

Vorläufige Erkenntnisse aus 1:1 Murenversuchen: Prozessverständnis und Belastungsannahmen

Hübl Johannes

1 Einleitung

Ereignisse in Wildbächen können in kürzester Zeit große Volumina an Feststoffen umsetzen. In wenigen Minuten werden einige tausend bis mehrere hunderttausend Kubikmeter an so genanntem Geschiebe in den Talbereich transportiert und dort abgelagert. Da solche Ereignisse jedoch selten sind und zumeist sehr lokal auftreten, ist es äußerst schwer, diese Verlagerungsprozesse zu verstehen und messtechnisch zu erfassen.

2 Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten

In Wildbächen können unterschiedliche Verlagerungsprozesse auftreten, an denen Feststoffe unterschiedlicher Größe (Fein- und Grobmaterial) sowie Wasser beteiligt sind (Abbildung 1).

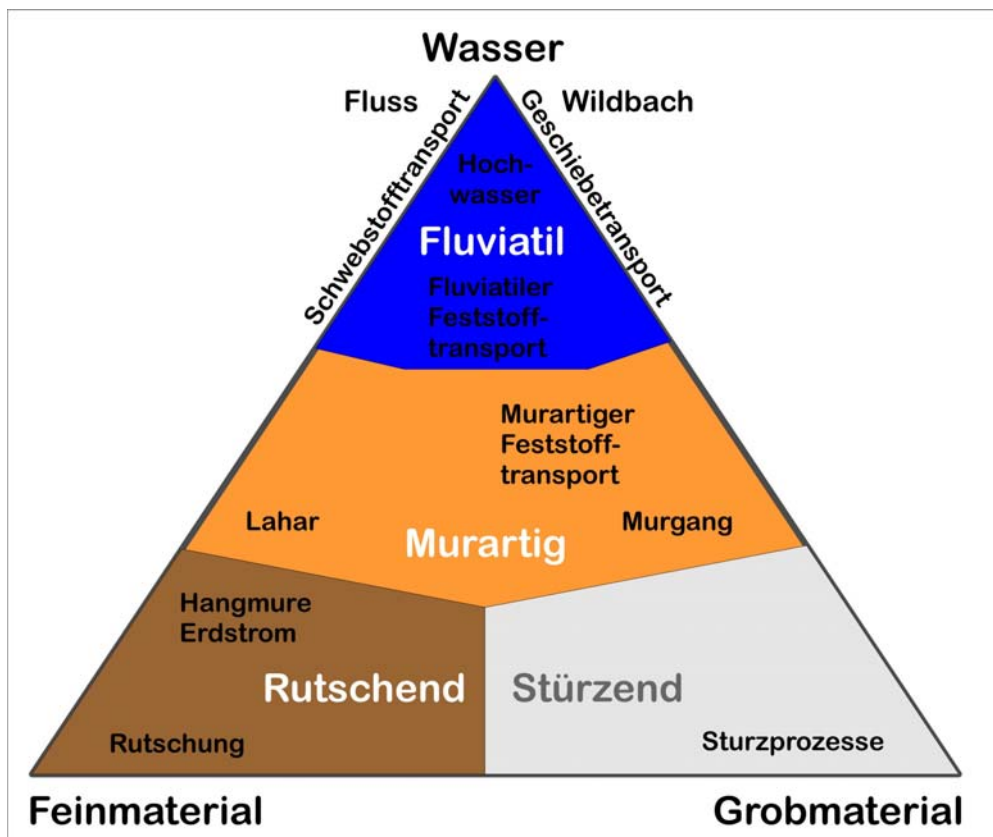


Abbildung 1: Verlagerungsarten in Wildbacheinzugsgebieten

Als Randbedingung kann einerseits das Volumen des Transportmediums, andererseits das mobilisierbare Feststoffvolumen betrachtet werden. So spricht man von transportlimitiert, wenn die Transportkapazität den Abtrag von Feststoffen begrenzt, von feststofflimitiert hingegen, wenn das Angebot an Feststoffen gering ist, und so die Transportkapazität nicht ausgeschöpft wird.

Allgemein kann festgehalten werden, dass sich die Verlagerungsprozesse an einem Ort (z.B. an einem Querprofil im Gerinne) während eines Ereignisses ändern, sich aber auch zum gleichen Zeitpunkt unterschiedliche Verlagerungsprozesse entlang des Längsprofils ausbilden können (Abbildung 2).

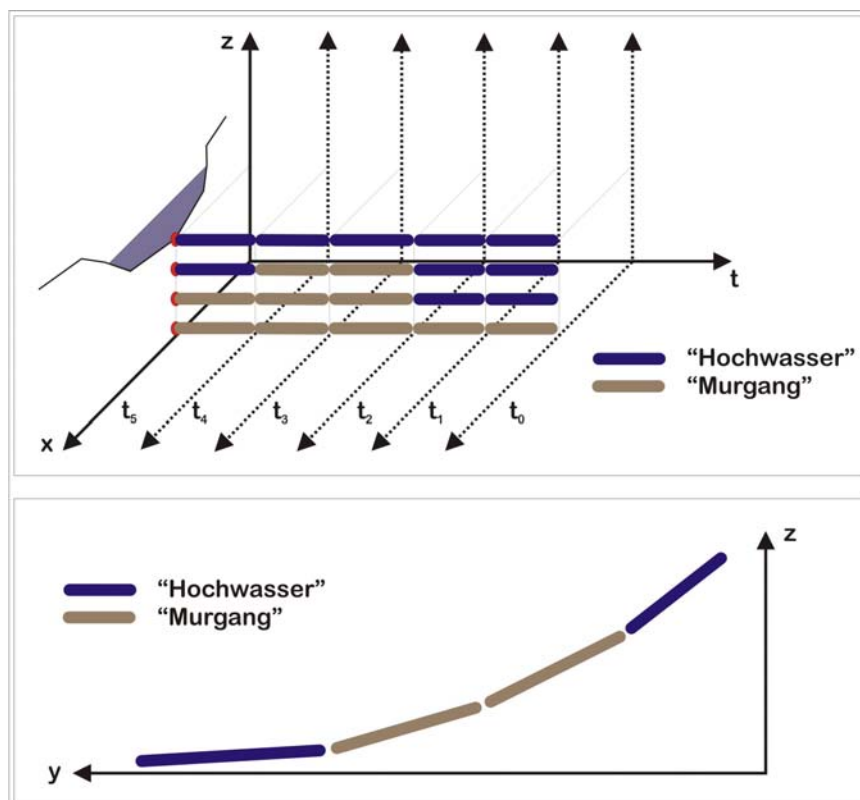


Abbildung 2: Zeitliche und räumliche Veränderungen des Verlagerungsprozesses während dem Ereignis entlang eines Gerinnes

Es ist aber **nicht** möglich, dass sich an einem Ort zur gleichen Zeit unterschiedliche Verlagerungsprozesse einstellen. Beim Aufeinandertreffen unterschiedlicher Verlagerungsprozesse an einem Ort zur gleichen Zeit (z. B. Zusammenfluss) tritt sofort ein neuer Verlagerungszustand (Prozess Routing) ein, der durch die äußeren Rahmenbedingungen bestimmt wird.

Ein Wildbachereignis wird anhand des charakteristischen Verlagerungsprozesses klassifiziert. Dieser kann innerhalb des Ereigniszeitraumes auch nur für eine kurze Zeit aufgetreten sein, hinterlässt aber die markantesten Spuren (Abbildung 3).

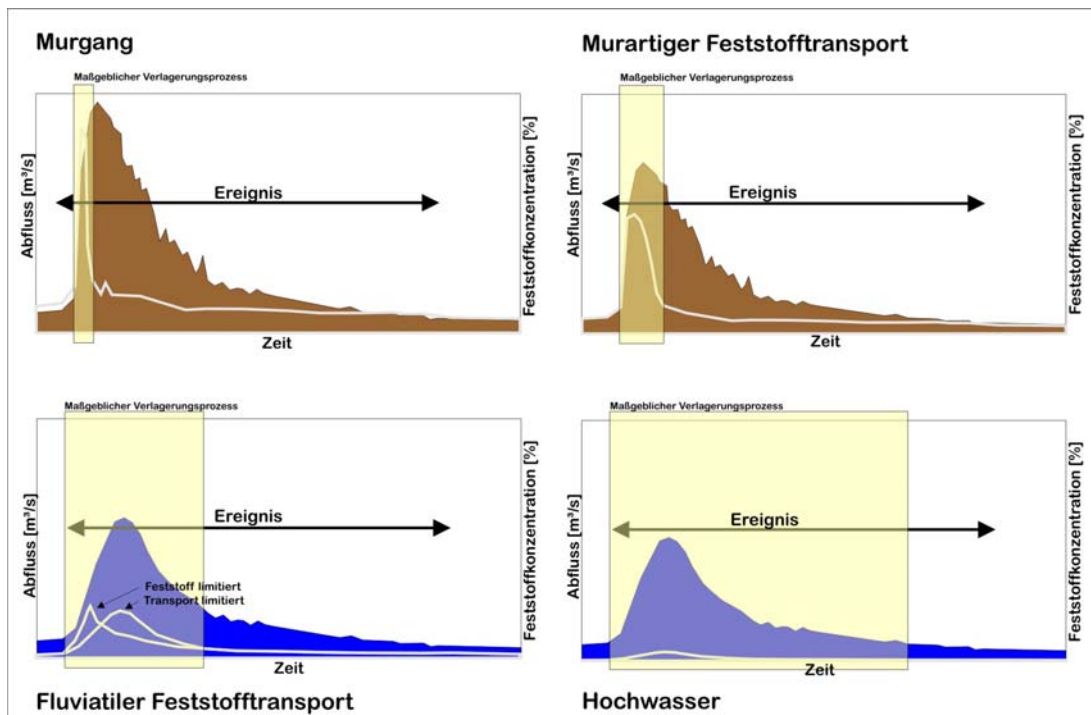


Abbildung 3: Typische Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten

2.1 Hochwasser (flood)

Hochwasser ist ein zeitlich begrenzter Abfluss mit hoher Wasserführung, bei dem ein Pegelstand oder Abfluss in einem bestimmten Querprofil über einem (statistisch) festgelegten Wert liegt. Die Feststoffe sind durch ihre sehr geringe volumetrische Konzentration für die Berechnung des Abflusses von untergeordneter Bedeutung. Während Schwebstoffe relativ homogen im Querprofil verteilt sind, wird das Geschiebe sohlennah verlagert, wobei die auf diese Weise transportierten Korngrößen je nach Fließgewässertyp variieren. Die Dichte des Wasser-Feststoffgemisches ist im Vergleich zu Wasser nicht signifikant erhöht und kann mit 1000 kg/m^3 angenommen werden. Möglicher Schaden entsteht primär durch Wasser und sedimentierte Schwebstoffe.

2.2 Fluvialer Feststofftransport (fluvial sediment transport)

Der fluviale Feststofftransport zeichnet sich durch das Vorhandensein von einem merkbareren Feststofftransport, dem Schwebstoff- und dem sohlennahen Geschiebetransport, aus. Die dabei transportierten Korngrößen hängen von den zur Verfügung stehenden Korngrößen sowie den hydraulischen Belastungen infolge des Abflussvorganges ab. Die Dichte des Zweiphasen Gemisches liegt unter 1300 kg/m^3 , die volumetrische Feststoffkonzentration erreicht Werte bis zu 20 Prozent. Die Geschwindigkeit des transportierten Geschiebes liegt unter der des turbulenten

Wasserabflusses, das Fließverhalten ist newtonisch. Die Ablagerungen sowohl im als auch neben dem Gerinne bilden sich in Form von flachen Lappen und Fächern aus, wobei eine Sortierung zu beobachten ist.

2.3 Murartiger Feststofftransport (*debris flood*)

Murartiger Feststofftransport leitet zu den Murgängen über. In der Fachliteratur wird diese Abflussform als auch stark geschiebeführendes Hochwasser, debris flood, immature debris flow, hyperconcentrated flow etc. bezeichnet. Die Feststoffe sind unabhängig von der Korngröße über den ganzen Abflussquerschnitt verteilt. Auch größere Kornfraktionen (Dezimeter) bewegen sich annähernd mit der Geschwindigkeit des Wassers. Die Dichte des Gemisches übersteigt zumeist 1300 kg/m^3 , wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration über 20 % erreicht werden kann. Das Fließverhalten kann angenähert als newtonisch bezeichnet werden. Der theoretische Reinwasserabfluss ist mit einem Faktor >1 zu multiplizieren, um den Abfluss des Gemisches bestimmen zu können. Murartiger Feststofftransport tritt in alpinen Einzugsgebieten sehr häufig auf und wird in historischen Dokumenten zumeist als Mure bezeichnet. Als Ablagerungsformen (Übermuring) finden sich unsortierte und korngestützte Geröllbänke und Lappen, das Feinmaterial ist ausgeschwemmt. Die Ablagerungen sind bereits kurz nach dem Ereignis begehbar.

2.4 Murgang (*debris flow*)

Als Murgang (Mure, Rufe) wird ein langsam bis schnell abfließendes breiartiges Gemisch von Wasser, Feststoffen und Wildholz definiert, das in mehreren Murschüben abgehen kann, einer bereits ausgebildeten Tiefenlinie folgt und eine typische Bewegungsform sowie charakteristische Ablagerungsformen aufweist. Das Fließverhalten ist nicht newtonisch, die Dichte des Gemisches übersteigt 1700 kg/m^3 , wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration über 40 % typisch ist. Die mittransportierten Feststoffe sind unabhängig von der Korngröße über den ganzen Abflussquerschnitt verteilt, der theoretische Reinwasserabfluss ist mit einem Faktor >1 zu multiplizieren, um den Abfluss des Gemisches bestimmen zu können. In den Ablagerungen (Murkopf, Murlappen, Murzungen, Murfirste oder Levees) lässt sich keine Sortierung der Feststoffe beobachten.

2.5 Unterscheidungskriterien

Tabelle 1: Eigenschaften unterschiedlicher in Wildbacheinzugsgebieten auftretender Prozesse (Aulitzky 1980/1984, Costa 1984, Hungr et al. 2001, Pierson & Costa 1987 u.a.)

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 ³	<1300 kg/m ³	1300-1700 kg/m ³	>1700 kg/m ³
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, Murfirste (Levéés) 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 Versuche Gaschira / Schesa

Im Schesatobel, einem 60 ha großen Erosionskessel westlich von Bludenz, besteht für das Institut für Alpine Naturgefahren die günstige Gelegenheit, eine Mure künstlich auszulösen zu können. Auf den ab 2002 durchgeführten Versuchen folgte 2004 der Erste, bei dem eine massiv konstruierte Messstation in der Murversuchsstrecke eingesetzt wurde, die imstande sein sollte, die auftretenden Murdrücke aufzuzeichnen. Erstmals wurde bei diesem Versuch auch ein akustischer Sensor zur Erfassung von Infraschallemissionen einer Mure eingesetzt.

Der 2006 durchgeführte Murversuch hatte im Wesentlichen auch die Aufgabe, die Druckwirkung der ausgelösten Murmassen aufzuzeichnen und die schon vorhandene Datenbasis der Infraschallemissionen eines Murprozesses zu vergrößern.

Vor jedem Murversuch wird im Erosionskessel ein künstlicher See angelegt, 2006 hatte dieser ein Volumen von rund 2000 m³ Wasser. Durch das Aufreißen des Sees wird in der unterliegenden Gerinnestrecke, die aus geschüttetem Material besteht, eine Mure ausgelöst. In der anschließenden Transitstrecke ist die Messstation angeordnet, die Ablagerung erfolgt in einem abgedämmten Bereich, um den Vorfluter nicht zu sehr mit Schwebstoffen zu belasten. In der Transitstrecke befinden sich nicht nur die auf der Messstation montierten Drucksensoren (Druckzellen), Radar und Infraschallsensoren für die Pegelmessung, eine Videokamera für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung und ein Porenwasserdrucksensor sondern auch in sicherer Entfernung ein im Infraschallbereich arbeitendes Mikrofon, ein 2-D Laserscanner für die Erfassung des Ereignisses im Querprofil, drei Geophone, und die zentrale Datenerfassung.

MUR.EXPO 2006

9. Mai 2006

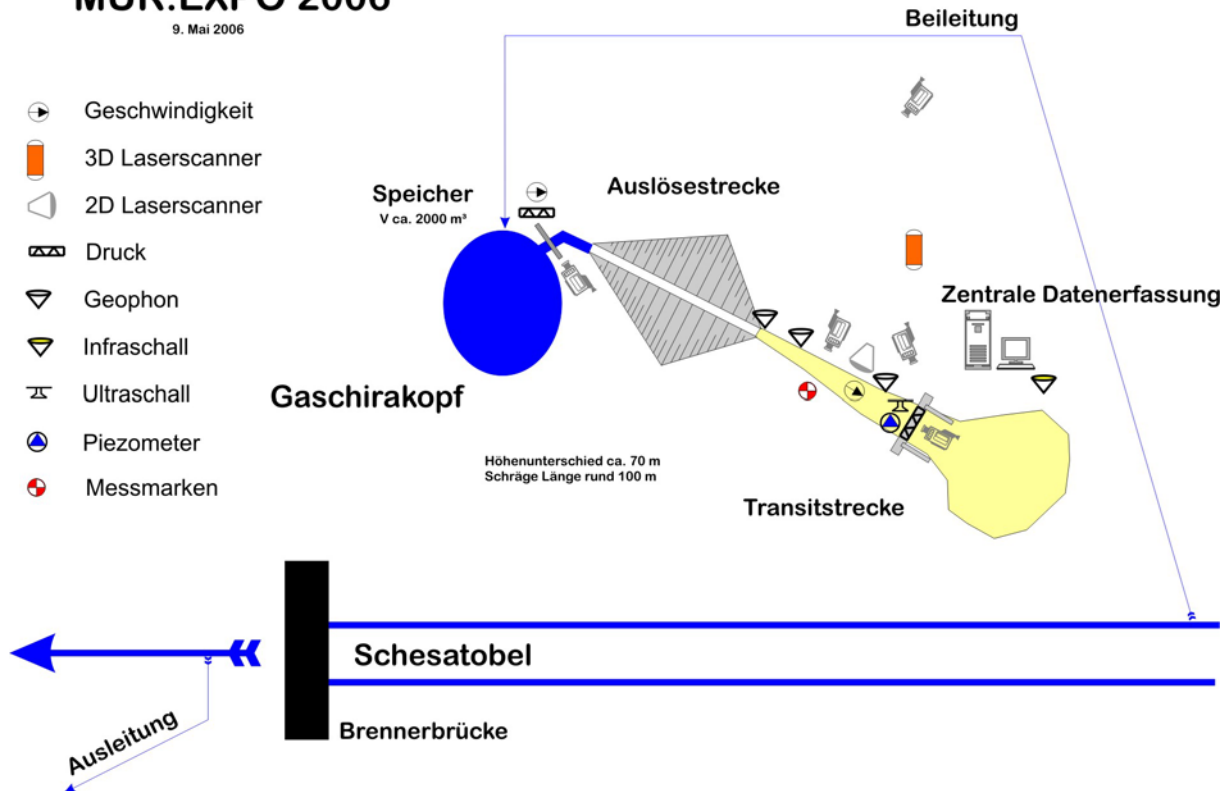


Abbildung 4: Schema der Versuche vom Mai 2006 in der Schesa

4 Messergebnisse

Wie sich 2006 beim Versuch zeigte, war es nicht gelungen, einen Murgang im engeren Sinn auszulösen. Stattdessen stellte sich murgangartiger Feststofftransport ein. Dies kann auf die, im Gegensatz zu dem Versuch 2004, geringe Menge an mobilisierbarem Material zurückgeführt werden (feststofflimitiert).

4.1 Massenbilanz

Die Bilanzierung der an einem Murereignis beteiligten Flüssigkeits- und Feststoffmassen ist ein wesentliches Hilfsmittel zur Unterscheidung der auftretenden Abflussprozesse.

Beim 2006 ausgelösten Ereignis wurde ein Gesamtvolumen von ca. 1300 m³ (Wasser und Feststoffe) umgesetzt, wobei der größte Teil der Feststoffe in den ersten drei Minuten des Murversuches verlagert wurden. Danach konnte fast nur noch fluviatiler Feststofftransport beobachtet werden. Aus der Massenbilanz ist die Abhängigkeit des ausgelösten Murereignisses von dem zu Verfügung stehenden Feststoffmaterial gut zu erkennen. Das Volumen des gesamten abgelagerten Geschiebes, aufgenommen mit einem 3-D Laserscanner nach dem Versuch, ergab

ein Volumen von ca. 700m³, die Geschiebeablagerungen erreichte dabei eine Länge von 60 m bei einer Ablagerungshöhe von bis zu 2.5 m.

Aus der durchgeführten Pegelmessung (Ultraschall), lässt sich für die Massenbilanz der Abfluss (Q_{Gesamt}) und aus den Abflussmessung beim Speichersee die Ganglinie Wasser (Q_{Wasser}) ermitteln. Diese zwei Messungen dienen als Abschätzung für den Feststofftransport ($Q_{\text{Feststoffe}}$) und die Erhöhung des Abflusses durch das Geschiebe ($Q_{\text{Gesamt}}/Q_{\text{Wasser}}$).

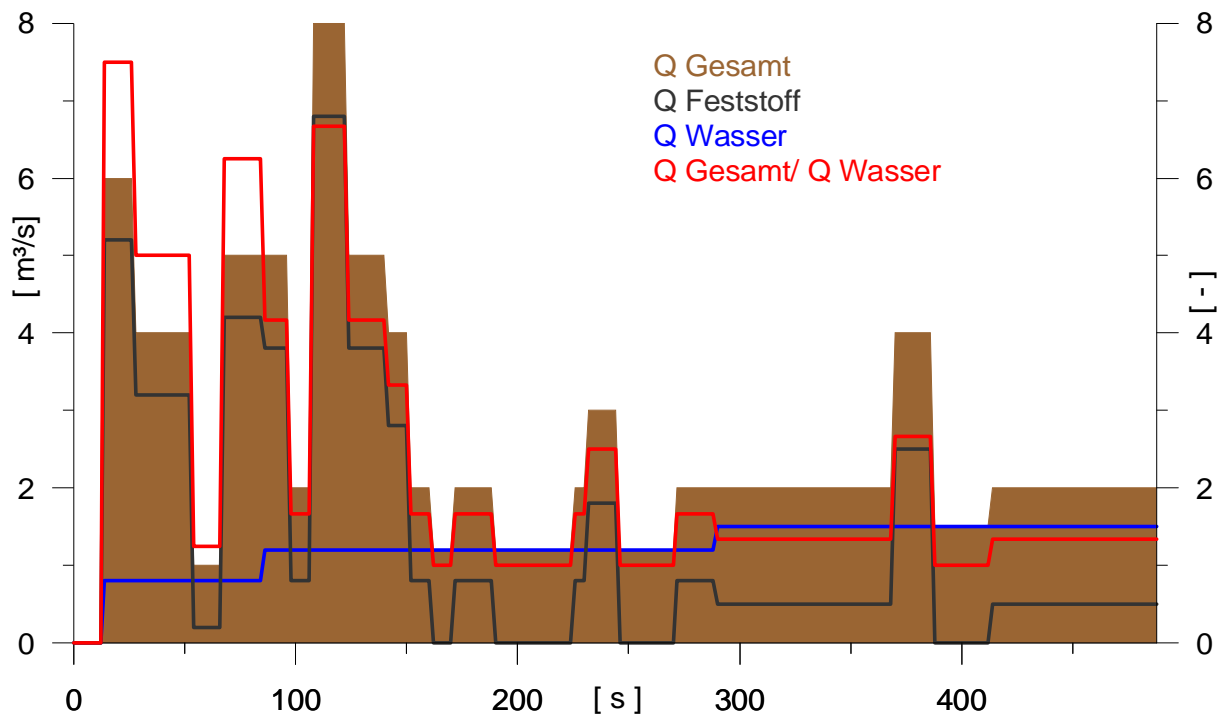


Abbildung 5: Abflussganglinien Wasser und Feststoffe des Murversuch 2006

4.2 Belastungen

Drucksensoren, wie sie beim Murversuch eingesetzt werden, beruhen auf dem piezoresistiven Effekt. Dabei werden in einer aus piezoaktiven Materialien bestehenden Messzelle Druckänderungen als Ladungsverschiebungen im Kristallgitter wirksam. Diese können gemessen werden und in ein elektrisches Signal umgeformt werden. Auf diese Drucksensoren wird für den Murversuch eine Stahlplatte von 300 x 400 mm geschraubt. Geschützt von Stahlprofilen werden diese Messeinrichtungen als Druckzellen bezeichnet und auf der im Gerinne eingebauten massiven Messstation vertikal montiert.



Abbildung 6: Montierte Druckzellen auf der Messstation. Rechts der Drucksensor in der Zelle noch ohne und links schon mit angeschraubter Druckplatte.

Für die Analyse der dynamischen Druckkomponente wurden die von den Druckzellen während des Murversuches aufgezeichneten Druckspitzen ausgewertet, wobei erst die gemeinsame Betrachtung der aufgezeichneten Druckdaten mit den aus der Videoanalyse ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten eine Auswertung der dynamischen Druckwirkung ermöglichte.

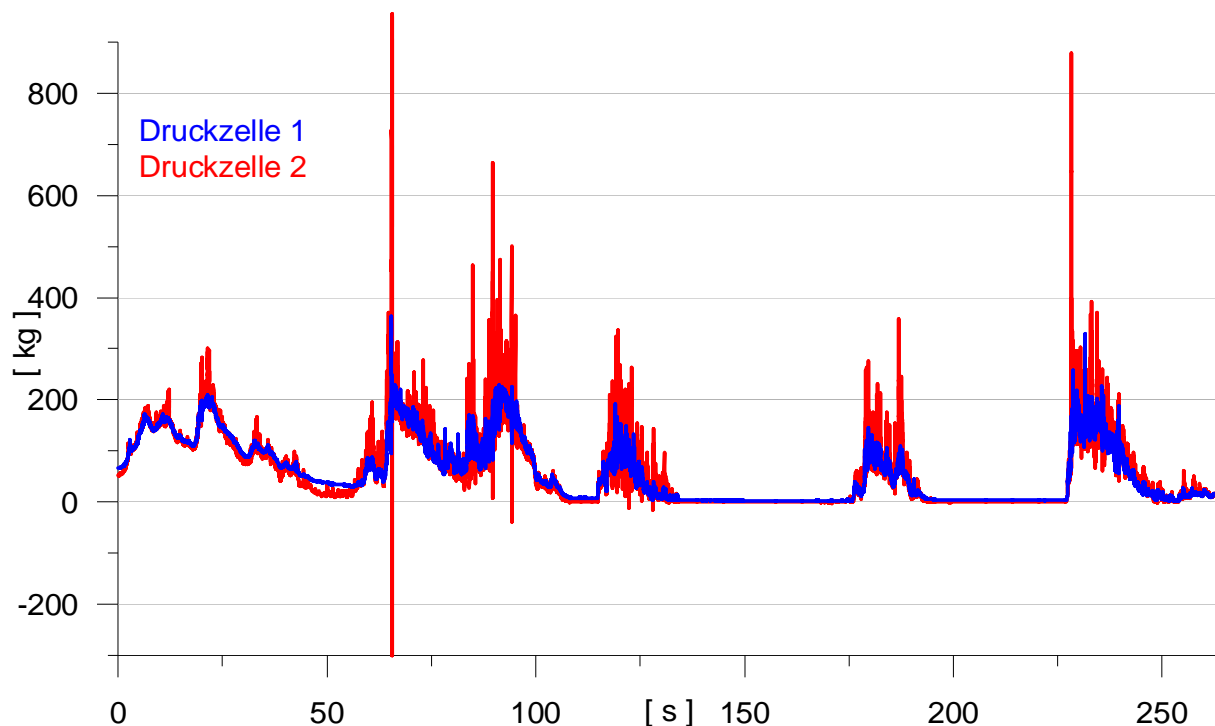


Abbildung 7: Graph der Druckzellen 1 und 2 aus dem Murversuch 2004

Unabhängig vom Zeitpunkt und der vollständigen oder nur teilweisen Beaufschlagung der Zellen wurde abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit der jeweils maximale Wert der einzelnen Murschübe für die Analyse verwendet.

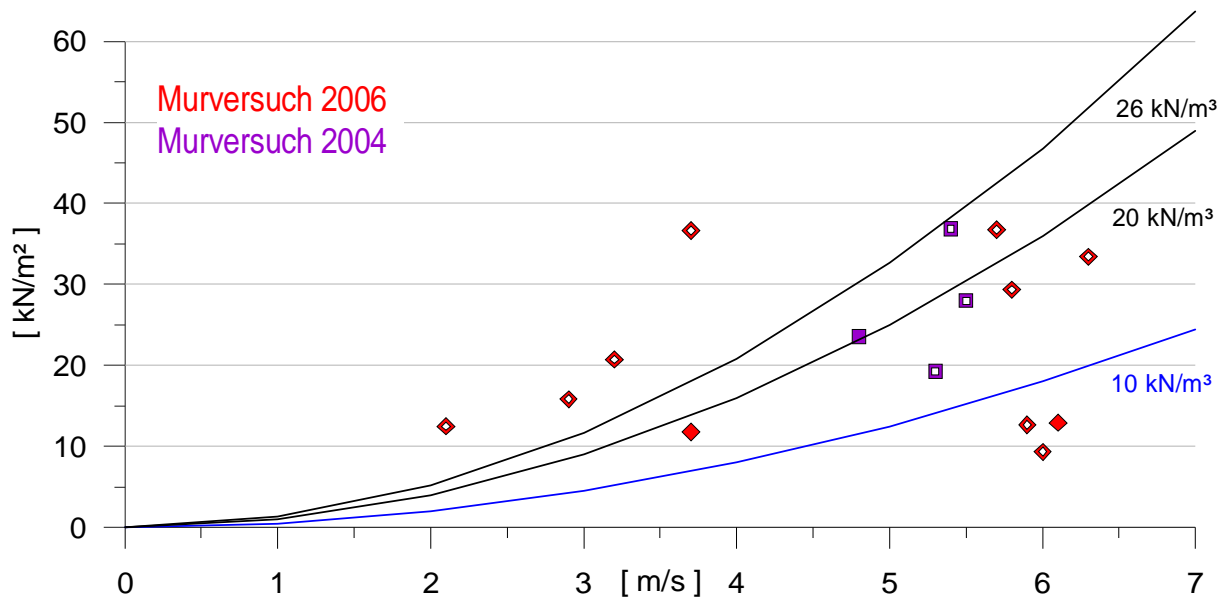


Abbildung 8: Dynamischer Druck verursacht durch einzelne Murschübe 2004 und 2006, im Vergleich mit dem theoretischen Staudruck von Flüssigkeiten unterschiedlicher Wichten

Im Vergleich mit dem Staudruck einer Modellflüssigkeit mit Wichten von 10, 20, und 26 kN/m³ ist die dynamische Druckwirkung der aufgezeichneten Murschübe vor allem in Bereichen geringer Geschwindigkeit doch entscheidend größer. Dieser Unterschied kann nicht alleine auf eine größere Dichte der Murmassen zurückgeführt werden, sondern auch auf eine Art Stoßwirkung. Die von den Druckzellen während des Murversuches aufgezeichneten Drücke zeichnen sich durch eine flächige Belastung der Zellen aus, wogegen ein Einschlag (Impact) eines einzelnen Steines punktuell wirkt. Diese Differenzierung scheint unbedingt notwendig, um eine möglichst objektive Aussage über die unterschiedlichen Kraftwirkungen während eines Murprozesses zu ermöglichen.

Die Einschläge einzelner Steine auf den Druckzellen verursachten Kraftspitzen bis 8 kN bei einer Wirkungszeit von nur wenigen hundertstel Sekunden. Die absolute Obergrenze eines möglichen Impacts wurde mit einer Simulation (eine Kugel mit einer Masse von 1360 kg prallt mit 6m/s gegen ein starres Hindernis) zu bestimmen versucht. Diese Simulation basierte schon auf Erkenntnissen und Parametern aus dem Murversuch 2004. Das Ergebnis fällt mit aufgezeichneten 750 kN erwartungsgemäß groß aus, und zeigt auch die starken Schwankungen solcher Betrachtungen. Solche Ereignisse müssen derzeit simuliert werden, weil die

verwendeten Drucksensoren auf derartige Kräfte nicht ausgelegt sind (Druckzelle bis max. 1000 kg/m²) und auch die massiv konstruierte Messstation einen solchen theoretisch möglichen Volltreffer nicht überstanden hätte.

Die am Ende des Murversuches 2006 hauptsächlich durch fluviatilen Feststofftransport entstandenen Geschiebeablagerungen verursachten eine statische Belastung der Druckzellen. Diese liegen aber im Rahmen der im Erdbau üblichen Berechnungsansätze.

4.3 *Signalanalyse Infrasschalldaten*

Es ist bekannt, dass eine sich bewegende Mure Vibrationen erzeugt. Diese Vibrationen wiederum produzieren Schallwellen im hörbaren und Infrasschall- Bereich. In Luft kann sich eine von einem Murereignis emittierte Infrasschallwelle über große Distanzen mit nur relativ kleinen Verlusten ausbreiten, wobei das aufgezeichnete Frequenzspektrum des Signals stark von der Wasser- Feststoffverteilung des Ereignisses abhängig ist. Prinzipiell gilt, dass je größer die Mure und je höher ihre Dichte ist, umso stärker wird das Signal und tiefer das Spektrum sein.

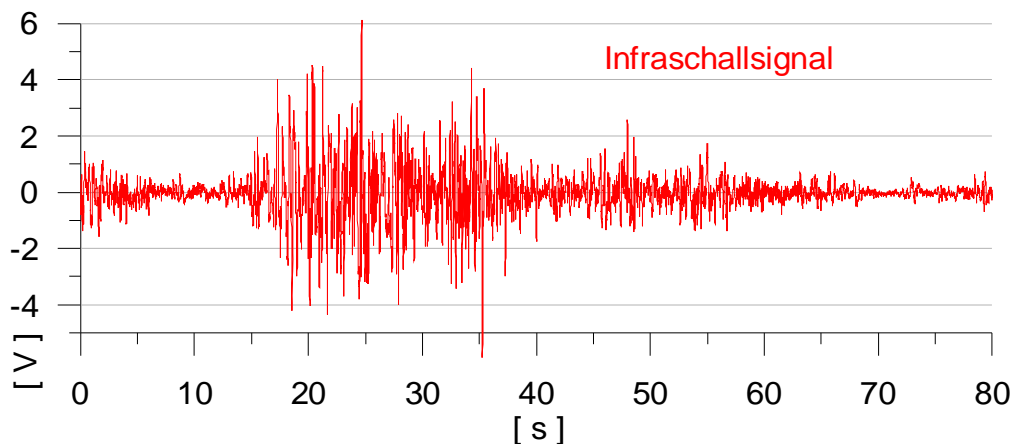


Abbildung 9: Graph des Infrasschallsignals 2004 (Sekunde 212 bis 292 nach Auslösung)

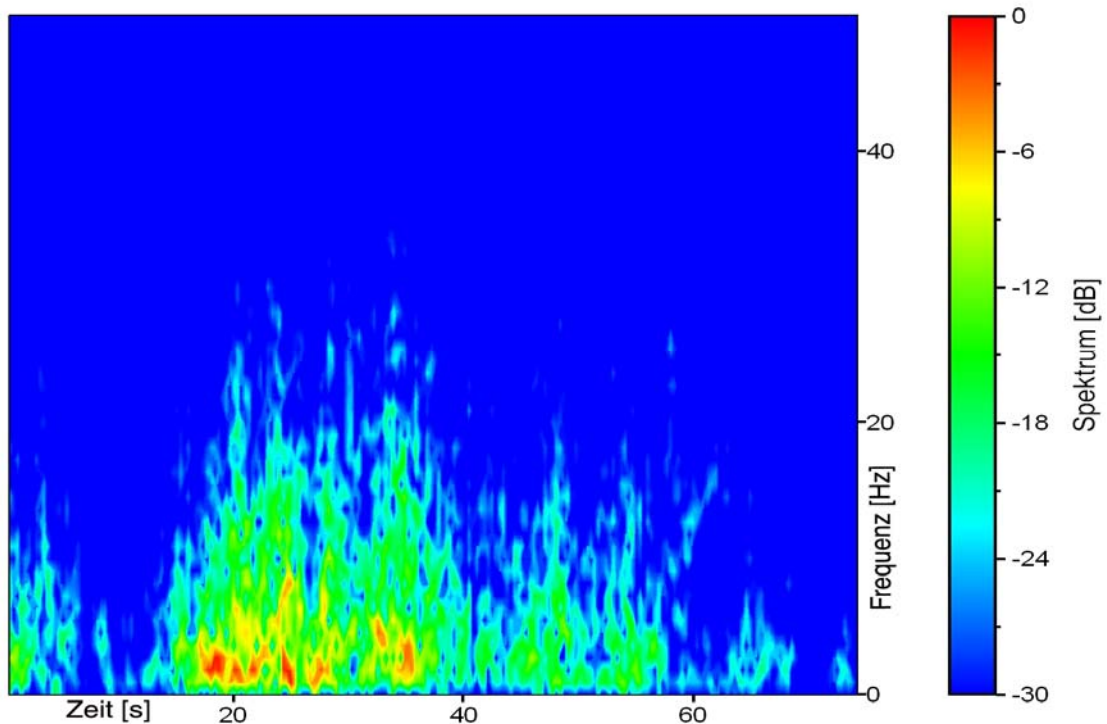


Abbildung 10: Fourierspektrogramm eines einzelnen Murschubes aus den Infrasschalldaten (Sekunde 212 bis 292 nach Auslösung)

Aus den erzeugten Spektrogrammen kann für den Murversuch der charakteristische Frequenzbereich zwischen 1 und 5 Hz angegeben werden. Die genaue Lage dieses Bereiches ist aber im größten Maße von den rheologischen Rahmenbedingungen abhängig und unterliegt damit doch einer großen Schwankungsbreite.

5 Schlußfolgerungen

Vor allem die Ergebnisse aus der Analyse des dynamischen Druckes unterstreichen die Notwendigkeit von Murversuchen im Maßstab 1:1. Somit wird auch in Zukunft die Druckwirkung der ausgelösten Murgänge bei der Planung, Durchführung und Analyse eines Murversuches im Vordergrund stehen. Ein weiteres Ziel ist, bei der Analyse der Infrasschall Daten Kriterien aus den Spektrogrammen zu formulieren, um diese dann als Erkennungsmerkmal eines Murereignisses bei der am Institut für Alpine Naturgefahren geplanten Frühwarn Einrichtung einzusetzen.

Des weiteren müssen die bisher verwendeten Messsysteme als Unterstützung dienen und verbessert bzw. kalibriert werden.