.12.1	71	117	188	2	0.7	SS	8500	53.5	0.9530	114.1
10.12.2	34	183	217	5	0.7	SS	6500	54	0.4359	83.3
10.12.3	19	139	158	7	0.7	SS	9000	56	0.3403	161.2
11.1.1	33	213	246	6	0.7	SI	450		0.3771	5.1
11.1.2	62	164	226	3	0.7	SI	200		0.7237	2.3
11.2.1	24	103	127	4	0.7	SI	450		0.5180	9.7
11.3.1	4	68	72	17	0.7	SI	800		0.1622	32.4
11.3.2	8	46	54	6	0.7	SS	2000		0.4138	103.4
11.3.3	13	59	72	5	0.7	SS	2000		0.4968	76.4
11.3.4	19	57	76	3	0.7	SS	2000		0.6667	70.2
12.1.1	7	2513	2520	359	0.7	SI	80000	92	0.0083	95.1
12.2.1	21	2173	2194	103	0.7	SI		90	0.0286	
12.3.1	17	825	842	49	0.7	SI		17	0.0600	
12.3.2	31	939	970	30	0.7	SI			0.0944	
12.3.3	16	1097	1113	69	0.7	CO			0.0428	
12.4.1	59	1000	1059	17	0.7	SI			0.1626	
12.5.1	35	1984	2019	57	0.7	CO			0.0516	
14.1.1	5	107	112	21	0.7	CO	270		0.1310	7.1
14.1.2	1	116	117	116	0.7	CO	180		0.0255	4.6
14.2.1	439	1266	1705	3	0.7	CO	35000		0.6843	54.6
15.1.1	14	627	641	45	0.7	SB	190		0.0648	0.9
16.1.1	181	490	671	3	0.7	SI	380		0.7131	1.5
17.1.1	8	158	166	20	0.7	SI			0.1412	
17.1.2	13	51	64	4	0.7	SI			0.5556	



17.1.3	9	75	83	9	0.7	SI			0.2952	
17.1.4	4	36	40	8	0.7	SI			0.3068	
17.1.5	2	42	44	19	0.7	SI			0.1454	
18.1.1	8	120	128	15	0.7	SI	16200		0.1818	368.2
18.2.1	57	72	129	1	0.7	SI	10400		1.0857	198.1
18.3.1	223	2275	2498	10	0.7	SI	2950		0.2564	3.4
18.4.1	95	1004	1099	11	0.7	IN	3100		0.2486	8.1
18.5.1	156	624	780	4	0.7	IN	2500		0.5455	8.7

### 9.1.1 Analyse der zeitlichen Kennwerte

Die zeitlichen Kennwerte wurden für jeden Phänotyp ausgewertet. Von allen ausgewerteten Murschüben entfallen auf die Phänotypen

- single surge (SI) 33 Datensätze
- single surge within a series of surges (SS) 22 Datensätze
- compound surge (CO) 11 Datensätze
- intermittent surge (IN) 4 Datensätze
- single surge with body (SB) 2 Datensätze

Im Schnitt liegen die Anstiegszeiten der Murschübe zwischen 20 und 30 Sekunden (Abbildung 27). Der hohe  $t_p$  Wert beim Phänotyp IN liegt darin, dass die Zeit bis zum höchsten Scheitelwert in einer Serie von Schüben herangezogen wurde und nicht unbedingt der erste Schub den höchsten Scheitel aufweist.

Die Verhältniswerte deuten darauf hin, dass der abfallende Ast etwa 10 mal so lang wie der Anstieg dauert (Abbildung 28). Der hohe Wert beim Phänotyp SB liegt darin, dass einem kurzen Anstieg eine hohe Spiegellage des Abflusses auf eine längere Zeit folgt.

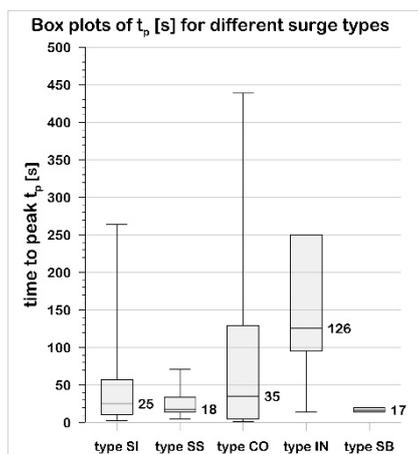


Abbildung 27: time to peak bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=72)

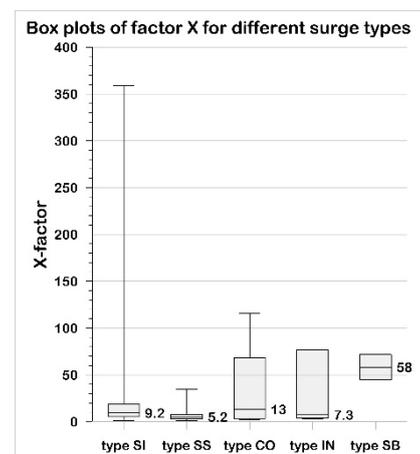


Abbildung 28: Verhältniswert X bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=72)



### 9.1.2 Normalisierte Wasserspiegellinien aus der Literatur

Vergleicht man visuell die normalisierten Wasserspiegelganglinien für unterschiedliche Formfaktoren, zeigen diese einen ähnlichen Verlauf wie die publizierten Wasserspiegellagen (Abbildung 29). Das lässt den Schluss zu, dass der Ansatz des modifizierten Verfahrens nach Kreps prinzipiell anwendbar ist.

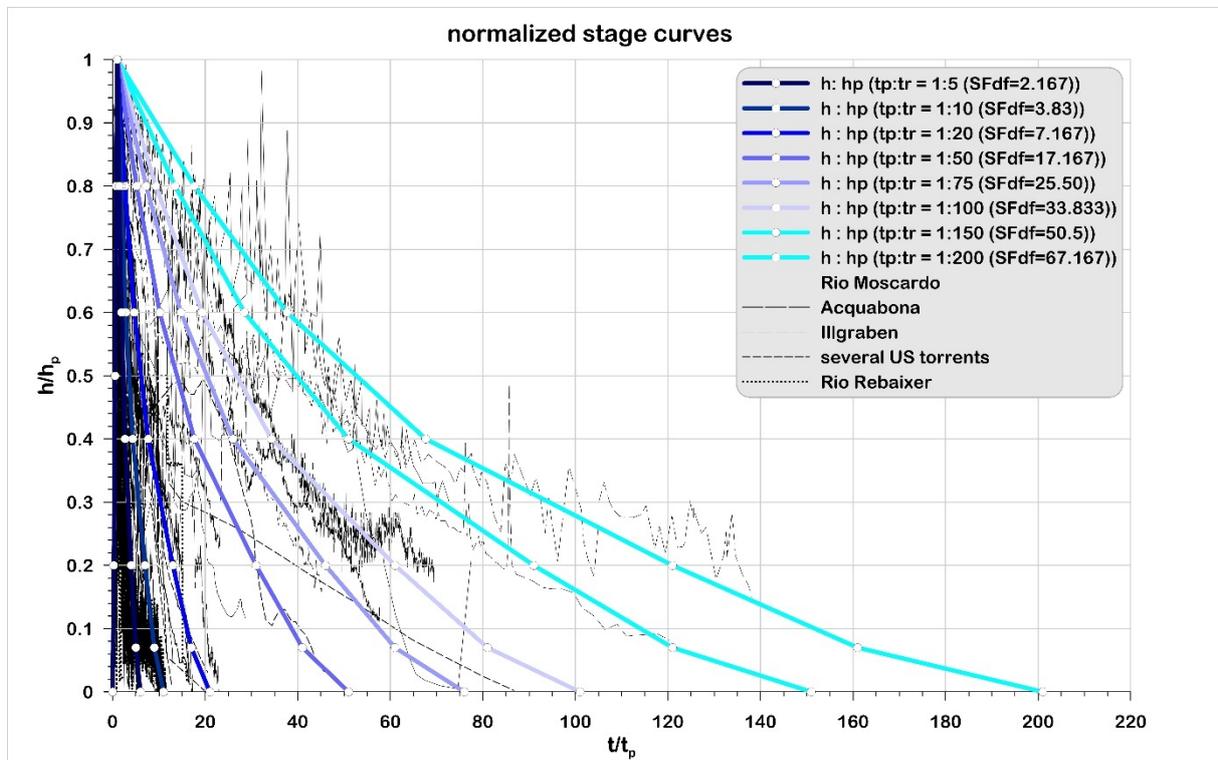


Abbildung 29: normalisierte Wasserspiegellagen aller publizierten Datensätze

### 9.1.3 Vergleich der publizierten mit den berechneten Abflüssen

Von den 72 ausgewerteten Wasserspiegelganglinien enthalten 26 Datensätze Angaben sowohl zur Murenfracht als auch zum Spitzenabfluss. Deshalb werden nur diese Angaben zum Vergleich beobachteten zu den berechneten Scheitelabflüssen herangezogen. Stellt man diese gegenüber sieht man, dass die berechneten Ergebnisse der Phänotypen SI und SS sehr gut mit den Beobachtungen zusammenpassen (Abbildung 30 und Abbildung 31). Bei den anderen Phänotypen zeigen sich größere Abweichungen. Dies ist auf die Geometrie der dimensionslosen Ganglinie zurückzuführen, da die Spiegelkurven der Phänotypen CO, IN und SB von der idealisierten dreiecksförmigen Ganglinie zum Teil stark abweichen. Diese Differenzen können aber auch dadurch begründet sein, dass die publizierten Werte der Fracht und des Abflusses auf Annahmen/Schätzungen beruhen und somit nicht den realen Werten entsprechen müssen.

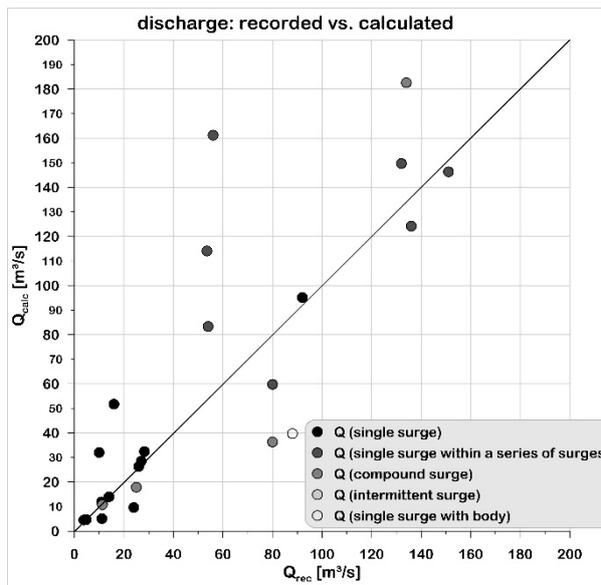


Abbildung 30: Publierte vs. berechnete Scheitelabflüsse für Typen von Murschüben/Murgängen

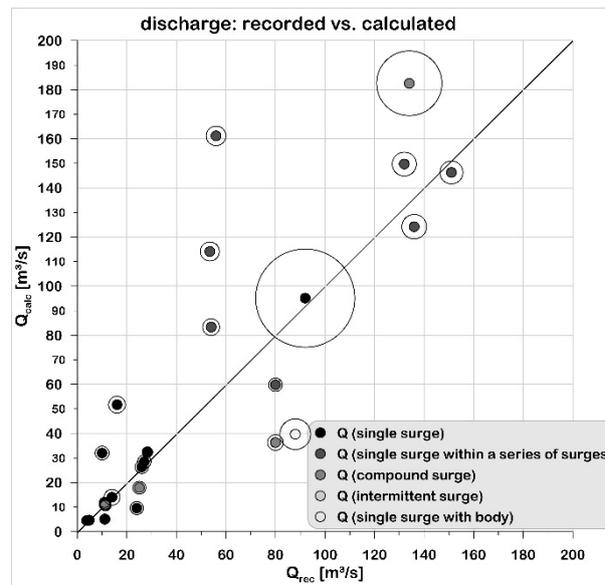


Abbildung 31: Publierte vs. berechnete Scheitelabflüsse für Typen von Murschüben/Murgängen; die Größe der Kreise ist proportional zur Murenfracht

#### 9.1.4 Vergleich der publizierten Scheitelwerte mit den berechneten Hydrographen

Die Datensätze der Gatria (4.1.X bis 4.4.X) beinhalten teilweise auch Angaben zum Scheitelwert und zu Murenvolumina. Deshalb können für diese Datensätze auch die Hydrographen von einzelnen Murschüben berechnet werden (Anhang 38 bis Anhang 41). Je nach Phänotyp zeigen sich geringere oder größere Differenzen zwischen berechneter und simulierter Ganglinie (Abbildung 32). So sind die Schübe 1 und 2 als Phänotyp SS, 4 und 5 als SI und 3 als Phänotyp CO klassifiziert. Der zusammengesetzte Schub 3 erreicht fast den gleichen Scheitelwert wie Schub 1, bei den Einzelschübe 4 und 5 ist nur eine geringe Differenz feststellbar. Der Abflussscheitel von Schub 2 ist leider nicht publiziert.

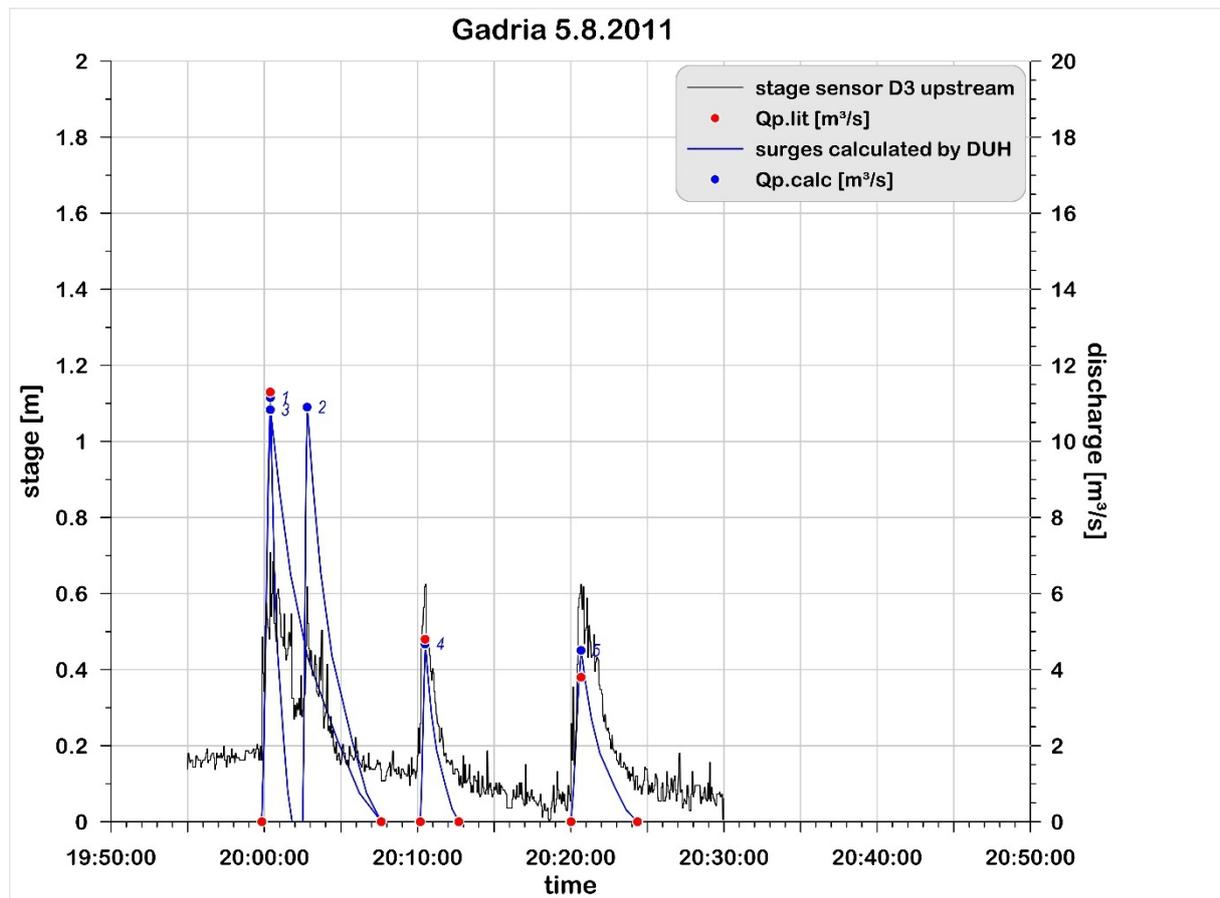


Abbildung 32: Wasserspiegelganglinie, publizierte Scheitelwerte und simulierte Hydrographen für das Ereignis vom 5.8.2011 in der Gatria (#4.1.1-4.1.5)

### 9.1.5 Vergleich der Abflüsse aus einem UV

Zum Vergleich der Formkennwerte der DUHs der ausgewerteten Schübe der betrachteten Einzugsgebiete wird das UV Verfahren angewendet. Die Kurvenscharen entsprechen den berechneten Abflüssen, die aus einem Kubikmeter mobilisierten Feststoffs resultieren, wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration von 0,7 verwendet wird (Abbildung 33).

Die Kennwerte vom Rio Moscardo streuen sehr weit, deshalb umfassen die Scheitelwerte  $Q_{MG, UV}$  den Bereich von 0,0025 bis 0,1  $m^3/s$ . In Acquabona liegen die  $Q_{MG, UV}$  zwischen 0,01-0,075  $m^3/s$ , am Illgraben zwischen 0,0025 bis 0,0075  $m^3/s$  und in der Gatria zwischen 0,01 bis 0,05. Insgesamt ergibt sich aus der Abbildung, dass die Abflüsse  $Q_{MG, UV}$  überwiegend dem Bereich zwischen 0,005 und 0,1  $m^3/s$  zuzuordnen sind, unabhängig vom Einzugsgebiet und von der Form der Ganglinie.

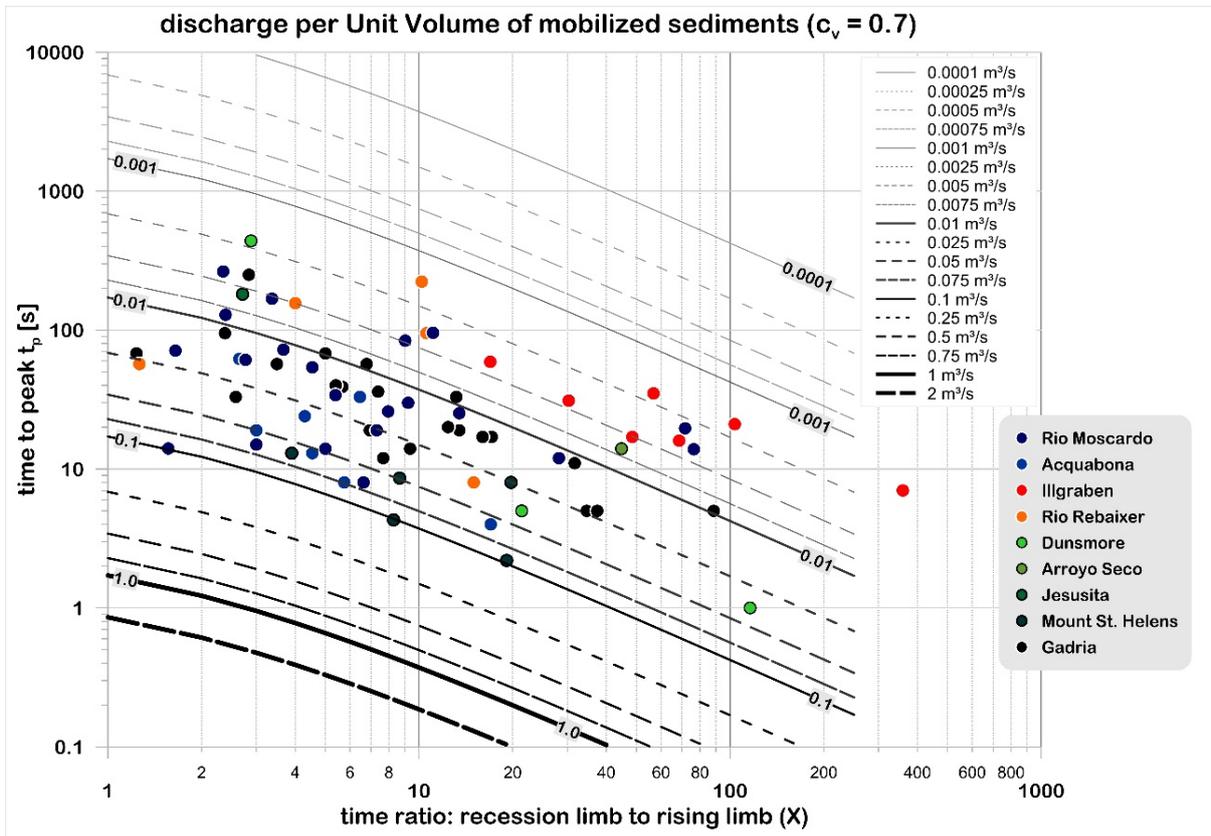


Abbildung 33: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für die ausgewerteten Einzugsgebiete

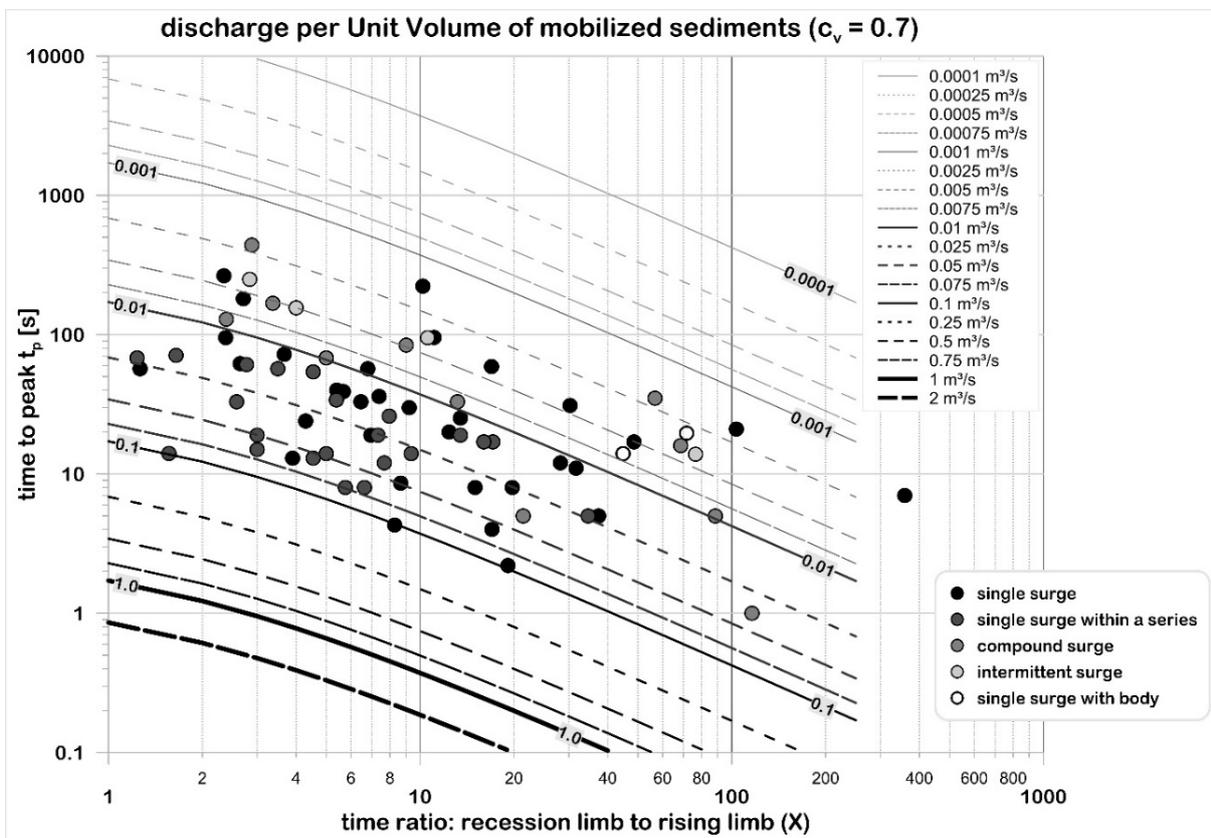


Abbildung 34: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für die ausgewiesenen Phänotypen

Werden die Abflüsse aus einem UV bezüglich der Phänotypen dargestellt (Abbildung 34), so weisen die Ergebnisse der single surge (SI) die größte Streuung auf, ähnlich



verhält es sich bei den compound surges (CO). Wesentlich geringer fällt die Bandbreite bei single surge within a series (SS) aus. Intermittierende Murgänge (IN) und single surge with body (SB) zeigen Werte rund um  $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Um zusätzlich einen Hinweis über die Murenfrachten der Datensätze zu erhalten, sind diese in Abbildung 35 proportional zu ihrem Volumen abgebildet. Größere Frachten haben zumeist eine längere Anstiegszeit, der Verhältnissfaktor kann jedoch im weiten Bereich schwanken.

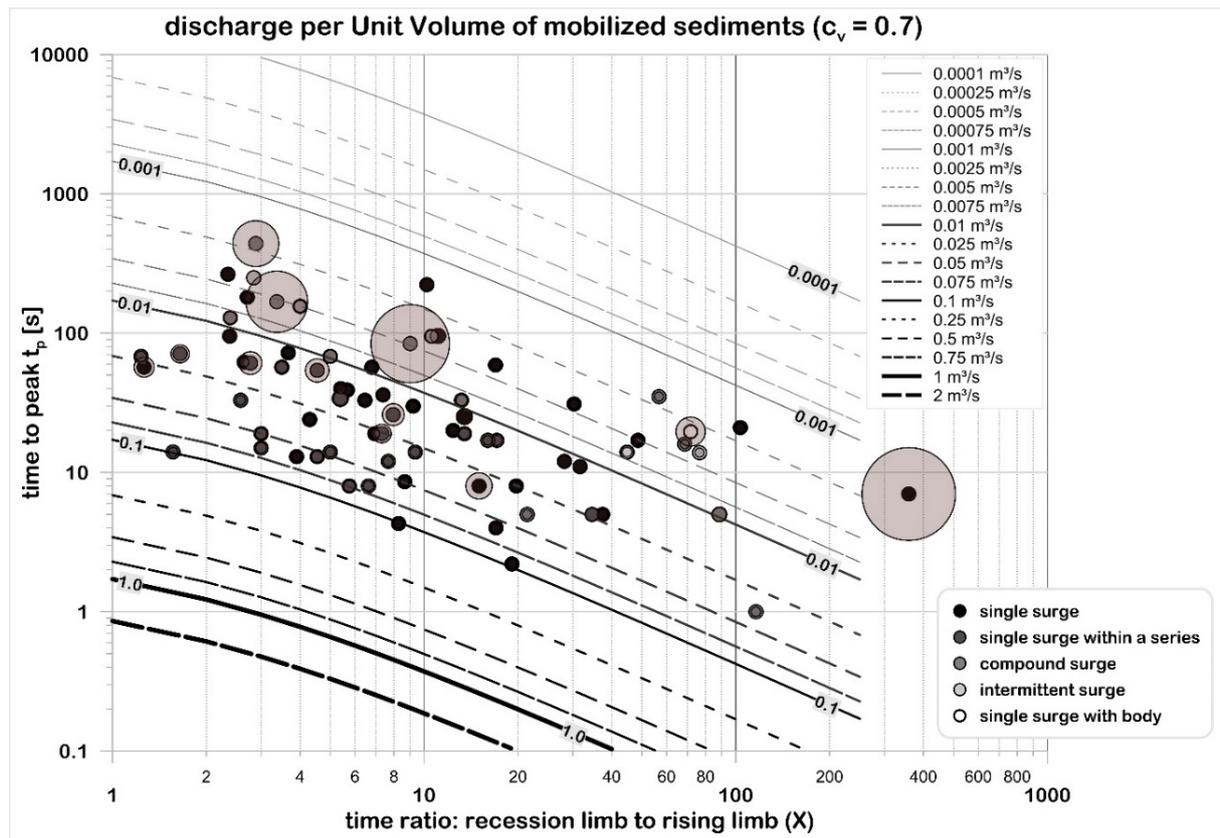


Abbildung 35: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für die ausgewiesenen Phänotypen. Die Größe der Kreise ist proportional zur gegebenen Murenfracht aufgetragen.

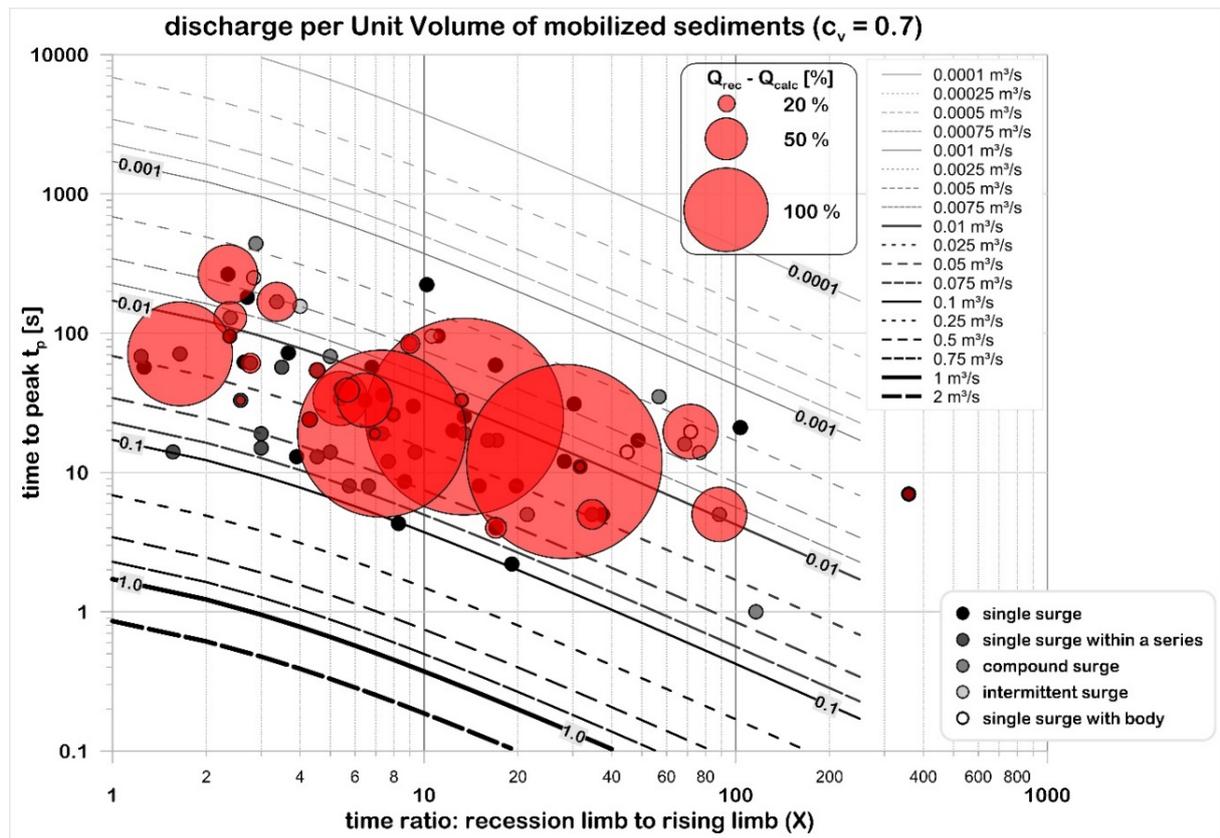


Abbildung 36: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für die ausgewiesenen Phänotypen. Die Größe der Kreise ist proportional zur Abweichung des berechneten zum beobachteten Scheitelabfluss skaliert.

Zur Veranschaulichung der Differenz der berechneten von den beobachteten Abflüssen werden in Abbildung 36 diese Abweichungen proportional als Kreise zum jeweiligen Datensatz abgebildet. Große Differenzen von über 100 % ergeben sich bei 4 Ereignissen, alle Datensätze vom Rio Moscardo (10.6.1 (SI), 10.7.1 (SI), 10.12.1 (SS) und 10.12.3 (SS)). Bei allen anderen Datensätzen treten weit geringere Differenzen auf.

## 9.2 Modellparameter mit Messdaten

Zum Unterschied zu den Literaturangaben liegen aus gemessene Abflussganglinien vor. Aus diesen konnten insgesamt 64 Murschübe hinsichtlich der Form der Abflussganglinie analysiert werden. Davon entfallen auf

- den Lattenbach 25 Schübe an 7 Ereignistagen,
- die Gatria 39 Schübe an 9 Ereignistagen.

Jeder Murschub wurde einem Phänotyp zugeordnet und mit den Formkennwerten der Einheitsganglinie der peak rate factor berechnet, mit der Vereinfachung, dass für alle Ereignisse die volumetrische Feststoffkonzentration mit 0,7 angenommen wurde. In Tabelle 14 sind weiters die gemessenen Murenfrachten ( $V_M$ ) und Scheitelwerte ( $Q_{rec}$ ) angeführt sowie der mit dem Verfahren berechnete Scheitelwert ( $Q_{calc}$ ).



Tabelle 14: Ergebnisse der Auswertungen der Messungen am Lattenbach (1.x.x) und der Gatria (4.x.x)

Kennung	$t_p$ [s]	$t_r$ [s]	$t_b$ [s]	$X (t_r/t_p)$ [-]	$c_v$ [-]	Typus	$V_{MG}$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_{rec}$ [m <sup>3</sup> /s]	$PRF_{MG}$ (CF=1)	$Q_{calc}$ [m <sup>3</sup> /s]
1.1.1	10	1392	1402	139	0.7	IN	11650	49.8	0.0213	24.8
1.1.2	10	209	219	21	0.7	CO	3976	49.8	0.1339	53.3
1.1.3	10	53	63	5	0.7	SS	1441	49.8	0.4412	63.6
1.1.4	17	131	148	8	0.7	SS	2444	32.4	0.3259	46.8
1.2.1	11	1981	1992	180	0.7	IN	17922	68.5	0.0165	26.9
1.2.2	11	18	29	2	0.7	SS	930	68.5	0.9565	80.9
1.2.3	12	21	33	2	0.7	SS	623	38	0.9231	47.9
1.2.4	36	508	544	14	0.7	SS	8247	39.1	0.1922	44
1.3.1	122	1368	1490	11	0.7	SI	5002	11.9	0.2360	9.7
1.4.1	146	1616	1762	11	0.7	IN	34792	158.4	0.2387	56.9
1.4.2	4	36	40	9	0.7	SI	1300	90.6	0.2857	92.9
1.4.3	6	22	28	4	0.7	SI	531	58.3	0.5806	51.4
1.4.4	18	28	46	2	0.7	SS	2966	158.4	0.9818	161.8
1.4.5	6	25	31	4	0.7	SS	1020	106.3	0.5294	90
1.4.6	6	21	27	3	0.7	SS	638	70.8	0.6000	63.8
1.4.7	3	16	19	5	0.7	SS	548	124.2	0.4390	80.2
1.5.1	6	1581	1587	263	0.7	SB	13963	64.4	0.0113	26.3
1.5.2	6	74	80	12	0.7	SS	1644	64.4	0.2169	59.4
1.6.1	470	2539	3009	5	0.7	IN	41070	87.6	0.4346	38
1.6.2	22	31	53	1	0.7	SS	1622	87.6	1.0312	76
1.6.3	28	153	181	5	0.7	CO	5616	62.2	0.4308	86.4
1.6.4	89	2165	2254	24	0.7	IN	22491	56.6	0.1162	29.4
1.7.1	127	548	675	4	0.7	SI	4209	21.8	0.5159	17.1
1.7.2	12	27	39	2	0.7	SI	1640	108.8	0.8000	109.3
1.7.3	50	934	984	19	0.7	CO	8957	41.4	0.1487	26.6
4.5.1	1	5	6	5	0.6	SI	117	47.2	0.4451	52.1
4.6.1	1	5	6	5	0.6	SI	48	20.9	0.4785	23
4.6.2	1	5	6	5	0.65	SI	148	59.5	0.4785	70.8
4.6.3	1	13	14	13	0.65	SI	676	125.6	0.2003	135.4
4.6.4	1	6	7	6	0.65	SI	300	102.5	0.3797	113.9
4.6.5	1	5	6	5	0.65	SI	269	112.4	0.4559	122.6
4.7.1	1	9	10	9	0.65	SI	349	89.7	0.2913	101.7
4.7.2	1	5	6	5	0.65	SI	343	134.2	0.4348	149.1
4.7.3	1	4	5	4	0.65	SI	189	93.5	0.5300	100.2
4.7.4	1	6	7	6	0.65	SI	202	74.2	0.4087	82.6
4.7.5	1	5	6	5	0.65	SI	102	44.9	0.4918	50.2
4.7.6	1	5	6	5	0.65	SI	163	72.8	0.4918	80.2
4.7.7	1	5	6	5	0.65	SI	186	73.5	0.4348	80.9
4.7.8	1	4	5	4	0.65	SI	104	48.8	0.5172	53.8
4.7.9	2	39	41	19	0.6	SI	3557	247.7	0.1431	254.5
4.7.10	2	33	35	17	0.6	SI	330	27.3	0.1665	27.5
4.7.11	2	22	24	11	0.6	SI	1219	150.6	0.2449	149.3
4.8.1	1	14	15	14	0.6	SI	149	25.9	0.1906	28.4
4.8.2	1	13	14	13	0.65	SI	994	192.3	0.2104	209.1



4.8.3	1	12	13	12	0.7	SI	757	150.4	0.2165	163.9
4.8.4	1	10	11	10	0.7	SI	525	124.5	0.2530	132.8
4.8.5	1	12	13	12	0.75	SI	466	99.4	0.2283	106.4
4.8.6	2	13	15	7	0.75	SI	607	108.3	0.3695	112.1
4.8.7	1	13	14	13	0.75	SI	907	171.2	0.2086	189.2
4.8.8	2	14	16	7	0.75	SI	1173	197.7	0.3580	210
4.8.9	1	13	14	13	0.75	SI	881	171.3	0.2104	185.3
4.8.10	1	10	11	10	0.75	SI	1289	303.5	0.2545	328
4.8.11	1	13	14	13	0.75	SI	1138	212.5	0.2052	233.5
4.8.12	1	12	13	12	0.75	SI	1018	210.1	0.2229	226.9
4.8.13	2	17	19	8	0.8	SI	1520	211	0.3006	228.5
4.9.1	2	14	16	7	0.75	SI	1010	166	0.3472	175.3
4.9.2	1	18	19	18	0.8	SI	1814	252.9	0.1538	279.1
4.9.3	1	8	9	8	0.75	SI	913	240.6	0.3018	275.6
4.9.4	1	7	8	7	0.75	SI	857	275.7	0.3667	314.3
4.9.5	1	15	16	15	0.8	SI	1583	263.6	0.1823	288.5
4.9.6	1	11	12	11	0.8	SI	1071	245.6	0.2496	267.3
4.9.7	1	8	9	8	0.7	SI	1038	288.2	0.3191	331.3
4.9.8	3	39	42	13	0.65	SI	3646	244.3	0.2069	251.4
4.9.9	3	40	43	13	0.7	SI	2287	153.5	0.2036	155.2

### 9.2.1 Analyse der zeitlichen Kennwerte

Die Formkennwerte wurden für jeden Phänotyp ausgewertet. Von allen ausgewerteten Murschüben entfallen auf die Phänotypen

- single surge (SI) 7 Datensätze
- single surge within a series of surges (SS) 40 Datensätze
- compound surge (CO) 6 Datensätze
- intermittent surge (IN) 10 Datensätze
- single surge with body (SB) 1 Datensatz

Im Schnitt liegen die Anstiegszeiten der Murschübe (Abbildung 37) zwischen 5 und 30 Sekunden. Der hohe  $t_p$  Wert beim Phänotyp IN liegt darin, dass die Zeit bis zum höchsten Scheitelwert in einer Serie von Schüben herangezogen wurde und nicht unbedingt der erste Schub den höchsten Scheitel aufweist.

Die Verhältniswerte (Abbildung 38) deuten darauf hin, dass der abfallende Ast etwa 5 bis 10 mal so lang wie der Anstieg dauert. Der intermittierende Abflusstyp liegt etwa bei dem Wert 20. Der hohe Wert beim Phänotyp SB gründet sich auf einen sehr kurzen Anstieg bei einer hohen Spiegellage des Abflusses auf längerer Zeit.

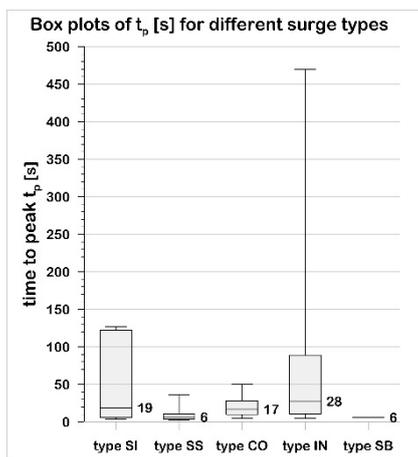


Abbildung 37: time to peak bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=64)

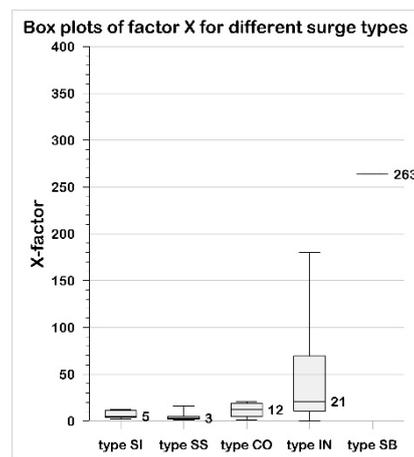


Abbildung 38: Verhältniswert X bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=64)

### 9.2.2 Vergleich der gemessenen mit den berechneten Abflüssen

Die Differenzen zwischen den gemessenen und berechneten Abflüssen fallen weitaus geringer aus als bei den Datensätzen aus der Literatur. Vor allem die Berechnungen aus der Gadria passen sehr gut mit den Messungen überein (Abbildung 39). Am Lattenbach gibt es größere Unterschätzungen, die aber mit dem zugrundeliegenden Phänotyp IN zu begründen sind (Abbildung 40). Dies zeigt sich auch, wenn man die entsprechenden Murenfrachten in den Abbildungen darstellt (Abbildung 41 und Abbildung 42). Durch die längere Basisdauer des DUHs wird der Scheitelwert unterschätzt, da ja innerhalb des Berechnungsintervalls sehr wohl hohe Spitzenabflüsse auftreten können.

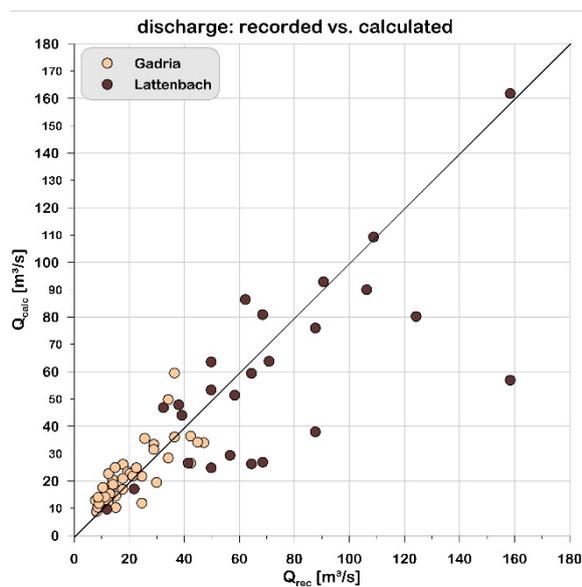


Abbildung 39: Gemessene vs. berechnete Scheitelabflüsse am Lattenbach und der Gadria

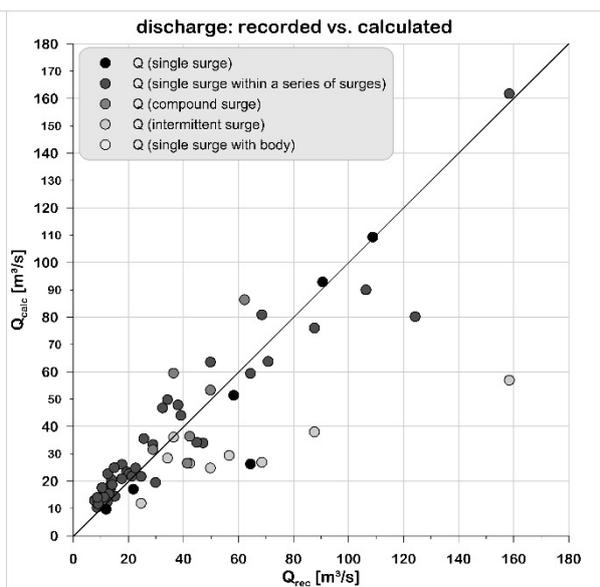


Abbildung 40: Gemessene vs. berechnete Scheitelabflüsse für Typen von Murschüben/Murgängen

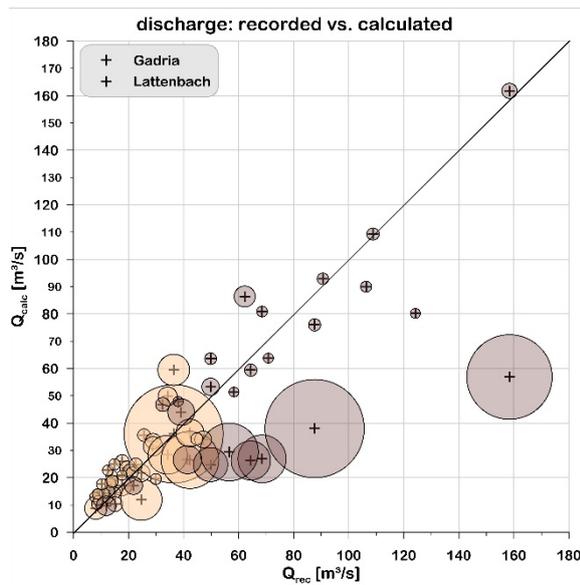


Abbildung 41: Gemessene vs. berechnete Scheitelabflüsse am Lattenbach und der Gatria; die Größe der Kreise ist proportional zur Murenfracht

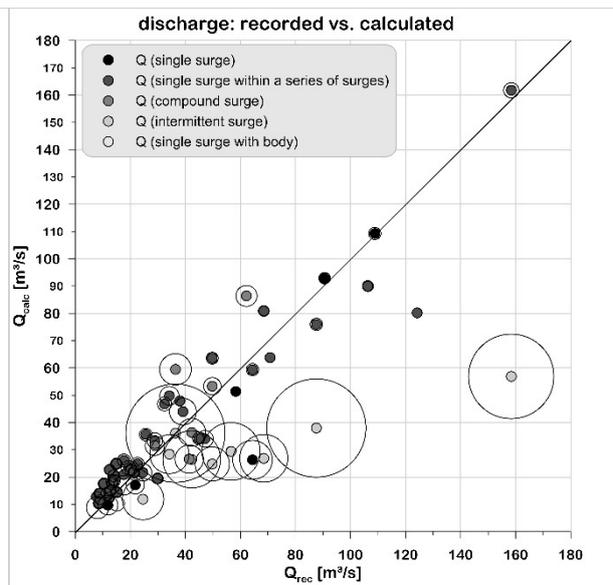


Abbildung 42: Gemessene vs. berechnete Scheitelabflüsse für Typen von Murschüben/Murgängen; die Größe der Kreise ist proportional zur Murenfracht

### 9.2.3 Vergleich der gemessenen mit den berechneten Hydrographen

Die Anwendung des DUHs für Muren zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Beispielhaft sind in Abbildung 44 und Abbildung 43 die Messwerte und die berechneten Ganglinien der Murschübe gemeinsam aufgetragen.

Am Lattenbach wurde die Schübe (1) und (4) als Phänotyp IN klassifiziert. Einerseits um den gesamten Murgang (1) zu simulieren, andererseits weil eine Auflösung in Einzelschübe nicht möglich war (4). Der Schub 2 wird dem Phänotyp SS zugeordnet, der Schub 3 als CO angesehen, da er sich aus zwei Abflussspitzen zusammensetzt. Wie zu erwarten, werden die Scheitelabflüsse des Phänotyps IN stark unterschätzt. Interessanterweise ergibt sich bei CO (3) eine Überschätzung, beim Murschub 2 nur eine geringe Unterschätzung.

Beim Murgang an der Gatria (Abbildung 44) wurde der gesamte Murgang als IN (1) klassifiziert, sowie deutlich abgrenzbare Murschübe betrachtet (2 bis 11). Deutlich ist die Differenz in der Ganglinienform für den Phänotyp IN erkennbar, die sich auch in einer zu Unterschätzung des Scheitelwerts widerspiegelt. Hingegen zeigen die Phänotypen SS eine gute Übereinstimmung, die Scheitelwerte werden etwas überschätzt.

Alle anderen Ergebnisse sind dem Anhang 43 bis Anhang 49 zu entnehmen.

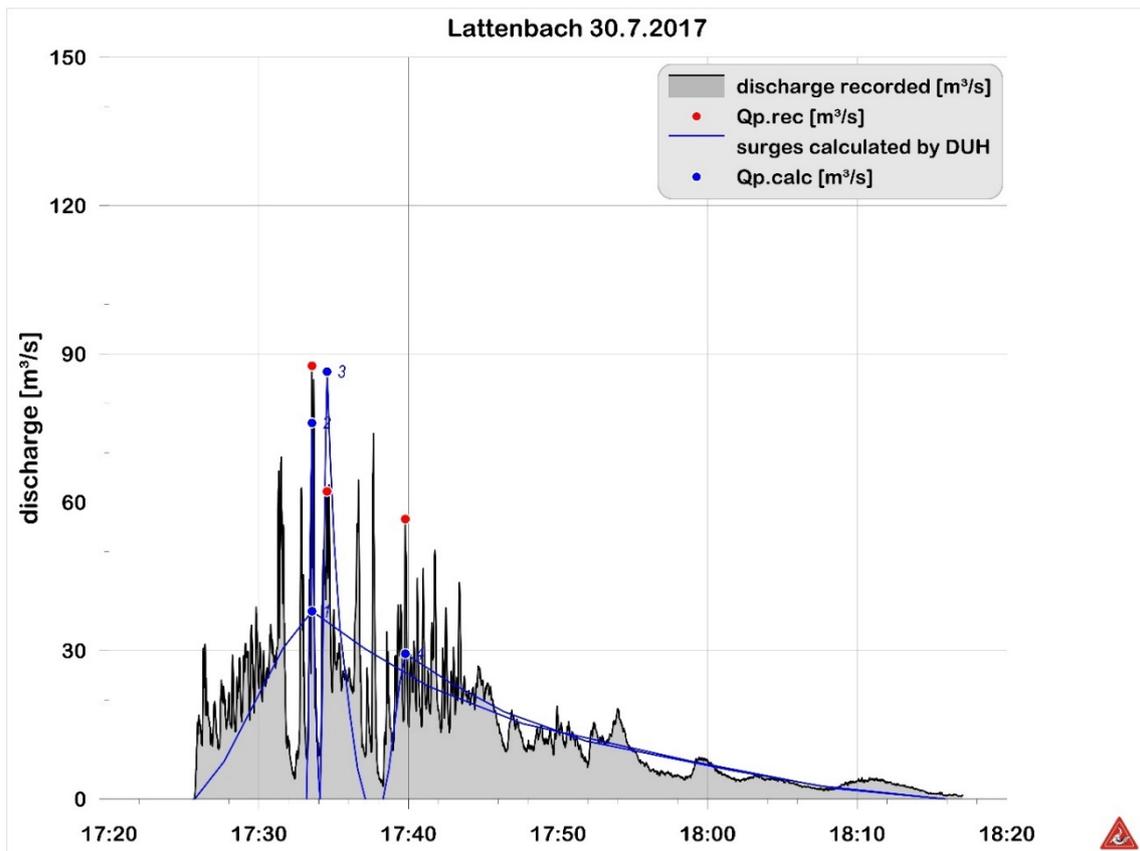


Abbildung 43: Gemessener Hydrograph und berechnete Murschübe für ein Ereignis am Lattenbach (#1.6.1-1.6.4)

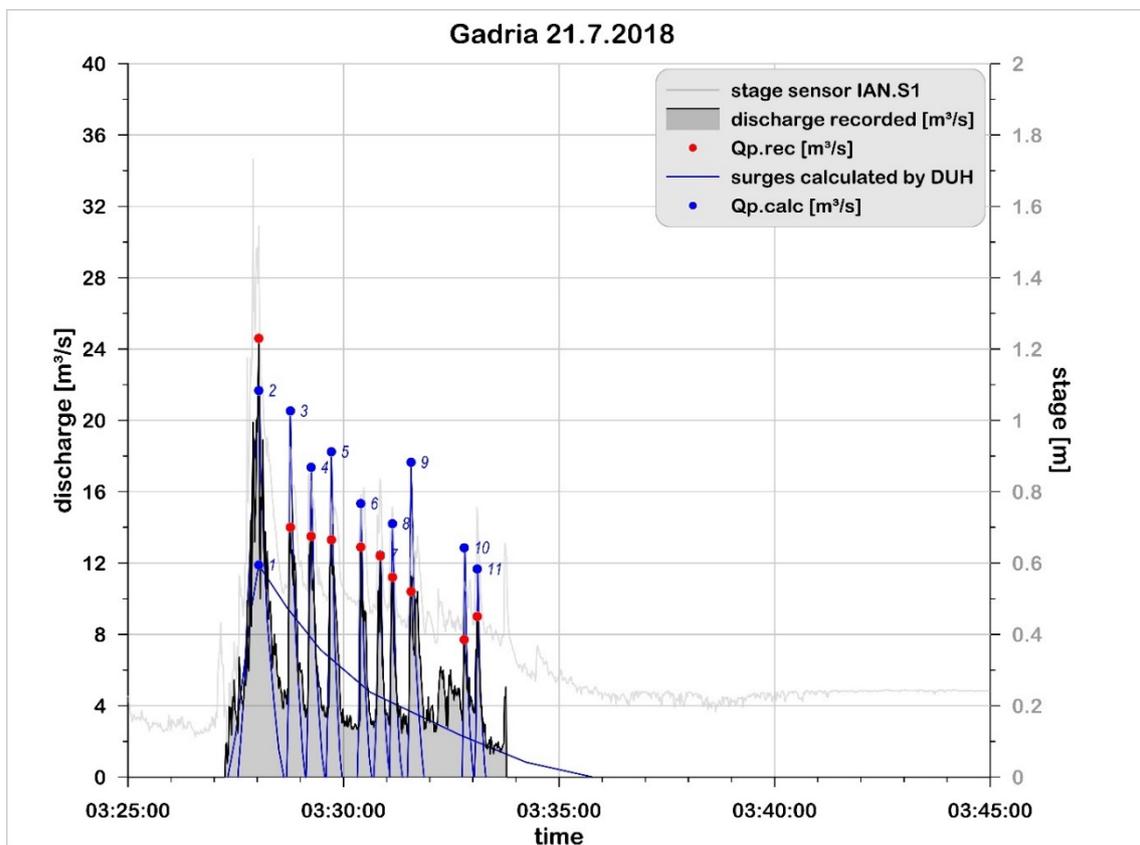


Abbildung 44: Gemessener Hydrograph und berechnete Murschübe für ein Ereignis an der Gatria (#4.7.1-4.7.11)



### 9.2.4 Vergleich der Abflüsse aus einem UV

Zum Vergleich der Formkennwerte der DUHs der ausgewerteten Schübe wird das UV Verfahren angewendet. Die Kurvenscharen entsprechen den berechneten Abflüssen, die aus einem Kubikmeter mobilisierten Feststoffs resultieren, wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration von 0,7 unterstellt wird (Abbildung 45).

Die Kennwerte vom Lattenbach streuen sehr weiter als die der Gatria. Am Lattenbach umfassen die Scheitelwerte  $Q_{M, UV}$  den Bereich von 0,001 bis 0,25  $m^3/s$ , in der Gatria liegen die  $Q_{M, UV}$  zwischen 0,01-0,025  $m^3/s$ .

Insgesamt ergibt sich aus der Abbildung, dass die Abflüsse  $Q_{M, UV}$  überwiegend dem Bereich zwischen 0,01 und 0,25  $m^3/s$  zuzuordnen sind, unabhängig vom Einzugsgebiet und von der Form der Ganglinie.

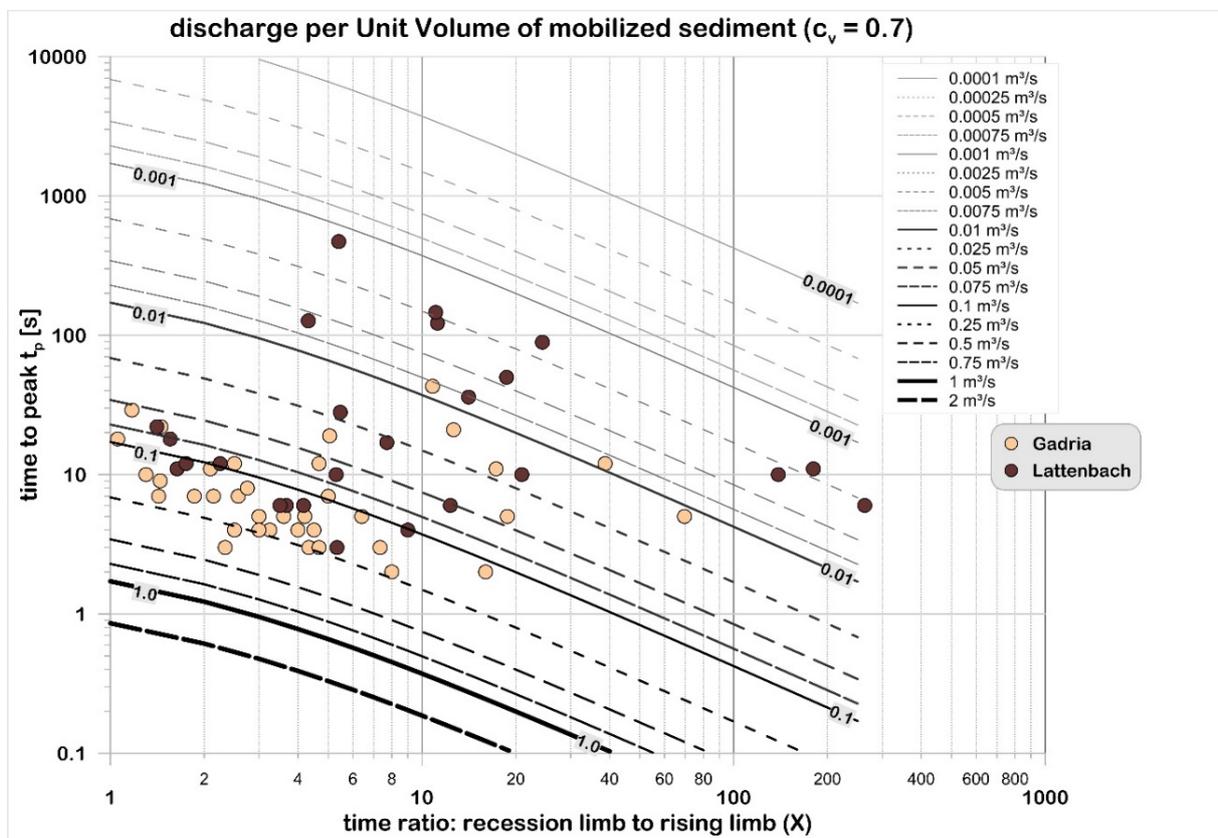


Abbildung 45: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für den Lattenbach und die Gatria

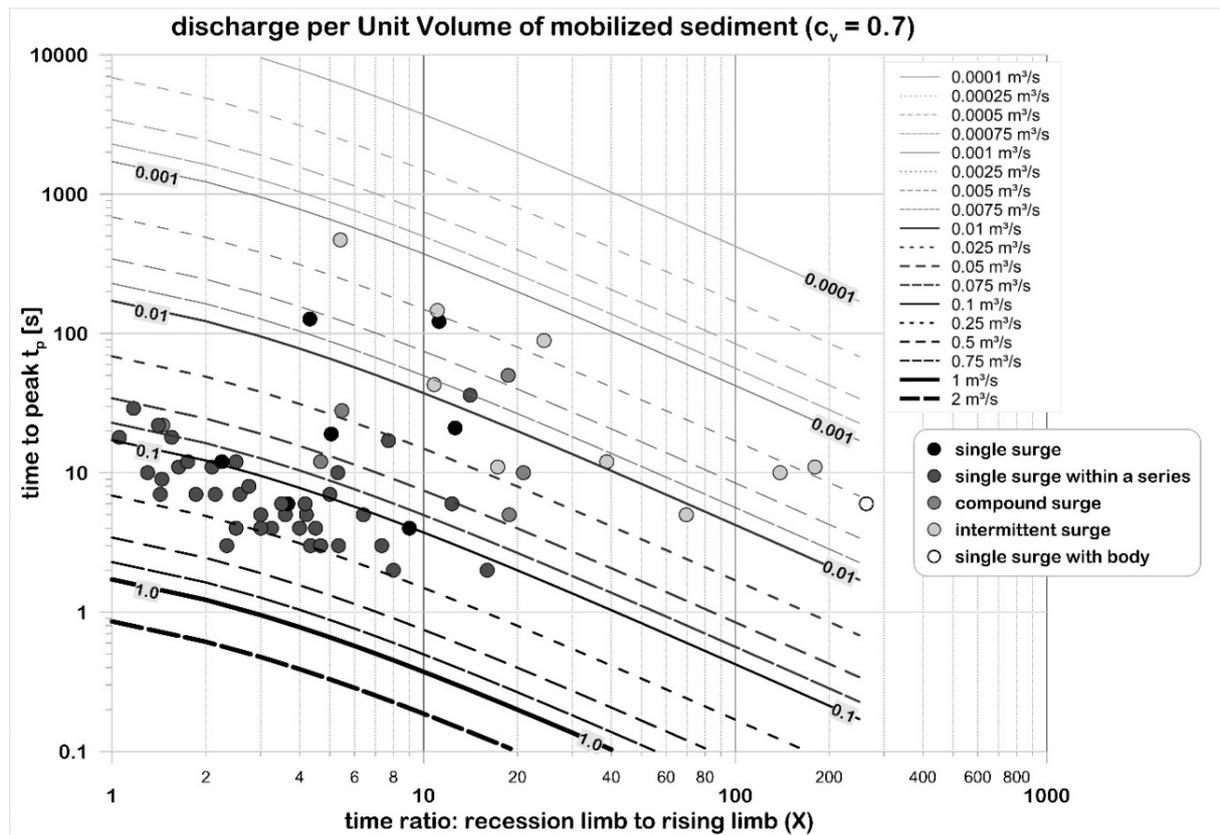


Abbildung 46: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für die ausgewiesenen Phänotypen

Werden die Abflüsse aus einem UV bezüglich der Phänotypen dargestellt (Abbildung 46), so weisen die Ergebnisse der single surge (SI) eine Streuung von 0,0025-0,1 m<sup>3</sup>/s auf, compound surges (CO) eine von 0,005-0,075 m<sup>3</sup>/s. Beim Phänotyp single surge within a series (SS) schwanken die Werte bis auf 2 Ausreißer zwischen 0,05 und 0,25 m<sup>3</sup>/s. Wesentlich geringer fällt die Bandbreite bei intermittierenden Murgängen (IN) aus.

Um zusätzlich einen Hinweis über die Murenfrachten der einzelnen Murschübe zu erhalten, sind diese in Abbildung 47 proportional zu ihrem Volumen abgebildet. Größere Frachten der Schübe wurden nur am Lattenbach gemessen, sie haben zumeist eine längere Anstiegszeit, der Verhältnissfaktor kann jedoch im weiten Bereich schwanken.

Zur Veranschaulichung der Differenz der berechneten von den beobachteten Abflüssen werden in Abbildung 48 diese Abweichungen proportional als Kreise zum jeweiligen Datensatz abgebildet. Die größte Differenz beträgt rund 80 % (Gadria 4.8.8) für den Phänotyp SS, bei allen anderen Datensätzen treten weit geringere Differenzen auf.

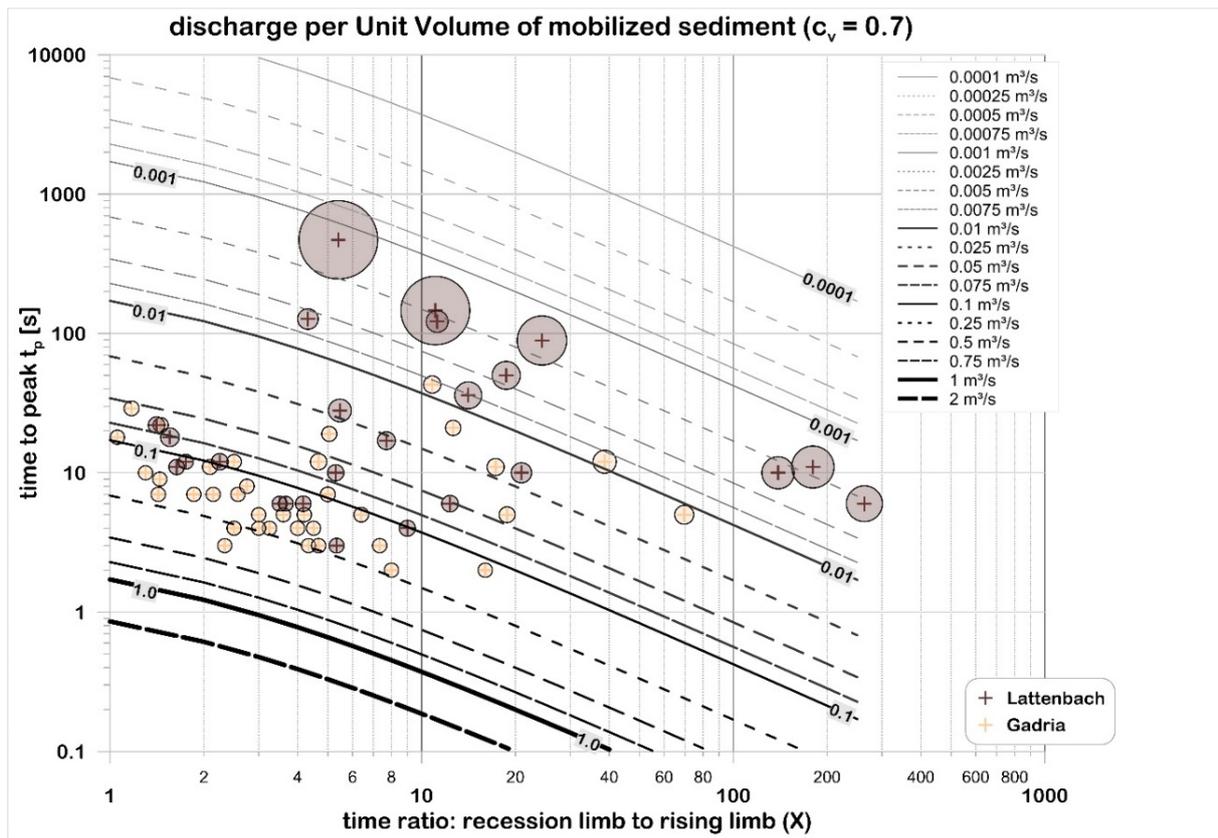


Abbildung 47: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für die ausgewiesenen Phänotypen. Die Größe der Kreise ist proportional zur gegebenen Murenfracht aufgetragen.

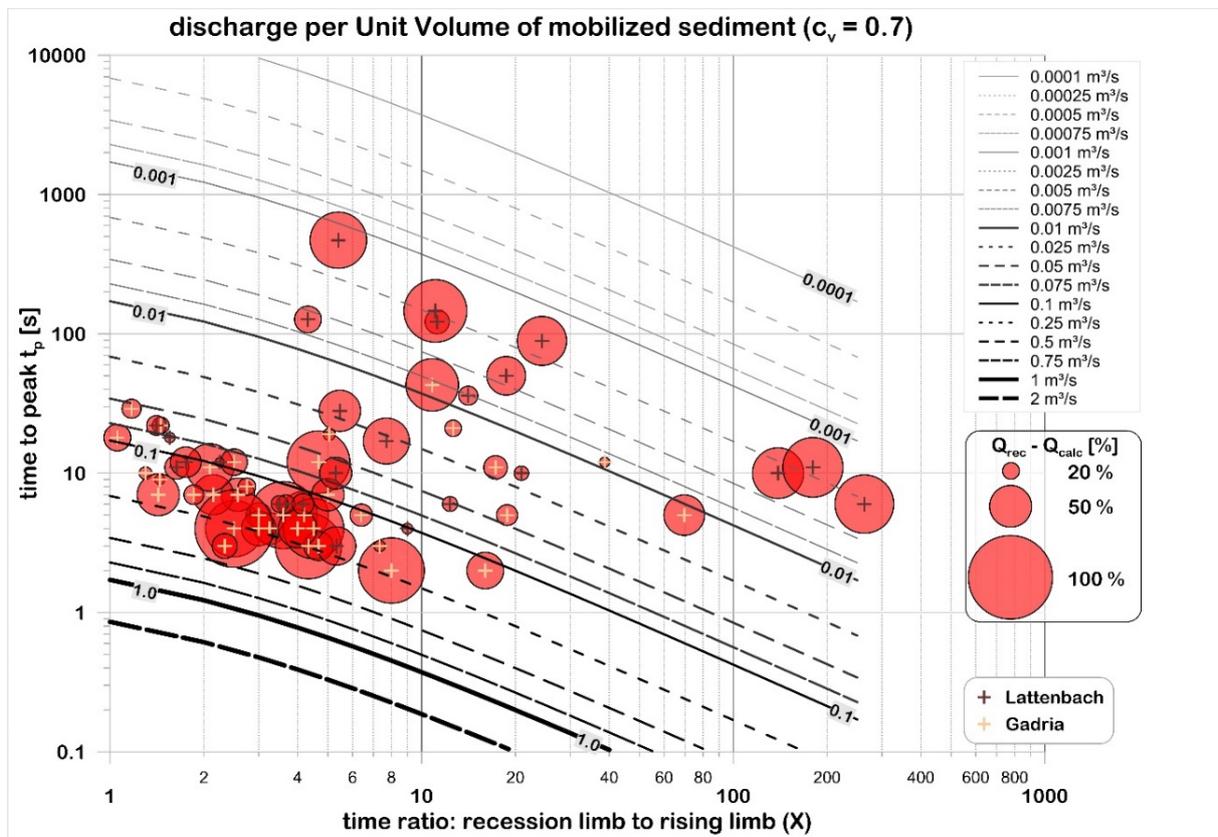


Abbildung 48: Vergleich der Abflüsse aus einem UV für die ausgewiesenen Phänotypen. Die Größe der Kreise ist proportional zur Abweichung des berechneten zum beobachteten Scheitelabfluss skaliert.



### 9.2.5 Gemessene Murenfracht und Spitzenabflüsse

Werden die gemessenen den berechneten Spitzenabflüssen bei gegebener Murenfracht gegenübergestellt wird deutlich, dass vor allem die Phänotypen IN und SB die größten Differenzen zeigen (Abbildung 49).

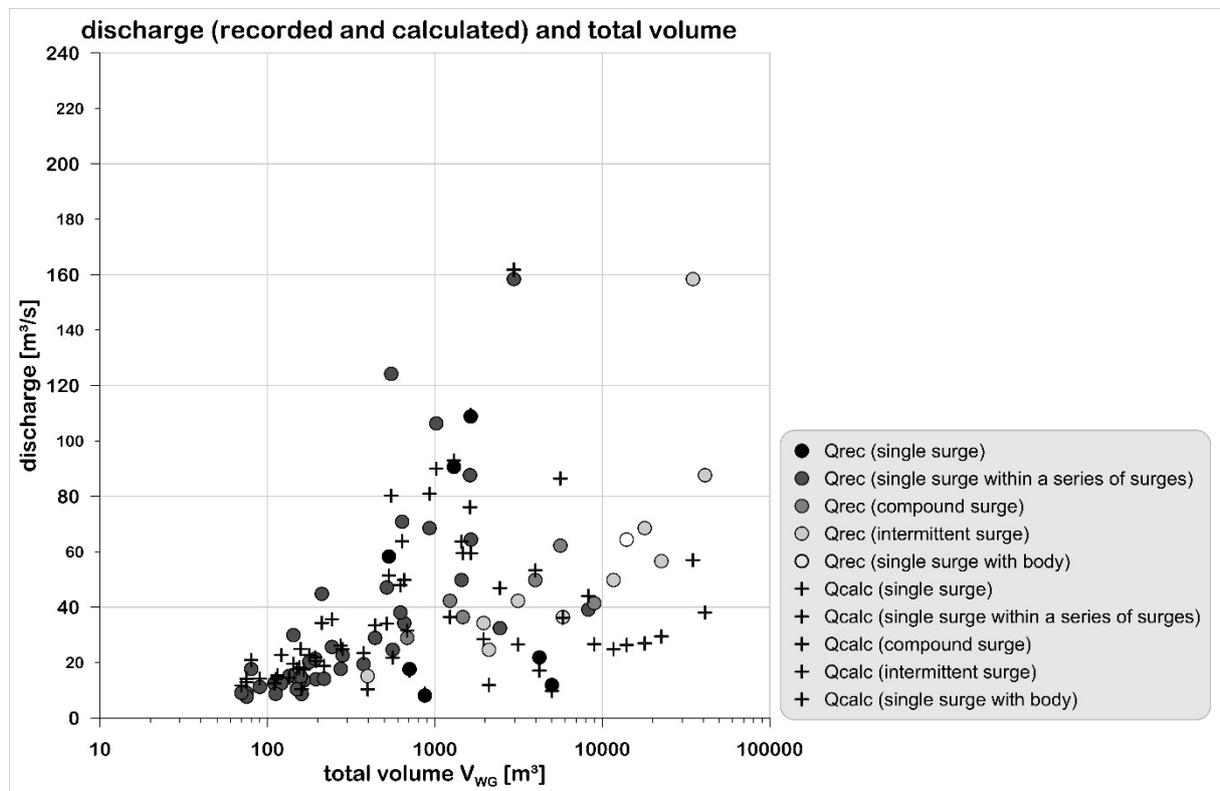


Abbildung 49: Gemessene und berechnete Spitzenabflüsse bei verschiedener gemessener Murenfracht

Ebenfalls ist die große Schwankungsbreite der Scheitelabflüsse bei den gemessenen Murenfrachten erkennbar. Klassifiziert man die Differenzen von Messung zu Berechnung in Stufen von 20 Prozent, lassen sich immerhin 42 Prozent der Datensätze einem Schwankungsbereich von  $\pm 20$  Prozent zuordnen und 72 % einem Schwankungsbereich von  $\pm 40$  Prozent (Abbildung 50).

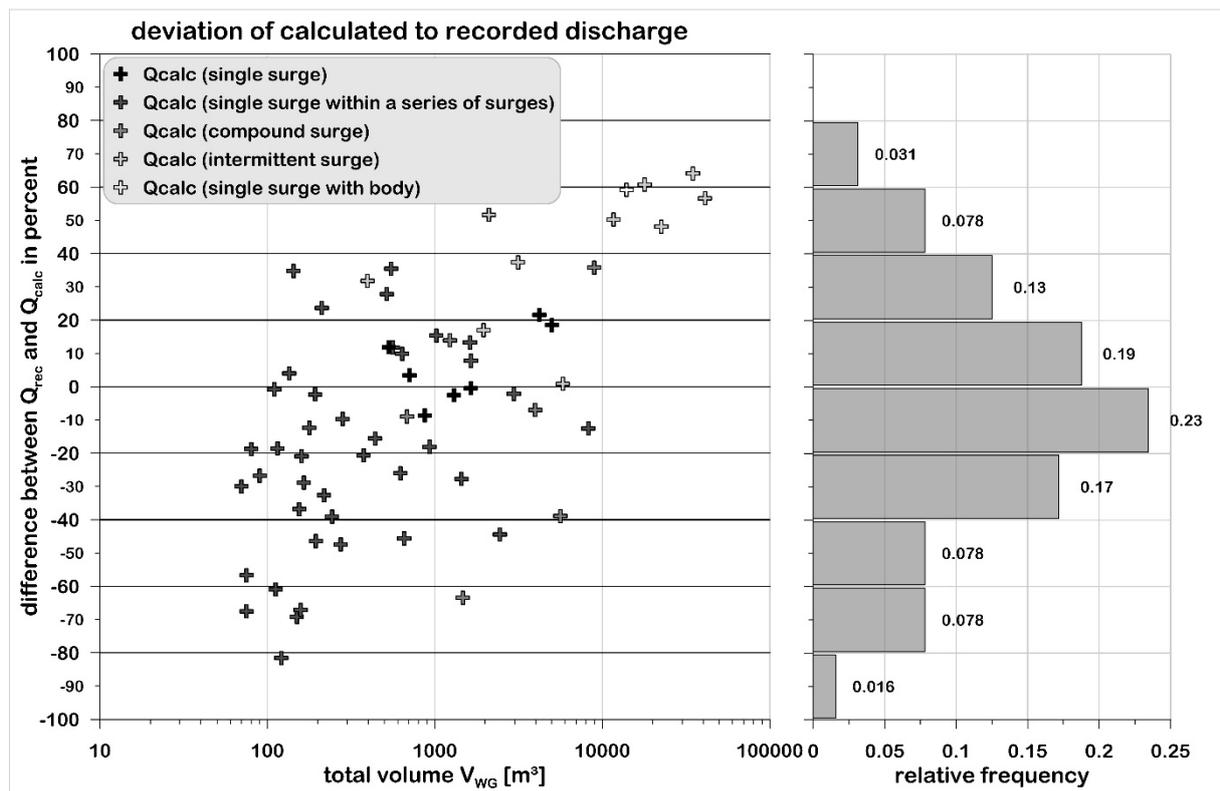


Abbildung 50: deviation between observed and calculated discharge in percent

### 9.3 Modellparameter unter Verwendung aller Datensätze

Kombiniert man die Datensätze aus der Literatur und den Messungen, erhält man 136 Datensätze, die zur Auswertung der zeitlichen Kennwerte zur Verfügung stehen.

Davon entfallen auf die Phänotypen

- single surge (SI) 40 Datensätze
- single surge within a series of surges (SS) 62 Datensätze
- compound surge (CO) 17 Datensätze
- intermittent surge (IN) 14 Datensätze
- single surge with body (SB) 3 Datensätze

#### 9.3.1 Analyse der zeitlichen Kennwerte

Der Median der Anstiegszeiten der Murschübe zeigt Werte zwischen 10 und 30 Sekunden. Der hohe  $t_p$  Wert beim Phänotyp IN liegt darin, dass die Zeit bis zum höchsten Scheitelwert in einer Serie von Schüben herangezogen wurde und nicht unbedingt der erste Schub den höchsten Scheitel aufweist (Abbildung 51).

Die Verhältniswerte deuten darauf hin, dass der abfallende Ast etwa 5 bis 15 mal so lang wie der Anstieg dauert. Der hohe Wert beim Phänotyp SB liegt darin, dass einem kurzen Anstieg eine hohe Spiegellage des Abflusses auf eine längere Zeit folgt (Abbildung 52).

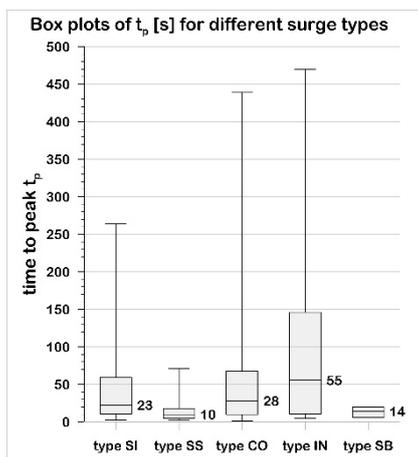


Abbildung 51: time to peak bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=136)

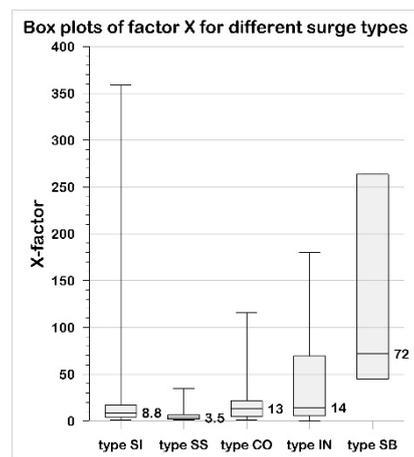


Abbildung 52: Verhältniswert X bei unterschiedlichen Ausprägungen von Murgängen (n=136)

Stellt man die time to peak dem Scheitelabfluss gegenüber, lässt sich kein Trend erkennen. Bis 50 m<sup>3</sup>/s schwanken die Anstiegszeiten zwischen 2 und 200 Sekunden, dieser Wert wird aber auch bei größeren Abflüssen kaum überschritten (Abbildung 53). Ein ähnliches Muster zeigt das Verhältnis der Dauer eines Murgangs/Murschubs zum Scheitelabfluss (Abbildung 54). Bis zu einem Scheitelabfluss von 50 m<sup>3</sup>/s dauert ein Murschub/Murgang zwischen 10 und 1000 Sekunden, bei höheren Abflüssen werden Dauern von 10 bis 100 Sekunden beim Phänotyp SI und SS erreicht, die anderen Phänotypen haben eine Basisdauer von 200 bis 2000 Sekunden.

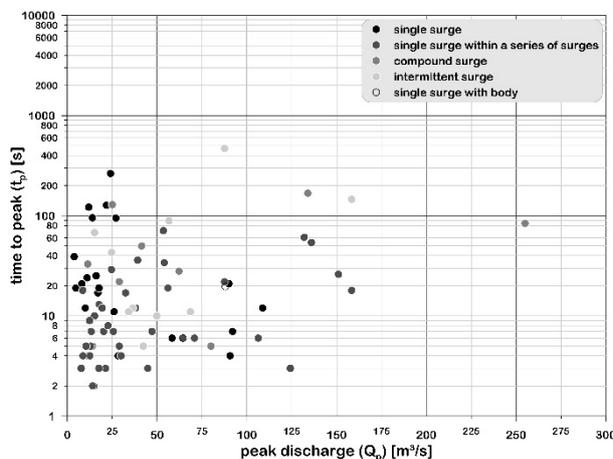


Abbildung 53: time to peak vs publizierter/gemessener Abfluss

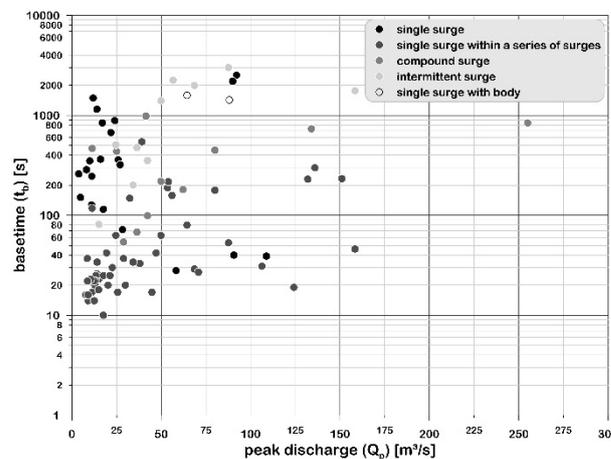


Abbildung 54: Gesamtdauer vs publizierter/gemessener Abfluss

Unter der Annahme, dass die Dauer eines Murgangs wesentlich vom Murvolumen abhängt, wird der Verhältniswert X mit der Murfracht normiert und in Beziehung zur Anstiegszeit gesetzt.

$$\frac{X}{V_{MG}} = a \cdot t_p^b$$

$$X = V_{MG} \cdot a \cdot t_p^b$$



Obwohl sich eine grundsätzliche Tendenz (Abbildung 55) bei allen Phänotypen erkennen lässt, ist die Schwankungsbreite sehr groß. Für alle Ereignisse (all) liegt das Bestimmtheitsmaß unter 0,6. Dieses nimmt vom Phänotyp CO (0,86) über IN (0,83), SS (0,70) zu SI (0,18) und SB (0,02) ab.

$$X_{all} = V_{MG} \cdot 0.0754155 \cdot t_p^{-0.9599743}$$

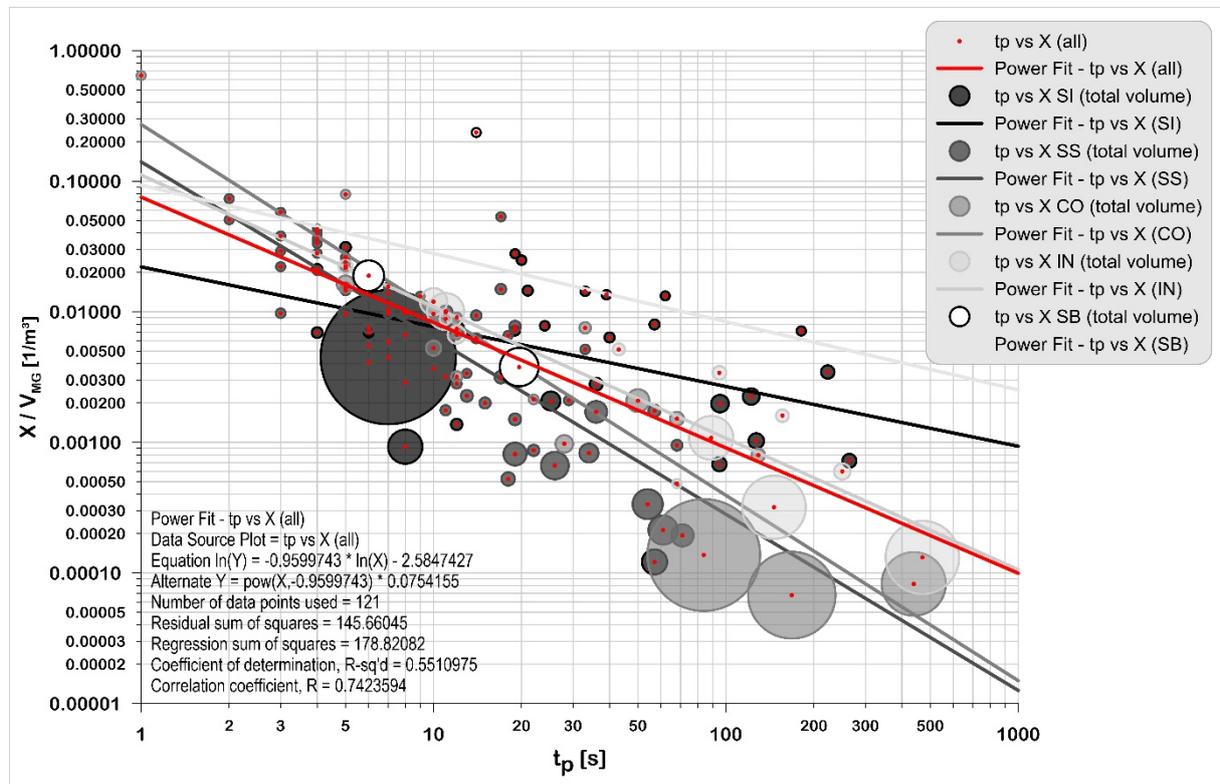


Abbildung 55: Verhältnis von time to peak zum mit dem Murenvolumen normierten Verhältnisswert X.

### 9.3.2 Unit Volume und Murenvolumen

Werden alle publizierten und beobachteten Daten mit bekannten Murenvolumina ( $n = 121$ ) in ein Diagramm mit dem Verhältnisswert als Abszisse und der Anstiegszeit als Ordinate gemeinsam mit den Abflüssen aus dem mobilisierbaren Einheitsvolumen bei einer Feststoffkonzentration von 0,7 aufgetragen zeigt sich, dass die höchsten Abflüsse aus einem Einheitsvolumen ( $Q_{MG,UV}$ ) bei kleineren Feststoffvolumen, die kleineren Abflüsse jedoch nur bei größeren Feststoffvolumen auftreten. Deshalb werden die Abflüsse des Einheitsvolumens in fünf Klassen von  $10^{-0.5}$  bis  $10^{-3}$  eingeteilt (Abbildung 57) und statistische Kennwerte dafür abgeleitet (Tabelle 15). Mit diesen kann eine grobe Abschätzung der Murenfrachten bei gegebenem Abfluss aus einem Einheitsvolumen getroffen werden.

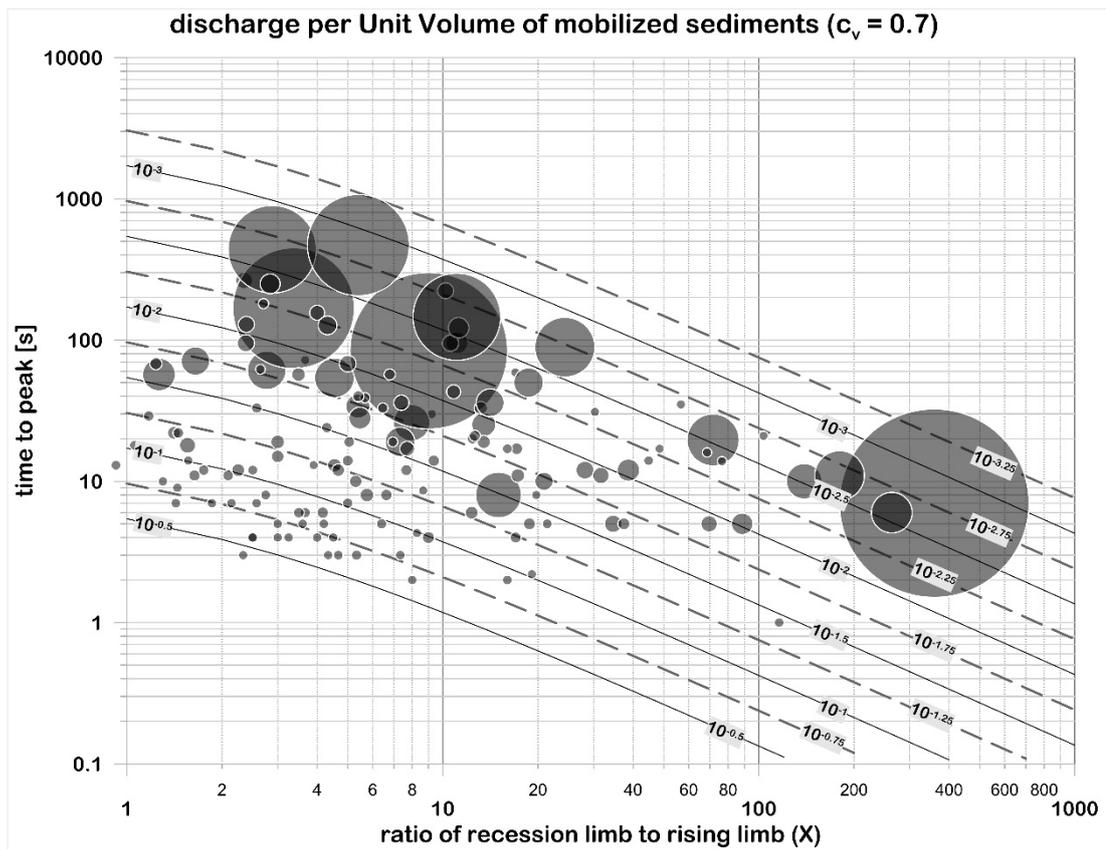


Abbildung 56: Kurvenscharen der Abflüsse aus einem Einheitsvolumen mit einer volumetrischen Feststoffkonzentration von 0.7 und beobachtete bzw. publizierte Murenfrachten. Die Größe der Kreise ist proportional dieser Volumina.

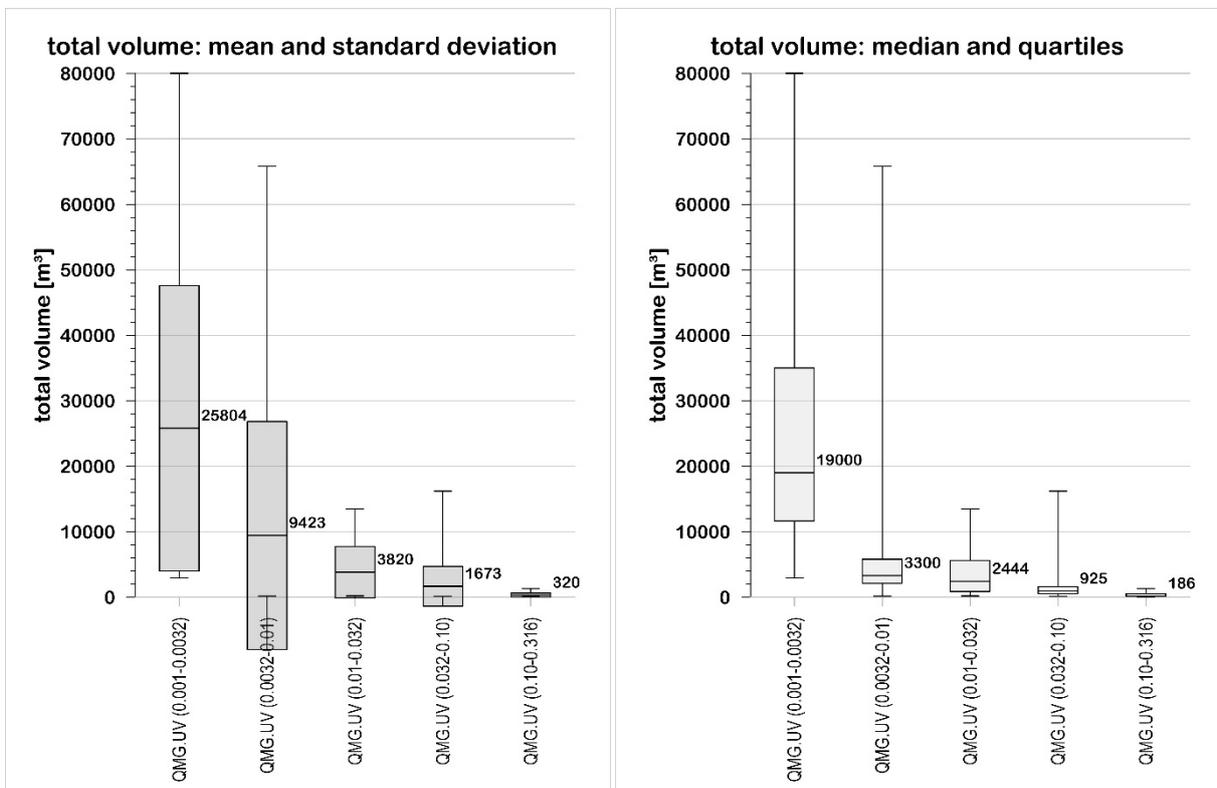


Abbildung 57: Statistische Kennwerte (Mittelwert und Standardabweichungen bzw. Median und unteres und oberes Quartil für beobachtete bzw. publizierte Murenfrachten von fünf Abflussklassen aus einem Einheitsvolumen



Tabelle 15: Abschätzung der Murenfrachten bei unterschiedlichen Abflussklassen aus einem Einheitsvolumen

Klasse	Abfluss aus einem UV [m³/s]		Murenfracht [m³]					
	von	bis	$V_{MG,mean}$	$V_{MG,min}$	$V_{MG,max}$	$V_{MG,std.de}$	$V_{MG,mean} + V_{MG,std.de}$	$V_{MG,sel}$
1	0.316	0.1	320	70	1300	309	629	1000
2	0.1	0.0316	1673	160	16200	3044	4718	5000
3	0.0316	0.01	3820	200	13500	3947	7767	10000
4	0.01	0.00316	9423	190	65800	17417	26840	25000
5	0.00316	0.001	25804	2950	80000	21796	47599	50000

Um die großen Schwankungen innerhalb einer Abflussklasse aus einem Einheitsvolumen zu berücksichtigen, wird die Standardabweichung zum Mittelwert addiert und aufgerundet (Tabelle 15). Diese Schätzungen können nur als grobe Richtwerte dienen und für eine Szenarienbildung zur Festlegung von Bemessungsabflüssen herangezogen werden.

### 9.3.3 Murenfracht und Abfluss

Nicht bei allen 136 Datensätzen sind sowohl die Murenfracht als auch der Scheitelwert gegeben. Deshalb reduziert sich die auswertbare Anzahl an Datensätzen auf 121. Bei Murenfrachten zwischen 100 und rund 100000 m³ schwanken die Murenabflüsse von rund 10 bis 250 m³/s. Allgemein lässt sich nur feststellen, dass mit zunehmendem Volumen auch die Scheitelabflüsse ansteigen, wobei die Phänotypen SS und CO die höchsten Abflüsse aufweisen. Bei hohen Frachten ergeben die berechneten Abflüsse zumeist zu geringe Werte.

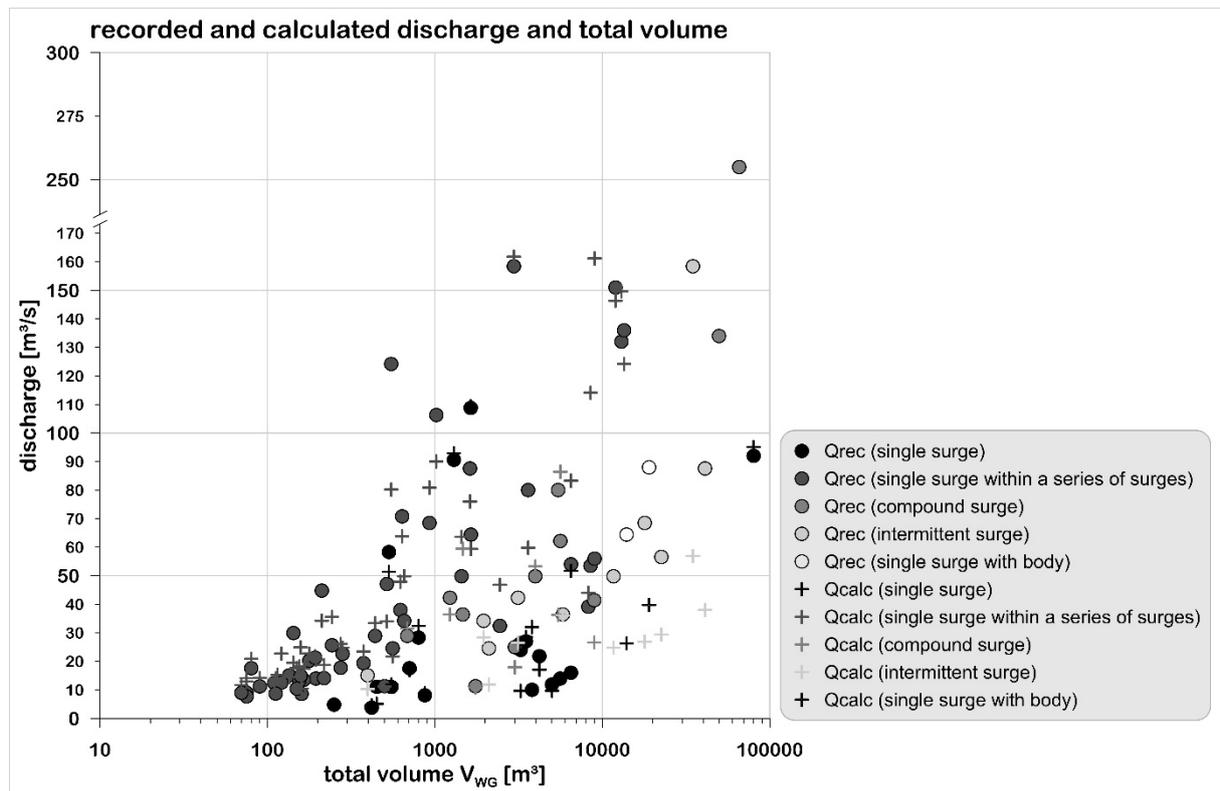


Abbildung 58: Gemessene und berechnete Spitzenabflüsse bei verschiedener Murenfracht unter Berücksichtigung aller Datensätze

Gegenüber den reinen Messdaten zeigen die Abweichungen der gemessenen/publizierten von den berechneten Abflüssen unter Berücksichtigung aller 121 Datensätzen ein weit besseres Bild. Rund 50 Prozent aller Differenzen liegen im Bereich zwischen  $\pm 20$  Prozent. Die geringsten Differenzen weisen die Phänotypen SI und SS auf, obwohl von diesen Phänotypen auch 4 Datensätze eine Unterschätzung von über 80 Prozent zeigen (Abbildung 59).

Das Verhältnis von Scheitelabfluss und Murenfracht lässt einen Trend erkennen, da mit zunehmender Fracht auch die Abflüsse zunehmen. Zusätzlich sind in Abbildung 60 jene Datensätze mit einem roten Kreis markiert, die eine Differenz von beobachtetem zu berechnetem Abfluss von weniger als  $\pm 20$  Prozent aufweisen.

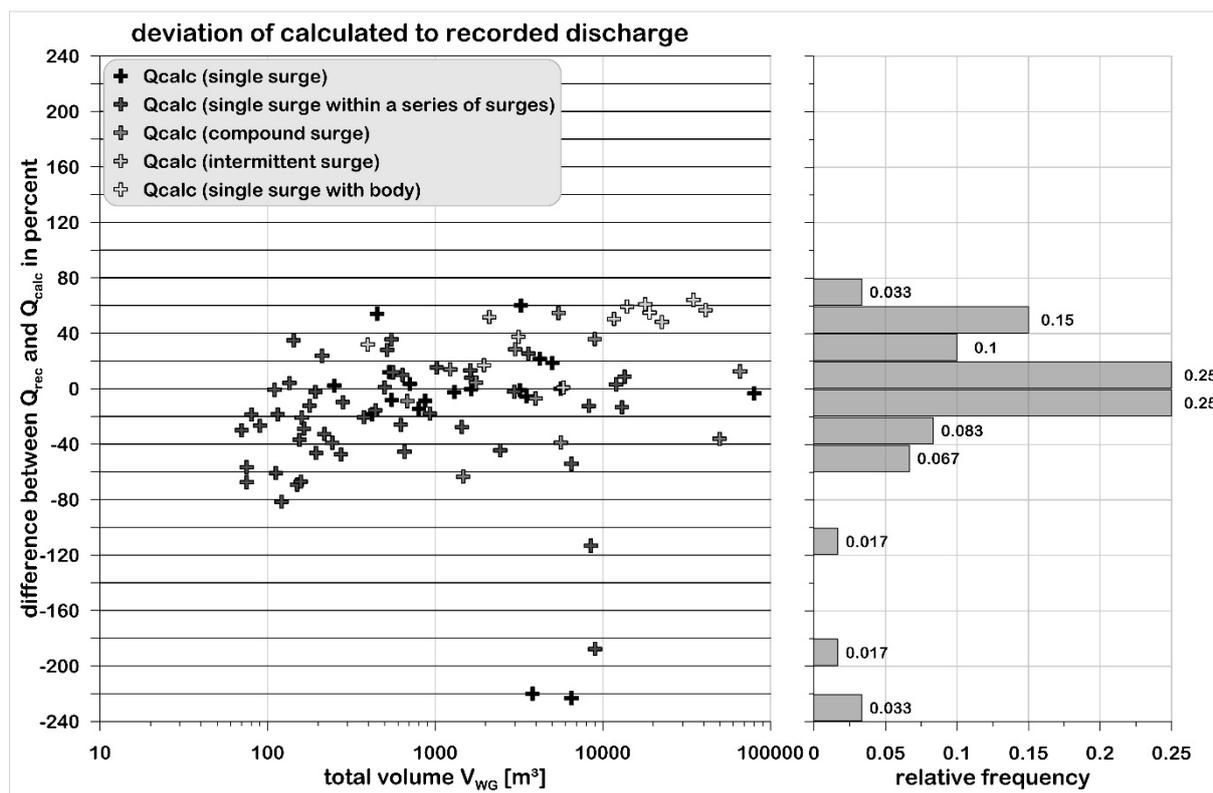


Abbildung 59: Abweichung der gemessenen und publizierten Abflüsse von den berechneten Abflüssen in Prozent

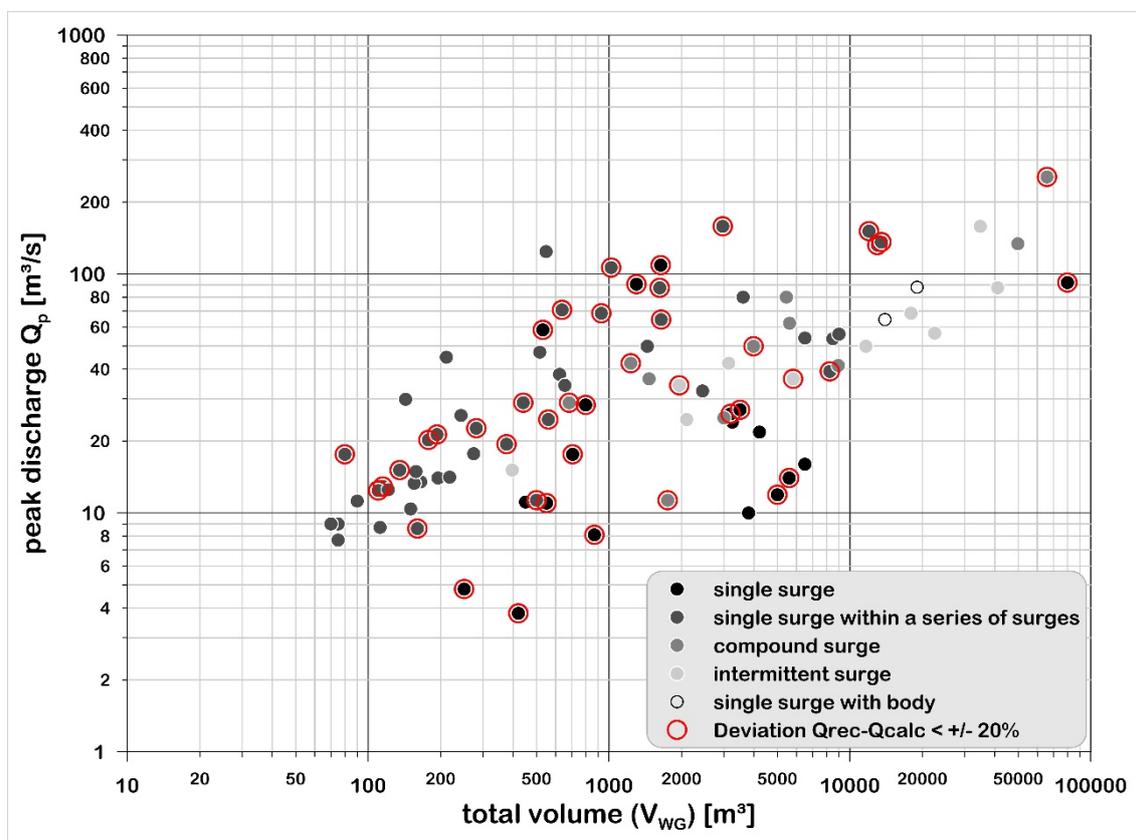


Abbildung 60: Publierte und gemessene Spitzenabflüsse bei verschiedener Murenfrachten; die Datensätze mit den roten Ringen bedeuten eine Abweichung der berechneten von weniger als  $\pm 20\%$  von den publizierten/gemessenen Abflüssen.



### 9.3.4 Mit dem empirischen Ansatz berechnete Abflüsse

Unter Anwendung des empirischen Ansatzes können Potenzfunktionen für alle Datensätze (Alle), nur für die Datensätze deren Abflussdifferenz zwischen Beobachtung und Berechnung kleiner als 20 Prozent ist (Selection), sowie für alle ausgewiesenen Phänotypen abgeleitet werden (Tabelle 16).

Tabelle 16: Koeffizienten (a), Exponenten (b) und Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) der ermittelten Potenzfunktionen für unterschiedliche Datensätze

Datenauswahl	Koeffizient a	Exponent b	1+b	$R^2$	Anzahl
Alle	2.4213925	-0.6686801	0.3313199	0.61	121
Selection	2.4719344	-0.6389523	0.3610477	0.64	43
SI	0.1424572	-0.3544591	0.6455409	0.19	29
SS	1.9803304	-0.5645395	0.4354605	0.70	61
CO	0.5270569	-0.4887855	0.5112145	0.66	15
IN	1.1396101	-0.6647349	0.3352651	0.81	13
SB	0.0123701	-0.1883602	0.8116398	0.97	3

Die beste Anpassung wird beim Phänotyp SB erzielt, was jedoch auf die nicht repräsentative Anzahl an Datensätzen zurückzuführen ist. Ähnlich verhält es sich beim Phänotyp IN. Aber auch die Anpassungen für den Phänotyp SS mit 66 Datensätzen und für die Selection mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,70 bzw. 0,64 deuten auf eine anwendbare Funktion hin (Abbildung 61).

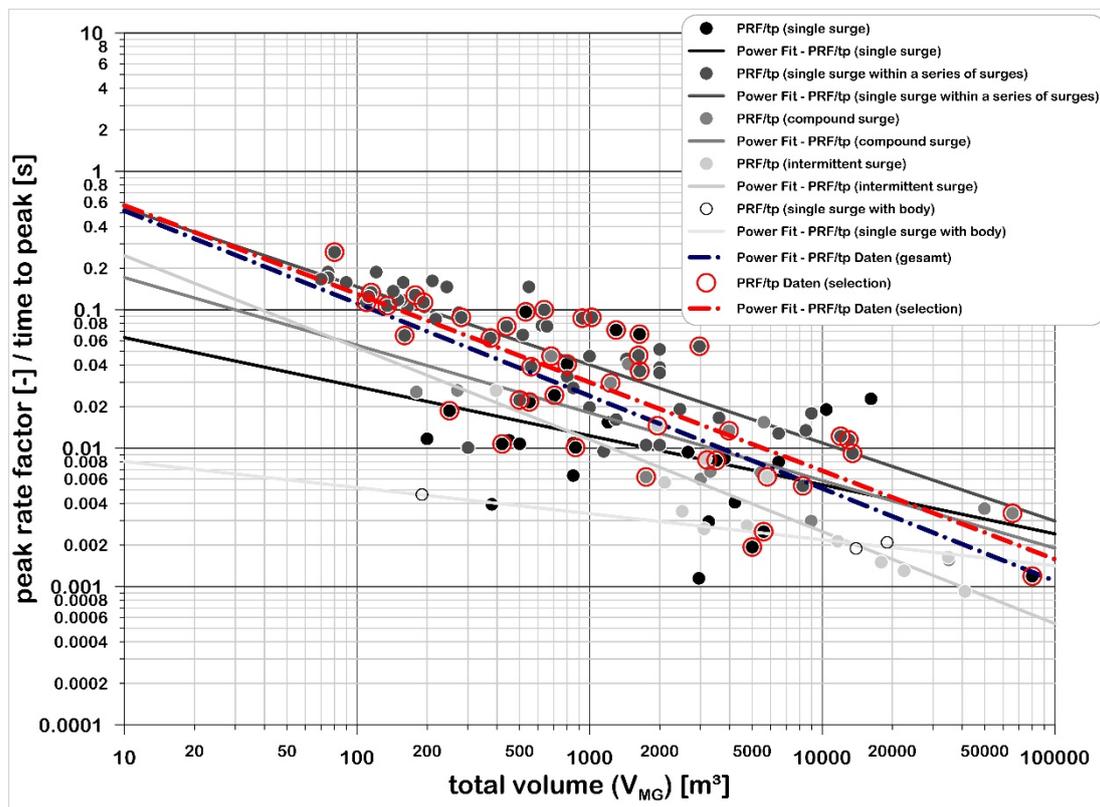


Abbildung 61: Ermittelte Potenzfunktionen für unterschiedliche Datensätze



In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 62 bis Abbildung 69) werden die Abflüsse der betrachteten 121 Datensätze mit den unterschiedlichen Potenzfunktionen berechnet und den publizierten/gemessenen Abflüssen gegenübergestellt.

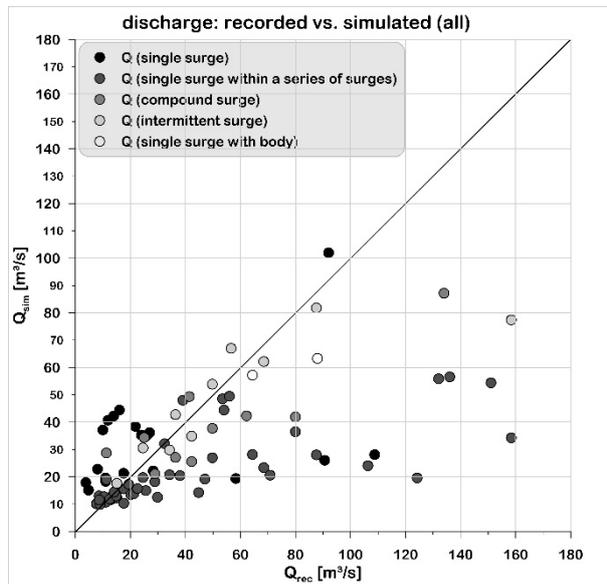


Abbildung 62: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassung der Funktion an alle Datensätze

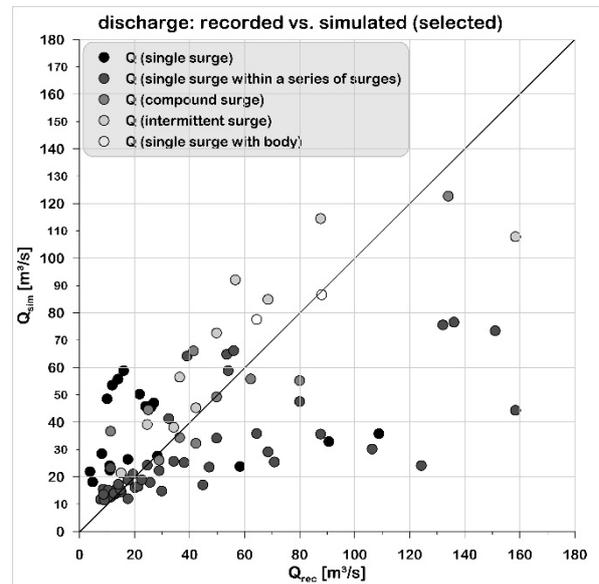


Abbildung 63: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassung der Funktion an ausgewählte Datensätze (selection)

Wird die Anpassungsfunktion für alle Datensätze gewählt (Abbildung 62), erreichen viele simulierten Abflüsse nicht den Beobachtungs- bzw. Messwert, besonders ab Abflüssen mit einem  $Q_{rec}$  größer als  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mit der Anpassungsfunktion für ausgewählte Datensätze (Abbildung 63) wird eine bessere Streuung erreicht, größere Abflüsse werden jedoch auch eher unterschätzt.

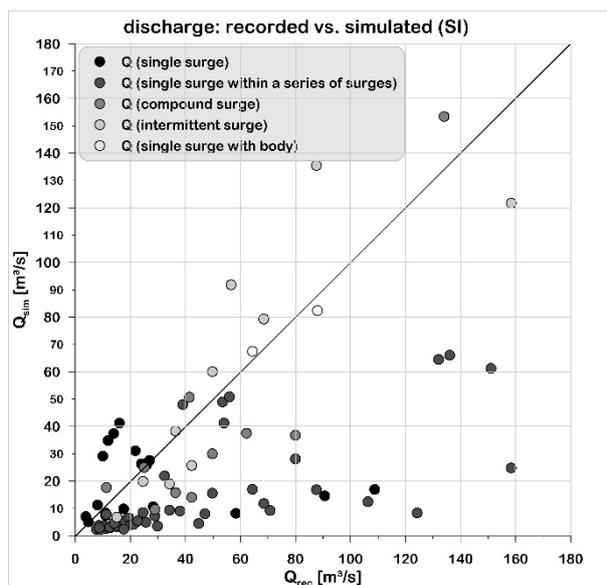


Abbildung 64: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassung der Funktion an Phänotyp SI

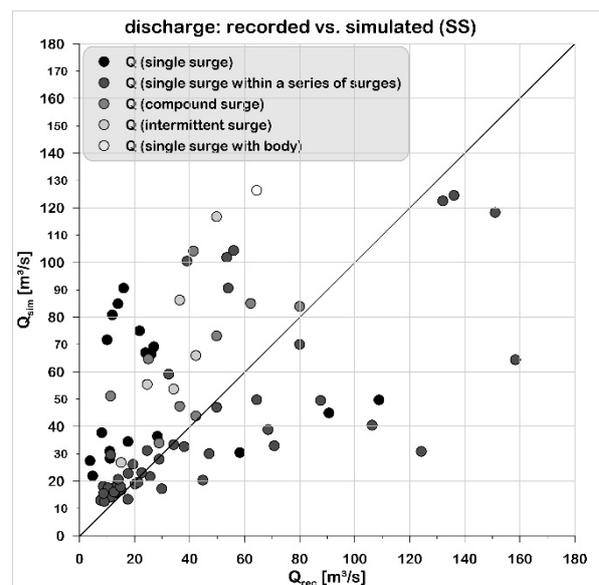


Abbildung 65: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassung der Funktion an Phänotyp SS



Mit der Anpassungsfunktion für den Phänotyp SI (Abbildung 64), erreichen viele simulierten Abflüsse nicht den Beobachtungs- bzw. Messwert, besonders ab Abflüssen mit einem  $Q_{rec}$  größer als  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . Unter Anwendung der Funktion für den Phänotyp SS (Abbildung 65) ergibt sich zwar eine größere Streuung, die simulierten Abflüsse liegen jedoch eher über dem Beobachtungs- bzw. Messwert. Dies gilt auch für größere Abflüsse.

Die Anpassungsfunktionen für die Phänotypen CO (Abbildung 66), IN (Abbildung 67) und SB (Abbildung 68) ergeben berechnete Abflüsse, die zumeist unter dem Beobachtungs- bzw. Messwert liegen. Sehr deutlich ist dieser Effekt bei den Phänotypen IN und SB erkennbar. Dies ist jedenfalls auf die Differenz zwischen gegebener Ganglinie und unterstellter Form der Ganglinie zurückzuführen.

Für die Anpassungsfunktion für ausgewählte Datensätze ist in Abbildung 69 auch die Murenfracht der Ereignisse dargestellt. Die Durchmesser der Kreise sind proportional zur angegebenen Murenfracht skaliert. Allgemein lässt sich daraus schließen, dass sich mit Zunahme der Frachten auch die Differenzen von Beobachtungs- bzw. Messwert zum berechneten Scheitelwert vergrößern.

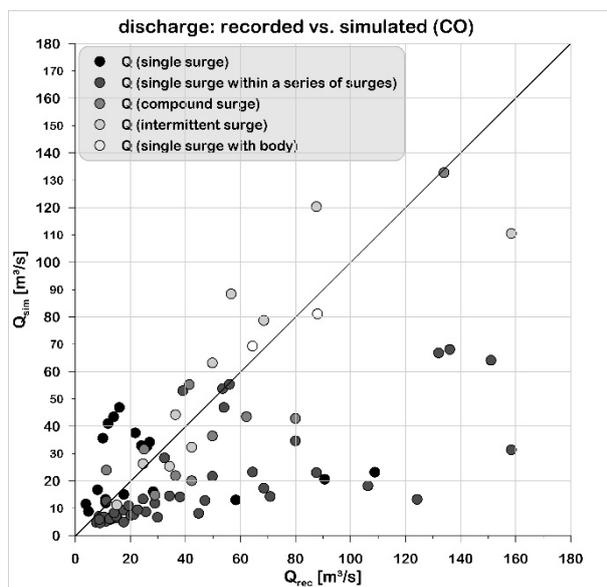


Abbildung 66: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassung der Funktion an Phänotyp CO

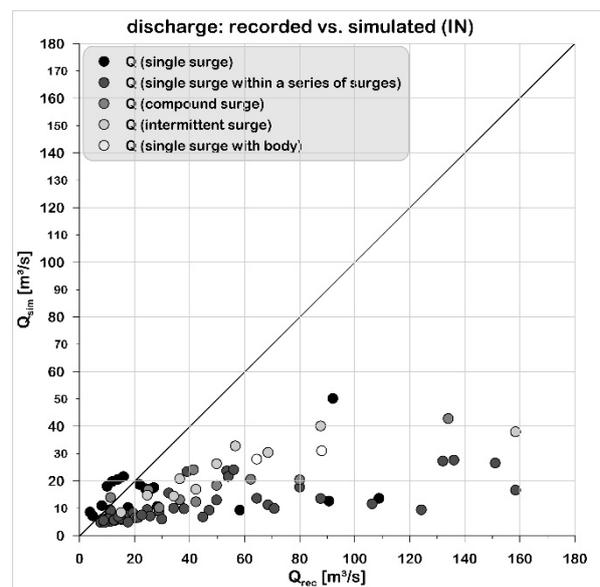


Abbildung 67: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassung der Funktion an Phänotyp IN

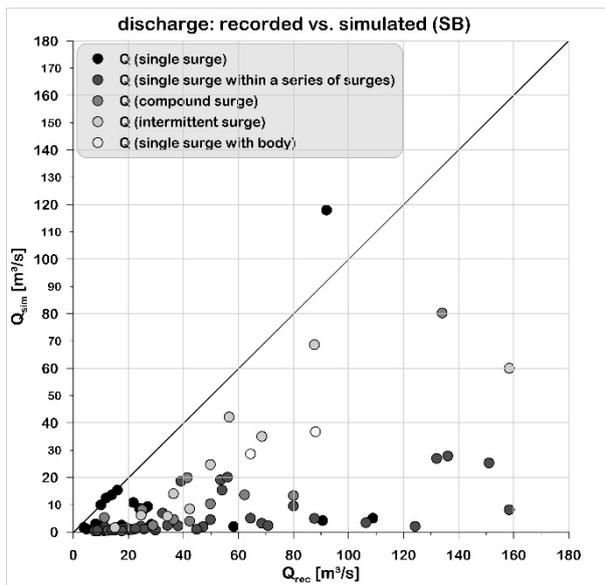


Abbildung 68: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassung der Funktion an Phänotyp SB

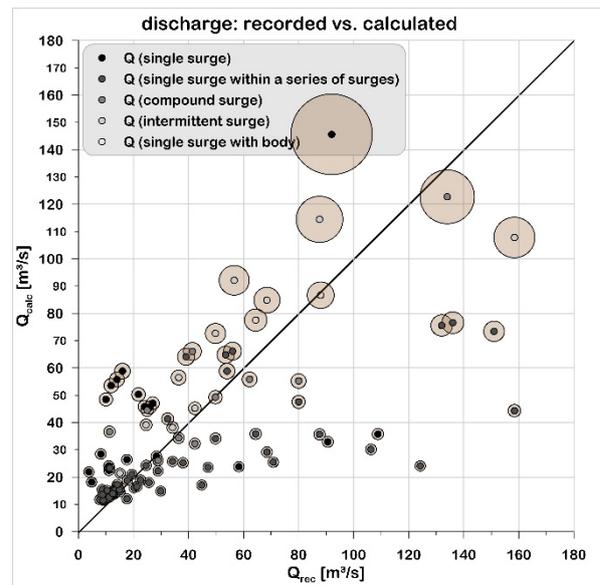


Abbildung 69: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Abfluss mit der Anpassungsfunktion für ausgewählte Datensätze (selection). Die Größe der Kreise ist proportional zur Murenfracht.

### 9.3.5 Vergleich mit publizierten empirischen Potenzfunktionen

Von verschiedenen Autoren wurden bereits ähnliche Potenzfunktionen publiziert. Der Vergleich mit den neu entwickelten Funktionen zeigt, dass die Abflüsse für Murenvolumina von unter 1000 m<sup>3</sup> mit den publizierten Ansätzen unterschätzt werden (Abbildung 70). Als Obergrenze ist sicherlich die Formel von Ikeda et al. (2019) mit einem Koeffizienten von 1 anzusehen, da alle Messwerte unterhalb dieser Geraden liegen. Von der Steigung der Funktion her passt Ou et al (1991) mit seinem „#2 rare debris flows“ noch am besten zu den bearbeiteten Datensätzen. Allgemein ist festzuhalten, dass die Exponenten der Potenzfunktion prinzipiell zu hoch angesetzt werden, wodurch die berechneten Scheitelabflüsse bei kleineren Murenvolumina die Messwerte als zu gering anzusehen sind.

Zumindest bis zu einem Murenvolumen von 100000 m<sup>3</sup> lässt sich mit den neuen Funktionen der Scheitelabfluss berechnen. Prinzipiell könnten beide Funktionen (selection und SS) verwendet werden, um aber einen konservativen Ansatz zu wählen, wird für die Plausibilisierung nur mehr die Anpassung für den Phänotyp SS verwendet.

$$Q_{MG(sel)} = 2.472 \cdot V_{MG}^{0.361}$$

$$Q_{MG(SS)} = 1.980 \cdot V_{MG}^{0.4355}$$

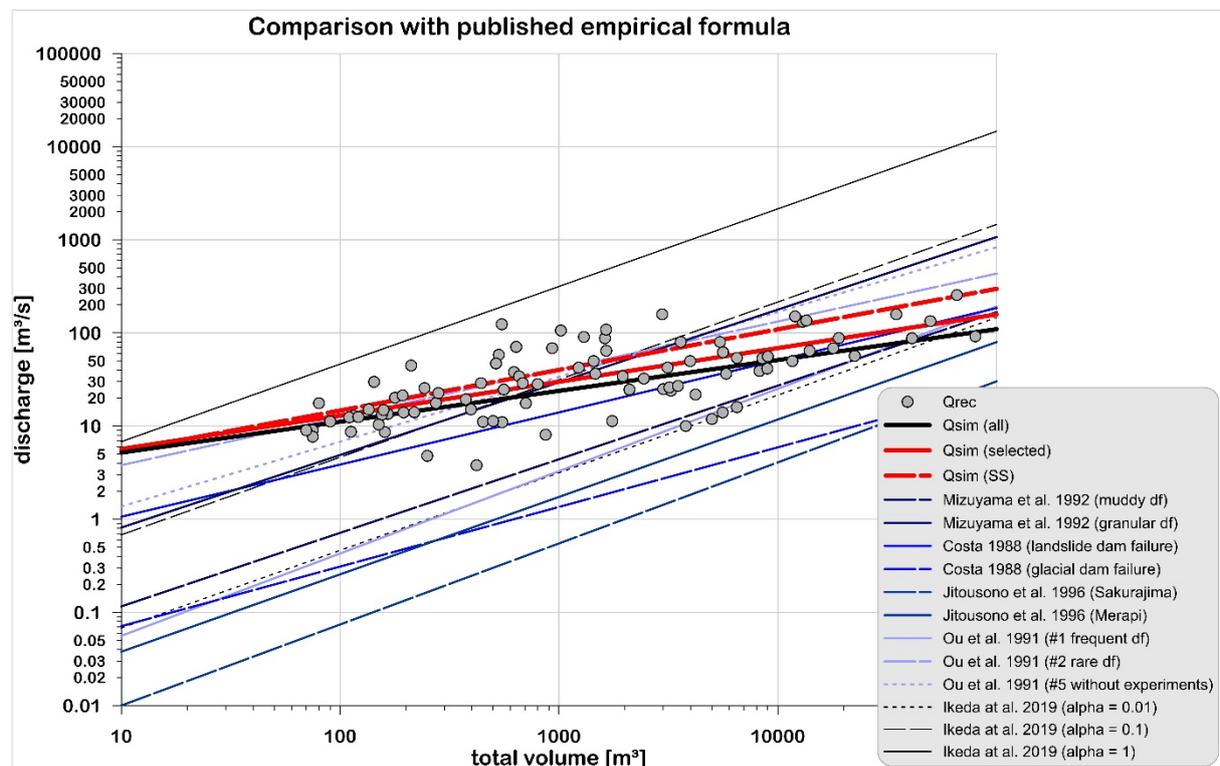


Abbildung 70: Vergleich der neuen empirischen Funktionen mit publizierten Potenzfunktionen

#### 9.4 Plausibilisierung

Für die Plausibilisierung werden dokumentierte Ereignisse aus Österreich, der Schweiz, aus den Murenversuchen in Chemolgan, aus China und aus Japan herangezogen.

Berücksichtigt man nur die Daten des Wildbach- und Lawinenkatasters, liegen fast alle dokumentierten Scheitelabflüsse, unabhängig vom Murenvolumen, unter der Anpassungsfunktion. Die Schweizer Ereignisse aus dem Jahr 1987 zeigen etwas höhere Scheitelwerte, während die Spitzenabflüsse aus den Murenversuchen von Chemolgan überwiegend unterhalb der Anpassungsfunktion rangieren. Die granularen Murenabflüsse aus Ikeda et al. (2019) streuen um die Funktion, liegen aber speziell bei größeren Volumina deutlich über der empirischen Funktion. Bei den als „muddy“ klassifizierten Murenabflüssen zeigt sich ein anders Bild, da die dokumentierten Abflüsse zumeist unter der Funktion liegen. Die vom Typ nicht definierten Abflüsse (NA) liegen alle auf oder über der Anpassungsfunktion.

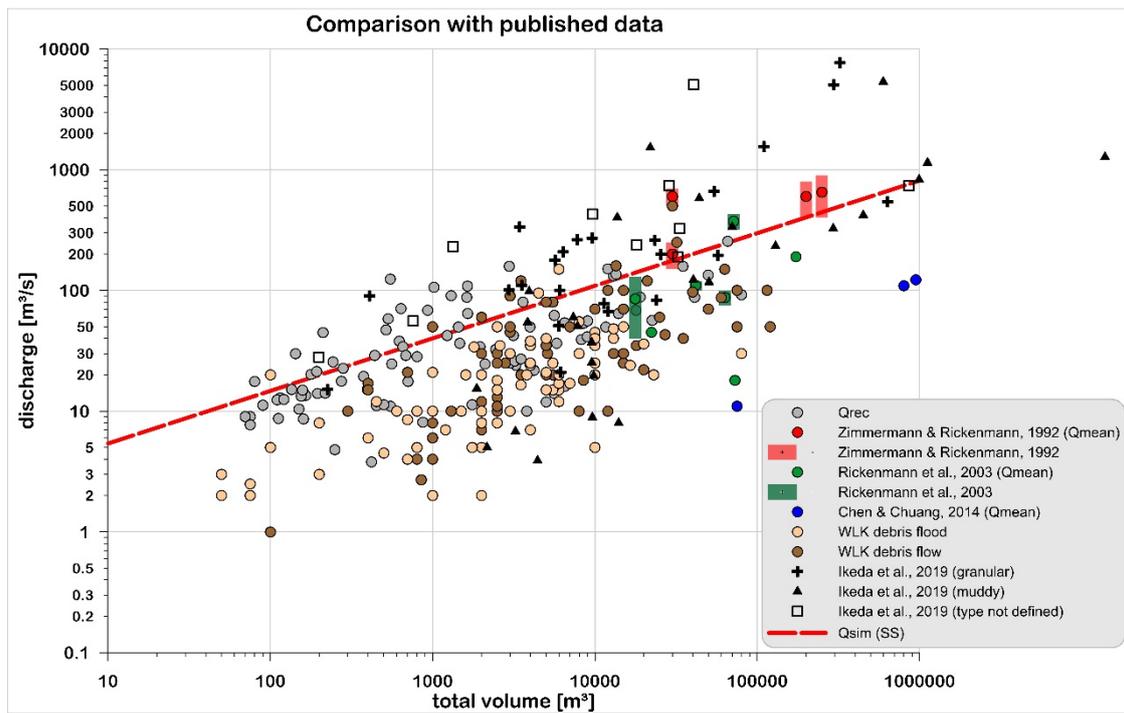


Abbildung 71: Plausibilisierung der vorgeschlagenen Anpassungsfunktion mit dokumentierten Ereignissen



## 9.5 Prozessfaktor

Der Prozessfaktor stellt den Quotienten aus dem Murenabfluss zum hydrologischen Abfluss her. Für den Murenabfluss wird die oben abgeleitete empirische Formel

$$Q_{MG(SS)} = 1.980 \cdot V_{MG}^{0.4355}$$

verwendet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Ansatz für den Spitzenabfluss eine Funktion der Murenfracht ist, wobei die volumetrische Feststoffkonzentration mit 0,7 festgelegt wird. Betrachtet werden beispielhaft die Volumina in der Bandbreite von 500 bis 100000 m<sup>3</sup>.

Für den hydrologischen Abfluss wird der Hüllkurvenansatz nach Wundt (1953) verwendet, wobei der Gebietsfaktor für alpine Einzugsgebiete zwischen 8 und 14 variieren kann. Der ermittelte Abfluss ist somit eine Funktion der Einzugsgebietsfläche, die in der Bandbreite von 1 bis 30 km<sup>2</sup> angenommen wird.

$$Q_{hydro} = GF \cdot A_E^{0.6} = HQ_{100}$$

Die Formel für den Prozessfaktor lautet somit:

$$PF = \frac{1.980 \cdot V_{MG}^{0.4355}}{GF \cdot A_E^{0.6}}$$

Der Prozessfaktor ist somit eine Funktion von

$$PF = f(A_E, GF \text{ und } V_{MG})$$

Vereinfacht lässt sich der Prozessfaktor für jede Kombination von  $V_{MG}$  und  $GF$  für verschiedene Größen der Einzugsgebiete als Potenzfunktion darstellen.

$$PF(V_{MG}, GF) = a \cdot A_E^b$$

Tabelle 17: Prozessfaktoren in Abhängigkeit von Murenfracht und Gebietsfaktor

$V_{MG}$	Gebietsfaktor 8		Gebietsfaktor 10		Gebietsfaktor 12		Gebietsfaktor 14	
	Koeffizient a	Exponent b	Koeffizient a	Exponent b	Koeffizient a	Exponent b	Koeffizient a	Exponent b
500	3.6251	-0.5715	3.0172	-0.6188	2.4709	-0.5898	2.1013	-0.5882
1000	5.0220	-0.6022	3.9583	-0.5920	3.3405	-0.6061	2.9027	-0.6138
5000	10.0494	-0.5980	8.0371	-0.5970	6.6975	-0.5983	5.7965	-0.6007
10000	13.6468	-0.5990	10.9387	-0.6007	9.0871	-0.5972	7.8724	-0.6037
25000	20.3513	-0.5995	16.2788	-0.5984	13.5320	-0.5980	11.6198	-0.5996
50000	27.4970	-0.5990	21.9433	-0.5979	18.3782	-0.6004	15.7590	-0.6006
100000	37.2744	-0.6002	29.8456	-0.6005	24.8544	-0.6013	21.2418	-0.5990

Der Exponent schwankt um den Wert -0,60 und kann somit als Fixwert betrachtet werden. Dadurch vereinfacht sich die Berechnung des Prozessfaktors zu:

$$PF(V_{MG}, GF) = a \cdot A_E^{-0.6}$$

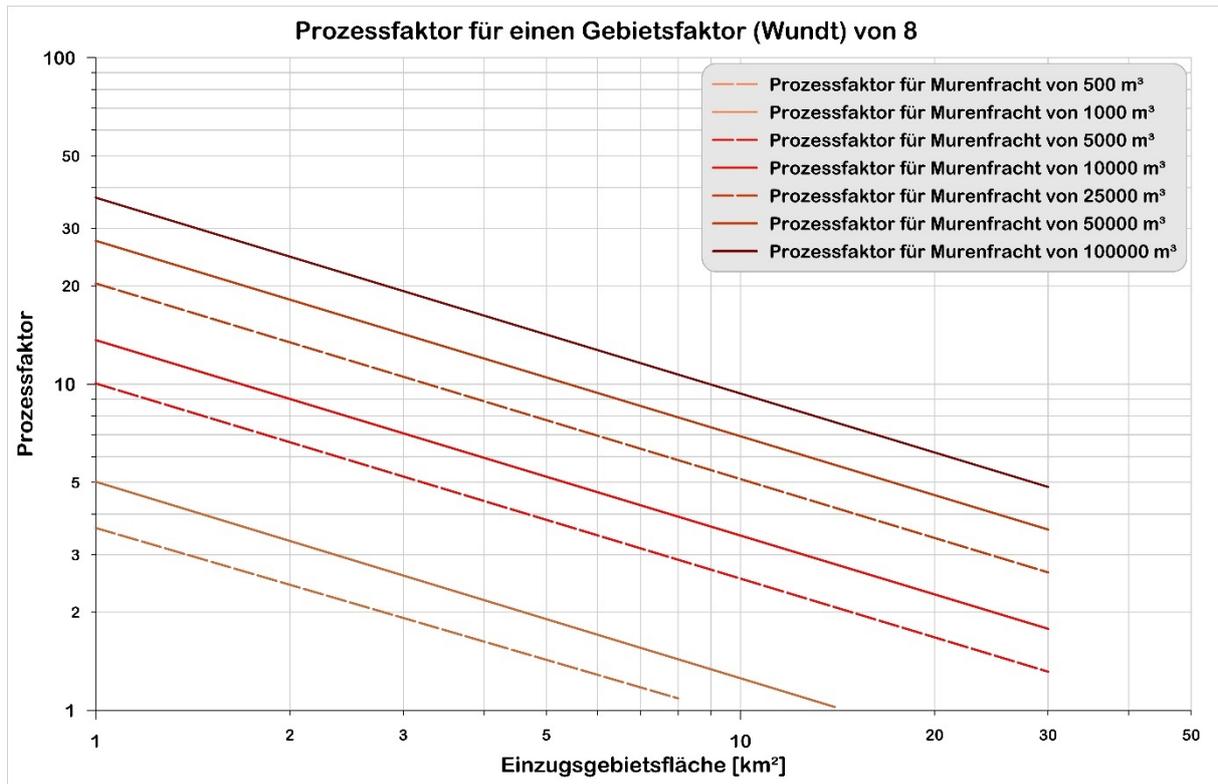


Abbildung 72: Prozessfaktor für einen Gebietsfaktor 8 nach Wundt für variable Murenfrachten und Einzugsgebietsgrößen

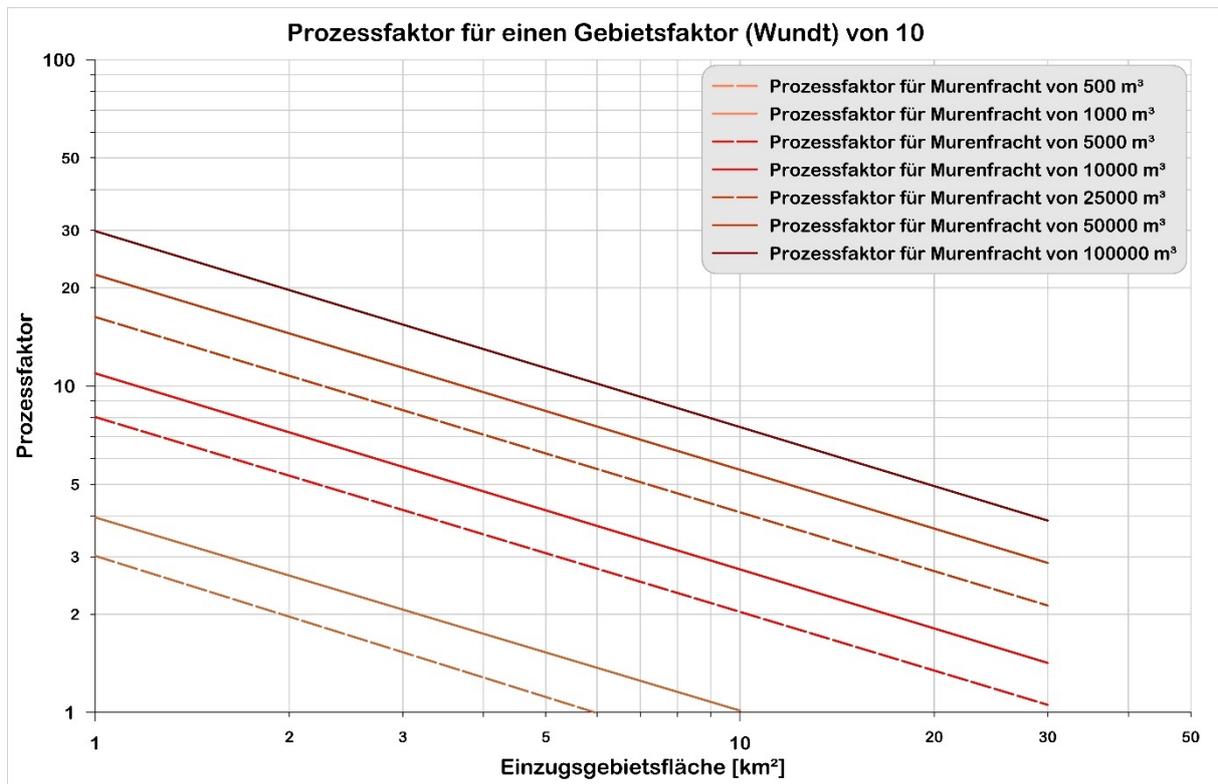


Abbildung 73: Prozessfaktor für einen Gebietsfaktor 10 nach Wundt für variable Murenfrachten und Einzugsgebietsgrößen

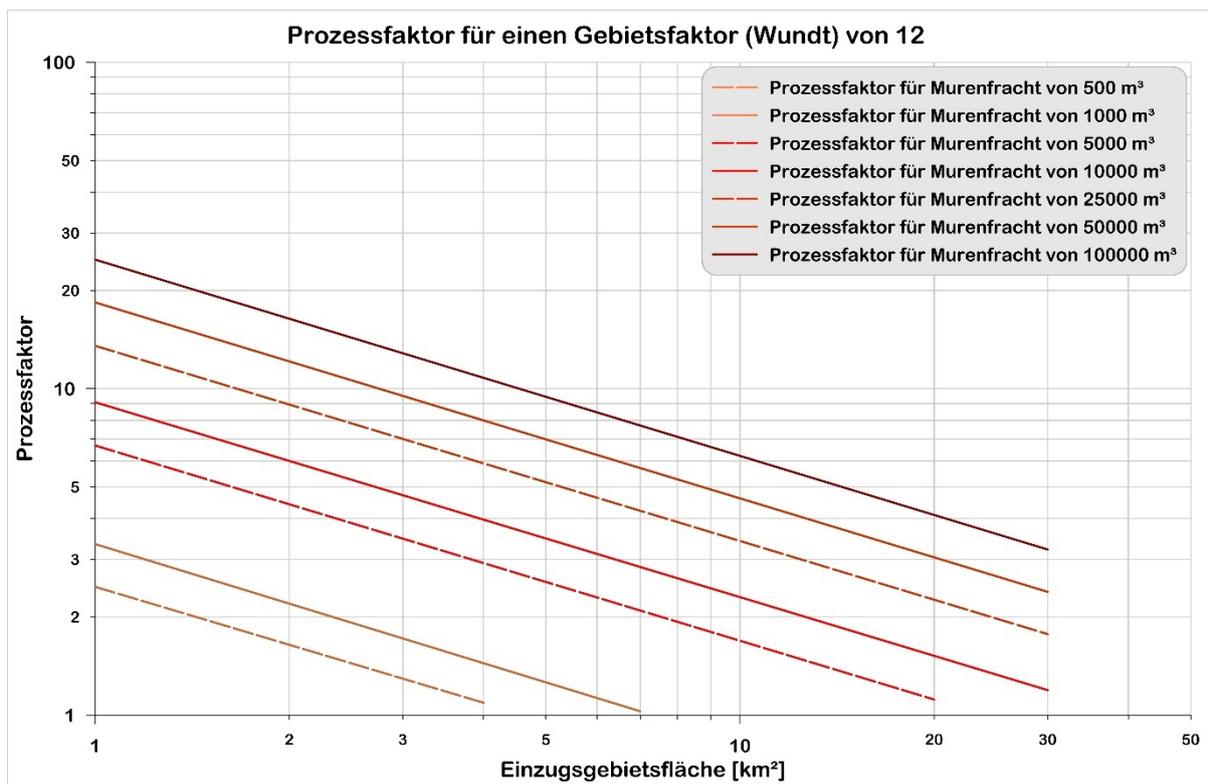


Abbildung 74: Prozessfaktor für einen Gebietsfaktor 12 nach Wundt für variable Murenfrachten und Einzugsgebietsgrößen

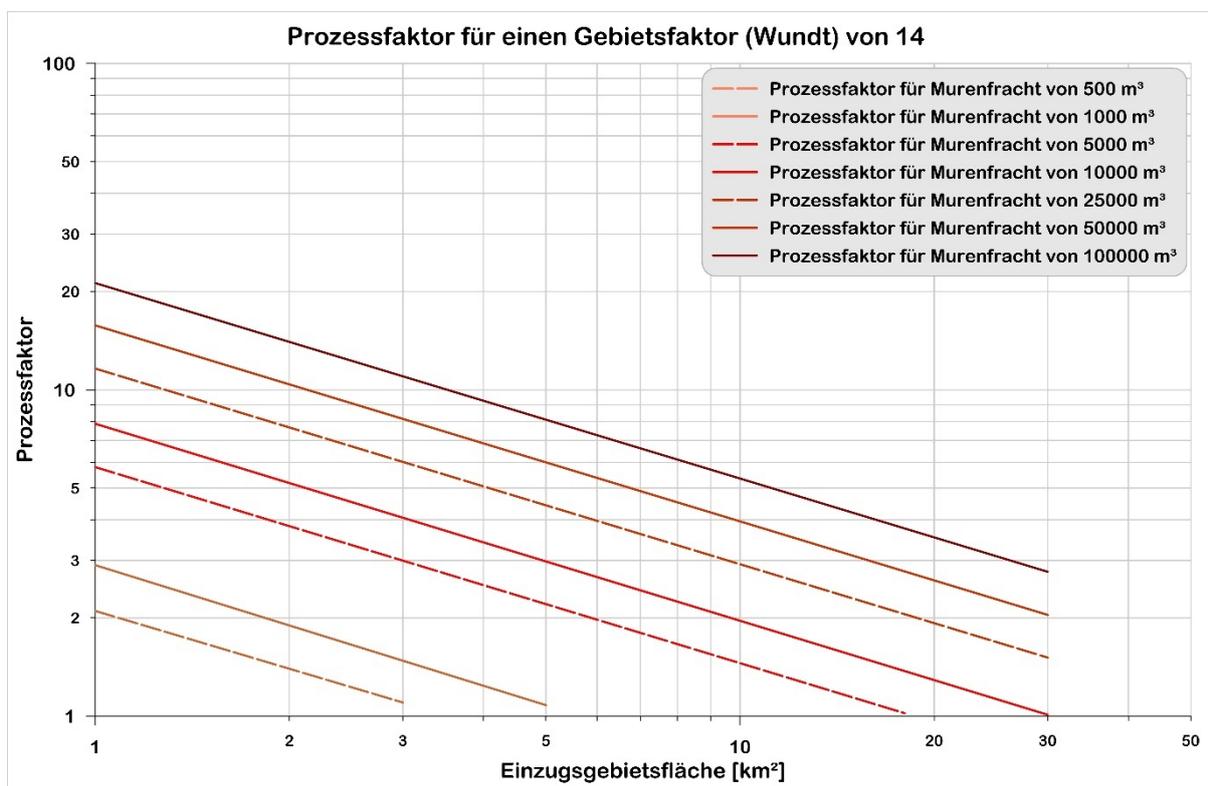


Abbildung 75: Prozessfaktor für einen Gebietsfaktor 14 nach Wundt für variable Murenfrachten und Einzugsgebietsgrößen

Um eine weitere Vereinfachung zu treffen, wird der Koeffizient a als Funktion des Gebietsfaktors betrachtet und daraus eine Potenzformel abgeleitet.

$$a = f(GF)$$



$$a = c \cdot GF^d$$

$$PF(V_{MG}) = c \cdot GF^d \cdot A_E^{-0.6}$$

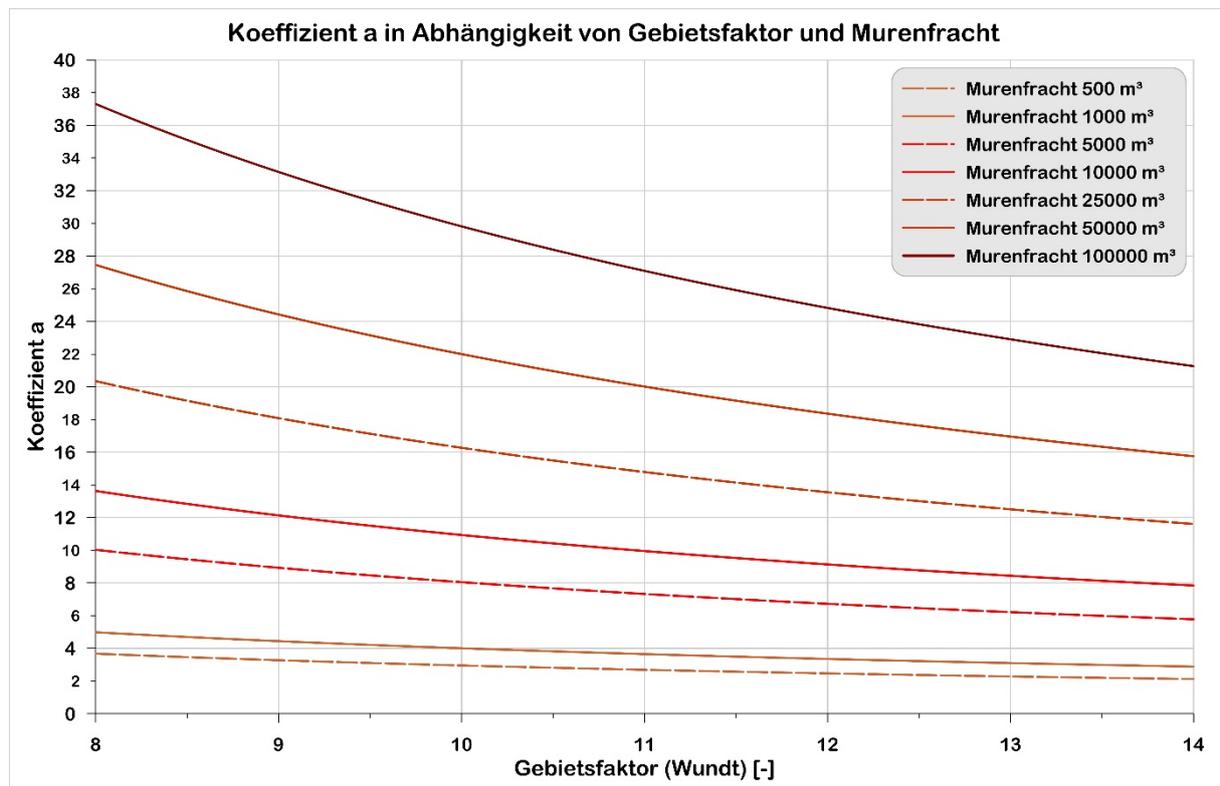


Abbildung 76: Koeffizient a in Abhängigkeit vom Gebietsfaktor für variable Murenfrachten

Für die Bandbreite der Murenfrachten errechnen sich somit die Koeffizienten und Exponenten laut Tabelle 18.

Tabelle 18: Koeffizient und Exponenten für die Potenzfunktion zur Ermittlung des Koeffizienten a

VMG	Koeffizient c	Exponent d
500	28.2884	-0.9815
1000	38.0622	-0.9779
5000	77.9278	-0.9860
10000	106.1969	-0.9873
25000	163.7547	-1.0028
50000	216.4711	-0.9929
100000	301.1654	-1.0043

Der Exponent d variiert nur leicht vom Wert -1, sodass in der Formel der Kehrwert des Gebietsfaktors eingesetzt werden kann.

$$PF(V_{MG}) = \frac{c}{GF} \cdot A_E^{-0.6}$$

Die Abhängigkeit vom Koeffizienten c von der Murenfracht lässt sich nun auch als Potenzfunktion darstellen.



$$c = 1.7479 \cdot V_{MG}^{0.4467}$$

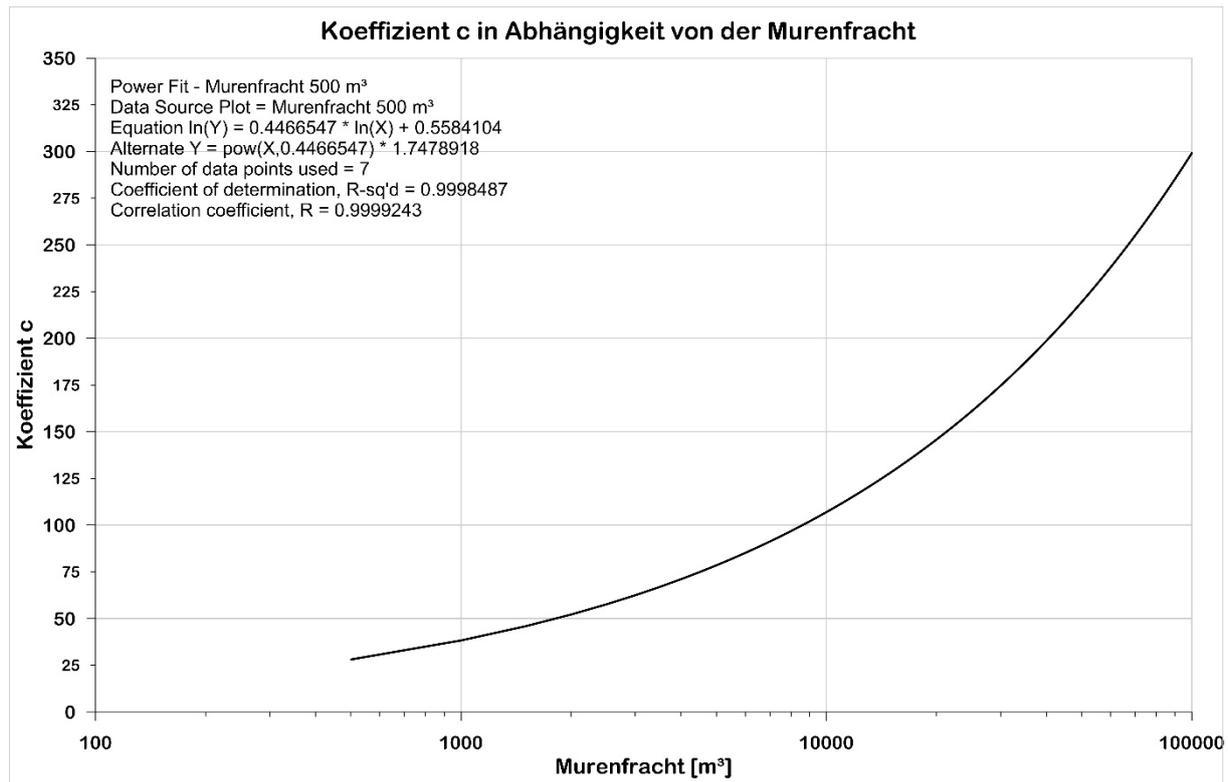


Abbildung 77: Koeffizient c in Abhängigkeit von der Murenfracht

Mit den durchgeführten Vereinfachungen lässt sich der Prozessfaktor für unterschiedliche Murenfrachten, Einzugsgebietsflächen und Gebietsfaktoren berechnen. Diese Formel weicht nur geringfügig von der oben entwickelten ab und beruht auf den verschiedenen Anpassungsfunktionen.

$$PF = \frac{1.7479 \cdot V_{MG}^{0.4467}}{GF \cdot A_E^{0.6}}$$

Die Prozessfaktoren sind indirekt proportional zu den Gebietsfaktoren und den Flächen der Einzugsgebiete, sie nehmen jedoch mit Vergrößerung der Murenfracht bis auf das Zehnfache zu.



## 9.6 Beispiel

Gegeben Beispiel 1: Ermittlung der Murenganglinien bei gegebener Feststofffracht

Feststofffracht	10000 m <sup>3</sup>		
vol. Feststoffkonzentration	0.7		
Kennwerte Potenzfunktion			
Koeffizient (a)	1.9803		
Exponent (b)	-0.5645395	Exponent (b+1)	0.4355

Ergebnisse:

Wasserfracht	4286 m <sup>3</sup>	
Murenfracht	14286 m <sup>3</sup>	
Abflussspitze	127,7 m <sup>3</sup> /s	
$a \cdot V_{MG}^b$	0.0089343	

Szenarien mit verschiedenen time to peak z.B. 2 bis 80 s

ID	$t_p$ [s]	$PRF_{MG} = t_p \cdot a \cdot V_{MG}^b$	$SF_{MG} = \frac{CF}{PRF_{MG}}$	$X = 3 \cdot SF_{MG} - 1.5$	$t_r = X \cdot t_p$	$t_b = t_p + t_r$
1	2	0.0179	55.9643	166.4	332.8	334.8
2	5	0.0447	22.3857	65.7	328.3	333.3
3	10	0.0893	11.1929	32.1	320.8	330.8
4	20	0.1787	5.5964	15.3	305.8	325.8
5	50	0.4467	2.2386	5.2	260.8	310.8
6	80	0.7147	1.3991	2.7	215.8	295.8

Szenario ID 1

ID	Dimensionless Hydrograph						Hydrograph		Volumen	
	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
	SF <sub>MG</sub> 56,075						[s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
1	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.250	0.2	1	0.025	0.0004	0.0004	0.5	25.5	6.4	6.4
1	0.500	0.5	2	0.088	0.0016	0.0020	1.0	63.8	22.3	28.7
1	0.750	0.8	3	0.163	0.0029	0.0049	1.5	102.1	41.5	70.2
1	1.000	1.0	4	0.225	0.0040	0.0089	2.0	127.7	57.4	127.7
1	14.866	0.8	5	12.479	0.2225	0.2315	29.7	102.1	3186.1	3313.8
1	31.505	0.6	6	11.648	0.2077	0.4392	63.0	76.6	2973.7	6287.4
1	56.464	0.4	7	12.479	0.2225	0.6617	112.9	51.1	3186.1	9473.5
1	100.836	0.2	8	13.311	0.2374	0.8991	201.7	25.5	3398.5	12872.1
1	134.114	0.07	9	4.493	0.0801	0.9792	268.2	8.9	1147.0	14019.0
1	167.393	0	10	1.165	0.0208	1.0000	334.8	0.0	297.4	14316.4
Summe				56.075	1.000				14316.4	



## Szenario ID 2

Dimensionless Hydrograph							Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
SF <sub>MG</sub> 22.429							[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
2	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.250	0.2	1	0.025	0.0011	0.0011	1.3	25.5	16.0	16.0
2	0.500	0.5	2	0.088	0.0039	0.0050	2.5	63.8	55.8	71.8
2	0.750	0.8	3	0.163	0.0072	0.0123	3.8	102.1	103.7	175.5
2	1.000	1	4	0.225	0.0100	0.0223	5.0	127.7	143.6	319.1
2	6.471	0.8	5	4.924	0.2195	0.2418	32.4	102.1	3143.0	3462.2
2	13.037	0.6	6	4.596	0.2049	0.4467	65.2	76.6	2933.5	6395.6
2	22.886	0.4	7	4.924	0.2195	0.6663	114.4	51.1	3143.0	9538.7
2	40.394	0.2	8	5.253	0.2342	0.9005	202.0	25.5	3352.6	12891.2
2	53.526	0.07	9	1.773	0.0790	0.9795	267.6	8.9	1131.5	14022.7
2	66.657	0	10	0.460	0.0205	1.0000	333.3	0.0	293.3	14316.0
Summe				22.429	1.000				14316.4	

## Szenario ID 3

Dimensionless Hydrograph							Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
SF <sub>MG</sub> 11.124							[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
3	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.250	0.2	1	0.025	0.0022	0.0022	2.5	25.5	31.9	31.9
3	0.500	0.5	2	0.088	0.0078	0.0100	5.0	63.8	111.7	143.6
3	0.750	0.8	3	0.163	0.0145	0.0245	7.5	102.1	207.4	351.0
3	1.000	1	4	0.225	0.0201	0.0446	10.0	127.7	287.2	638.3
3	3.673	0.8	5	2.406	0.2145	0.2591	36.7	102.1	3071.2	3709.5
3	6.881	0.6	6	2.246	0.2002	0.4594	68.8	76.6	2866.5	6575.9
3	11.693	0.4	7	2.406	0.2145	0.6739	116.9	51.1	3071.2	9647.2
3	20.247	0.2	8	2.566	0.2288	0.9027	202.5	25.5	3276.0	12923.1
3	26.663	0.07	9	0.866	0.0772	0.9800	266.6	8.9	1105.6	14028.8
3	33.079	0	10	0.225	0.0200	1.0000	330.8	0.0	286.6	14315.4
Summe				11.124	1.000				14315.4	



## Szenario ID 4

		Dimensionless Hydrograph					Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
				$SF_{MG}$	5.607		[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
4	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.250	0.2	1	0.025	0.0045	0.0045	5.0	25.5	63.8	63.8
4	0.500	0.5	2	0.088	0.0156	0.0201	10.0	63.8	223.4	287.2
4	0.750	0.8	3	0.163	0.0290	0.0490	15.0	102.1	414.9	702.1
4	1.000	1	4	0.225	0.0401	0.0892	20.0	127.7	574.4	1276.5
4	2.274	0.8	5	1.147	0.2045	0.2937	45.5	102.1	2927.6	4204.1
4	3.803	0.6	6	1.070	0.1909	0.4846	76.1	76.6	2732.4	6936.6
4	6.096	0.4	7	1.147	0.2045	0.6891	121.9	51.1	2927.6	9864.2
4	10.174	0.2	8	1.223	0.2182	0.9073	203.5	25.5	3122.8	12986.9
4	13.231	0.07	9	0.413	0.0736	0.9809	264.6	8.9	1053.9	14040.9
4	16.289	0	10	0.107	0.0191	1.0000	325.8	0.0	273.2	14314.1
Summe				5.607	1.000				14314.1	

## Szenario ID 5

		Dimensionless Hydrograph					Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
				$SF_{MG}$	2.242		[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
5	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.250	0.2	1	0.025	0.0112	0.0112	12.5	25.5	159.6	159.6
5	0.500	0.5	2	0.088	0.0390	0.0502	25.0	63.8	558.5	718.1
5	0.750	0.8	3	0.163	0.0725	0.1227	37.5	102.1	1037.2	1755.2
5	1.000	1	4	0.225	0.1004	0.2230	50.0	127.7	1436.1	3191.3
5	1.435	0.8	5	0.391	0.1745	0.3975	71.7	102.1	2496.8	5688.1
5	1.956	0.6	6	0.365	0.1628	0.5603	97.8	76.6	2330.3	8018.4
5	2.739	0.4	7	0.391	0.1745	0.7348	136.9	51.1	2496.8	10515.2
5	4.129	0.2	8	0.417	0.1861	0.9209	206.5	25.5	2663.2	13178.4
5	5.173	0.07	9	0.141	0.0628	0.9837	258.6	8.9	898.8	14077.3
5	6.216	0	10	0.037	0.0163	1.0000	310.8	0.0	233.0	14310.3
Summe				2.242	1.000				14310.3	



Szenario ID 6

Dimensionless Hydrograph							Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
SF <sub>MG</sub>				1.401			[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
6	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.250	0.2	1	0.025	0.0178	0.0178	20.0	25.5	255.3	255.3
6	0.500	0.5	2	0.088	0.0625	0.0803	40.0	63.8	893.6	1148.9
6	0.750	0.8	3	0.163	0.1160	0.1963	60.0	102.1	1659.5	2808.4
6	1.000	1	4	0.225	0.1606	0.3569	80.0	127.7	2297.8	5106.1
6	1.225	0.8	5	0.202	0.1444	0.5013	98.0	102.1	2065.9	7172.1
6	1.495	0.6	6	0.189	0.1348	0.6361	119.6	76.6	1928.2	9100.3
6	1.899	0.4	7	0.202	0.1444	0.7805	151.9	51.1	2065.9	11166.2
6	2.618	0.2	8	0.216	0.1540	0.9345	209.5	25.5	2203.7	13369.9
6	3.158	0.07	9	0.073	0.0520	0.9865	252.6	8.9	743.7	14113.6
6	3.697	0	10	0.019	0.0135	1.0000	295.8	0.0	192.8	14306.5
Summe				1.401	1.000				14306.5	

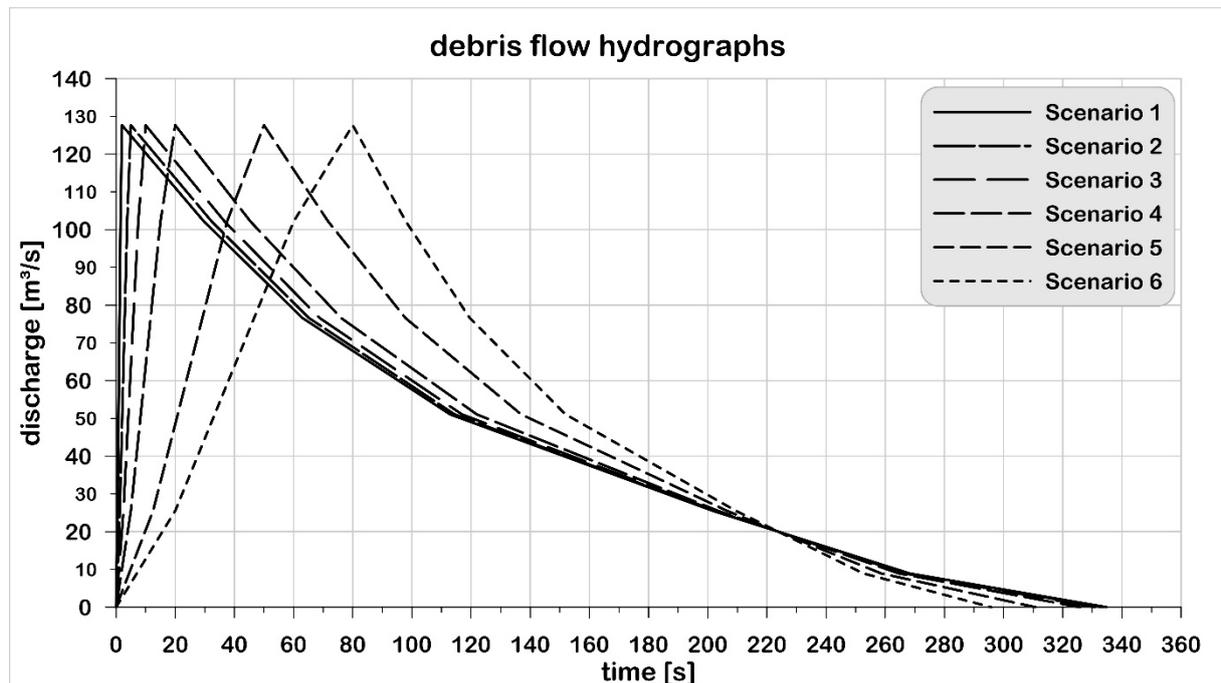


Abbildung 78: Berechnete Murenganglinien für unterschiedliche Szenarien



## Gegeben Beispiel 2: Überprüfung von Messergebnissen

Murenfracht	14286 m <sup>3</sup>		
vol. Feststoffkonzentration	0.7		
Conversion factor	1	in Sekunden	
Zeitwerte aus einer gegebenen Ganglinie (z.B. Beispiel 1)			
ID	t (t <sub>0</sub> )	t (t <sub>p</sub> )	t (t <sub>e</sub> )
1	0	2	335
2	0	5	334
3	0	10	331
4	0	20	326
5	0	50	311
6	0	80	296

Ergebnisse:

Wasserfracht	4286 m <sup>3</sup>	SZ = 3.33
Feststofffracht	10000 m <sup>3</sup>	

## Szenarien mit den gegebenen Zeitwerten

Berechnung Kennwerte für den DUH							Murenkennwerte	
ID	$t_p = t(t_p) - t(t_0)$	$t_r = t(t_r) - t(t_p)$	$t_b = t_p + t_r$	$X = \frac{t_r}{t_p}$	$SF_{MG} = \frac{X + 1.5}{3}$	$PRF_{MG} = \frac{CF}{SF_{MG}}$	$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_{MG}}{t_p}$	$Q_{MG(UV)} = \frac{4.2857}{t_p \cdot (X + 1.5)}$
	[s]	[s]	[s]				[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
1	2	333	335	166.5	56.0000	0.0179	127.6	0.012755
2	5	329	334	65.8	22.4333	0.0446	127.4	0.012736
3	10	321	331	32.1	11.2000	0.0893	127.6	0.012755
4	20	306	326	15.3	5.6000	0.1786	127.6	0.012755
5	50	261	311	5.2	2.2400	0.4464	127.6	0.012755
6	80	216	296	2.7	1.4000	0.7143	127.6	0.012755

## Szenario ID 1 bis 6 (wie in Beispiel 1)

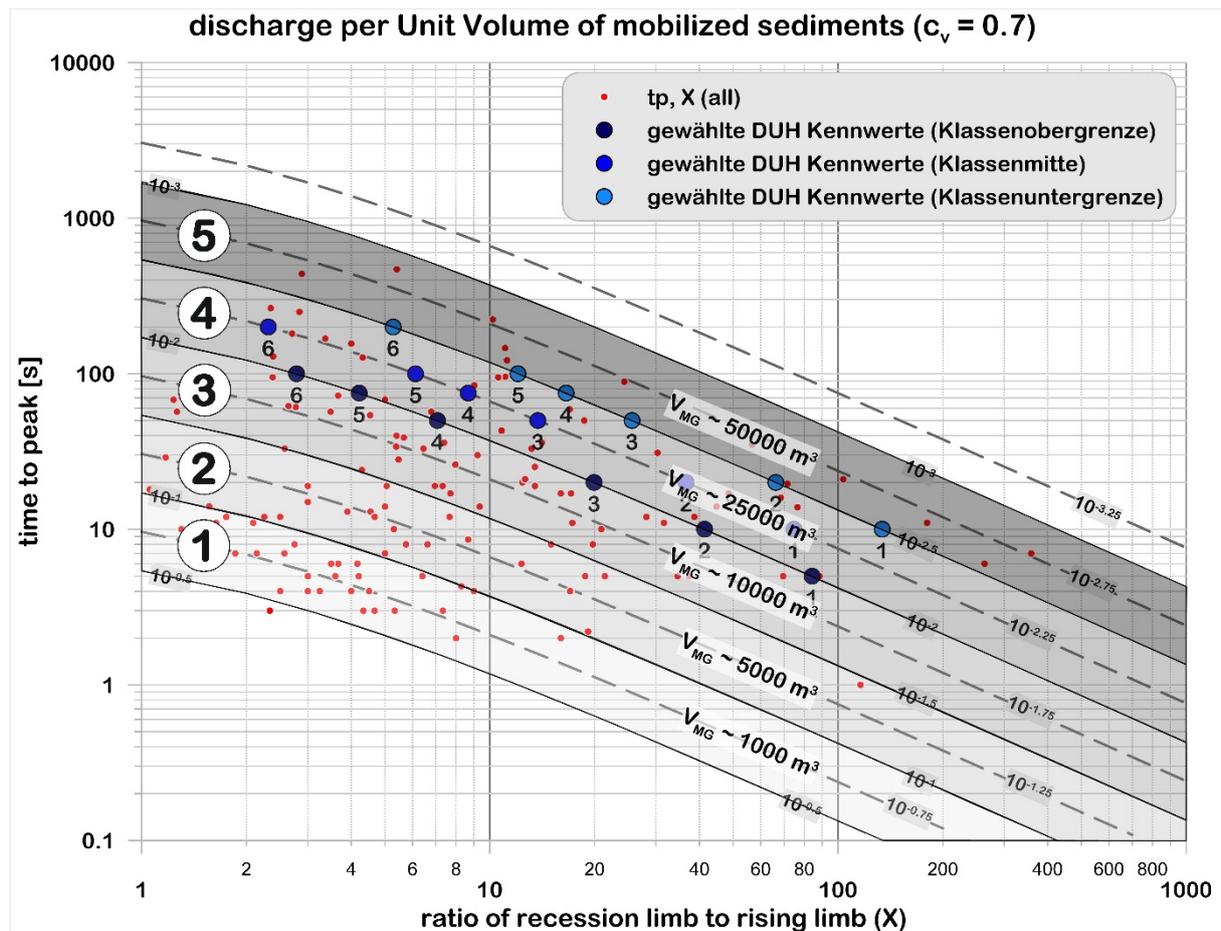
ID	Dimensionless Hydrograph						Hydrograph		Volumen	
	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
					$SF_{MG}$		[s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
					56,075					
1	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.250	0.2	1	0.025	0.0004	0.0004	0.5	25.5	6.4	6.4
1	0.500	0.5	2	0.088	0.0016	0.0020	1.0	63.8	22.3	28.7
1	0.750	0.8	3	0.163	0.0029	0.0049	1.5	102.1	41.5	70.2
1	1.000	1.0	4	0.225	0.0040	0.0089	2.0	127.7	57.4	127.7



Gegeben Beispiel 3: Berechnung von Murenganglinien bei gegebener Murenfracht und gewählter Anstiegszeit

Murenfracht	15000 m <sup>3</sup>	
vol. Feststoffkonzentration	0.7	
Conversion factor	1	in Sekunden

Die gegebene Murenfracht liegt in Klasse 4. Zur Absicherung werden neben der Klassenmitte auch die Klassengrenzen mitberücksichtigt.



Klassen	V <sub>MG.sel</sub> [m <sup>3</sup> ]	Q <sub>MG.UV</sub> Klassenobergrenze	Q <sub>MG.UV</sub> Klassenmitte	Q <sub>MG.UV</sub> Klassenuntergrenze
1	1 - 1000	0.316	0.17783	0.1
2	1001 - 5000	0.1	0.05623	0.0316
3	5001 - 10000	0.0316	0.01778	0.01
4	10001 - 25000	0.01	0.00562	0.00316
5	25001 - 50000	0.00316	0.00178	0.001



Dadurch ergeben sich folgende Eingangswerte für die Formkennwerte:

Klasse 4: Klassenobergrenze			Klasse 4: Klassenmitte			Klasse 4: Klassenuntergrenze		
ID	$t_p$ [s]	$X = \frac{4.2857}{t_p \cdot Q_{MG(UV)}} - 1.5$	ID	$t_p$ [s]	$X = \frac{4.2857}{t_p \cdot Q_{MG(UV)}} - 1.5$	ID	$t_p$ [s]	$X = \frac{4.2857}{t_p \cdot Q_{MG(UV)}} - 1.5$
1	5	84.2	1	10	74.7	1	10	134.0
2	10	41.4	2	20	36.6	2	20	66.3
3	20	19.9	3	50	13.7	3	50	25.6
4	50	7.1	4	75	8.7	4	75	16.6
5	75	4.2	5	100	6.1	5	100	12.1
6	100	2.8	6	200	2.3	6	200	5.3

Ergebnisse:

Wasserfracht	4500 m <sup>3</sup>	SZ=3.33
Feststofffracht	10500 m <sup>3</sup>	

Szenarien mit den gegebenen Kennwerten für die Klassenobergrenze

Berechnung Kennwerte für den DUH							Murenkennwerte	
ID	$t_p$	$t_r$	$t_b$	$X = \frac{4.2857}{t_p \cdot Q_{MG(UV)}} - 1.5$	$SF_{MG} = \frac{X + 1.5}{3}$	$PRF_{MG} = \frac{CF}{SF_{MG}}$	$Q_{MG} = PRF_{MG} \cdot \frac{V_{MG}}{t_p}$	$Q_{MG(UV)} = \frac{4.2857}{t_p \cdot (X + 1.5)}$
	[s]	[s]	[s]				[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
1	5	421	426	84.2	28.5713	0.0350	105.0	0.010000
2	10	414	424	41.4	14.2857	0.0700	105.0	0.010000
3	20	399	419	19.9	7.1428	0.1400	105.0	0.010000
4	50	354	404	7.1	2.8571	0.3500	105.0	0.010000
5	75	316	391	4.2	1.9048	0.5250	105.0	0.010000
6	100	279	379	2.8	1.4286	0.7000	105.0	0.010000



## Klassenobergrenze Szenario ID 1

Dimensionless Hydrograph							Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
SF <sub>MG</sub> 28.5713							[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
1	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.250	0.2	1	0.025	0.0009	0.0009	1.3	21.0	13.1	13.1
1	0.500	0.5	2	0.088	0.0031	0.0039	2.5	52.5	45.9	59.1
1	0.750	0.8	3	0.163	0.0057	0.0096	3.8	84.0	85.3	144.4
1	1.000	1	4	0.225	0.0079	0.0175	5.0	105.0	118.1	262.5
1	8.018	0.8	5	6.316	0.2206	0.2381	40.1	84.0	3315.9	3578.4
1	16.439	0.6	6	5.895	0.2059	0.4440	82.2	63.0	3094.9	6673.3
1	29.071	0.4	7	6.316	0.2206	0.6646	145.4	42.0	3315.9	9989.3
1	51.528	0.2	8	6.737	0.2353	0.9000	257.6	21.0	3537.0	13526.3
1	68.371	0.07	9	2.274	0.0794	0.9794	341.9	7.4	1193.7	14720.0
1	85.214	0	10	0.589	0.0206	1.0000	426.1	0.0	309.5	15029.5
Summe				28.672	1.000				15029.5	

## Szenario ID 2

Dimensionless Hydrograph							Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
SF <sub>MG</sub> 14.2857							[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
2	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.250	0.2	1	0.025	0.0017	0.0017	2.5	21.0	26.3	26.3
2	0.500	0.5	2	0.088	0.0061	0.0079	5.0	52.5	91.9	118.1
2	0.750	0.8	3	0.163	0.0114	0.0192	7.5	84.0	170.6	288.8
2	1.000	1	4	0.225	0.0157	0.0349	10.0	105.0	236.3	525.0
2	4.446	0.8	5	3.102	0.2167	0.2516	44.5	84.0	3256.9	3781.9
2	8.582	0.6	6	2.895	0.2023	0.4539	85.8	63.0	3039.7	6821.6
2	14.786	0.4	7	3.102	0.2167	0.6706	147.9	42.0	3256.9	10078.5
2	25.814	0.2	8	3.309	0.2312	0.9018	258.1	21.0	3474.0	13552.5
2	34.086	0.07	9	1.117	0.0780	0.9798	340.9	7.4	1172.5	14725.0
2	42.357	0	10	0.289	0.0202	1.0000	423.6	0.0	304.0	15028.9
Summe				14.313	1.000				15028.9	



## Szenario ID 3

		Dimensionless Hydrograph					Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
				$SF_{MG}$	7.1428		[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
3	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.250	0.2	1	0.025	0.0035	0.0035	5.0	21.0	52.5	52.5
3	0.500	0.5	2	0.088	0.0122	0.0157	10.0	52.5	183.8	236.3
3	0.750	0.8	3	0.163	0.0227	0.0384	15.0	84.0	341.3	577.5
3	1.000	1	4	0.225	0.0314	0.0699	20.0	105.0	472.5	1050.0
3	2.661	0.8	5	1.495	0.2089	0.2787	53.2	84.0	3138.7	4188.8
3	4.654	0.6	6	1.395	0.1949	0.4737	93.1	63.0	2929.5	7118.3
3	7.643	0.4	7	1.495	0.2089	0.6825	152.9	42.0	3138.7	10257.0
3	12.957	0.2	8	1.594	0.2228	0.9053	259.1	21.0	3348.0	13605.0
3	16.943	0.07	9	0.538	0.0752	0.9805	338.9	7.4	1129.9	14735.0
3	20.929	0	10	0.139	0.0195	1.0000	418.6	0.0	292.9	15027.9
Summe				7.156	1.000				15027.9	

## Szenario ID 4

		Dimensionless Hydrograph					Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
				$SF_{MG}$	2.8571		[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
4	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.250	0.2	1	0.025	0.0087	0.0087	12.5	21.0	131.3	131.3
4	0.500	0.5	2	0.088	0.0306	0.0393	25.0	52.5	459.4	590.6
4	0.750	0.8	3	0.163	0.0568	0.0961	37.5	84.0	853.1	1443.8
4	1.000	1	4	0.225	0.0786	0.1747	50.0	105.0	1181.3	2625.0
4	1.589	0.8	5	0.530	0.1853	0.3600	79.5	84.0	2784.4	5409.4
4	2.296	0.6	6	0.495	0.1730	0.5330	114.8	63.0	2598.7	8008.1
4	3.357	0.4	7	0.530	0.1853	0.7183	167.9	42.0	2784.4	10792.5
4	5.243	0.2	8	0.566	0.1977	0.9160	262.1	21.0	2970.0	13762.5
4	6.657	0.07	9	0.191	0.0667	0.9827	332.9	7.4	1002.4	14764.9
4	8.071	0	10	0.049	0.0173	1.0000	403.6	0.0	259.9	15024.7
Summe				2.862	1.000				15024.7	



## Szenario ID 5

		Dimensionless Hydrograph					Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
				$SF_{MG}$	1.9048		[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
5	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.250	0.2	1	0.025	0.0131	0.0131	18.8	21.0	196.9	196.9
5	0.500	0.5	2	0.088	0.0459	0.0590	37.5	52.5	689.1	885.9
5	0.750	0.8	3	0.163	0.0852	0.1442	56.3	84.0	1279.7	2165.6
5	1.000	1	4	0.225	0.1180	0.2621	75.0	105.0	1771.9	3937.5
5	1.351	0.8	5	0.316	0.1657	0.4278	101.3	84.0	2489.1	6426.6
5	1.773	0.6	6	0.295	0.1546	0.5825	132.9	63.0	2323.1	8749.7
5	2.405	0.4	7	0.316	0.1657	0.7481	180.4	42.0	2489.1	11238.8
5	3.529	0.2	8	0.337	0.1767	0.9249	264.6	21.0	2655.0	13893.8
5	4.371	0.07	9	0.114	0.0596	0.9845	327.9	7.4	896.1	14789.8
5	5.214	0	10	0.029	0.0155	1.0000	391.1	0.0	232.3	15022.1
Summe				1.908	1.000				15022.1	

## Szenario ID 6

		Dimensionless Hydrograph					Hydrograph		Volumen	
ID	$\tau_i$	$\theta_i$	i	$u_i$	$\frac{u_i}{SF_{MG}}$	$\sum_0^i \frac{u_i}{SF_{MG}}$	$t_i = t_p \cdot \tau_i$	$Q_i = Q_p \cdot \theta_i$	$V_i$	$\sum_0^i V_i$
				$SF_{MG}$	1.4286		[s]	[m³/s]	[m³]	[m³]
6	0.000	0	0	0.000	0.0000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.250	0.2	1	0.025	0.0175	0.0175	25.0	21.0	262.5	262.5
6	0.500	0.5	2	0.088	0.0612	0.0786	50.0	52.5	918.8	1181.3
6	0.750	0.8	3	0.163	0.1136	0.1923	75.0	84.0	1706.3	2887.5
6	1.000	1	4	0.225	0.1573	0.3495	100.0	105.0	2362.5	5250.0
6	1.232	0.8	5	0.209	0.1461	0.4956	123.2	84.0	2193.7	7443.8
6	1.511	0.6	6	0.195	0.1363	0.6319	151.1	63.0	2047.5	9491.3
6	1.929	0.4	7	0.209	0.1461	0.7780	192.9	42.0	2193.7	11685.0
6	2.671	0.2	8	0.223	0.1558	0.9338	267.1	21.0	2340.0	14025.0
6	3.229	0.07	9	0.075	0.0526	0.9864	322.9	7.4	789.7	14814.8
6	3.786	0	10	0.019	0.0136	1.0000	378.6	0.0	204.7	15019.5
Summe				1.430	1.000				15019.5	

Die Tabellen für Klassenmitte und Klassenuntergrenze sind nicht mehr angeführt, die Ergebnisse jedoch in Abbildung 79 dargestellt.

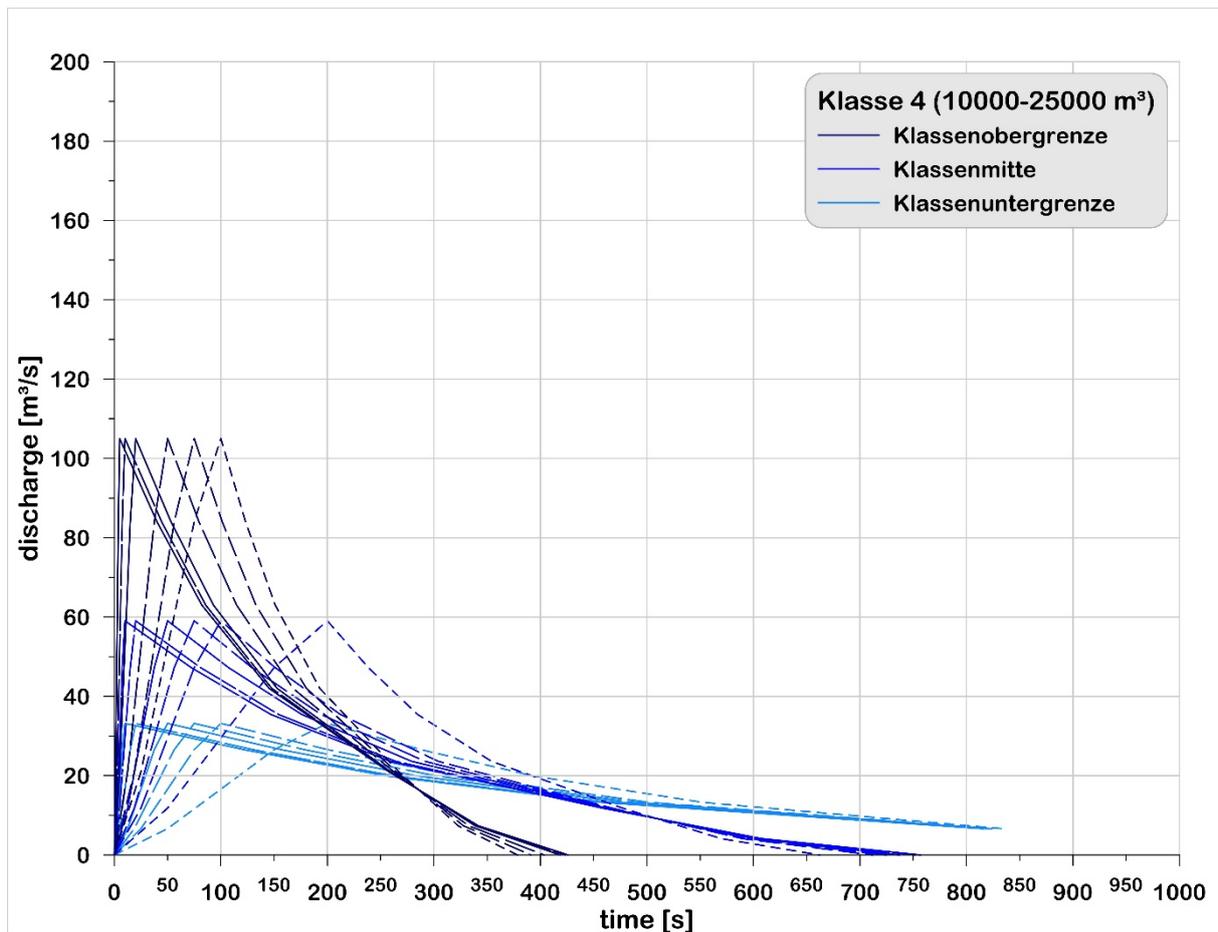


Abbildung 79: Murenganglinien für ein Murenvolumen von 15.000 m<sup>3</sup> in der Klasse 4



## 10 Diskussion der Ergebnisse

Tabelle 19: Vergleich der Geschiebe- bzw. Sedimentzuschlagsfaktoren für den Reinwasserabfluss bei unterschiedlicher Feststoffkonzentration

Intensitätsfaktor für fluviale Ereignisse		Geschiebezuschlag gem. DIN 19663	
Hochwasser (HW)	1.0-1.05	Geschiebetransport kann ausgeschlossen werden	1.0
Fluviale Feststoffverlagerung (FFT)	1.05-1.11	Geschiebetransport gering	1.05-1.1
Murartige Feststoffverlagerung (MFT)	1.11-1.67	Mittlerer bis großer Geschiebetransport	1.1-1.4
Murgang (MG)	> 1.67	Sehr großer Geschiebetransport, Muren sind nicht auszuschließen	> 1.4



## 11 Literatur

- Arattano, M., Franzi, L., 2003, On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. *Nat. Hazards and Earth System Sciences*, 3, 539-544
- Arattano, M., Franzi, L., 2004, Analysis of different water-sediment flow processes in a mountain torrent. *Nat. Haz. and Earth Syst. Sciences*, 4, 783–791
- Aulitzky, H., 1980, Preliminary two-fold classification of debris torrents, *Interpraevent*, Bd. 4, 285-309
- Aulitzky, H., 1984, Die neue, vorläufige zweigeteilte Wildbachklassifikation, *Wildbach- und Lawinenverbau*, 48. Jg., Sonderheft, 8-60
- Berger, C., McArdell, B. W., Schlunegger, F., 2011, Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland, *Journal of geophysical research*, Vol. 116, F01002, doi:10.1029/2010JF001722
- Bovis, M.J., Dagg, B.R., 1992, Debris flow triggering by impulsive loading: mechanical modelling and case studies, *Can. Geotechn. Journal*, 29, 345-352
- Chen, J. C., Chuang, M. R., 2014, Discharge of landslide-induced debris flows: case studies of Typhoon Morakot in southern Taiwan, *Natural Hazards and Earth System sciences*, 14, pp 1719-1730
- Comiti, F., Marchi, L., Macconi, P., Arattano, M., Bertoldi, G., Borga, M., Brardinoni, F., Cavalli, M., D'Agostino, V., Penna, D., Theule, J., 2014, A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadria basin: *Natural Hazards*, V. 73, p. 1175–1198, DOI 10.1007/s11069-014-1088-5
- Costa J.E., 1984, Physical geomorphology of debris flows, *Developments and applications in Geomorphology*, Costa, J.E, Fleisher, P.J. (eds.), Springer Verlag, 268-317
- Costa, J. E., 1988, Floods from dam failures, in: Baker, V. R. et al. (eds), *Flood Geomorphology*, John Wiley & Sons, New York, pp. 439–463
- Coviello, V., Theule, J., Crema, St., Arattano, M., Comiti, F., Cavalli, M., Lucia, A., Macconi, P., Marchi, L., 2021, Combining Instrumental Monitoring and High-Resolution Topography for Estimating Sediment Yield in a Debris-Flow Catchment, *Environmental and Engineering Geoscience* 27 (1), 95–111, <https://doi.org/10.2113/EEG-D-20-00025>
- Fang, X., Khanal, P., Theodore, C., David, T. and Pratistha, P., 2005, Revisit of NRCS unit hydrograph procedures, *Proceedings of the ASCE Texas Section Spring Meeting*, Austin, Texas
- Genevois, R., Tecca, P. R., Berti, M., Simoni, A., 2000, Debris flows in Dolomites: experimental data from a monitoring system, in: Wieczorek G.F. & Naeser, N.D. (Eds.), *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Debris Flow Hazard and Mitigation - Mechanics, Prediction, and Assessment*, Taipei, Taiwan, Aug. 16-18, 2000, 283-291, Balkema, Rotterdam, The Netherlands
- Jitousono, T., Shimokawa, E., Tsuchiya, S., 1996, Debris flow following the 1994 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia, *J. Jap. Soc. Erosion Control Engineering* 48 (Special Issue), 109–116



- Hübl, J., 2006, Zweites Ergänzungsgutachten Hagenbach, Gemeinde Mautern in der Steiermark, Bezirk Liezen; Gerichtsgutachten im Auftrag des Handelsgericht Wien, Aktenzeichen 16 Cg 208/03t, pp 44 (unveröffentlicht)
- Hübl, J., 2007, Ereignisdokumentation in Wildbächen - Systematik und mögliche Ergebnisse. in: Gutknecht, D. (Hrsg.), Wiener Mitteilungen: Extreme Abflussereignisse. Dokumentation - Bedeutung - Bestimmungsmethoden. ÖWAV-Seminar, Bundesamtsgebäude Wien, 24.-25. Mai 2007 206, 69 - 84; Inst. f. Wasserbau u. Ingenieurhydrologie, TU Wien, Wien; ISBN 978-3-85234-098-2
- Hübl, J., 2009, Hochwässer in Wildbacheinzugsgebieten, Wiener Mitteilungen, Band 216, pp. 45-58
- Hübl, J., 2018, Conceptual Framework for Sediment Management in Torrents, Water, 10, 1718. <https://doi.org/10.3390/w10121718>
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N., 2001, A review of the classification of landslides of the flow type, Environmental & Engineering Geoscience, Vol. VII, 3, 221-238
- Ikeda, A., Mizuyama, T., Itoh, T., 2019, Study of prediction methods of debris-flow peak discharge, Proc. Of the 7<sup>th</sup> International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation, Golden, Colorado**
- Kean, J. W., Staley, D. M., Cannon S. H., 2011, In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions, Journal of Geophysical Research, Vol. 116, F04019, doi:10.1029/2011JF002005
- Kreps, H., 1957, Ein Versuch zur schematischen Berechnung von Hochwasser-Abflussfrachten, Mitteilungsblätter des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Heft 18
- Marchi, L., Arattano, M., Deganutti, A.M., 2002, Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). Geomorphology 46 (1/2), 1–17
- Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G., 1992, Prediction of debris flow peak discharge, Proc. Int. Symp. Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 4, pp. 99–108
- Mockus, V., 1949, Estimation of Total Surface Runoff for Individual Storms, Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed, USDA
- Ou, G., Kobashi S., Mizuyama, T., 1991, Prediction of Debris Flow Peak Discharge, J. Jap. Soc. Erosion Control Engineering, 1991-1992, Volume 44, Issue 4, pp 24-29
- Pierson, T. C., 1986, Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington, in: Abrahms, A. D., Allen & Unwin (Eds.), Hillslope Processes, Boston, 269–296
- Pierson, T. C., Costa, J.E., 1987, A rheologic classification of subareal sediment-water flows, Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, Volume VII, 1-12
- Pfitscher, M., 2016, Bestimmung von Murgangsintensitätsfaktoren und deren Relevanz auf die Ausbreitung alpiner Murgänge, Masterarbeit, Institut für Alpine Naturgefahren (IAN), BOKU-Universität für Bodenkultur, pp 134
- Rickenmann, D., 1999, Empirical relationships for debris flows, Natural Hazards, 19, 47–77



- Rickenmann, D.; Weber, D., 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: Mechanics, Prediction and Assessment, Rotterdam: Millpress, pp 883-893
- Vees, F., 2020, Analyse der Spiegellagen von Murgängen zur Entwicklung dimensionsloser Ganglinien, Bachelorarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, pp. 57 (unveröffentlicht)
- Wundt, W., 1953, Gewässerkunde, Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg
- Zanuttigh, B., Lamberti, A., 2007, Instability and surge development in debris flows, Review of Geophysics, 45, RG3006, doi:10.1029/2005RG000175
- Zimmermann, M. und Rickenmann, D., 1992, Beurteilung von Murgängen in der Schweiz: Meteorologische Ursachen und charakteristische Parameter zum Ablauf, Internationales Symposium INTERPRAEVENT - BERN, Band 2, pp 153-163.



# Anhang



# 1 Metadaten der verwendeten Eingangsdaten aus veröffentlichten Artikeln und bereitgestellten Messdaten von Wasserstandsganglinien

## Anhang 1: Murenabflusshöhen (stage curves)

ID	catchment	reference	date	remark
10.1.1	Rio Moscardo	Marchi et al. (2002) Fig.6	19910813	downstream
10.2.1	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.4	19910930	downstream (seconds)
10.3.1	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.4	19920901	surge 1 downstream
10.3.2	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.4	19920901	surge 2 downstream
10.3.3	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.4	19920901	surge 3 downstream
10.4.1	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.4	19930711	downstream (seconds)
10.6.1	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.4	19930720	downstream
10.7.1	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.19a	19930914	downstream
10.8.1	Rio Moscardo	Zanuttigh et al. (2007) Fig.4	19940718	downstream
10.9.1	Rio Moscardo	Arattano et al. (2003) Fig.2	19960622	Surge 1 Upstream
10.9.2	Rio Moscardo	Arattano et al. (2003) Fig.2	19960622	Surge 2 Upstream
10.9.3	Rio Moscardo	Arattano et al. (2003) Fig.2	19960622	Surge 3 Upstream
10.9.4	Rio Moscardo	Arattano et al. (2003) Fig.2	19960622	Surge 4 Upstream
10.9.5	Rio Moscardo	Arattano et al. (2003) Fig.3	19960622	2nd station
10.9.6	Rio Moscardo	Arattano et al. (2003) Fig.4	19960622	3rd station
10.10.1	Rio Moscardo	Marchi et al. (2002) Fig.7	19960708	upstream
10.10.2	Rio Moscardo	Marchi et al. (2002) Fig.7	19960708	downstream
10.11.1	Rio Moscardo	Marchi et al. (2002) Fig.7	19970627	downstream
10.12.1	Rio Moscardo	Arattano et al. (2004) Fig.1	20020804	Surge 1 (compound surge)
10.12.2	Rio Moscardo	Arattano et al. (2004) Fig.1	20020804	Surge 2
10.12.3	Rio Moscardo	Arattano et al. (2004) Fig.1	20020804	Surge 3
11.1.1	Acquabona	Zanuttigh et al. (2007) Fig.2a	19980725	1st surge
11.1.2	Acquabona	Genevois et al. (2000) Fig.5	19980725	2nd surge
11.2.1	Acquabona	Genevois et al. (2000) Fig.6	19980727	1st surge
11.3.1	Acquabona	Genevois et al. (2000) Fig.7a	19980817	1st surge
11.3.2	Acquabona	Genevois et al. (2000) Fig.7b	19980817	2nd surge
11.3.3	Acquabona	Genevois et al. (2000) Fig.7b	19980817	3rd surge
11.3.4	Acquabona	Zanuttigh et al. (2007) Fig.2c	19980817	4th surge
12.1.1	Illgraben	Zanuttigh et al. (2007) Fig.3a	20000628	1st surge
12.2.1	Illgraben	Berger et al. (2011) Fig.8	20080701	1st surge
12.3.1	Illgraben	Berger et al. (2011) Fig.12	20080831	1st surge
12.3.2	Illgraben	data provided by McArdell, B. (2010)	20080831	Compound surge
12.3.3	Illgraben	data provided by McArdell, B. (2010)	20080831	Single surge
12.4.1	Illgraben	data provided by McArdell, B. (2010)	20090727	Compound surge
12.5.1	Illgraben	data provided by McArdell, B. (2010)	20090809	Compound surge
14.1.1	Dunsmore	Kean et al. (2011) Fig.7b	20091213	1st surge
14.1.2	Dunsmore	Kean et al. (2011) Fig.7b	20091213	2nd surge
14.2.1	Dunsmore	Kean et al. (2011) Fig.6h	20100206	1st surge
15.1.1	Arroyo Seco	Kean et al. (2011) Fig.6g	20100206	1st surge
16.1.1	Jesusita	Kean et al. (2011) Fig.6i	20100227	1st surge
17.1.1	Mount St.Helens	Pierson et al. (1986) Fig.13.9	19811001	1st surge

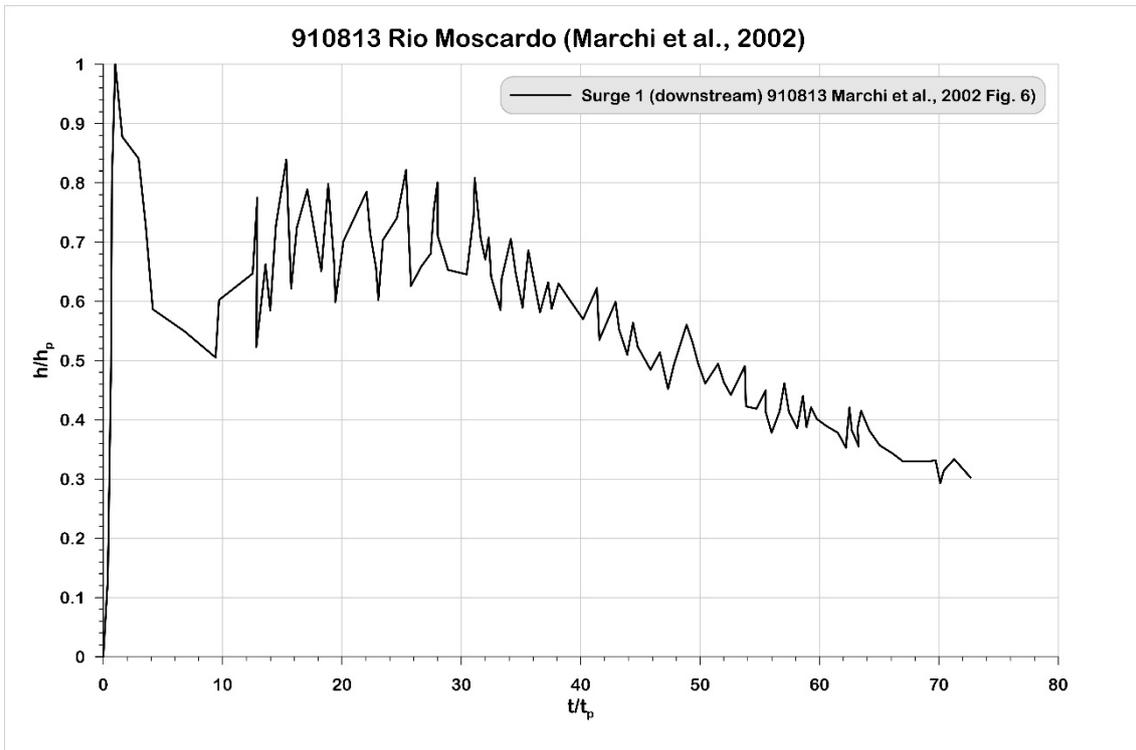


18.1.1	Rio Rebaixer	data provided by Hürlimann, M. (2018)	20120704	1st surge
18.2.1	Rio Rebaixer	data provided by Hürlimann, M. (2018)	20130717	1st surge
18.3.1	Rio Rebaixer	data provided by Hürlimann, M. (2018)	20170710	1st surge
18.4.1	Rio Rebaixer	data provided by Hürlimann, M. (2018)	20170721	1st surge
18.5.1	Rio Rebaixer	data provided by Hürlimann, M. (2018)	20180905	1st surge
4.1.1	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20110805	D3-upstream
4.1.2	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20110805	D3-upstream
4.1.3	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20110805	D3-upstream
4.1.4	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20110805	D3-upstream
4.1.5	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20110805	D3-upstream
4.2.1	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20130718	Main front
4.2.2	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20130718	Surge II
4.2.3	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20130718	Surge III
4.2.4	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20130718	Mainfront+Surge II und III
4.2.5	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20130718	Surge IV
4.2.6	Gadria	Comiti et al. (2014) Fig. 9	20130718	Surge V
4.3.1	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20140715	Main front
4.3.2	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20140715	Surge IV
4.3.3	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20140715	Surge V
4.3.4	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20140715	Surge IV und V
4.3.5	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20140715	Surge VI
4.3.6	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20140715	Surge VII
4.4.1	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20150608	Surge III
4.4.2	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20150608	Surge IV
4.4.3	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20150608	Surge V (cutoff)
4.4.4	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20150608	Surge VI
4.4.5	Gadria	Coviello et al. (2021) Fig. 11	20150608	Surge VII+VIII (cutoff)

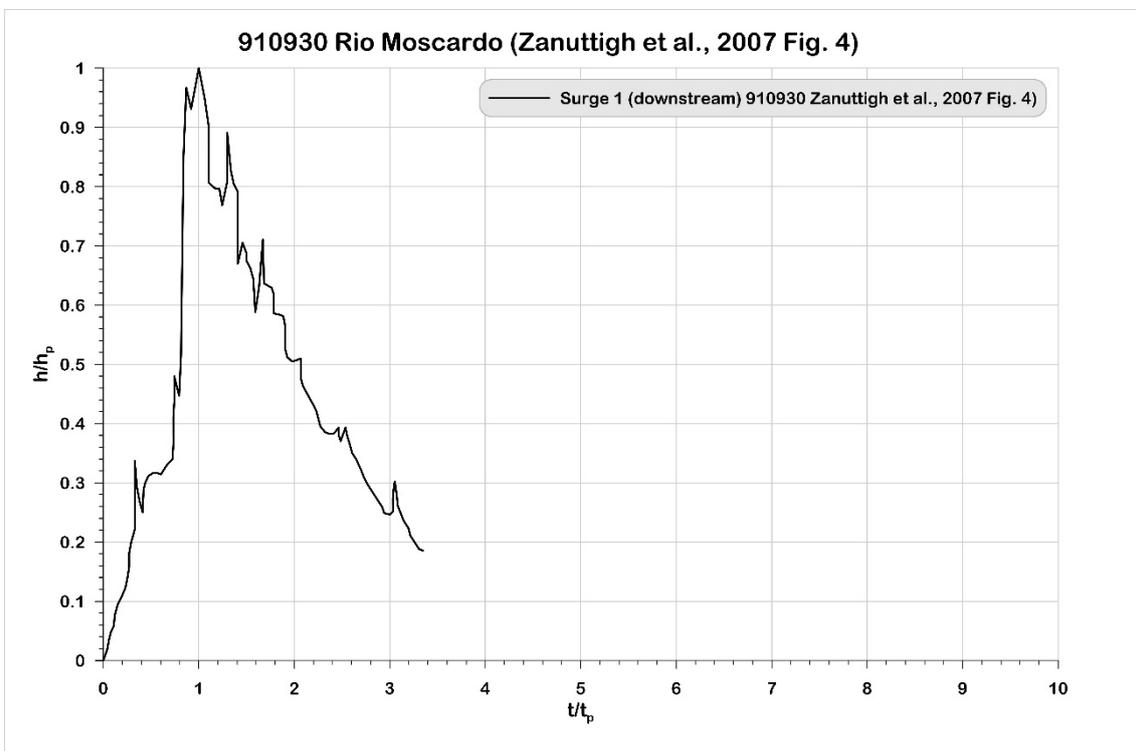


## 2 Dimensionslose Wasserstandsganglinien

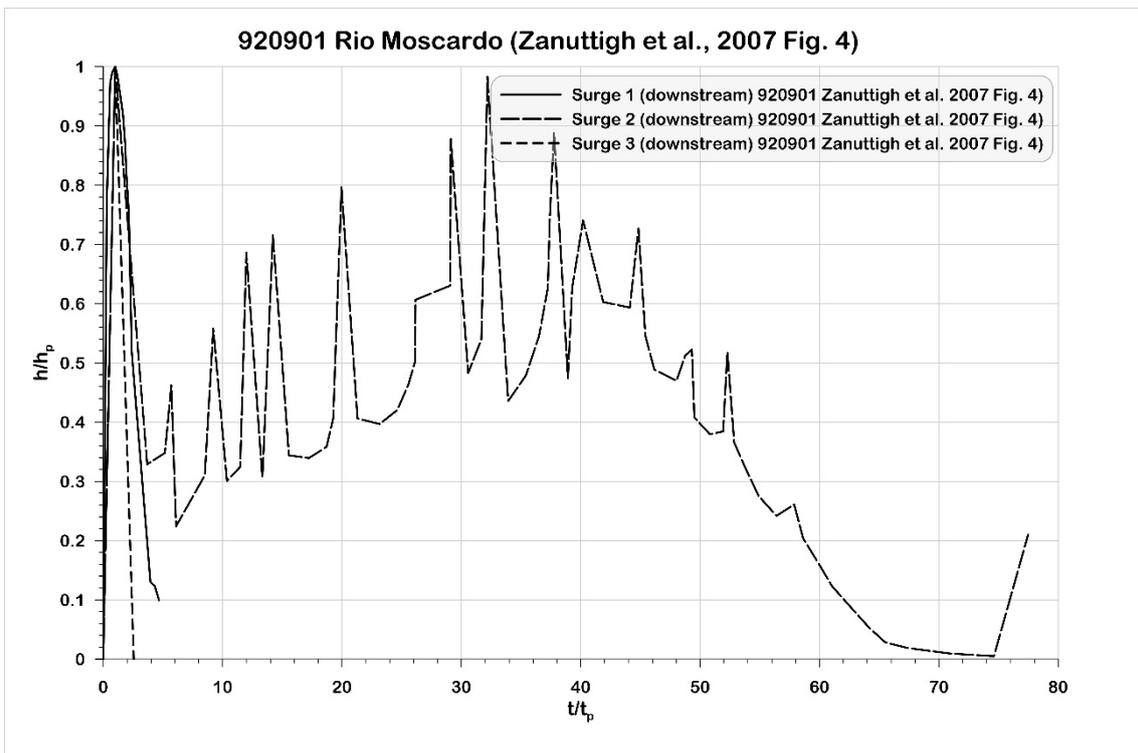
### 2.1 Rio Moscardo



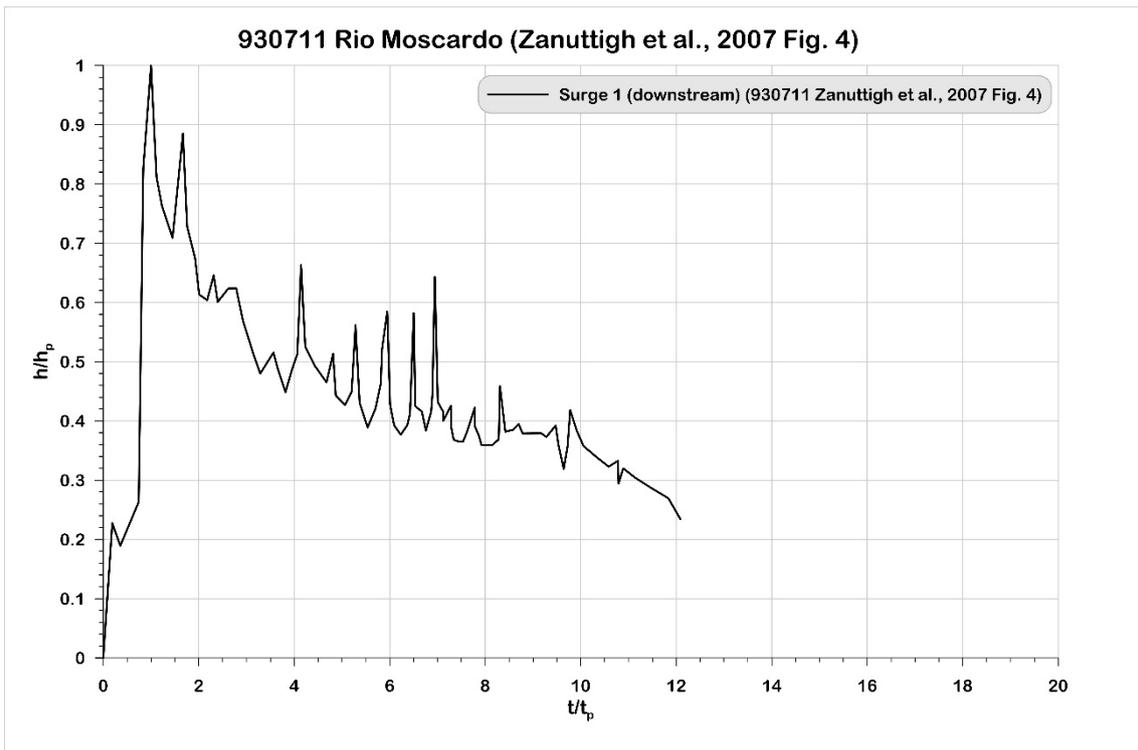
Anhang 2: normalized stage curve #10.1.1



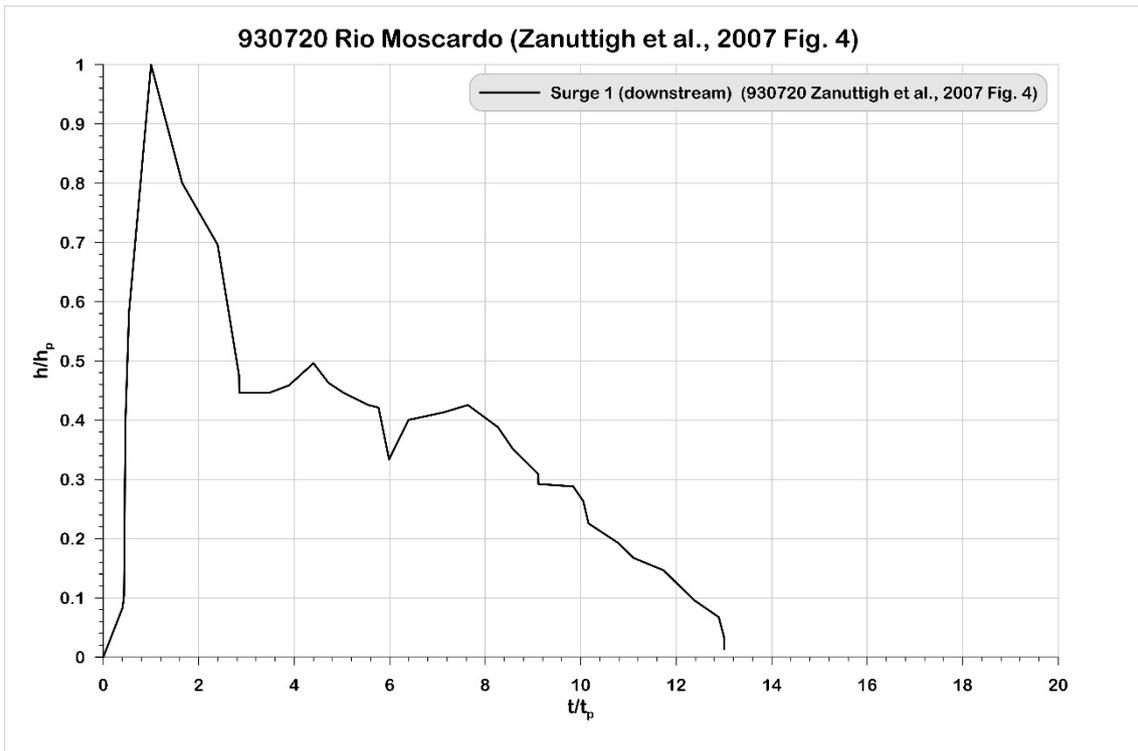
Anhang 3: normalized stage curve #10.2.1



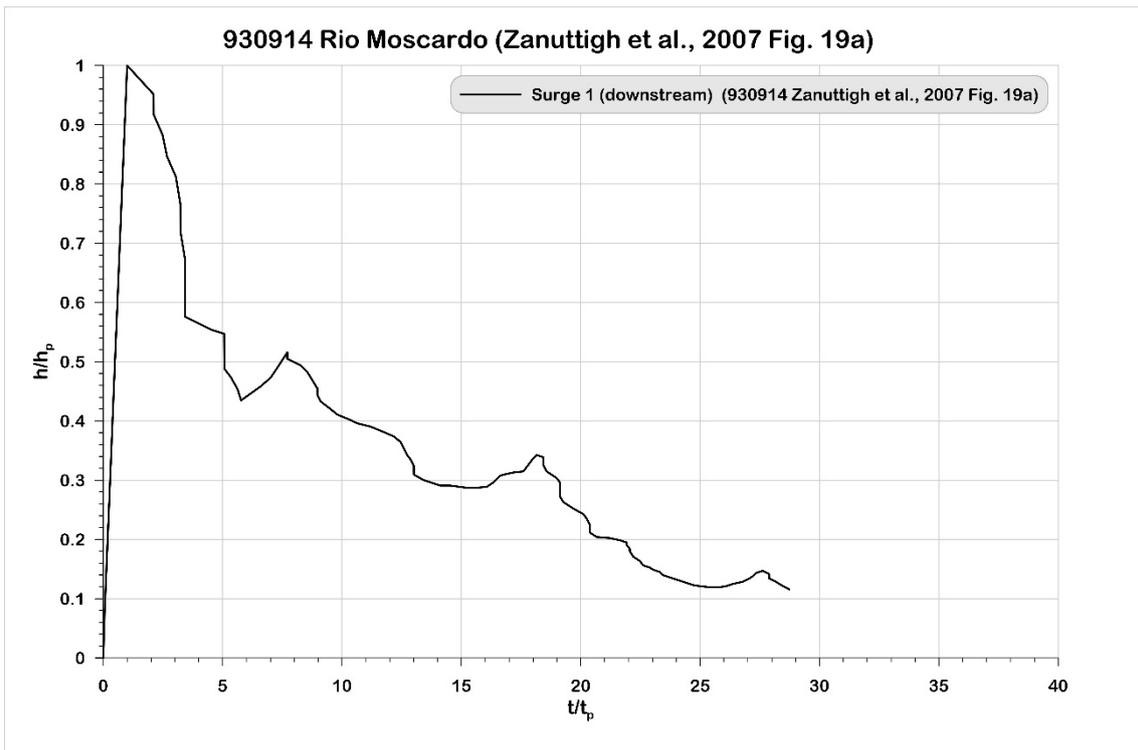
Anhang 4: normalized stage curves #10.3.1-10.3.3



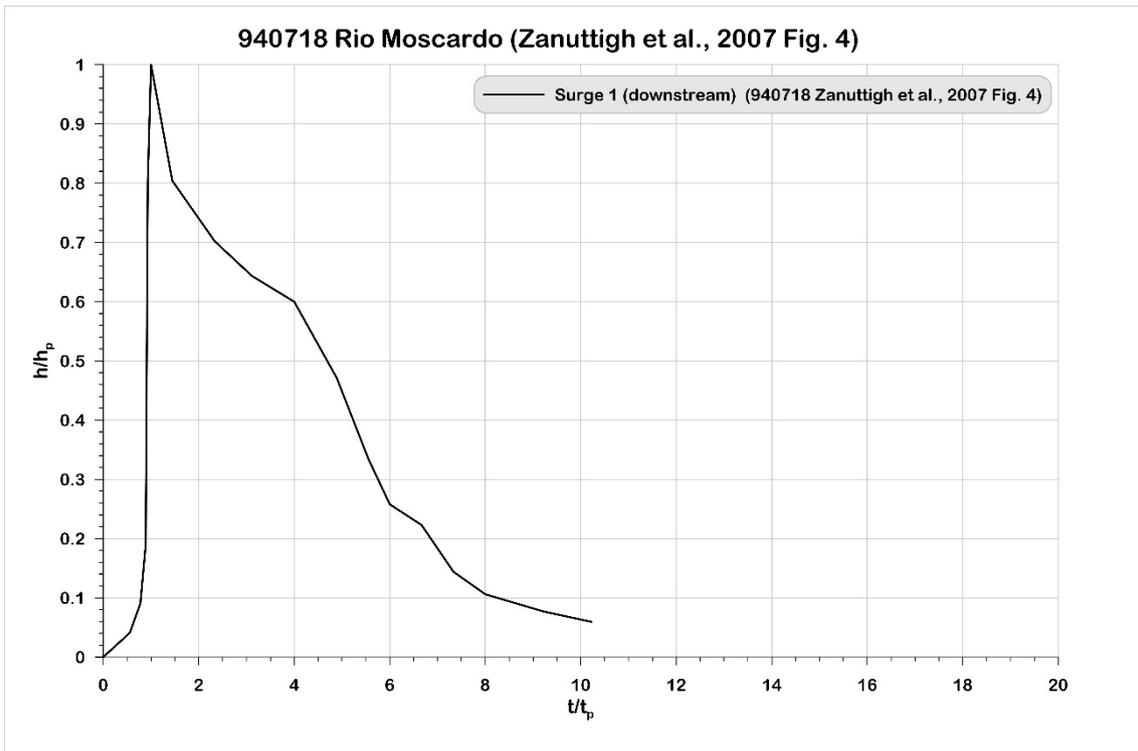
Anhang 5: normalized stage curve #10.4.1



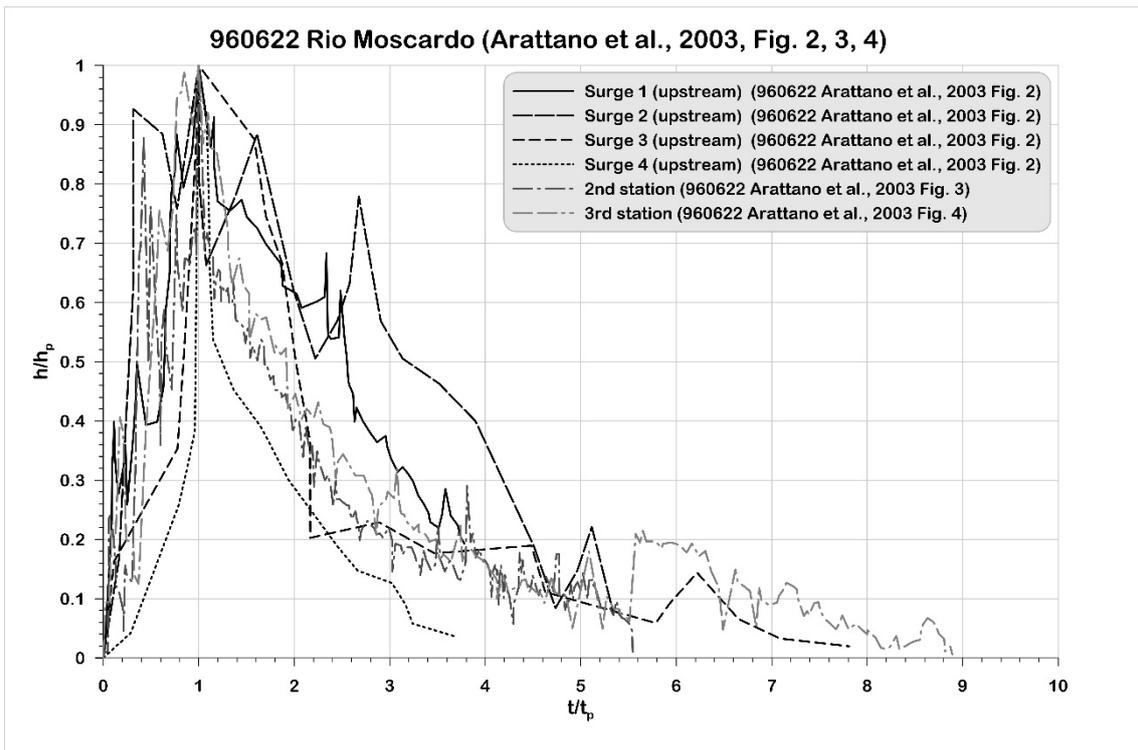
Anhang 6: normalized stage curve #10.6.1



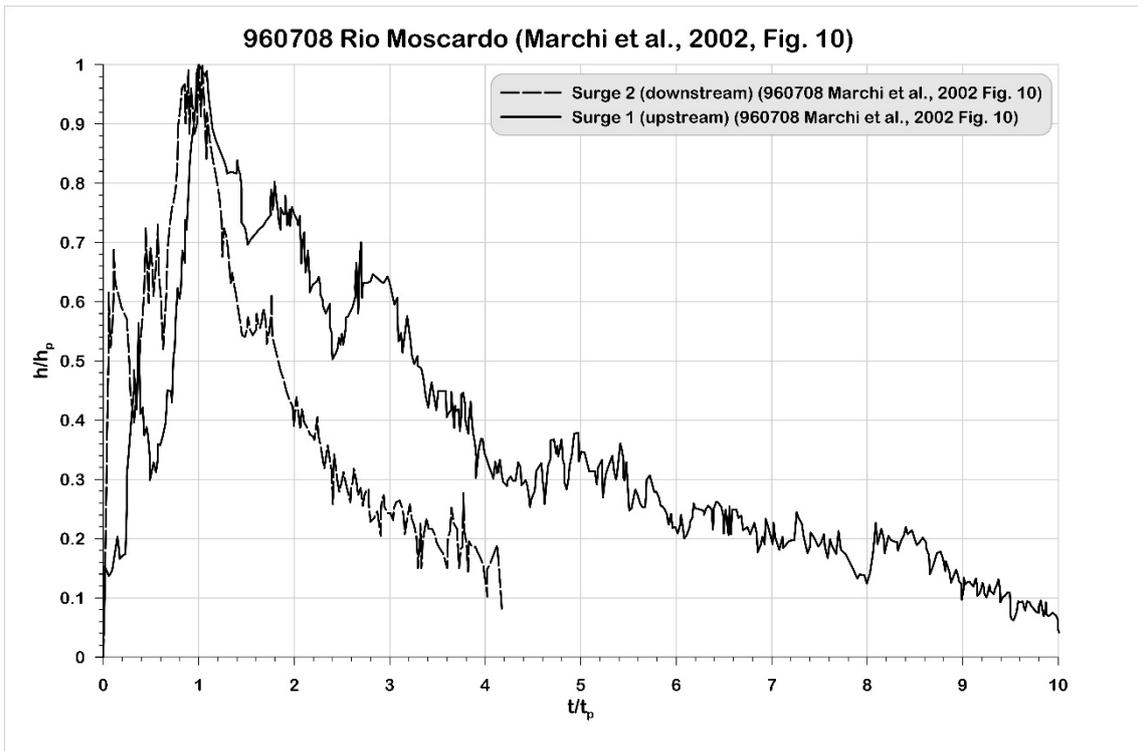
Anhang 7: normalized stage curve #10.7.1



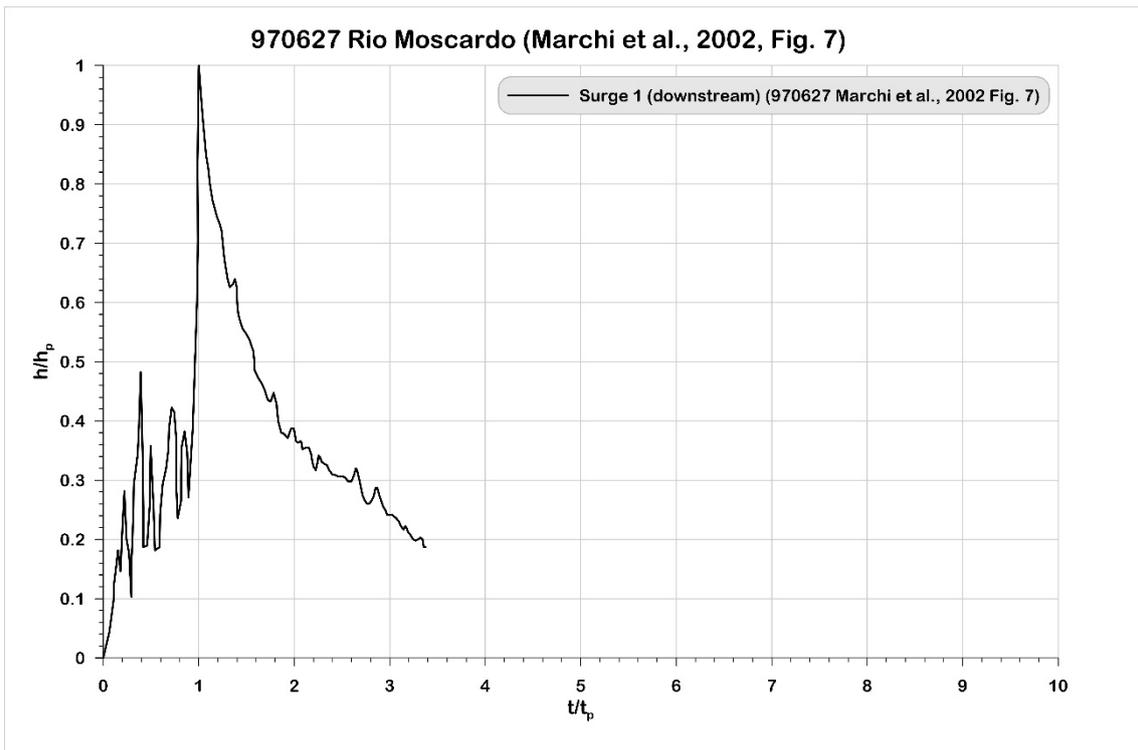
Anhang 8: normalized stage curve #10.8.1



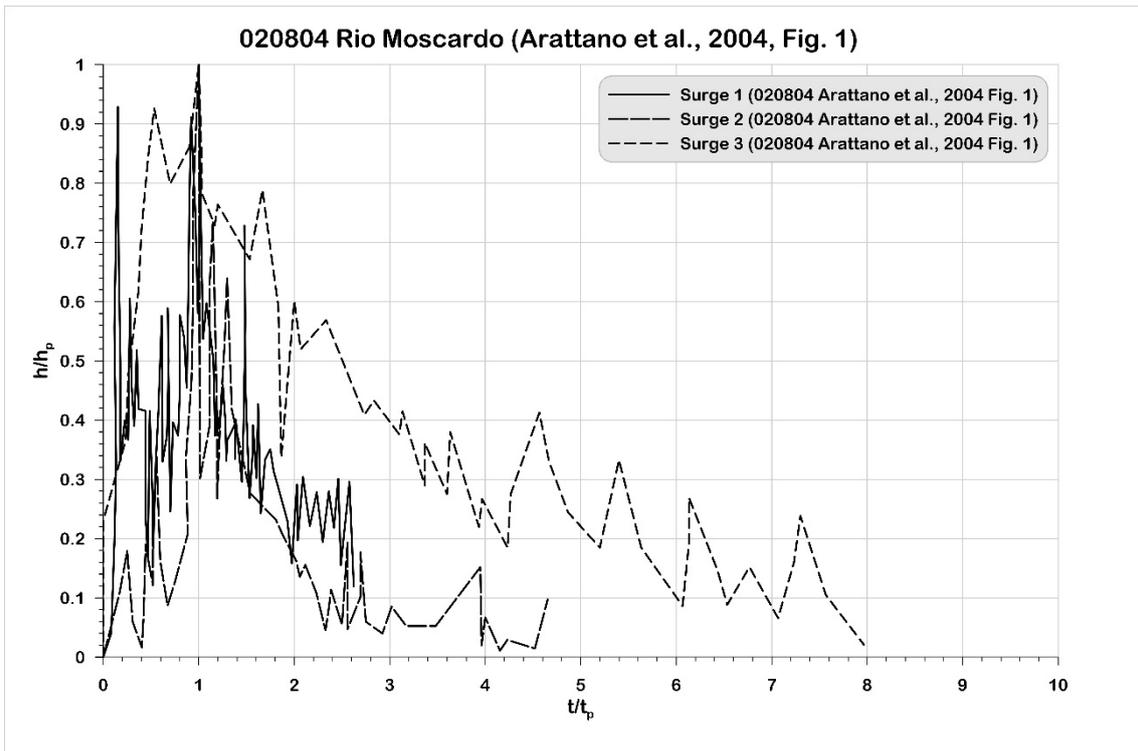
Anhang 9: normalized stage curves #10.9.1-10.9.6



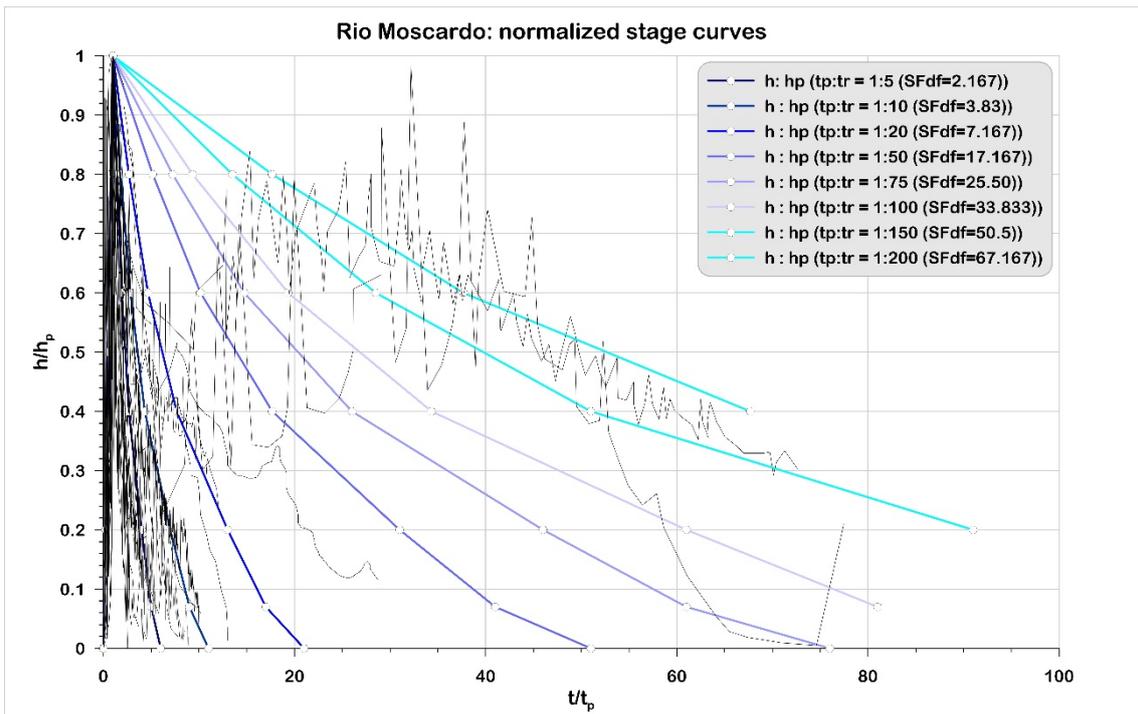
Anhang 10: normalized stage curves #10.10.1-10.10.2



Anhang 11: normalized stage curve #10.11.1



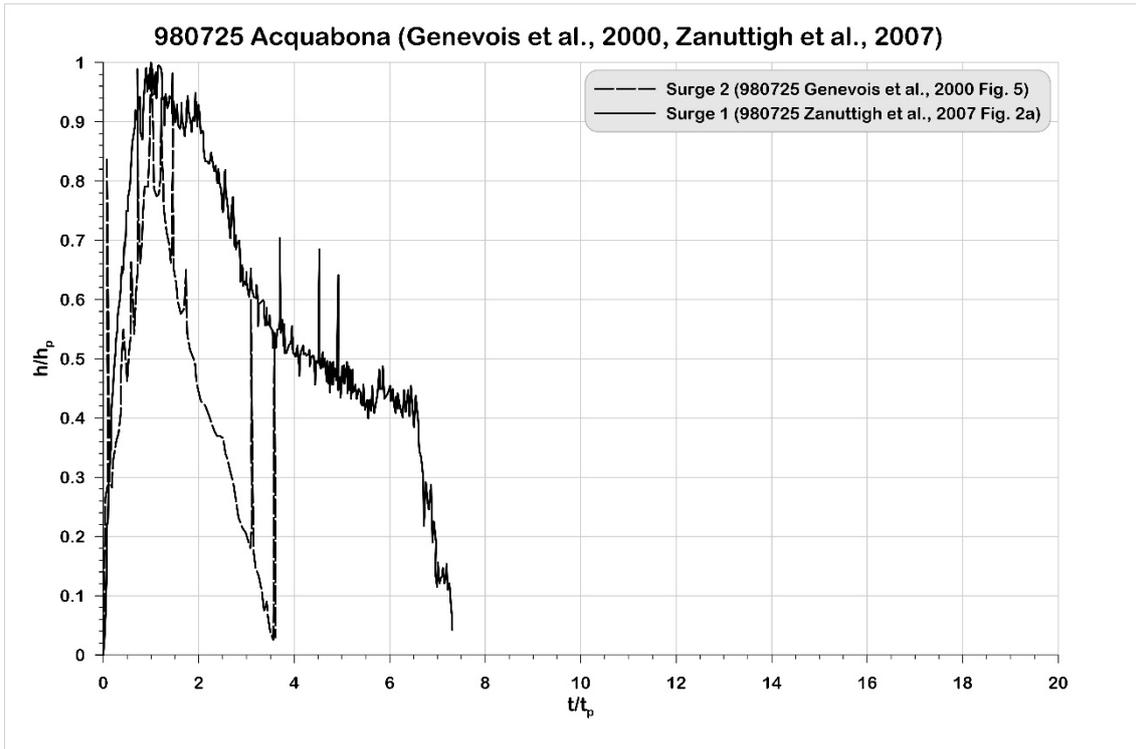
Anhang 12: normalized stage curves #10.12.1-10.12.3



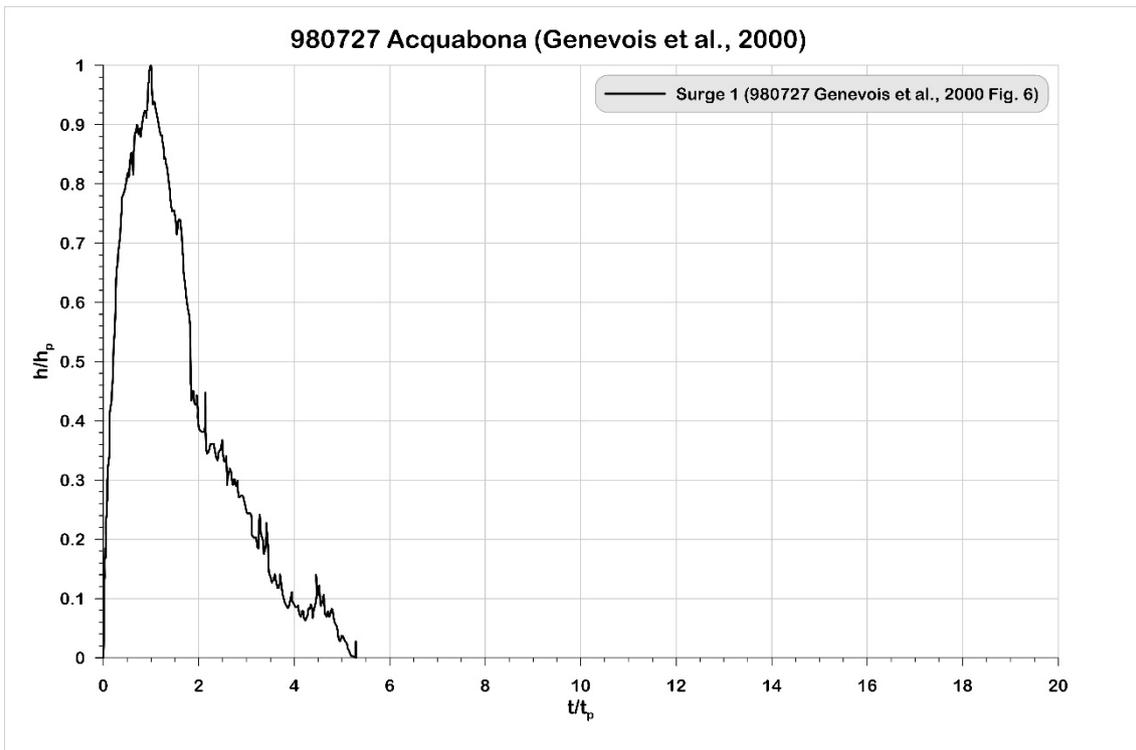
Anhang 13: normalized stage curves Rio Moscardo



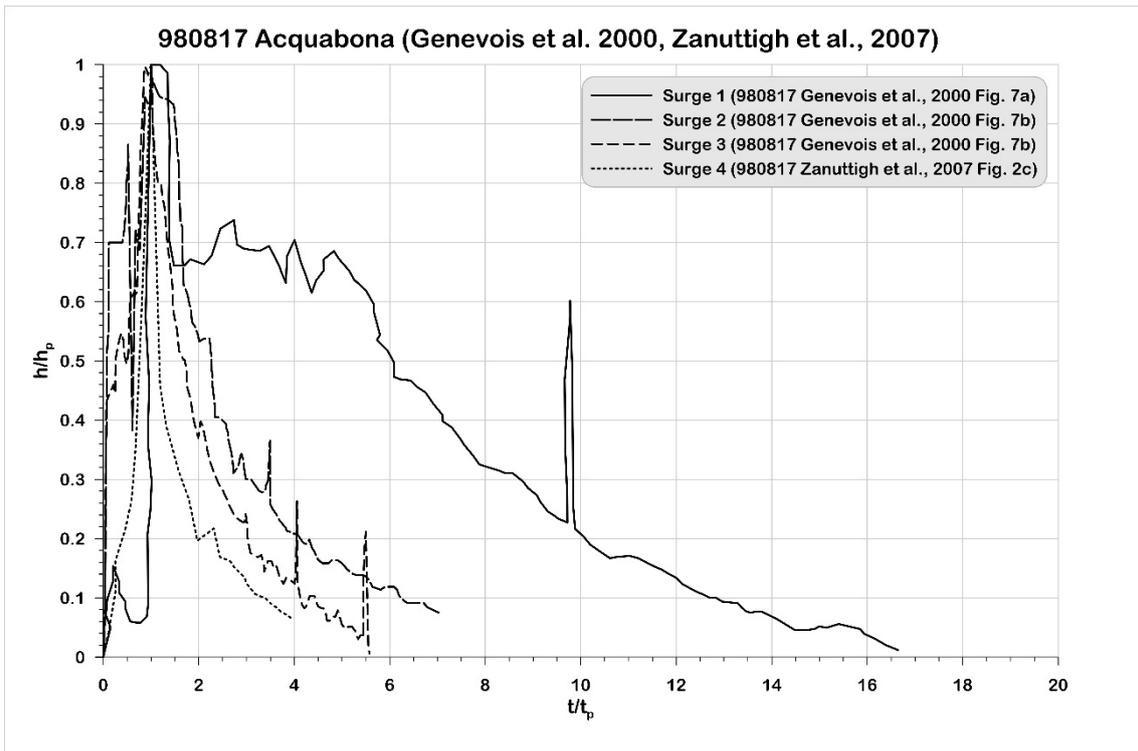
## 2.2 Acquabona



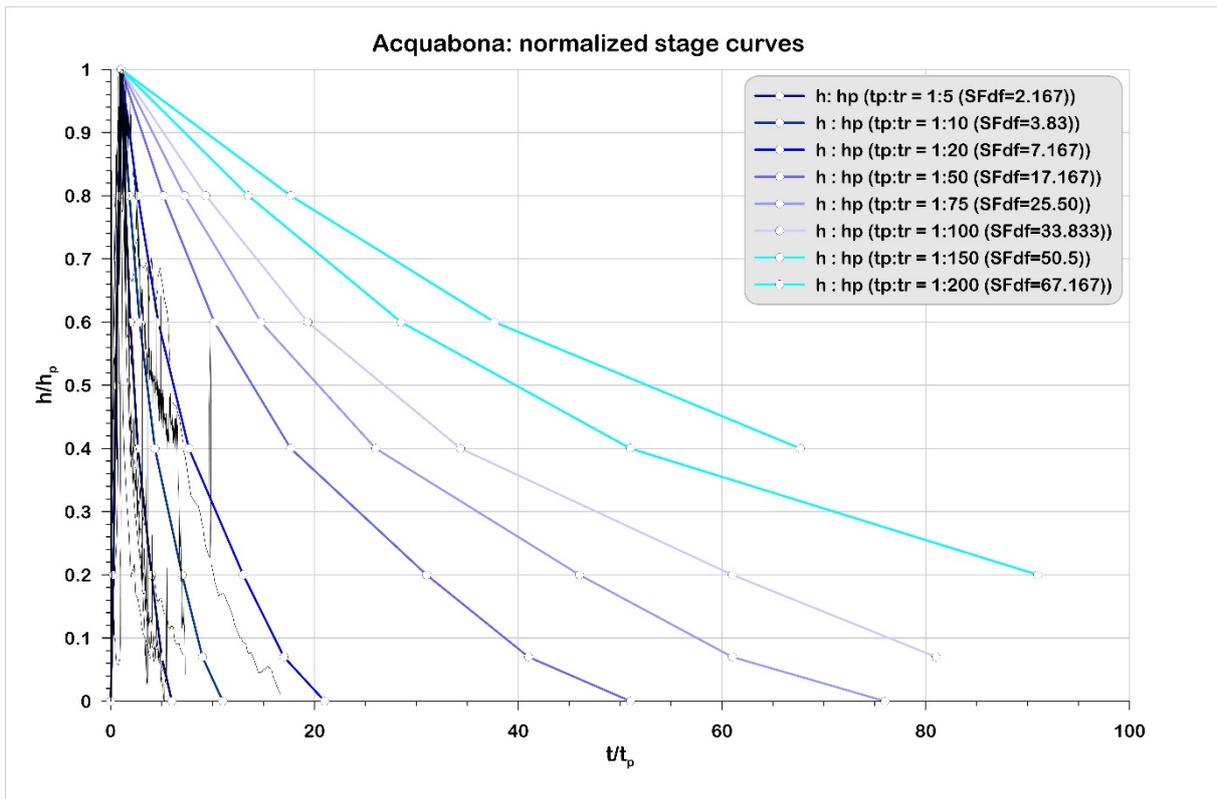
Anhang 14: normalized stage curves #11.1.1-11.1.2



Anhang 15: normalized stage curve #11.2.1



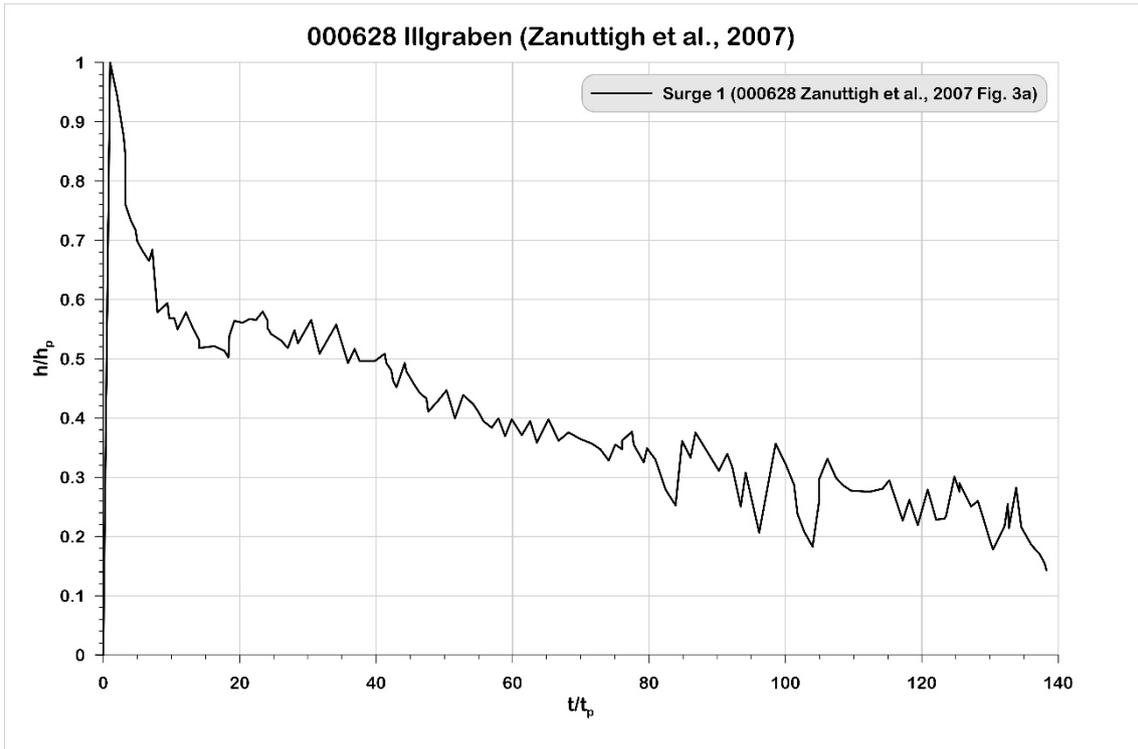
Anhang 16: normalized stage curves #11.3.1-11.3.4



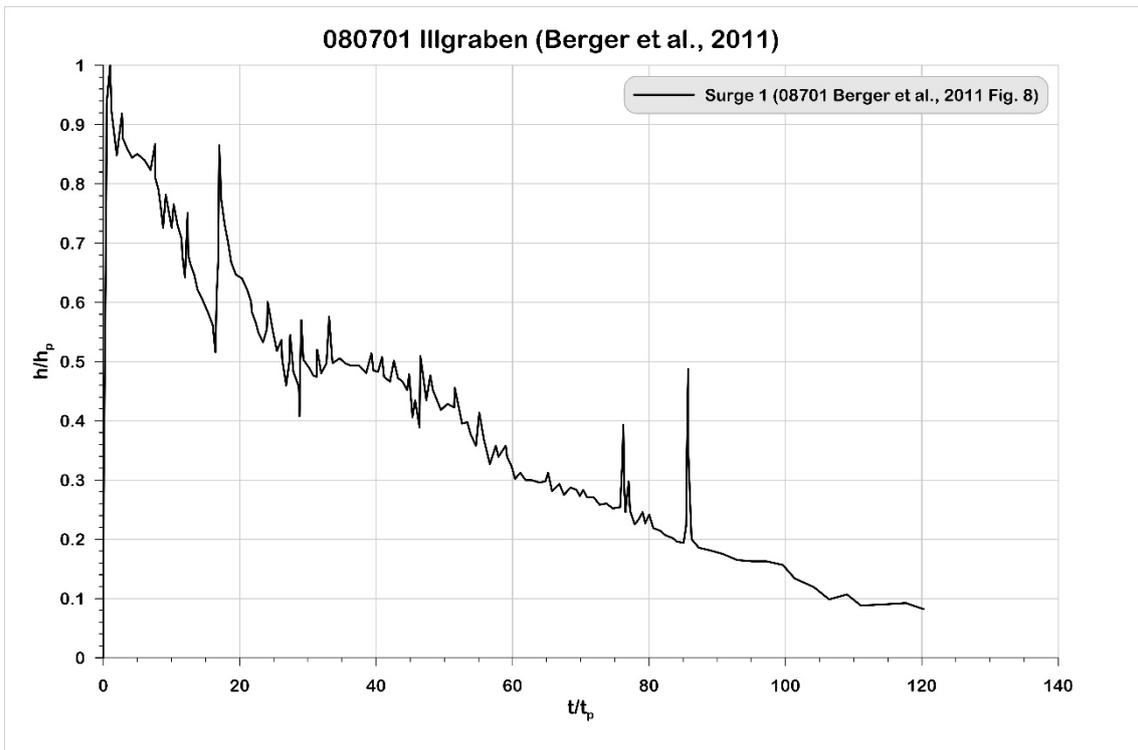
Anhang 17: normalized stage curves Acquabona



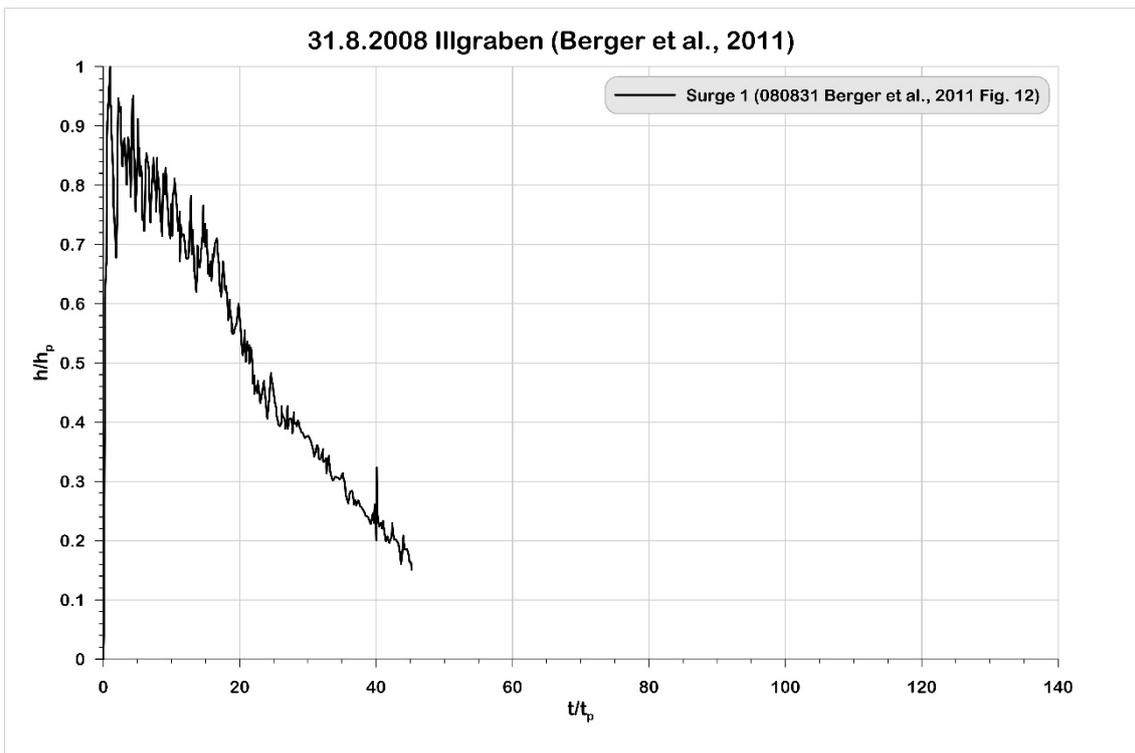
### 2.3 Illgraben



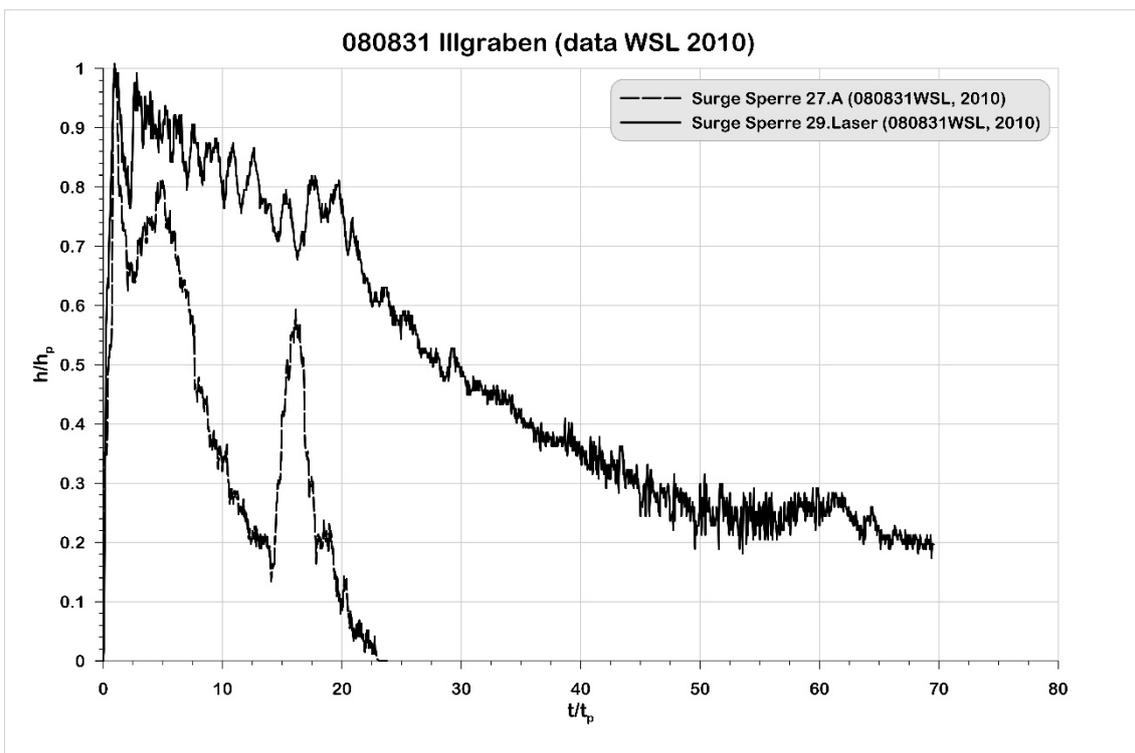
Anhang 18: normalized stage curve #12.1.1



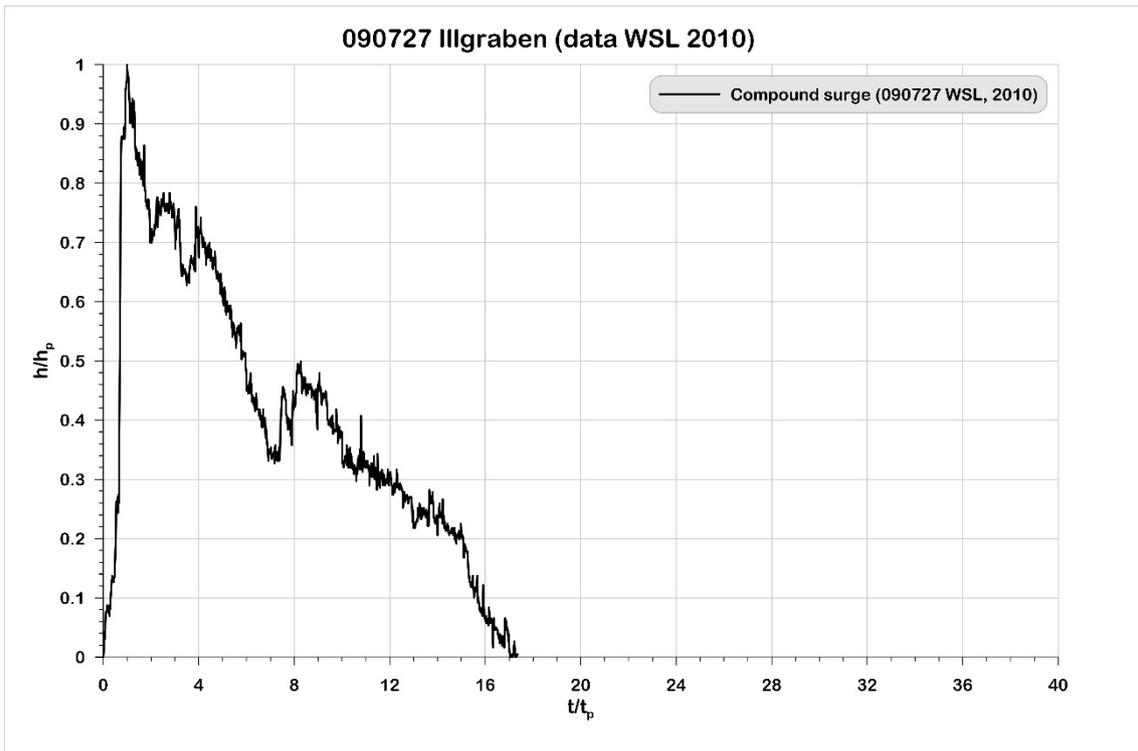
Anhang 19: normalized stage curve #12.2.1



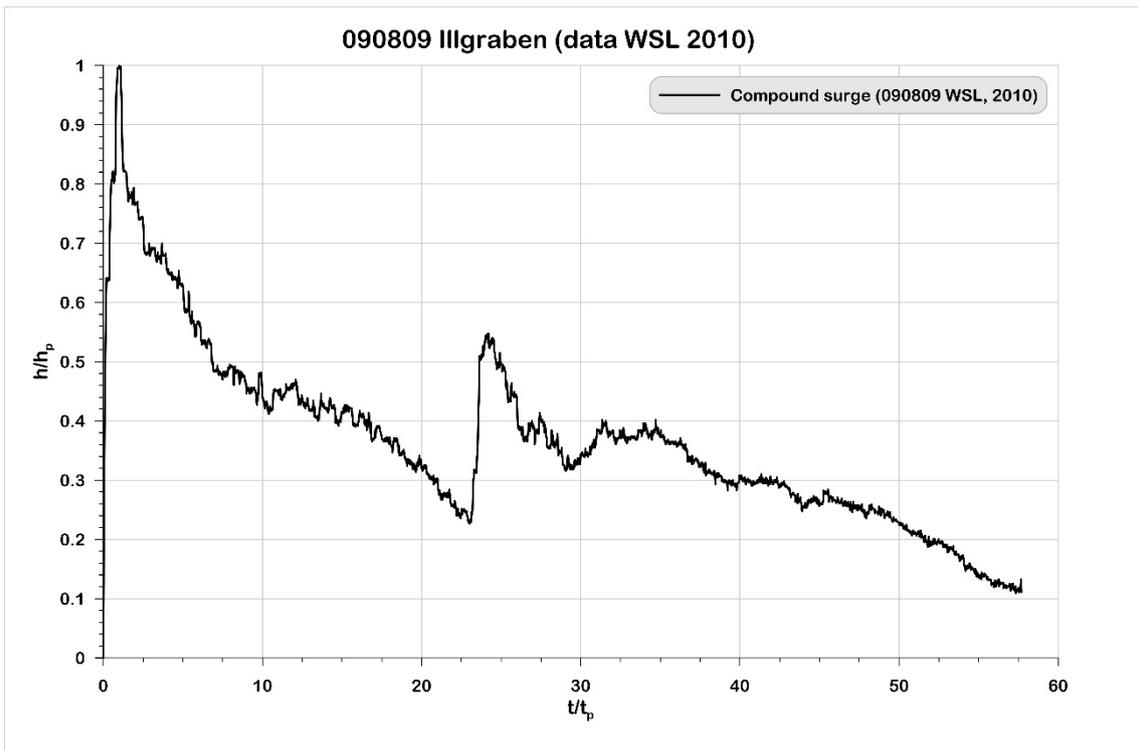
Anhang 20: normalized stage curve #12.3.1



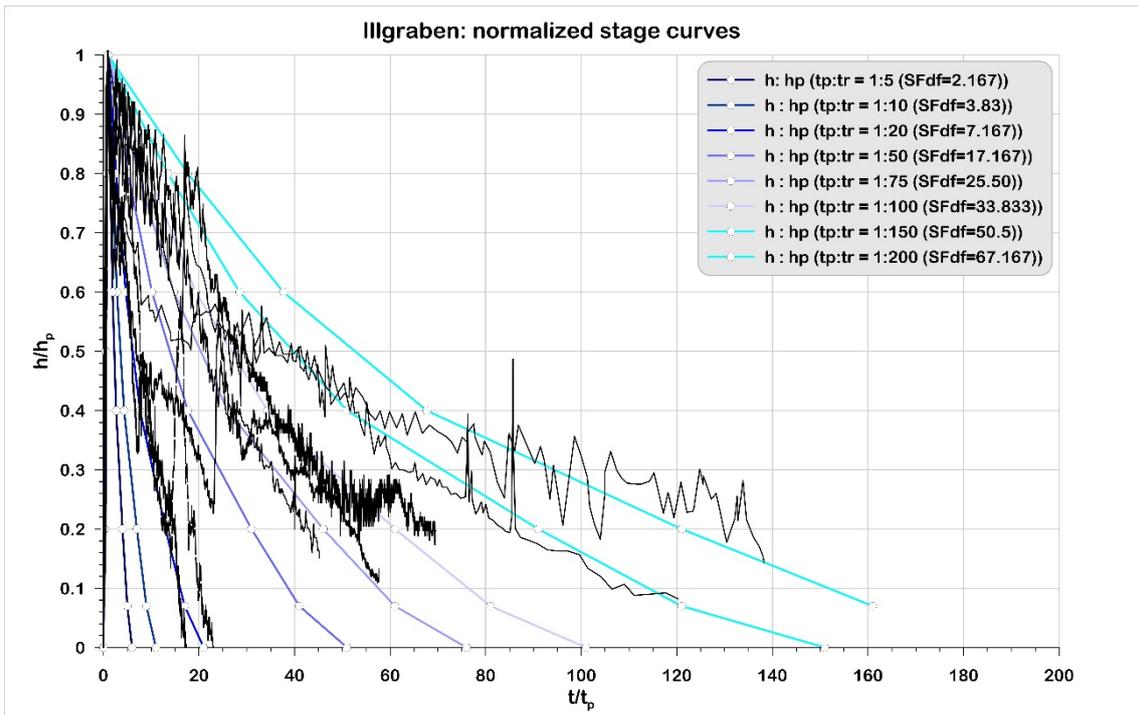
Anhang 21: normalized stage curves #12.3.2-12.3.3



Anhang 22: normalized stage curve #12.4.1

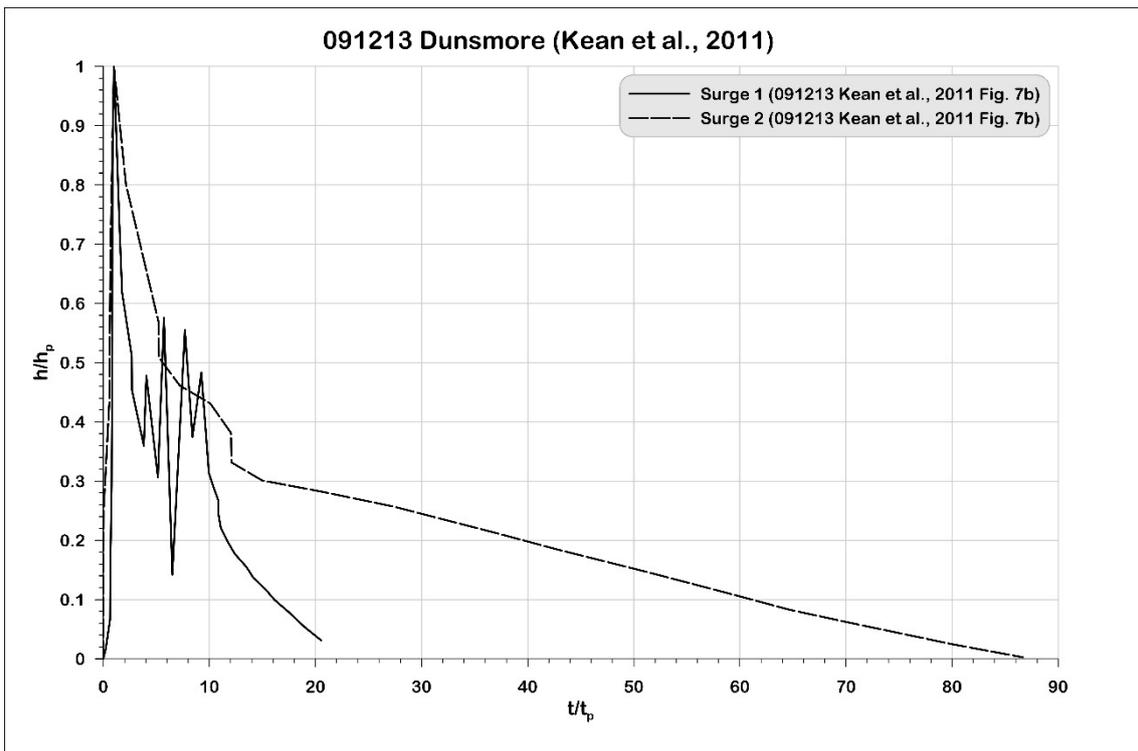


Anhang 23: normalized stage curve #12.5.1

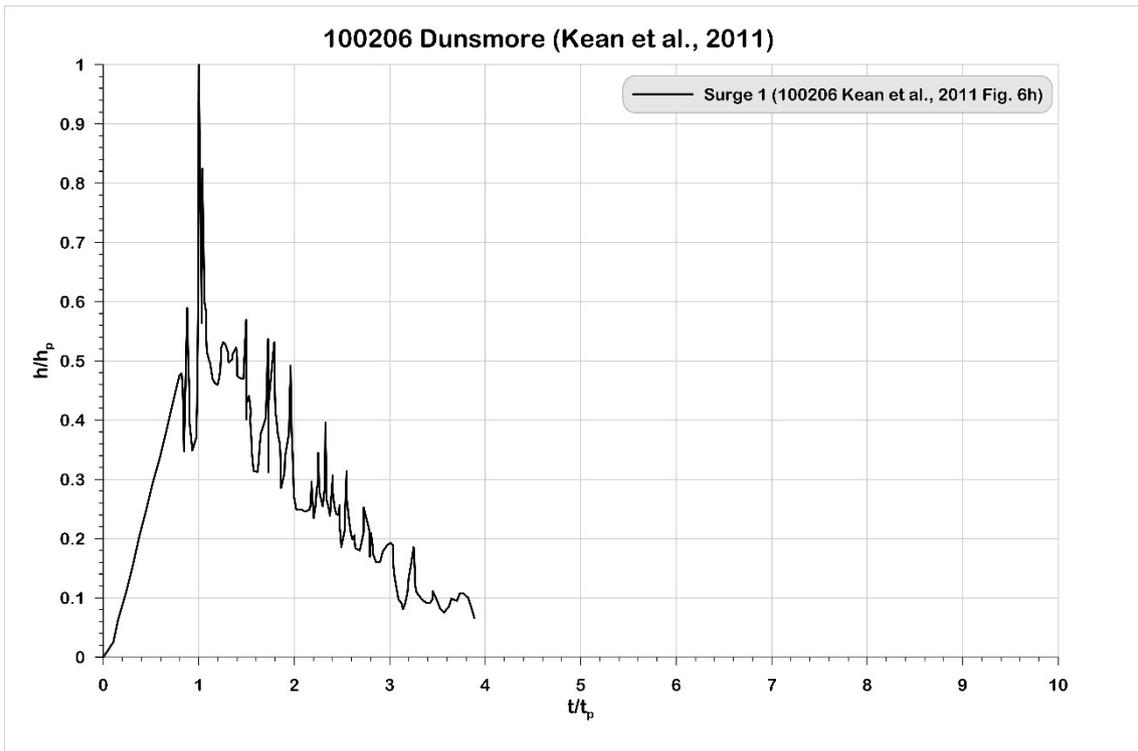


Anhang 24: normalized stage curve Illgraben

### 2.4 Dunsmore

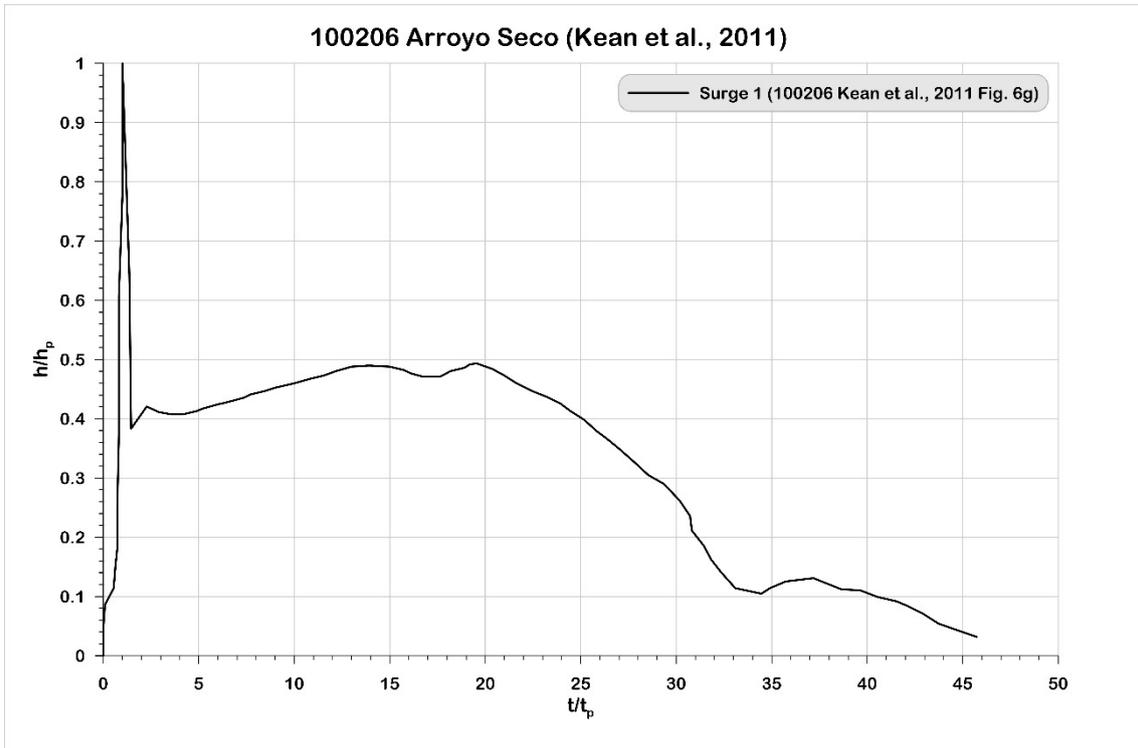


Anhang 25: normalized stage curves #14.1.1-14.1.2



Anhang 26: normalized stage curves #14.2.1

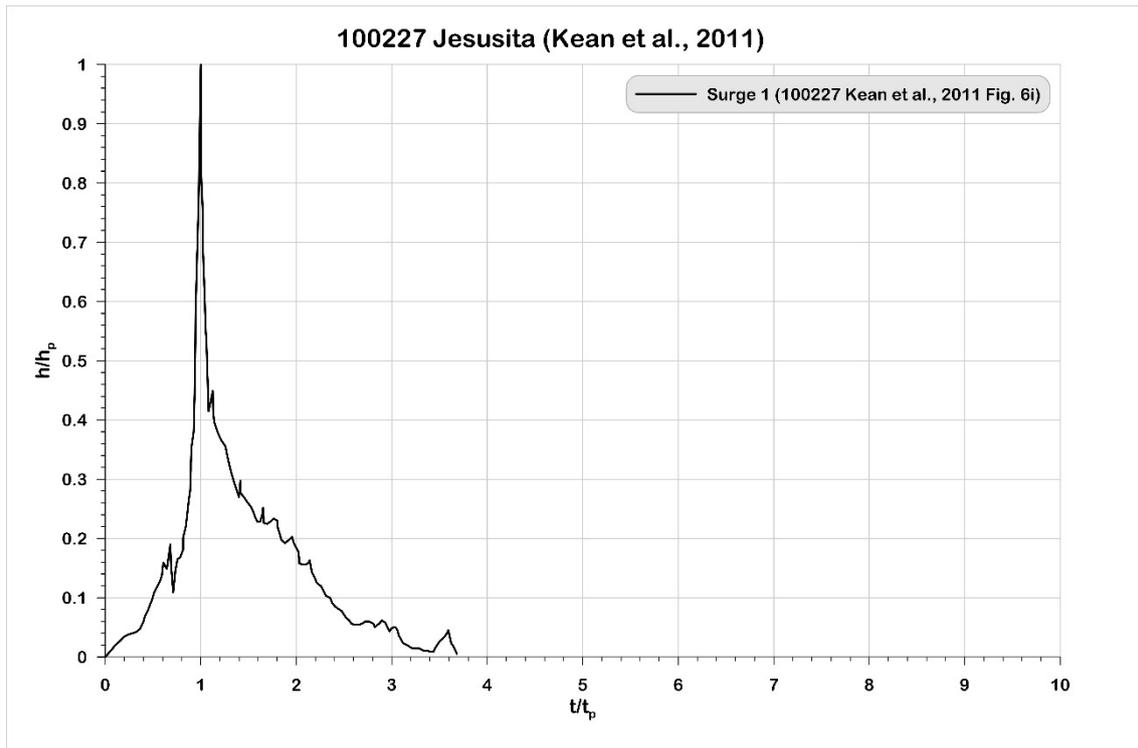
## 2.5 Arroyo Secco



Anhang 27: normalized stage curves #15.1.1

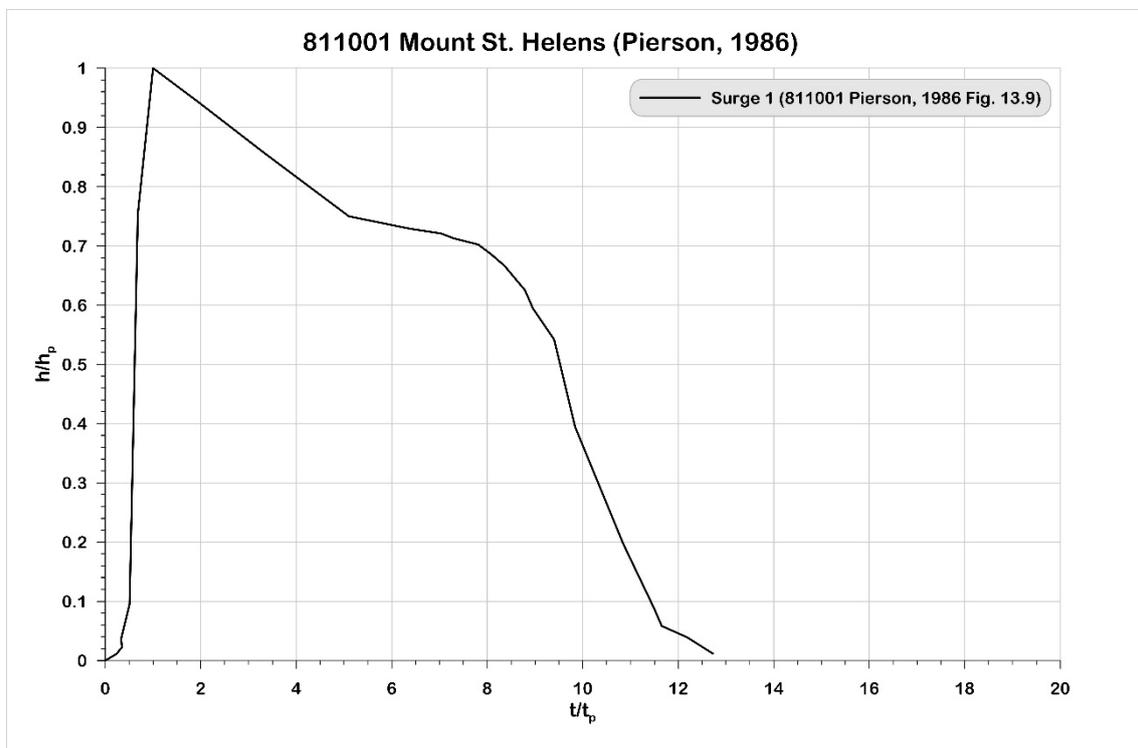


## 2.6 Jesusita

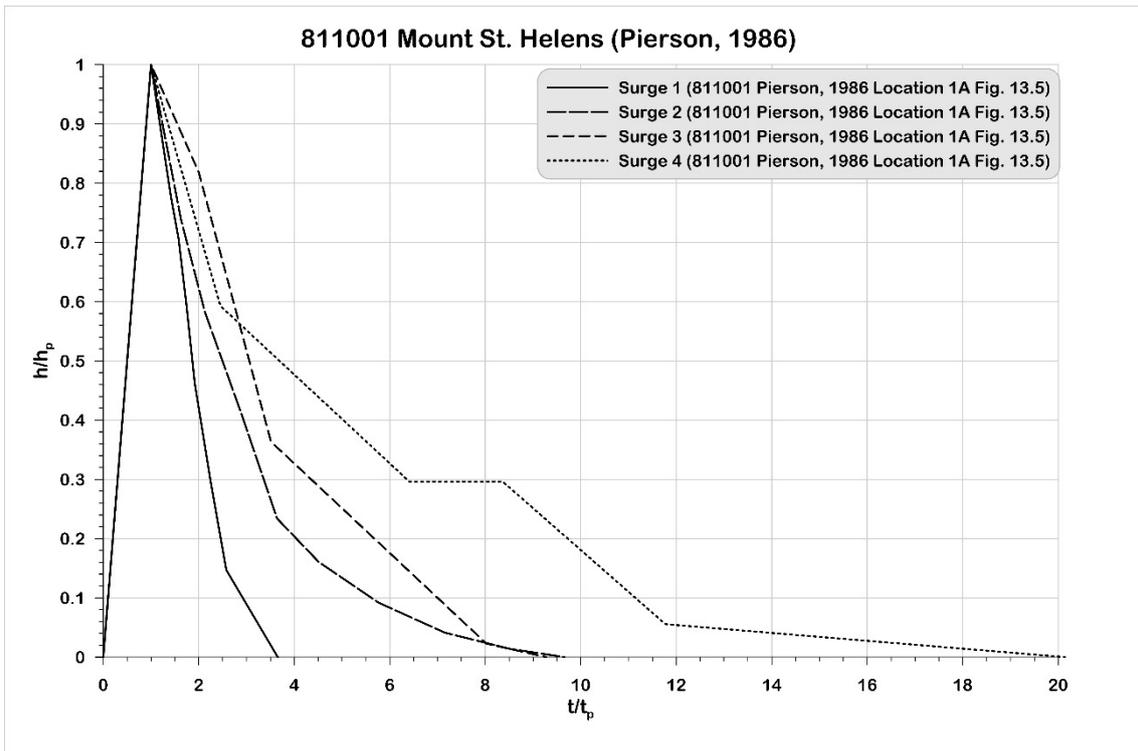


Anhang 28: normalized stage curves #16.1.1

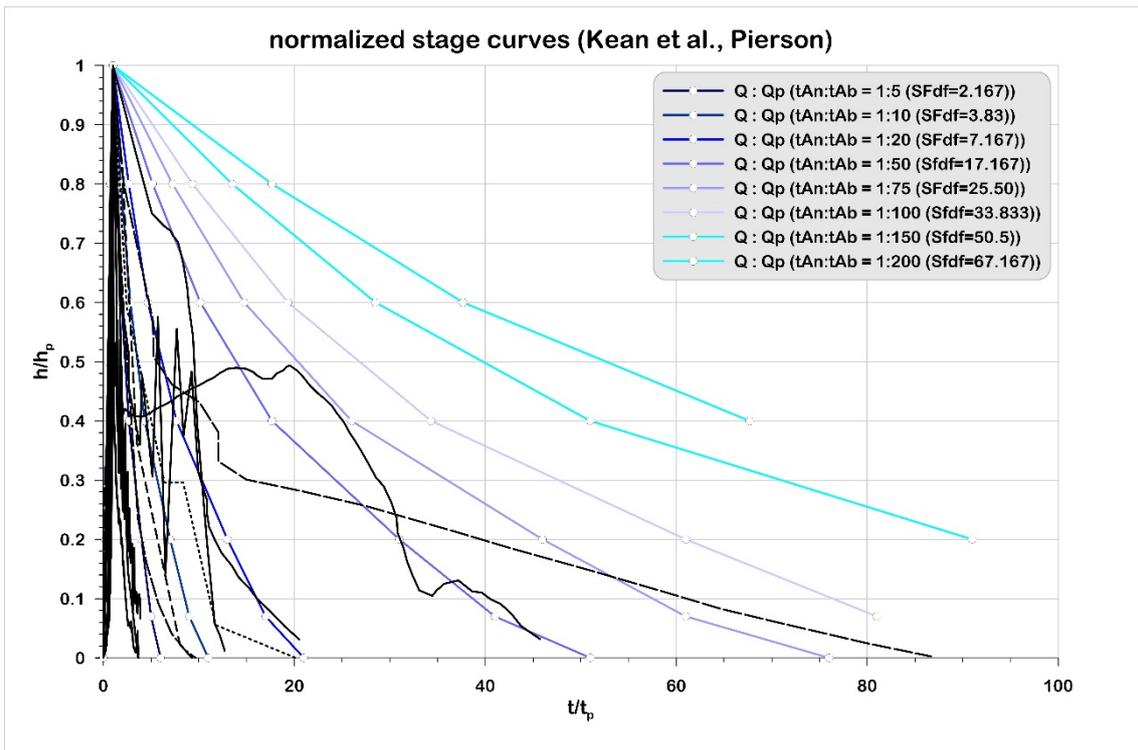
## 2.7 Mt. St. Helens



Anhang 29: normalized stage curves #17.1.1



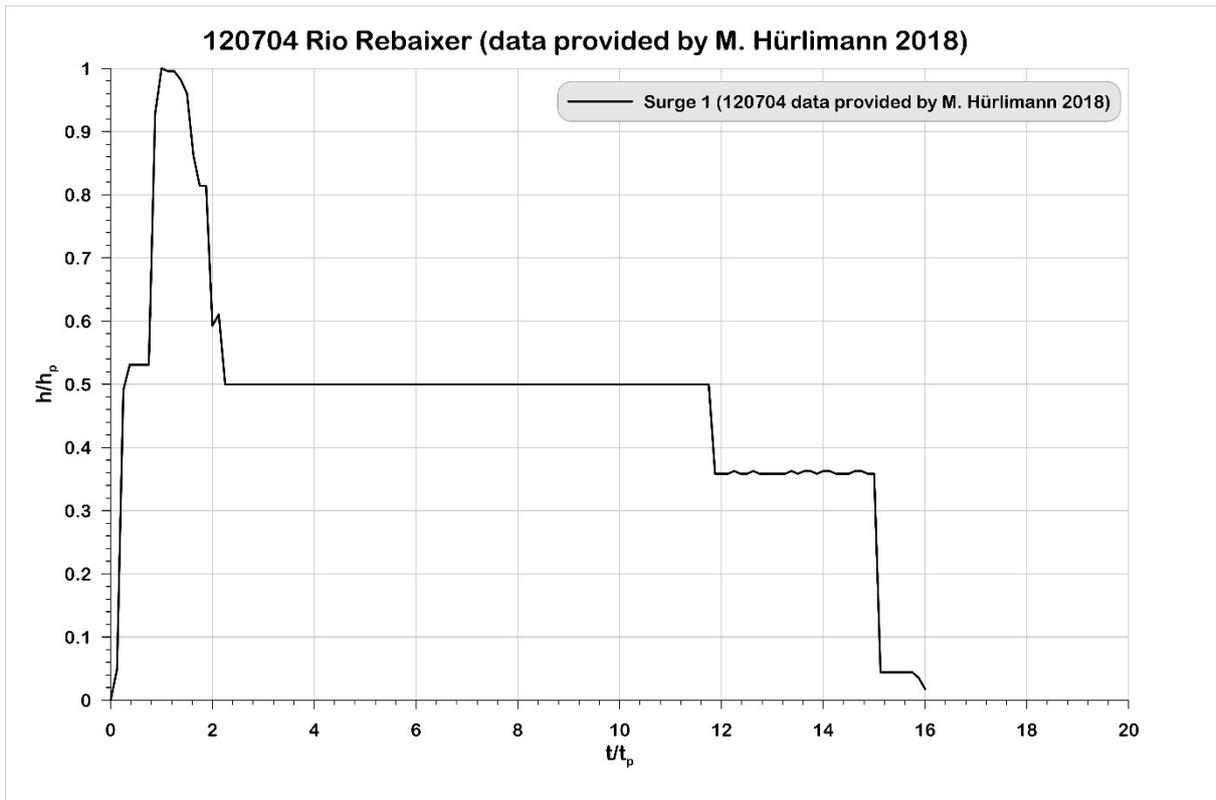
Anhang 30: normalized stage curves #17.1.2-17.1.5



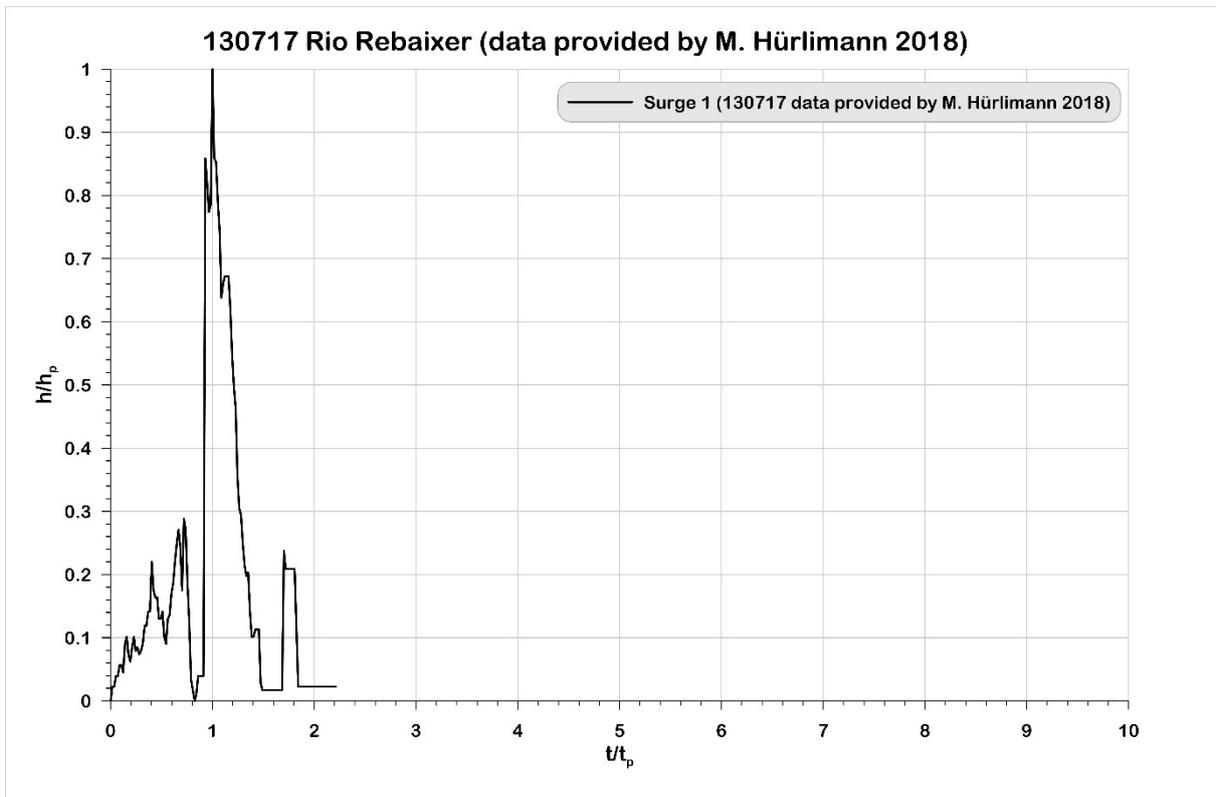
Anhang 31: normalized stage curves US torrents



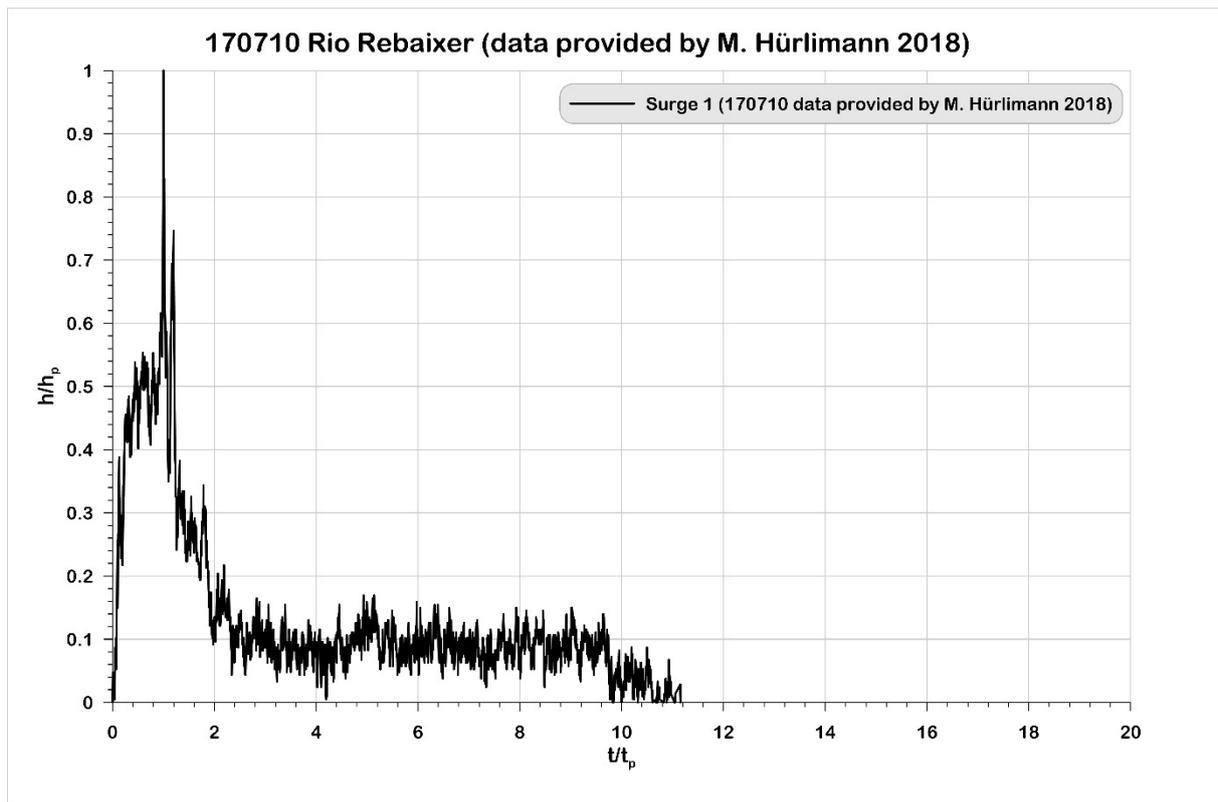
## 2.8 Rio Rebaixer



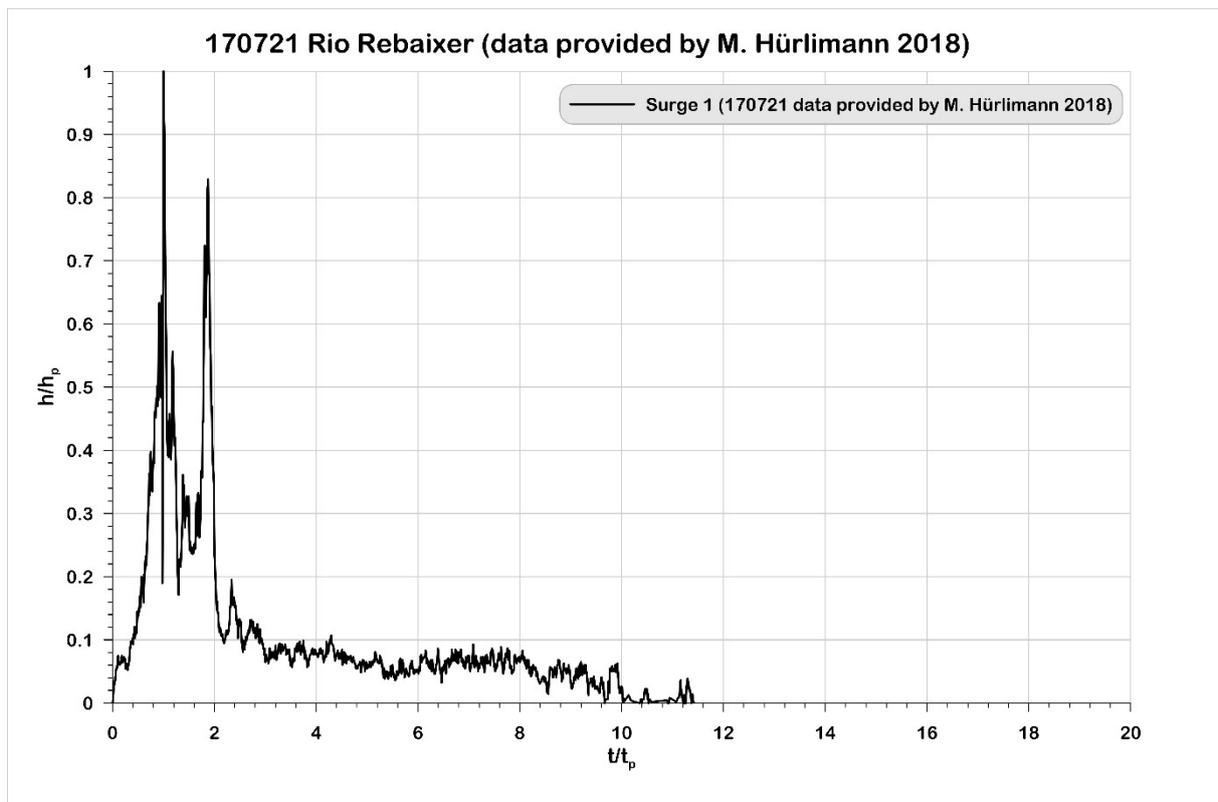
Anhang 32: normalized stage curves #18.1.1



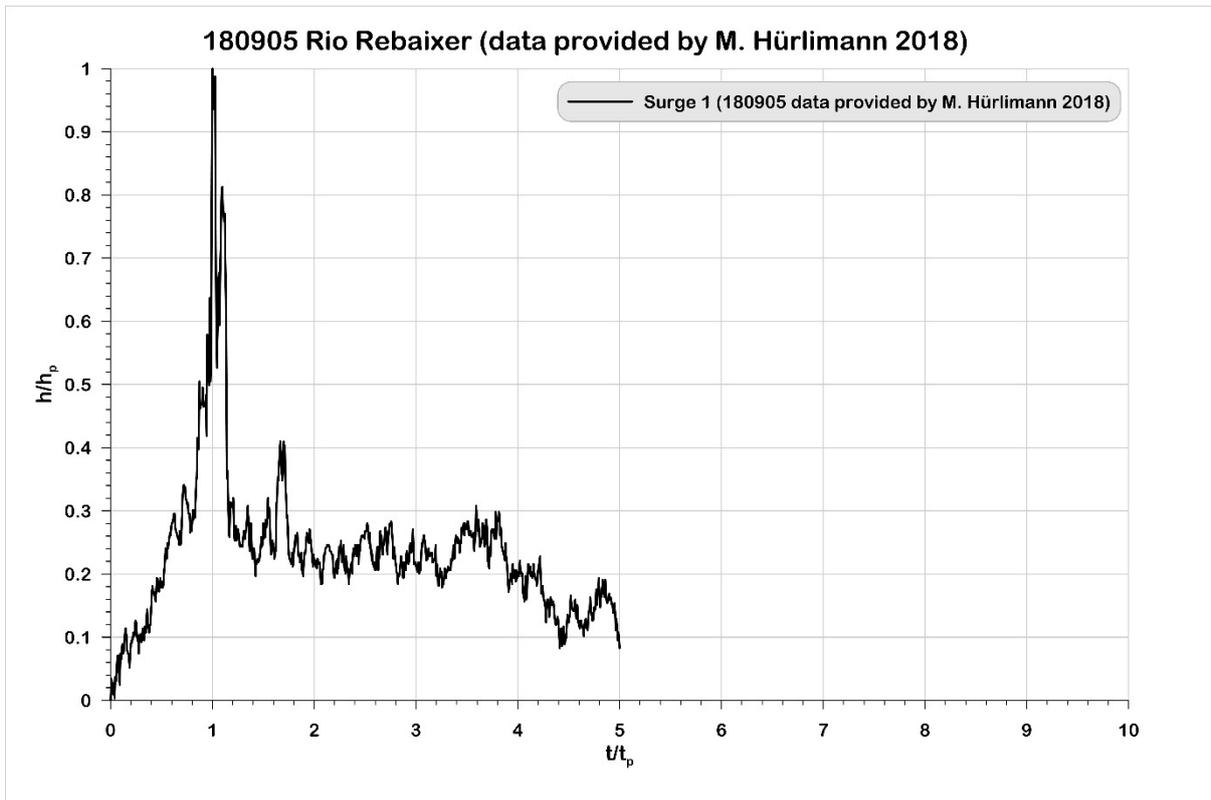
Anhang 33: normalized stage curves #18.2.1



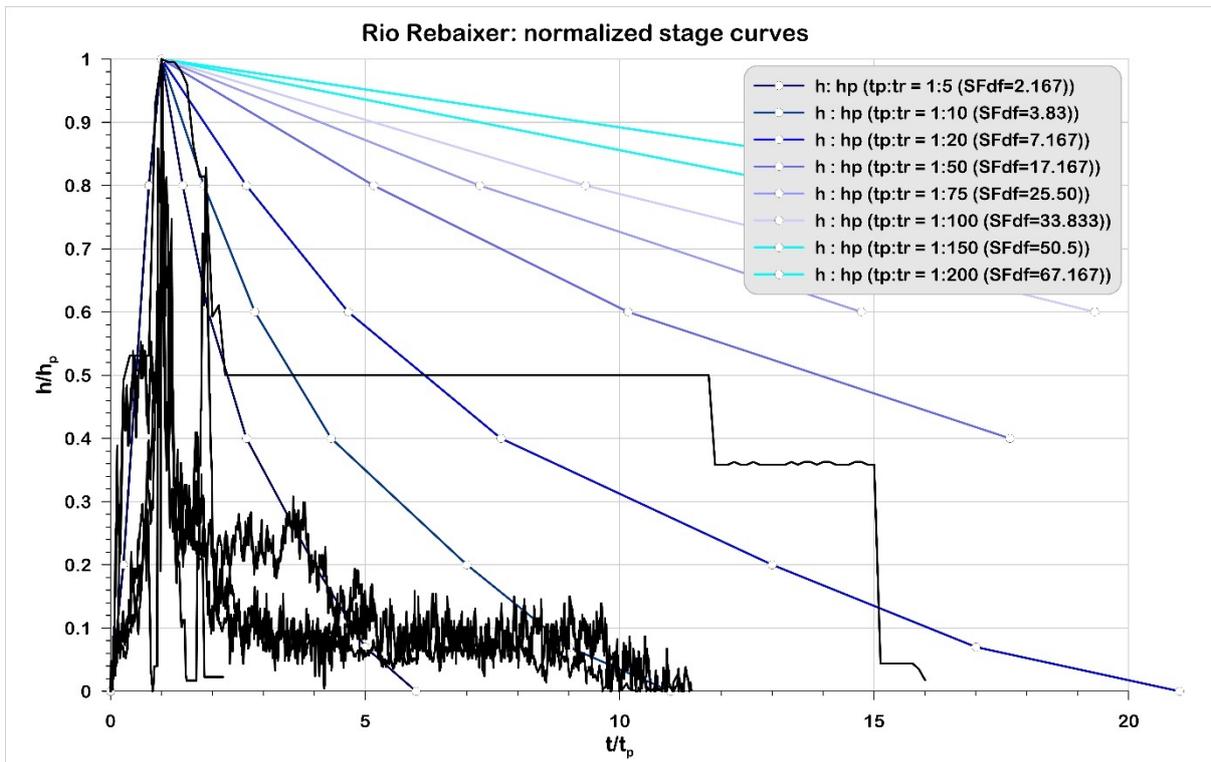
Anhang 34: normalized stage curves #18.3.1



Anhang 35: normalized stage curves #18.4.1



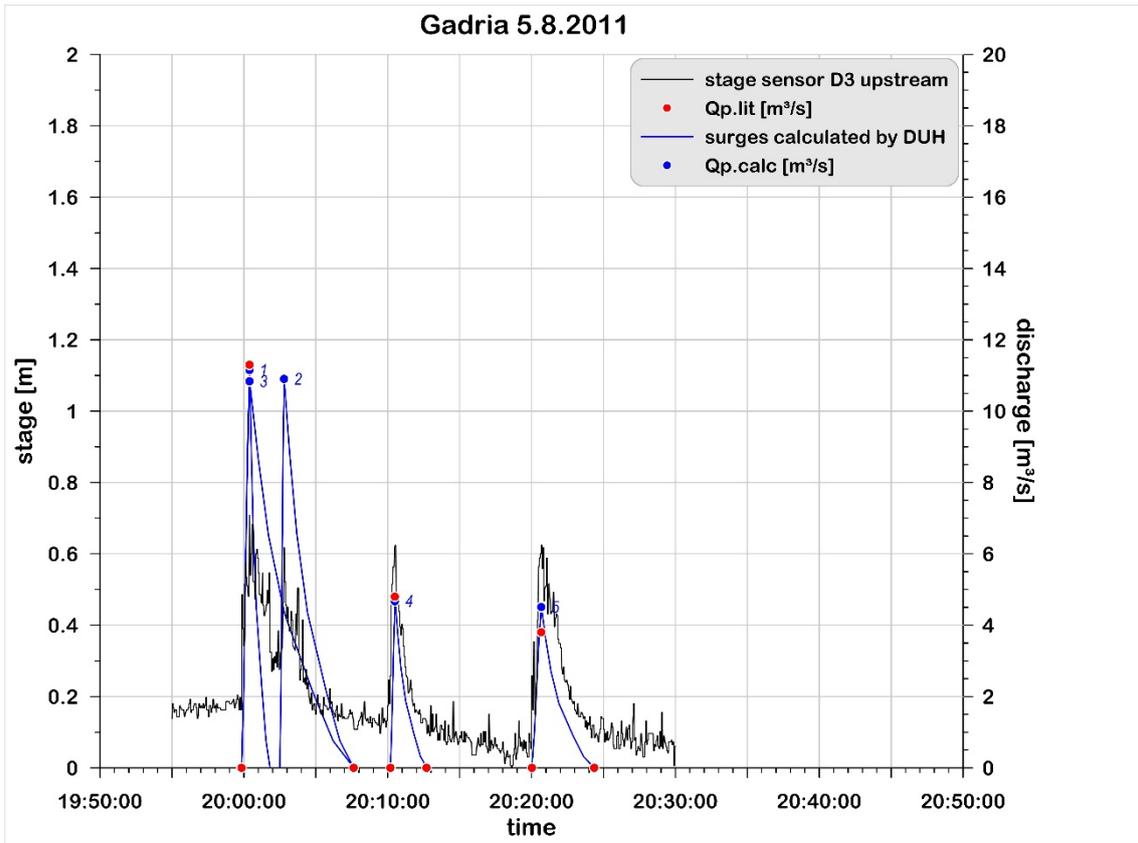
Anhang 36: normalized stage curves #18.5.1



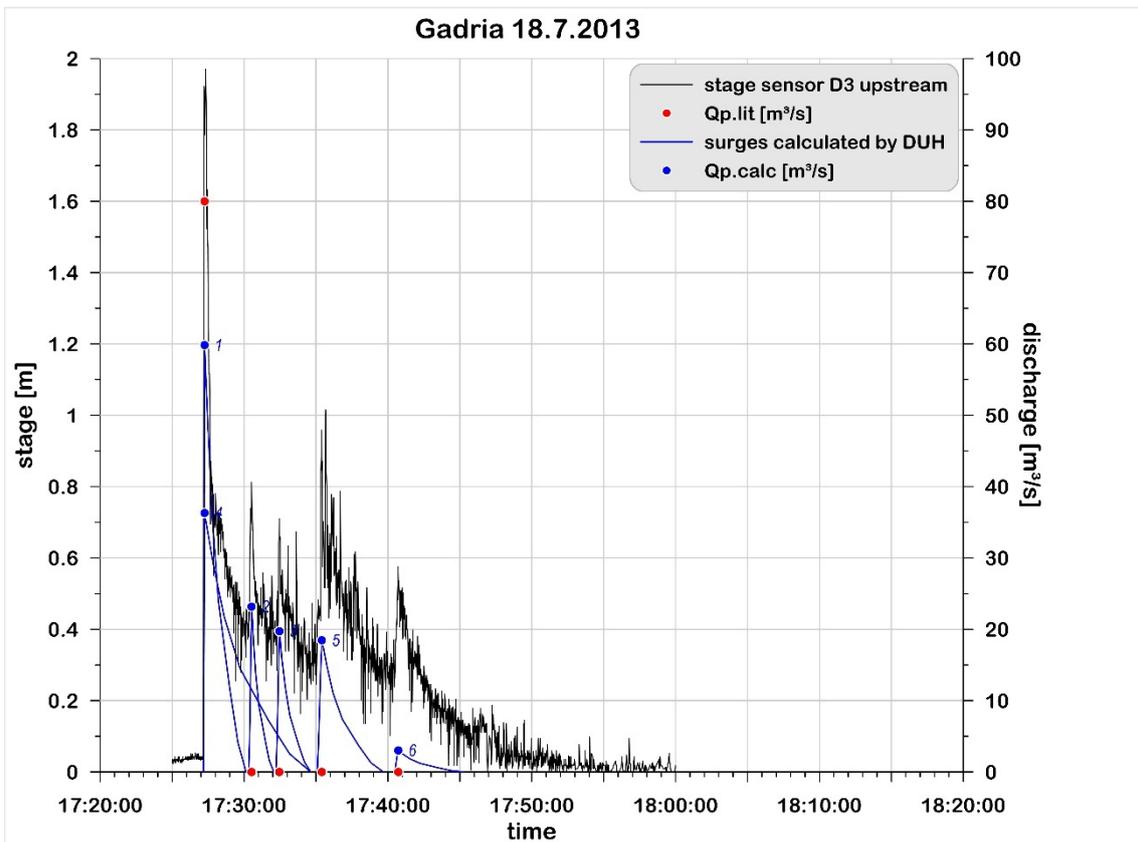
Anhang 37: normalized stage curves Rio Rebaixer



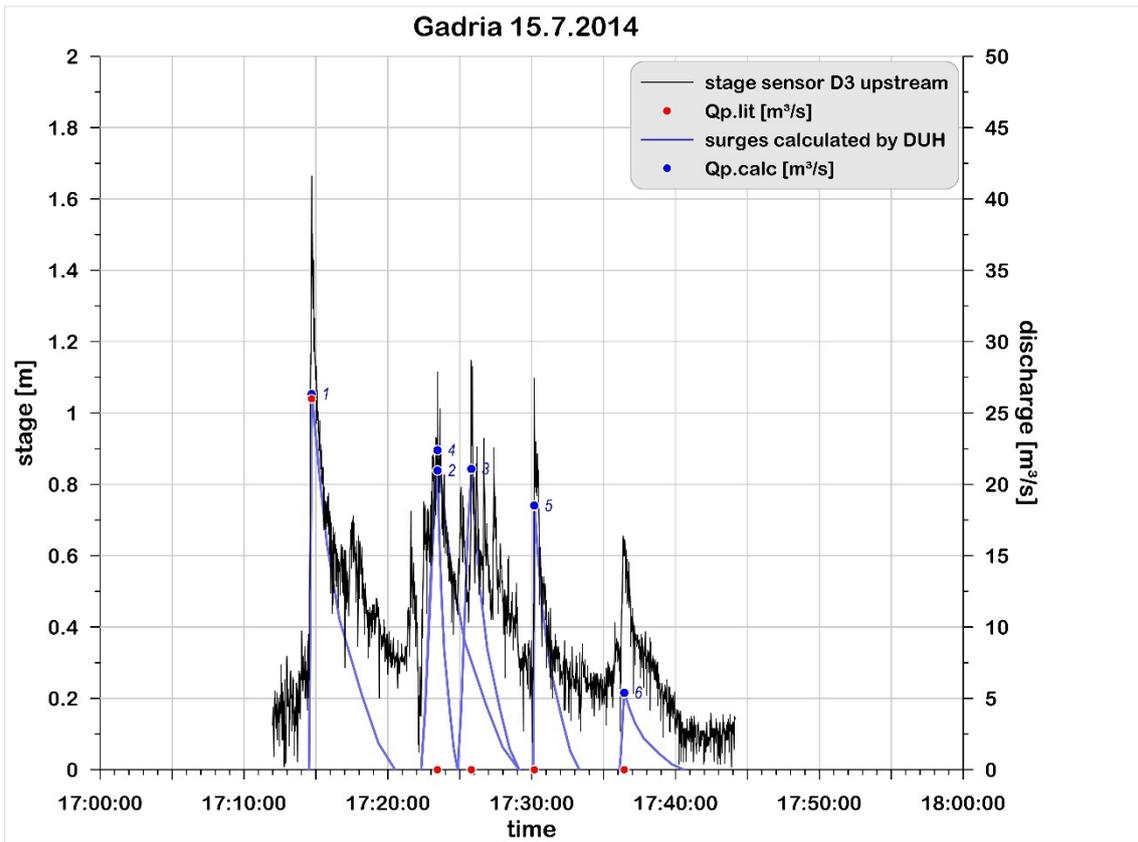
### 3 Gemessene Wasserstandsganglinien, publizierte Spitzenabflüsse und berechnete Abflussganglinien



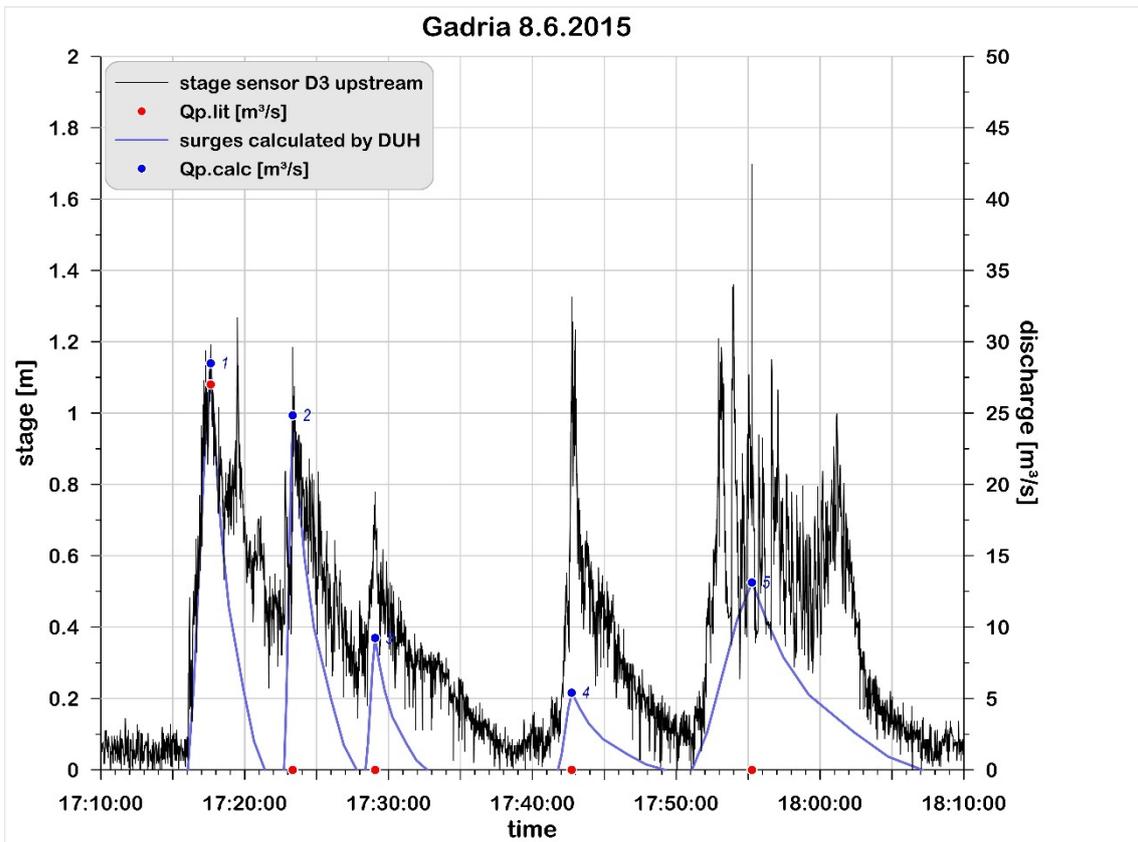
Anhang 38: #4.1.1-4.1.5



Anhang 39: #4.2.1-4.2.6



Anhang 40: #4.3.1-4.3.6



Anhang 41: #4.4.1-4.4.5



## 4 Metadaten der verwendeten Eingangsdaten aus Abflussmessungen am Lattenbach und der Gatria (IAN)

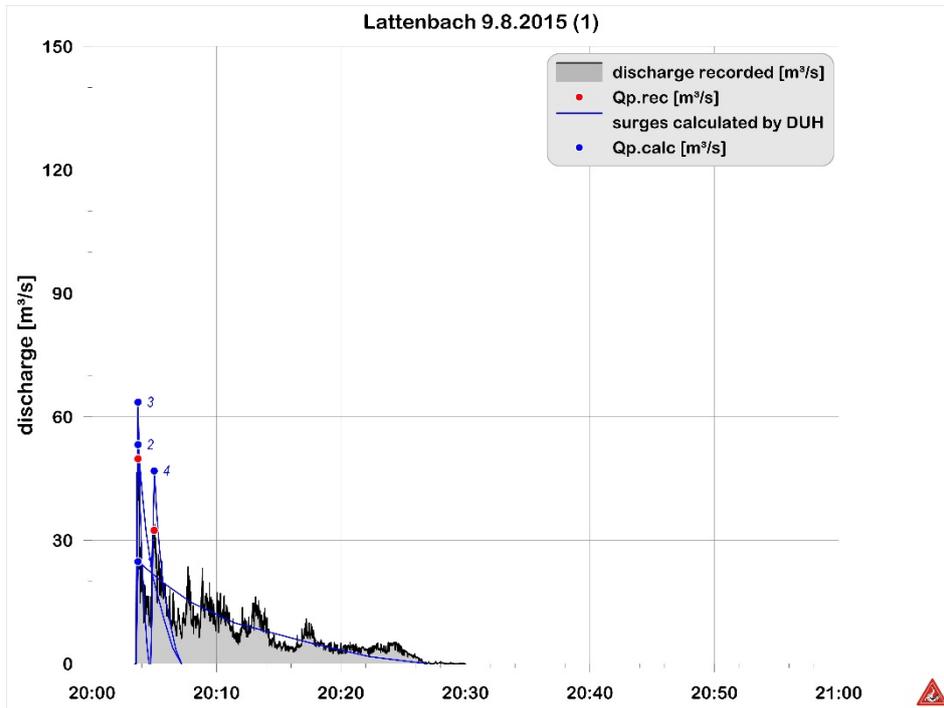
Anhang 42: gemessene Murenabflüsse

Kennung	Catchment	date		Kennung	Catchment	date
1.1.1	Lattenbach	09.08.2015 20:03:32		4.5.1	Gatria	10.07.2017 20:35:11
1.1.2	Lattenbach	09.08.2015 20:03:32		4.6.1	Gatria	19.08.2017 03:33:04
1.1.3	Lattenbach	09.08.2015 20:03:32		4.6.2	Gatria	19.08.2017 03:43:29
1.1.4	Lattenbach	09.08.2015 20:04:43		4.6.3	Gatria	19.08.2017 03:44:07
1.2.1	Lattenbach	09.08.2015 23:01:14		4.6.4	Gatria	19.08.2017 03:44:27
1.2.2	Lattenbach	09.08.2015 23:01:14		4.6.5	Gatria	19.08.2017 03:43:29
1.2.3	Lattenbach	09.08.2015 23:19:04		4.7.1	Gatria	21.07.2018 03:27:19
1.2.4	Lattenbach	09.08.2015 23:01:52		4.7.2	Gatria	21.07.2018 03:27:33
1.3.1	Lattenbach	16.08.2015 15:48:52		4.7.3	Gatria	21.07.2018 03:28:41
1.4.1	Lattenbach	10.09.2016 18:54:03		4.7.4	Gatria	21.07.2018 03:29:08
1.4.2	Lattenbach	10.09.2016 19:22:45		4.7.5	Gatria	21.07.2018 03:29:36
1.4.3	Lattenbach	10.09.2016 19:37:48		4.7.6	Gatria	21.07.2018 03:30:19
1.4.4	Lattenbach	10.09.2016 18:56:11		4.7.7	Gatria	21.07.2018 03:30:42
1.4.5	Lattenbach	10.09.2016 18:59:11		4.7.8	Gatria	21.07.2018 03:31:04
1.4.6	Lattenbach	10.09.2016 19:06:43		4.7.9	Gatria	21.07.2018 03:31:29
1.4.7	Lattenbach	10.09.2016 19:11:20		4.7.10	Gatria	21.07.2018 03:32:45
1.5.1	Lattenbach	29.07.2017 18:29:40		4.7.11	Gatria	21.07.2018 03:33:02
1.5.2	Lattenbach	29.07.2017 18:29:40		4.8.1	Gatria	11.06.2019 22:28:09
1.6.1	Lattenbach	30.07.2017 17:25:43		4.8.2	Gatria	11.06.2019 22:28:09
1.6.2	Lattenbach	30.07.2017 17:33:11		4.8.3	Gatria	11.06.2019 22:30:55
1.6.3	Lattenbach	30.07.2017 17:34:05		4.8.4	Gatria	11.06.2019 22:31:12
1.6.4	Lattenbach	30.07.2017 17:38:18		4.8.5	Gatria	11.06.2019 22:31:49
1.7.1	Lattenbach	04.06.2018 18:37:27		4.8.6	Gatria	11.06.2019 22:32:23
1.7.2	Lattenbach	04.06.2018 18:49:29		4.8.7	Gatria	11.06.2019 22:32:48
1.7.3	Lattenbach	04.06.2018 18:50:20		4.8.8	Gatria	11.06.2019 22:33:30
				4.8.9	Gatria	11.06.2019 22:33:44
				4.8.10	Gatria	11.06.2019 22:34:02
				4.8.11	Gatria	11.06.2019 22:34:48
				4.8.12	Gatria	11.06.2019 22:30:55
				4.8.13	Gatria	11.06.2019 22:31:49
				4.9.1	Gatria	26.07.2019 12:25:13
				4.9.2	Gatria	26.07.2019 12:25:13
				4.9.3	Gatria	26.07.2019 12:26:53
				4.9.4	Gatria	26.07.2019 12:27:13
				4.9.5	Gatria	26.07.2019 12:27:38
				4.9.6	Gatria	26.07.2019 12:28:09
				4.9.7	Gatria	26.07.2019 12:28:57
				4.9.8	Gatria	26.07.2019 12:29:14
				4.9.9	Gatria	26.07.2019 12:29:34

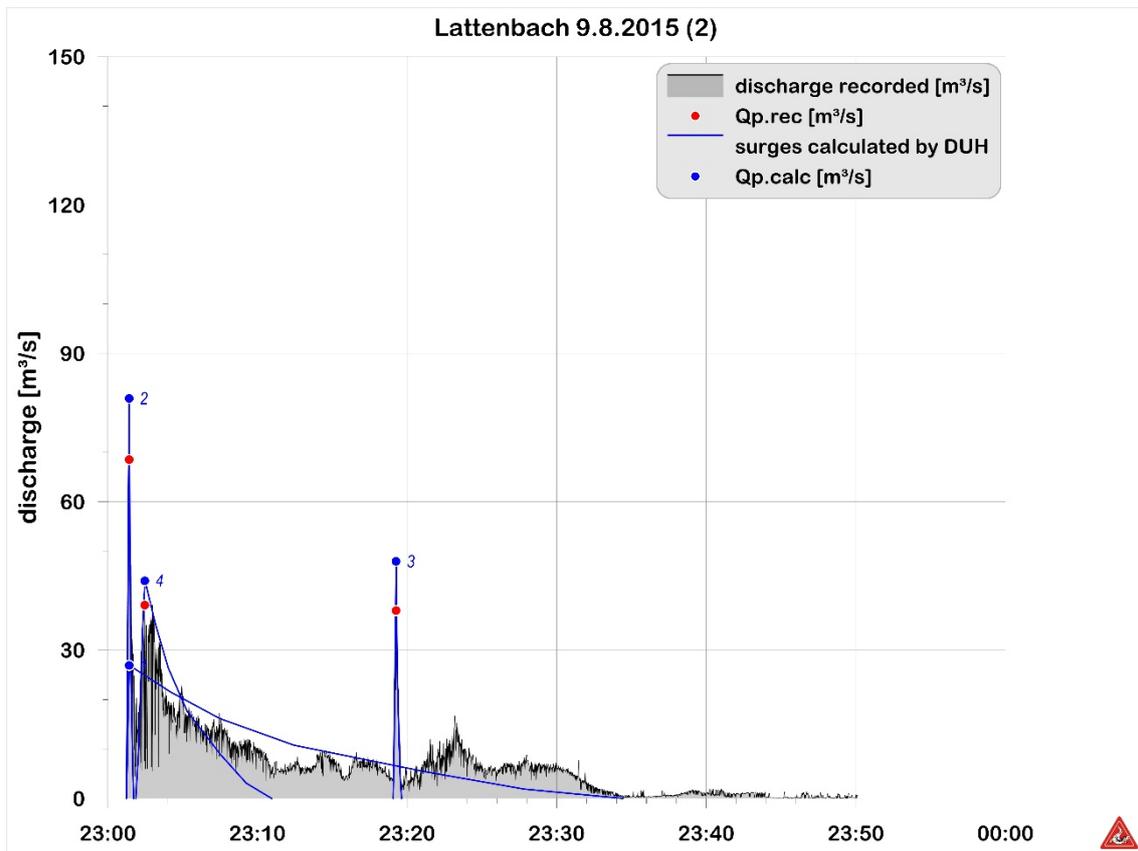


## 5 Gemessene und berechnete Abflussganglinien

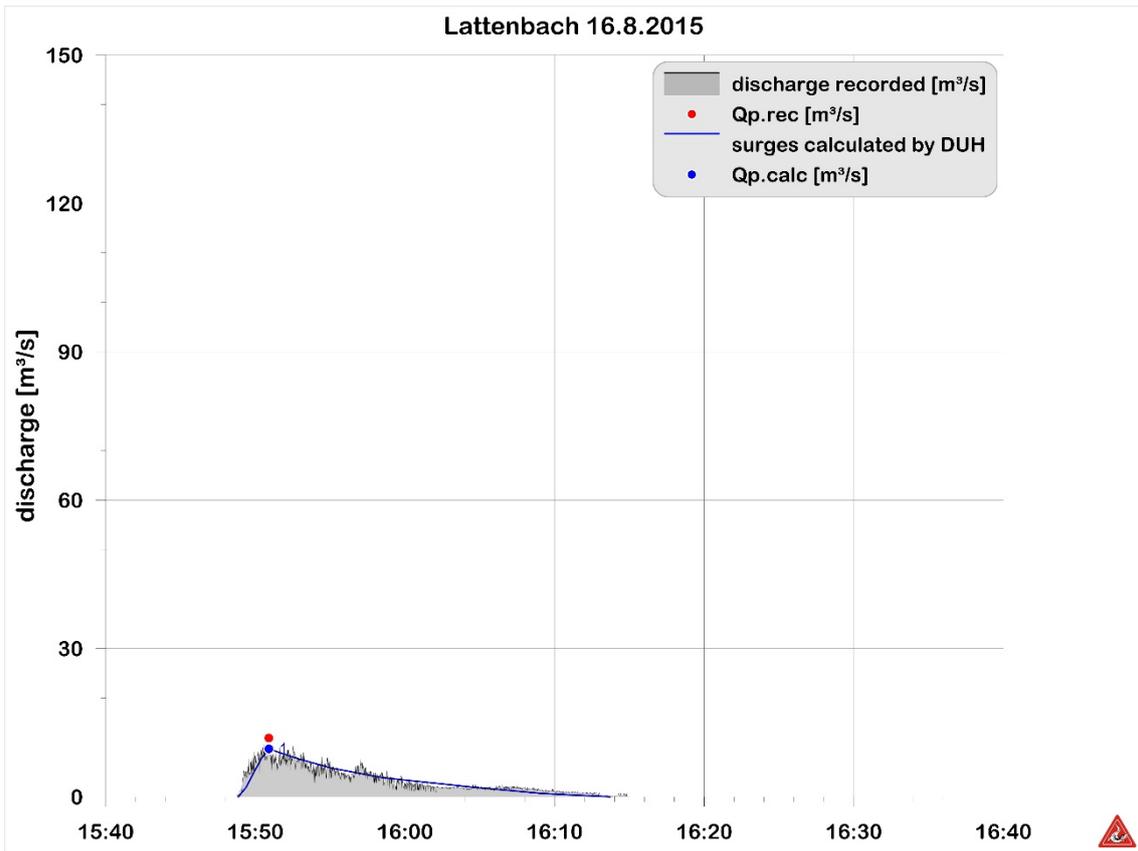
### 5.1 Lattenbach



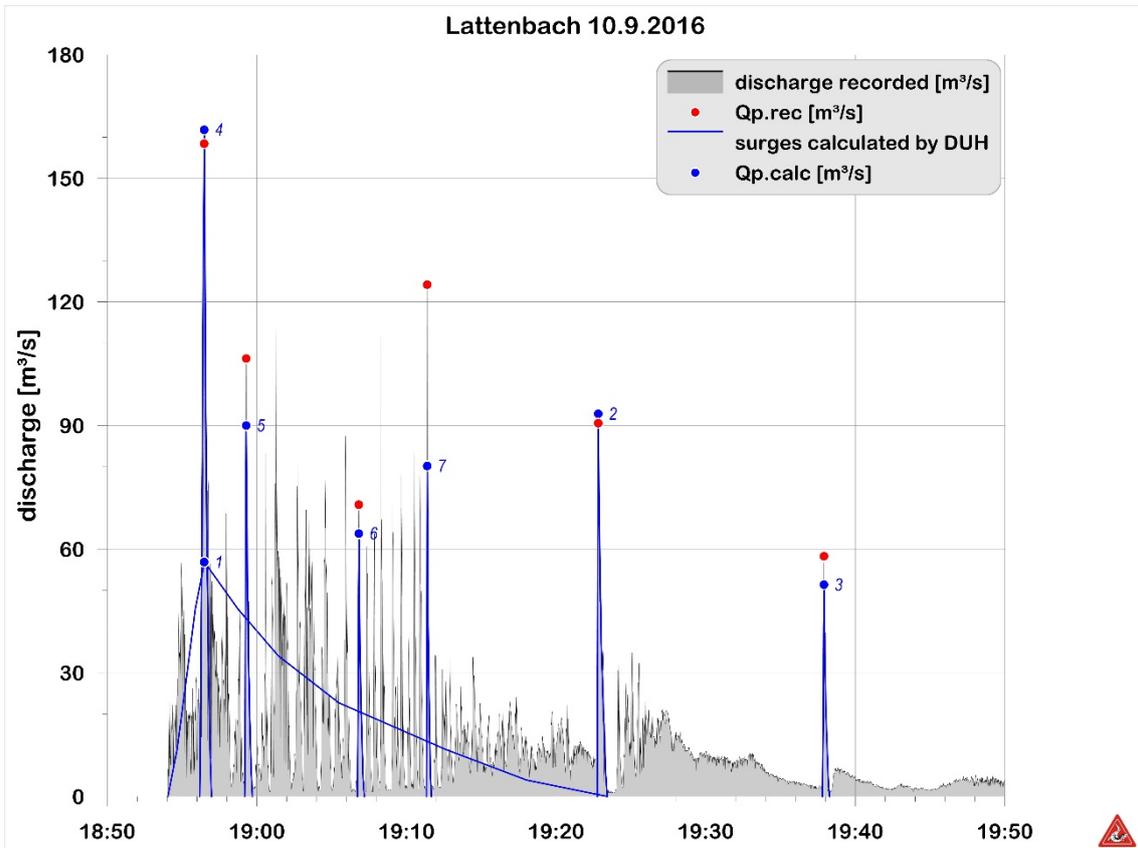
Anhang 43: #1.1.1-1.1.4



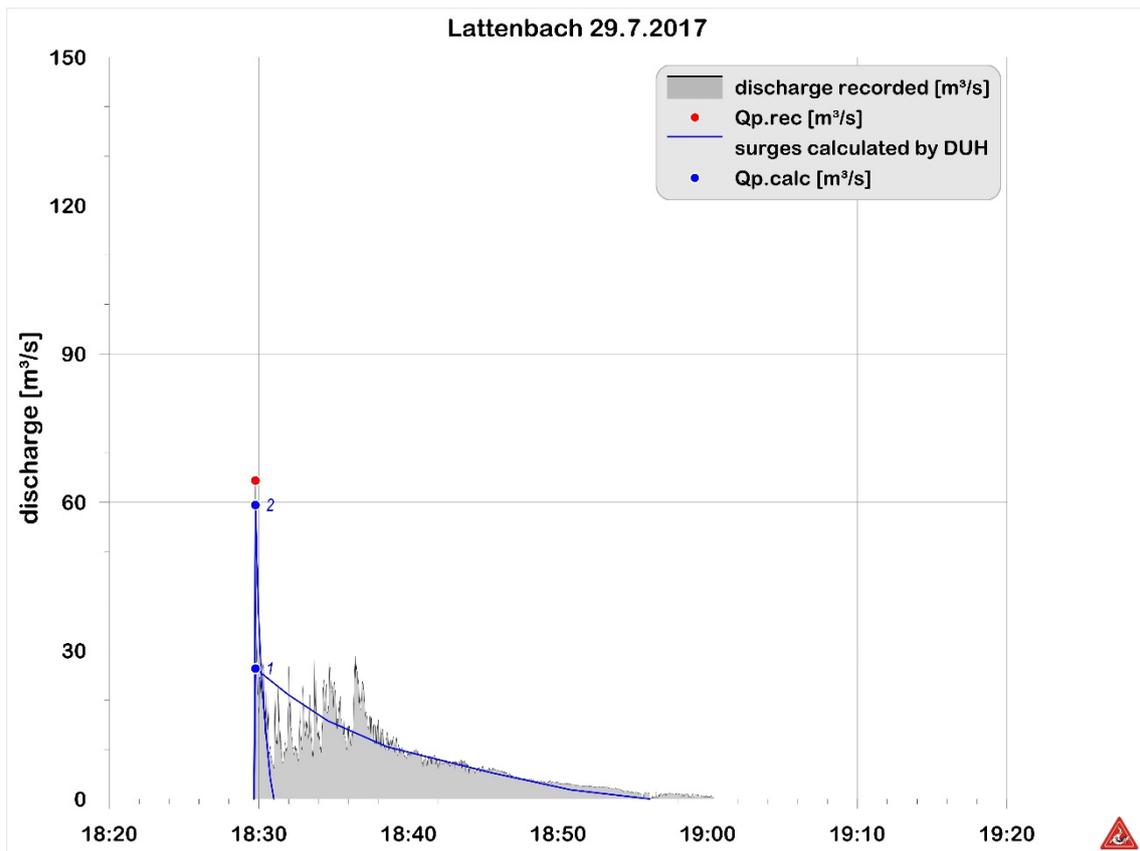
Anhang 44: #1.2.1-1.2.4



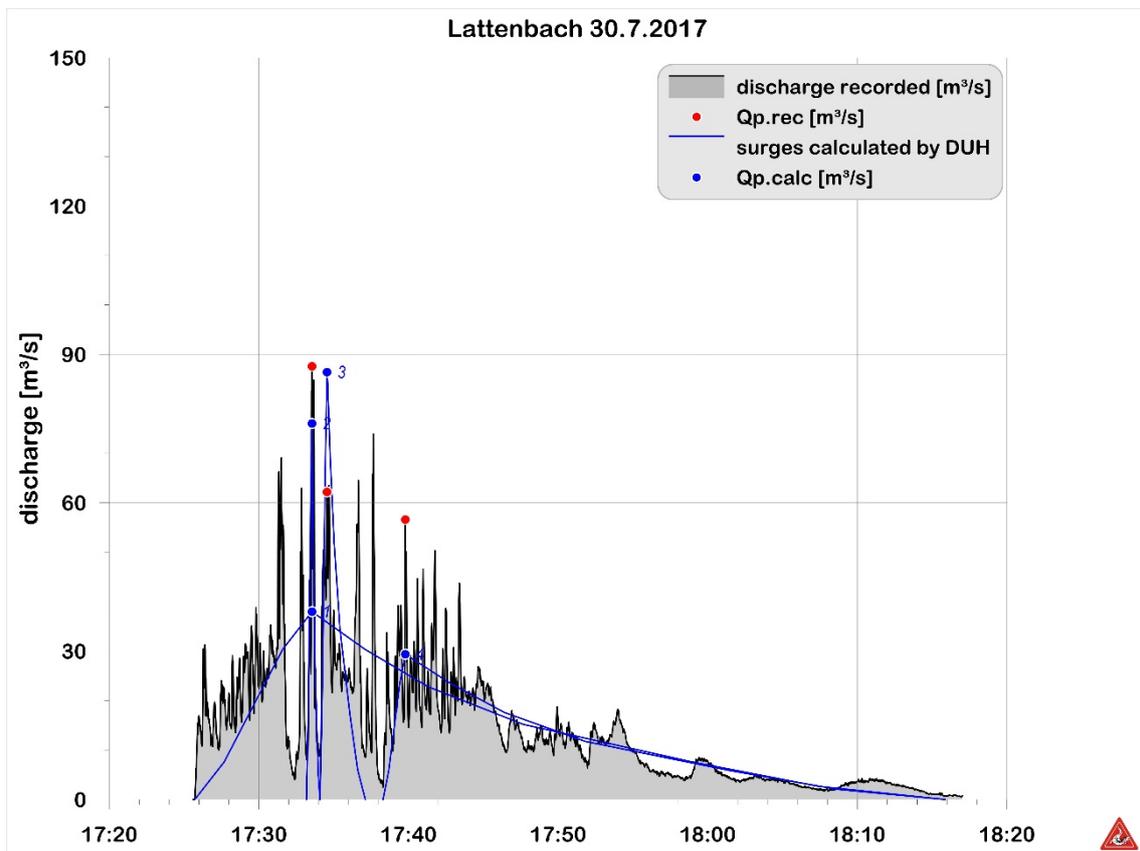
Anhang 45: #1.3.1



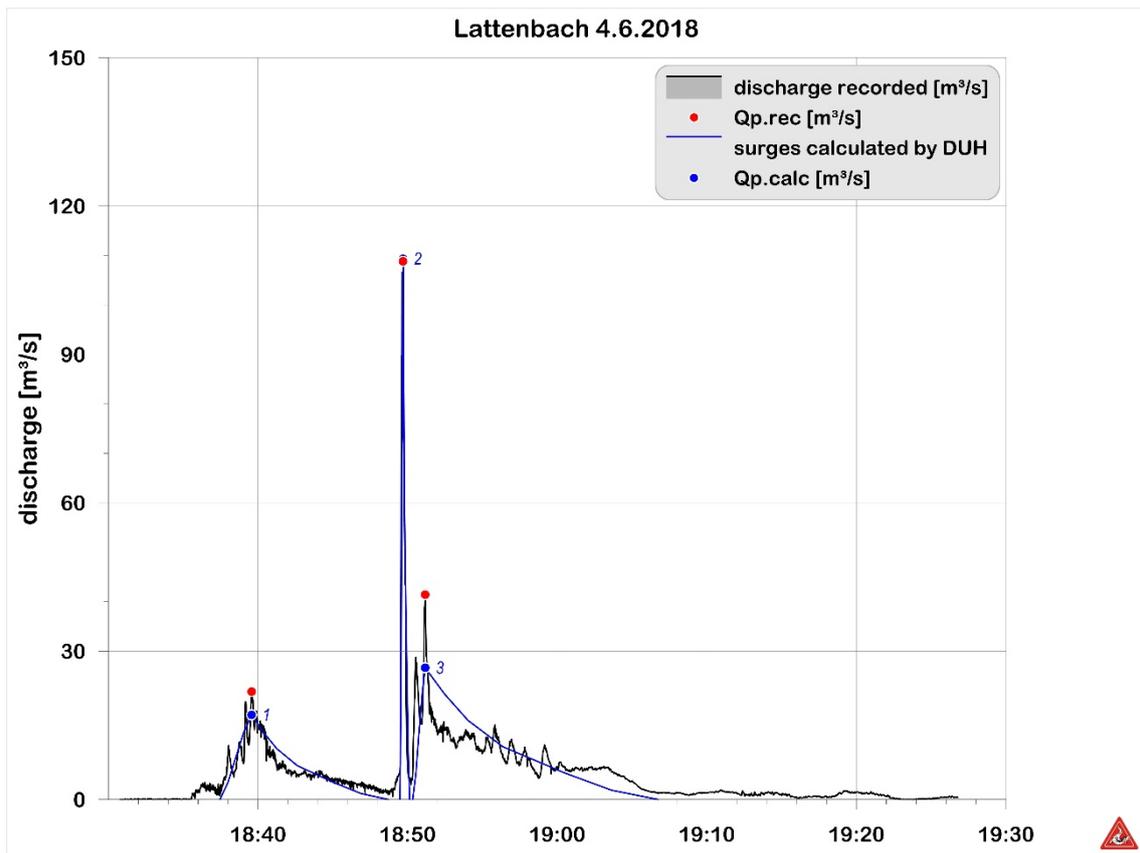
Anhang 46: #1.4.1-1.4.7



Anhang 47: #1.5.1-1.5.2



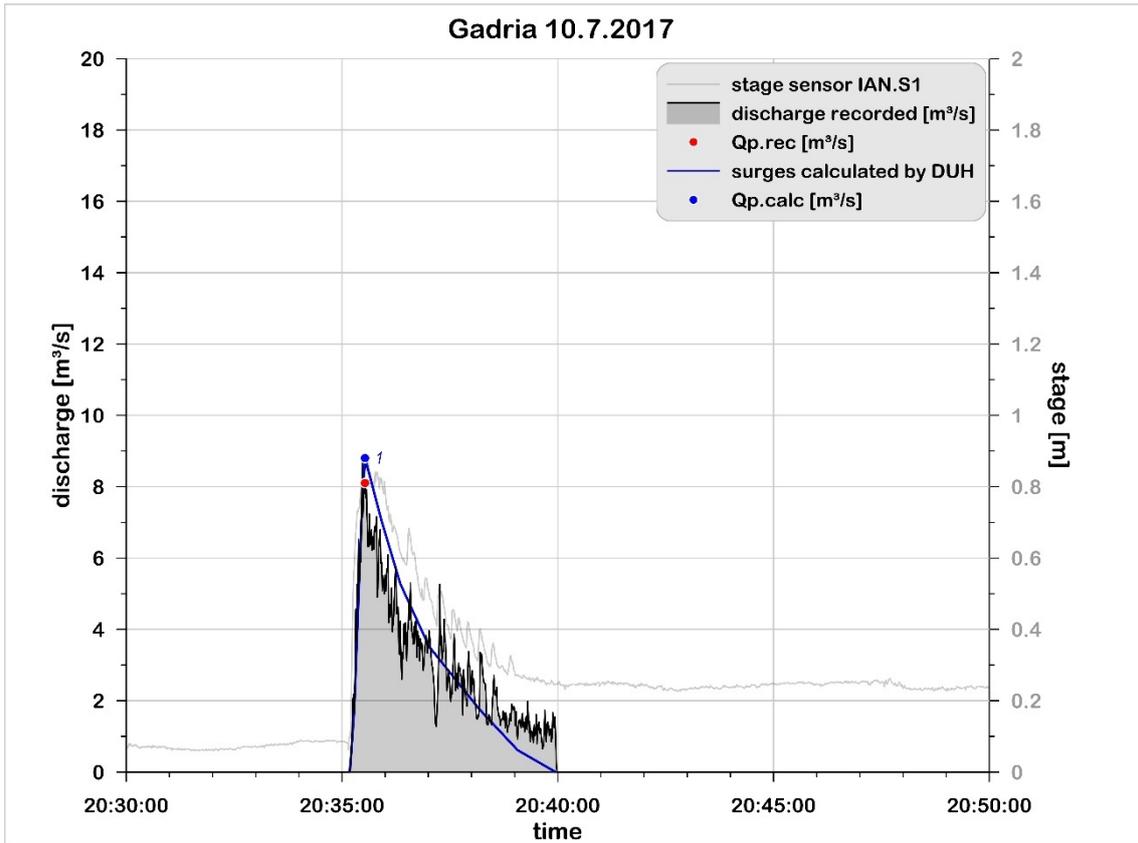
Anhang 48: #1.6.1-1.6.4



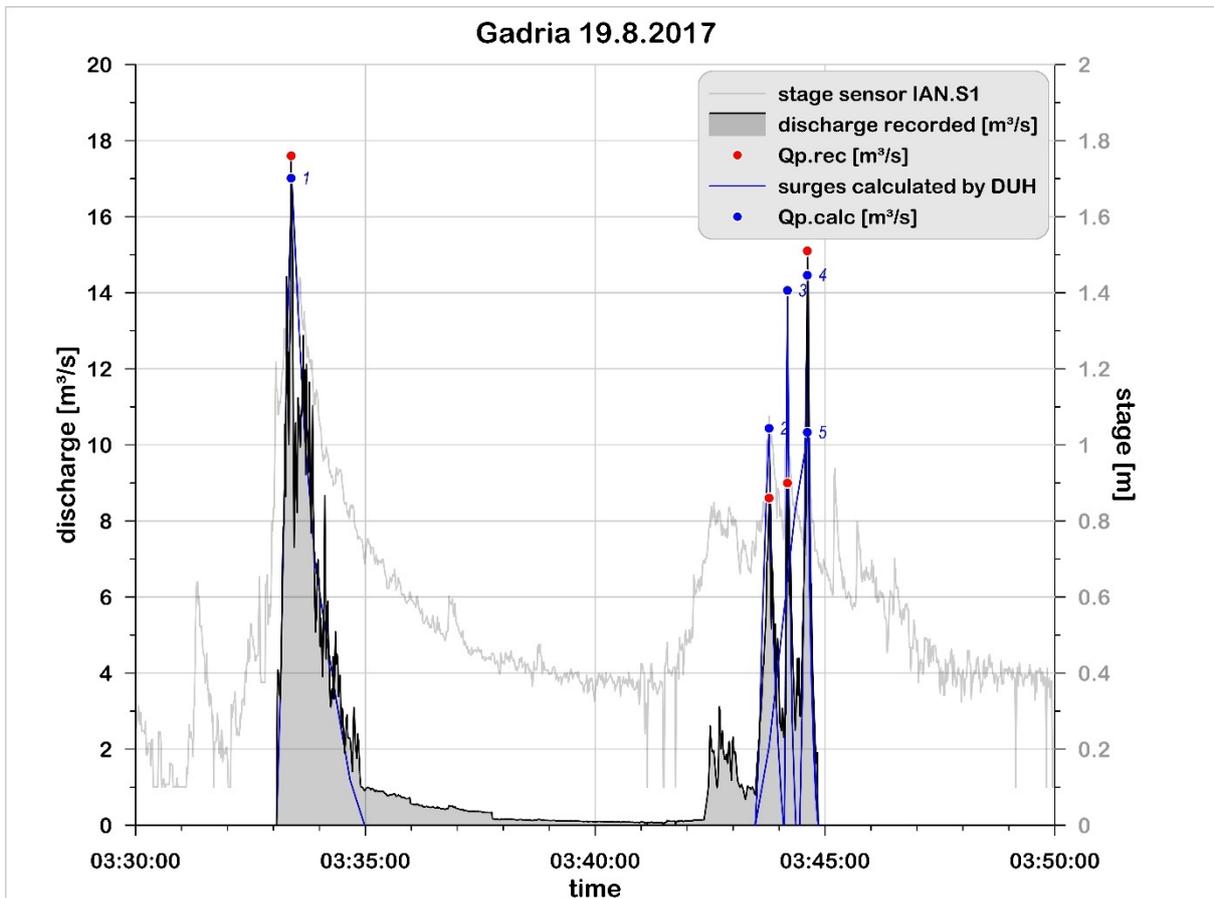
Anhang 49: #1.7.1-1.7.3



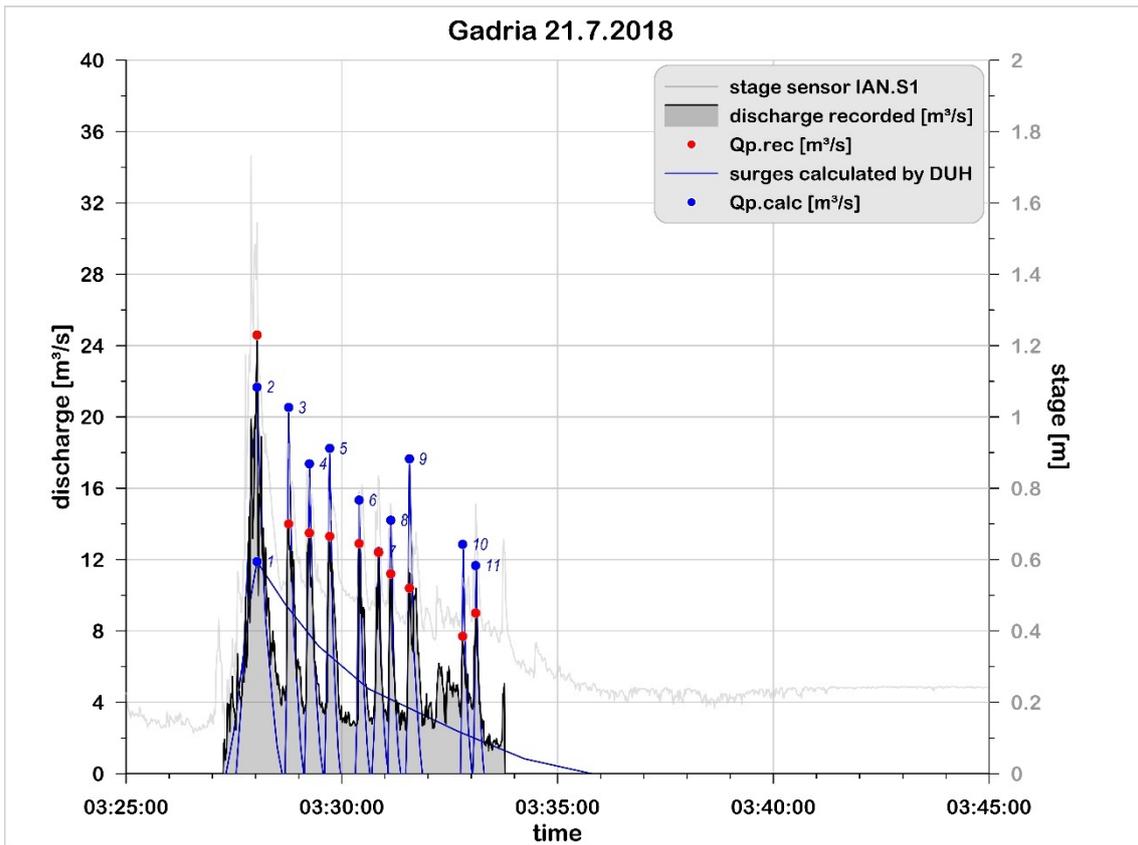
## 5.2 Gatria



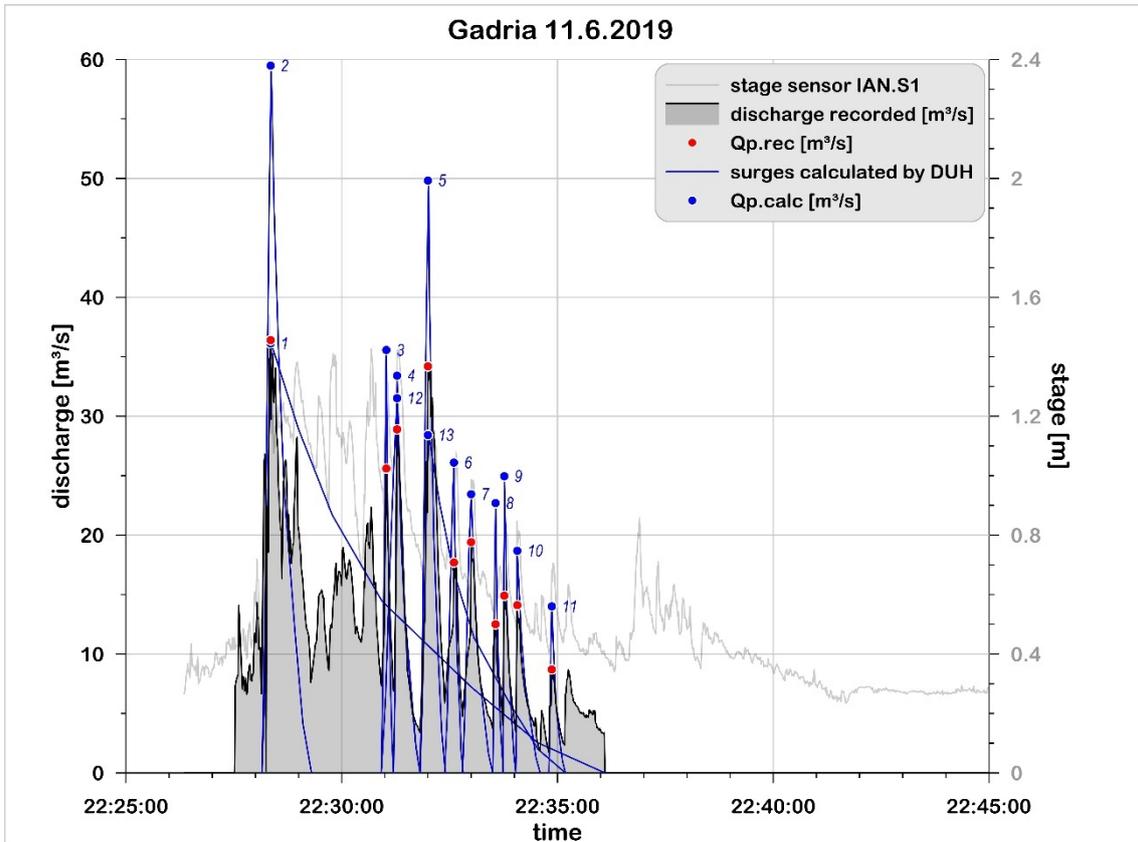
Anhang 50: #4.5.1



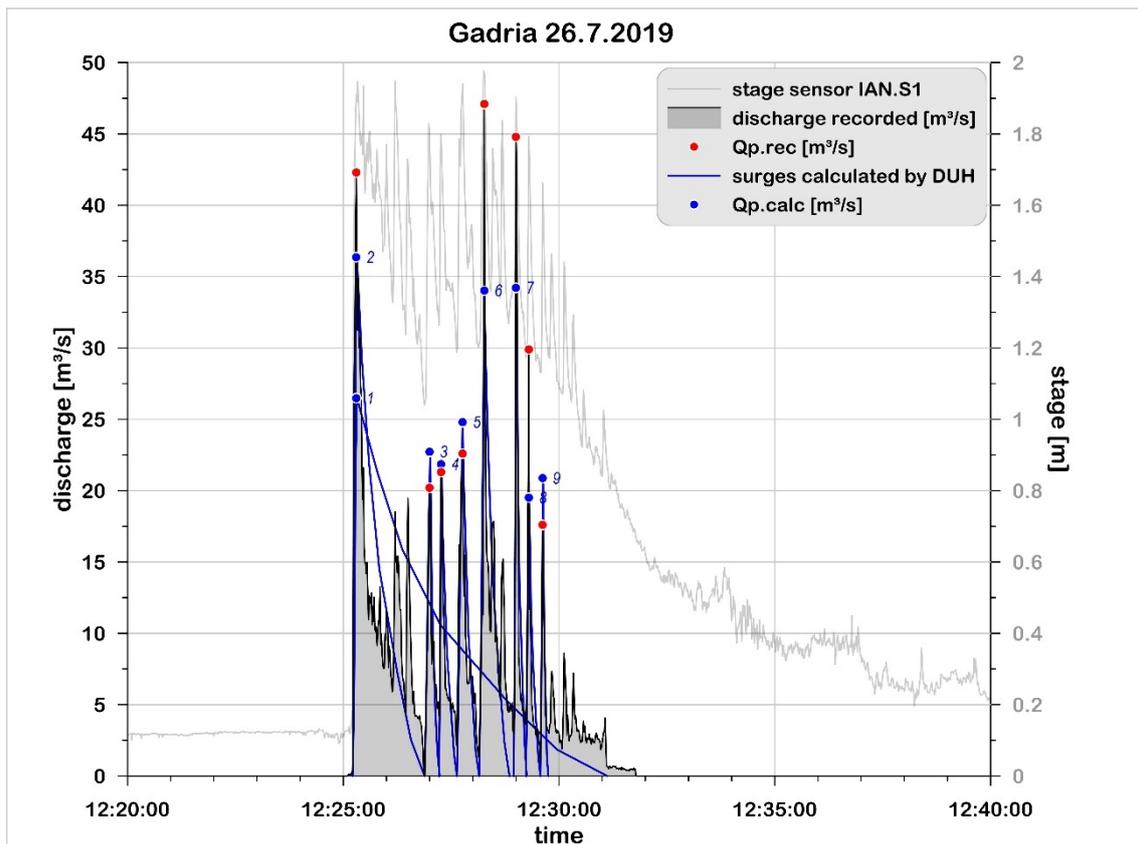
Anhang 51: #4.6.1-4.6.5



Anhang 52: #4.7.1-4.7.11



Anhang 53: #4.8.1-4.8.13



Anhang 54: #4.9.1-4.9.9



### Anhang 55: Daten von Spitzenabflüssen und Murenvolumina aus dem Wildbach- und Lawinenkataster

Leitprozess	V <sub>MG</sub> [m <sup>3</sup> ]	Q <sub>p</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Leitprozess	V <sub>MG</sub> [m <sup>3</sup> ]	Q <sub>p</sub> [m <sup>3</sup> /s]
Murartiger Feststofftransport	15000	50	Murgang	18000	35
Murartiger Feststofftransport	800	10	Murgang	1000	50
Murgang	2000	30	Murartiger Feststofftransport	2000	20
Murartiger Feststofftransport	1000	10	Murartiger Feststofftransport	5500	15
Murartiger Feststofftransport	1800	34	Murartiger Feststofftransport	8000	30
Murartiger Feststofftransport	10000	20	Murartiger Feststofftransport	1000	2
Murgang	2000	60	Murgang	300	10
Murartiger Feststofftransport	10000	25	Murgang	100	1
Murartiger Feststofftransport	400	6	Murartiger Feststofftransport	5000	15
Murartiger Feststofftransport	4000	24	Murartiger Feststofftransport	75	2.5
Murartiger Feststofftransport	2500	18	Murartiger Feststofftransport	1200	7
Murartiger Feststofftransport	2000	10	Murartiger Feststofftransport	80000	30
Murartiger Feststofftransport	1500	10	Murgang	2500	11
Murartiger Feststofftransport	200	3	Murgang	800	4
Murgang	21000	120	Murartiger Feststofftransport	1750	5
Murgang	35000	40	Murgang	1000	4
Murartiger Feststofftransport	2000	8	Murgang	7000	50
Murgang	13500	160	Murgang	2800	25
Murgang	8500	18	Murartiger Feststofftransport	75	2
Murgang	1500	10	Murgang	400	15
Murartiger Feststofftransport	5000	21	Murgang	120000	50
Murartiger Feststofftransport	500	4.5	Murartiger Feststofftransport	6000	12
Murartiger Feststofftransport	13000	40	Murartiger Feststofftransport	10000	40
Murgang	1000	6	Murgang	5500	20
Murartiger Feststofftransport	450	12	Murartiger Feststofftransport	50	3
Murartiger Feststofftransport	10000	45	Murgang	27000	43
Murgang	12000	100	Murgang	1000	6
Murgang	2000	12	Murgang	63000	150
Murartiger Feststofftransport	200	8	Murartiger Feststofftransport	23000	20
Murartiger Feststofftransport	4000	25	Murartiger Feststofftransport	700	8.5
Murartiger Feststofftransport	2000	8	Murartiger Feststofftransport	16500	24
Murgang	2500	10	Murartiger Feststofftransport	4000	7
Murartiger Feststofftransport	3000	10	Murartiger Feststofftransport	800	5
Murartiger Feststofftransport	7000	17	Murartiger Feststofftransport	6000	17
Murartiger Feststofftransport	6000	15	Murgang	1000	8
Murgang	5500	80	Murgang	5100	30
Murartiger Feststofftransport	5000	40	Murartiger Feststofftransport	6000	20
Murgang	2500	13	Murgang	13000	30
Murgang	20000	22	Murartiger Feststofftransport	600	10
Murgang	30000	500	Murgang	3000	90
Murartiger Feststofftransport	2000	5	Murgang	15000	25
Murgang	1300	10	Murgang	25000	60
Murartiger Feststofftransport	3800	20	Murartiger Feststofftransport	100	20
Murartiger Feststofftransport	8000	55	Murgang	3500	20



Murartiger Feststofftransport	20000	36	Murgang	15000	100
Murartiger Feststofftransport	10000	40	Murartiger Feststofftransport	3500	16.5
Murartiger Feststofftransport	1600	20	Murartiger Feststofftransport	100	5
Murgang	2000	7	Murartiger Feststofftransport	5500	25
Murgang	2000	60	Murgang	2500	50
Murartiger Feststofftransport	50	2	Murgang	700	21
Murartiger Feststofftransport	6000	20	Murartiger Feststofftransport	2500	8
Murartiger Feststofftransport	6000	150	Murartiger Feststofftransport	2500	50
Murartiger Feststofftransport	1000	21	Murgang	8000	30
Murartiger Feststofftransport	3000	30	Murgang	10000	70
Murgang	850	2.7	Murgang	60000	87
Murartiger Feststofftransport	10000	35	Murgang	12000	10
Murartiger Feststofftransport	700	4	Murartiger Feststofftransport	10000	5
Murgang	115000	100	Murgang	75000	50
Murartiger Feststofftransport	4000	35	Murgang	8000	10
Murartiger Feststofftransport	100	5	Murgang	5000	35
Murartiger Feststofftransport	13000	48	Murgang	3500	120
Murartiger Feststofftransport	4500	95	Murgang	75000	100
Murartiger Feststofftransport	4000	38	Murgang	5000	20
Murartiger Feststofftransport	2600	35	Murgang	15000	30
Murartiger Feststofftransport	2500	15	Murgang	5000	80
Murgang	3000	45	Murgang	50000	70
Murgang	2500	30	Murartiger Feststofftransport	2000	2
Murgang	15000	70	Murgang	2500	25
Murgang	32000	250	Murgang	40000	97
Murgang	400	17	Murgang	3000	50



Anhang 56: Daten von Spitzenabflüssen und Murenvolumina (Ikeda et al., 2019; Table 1)

Name	Country	Peak Discharge [m³/s]	Magnitude (Total volume of Debris Flow) [m³]
Ishihara Creek	JP	195	57290
Wada River	JP	336	3427
	JP	231	1340
Hiragi Creek	JP	78	11388
Matano River	JP	263	7787
Nishishirahama River	JP	21	6149
Higashikusuzaki River	JP	178	5676
	JP	429	9653
Kusuzuki River	JP	90	409
	JP	28	199
	JP	56	757
Moriyukiobtani River	JP	260	23436
Gamaharasawa Creek	JP	661	54333
Atsumari River	JP	5037	296173
Harihara River	JP	7705	322812
Funaishi River A	JP	1526	21915
Funaishi River B	JP	5066	40419
Takesawa Creek	JP	403	13728
	JP	239	18035
	JP	325	33229
	JP	190	32378
Nashizawa Creek	JP	543	635376
	JP	735	861117
Stava River	IT	5341	597346
Nakakura River	JP	271	9619
Oomoji River	JP	110	3541
Yasu River	JP	51	5974
Sarutaki River	JP	67	12066
Kono River	JP	199	25522
Doogahara River	JP	101	2951
Shimogasaki River	JP	209	6363
Name River	JP	83 - 1556	23900 - 110000
	JP	737	28.519
Nojjiri River	JP	1 - 827	296 - 994718
Mochiki River	JP	15.4 - 122.4	1871 - 40369
Harumatsu River	JP	5	2165
Furusato No.1 River	JP	6.8 - 59.9	3232 - 7358
Arimura River	JP	19.6 - 335.3	9832 - 70145
Kurokami River	JP	8.9	9641
Kamikamihorisawa Creek	JP	15.1 - 100	224.6 - 6062
Mt. Usuzan	JP	54.5 - 98.2	3850 - 3927
Mt. Tokachidake	JP	1272	13877780
Jiangjia Creek	PRC	50.4 - 1142	7826 - 1120495



Hunshui Gully	PRC	3.9 - 326.1	4425 - 294022
Nojiri River Sabo Dam No.8	JP	25.3 - 233.4	9579 - 129619
Arimura Sabo Dam No.3	JP	117	50389
Mirunashi Sabo Dam No.1	JP	8 - 420	14000 - 450000
Alberta Creek	CA	37.2 - 580.7	9550 - 43915