



Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung

Gebietsbauleitung Bludenz

Oberfeldweg 6 6700 – Bludenz



Institut für Alpine
und Forstliches

Arbeitsbereich
(Wildbach Lawine)

Universität für Bodenkultur -

Peter - Jordanstraße 38
A – 1180 WIEN

Projektsbetreuer: Dipl.-Ing. JÄGER Gerald

Vorläufiger Endbericht
des Projektes
Großmaßstäbliche Murenversuche Gaschiera
MUR.EXPO



Inhaltsverzeichnis

PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG.....	5
EINLEITUNG.....	6
Definition von Muren.....	6
Systematik von Muren.....	9
Theorie (Rheologie, physikalische Parameter,...).....	10
Newton`sche Flüssigkeit.....	11
Pseudoplastisches Fließverhalten.....	11
Dilatantes Fließverhalten.....	11
Plastisches Fließverhalten.....	12
Bingham`sches Fließverhalten.....	12
Laminares und turbulentes Fließen.....	13
FlieBstabilität.....	14
Bingham-Zahl.....	14
BESCHREIBUNG DES VERSUCHSGEBIETES.....	21
Allgemeines (relative Lage/Exposition).....	21
Geologie/Geomorphologie.....	23
Speichersee und dessen Funktionsprinzip.....	24
MESSTECHNIK.....	27
Ultraschall.....	27
Radarmessgerät.....	28
Geophone.....	29
Aerometer – Schwebstoffmessung.....	31
Zugkraftmessung.....	31
VIDEOSTUDIEN.....	32
VERMESSEN DES GELÄNDES MIT EINER MESSBILDKAMERA.....	33

TERRESTRISCHE VERMESSUNG.....	34
BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANORDNUNG UND DURCHFÜHRUNG DER VERSUCHE.....	36
Allgemeines	36
Anordnung der Geräte	39
Durchführung der Versuche – Murenablaufbeschreibung.....	39
UNTERSUCHUNGEN AN DEN ENTNOMMENEN PROBEN.....	41
Sieb- und Schlämmanalysen	42
Messung der Viskosität, Grenzschubspannung, Scherfestigkeit,	43
AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE DER VERSUCHE.....	45
Geländemodellerstellung mit Hilfe des Softwarepakets ELCOVISION 10	45
Ermittlung Auftrag-Abtrag (Erosion)	48
Geophone – Geschwindigkeiten, Erschütterungen	56
Schwebstoffmessung	66
Radarmessung.....	68
Ultraschall – Abflusstiefe.....	70
Pegelmessung:.....	70
Makroskopisches Erscheinungsbild der Versuchsmuren	75
(z.B.: Murkegel).....	75
Ermittlung des Murdruckes in Fließrichtung aus der Zugkraftmessung.....	76
MÖGLICHKEITEN DES EINSATZES EINZELNER MESSINSTRUMENTE FÜR FRÜHWARNSYSTEME IN WILDBACHEINZUGSGEBIETEN	78
Frühwarnsysteme - Begriffsdefinition	78
Methoden der Frühwarnung.....	79
Erkenntnisse	83
DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	87

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	87
FIRMENVERZEICHNIS.....	88
LITERATURVERZEICHNIS	89
ANHANG.....	92

Problemstellung und Zielsetzung

Schlamm-, Schuttströme und Muren zählen zu den bedrohlichsten und zerstörerischsten Naturgefahren bzw. Massenbewegungen auf der Erde. Auch Mitteleuropa leidet erheblich unter solchen zum Teil großvolumigen Schuttströmen. Murgänge treten in den Alpen praktisch jedes Jahr auf, und solche Ereignisse führen immer wieder zu beträchtlichen Schäden. Bei den größeren Murgängen in den Alpen werden Geschiebemengen von mehreren 10.000 m³ bis einigen 100.000 m³ talwärts transportiert. Dabei werden Fließgeschwindigkeiten bis zu 15 m/s (54 km/h) erreicht (RICKENMANN, 2001).

Bisher stellte die geringe Wahrscheinlichkeit selbst einen Murgang beobachten zu können ein großes Problem dar. Man war auf Beschreibungen und Videoaufnahmen von Naturereignissen angewiesen. Doch auch die beste Beschreibung liefert keine direkt auswertbaren Daten, sondern nur Hinweise auf Größenordnungen.

Modellversuche stellen eine weitere Hilfestellung für murdynamische Forschung dar. Allerdings gelten diese nur für viskose Muren und innerhalb dieser nur für einen relativ begrenzten Bereich.

Um das immer noch weitgehend unerforschte Fließverhalten von Muren zu analysieren, wurde zur Erforschung der Auslösemechanismen, des Fließverhaltens und der Reichweite von Muren etwa 60 km westlich der Hauptstadt von Kasachstan ein Experimentiergelände (Chemolgan Testgelände) eingerichtet, in dem Muren im Maßstab 1:1 erzeugt werden können.

Das Chemolgan Testgelände war weltweit der einzige Ort, wo solche Muren im Zeitraum zwischen 1972 und 1991 unter natürlichen Bedingungen ausgelöst und risikofrei studiert werden konnten. Im Jahre 1991 wurde dieses Projekt jedoch aus finanziellen Gründen beendet.

Aufgrund von Beobachtungen des **Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinverbauung Bludenz** wurde festgestellt, dass in Vorarlberg die Voraussetzung für eine europaweit einzigartige Murversuchsstrecke gegeben ist. Bis zu 15 Murversuche im Jahr können in vollem Maßstab am **Gaschierakopf** vorgenommen werden.

Daraus entstand die Überlegung, mit Hilfe modernster Messtechnik murdynamische Untersuchungen in der Versuchsstrecke vorzunehmen. Dabei können die Grenzbedingungen für die Entstehung von Muren und ihres Fließverhaltens unter

realistischen Bedingungen erforscht werden. Durch das bessere Verständnis des komplexen Prozesses der Fließdynamik ist zu erwarten, dass effektivere Methoden der Schadensverhütung und -minderung erzielt werden können. Auch die Wirkung bestehender Bauwerke in der Versuchsstrecke kann beobachtet und analysiert werden.

Ziel dieser Versuche ist die Erforschung von Muren in Bezug auf **Entstehung, Kinematik und Geschwindigkeit** von Muren. Diese noch weitgehend unbekanntes Eigenschaften sollen in einem interdisziplinären Ansatz mit Hilfe von Experimenten und der Untersuchung der Mursedimente entlang der Murversuchsstrecke erforscht werden.

Einleitung

Definition von Muren

Der Fließprozess von Murgängen ist komplex und bisher nicht gut verstanden. Es treten unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen flüssiger Phase, Feinanteil und grobblockigen Materialien auf. Dabei sind die Feststoffkonzentrationen und der Korndurchmesser am Frontbereich der Welle am größten und nehmen zum hinteren Teil des Murganges stark ab (T. KOCH, 1998). Muren besitzen wohl typische, gemeinsame Charakteristika, eine präzise Definition dieses Feststoffverlagerungsprozesses ist jedoch nur schwer möglich. Typische Eigenschaften vieler Murgänge sind:

- Zusammensetzung aus hochgradig unsortierten Feststoffen (feinste Fraktionen bis hin zu Blöcken von mehreren Kubikmetern) und Wasser
- Ausbildung einer typischen Längsschnittform während des Fließvorganges – wellenförmige, schubartige Abfluss mit der Bildung einer Front (Abbildung 1)
- Laminares Fließen im Bereich des Murkörpers aufgrund der hohen Viskosität des Murmaterials.
- Transport der größten Bestandteile an der Oberfläche und Ablagerung an der Front und/oder unter Bildung von Levees.

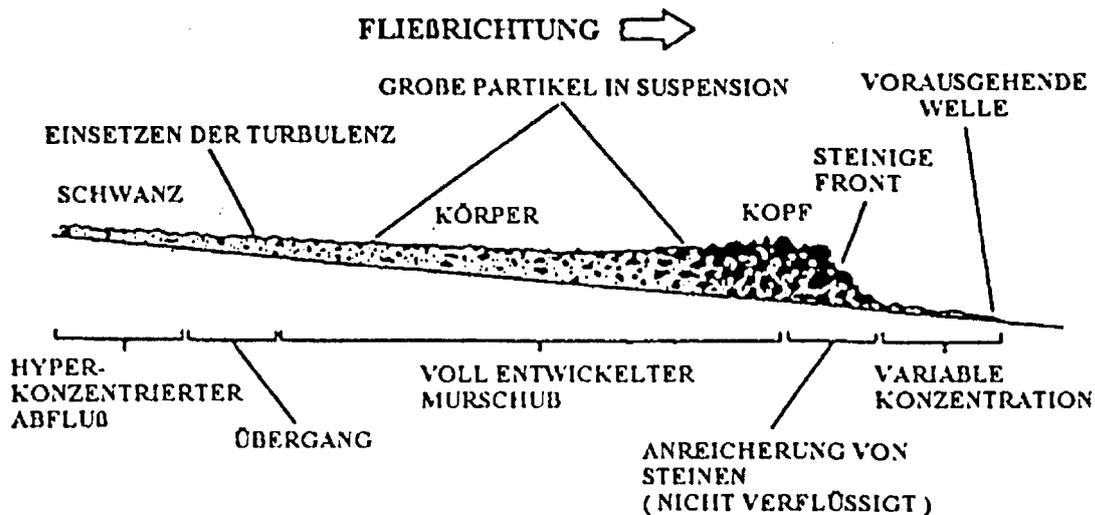


Abbildung 1: Längsschnitt durch einen Murschub

BENDEL (1949) versteht unter Murgang folgendes: Wenn die Menge des vom Wasser mitgeführten Geschiebes so groß ist, dass die bewegte Masse ein durchgehendes Gemisch von Erde, mächtigen Felsblöcken, Holz und feinen Bestandteilen, Schlamm usw. ist, so spricht man von Mure, Rufe, Gisse oder Murgang.

Nach JORDAN (1994) ist ein Murgang „ein Gemisch aus Gesteinstrümmern und Wasser, das genügend gesättigt ist, um das volle Gewicht der Brocken durch den Porenwasserdruck zu tragen und das eine so hohe Sedimentkonzentration aufweist, dass es sich wie ein Einphasengemisch verhält, indem sich Flüssigkeit und Feststoffe bis zur Ablagerung nicht trennen. Muren können begrenzt in Gräben, aber auch unbegrenzt auf freien Hängen auftreten“.

Sie setzen sich aus hochgradig unsortierten Feststoffen von feinstem Material bis zu einer Größe von mehreren Kubikmetern und Wasser zusammen. In vielen Fällen wurde eine zweigipfelige Kornverteilungskurve beobachtet (DAVIES, 1988, PIERSON, 1986), die eine Trennung in Matrix (bestehend aus den feinen Teilchen bis zu einer Größe von 1-2 mm) und den darin über den gesamten Querschnitt gleichmäßig suspendierten Grobanteilen zulässt (JORDAN, 1994).

Muren im engeren Sinn sind episodisch niedergehende Gesteins-Schlamm-Gemische in Form eines überwiegenden Suspensionstransportes. Sie können auch definiert werden, als Gravitationsströme, für welche die hydraulischen Gesetze nicht mehr oder nur eingeschränkt gelten. Dabei gibt es Übergänge vom Geschiebetrieb

bis zum Murgang. Muren entstehen vielfach nach Damnbrüchen oder zerbrechen von Verklausungen (AULITZKY, 1990).

Während des Fliessvorganges kommt es zur Ausbildung einer typischen Längsschnittform, die eine relativ klare Dreiteilung einer Mure erkennen lässt. An der Spitze bildet sich der Murkopf mit steil abfallender Murfront aus, der größtenteils aus den größten Bestandteilen einer Mure aufgebaut wird. Daran anschließend folgt der eigentliche Murkörper, bestehend aus einer relativ gleichmäßigen Mischung aus Matrix und suspendierten Grobkomponenten. Der Querschnitt hat oftmals eine ausgeprägte Kastenform. Den Abschluss bildet der sogenannte Murschwanz, der mit zunehmendem Abstand von der Spitze immer dünnflüssiger wird (PIERSON, 1986).

„Muren sind bekannt als Massenbewegungen, die in der Mitte zwischen einer Rutschung und einem Hochwasser stehen. Sie haben mechanische Prozesse, die von beiden Prozessen abweichen. Eine Mure ist eine Form von schneller Massenbewegung, bestehend aus einem Körper aus Feststoffen, Wasser und Luft. Sie unterscheiden sich von einer Schlammflut vor allem durch die Korngröße (COSTA/JARRETT, 1981).

Im Bereich des Murkörpers herrscht, bedingt durch die hohe Viskosität des Murmaterials, laminares Fließen vor.

Die größten Bestandteile einer Mure werden vornehmlich an der Oberfläche transportiert und in weiterer Folge, bedingt durch die höhere Oberflächengeschwindigkeit an der Front gesammelt oder seitlich unter Bildung sogenannter Levees abgelagert. Kommt eine Mure zum Stillstand, bleibt diese umgekehrte Sortierung (die größten Gesteinstrümmer werden von der feinkörnigen Matrix an der Oberfläche gehalten) und die Kastenform erhalten.

Muren können hohe Geschwindigkeiten erreichen. Nach Angaben von AULITZKY werden Geschwindigkeiten von 30 m/s durchaus erreicht, nach umfangreichen Untersuchungen von HAEBERLI (1992) wurde bei den Murgängen in der Schweiz eine Geschwindigkeit von 15 m/s nicht überschritten.

Systematik von Muren

Um das dynamische Verhalten von Muren zu beschreiben, wurde eine große Anzahl von rheologischen Modellen entwickelt (eine Übersicht gibt z.B.: CHEN, 1987). Ein „ideales“ Modell müsste in der Lage sein, alle zuvor beschriebenen Eigenschaften zu erklären. Bis heute konnte ein solches Modell allerdings noch nicht gefunden werden. Neuere Arbeiten konzentrieren sich daher auf eine Kombination aus mehreren Modellen für verschiedene Fließbereiche (z.B.: JORDAN, 1994).

Einfache rheologische Modelle gehen meist von zwei grundlegend verschiedenen Ansätzen aus. Einerseits wird davon ausgegangen, dass Murmaterial eine gewisse Scherfestigkeit besitzt und sich nach Überschreiten dieser Grenze entweder wie eine ideal-plastische oder pseudoplastische Flüssigkeit verhält und daher im einfachsten Fall mit dem BINGHAM-Modell beschrieben werden kann (z.B.: COSTA, 1984).

Andererseits geht TAKAHASHI (1991) davon aus, dass die Konzentration an Tonmineralien in der interstitialen Flüssigkeit nicht ausreicht, um eine so hohe Scherfestigkeit hervorzurufen, dass große Gesteinstrümmen in Suspension gehalten werden. Somit ist nicht die Viskosität des Murmaterials für das dynamische Verhalten ausschlaggebend, sondern Interaktionen zwischen den Teilchen. Daher kann das Verhalten einer Mure mit einem dilatanten oder granularen Fließmodell am besten charakterisiert werden.

DAVIES (1988) gibt für Muren folgende Charakteristik (siehe Tabelle 1):

Typisches Verhalten ist ein wellenförmiger, pulsierender Ablauf und Transport von Blöcken auf der Oberfläche.

Murentype	1	2	3
Fließverhalten - turbulent	stetig	pulsierend laminar	einfache Welle laminar
Körnung	fein	fein und grob	grob und fein
Kornverteilung - konzentriert	an der Sohle	verteilt über die ganze Tiefe	verteilt über die ganze Tiefe
Dichte	<1600 kg/m ³	>1800 kg/m ³	>1800 kg/m ³
Viskosität	10-100 * Wasser	>1000 * Wasser	>1000 * Wasser
Geschwindigkeit	gering - 2 m/s	hoch - 3-5 m/s	hoch
Verhalten zur Sohle	ablagernd	sehr erosiv	sehr erosiv

Tabelle 1: Charakteristiken einzelner Murtypen nach DAVIES

Murtyp 1 ähnelt dem normalen Geschiebetrieb aber modifiziert durch die Reduktion der Turbulenz, infolge suspendierter Feinteile. Es überwiegen Trägheitskräfte (Inertial flow regime): Scherkräfte und Impuls zwischen Körner treten auf. Der Impuls durch Kollision der Körner wird aber nicht zur Gänze auf das Fluid zwischen den Körnern übertragen (BAGNOLD, 1956).

Murtyp 2 ist nach DAVIES (1988) auf „macroviscous flow“ zurückzuführen. Der Impuls infolge der Kollision von Körnern wird auf das Fluid übertragen und dissipiert. Der hohe Feinteil zeigt viskose Eigenschaften, die auf das Verhalten der Mure großen Einfluss ausüben.

Murtyp 3 ist nach TAKAHASHI (1978) auf Situationen zurückzuführen, wo eine schnell ansteigende Sickerströmung in einer geneigten Sand- oder Schotterablagerung die Oberfläche erreicht.

Theorie (Rheologie, physikalische Parameter,...)

Als eine Flüssigkeit wird in der einfachsten aber auch anschaulichsten Definition ein Material bezeichnet, das fließt. Fließen bezeichnet dabei die Eigenschaft einer Flüssigkeit, bei einer angreifenden Schubspannung eine gleichmäßige und irreversible Deformation zu erleiden (PIERSON/COSTA, 1987).

Als Viskosität wird jene Eigenschaft einer Flüssigkeit bezeichnet, einer Verschiebung benachbarter Schichten einen Widerstand entgegenzusetzen. Anders ausgedrückt ist die Viskosität einer Flüssigkeit ein Maß für das Verhältnis zwischen angreifender Schubspannung und der Schergeschwindigkeit oder Scherrate. Die Scherrate ($\dot{\gamma}$) ist dabei der Geschwindigkeitsunterschied zwischen zwei parallelen Schichten (du) bezogen auf deren Abstand (dz).

Das Verhältnis zwischen Schubspannung und Scherrate einer fließenden Flüssigkeit bietet eine sehr gute Möglichkeit, die rheologischen Eigenschaften dieser Flüssigkeit zu beschreiben. Dabei wird die Formel zur Charakterisierung dieses Verhältnisses rheologische Gleichung oder auch rheologisches Modell, die graphische Darstellung Rheogramm genannt (WAN/WANG, 1994).

Abbildung 2 zeigt einige typische Rheogramme von idealisierten Flüssigkeiten und plastischen rheologischen Körpern.

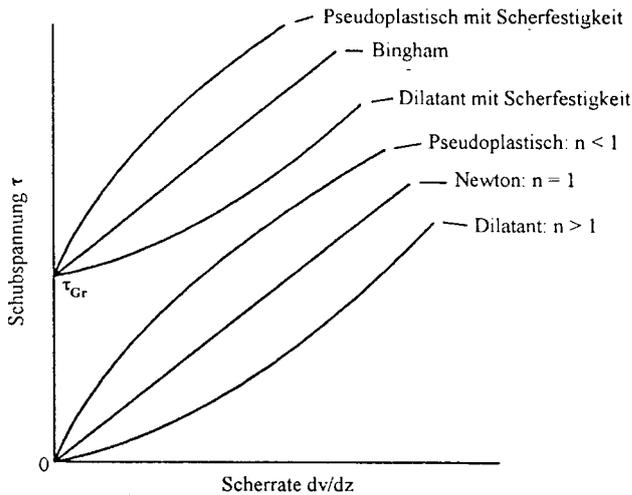


Abbildung 2: Fließkurven einiger idealisierter Flüssigkeiten und von plastischen Materialien, wobei gilt: $\tau = \tau_{Gr} + (du / dz)^n$ (JORDAN, 1994)

Newton'sche Flüssigkeit

Bei einer Newton'schen oder auch idealviskosen Flüssigkeit verhält sich die Schubspannung τ proportional zur Scherrate du/dz :

$$\tau = \eta * \frac{du}{dz}$$

dabei wird η als dynamische Viskosität oder kurz Viskosität bezeichnet.

Pseudoplastisches Fließverhalten

Pseudoplastisches Fließverhalten liegt vor, wenn einer Verformung mit zunehmender Scherrate immer weniger Widerstand entgegengesetzt wird. Dieses Verhalten wird vermutlich durch Einregelungsvorgänge der Teilchen, vor allem der plättchenförmigen Tonminerale, in der Fließebene verursacht (MAJOR/PIERSON, 1992).

$$\tau = \eta * \left(\frac{du}{dz} \right)^n$$

wobei n als Plastik-Index bezeichnet wird und <1 ist.

Dilatantes Fließverhalten

Bei einer dilatanten Flüssigkeit führt eine Zunahme der Schubspannung zu einer überproportionalen Zunahme der Viskosität, das heißt sie wird immer dickflüssiger.

$$\tau = \eta^* \left(\frac{du}{dz} \right)^n$$

dabei nimmt η in diesem Fall Werte >1 an.

Plastisches Fließverhalten

Dieses liegt dann vor, wenn ein disperses System erst nach Überschreiten einer bestimmten Schubspannung τ_{Gr} zu fließen beginnt. τ_{Gr} wird deshalb auch als Fließgrenze oder Scherfestigkeit bezeichnet. Ist die Schubspannung kleiner als die Fließgrenze, verhält sich das Material wie ein fester Körper, der eine elastische Verformung zulässt. Wird die Fließgrenze überschritten, bestehen grundsätzlich wieder drei Möglichkeiten des Fließverhaltens.

Bingham'sches Fließverhalten

Wird auch als ideal-plastisches Fließen bezeichnet. Nach Überschreiten der Fließgrenze τ_{Gr} , besteht eine Proportionalität zwischen τ und du/dz :

$$\tau = \tau_{Gr} + \eta^* \frac{du}{dz}$$

Pseudoplastisches oder dilatantes Verhalten mit einer Fließgrenze

Wird die Schubspannung größer als τ_{Gr} , so verhält sich das Material entweder pseudoplastisch oder dilatant. Man schreibt:

$$\tau = \tau_{Gr} + \eta^* \left(\frac{du}{dz} \right)^n$$

dabei gilt für pseudoplastisch: $n < 1$ und für dilatant $n > 1$.

Anwendung der rheologischen Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Muren.

In der Literatur (zum Beispiel CHEN, 1987; IVERSON/DENLINGER, 1987) finden sich eine große Anzahl an mehr oder weniger brauchbaren Modellen zur Beschreibung des Fließverhaltens von Muren (**Newton'sche- oder viskose Modell, Bingham- oder visko-plastische Modell, Dilatante- oder granulare Abflussmodell nach JORDAN, Generelles visko-plastisches Modell nach**

CHEN). Der größte Teil dieser Modelle lässt sich jedoch in drei allgemeine Kategorien einordnen (JORDAN, 1994):

Newton'sches Modell:
$$\tau = \eta * \frac{du}{dz}$$

Bingham'sches Modell:
$$\tau = \tau_{Gr} + \eta_B * \frac{du}{dz}$$

Granulares Fließmodell:
$$\tau = \eta_G * \left(\frac{du}{dz}\right)^2$$

Fließverhalten: Laminares-, und turbulentes fließen und Fließstabilität:

Die zuvor beschriebenen Modelle unterstellen laminares Fließen von Muren. Tatsächlich wird dieses Fließverhalten von sehr vielen Autoren beschrieben (z.B.: COSTA, 1988, PIERSON, 1986, DAVIES, 1988). Allerdings kann diese Annahme nur für den Murkörper als generell zutreffend bezeichnet werden, da es in den hinteren Bereichen eines Murstoßes, dem sogenannten Murschwanz, durch den zunehmenden Wassergehalt und der damit verbundenen Abnahmen der Viskosität und Zunahme der Geschwindigkeit, sicherlich auch zu turbulenten fließen kommen kann.

Laminares und turbulentes Fließen

Da sich eine Mure wie ein Einphasengemisch verhält, wobei vereinfacht angenommen wird, dass dieses aus einer Matrix aus sehr feinkörnigen Material und Wasser und darin gleichmäßig verteilten grobkörnigen Material aufgebaut wird, bewegen sich alle Teilchen mit der selben durchschnittlichen Geschwindigkeit. Aus diesem Grund kann zur Berechnung des Fließverhaltens die schon aus der Hydraulik bestens bekannte Reynolds-Zahl (Re) verwendet werden. JORDAN (1994) schreibt:

$$Re = \frac{U * H * \rho_F}{\eta}$$

Hier bedeutet ρ_F die Dichte der Flüssigkeit. Statt der Abflusstiefe H wird üblicherweise der hydraulische Radius R eingesetzt. Für Wasser gilt $Re > 2500$ als

Grenzwert zu turbulenten Fließen. $Re < 500$ bedeutet laminaren Abfluss. Bei Muren werden nach DAVIES (1988) diese Grenzwerte bei 600 und 1500 angenommen.

FlieBsstabilität

Ebenfalls aus der Hydraulik bekannt ist die sogenannte Froud'sche Zahl (Fr) zur Abgrenzung von kritischem oder auch schiessendem Abfluss, zu nicht-kritischem oder strömendem Abfluss. Nach JORDAN (1994) ist

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g^* H}}$$

für wasser gilt $Fr=1$ als Grenzwert zwischen stabilen und instabilen Abfluss. Bei Muren muss nach DAVIES (1988) eine differenziertere Unterscheidung ,abhängig von der Reynoldszahl getroffen werden:

In sehr turbulentem Abfluss ($Re > 10^5$) liegt die kritische Froud-Zahl Fr_k bei ~ 2 .

Sinkt die Reynoldszahl nahe dem Grenzwert des turbulenten Abflusses bei ~ 1500 , sinkt auch Fr_k auf etwa 0,8.

Im Übergangsbereich, das heißt bei $600 < Re < 1500$ steigt die Stabilität des Abflusses.

Bei laminarem FlieBsverhalten ($Re < 600$) liegt Fr_k in einem breiten Gerinne bei $\sim 0,6$.

In einem schmälere gerinne steigt Fr_k auf etwa 0,8

In der Literatur (z.B.: WAN/WANG, 1994) wird sehr häufig das Auftreten von sogenannten Rollwellen beschrieben, wobei bis heute nicht geklärt werden konnte, ob diese wellen durch bestimmte Gerinneigenschaften, wie zum Beispiel Verengungen, oder durch die Instabilität des Murmaterials selbst verursacht werden. DAVIES (1988) führt diese Erscheinungen auf die Instabilität des Materials bei Überschreiten der kritischen Froudzahl zurück. Bei laminaren Abfluss bewegen sich diese Wellen immer schneller als die restliche Flüssigkeit.

Bingham-Zahl

Streng genommen gelten die beiden oben beschriebenen Kennwerte nur für Newtonsche Flüssigkeiten. Die für Bingham'sches Material entwickelte Bingham-Zahl sollte in der Lage sein, laminares von turbulentem FlieBsverhalten abzugrenzen. Die Bingham-Zahl (Bi) errechnet sich aus (JORDAN, 1994):

$$Bi = \frac{\tau_{Gr} * H}{\eta_B * U}$$

Unglücklicherweise konnten bis heute keine allgemeingültigen Grenzwerte für die Bingham-Zahl gefunden werden.

Klassifikation

Eine der brauchbarsten Einteilungen stammt von COSTA (1988), der eine Unterteilung in Reinwasserabfluss, Hyperkonzentrierten Abfluss und Murgang vornimmt (siehe Tabelle 2).

Abfluss	Sedimentkonzentration	Dichte (g/cm³)	Scherfestigkeit (Pa)	Flüssigkeitstyp	Fließverhalten
Reinwasserabfluss	1-40% (Gewicht)	1,01-1,33	0-10	Newton	Turbulent
	0,4-20 (Volumen)				
Hyperkonzentrierter Abfluss	40-70% (Gewicht)	1,33-1,80	10-40	nicht-Newton	Turbulent bis
	20-47% (Volumen)				Laminar
Murgang	70-90% (Gewicht)	1,80-2,30	>40	Viskoplastisch	Laminar
	70-90% (Volumen)				

Abfluss	Vorherrschender Sediment-Stützmechanismus	Viskosität (Pas)	Fallgeschwindigkeit (% von reinem Wasser)	Sedimentkonzentrations-Profil
Reinwasserabfluss	Elektrostatische Kräfte,	0,001-2	100-33	Ungleichförmig
	Turbulenz			
Hyperkonzentrierter Abfluss	Auftrieb, Dispersiver Druck,	Feb.20	33-0	Ungleichförmig bis
	Turbulenz			Gleichförmig
Murgang	Kohäsion, Auftrieb, Dispersiver	>>20	0	Gleichförmig
	Druck, Strukturelle Stützung			

Tabelle 2: Rheologische Klassifikation der Transportprozesse nach COSTA

Eine noch weitergehende Einteilung stammt von PIERSON/COSTA (1987), wobei allerdings keine Angaben über die Grenzkonzentration der verschiedenen Transportprozesse gemacht werden (siehe Abbildung 3).

Die größte Unsicherheit bei der Klassifikation der verschiedenen Transportprozesse entsteht bei der Festlegung der Grenzwerte für die Feststoffkonzentration, da von dieser direkt alle rheologischen Eigenschaften, wie die Viskosität oder das Fließverhalten abhängen. Erschwert wird diese Klassifizierung vor allem durch das zum Teil gänzlich verschiedene Verhalten trotz gleicher Konzentration. Dieses entsteht hauptsächlich durch unterschiedliche Korngrößenverteilungen oder unterschiedlichen chemisch-physikalischen Aufbau der Feststoffe.

Das bedeutet aber, dass eine Einteilung der Transportprozesse allein über die Konzentration nur bei gleichem Sedimentaufbau zielführend sein kann.

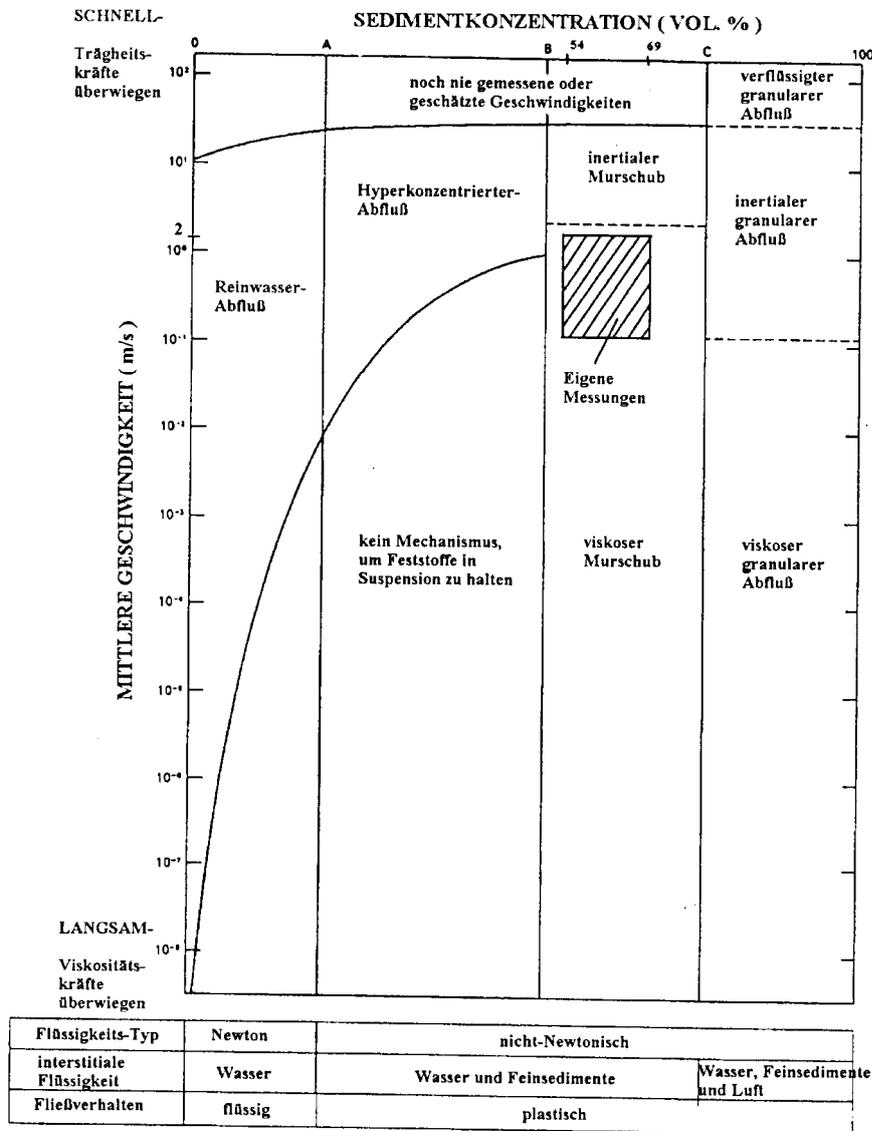


Abbildung 3: Klassifikation von fließenden Sediment-Wasser Gemischen (nach PIERSON/COSTA, 1987).

Beim Reinwasserabfluss bleibt die Sedimentkonzentration so klein, dass kaum Interaktionen zwischen den Partikeln auftreten und das rheologische Verhalten allein von der flüssigen Phase, also dem Wasser, abhängt. Das Fließverhalten folgt dem Newton'schen Modell und ist in natürlichen Gerinnen in der Regel turbulent. Besitzt die fließende Mischung durch steigende Sedimentkonzentration eine messbare Scherfestigkeit, spricht man von hyperkonzentriertem Abfluss. Das

Fliessverhalten entspricht immer noch dem einer Flüssigkeit, doch werden durch höhere Konzentration Turbulenzen weitgehend abgeschwächt oder überhaupt verhindert.

Der in Tabelle 2 als Murgang bezeichnete Abflussvorgang wird in Abbildung 3 näher definiert. Die Unterscheidung beruht im wesentlichen auf dem unterschiedlichen Sedimentstützmechanismus. Besitzt das Gemisch einen so hohen Feinanteil (Matrix), dass die groben Komponenten durch diese Matrix gestützt werden, spricht man von einem Murgang oder auch Murschub (kurze Mure) im eigentlichen Sinn. Als Murgang wird dabei eine zeitlich zusammenhängende Abfolge von einzelnen Murschüben bezeichnet (HÜBL, 1996). Dominieren beim viskosen Murschub die durch Viskosität verursachten Kräfte, wird das Fliessverhalten eines inertialen Murschubes vor allem durch Partikelkollisionen und Reibungskräfte beeinflusst. Diese nehmen mit steigender Geschwindigkeit zu.

Wird das Sediment-Wasser Gemisch so grobkörnig, dass sich die Teilchen überwiegend gegenseitig abstützen, spricht man von granularem Abfluss. Auch hier wird abhängig von der Geschwindigkeit eine weitere Einteilung in viskosen granularen Abfluss und inertialen granularen Abfluss getroffen.

Sowohl der Murschub als auch der granulare Abfluss weisen ein ausgeprägtes plastisches Fliessverhalten auf. Dieses wird vielfach als ideal-plastisch (=Bingham) beschrieben (z.B. COSTA/JARRETT, 1981), entspricht aber eher einem nicht-linearen plastischen Verhalten, je nach Korngrößenverteilung pseudoplastisch (viskose Muren) oder dilatant (inertiale Muren und granularer Abfluss) (JORDAN, 1994).

TAKAHASHI (1991) teilt Muren, aufbauend auf die grundlegende Arbeit von BAGNOLD (1954), in drei verschiedene Kategorien (siehe Abbildung 4).

1. Makroviskose Muren (kurz viskose Muren)
2. Übergangsform
3. Inertiale Muren

Ist bei den makroviskosen Muren die Viskosität der interstitialen Flüssigkeit die für das Fliessverhalten ausschlaggebende Komponente, so dominieren bei den inertialen Muren die durch Partikelkollisionen und Reibung verursachten Kräfte. Im

makroviskosen Bereich nimmt die Schubspannung linear mit der Scherrate zu, im inertialen Bereich steigt sie mit dem Quadrat der Schergeschwindigkeit (Abbildung 4).

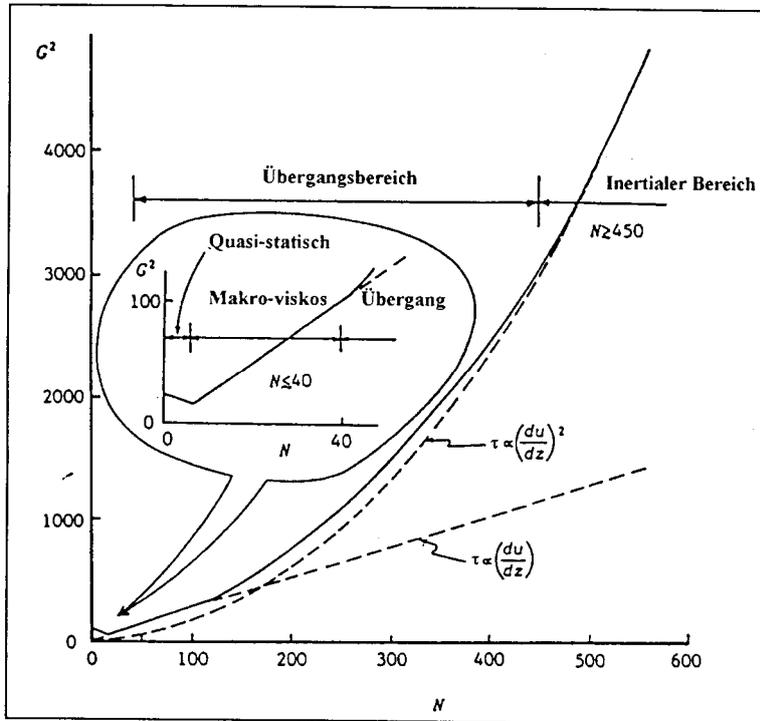


Abbildung 4: Fließbereiche von Muren nach TAKAHASHI, 1991

BAGNOLD (1954) definierte den viskosen und inertialen Fließbereich aufgrund seiner Experimente mit granularen Dispersionen unter Scherung. Er fand zwei dimensionslose Parameter zur Abgrenzung der verschiedenen Bereiche:

$$G^2 = \frac{\rho_s * D^2 * \tau}{\eta^2 * \lambda}$$

$$N = \frac{\lambda^{0.5} * \rho_s * D^2 * \frac{du}{dz}}{\eta}$$

Hier bedeutet D den Teilchendurchmesser, ρ_s die Gesteinsdichte, τ die Schubspannung, η die Viskosität der interstitialen Flüssigkeit, du/dz die Scherrate und λ die lineare Konzentration:

$$\lambda = \left(\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right)^{-1}$$

wobei C_* die maximal mögliche Konzentration und C_v die Volumskonzentration bedeutet.

Der viskose Bereich definiert durch $G < 10$ und $N < 40$, der inertielle Bereich durch $G > 55$ und $N > 450$.

JORDAN (1994) schreibt in seiner Arbeit, dass im inertialen Fließbereich ein dilatantes oder auch granulares Abflussmodell für die Berechnung des Fließverhaltens herangezogen werden kann. Dieses Modell wird durch große Teilchendurchmesser und große Geschwindigkeit begünstigt (Gleichung???). Andererseits sollten im makroviskosen Bereich mit einem viskosen Modell die besten Ergebnisse erzielt werden.

Die oben angeführte Dreiteilung des Fließverhaltens von Muren zieht sich, zum Teil mit anderen Namen, durch die gesamte neuere Literatur über Muren, wobei zur Abgrenzung der Bereiche noch weitere Kennwerte entwickelt wurden:

Savage-Zahl (IVERSON/LAHUSEN, 1993)

$$S = \frac{\gamma^2 * D^2}{C_v * g * H}$$

γ steht für die Scherrate (du/dz).

Überschreitet S den Wert 0,1 so dominieren Partikelkollisionen vermutlich den Fließvorgang und die Mure bewegt sich im inertialen oder auch granularen Bereich (JORDAN, 1994).

Reibungszahl F (IVERSON/Lahusen, 1993)

$$F = \frac{\rho_s * C_v * g * H}{\gamma * \eta}$$

Hier gilt, dass interpartikuläre Reibung die Viskosität dominiert, wenn $F > 1400$.

Ein Faktor D_* nach CHEN (1987)

$$D_* = \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 * g * D^3 \right)} * \frac{\lambda}{\nu_w}$$

Dabei steht ν_w für die kinematische Viskosität des Wassers ($\nu_w = \eta_w / \rho_w$).

CHEN definiert, dass dilatanter Abfluss bei $D_* > 1500$, Bingham'sches Fließverhalten, bei $350 < D_* < 800$ und bei $800 < D_* < 1500$ ein Übergangsverhalten vorherrscht.

Ein weiterer Kennwert ist der sogenannte CSA-Wert (CHEN/ZHAO, 1995).

Eine neuere Klassifikation nach rheologischen Gesichtspunkten (J. HÜBL, 1995) stellt sich dabei wie folgt dar (siehe Tabelle 3)

Muren				
Begriff	Murschwall	Nicht kohäsive Mure	Kohäsive Mure	Übergangsform
engl. Ausdruck	Debris flood (?) flash flood (?)	Grain Flow; Non cohesive debris flow; Uniformly dispersed grain flow	Cohesive debris flow; Viscous debris flow; Density modified grain flow; Plug flow	Hybrid debris flow; Transitional debris flow
Auftretende Kräfte und Spannungen	Dispersiver Druck; Korninteraktionen; Turbulenz	Dispersiver Druck; Korninteraktionen; (Auftrieb?)	Festigkeit; Kohäsion; Viskosität; Porendruck (-schwankungen); (Dispersiver Druck)	Korninteraktionen; Turbulenz; Auftrieb
Fließverhalten	inertial (?)	makroviskos; dilatant	viscoplastisch; (makroviskos?)	dilatant; turbulent; viscoplastisch
Einfluß der Lauflänge und der Vorbefeuchtung	groß	gering	groß	gering
Einfluß der Feinfraktion	-	gering; Viskosität durch Grobkornkonzentration	groß; Viskosität durch Feinfraktion	gering-groß
Stützung	Fast keine Matrix vorhanden; Korngestützt	Fast keine Matrix vorhanden; Korngestützt	Hoher Matrixanteil; Matrixgestützt	Geringer Matrixanteil
Strömungszustand	turbulent (?)	laminar	laminar	laminar-turbulent
Geschwindigkeiten	sehr groß	klein-hoch	klein-mittel	mittel-hoch
Wasseranteil	sehr groß	groß	klein	mittel-groß
Entstehung	Aufbruch einer Verkläuerung	Geschiebeaufnahme während des Abflusses	Geschiebeaufnahme während des Abflusses; Hangrutsche	Geschiebeaufnahme während des Abflusses; Hangrutsche

Tabelle 3: Klassifikation nach rheologischen Gesichtspunkten (HÜBL J., 1995)

Die in Tabelle 3 gezeigte Untergliederung fußt einerseits auf den Erkenntnissen amerikanischer, chinesischer und japanischer Literatur, andererseits auf der Erfahrung, dass Muren je nach Kornverteilung ein unterschiedliches Verhalten zeigen können.

Murschübe sind meist Teilprozesse eines Extremereignisses, und ereignen sich gemeinsam mit flüssigkeitsgesteuerten Prozessen. Als flüssigkeitsgesteuerten Prozessen werden Massenverlagerungsprozesse bezeichnet, die primär durch die gravitative Kraft des abfließenden Wassers bestimmt werden. Das Transportmittel (Wasser) verhält sich wie eine newton'sche Flüssigkeit, wobei die feineren Fraktionen größtenteils durch Turbulenz getragen werden (Schweb), größere Feststoffe bewegen sich rollend, hüpfend oder springend entlang der Bachsohle fort.

Beschreibung des Versuchsgebietes

Allgemeines (relative Lage/Exposition)

Das Versuchsgebiet liegt im Süden Vorarlbergs, in einem der international bekanntesten Wildbäche, der Schesa (siehe Abbildung 5).

Die Schesa ist ein linksufriger Zubringer der Ill und befindet sich in den Gemeinden Bürserberg (Oberlauf), Bürs (Mittel- und Unterlauf) und Nüziders (Mündung) – südlich von Bludenz. Das Einzugsgebiet dieses murstoß- bis murfähigen Altschuttbaches ist insgesamt 14,5 km² groß, wobei auf das Einzugsgebiet des Bruchkessels (Größe ca. 60 ha) etwa 1,3 km² entfallen.

Die Höhenlage reicht von 2150 m (Alpilakopf) bis 550 m (Mündung).

Die Gesamtlänge des Schesatobels beträgt von der Mündung in die Ill bis zum oberen Bruchkesselrand 4,8 km. Das Bachgefälle bewegt sich am Schwemmkegel zwischen 7% und 12%, das Verlandungsgefälle im Bruchkessel von 12 – 24%.

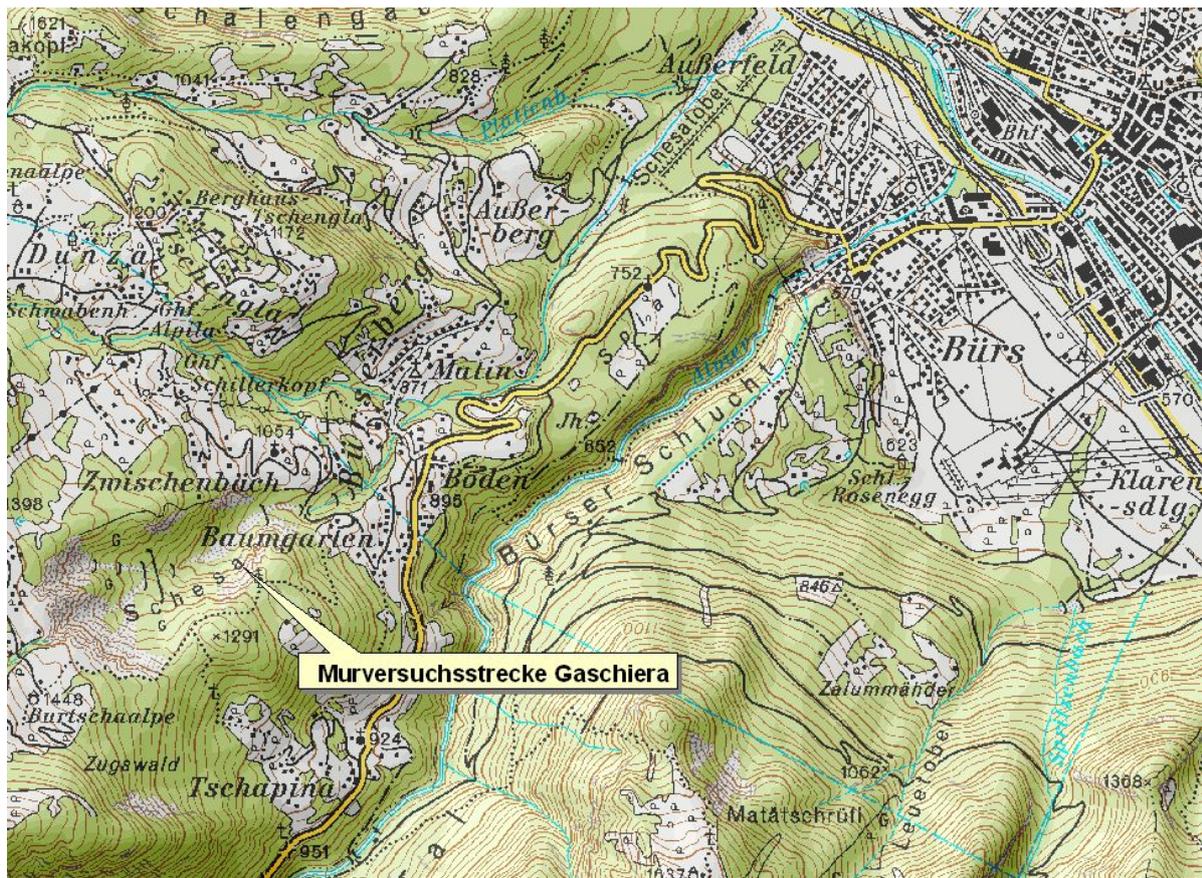


Abbildung 5: Übersichtskarte des Schesatobels mit der Murversuchsstrecke Gaschiera

Die Murversuchsstrecke im Schesatobel befindet sich im Bereich Gaschiera. Dieser ist der orographisch rechte Teil des talseitigen Endes des annähernd 50 Mio. m³ großen Bruchkessels und ist ein aus Lockermaterial aufgebauter Schutthaufen.

Technische Daten zur Versuchsstrecke:

Die Erosions- bzw. Transitstrecke beginnt in einer Seehöhe von 1.117 m und mündet nach ca. 54 m Höhenunterschied in die Ablagerungsstrecke in den Schesahauptbach (siehe Abbildung 6). Die Versuchsstrecke ist NNW exponiert und teilt sich in Erosions- bzw. Transitstrecke (ca. 180m schräge Länge) und Ablagerungsstrecke (ca. 160m schräge Länge). Die mittlere Neigung beträgt rund 40%. Die genauen Daten sind den Längsprofilen im Anhang zu entnehmen.

Das eigentliche Murverhalten spielt sich im Übergangsbereich zwischen der Erosion- bzw. Transitstrecke und der Ablagerungsstrecke statt (Erkenntnis aus den Versuchen). Oberhalb der Versuchsstrecke befindet sich ein künstlich angelegter Wasserspeicher, der ca. 3000 m³ Wasser beinhaltet. Durch das Öffnen eines Auslaufes mittels eines Baggers wird der Murgang initiiert.

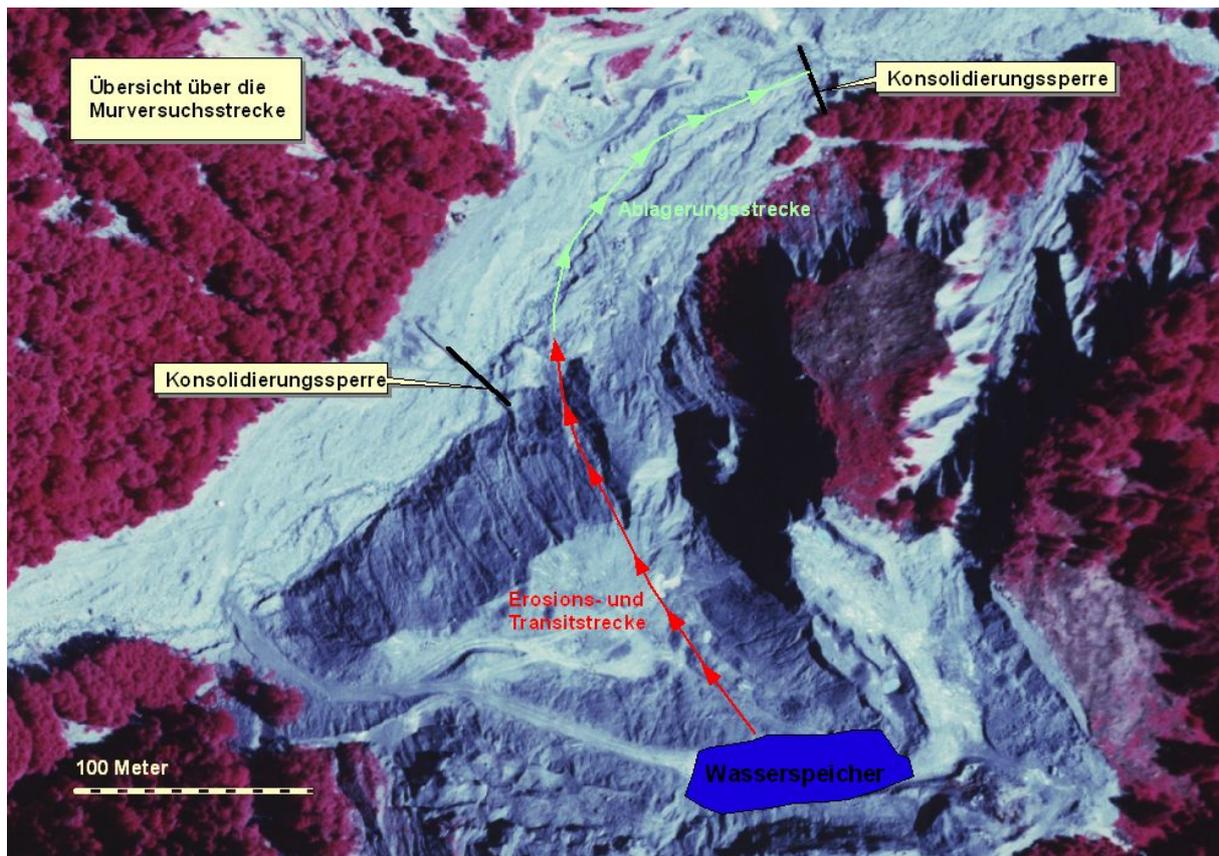


Abbildung 6: Übersicht über die Murversuchsstrecke

Geologie/Geomorphologie

Die Schesa gehört geologisch gesehen noch zum Oberostalpin (Permomesozoikum – Rhätikon, Nördliche Kalkalpen)(MARKART G., KOHL B. und ZANETTI P., 1995/1996). Die Abscherungs- und Aufgleitungsbahn der Zimba-Schesaplana-Scholle steigt steil aus der Alvierschlucht zum Gaschierakopf an und verflacht sich dann gegen NW.

Den Felsuntergrund dieses Bereiches bilden die kalkalpinen Gesteinsserien der Raiblerschichten mit Arlbergschichten, Dolomiten, Rauhwacken und Mergeln sowie Partnachsichten (Mergel mit einzelnen Kalklagen) und alpiner Muschelkalk. Die flächenhafte Freilegung des Felsuntergrundes im Materialabtragsgelände Gaschiera hat die geologische Prognose voll bestätigt. Die Felsoberfläche ist nach der Gesteinhärte und den Gletscher-Rückzugsständen selektiv mit Steilstufen und Verflachungen bzw. Rinnen ausgeschürft und fällt insgesamt aus dem Schesaeinschnitt in den Haupttalhang streichend steil ab. Der Felsuntergrund wird

von mächtigen Partnachmergeln im obersten Abtragsbereich und von Arlbergschichten mit eingeschalteten Partnachmergeln im unteren Teil aufgebaut. Diese bisher aufgeschlossene Folge wird im untersten Abtragsteil von Raiblerschichten unterlagert.

Die beim Murgang auftretenden Lockermassen werden von spätglazialen Sedimenten, bestehend aus Moränenschotter, schwach geneigten Verbauungsschottern mit Murfächern und Schwemmkegeln mehrerer Gewässer (Bp.: Gletscherabflüsse des Brandner Ferners), Sandablagerungen sowie von hang- bzw. oberflächenparallelen Übergusschichten aufgebaut.

Dabei handelt es sich um sehr inhomogene, in sich stark verzahnte Abfolgen von Grobschottern bis Schluff-Tonen mit unterschiedlichen Wasserwegigkeiten und Festigkeiten. Ca. 60 % nimmt der Kiesanteil ein; den Rest bilden Grobkorn mit $d > 600$ mm und Schluffe (BERTLE H., 1998).

Speichersee und dessen Funktionsprinzip

Der Speichersee (siehe Abbildung 7) befindet sich direkt oberhalb der Murversuchsstrecke und kann durch den Schesahauptbach ständig gespeist werden. Dabei wird das Wasser auf der orographisch rechten Seite nach einer Wildbachsperre über einen Schieber und PVC-Rohre abgeleitet. Die Rohrleitung verläuft dem Hang entlang bis zum Speichersee. Der Vorteil liegt in der Regulation dieses Systems, da bei Hochwasser bzw. Schlechtwetter der Schieber geschlossen werden kann (das Wasser fließt dann im Bachlauf der Schesa) und es zu keinem Überlaufen des Speichersees kommt.

Der See wird bei jedem Versuch terrestrisch neu vermessen (zur Ermittlung der Wassermenge – das Fassungsvermögen schwankt zwischen 2161 m^3 und 3174 m^3), da sich aufgrund von Erdbewegungsarbeiten dessen Größe ständig ändert. Nach Öffnen eines Auslaufes des Speichersees durch einen Bagger gelangt das Wasser in die Transitstrecke und der Murgang konnte initiiert werden.



Abbildung 7: Wasserspeicher oberhalb der Versuchsstrecke

Technische Daten des Speichersees (terrestrische Vermessung)

1.Versuch:

Beim ersten Versuch hatte der Speichersee eine Fläche von 2406,588 m² und bei einer durchschnittlichen Wassertiefe von 1,3 m ergab sich eine Wassermenge von ca. 3128,564 m³.

Terrestrische Vermessung und koordinative Bestimmung des Speichersees			
Punktnummer	X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Höhe
Theodolit	-42879,185	222227,61	1117,466
100	-42882,913	222221,685	1115,463
101	-42885,662	222212,711	1115,352
102	-42888,816	222202,295	1115,503
103	-42881,725	222197,919	1115,413
104	-42873,589	222194,841	1115,476
105	-42862,838	222196,355	1115,542
106	-42853,592	222197,332	1115,703
107	-42843,269	222199,51	1115,566
108	-42831,224	222200,179	1115,489
109	-42820,351	222200,801	1115,464
110	-42806,268	222205,649	1115,323
111	-42799,93	222208,13	1115,474
112	-42793,096	222210,775	1115,691
113	-42795,369	222218,336	1115,503
114	-42800,049	222220,143	1115,473
115	-42803,995	222226,218	1115,342
116	-42807,316	222230,508	1115,314
117	-42817,951	222230,134	1115,358
118	-42830,551	222228,22	1115,446
119	-42844,66	222228,391	1115,319
120	-42854,343	222228,065	1115,516
121	-42861,167	222225,584	1114,937
122	-42870,315	222223,996	1115,448
123	-42877,945	222222,935	1115,427

Tabelle 4: Vermessungspunkte des Speichersees (Vermessung mit einem Theodolit)

2. und 3. Versuch:

Für den zweiten und dritten Versuch vergrößerte sich die Fläche des Speichersees auf 2645,222 m² und bei einer durchschnittlichen Wassertiefe von 1,2 m fasste der See nun eine Wassermenge von ca. 3174,266 m³.

4. Versuch:

Beim vierten Versuch hatte der Speichersee eine Fläche von 3125,075 m² und bei einer durchschnittlichen Wassertiefe von 1,0 m ergab sich eine Wassermenge von ca. 3125 m³.

5. Versuch:

Durch eine markante Verkleinerung des Speichersee betrug die Fläche bei diesem Versuch nur mehr 1440,576 m² und bei einer durchschnittlichen Wassertiefe von 1,5 m ergab sich eine Wassermenge von ca. 2160,864 m³.

Die Vermessungsdaten des 2. und 3., 4. bzw. 5. Versuches sind dem Anhang zu entnehmen

Messtechnik

Ultraschall

Ultraschall werden die mechanischen Schallwellen mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz genannt. Das heißt sie werden gebildet durch schwingende Teilchen in der Materie, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt ab von der Schallgeschwindigkeit des jeweiligen Messmediums.

Erzeugt wird Ultraschall mithilfe des piezoelektrischen Effektes. Dabei werden sogenannte elektroakustische Wandler (Quarz, Bariumtitanat, Piezokeramik etc.) durch hochfrequente Wechselspannungen zu mechanischen Schwingungen angeregt. Für die Wasserstandsmessung werden üblicherweise Frequenzen zwischen 200 und 800 kHz verwendet.

Ultraschallsensoren werden grundsätzlich zur Abstandsmessung eingesetzt. Sie basieren auf dem Prinzip der Echo Messung, das heißt es wird die Laufzeit eines Ultraschallimpulses zwischen Sensor und zu messendem Objekt (Schneehöhe, Füllstand, Pegelstand etc.) ermittelt (SOMMER, 2001).

In Wildbacheinzugsgebieten gehen Murgänge immer mit einer signifikanten, plötzlichen Erhöhung des Fliessniveaus einher. Es ist also naheliegend, Pegelmessungen als Indikator für einen unmittelbar bevorstehenden Murgang oder einen bereits stattfindenden Murgang zu verwenden.

Da der Sensor lediglich über die Laufzeit den Abstand zwischen der Ultraschallquelle und der reflektierenden Oberfläche, in diesem Fall der Wasseroberfläche, misst, ist noch ein Algorithmus notwendig, um den eigentlichen Wasserstand (Pegel) zu erhalten. Dies erfolgt intern über eine entsprechende Programmierung des Speichermoduls. Dabei wird die gemessene Entfernung h addiert mit einem fixen, negativen Wert, der Gesamthöhe zur Bodenoberfläche H und anschließend noch mit -1 multipliziert. Über den so erhaltenen Pegel wäre es dann noch möglich, mittels

eines im Vorfeld ermittelten Pegelschlüssels den Abfluss für das betreffende Gerinne zu erhalten.

In der Umrechnung liegt auch schon der größte Nachteil der Pegelmessung mittels Ultraschall. Ändert sich die Sohlenlage des Bachlaufes stimmen die Umrechnungsparameter natürlich nicht mehr und müssten neu kalibriert werden.



Abbildung 8: Ultraschallsensor zur Ermittlung der Abflusstiefe

Radarmessgerät

Sehr ähnlich wie die Pegelmessung mittels Ultraschall erfolgt die Messung mittels Radar. Radar ist eigentlich eine Abkürzung und bedeutet Radio Aircraft Detecting And Ranging.

Der grundlegende Unterschied zum Ultraschall liegt in der Wellenart.

Mikrowellen, die zur Aufnahme von Radardaten eingesetzt werden, gehören zu den elektromagnetischen Wellen. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und werden ebenfalls an praktisch allen Grenzschichten reflektiert.

Die Messung mit einem Radar verlangt vollständige Einsicht in den Bachlauf. Der Parameter, der mit der Radarmessung ermittelt wird, ist ein Maß für die „Intensität“ einer Bewegung. Das Radarmodul zeichnet dabei Bewegungen innerhalb eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von 11 Grad auf.

Der aufgezeichnete Wert ist abhängig von:

- Material: Dielektrizitätskonstante (Wasser hat hohe Dielektrizitätskonstante)
- Entfernung
- Bereiche innerhalb des Kegels, die sich bewegen.

Bei der Messung wird angenommen, dass die Entfernung und das Material konstant bleiben. Daher entspricht das Ausgangssignal der Intensität einer Murbewegung.

Diese Intensität ist unabhängig von der Geschwindigkeit der Mure.

Die verwendeten Radarwellen haben eine geringere Streuung als Ultraschallwellen, wodurch sich die einsetzbare Reichweite und die Genauigkeit erhöhen.

Geophone

Im Rahmen der Murversuche im Schesatobel wurden von der Firma Sommer Mess-Systemtechnik Geophone aufgestellt. Als Ergebnis dieser Messungen sollten Aussagen über das seismische Verhalten von Muren, die Geschwindigkeit von Muren sowie Kenntnisse über die Abhängigkeiten der Messung von den lokalen Gegebenheiten gewonnen werden. Bei letzteren handelt es sich insbesondere um den Einfluss des Abstandes des Messgerätes zur Mure mit der Dämpfung der Schwinggeschwindigkeit.

Geophone bestehen im Wesentlichen aus einem Magneten (seismische Masse), der sich in einer elektrischen Spule frei bewegen kann. Wird dieser Magnet durch Bodenschwingungen in Bewegung versetzt, induziert er Strom in der Spule, der gemessen werden kann. Die Anzeige erfolgt als elektrische Spannung, meist wird als Einheit mV verwendet.

Geophone können üblicherweise Vibrationen in einem Frequenzbereich von 10 Hz bis 300 Hz messen. Die meisten Murgänge erzeugen Bodenschwingungen im

Bereich zwischen 30 Hz und 80 Hz, je mehr Wasseranteil in der Mure, umso höher die Frequenz.

Die Geschwindigkeiten der Bodenwellen liegen dabei, je nach Wellentyp zwischen wenigen hundert m/s und einigen tausend m/s.

Je nachdem in wie vielen Raumachsen Schwingungen aufgezeichnet werden, spricht man von ein- bzw. dreidimensionalen Geophonen. Letzteres besteht im Grunde einfach aus drei, in den Raumachsen angeordneten seismischen Massen, die eine dreidimensionale Messung der Schwingung ermöglichen. 1-dimensional messende Geophone sind heutzutage bereits Massenware und in guter Qualität von mehreren Herstellern zu beziehen. (SCHMIDT; 2002)

Als Messwertgeber wurden handelsübliche Geophone mit einer Eigenfrequenz von 4 Hz verwendet. Diese Geophone wurden zur zeitlichen Übereinstimmung alle an einen gemeinsamen Datensammler angeschlossen. Die Abtastrate betrug dabei 1 s. Dem Datensammler wurden Geophonverstärker vorgeschaltet, welcher die auftretenden Erschütterungen mittels Filter entsprechend der Abtastrate anpassen. Aus der zeitlichen Differenz der empfangenen Signale zweier benachbarter Messsensoren sowie aus der Distanz zueinander kann in etwa die Frontgeschwindigkeit eines Murschubes errechnet werden.



Abbildung 9: Geophon in das Erdreich eingegraben

Aerometer – Schwebstoffmessung

Im Ausleitungsgerinne kam eine Schwebstoffmessung zur Anwendung, wobei folgende Messgeräte verwendet wurden:

Biegeschwinger zur Dichtemessung mit Datenaufzeichnung: Der Flüssigkeitstransport erfolgte über eine Tauchpumpe, die mit einem Aggregat betrieben wurde. Er besteht aus einem Edelstahl-Röhrchen mit einem Durchmesser von 4 mm. Es ist einmal in der Mitte mit einem Radius von 2 cm um 180° gebogen. An den zwei Armen werden Magnete angebracht, mit denen das Röhrchen wie eine Stimmgabel in Schwingung versetzt wird. An den Stellen an denen das Röhrchen eingespannt ist, sitzen die Knotenpunkte der Schwingung. Somit ist das Volumen der am Schwingungsvorgang beteiligten Flüssigkeit, die durch das Röhrchen gepumpt wird, definiert und es kann aus der Schwingungsperiode auf die Dichte der Flüssigkeit geschlossen werden.

Aerometer: zum Vergleich mit dem Biegeschwinger

Zugkraftmessung

Die Zugkraftmessung erfolgte mit einer DMS-Wägezelle des Typs UB1. Die Wägezelle besteht aus Edelstahl. Durch die geschweißte Abdeckung der DMS-Messelemente und dem Einsatz einer Glasdurchführung für den Kabelanschluss garantiert sie hohe Genauigkeit auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen.



Abbildung 10: Einhängen der DMS-Wägezelle zwischen die Stahlseile

Videostudien

Die gesamte Filmdokumentation der in diesem Projekt durchgeführten Versuche erfolgte mit Hilfe von mindestens 4 Videokameras.

Die Filmteams des Zentralen Informatikdienstes der Universität für Bodenkultur bzw. der Firma MEDIAFILM verwendete dabei unter anderem Beta-Kameras und High-speed Kameras.

Weiters kamen „normale“ digitale Kameras zum Einsatz, die vor allem beim 3. Murversuch überraschend gute Aufnahmen zeigten – darunter eine Zeitrafferstudie des Aufbaues eines typischen Murkegels.

Vermessen des Geländes mit einer Messbildkamera

Vor jedem Murversuch – wie auch nach jedem Versuch – wurde das gesamte Gelände mit Hilfe einer Messbildkamera vom Gegenhang aus von unterschiedlichen Standorten photographisch aufgenommen (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12). Daraus konnte in weiterer Folge ein Geländemodell erstellt werden bzw. konnten die Vorgänge photographisch erfasst werden.



Abbildung 11: Fotografie mit der Messbildkamera vor dem Murversuch



Abbildung 12: Fotografie mit der Messbildkamera nach dem Murversuch

Wie aus Abbildung 11 und Abbildung 12 ersichtlich ist, konnte nach Erstellung von Digitalen Geländemodellen (Gelände vor und nach dem Versuch) die Kubatur der erodierten Lockermasse bestimmt werden.

Auch die Eintiefung des Geländes im Bereich der Transitstrecke ist daraus deutlich zu sehen.

Terrestrische Vermessung

Messmarken

Um mittels Videokameras Oberflächengeschwindigkeiten berechnen zu können, wurden auf beiden Seiten der Auslöse- bzw. Transitstrecke Messmarken in den Boden gesetzt. Diese sind ebenfalls terrestrisch vermessen worden und somit eindeutig koordinativ bestimmt.

Das Problem bei dieser Methode lag in der Ungewissheit des Verlaufes des Murganges, sodass die Marken zum Teil sehr weit entfernt der Transitstrecke

positioniert wurden. Weiters konnte - zur Ermittlung der Geschwindigkeit - die Bewegung von an der Oberfläche fließenden groben Gesteinspartikeln nicht genau bestimmt werden und dementsprechend konnte keine sinnvolle Auswertung erfolgen. Dennoch waren diese sehr hilfreich, da die eindeutige koordinative Lage der Tafeln hilfreich bei der Erstellung der Geländemodelle war, diese nicht nur relativ, sondern aufgrund dieser Passpunkte absolut (globale Koordinatensystem) orientiert werden konnten.

Terrestrische Vermessung und koordinative Bestimmung der Messmarken				
Standort	Punktnummer	Y	X	Höhe
Theodolitstandort	1000	-42.982,890	222.438,053	1.052,59
Konsolidierungssperre	101	-42.966,655	222.370,938	1.057,49
Konsolidierungssperre	102	-42.984,367	222.387,516	1.057,51
Konsolidierungssperre	105	-42.831,782	222.495,437	1.028,08
Konsolidierungssperre	106	-42.834,297	222.500,865	1.027,46
Messmarke	1	-42.893,772	222.341,554	1.071,86
Messmarke	2	-42.881,105	222.329,588	1.084,55
Messmarke	3	-42.866,727	222.318,457	1.095,97
Messmarke	4	-42.856,024	222.304,489	1.106,88
Messmarke	5	-42.896,879	222.264,940	1.106,88
Messmarke	6	-42.903,592	222.276,924	1.095,61
Messmarke	7	-42.916,918	222.301,189	1.081,27
Messmarke	8	-42.926,352	222.324,031	1.073,13
Messmarke	9	-42.893,904	222.258,860	1.112,53
Messmarke	10	-42.849,946	222.298,666	1.112,54
Messmarke	11	-42.936,874	222.345,454	1.064,97
Messmarke	12	-42.951,546	222.364,327	1.059,29
Messmarke	13	-42.898,153	222.363,858	1.065,05
Messmarke	14	-42.900,211	222.397,796	1.056,46

Tabelle 5: Koordinaten der einzelnen Messmarken, die vor allem der Erstellung der Geländemodelle dienen

Beschreibung der Versuchsanordnung und Durchführung der Versuche

Allgemeines

Insgesamt sind 5 Murversuche durchgeführt worden, wobei für jeden einzelnen Murversuch der Schwerpunkt auf ein anderes Messgerät bzw. auf einen besonderen Abschnitt (Erosions- bzw. Transitstrecke oder Ablagerungsstrecke) der Versuchsstrecke gelegt wurde. Bei jedem Versuch wurden sowohl im Ablagerungsbereich als auch im Übergangsbereich zur Erosions- und Transitstrecke Geschiebeproben entnommen

Beim **ersten Murversuch** lag die Konzentration im Bereich der richtigen Handhabung der Messbildkamera, der Pegelmessung im Speichersee (zum Erhalt einer Absenkkurve) und der Geophonmessung. Hier muss jedoch erwähnt werden, dass aufgrund der Unwissenheit des Verlaufes des Murganges die Geophonmessung ausschließlich auf die Erschütterung bzw. den Abstand der Geophone zur Versuchsstrecke getestet wurde.

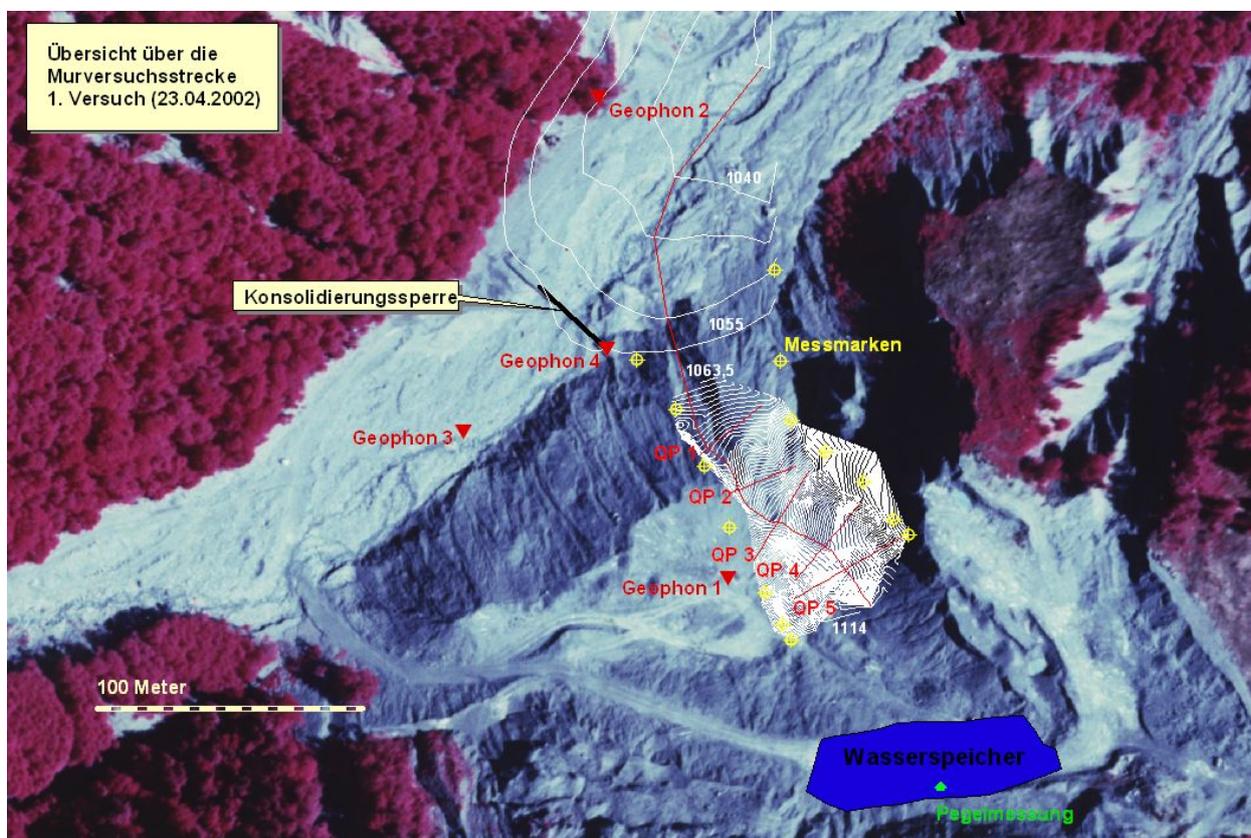


Abbildung 13: Übersicht der Versuchsstrecke - erster Murgang

Bei diesem **Versuch (zweiter)** wurde ebenfalls das Gelände mit der Messbildkamera genau vermessen und die Geophone im Ablagerungsbereich installiert. Somit konnte diesmal die Geschwindigkeit des Murganges im Ablagerungsbereich ermittelt werden. Darüber hinaus gelangte zum ersten Mal das Radarmessgerät zum Einsatz.

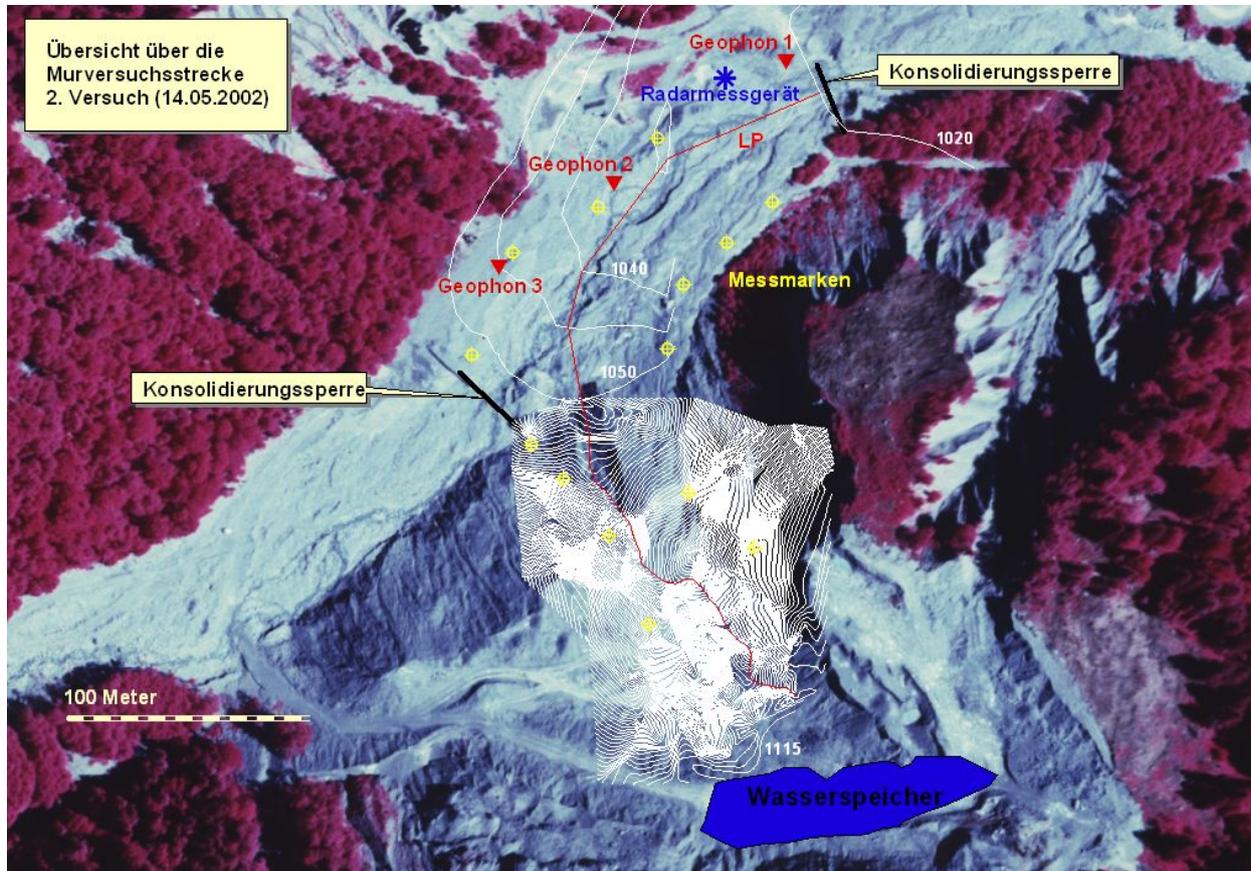


Abbildung 14: Übersicht der Versuchsstrecke - zweiter Murgang

Der **dritten Murversuch** war geprägt durch schlechte äußere Witterungsbedingungen (kein Vermessen des Geländes mit der Messbildkamera), sodass sich die Messtechnik rein auf die Schwebstoffmessung konzentriert. Allerdings konnte bei diesem Murgang der Aufbau eines typischen Murkegels beobachtet werden.

Im **vierten Murversuch** gelangten wieder die Messbildkamera und Geophone zum Einsatz. Diese wurden jedoch im Gegensatz zum zweiten Versuch nicht in der Ablagerungs-, sondern in der Erosions- bzw. Transitstrecke installiert. Mit Hilfe eines

Ultraschalles bzw. einer DMS-Wägezelle wurde die Abflusstiefe bzw. der Murdruck ermittelt.

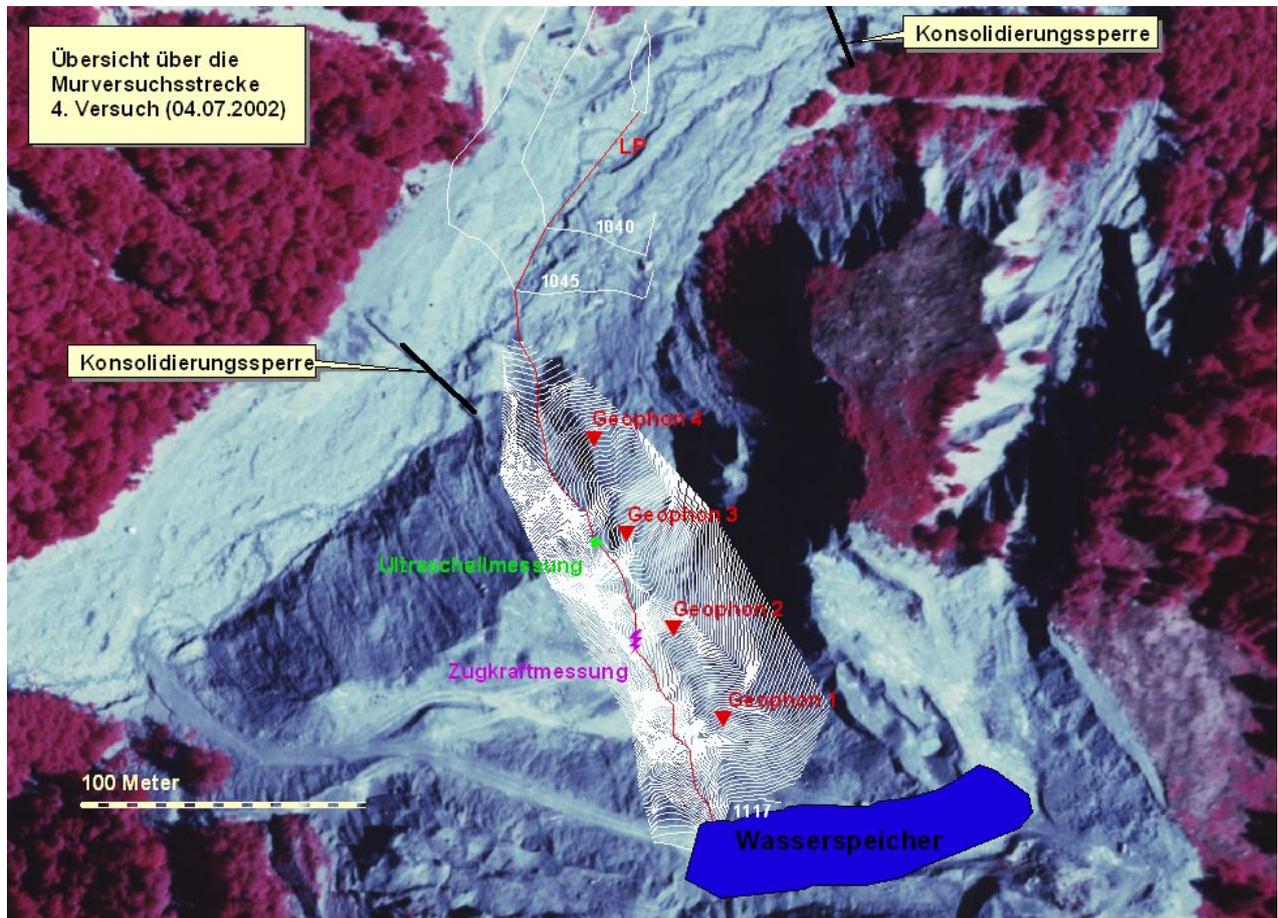


Abbildung 15: Übersicht der Versuchsstrecke - vierter Murgang

Beim **fünfter Murversuch** wurde nur mehr eine Zugkraftmessung durchgeführt.

Hilfe eines Baggers der Kiesfirma ZECH der Speichersee aufgerissen worden. Während in der ersten Phase in der Erosionsstrecke bis zu 8000 m³ Lockermaterial aufgenommen wurden (seitliche Einhänge brachen ein), war vor allem im Bereich des Schesahauptbaches (Bereich der Geschiebeablagerung) – zwischen den Konsolidierungssperren – das eigentliche Murverhalten zu beobachten. Die Fortbewegung der Feststoffe erfolgte kollernd und gleitend. Innerhalb des Murenkörpers wurden die Grob- und Feinkomponenten mit der gleichen Geschwindigkeit wie der Murenbrei vorwärtsbewegt. Die größten Bestandteile wurden vornehmlich an der Oberfläche transportiert. Diese tauchten bei entsprechender Abflusstiefe in den Murenkörper ein. In der einschlägigen Literatur wird übereinstimmend das laminare Fliessverhalten des Murkörpers beschrieben (z.B.: PIERSON, 1986, COSTA, 1988, DAVIES, 1988, JORDAN, 1994). Es handelt sich hierbei um ein allgemeines typisches Kennzeichen, welches die Mure von anderen ähnlichen Phänomenen, wie zum Beispiel dem hyperkonzentrierten Abfluss, bei dem Turbulenz vorherrscht, abgrenzt. Auch die allgemein anerkannten rheologischen Modelle setzen laminares Fliessen voraus.

Murgänge weisen an der Front eine hohe Feststoffkonzentration auf und zeichnen sich durch ein schubartiges Fliessverhalten aus, das sich deutlich vom Reinwasserabfluss unterscheidet (RICKENMANN, 2001).

Dieses Verhalten kann allerdings nicht für die gesamte Mure gelten. Wie die Versuche zeigten, gliedert sich eine typische Mure grob in drei Bereiche: Ganz an der Spitze der sogenannte Murkopf, der nahezu vollständig aus den größten Bestandteilen der Mure aufgebaut wird und in dem durch das Fehlen der Matrix der Fliesswiderstand hauptsächlich durch Reibung zwischen den Steinen hervorgerufen wird. Nach den Beobachtungen der Versuche kann hier sicherlich nicht mehr von Fliessen gesprochen werden. Vielmehr scheint es, als ob der Murkopf hauptsächlich von den nachfolgenden flüssigeren Murbereichen geschoben wird. Dem Murkopf folgt der eigentliche Hauptteil einer Mure, der sogenannte Murkörper, der aus einer Matrix und darin eingebetteten großen Steinen, die oftmals an der Oberfläche konzentriert auftreten, aufgebaut wird. Hier sollte durch die hohe Viskosität der Matrix bedingt nur laminares Fliessen auftreten können. Es ist dies auch der Bereich, dessen Verhalten mit den oben angeführten Modellen beschrieben werden kann.

Dem Murkörper folgt ein Bereich, der durch abnehmende Sedimentkonzentration und damit abnehmende Viskosität gekennzeichnet ist. Er wird als sogenannter Murschwanz bezeichnet. Hier kann es, je nach Geschwindigkeit und Abstand vom Murkörper zum Einsetzen von Turbulenz kommen (PIERSON, 1986, COSTA, 1988). Der Murgang dauerte ungefähr 30 Minuten, wobei der Abfluß in den ersten 15 Minuten (ca. $2 \text{ m}^3/\text{s}$) deutlich höher war als in den zweiten 15 Minuten (ca. $1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Untersuchungen an den entnommenen Proben

Die für die Alpen typische Murgänge könne vereinfacht als ein Gemisch aus den drei Hauptkomponenten Wasser, Feinmaterial und groben Steinen betrachtet werden (RICKENMANN, 2001).

Von verschiedenen Standorten (untere Transitstrecke, Ablagerungsbereich) wurden Geschiebeprobe (Feinmaterial und Steine) entnommen, die im Labor in Wien ausgewertet werden.

Eine einfache Probe aus der Transitstrecke wurde gleich nach deren Entnehmen gewogen, getrocknet und später in trockenem Zustand das Gewicht wiederum bestimmt.

Leeres Kübelgewicht: 0,5 kg

Gewicht der Probe **feucht** (ohne Kübelgewicht) 10,5 kg

Gewicht der Probe **trocken** (ohne Kübelgewicht) 7,5 kg

Gewicht des entwichenen Wassers 3,0 kg

Volumen der Probe in feuchtem Zustand 6,0 dm³

Volumen der Probe in trockenem Zustand 3,0 dm³

Volumen des Wassers 3,0 dm³

Dichte $\rho = \text{Masse} / \text{Volumen}$: **feucht:** $10,5/6 = 1,75 \text{ kg/dm}^3$

trocken: $7,5/3 = 2,50 \text{ kg/dm}^3$

Diese Korndichte deckt sich relativ gut mit entsprechenden Tafelwerten von Mineralien:

Silikate		Karbonate	
Orthoklas	2,5-2,6	Kalkspat	2,6-2,8
Plagioklas	2,62-2,76	Aragonit	2,9-3,00
Quarz	2,65	Phosphate	
Serpentin	2,5-2,7	Apatit	3,18-3,21
Hornblende	3,1-3,3	Oxyde	
Augit	3,2-3,6	Geothit	3,3-4,0
Olivin	3,3-3,5	Siderit	3,9
Zirkon	4,68-4,7	Magnetit	4,9-5,2
Schichtsilikate		Hämatit	5,0-5,3
Montmorillonit	2,6	Sulfide	
Kaolinit	2,58-2,6	Pyrit	4,9-5,2
Vermiculit	2,4-2,7	Bleiglanz	7,2-7,6
Muskovit	2,76-3,1	Chloride	
Biotit	3,02-3,12	Steinsalz	2,1-2,2
Sulfate			
Gips	2,32		
Anhydrit	2,9		

Tabelle 6: Dichte einiger Mineralien (PREGL, 1993)

Sieb- und Schlämmanalysen

Bei der Untersuchung der fünf entnommenen Geschiebeprobeen erfolgte zuerst eine Grobsiebung im Labor des Institutes für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen. Da der Schlämmanteil (Korngröße kleiner 0.063 mm) mehr als 20% betrug, muss dieser im Labor des Institutes für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft weiterbearbeitet werden (Schlämmung).

Einteilung der Korngrößen mineralischer Bodenarten	
Name	Korngröße in mm
Steine	> 63
Grobkies	63 bis 20
Mittelkies	20 bis 6,3
Feinkies	6,3 bis 2,0
Grobsand	2,0 bis 0,63
Mittelsand	0,63 bis 0,2
Feinsand	0,2 bis 0,063
Schluff, Ton	< 0,063

Tabelle 7: Korngrößeneinteilung

Die schon gesiebte und ausgewertete Geschiebeprobe – entnommen beim dritten Murversuch – zeigt deutlich eine zweigipfelige Kornverteilung mit hohem Schluff- und Tonanteil bzw. Grobsandanteil (siehe Abbildung 17).

Die weiteren Ergebnisse können nach der Schlämmanalyse in Form eines Wentworth – Diagramms oder mittels einer Φ - Kurve nach Krumbein dargestellt werden.

Messung der Viskosität, Grenzschubspannung, Scherfestigkeit, ...

Ebenfalls nach Beendigung der Sieb- und Schlämmanalysen kann die Viskosität, Grenzschubspannung und Scherfestigkeit der Matrix jeder einzelnen Geschiebeprobe mit Hilfe eines Viskosimeters gemessen werden. Die Rheologie einer Mure stellt eine der Schlüsselfaktoren zur Beschreibung ihres Verhaltens dar.

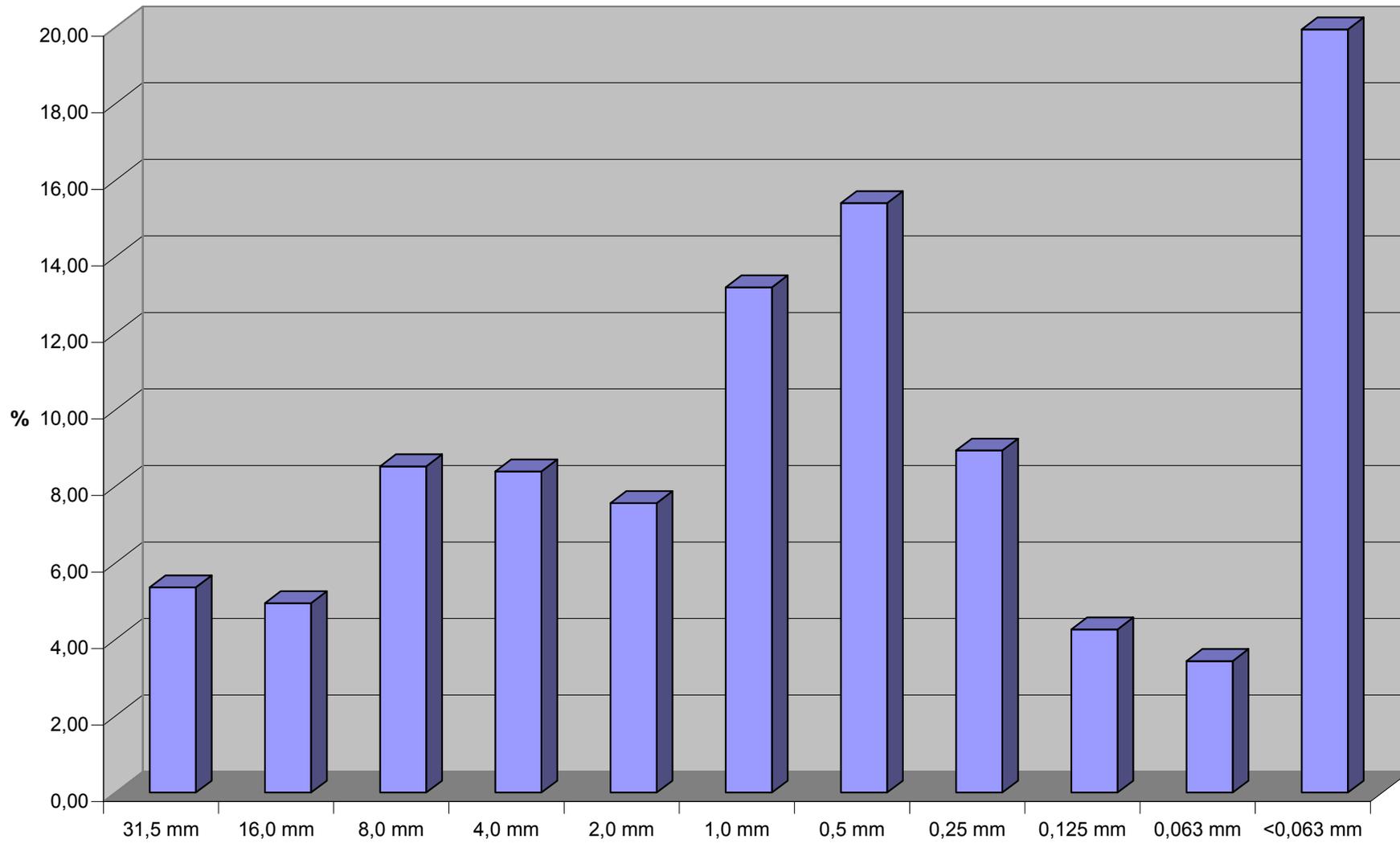


Abbildung 17: Kornverteilung der entnommenen Probe des dritten Murversuches

Auswertung und Ergebnisse der Versuche

Geländemodellerstellung mit Hilfe des Softwarepakets ELCOVISION 10

Funktionsweise des Softwarepakets ELCOVISION 10

Die Auswertesoftware ELCOVISION 10 bedient sich des Systems der Photogrammetrie. Diese ist ein indirektes Messverfahren zur Bestimmung eines Objektes in Form, Größe und Lage aus photographischen Bildern. Das wesentliche Merkmal besteht darin, dass die Messungen nicht am Objekt selbst, sondern in Bildern, in denen das Objekt abgebildet ist, vorgenommen werden.

ELCOVISION 10 bildet aus Bildern guter geometrischer Konfiguration numerische Modelle. Voraussetzung für eine gute geometrische Konfiguration sind günstige Schnittbedingungen zwischen den Aufnahmestrahlbündeln und eine Verteilung korrespondierender Bildpunkte über das gesamte Format.

Zu Beginn der Auswertung erfolgt eine Reseaumessung (siehe Abbildung 18), die zwei Aufgaben erfüllt. Zum einen wird im Bild ein kartesisches Koordinatensystem definiert, zum anderen können durch die Reseaumessung Fehler – Nichtplanlage des Filmes, Filmdeformationen beim Entwicklungsprozess, Nichtlinearitäten beim Scannen von Bildern und Unstetigkeitsstellen des Digitalisiertablets – mathematisch kompensiert werden. Die Bildpaare werden anschließend nacheinander der Relativen und Absoluten Orientierung unterzogen (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). Die Verbindung zwischen den Modellen ist über identische Punkte gegeben. Die Anzahl der Objektpunkte wird erhöht, sobald neue Punkte im Objektraum gewonnen werden. Im Anschluss an die Modell-Orientierung wird zur Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung die Bündelausgleichung berechnet.

Der Orientierungsprozess ist nun abgeschlossen und die eigentliche Auswertung schliesst sich an. Es wird nun das Prinzip der modellweisen Messung verlassen und zu Gunsten einer höheren Genauigkeit und Zuverlässigkeit eine Mehrbildmessung ermöglicht.

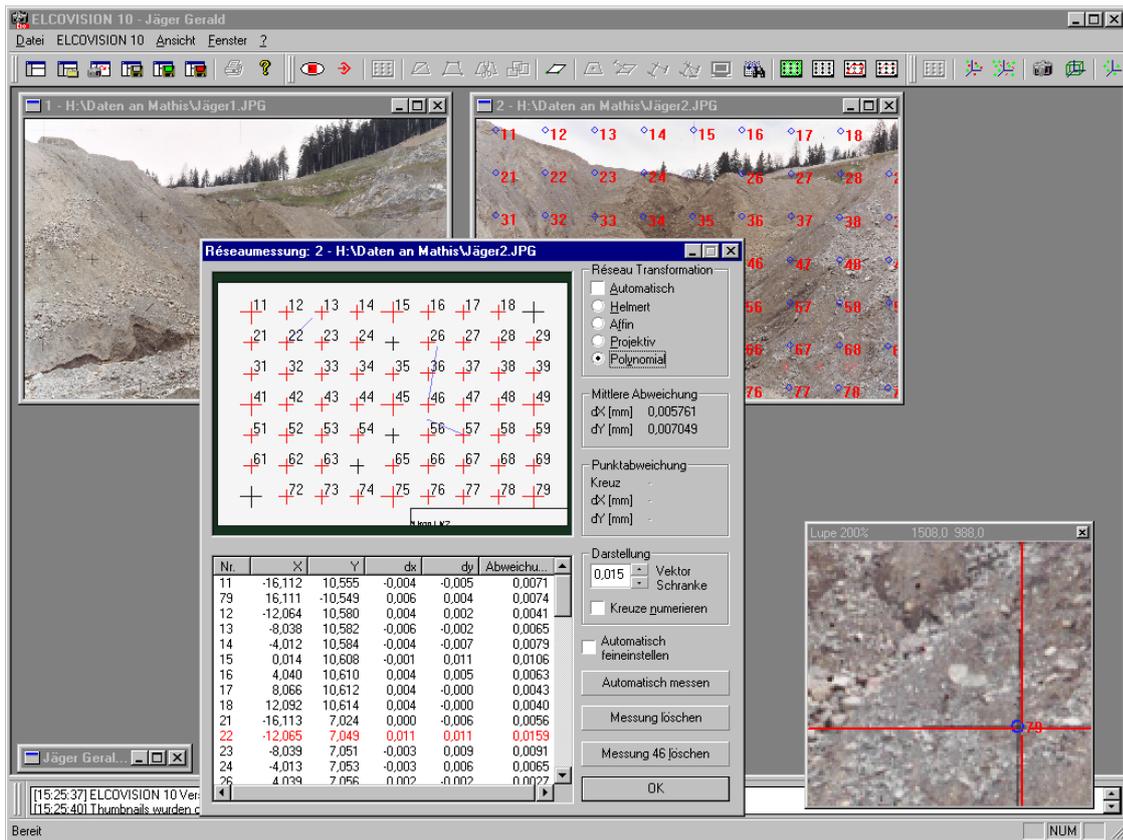


Abbildung 18: Reseauamessung an einem Bildpaar

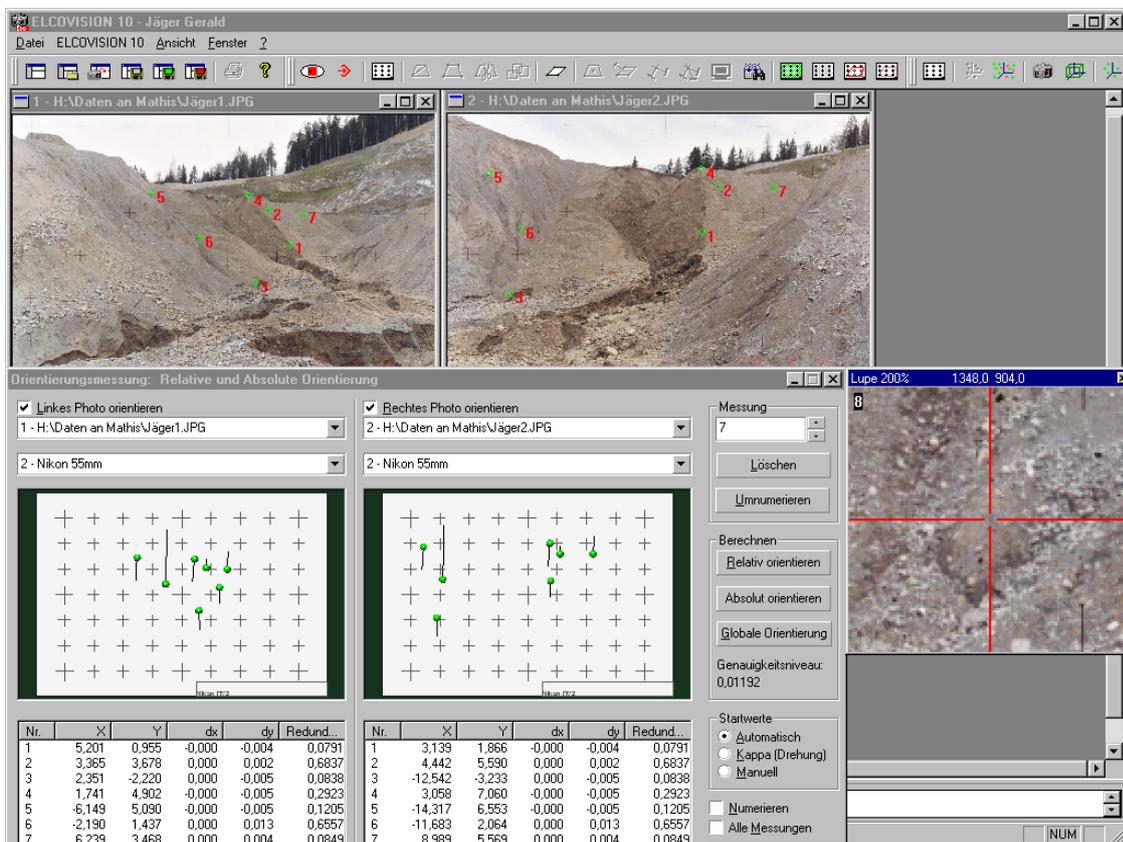


Abbildung 19: Relative Orientierung der Bildpaare

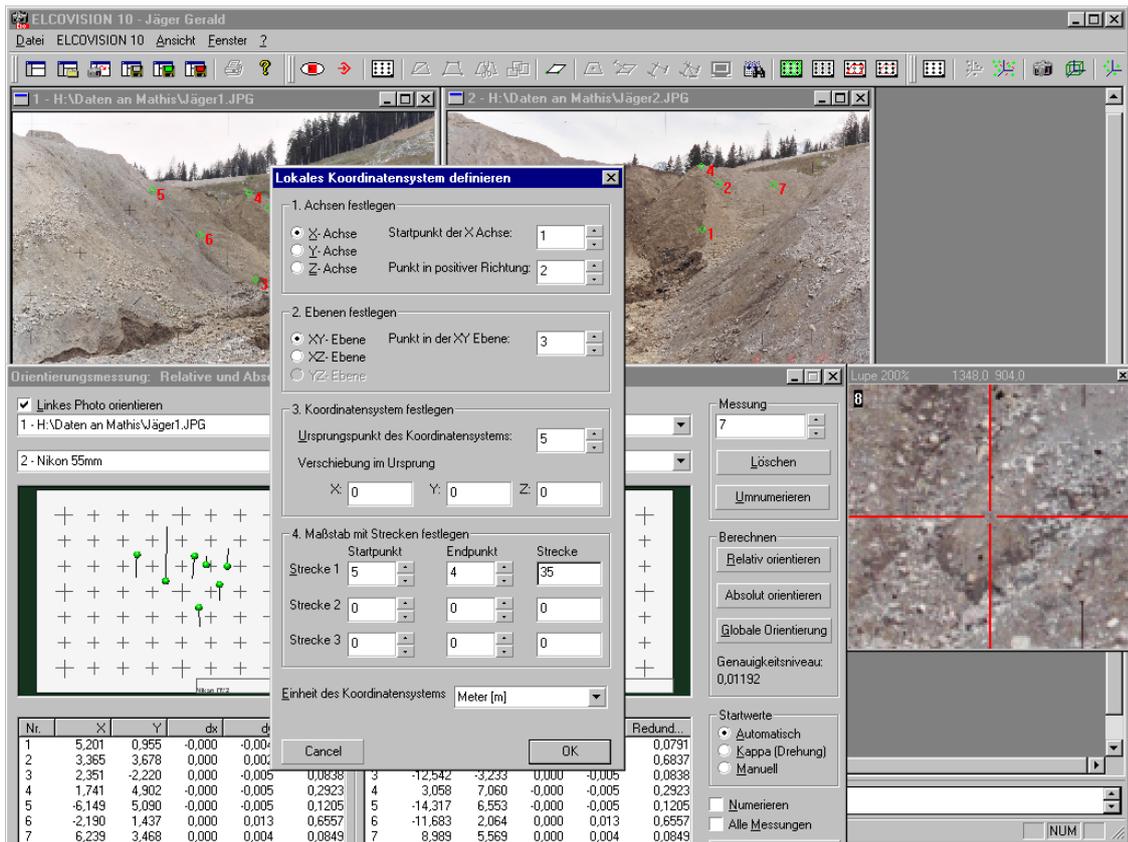


Abbildung 20: Absolute Orientierung der Bildpaare

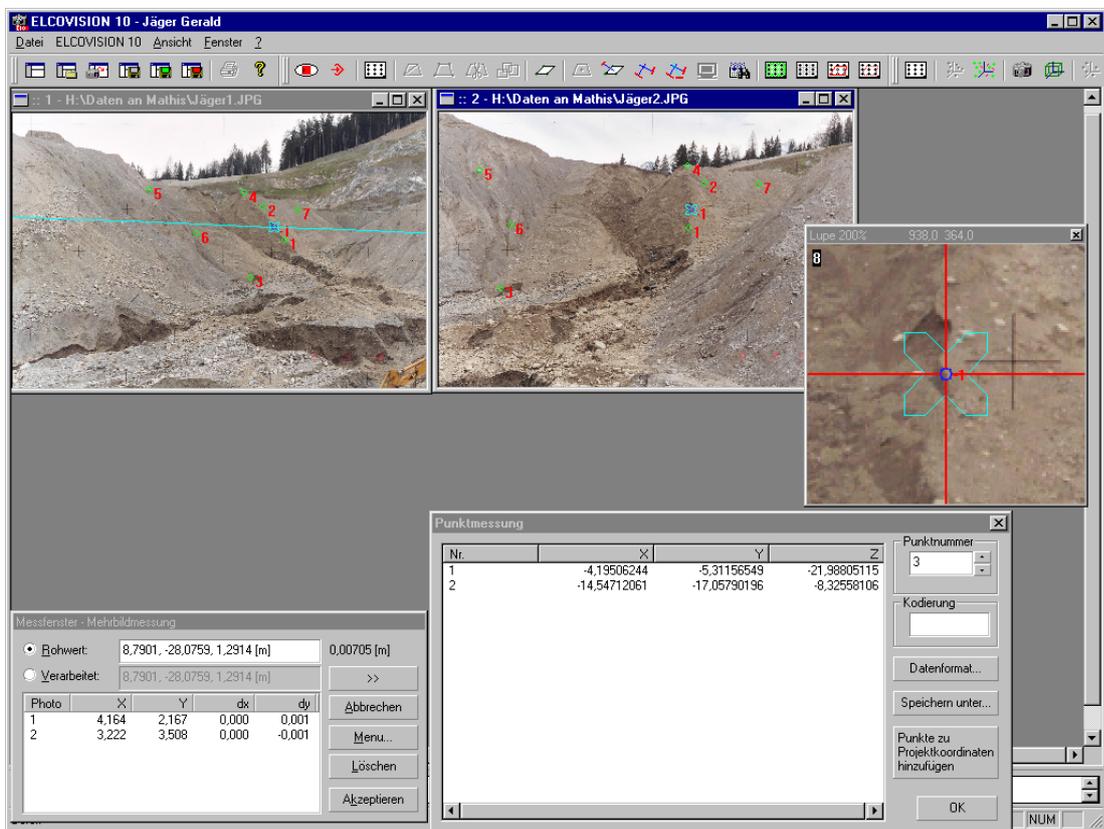


Abbildung 21: Identische Punkte des Bildpaares

Neben dreidimensionalen Punktkoordinaten werden gleichzeitig Linieninformationen für eine graphische Darstellung gespeichert. Ein graphisches Messprotokoll erscheint auf dem Bildschirm.

Alle Daten werden in einer ASCII-Datei abgelegt und stehen für weiterverarbeitende Programme im DXF-Format bereit. Für die Erstellung der einzelnen Geländemodelle werden diese Daten im GeoCad eingelesen und mittels einer Vermaschung können Höhenschichtlinien erzeugt werden. Die Weiterverarbeitung erfolgte anschließend im Arcview.

Ermittlung Auftrag-Abtrag (Erosion)

Wie im obigen Kapitel schon beschrieben, wurde im Arcview für jeden Murgang ein Geländemodell vor und nach jedem Versuch im TIN- und GRID-Format (0,5 m Zellen) generiert (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23) und die Differenz zur Ermittlung der erodierten Lockermasse bestimmt wurde.

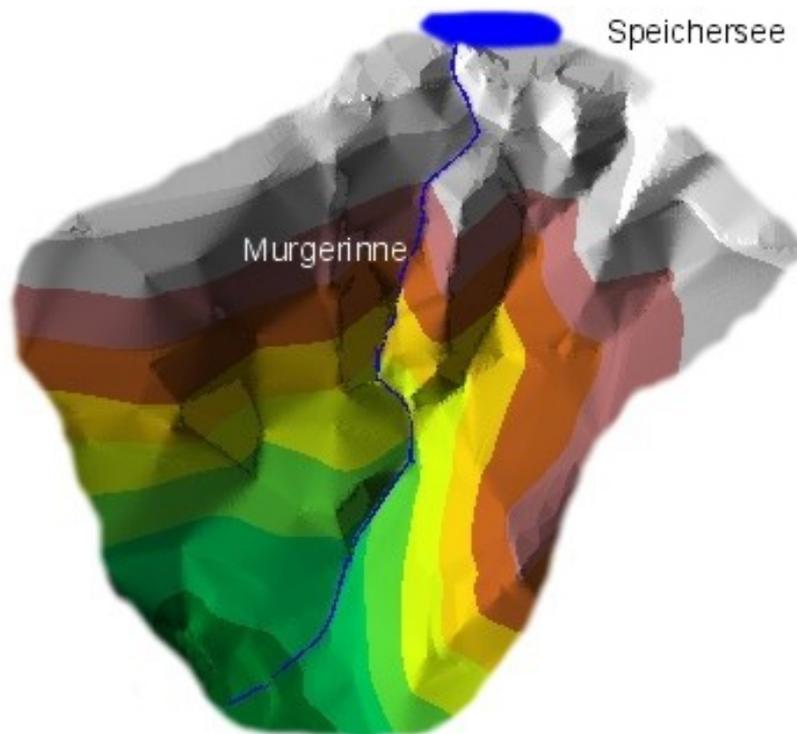


Abbildung 22: Geländemodell des 2. Murversuchs im TIN-Format

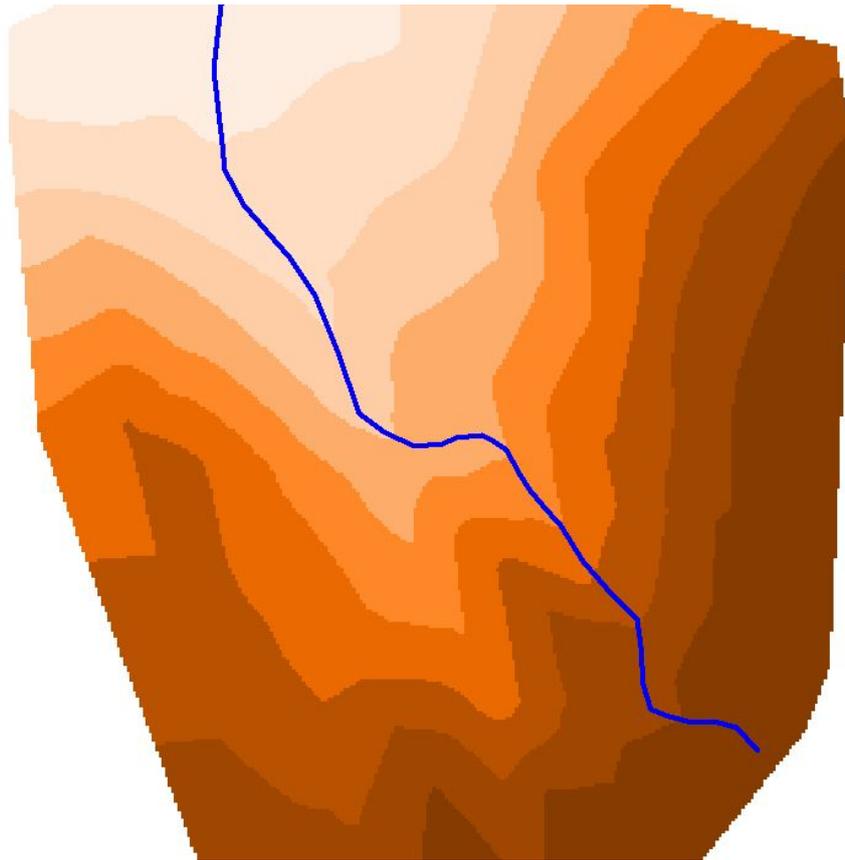


Abbildung 23: Geländemodell des 2. Murversuchs im GRID-Format

Sowohl beim ersten als auch beim zweiten Versuch wurde aus den Geländemodellen ermittelt, dass bis zu **8000 m³** an Geschiebepotential erodiert und im Ablagerungsbereich aufgelandet wurden. Wie bei den größeren untersuchten Murgangereignissen des Sommers 1987 in der Schweiz zeigte sich, dass rund zwei Drittel der gesamten Murenfracht aus Tiefen- und Seitenerosion im gerinnenahen Bereich stammte. Das Feststoffpotential der Seitenhänge ist von großer Bedeutung für die Geschiebenachlieferung ins Gerinne, welche auch zwischen den Murwellen erfolgte (RICKENMANN, 1995).

Die genauen Neigungsverhältnisse sowohl der Erosions- bzw. Transitstrecke als auch der Ablagerungstrecke und die Eintiefungen im Gelände (bis zu 10 m) des ersten Versuches sind maßstabsgetreu aus dem Längsprofil bzw. den Querprofilen im Anhang zu entnehmen.

Beim vierten Versuch wurden nur mehr **5000 m³** erodiert. Der Grund dafür liegt darin, dass vor dem Murversuch eine lange Trockenperiode die Gesteinsmassen im Hang ausgetrocknet und damit sehr verfestigt hat.

In den folgenden Geländemodellen (nicht maßstabsgetreu) des ersten Murversuches wurde zuerst ein Längsprofil entlang des Murganges nach dem Versuch in das Höhenschichtenprofil gelegt und dieses für das Modell vor dem Versuch übernommen.

Weiters wurden alle 20m (horizontal) Querprofile in den Modellen erstellt, aus denen die Eintiefung sehr deutlich ersichtlich ist.

Beginnend bei hm 0,20 – die Eintiefung beträgt hier 2,37m und die erodierte Querschnittsfläche 12,14 m² – schreitet die Erosion mit zunehmender Neigung drastisch bis zu hm 0,92 an (maximale Eintiefung 9,90m und eine Querschnittsfläche von 140,10 m²).

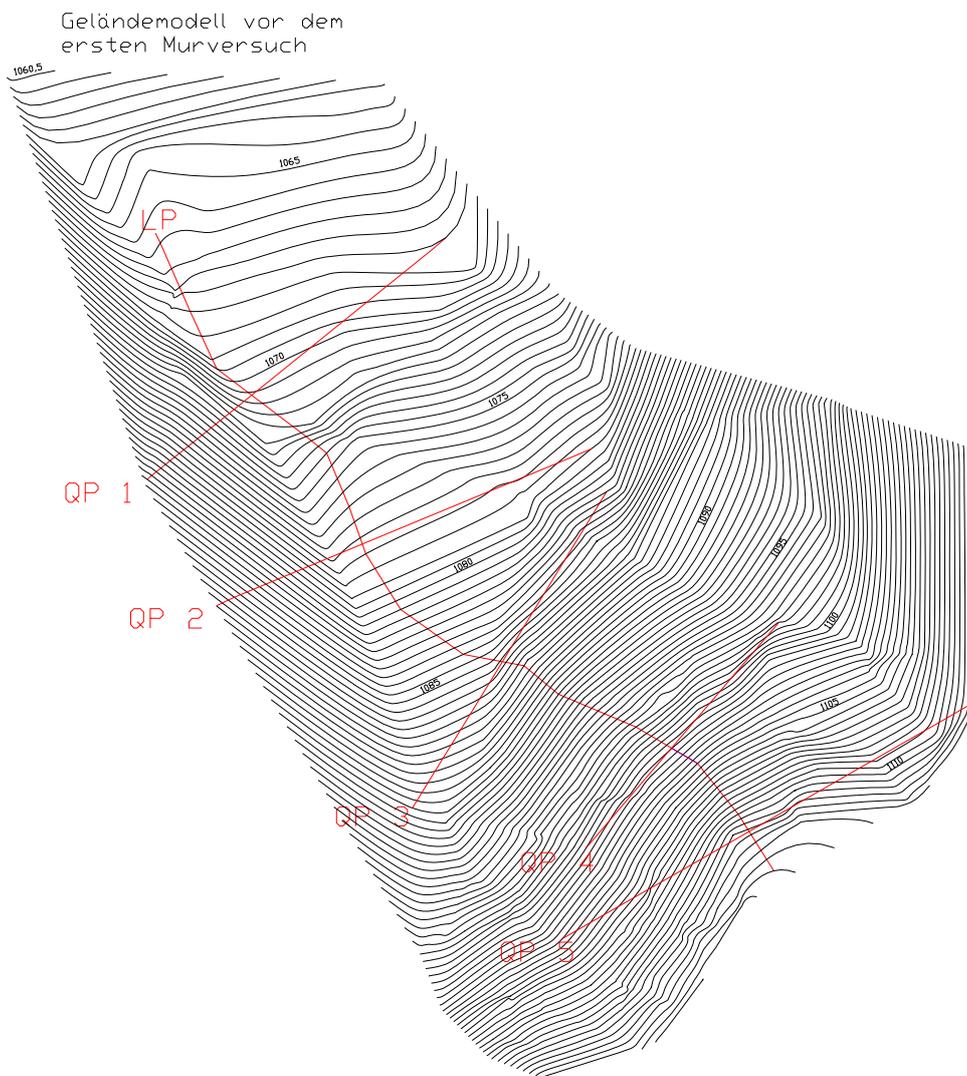


Abbildung 24: Geländemodell (Höhenschichtlinien) vor dem Murversuch

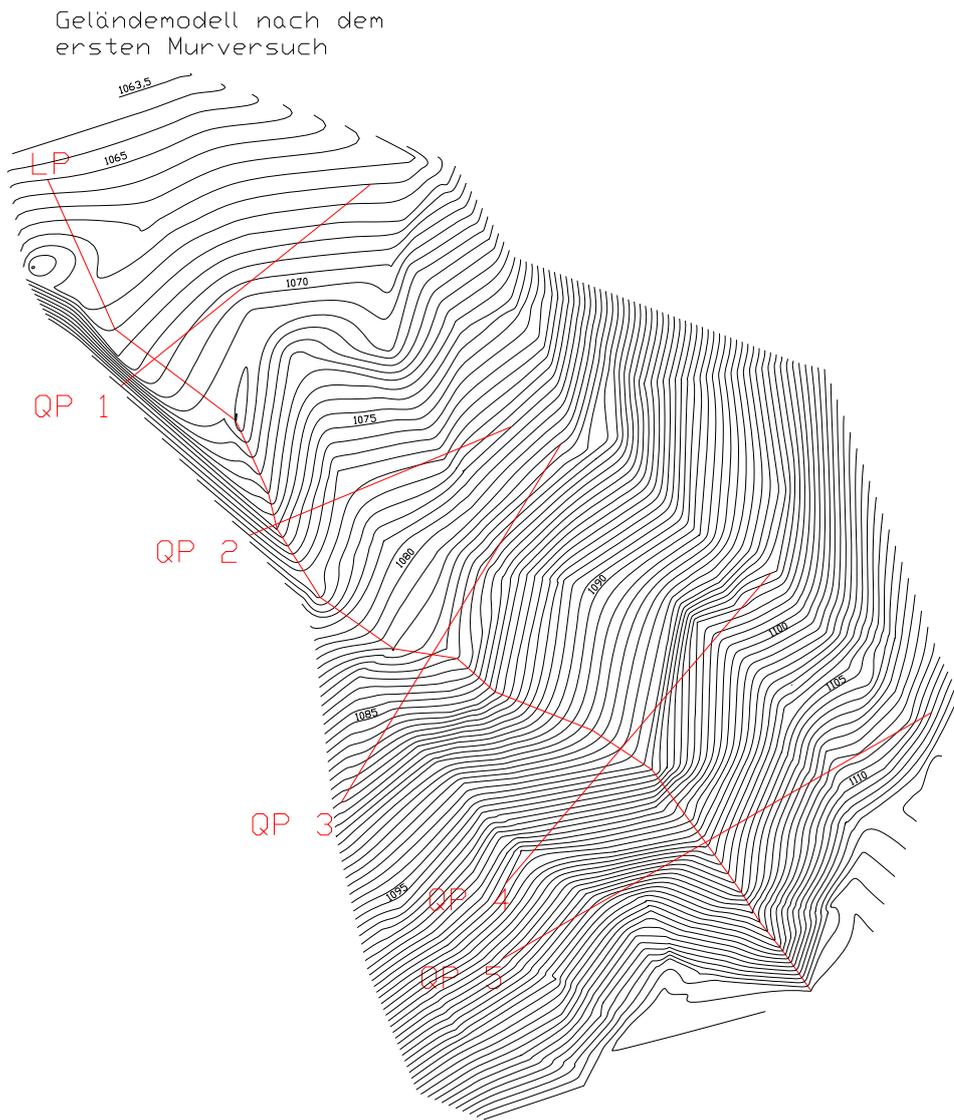


Abbildung 25: Geländemodell (Höhenschichtlinien) nach dem Murversuch

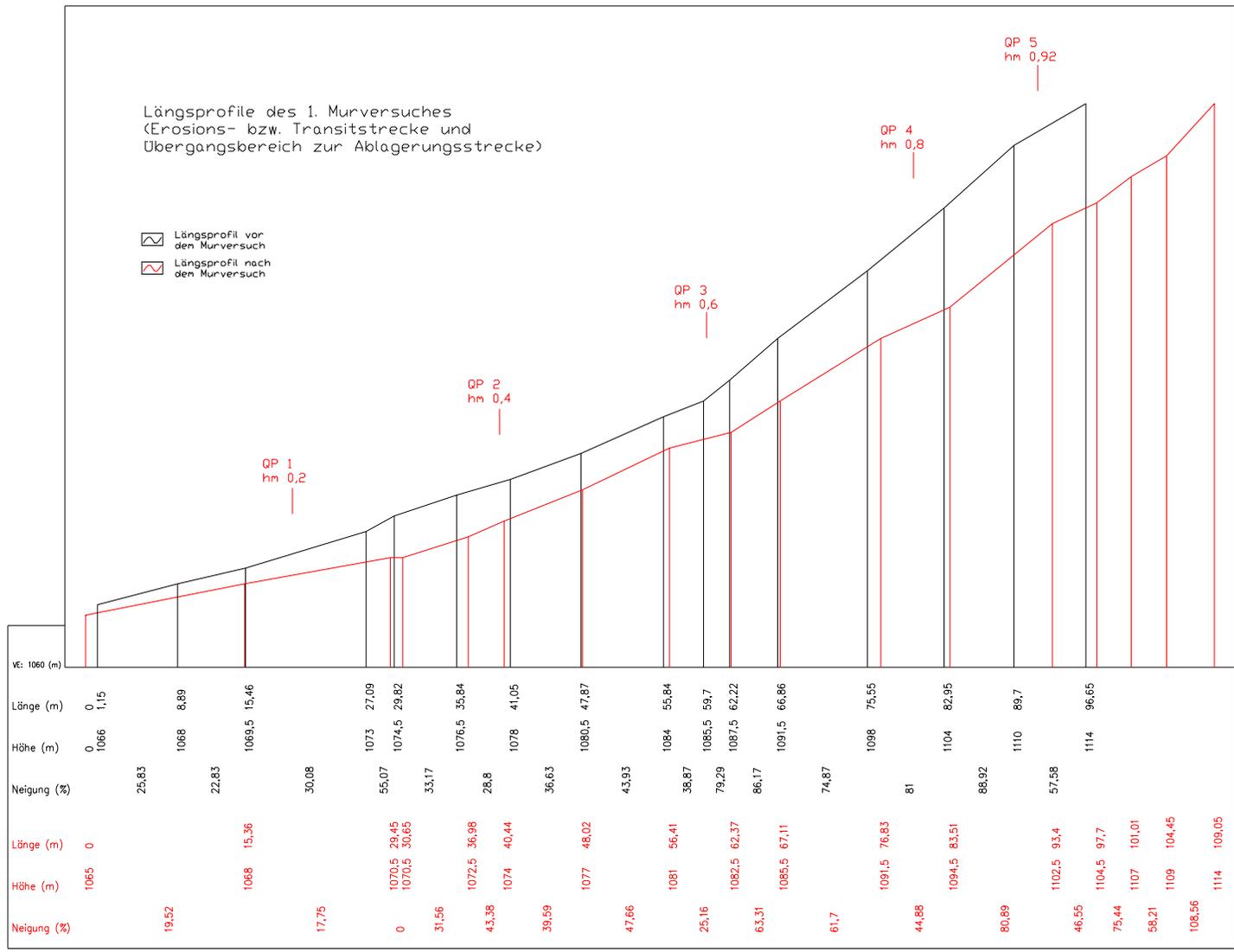


Abbildung 26: Längsprofil des ersten Murrversuches

Zwischen den Querprofilen 1 und 2 beträgt die mittlere Längsneigung 19° oder 34,43%. Die Erosion in diesem Bereich ist mit einer Eintiefung zwischen 2,37 und 2,83 m eher noch gering. Auch die abtransportierte Querschnittsfläche liegt nur zwischen 12,14 m² und 13,44 m².

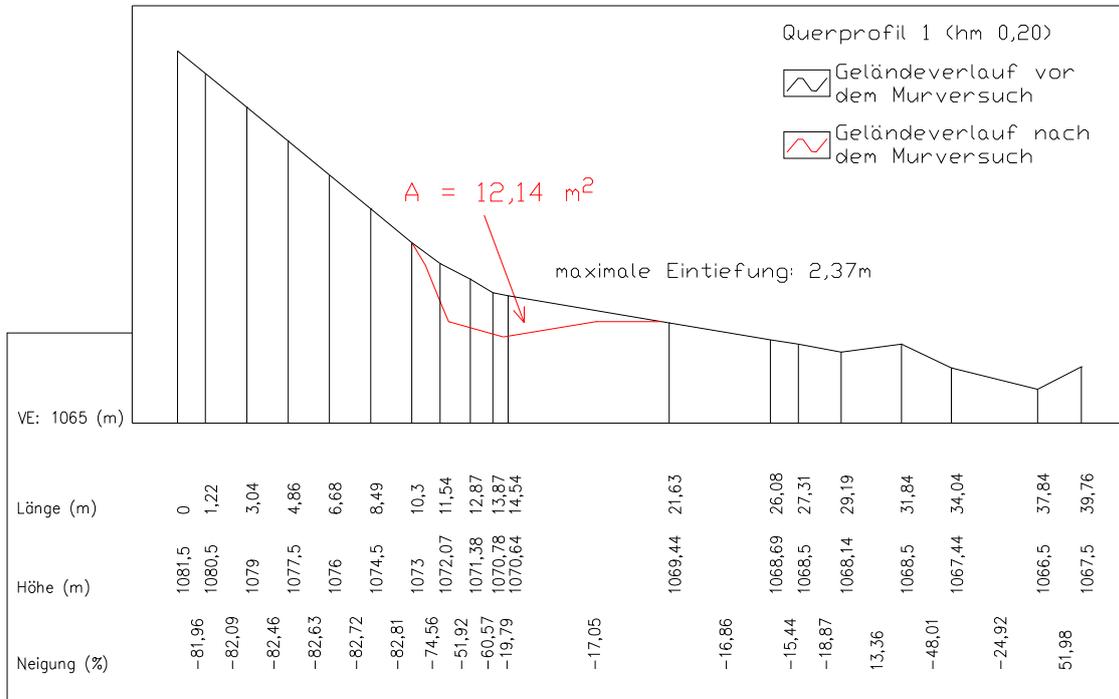


Abbildung 27: Querprofil Nr.1

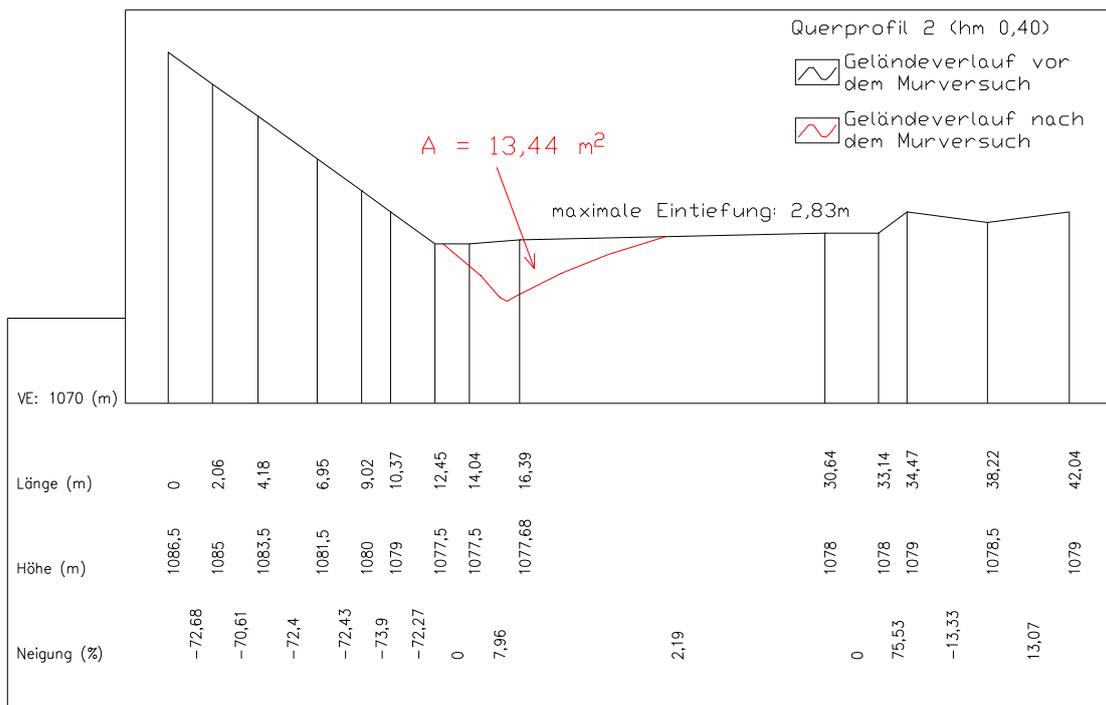


Abbildung 28: Querprofil Nr.2

Die Neigungsänderung zwischen dem Querprofil 2 und 3 beträgt nur zirka 6% (22° oder 40,40%). Daher ist auch bei der Eintiefung (2,98 m) kein wesentlicher Unterschied auszumachen. Die erodierte Querschnittsfläche hat sich jedoch verdoppelt (30,56 m²). Der Grund dürfte darin liegen, dass sich nach diesem Querprofil bergwärts die Neigungsverhältnisse stark ändern und hier aufgrund der höheren Murgeschwindigkeit eine größere Erosion verursacht wird.

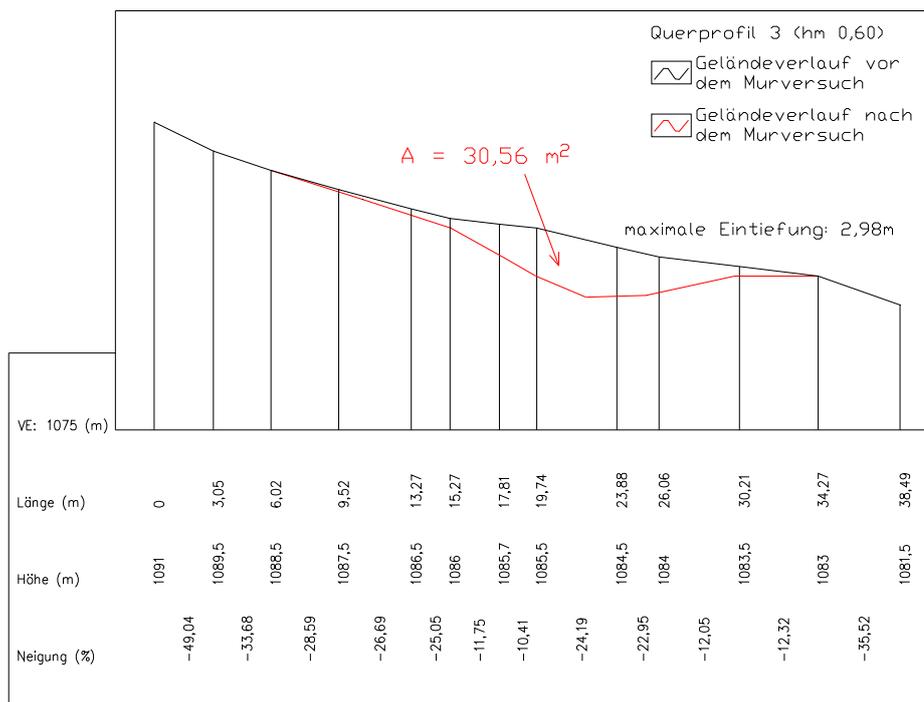


Abbildung 29: Querprofil Nr.3

Zwischen dem Querprofil 3 und 4 hat sich die Neigung fast verdoppelt (38° oder 78,13%). Dementsprechend groß ist nicht nur die Eintiefung (bis zu 7,12 m). Auch die erodierte Querschnittsfläche hat sich mit 100,13 m² mehr als verdreifacht. Der Grund für diese große Erosion ergibt sich in dem seitlichen Abfahren der labil gewordenen Hangflanken, die wegen der großen Eintiefung ungehindert in den Murgang gelangen.

Die Neigung zum letzten Querprofil (durchschnittlich 39° oder 80,98%) bewirkt aufgrund der Steilheit nochmals eine Steigerung der Erosionsrate. Bis zu 140,10 m²

Geschiebe werden an dieser Stelle abtransportiert und das Gerinne tiefte sich 9,90 m ein.

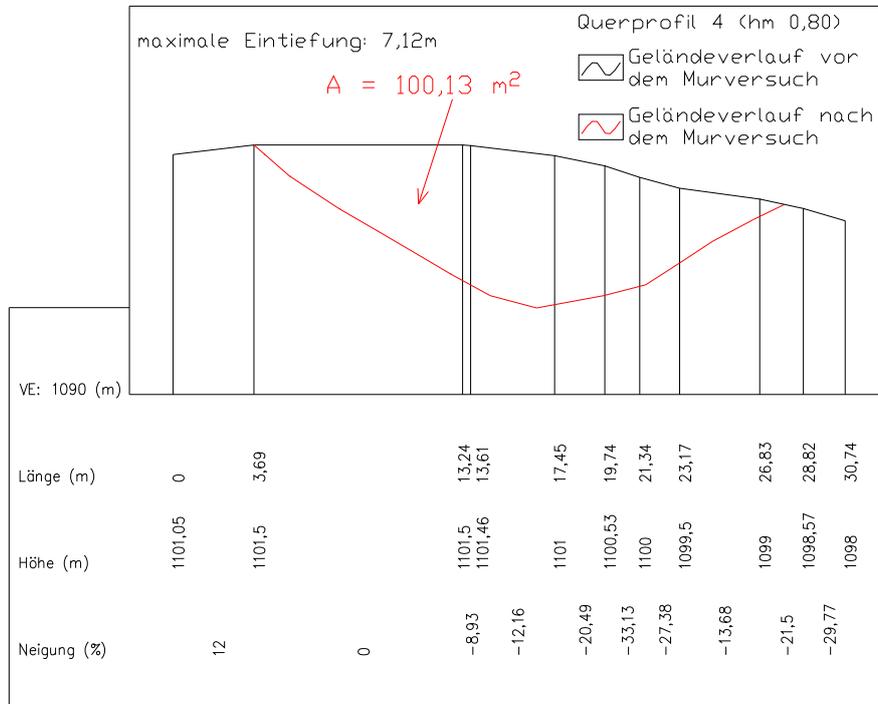


Abbildung 30: Querprofil Nr.4

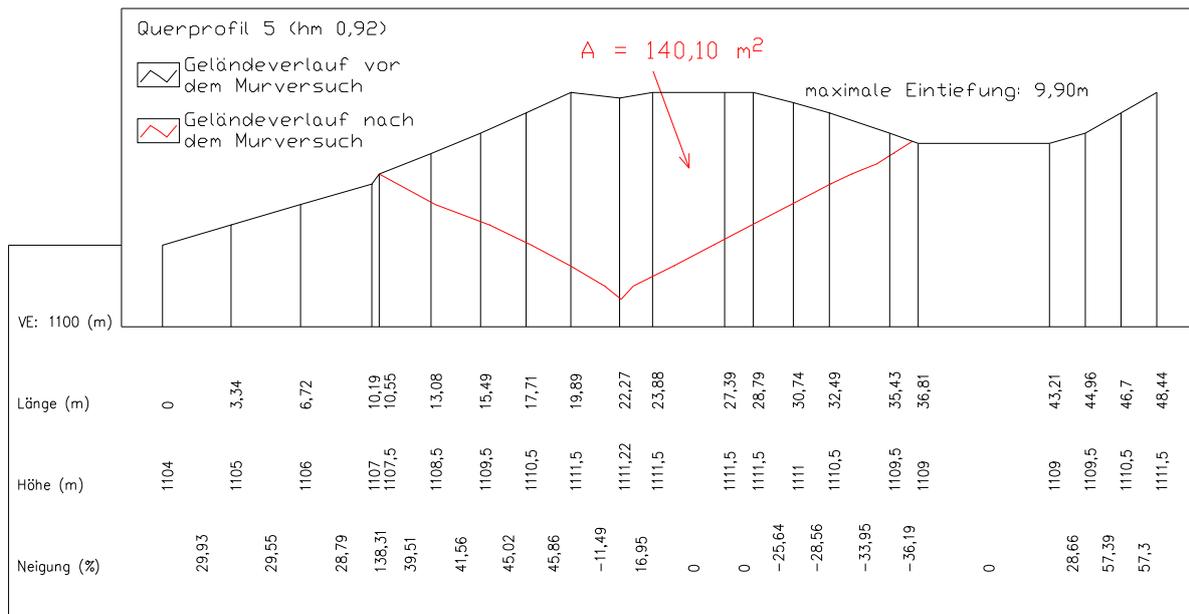


Abbildung 31: Querprofil Nr.5

Geophone – Geschwindigkeiten, Erschütterungen

Bei drei Versuchen wurden Geophone verwendet, wobei für jeden einzelnen Versuch unterschiedliche Standorte gewählt wurden.

1.Versuch:

Drei Geophone wurden entlang der zu erwartenden Ausbreitungsrichtung der Mure aufgestellt, ein Geophon wurde rechtwinklig versetzt zu dieser Richtung gesetzt, um eine Abnahme der Intensität mit der Distanz zur Mure zu erhalten.

Das **Geophon 1** wurde in der Flanke des Hügels - in halber Höhe zum Stausee – orographisch links von der Rinne in der Nähe des Entstehungsbereichs der Mure platziert. Der Abstand zu Geophon 4 betrug zirka 80m, jener zur Rinne ungefähr 40m.

Geophon 2 wurde am Weg auf der Gegenseite des Schesatobel an einer bewaldeten Kuppe direkt am Weg zirka 80m unterhalb der Sperre (Abstand zur Hauptrinne ca. 100m) im Erdreich befestigt.

Das **Geophon 3** wurde im Schesatobel zirka 60 Meter nach oben versetzt (Abstand zu Geophon 4 ca. 60m) aufgestellt.

Geophon 4 befand sich direkt an der Sperre im Schesatobel oberhalb der Einmündung der Mure (Abstand zur Hauptrinne ca. 40m; Abstand zur Nebenrinne ca. 2-5m)

Die Geophone 1 und 2 waren mit „neuen“ Verstärkern, stärkerer Mittelwert ausgestattet. Die Geophone 3 und 4 hatten noch den „alten“ Verstärker, der bessere Spitzen anzeigt, aber auch störanfälliger ist.

Alle 4 Geophone wurden zuvor geeicht und zeigen dieselben Amplituden.

Geophon 1:	08:11 – 08:14	Spitzen durch Baggerarbeiten
Geophon 2:	08:15 – 08:18	Fahrzeuge entlang des Weges
	08:29	Fahrzeug
Geophon 1:	08:29	Beginn der Baggerarbeiten
	08:30:30	Ersteinsatz des Ereignisses
Geophon 3:	08:30:47	Ersteinsatz des Ereignisses
Geophon 4:	08:30:50	Ersteinsatz des Ereignisses

Geophon 2:	08:30:55	Ersteinsatz des Ereignisses
Geophon 4:	08:32:37	2. Rinne bildet sich neben Geophon
	08:36:10	2. Rinne abermals aktiv
Geophon 1:	08:39:50	Abbrüche an den Flanken im oberen Teil
	08:40:20	Abbrüche an den Flanken im oberen Teil
	08:40:50	Abbrüche an den Flanken im oberen Teil
	08:41:40	Abbrüche an den Flanken im oberen Teil
	08:42:30	Abbrüche an den Flanken im oberen Teil
	08:43:30	Abbrüche an den Flanken im oberen Teil
Geophon 4 und 2:		Ereignisse aus Geophon 1 zeitversetzt

Die Mure wurde deutlich von allen Geophonen (siehe Abbildung 32) aufgezeichnet, unabhängig von der Entfernung und der Ankopplung der Geophone. Es ist eine deutliche Abhängigkeit der Intensität von der Geophondistanz zur Mure zu erkennen. Insbesondere die Spur von Geophon 4 zeigt sehr hohe Intensitäten, als die Mure in zwei Schüben den Wall umströmt und nur wenige Meter an dem Messgerät vorbeiläuft. Die ebenfalls hohen Intensitäten am Geophon 1 lassen sich durch die Nähe zum Entstehungsgebiet der Mure erklären, wo durch den Übergang vom steilen in den flacheren Bereich und die turbulenten Bewegungen durch das Losreißen von Material deutlich stärkere Schwinggeschwindigkeiten vorliegen. An allen Geophonen läßt sich eine zeitliche Abfolge des Ereignisses ablesen. So liegt ein zeitlicher Versatz zwischen dem ersten Einsatz der Mure an Geophon 1, Geophon 4 und Geophon 2 von jeweils ca. 30 s vor, aus dem über die Entfernungen auf die Geschwindigkeit der Mure geschlossen werden kann. Dieser zeitliche Ablauf ist auch bei späteren Ereignissen, wie den Einbruch von Flanken zu erkennen und liegt im selben Zeitbereich. Über die Bestimmung der Geschwindigkeit ist eine Verifizierung der Mure und eine Eliminierung von eventuelle Störungen möglich.

Geophonmessung 23.04.02

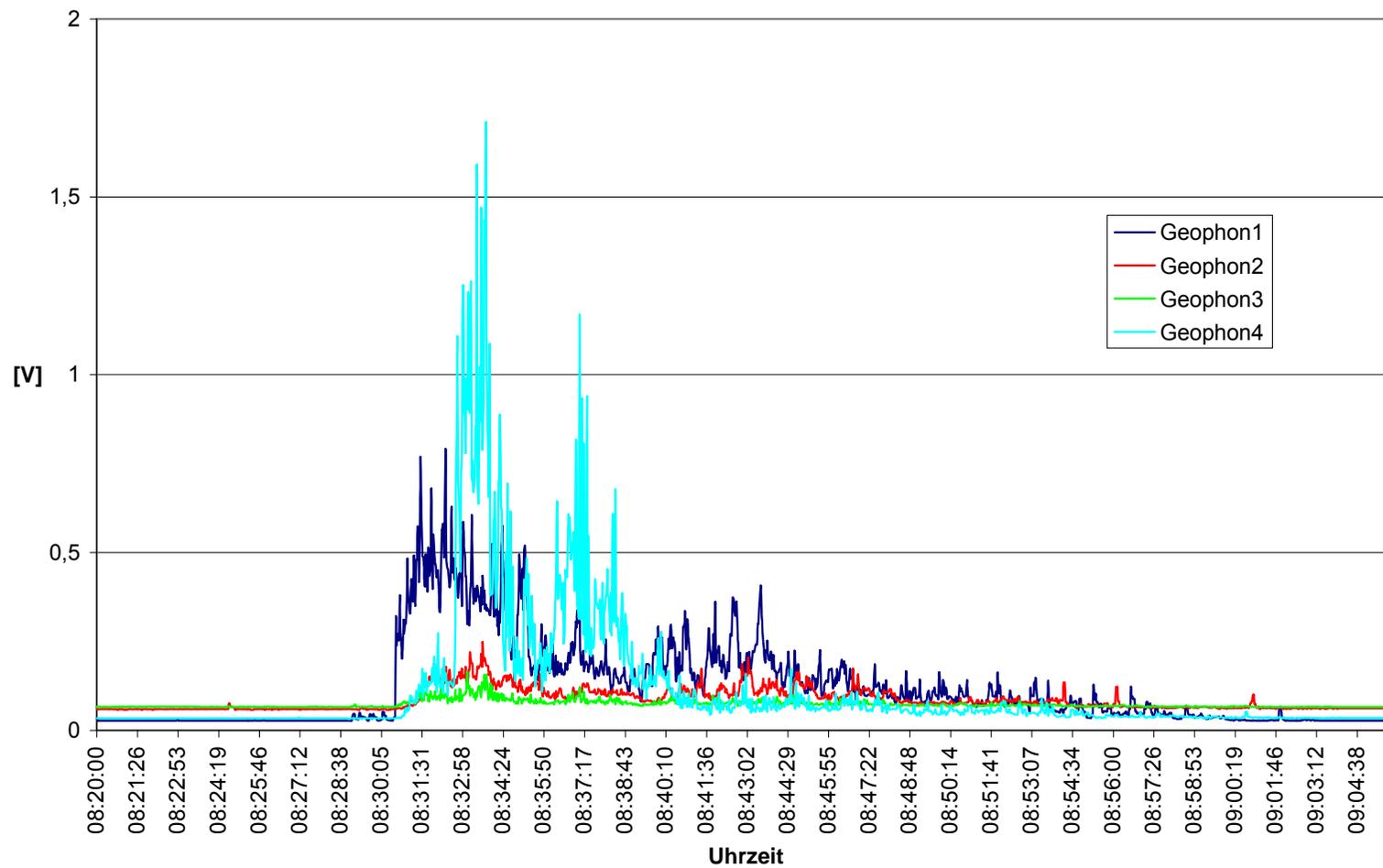


Abbildung 32: Messwertgraphik der Geophonauswertung

2.Versuch:

Die Geophonstandorte wurden mit Hilfe des Theodoliten koordinativ entlang der Ablagerungsstrecke eingemessen, sodass eine Geschwindigkeitsauswertung mit den Geophondaten ermöglicht wurde.

Die Geophone 1, 2 und 3 sind orographisch linksufrig bachaufwärts angeordnet.

Punktnummer	X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Höhe
Geophon 1	-42853,5855	222519,7743	1028,54203
Geophon 2	-42924,08292	222469,1938	1037,99207
Geophon 3	-42971,37951	222434,6006	1051,4552

Tabelle 8: Koordinaten der eingemessenen Geophone

Geophon 1: am Fahrweg direkt neben der Sperre unterhalb des Stollens.

Abstand zur Rinne zirka 10 m

Geophon 2: hinter dem aufgeschütteten Wall am Weg vor dem Stollen (ca. 15 m oberhalb)

Abstand zur Rinne ebenfalls zirka 10 m

Geophon 3: in der Böschung (ca. 5 m unter Weg) neben dem Fahrweg auf Höhe des Platzes zwischen bewaldeter Kuppe und Steinhaufen auf einem Schuttniveau.

Abstand zur Rinne nur mehr rund 3 m

Bei diesem Versuch waren alle Geophone schon mit einem neuen Verstärker ausgestattet.

Messbeginn Material das vom See über die Böschung herabgekippt wurde

Vielzahl von Autos die vorbeifahren

13:35 2 Muldenkipper von unten nach oben

13:49 Muldenkipper von oben nach unten

13:53 Muldenkipper von oben nach unten

13:58 Beginn der Mure

14:05 Ausbildung einer zweiten Rinne auf der abgewandten Seite des Bettes

Ab jetzt wechselnd starkes Fließen in den Unterschiedlichen Rinnen

14:07 2 Muldenkipper von unten nach oben

erster Einsatz

Geophon 3 13:58:50
Geophon 2 13:59:55 65 Sekunden (v1)
Geophon 1 14:00:58 63 Sekunden (v2) 128 Sekunden (v3)

weitere Einsätze zwischen Geophon 3 und 1:

14:07:18 14:08:39 81 Sekunden (v4)
14:07:40 14:08:44 65 Sekunden (v5)
14:10:15 14:11:04 49 Sekunden (v6)
14:13:40 14:14:28 49 Sekunden (v6)
14:19:48 14:20:39 52 Sekunden (v7)

Die Intensität des Ereignisses war an Geophon 3 um ein Vielfaches deutlicher, da die Mure an dieser Stelle im Bachbett um 90 Grad umgeschwenkt wurde und dabei an die Böschung prallte.

Bei diesem Versuch wirkten sich die Vielzahl von vorbeifahrenden Autos und besonders von beladenen Muldenkippern störend auf die Messung aus.

	Geophon3 zu Geophon2	Geophon2 zu Geophon1
horizontaler Längenabstand	58,60m	86,76m
Höhenunterschied	13,47m	9,45m
Neigung in Prozent	22,99	10,89
Neigung in Grad	12,96	6,22
schräger Längenabstand	60,13	87,27

Tabelle 9: Geometrische Daten zu den Geophonstandorten

Die horizontale Länge zwischen Geophon 1 und 3 beträgt 145,36m – die schräge Länge 147,4m.

Die durchschnittliche Neigung zwischen Geophon 1 und 3 beträgt $9,54^\circ$ (16,81%).

Geschwindigkeiten:

v1 0,925 m/s
v2 1,385 m/s
v3 1,151 m/s
v4 1,819 m/s
v5 2,268 m/s
v6 3,008 m/s
v7 2,835 m/s

Geophonmessung 14.05.02

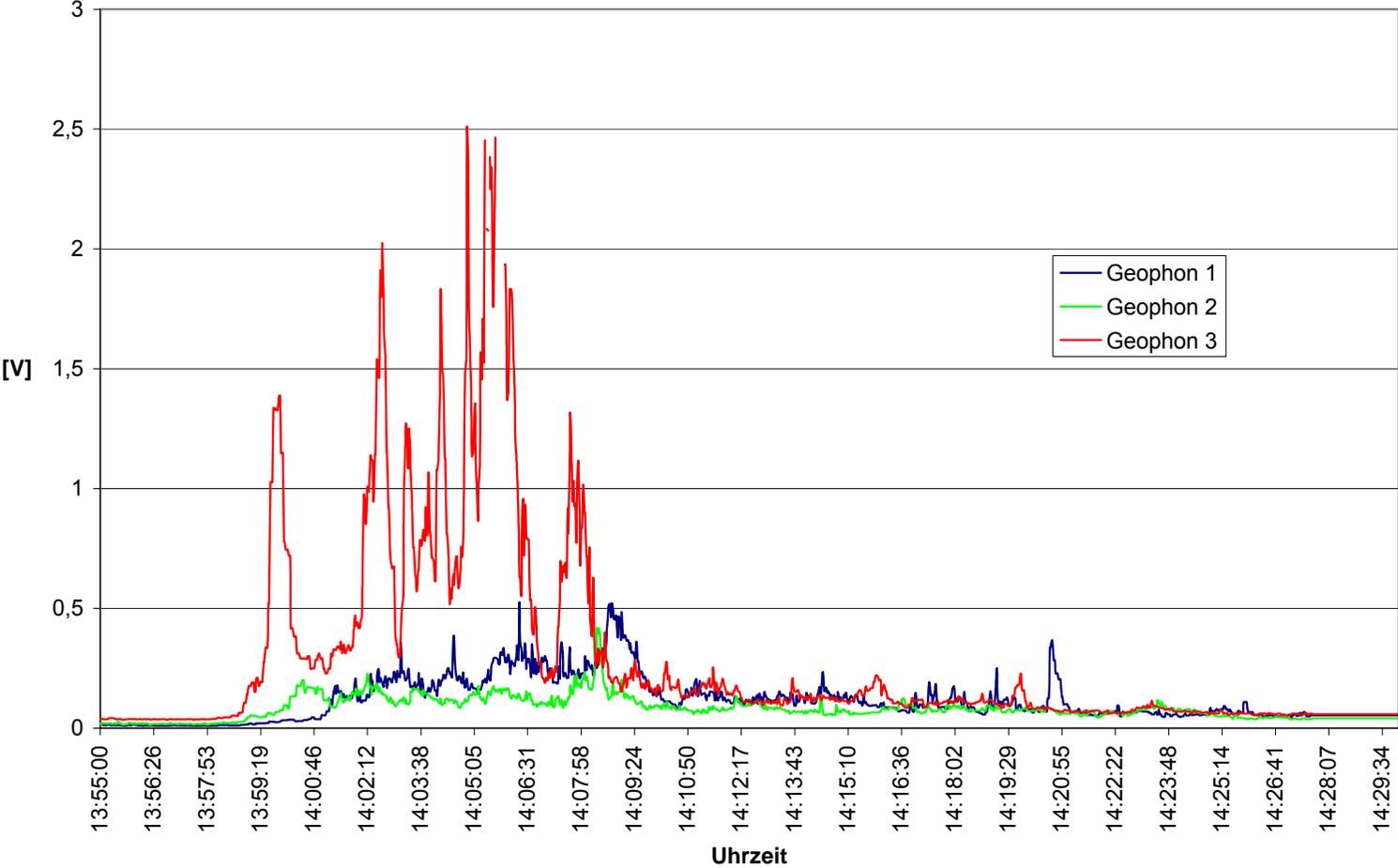


Abbildung 33: Messwertgraphik der Geophonauswertung

4.Versuch:

Auch bei diesem Versuch wurden die Geophonstandorte wiederum mit Hilfe des Theodoliten koordinativ eingemessen – jedoch entlang der Erosions- und Transitstrecke, sodass ebenfalls eine Geschwindigkeitsauswertung mit den Geophondaten ermöglicht wurde.

Die Geophone 2, 3 und 4 sind orographisch rechtsufrig bachabwärts angeordnet.

Punktnummer	X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Höhe
4	-42.920,41	222.357,91	1.063,54
3	-42.909,09	222.324,63	1.074,22
2	-42.892,62	222.290,78	1.088,39
1	-42.875,02	222.258,84	1.104,10

Tabelle 10: Koordinaten der eingemessenen Geophone

Geophon 1: 10 Höhenmeter unterhalb des Stauseeaufbruchs; zirka 10m von der Rinne; das Geophon 1 zeigt aufgrund der Nähe zum Bagger keine realistischen Werte;

Geophon 2: 80 m nach unten versetzt auf einer Kuppe; Abstand zur Rinne zirka 10 m

Geophon 3: direkt an der Rinne auf der Höhe, an der der Ultraschall montiert wurde
Abstand zur Rinne zirka 4 m

Geophon 4: zirka 50 m nach unten versetzt; im Bereich der Kurve (wo die Versuchstrecke in den Schesahauptbach mündet); Abstand zur Rinne ca. 15m

Alle Geophone mit ähnlicher Ankopplung im Hangschutt

Wiederum kamen nur Geophone mit einem neuen Verstärker zum Einsatz.

ab 14:50	Baggararbeiten am Stausee
15:10	Beginn der Mure
15:30	Schließen der Rinne, um Kraftmessgeber auszubauen
15:42	Erneutes Öffnen der Rinne

Einsätze zwischen Geophon 2 und 3 (obere Strecke):

14:14:28	14:14:34	6 Sekunden (v1)
14:22:27	14:22:38	11 Sekunden (v2)
14:15:22	14:15:27	5 Sekunden (v3)
14:25:00	14:25:06	6 Sekunden (v4)

Einsätze zwischen Geophon 3 und 4 (untere Strecke):

14:12:19	14:12:36	17 Sekunden (v5)
14:14:34	14:14:47	13 Sekunden (v6)
14:22:38	14:22:56	18 Sekunden (v7)
14:15:27	14:15:44	17 Sekunden (v8)

Die Intensität des Ereignisses ist an Geophon 2 um ein Vielfaches deutlicher, da die Mure an dieser Stelle sehr nah am Geophon befindet.

	Geophon4 zu Geophon3	Geophon3 zu Geophon2	Geophon2 zu Geophon1
horizontaler Längenabstand	35,15m	37,65m	36,47m
Höhenunterschied	10,68m	14,17m	15,71m
Neigung in Prozent	30,38	37,64	43,08
Neigung in Grad	16,9	20,62	23,3
schräger Längenabstand	36,74m	40,23m	39,71m

Tabelle 11: Geometrische Daten zu den Geophonstandorten

Geschwindigkeiten:	V1	6,705 m/s (oberer Teil der Strecke)
	V2	3,657 m/s (oberer Teil der Strecke)
	V3	8,046m/s (oberer Teil der Strecke)
	V4	6,705 m/s (oberer Teil der Strecke)
	V5	2,161 m/s (unterer Teil der Strecke)
	V6	2,826 m/s (unterer Teil der Strecke)
	V7	2,041 m/s (unterer Teil der Strecke)
	V8	2,161 m/s (unterer Teil der Strecke)

Geophonmessung 04.07.02

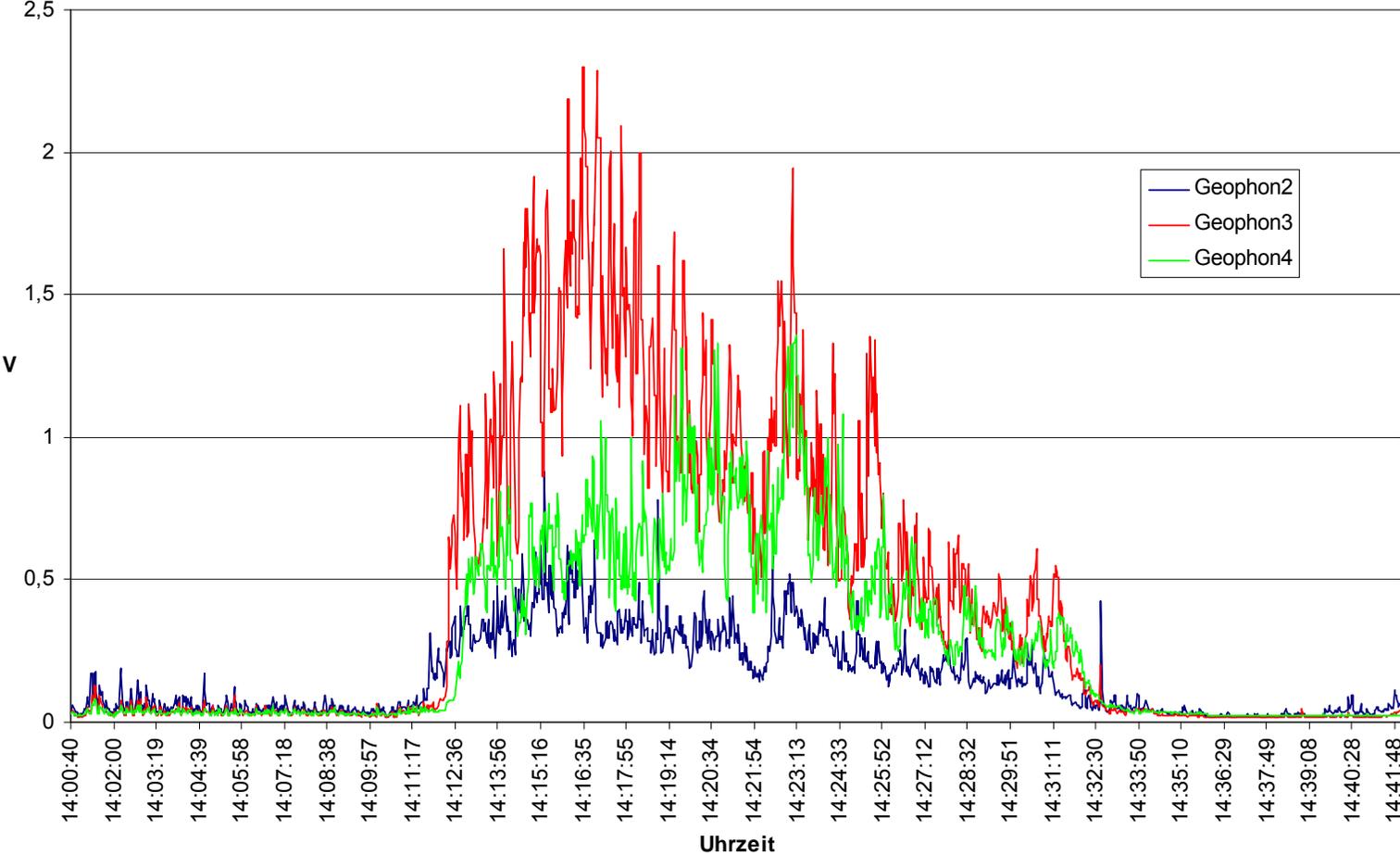


Abbildung 34: Messwertgraphik der Geophonauswertung

Geschwindigkeiten der einzelnen Streckenabschnitte:

- Obere Erosions- bzw. Transitstrecke (37, 64% oder 20,62°): Die Geschwindigkeiten betragen auf diesem Streckenabschnitt zwischen 3,66 und 8,05 m/s.
- Untere Erosions- bzw. Transitstrecke (30, 38% oder 16,9°): Auf diesem Streckenabschnitt erreichte der Murgang Geschwindigkeiten zwischen 2,04 und 2,83 m/s.
- Auf der Ablagerungsstrecke (Neigung zwischen 10,89 und 22,99%) wurden Geschwindigkeiten von 0,93 bis 3,0 m/s gemessen.

Schwebstoffmessung

Die Messung erfolgte ca. 400 m unterhalb der Murversuchsstrecke bei einer Konsolidierungssperre im Schesahauptbach. Dort wurde die Pumpe am Sperrenfuß, das Messgerät und Aggregat auf der Sperre eingesetzt;

Messung in g/cm³:

	Aero	Biege
14:40	1,037	1,0373
14:44	1,039	1,0394
14:55	1,032	1,0301
15:00	1,027	1,0283
15:03	1,022	1,0212
15:06	1,021	1,0196
15:16	1,019	1,0193
15:22	1,016	1,013
15:24	1,013	1,012

Auswertung:

Leider zeigte sich, dass die Tauchpumpe für die Schwebstoffmessung nur bedingt geeignet war. Bei Aufstellen der Messung verfangen sich im Testbetrieb kleine Steine in der Pumpe, sodass sie blockierte. Im Zeitbereich vor dem Mureignis schwankte der Wasserspiegel öfters, wodurch die Pumpe mehrmals nicht mit Wasser versorgt wurde. Sofort mit dem Auftreten der ersten Wassermassen der Mure begann die Pumpe zu blockieren, was auf den hohen Anteil an grobkörniger Schwebefracht zurückzuführen ist, die durch ihre Reibung die Pumpe blockierte. Durch Reinigung konnte die Pumpe wieder betriebsbereit gemacht werden, verstopfte aber sofort wieder, wenn sie in die stark mit Schwebstoffen belasteten Wassermassen hineingelassen wurde. Einige, wenige Messungen konnten aber dennoch durchgeführt werden.

Spitzenwert: **Dichte von Wasser in der Schesa + 0,35 (~1,35 g/cm³)**

Die Messung mit dem Biegeschwinger zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Aerometermessung.

Dichtemessung 28.05.02

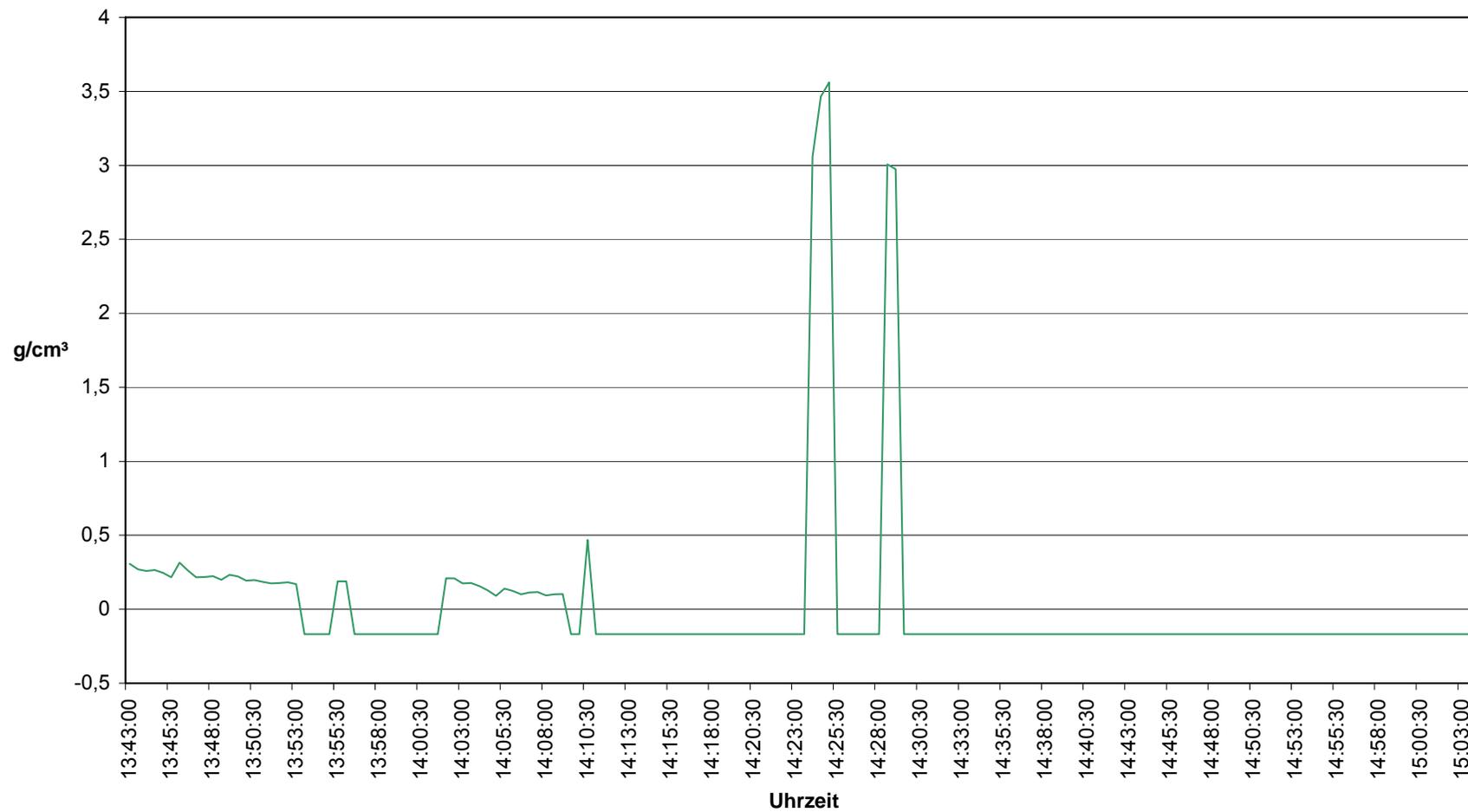


Abbildung 35: Schwebstoffmessung

Radarmessung

Das Radarmessgerät befindet sich derzeit in der Entwicklungsphase und konnte bei drei Versuchen in der Schesa erprobt, verbessert bzw. kalibriert werden.

1.Versuch:

Es erfolgte nur eine manuelle Ablesung. Durch turbulente Bewegungen des Materials und den hohen Wasserstand zeigte sich ein diffuses Geschwindigkeitsbild. An der gegebenen Position war keine Bestimmung möglich. Bessere Ergebnisse sind an Positionen zu erwarten, an denen eine konstante Bewegung auftritt, wie sie in dem Teil der Mure zu erwarten sind, wo sich das Material in einer flachen Rinne oder einem flachen Bett in einem kontinuierlichen Strom fortbewegt.

2.Versuch:

Die Messung erfolgte beim Datensammler an der Position 1. Der Aufnehmer des Radars zeigte von ca. 2 m Höhe waagrecht ins Bachbett.

Auf dem Radarmessgerät ist das Murereignis deutlich mit unterschiedlichen Schüben zu erkennen. Die Änderung der Geschwindigkeit um ca. 14:06 ist auf das Entstehen einer weiteren Rinne zurückzuführen.

Die Empfindlichkeit sollte anders eingestellt werden (größere Verstärkung des Signals).

Radarmessung 14.05.02

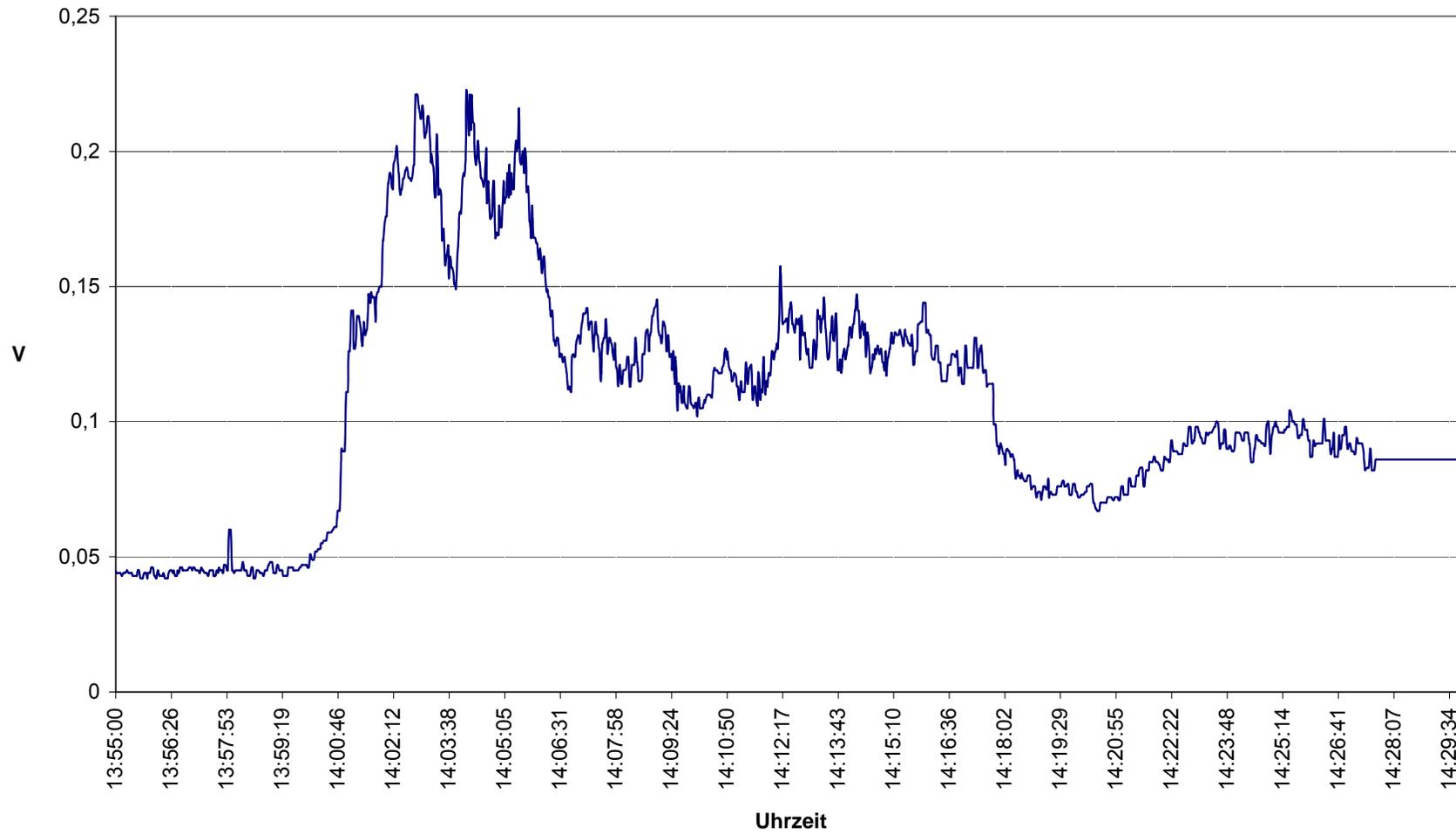


Abbildung 36: Radarmessung

3.Versuch:

Das Radarmodul wurde wie beim zweiten Versuch auf dem Weg bei der Sperre direkt unterhalb des Stollens aufgestellt. Die Ausrichtungsrichtung zeigte waagrecht das Bachbett nach oben.

Bei der Messung sprach das Modul auf die Murbewegung an, der Abstrahlkegel war jedoch nicht günstig gesetzt und wurde um ca. 15:22 korrigiert, wodurch sich eine höhere Intensität ergab. Weiters drohte der Schutzdamm für die Aufgabestation zu brechen, wodurch ein Bagger ins Bachbett einfahren musste. Dies führte ebenfalls zu einer Verfälschung der Messung.

Ultraschall – Abflusstiefe

Pegelmessung:

1.Versuch:

Mit einer Pegelsonde wurde das Sinken des Wasserstandes im See dokumentiert. Positioniert wurde diese in einem Eisenrohr an der dem Abfluss abgewandten Seite des Staubeckens. Die Pegeltiefe betrug am Anfang 128,8 cm – das Messintervall 10s.

Um 8:29:20 riss der Bagger den Speichersee auf, sodass das Wasser in die Versuchsstrecke strömen konnte. Nach ca. 20 min, um 8:47:20 registrierte die Sonde die letzte Wasserstandsänderung. Da die Fläche des Speichersees aufgrund der terrestrischen Vermessung bekannt war, konnte man mit Hilfe dieser Ultraschallmessung den Abfluss aus dem See berechnen bzw. eine Hochwasserganglinie erstellen, die eine Grundlage für eine Simulation mit dem Softwarepaket FLO 2D darstellt.

Absenkkurve

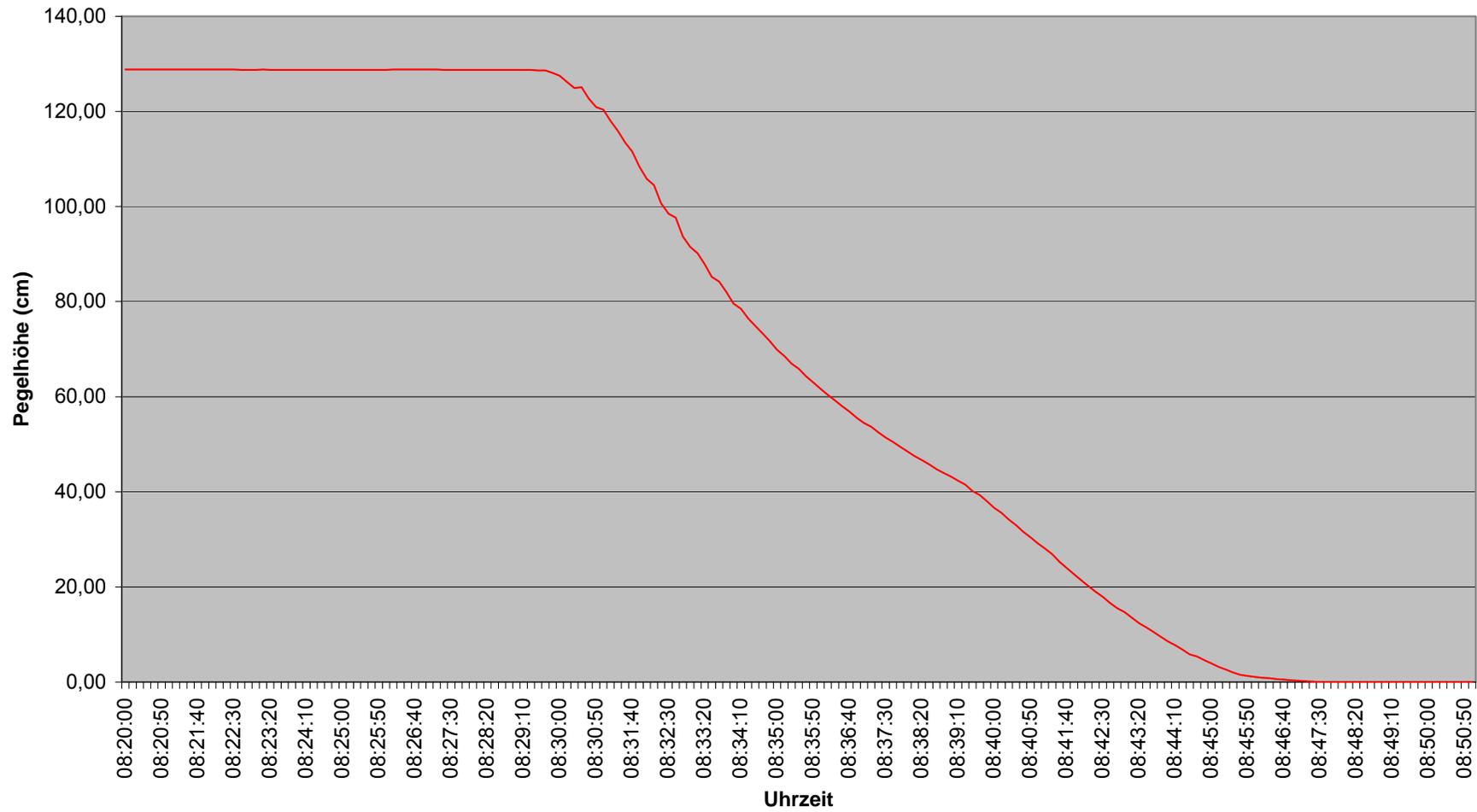


Abbildung 37: Ermittelte Absenkkurve aus der Pegelmessung

Abflussdiagramm

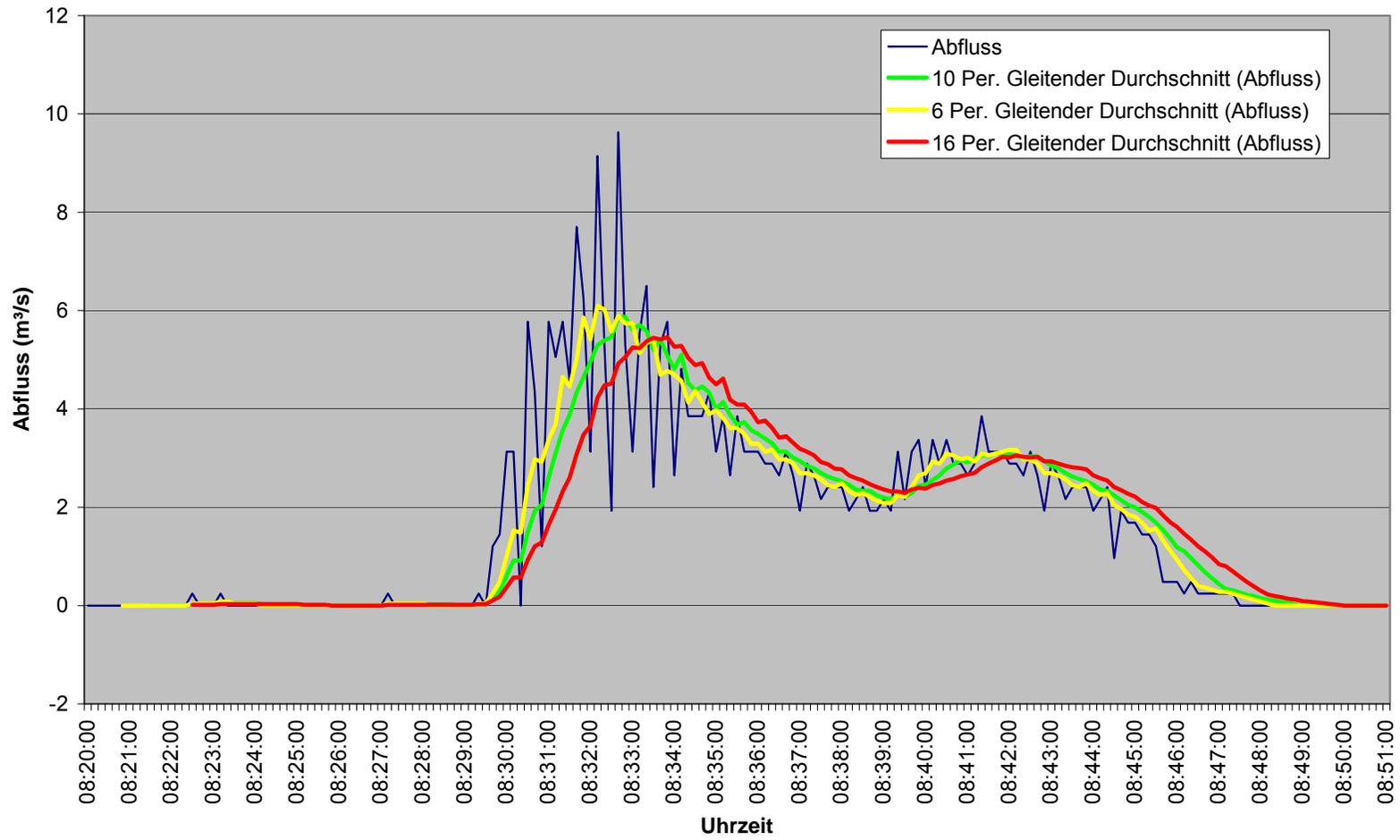


Abbildung 38: Aus der Absenkkurve ermittelte Ganglinien

2.Versuch:

Wie beim ersten Versuch wurde im Speichersee eine Pegelmessung durchgeführt. Da die Messsonde nur auf einen Meter Wassertiefe ausgelegt wurde, konnten keine sinnvollen Daten ermittelt werden.

4.Versuch:

Auf einem Stahlseil, das über der Transitstrecke montiert wurde, wurde ein Ultraschall angebracht, mit dem die Abflusstiefe ermittelt werden konnte. Die Breite des Murganges in diesem Bereich variierte zwischen 5,0 und 5,6 m. Bei der Interpretation der Ergebniskurve muss aber auf das vorhandene Spritzwasser geachtet werden (Turbulenzen im Murgang sind sehr schwer zu erfassen). Eine genaue Auswertung kann nur in Verbindung mit der Videoanalyse erfolgen.

Ultraschallpegelmessung 04.07.02

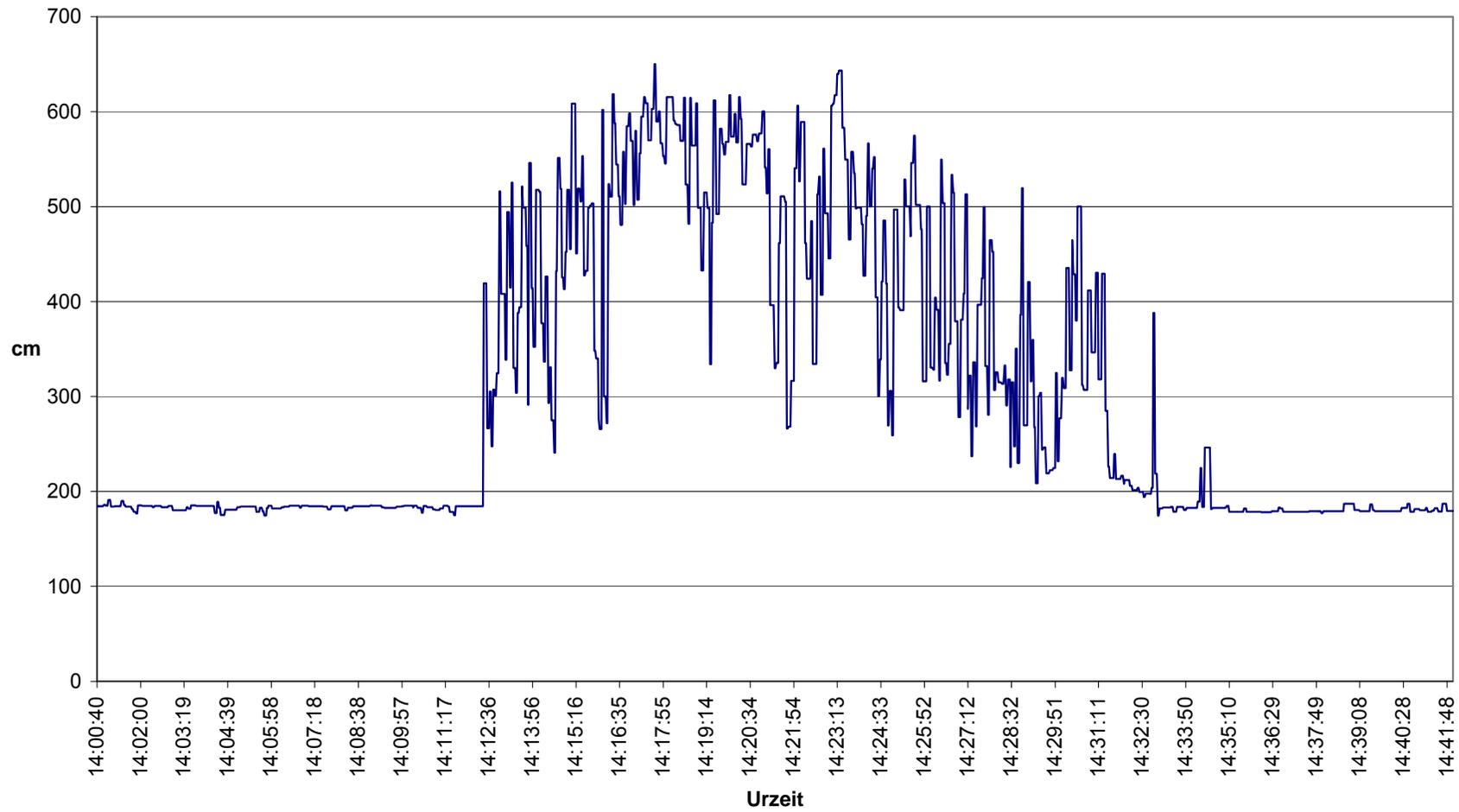


Abbildung 39: Ultraschallmessung zur Ermittlung der Abflusstiefe

Makroskopisches Erscheinungsbild der Versuchsmuren

(z.B.: Murkegel)

Von drei verschiedenen Positionen wurde mit Videokameras der Murablauf dokumentiert. Dabei gelangten sowohl „normale“ VHS, als auch MII und Digital9 – Kameras zum Einsatz.

Wie auch beim ersten Versuch ist die Förderkraft des Murbreies dabei deutlich zu sehen. Die großen Gesteine ,welche in der Bahn liegen, werden deutlich vorwärts gekollert bzw. gerollt.

Die Mure ist auch imstande, in kurzer Zeit eine größere Eintiefung in der Transitstrecke zu bewirken. Deutlich zu sehen ist auch, dass in der Erosions- und Transitstrecke die großen Blöcke innerhalb des Murenkörpers gleiche bis größere Geschwindigkeiten aufweisen, während bei abnehmendem Gefälle die großen Steine zurückbleiben (Verlust der Bewegungsenergie). Der Murbrei bewegt sich hingegen weiter.

Vor allem im dritten Versuch hat sich der Murgang bei gleichzeitiger Geschwindigkeitsabnahme verbreitert und einen deutlichen **Kegel** gebildet (siehe Abbildung 40).



Abbildung 40: Typische Ausbildung eines Murkegels beim dritten Versuch

Ermittlung des Murdruckes in Fließrichtung aus der Zugkraftmessung

4.Versuch:

In der Transitstrecke wurde mit einem Stein (ca. $0,14 \text{ m}^3$ $0,5 \times 0,4 \times 0,7 \text{ m}$), der an einem fix verankertem Stahlseil (12mm) befestigt wurde, der Murdruck in Fließrichtung bestimmt.

Dabei wurde das Stahlseil an einem großen Stein (direkt oberhalb der Versuchsstrecke am See) verankert und an diesem der Stein in der Transitstrecke angehängt. Durch Einhängen des Messgerätes in das Stahlseil konnten die Zugkräfte, die sich aufgrund des Murdruckes auf die Oberfläche des Steines ergeben, gemessen werden (max. Kraft 556 kg).

Fläche 1:	0,5x0,4m	0,2m ²	27,8 kN/m ²
Fläche 2:	0,5x0,7m	0,35m ²	15,9 kN/m ²
Fläche 3:	0,4x0,7m	0,28m ²	19,9 kN/m ²

Kraftmessung 04.07.02

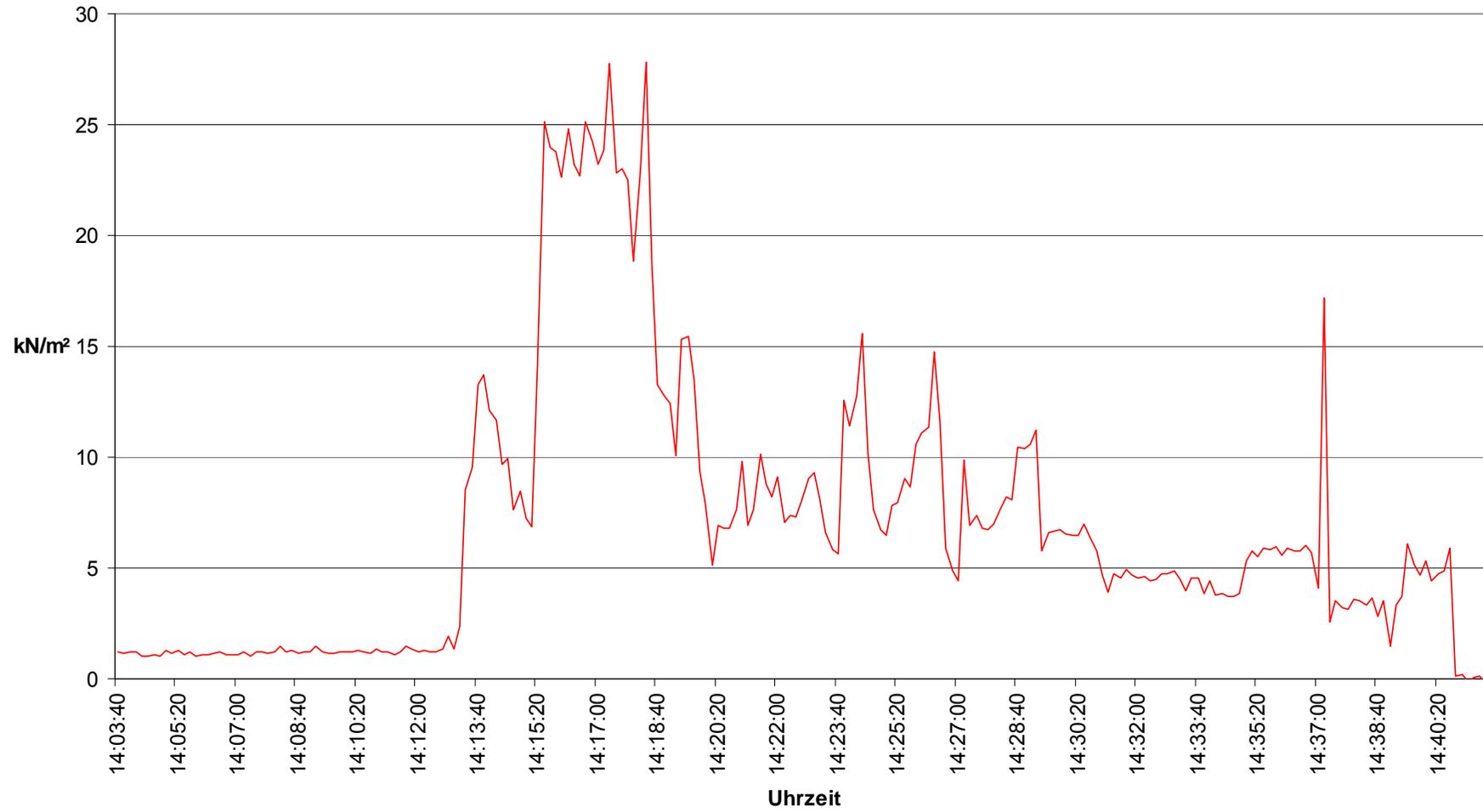


Abbildung 41: Messwertgraphik der Zugkraftmessung

5.Versuch:

Wie beim vierten Versuch wird in der Transitstrecke mit einem Stein (**ca. $\frac{1}{4} \text{ m}^3$** $0,7\text{m} \times 0,8\text{m} \times 0,5\text{m}$), der an einem fix verankertem Stahlseil befestigt wird, der horizontale Murdruck gemessen.

Dabei wurde das Stahlseil im Fels (direkt oberhalb der Versuchsstrecke am See) verankert und an diesem der Stein in der Transitstrecke angehängt. Durch Einbringen des Messgerätes an dem Stahlseil konnte der Druck, der aufgrund des Murganges auf die Oberfläche des Steines wirkt, gemessen werden (max. Kraft 139 kg).

Da der Stein jedoch schon zu Beginn des Murganges ungünstig an den Gerinnerand verlagert wurde, konnten keine so hohen Drücke wie beim vorigen Murgang erzielt werden.

Fläche 1:	0,7x0,8m	0,56m ²	2,5 kN/m ²
Fläche 2:	0,7x0,5m	0,35m ²	4,0 kN/m ²
Fläche 3:	0,8x0,5m	0,40m ²	3,5 kN/m ²

Möglichkeiten des Einsatzes einzelner Messinstrumente für Frühwarnsysteme in Wildbacheinzugsgebieten

Frühwarnsysteme - Begriffsdefinition

KEUSEN (1997) liefert folgenden Vorschlag:

„Frühwarndienste sind systematische Beobachtungen und Messungen, die geeignet sind, das Verhalten und die Entwicklung einer drohenden Naturgefahr zu erkennen, um im Hinblick auf die Vermeidung von Schäden zeit- und sachgerecht handeln zu können.“

Diese Definition schließt allerdings sogenannte contact warning systems aus, bei denen eine physische Auslösung des Alarms durch das Ereignis selbst stattfindet.

SCHMIDT 2002 schlägt daher folgende etwas allgemeinere Definition vor.

„Frühwarnsysteme sind Einrichtungen, die geeignet sind drohende Naturgefahren rechtzeitig zuerkennen um automatisch eine Warnung/Alarmierung auszulösen, die zur Ergreifung geeigneter Maßnahmen führt um Schäden zu vermeiden und/oder zu vermindern.“

Eine etwas umfassendere Definition wird von GENG (2000) verwendet.

A prediction is a forecast that an event of specific magnitude will take place at a certain time and location.

A warning is the authority public statement on a hazard coming and bringing specific risks for a particular segment of the population in the particular area.

An alarming has nearly the same meaning as a short term warning, but more technical, concrete and might be for rather smaller populations within smaller areas.

JINGRI (1989) klassifiziert die Methoden der Frühwarnung im Bereich Murgang auf folgende Weise (Berührungsorientierte Warnung, Warnung durch direkten Kontakt, Warnung über elektrischen Widerstand, Warnung durch Druck, Berührungslose Warnsysteme –Geophon- und Ultraschallmessung).

Methoden der Frühwarnung

Murenwarnsysteme allgemein bestehen aus mehreren Komponenten.

- Wissenschaft: Sie liefert die grundlegenden Daten, Modelle und Vorstellungen darüber, welche Prozesse für ein Ereignis überhaupt maßgebend sind, die dann in weiterer Folge die Basis darstellen für die Auswahl der zu messenden Parameter und die Erarbeitung von Schwellenwerten zur Alarmauslösung.
- Technik: Sie liefert das instrumentelle und apparative Rüstzeug zur Erfassung, Speicherung und Übertragung der zu messenden Parameter. Darüber hinaus sorgt sie für die Auswertung und Analyse der Daten, in enger Zusammenarbeit mit der Wissenschaft.
- Katastrophenmanagement: Sicherstellung einer zentralen Überwachung der eingehenden Daten, Bewertung und Vergleich/Abstimmung auf die aktuelle Situation, Ausarbeitung und Implementierung eines Alarm/Notfallplans, Durchführung der Alarmierung, Aufklärung und Öffentlichkeitsarbeit.

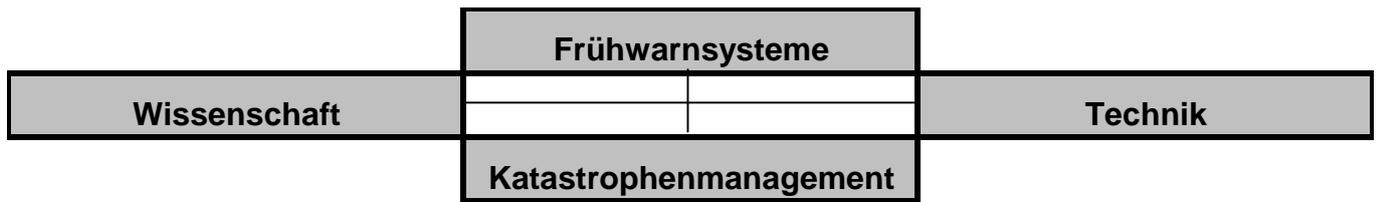


Tabelle 12: Bestandteile eines Frühwarnsystems (KLAUS, 1999)

GENG (2000) unterteilt, ausgehend von einer zentralen Datenbasis, Frühwarnsysteme in 4 Subsysteme die jeweils noch in verschiedenen Sections unterteilt werden.

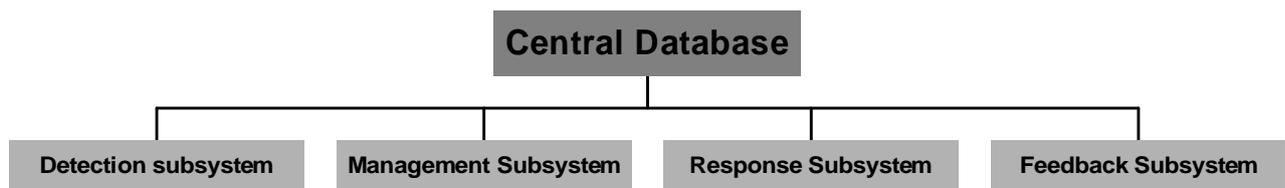


Abbildung 42: Aufbau eines Frühwarnsystems (GENG 2000)

Im Detection subsystem findet die wissenschaftlich/technische Messung, Aufzeichnung und Analyse der Daten statt mit dem Ziel einer wissenschaftlichen Vorhersage. Diese wird weitergeleitet an das Management subsystem, üblicherweise eine öffentliche, entscheidungsbefugte Einrichtung, die die gelieferten Daten beurteilt und eine entsprechende Warnung veröffentlicht und gegebenenfalls abändert und/oder aktualisiert. Das Response subsystem umfasst und beschreibt den Komplex der Reaktionen der Bevölkerung auf ausgegebene Warnmeldungen. Hier sind zahlreiche Interaktionen möglich, verschärftes Sicherheitsbewusstsein aufgrund neuer, zugänglicher Daten/Informationen, Adaptionen gewonnener Erkenntnisse auf ähnliche Situationen etc...

Das Feedback subsystem schließlich versucht mithilfe eines ständigen Soll-Ist Vergleiches das System zu optimieren.

Wie eingangs schon angedeutet, kann man bei Naturgefahren lang- mittel- und kurzfristige Warnungen unterscheiden. Im Fall der Murenfrühwarnung dürfte wohl nur eine kurzfristige Warnung, gleichbedeutend mit einer Alarmierung, in Betracht kommen. Es liegt auf der Hand, dass in diesem Fall der Zeitfaktor die entscheidende Rolle spielt. Folglich ist darauf zu achten, dass die Zeitverluste im Umfeld der eigentlichen Warneinrichtung, also die technische Alarmierung und die Maßnahmen im Zuge des Katastrophenmanagements auf ein Minimum zu reduzieren sind.

Es nützt also nichts, wenn innerhalb von Sekundenbruchteilen ein Alarm in der Feuerwehrzentrale eingeht, die diensthabende Person dann aber 5 Minuten nach dem entsprechenden Ordner mit dem Alarm- und Massnahmenplan sucht.

JINGRI (1989) klassifiziert die Methoden der Frühwarnung im Bereich Murgang auf folgende Weise.

Contact warning: (Berührungsorientierte Warnung)

Sie stellt den Beginn der Frühwarnung und gleichzeitig auch die in der Vergangenheit am häufigsten zum Einsatz gelangte Methode dar. Es werden folgende Möglichkeiten der Ausführung unterschieden.

Break-off warning (Warnung durch direkten Kontakt)

Eine Kontrollleine wird über das Abflussprofil gespannt. Bei Abgang eines Murganges und Erreichen des durch die Leine definierten Niveaus wird diese durchtrennt und löst in Folge den Alarm aus. Neben Reissleinen gibt es noch andere Möglichkeiten einer Break-Off Warnung, beispielsweise durch Auslegearme die ins Gerinne reichen und bei einem Murgang aus der Fliessrichtung geschleudert werden etc...Den Vorteilen durch einfache technische Installation stehen die Nachteile großer Störanfälligkeit gegenüber. Änderungen im Erosionsgeschehen (Eintiefungen) können zum Nichtauslösen führen, mehrere Murstöße hintereinander werden nicht erfasst und eine Störung des Systems durch Mensch und Tier (abreißen der Leine) ist leicht möglich. Dadurch ist eine Warnung/Alarmierung nur einmal möglich

Conduct warning (Warnung über elektrischen Widerstand)

Hier macht man sich die Tatsache zunutze, dass die elektrische Leitfähigkeit von Murmaterial zwischen 10 k Ω und 30 k Ω liegt. Bei Erreichen eines gewissen Fließniveaus wird über das Murmaterial der Stromkreis geschlossen und der Alarm ausgelöst. Ähnlich wie beim Break off System muß hier also im Vorfeld eine Fließhöhe definiert werden ab der Gefahr besteht. Der Nachteil dieser Methode liegt hier in der notwendigen Installation eines 220 V Wechselstromsystems das Sicherheitsmaßnahmen erforderlich macht.

Pressure sensing warning (Warnung durch Druck)

Hier werden Drucksensoren zur Alarmauslösung verwendet

Um eine Zerstörung des Sensors durch den Aufprall des Murmaterials zu verhindern werden diese möglichst geschützt durch Einbauten installiert. Umfangreiche Testarbeit ist notwendig um die Beziehung zwischen dem gemessenen Druck und den Eigenschaften und dem Umfang des Murganges zu bestimmen. Will man auch Aussagen über die Fließhöhe erhalten ist der Einbau mehrere Sensoren, verteilt über das Abflussprofil möglich.

Contactless warning: (Berührungslose Warnsysteme)

Eine Zusammenfassung neuerer Methoden die eine berührungsfreie Messung des Abflussgeschehens ermöglichen.

Debris flow Ground sound warning (Seismik und Geophonmessung)

Das Abflussgeschehen eines Einzugsgebietes löst im Boden Schwingungen aus. Diese sind mittels sogenannter Geophone oder seismischer Sensoren messbar. Dabei zeigt sich, dass sich die Ergebnisse bei Abfluß, Murgang, motorisiertem Verkehr und z.B. Blitzschlag deutlich unterscheiden und zwar hinsichtlich folgender drei Faktoren. Frequenz, Amplitude und Dauer. Vorteile des Systems liegen in der Tatsache, dass eine Datenerfassung bereits oberhalb des Messquerschnittes möglich ist, darüber hinaus ist keine fixe Sohlage erforderlich.

Ultrasonic (mud level) warning (Ultraschallmessung)

Ähnlich einer Echolot Messung wird hier mittels Ultraschall oder Radar die Pegelhöhe des untersuchten Querschnitts gemessen. Erreicht der Pegel eine gewisse

Höhe wird Alarm ausgelöst. Eine fixe Sohllage ist hier jedoch wieder Voraussetzung um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Ein ständige Kontrolle des Systems, vor allem nach Ereignissen ist also unerlässlich.

Ergänzend sei hier noch die Warnung über Niederschlagsmessanlagen angeführt. Da der Niederschlag zu Beginn eines jeden Ereignisses steht, also hier die größtmöglichen Zeitreserven für eine eventuelle Alarmierung liegen stellen Systeme die eine Beziehung zwischen dem gefallenem Niederschlag und einer Eintretenswahrscheinlichkeit herstellen ein wichtiges Mittel zur Vorwarnung dar. Für eine eigentliche Warnauslösung sind sie aber zu ungenau. Da sie mit dem eigentlichen Murgang nicht in Berührung kommen gehören Niederschlagsmessanlagen ebenfalls zu den kontaktlosen Warnsystemen.

Vorteile der Contactless warning Systeme sind vor allem die Erfassung auch kurz hintereinander erfolgender Murschübe sowie ein doch erheblich reduzierter Wartungsaufwand und eine geringere Störanfälligkeit.

Nachteilig ist anzusehen, dass die Kalibrierung der Systeme für jedes einzelne Einzugsgebiet wohl erheblich aufwendiger ist. Erschwerend kommt hier hinzu, dass sich momentan noch kaum zuverlässige und aussagekräftige Untersuchungsergebnisse in Umlauf befinden, die eine generelle Anwendung eines Systems ermöglichen. Das heißt momentan sind alle derzeit installierten Systeme dieser Art noch als Prototypen anzusehen.

Erkenntnisse

Die Aufgabe dieses Projektes in Bezug auf die Frühwarnung bestand darin, die Möglichkeiten bzw. Probleme der berührungslosen Warnsysteme bzw. des Bestandteiles „TECHNIK“ anhand der durchgeführten Versuche aufzuzeigen.

Bei der **Geophonmessung** löst das Abflussgeschehen im Boden Schwingungen aus, die mittels der Geophone messbar sind. Besonders wichtig für den Einsatz von Geophonen zur Detektierung von Murgängen ist der Ort der Installation. Stellt man sie zu nahe am Gerinne auf sind sie anfällig für Beschädigung oder Zerstörung im Ereignisfall, zu weit entfernt vom Bachlauf kann es schwierig werden Grenzwerte festzulegen bzw. überhaupt relevante Schwingungen aufzufangen. Ein weiteres Problem stellen Störgeräusche dar. So kann zum Beispiel der Einbau in der Nähe von Brücken oder Verkehrswegen, wenn auch günstig hinsichtlich Wartung und Betreuung, nicht herangezogen werden, da Verkehrsbewegungen doch eine erhebliche Störquelle darstellen. Jedes einzelne Fahrzeug ist dabei als deutlicher Messwertausschlag in der Aufzeichnung zu erkennen. Dieser könnte zwar softwaretechnisch herausgefiltert werden, da diesbezügliche Kenntnisse jedoch noch nicht in ausreichender Anzahl vorliegen, wäre es vernünftiger diesen Störeinflüssen durch günstige Standortwahl gleich zu Beginn zu begegnen.

Eine Möglichkeit diesem Problem entgegenzuwirken wäre die Verwendung von Geophonen in Kombination mit dem gleichzeitigen Einsatz eines **Geschwindigkeitsradars**.

Abbildung 43 zeigt schön, dass die Geophonmessung mit der Radarmessung gut korreliert (gleichzeitiger Beginn des Murganges und unterschiedlichen Schübe sind zu erkennen). Ein diesbezüglicher Zusammenhang ist wichtig für die Plausibilität der Ergebnisse und wird auch von anderen Untersuchungen bestätigt.

Vergleich zwischen Radar- und Geophonmessung

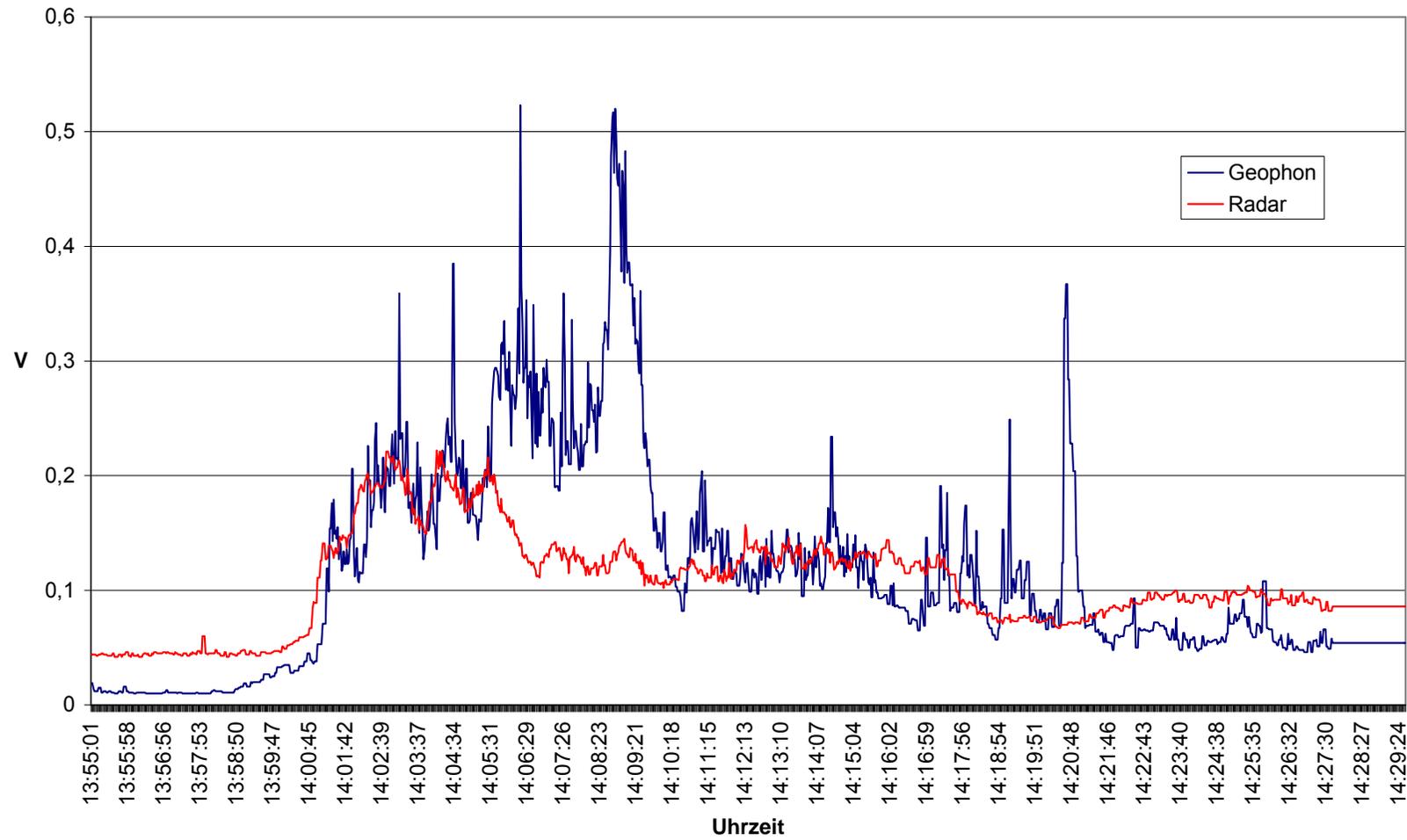


Abbildung 43: Vergleich der Geophon- und der Radarmessung

Eine möglichst frühzeitige Detektierung eines Murganges mittels Abfluss-/Wasserstandmessung (mittels **Ultraschall**) ist nur in Kombination mit einer zusätzlichen Videoaufzeichnung sinnvoll, da der Spritzwasseranteil zu einer Verfälschung der eigentlichen Größe einer Mure führen kann.

Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel der weiteren Versuche am Gaschierakopf ist vor allem die Erforschung von Muren in Bezug auf die **Druckwirkung** der Murmasse auf ein stehendes Bauwerk. Auf einen eigens angefertigten Stahlcontainer, der mit Schotter gefüllt wird, werden verschiedenste Druckmessenrichtungen (Wägezellen, Druckmatten, ...) in unterschiedlicher Höhe angebracht und somit kann der Druck des Murganges gemessen werden.

Weiters soll in der Transitstrecke mit Hilfe eines Steines, der an einem fix verankertem Stahlseil (12mm) befestigt wird, der Murdruck in Fließrichtung bestimmt werden. Dabei kann das Stahlseil an einem großen Felsblock (direkt oberhalb der Versuchsstrecke am See) verankert und an diesem der Stein in der Transitstrecke angehängt werden. Durch Einhängen des Messgerätes in das Stahlseil können die Zugkräfte, die sich aufgrund des Murdruckes auf die Oberfläche des Steines ergeben, gemessen werden.

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

Firmenverzeichnis

Die Murversuche wurden vom Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen (**Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. HÜBL Johannes und Dipl.-Ing. JÄGER Gerald**) in Kooperation mit dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung ,Gebietsbauleitung Bludenz (**Dipl.-Ing. JENNI Martin**) durchgeführt.

Zur erfolgreichen Realisierung dieses Projektes wirkten folgende Firmen bei den Versuchen mit:



Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung

Gebietsbauleitung Bludenz

Oberfeldweg 6 6700 - Bludenz



Firma SOMMER Messtechnik GesmbH & Co KG

Straßenhäuser 27 6842 – Koblach

ZECH KIES

Zech Kies GesmbH

Katlis Werkstr. 2 6714 – Nüziders



Zentraler Informatikdienst (Universität für Bodenkultur)

PETER - JORDANSTR. 82 1190 - WIEN



media Film (Film- u. Videoproduktion Hans Waibel)

Millöckergasse 30 6850 – Dornbirn

Literaturverzeichnis

- AULITZKY, H. (1990):** Vorlesungen Grundlagen der Wildbach- und Lawinenverbauung, Wien.
- BAGNOLD (1954):** Experiments of a gravity-free dispersion of large solid speres in a Newtonian fluid under shear, Royal Soc. London. Proc., Ser. A, 225, S 49-63.
- BAGNOLD (1956):** The flow of cohesionsless grains in fluids, Philosophical Transactions of the Royal Society, 249, S 235-297.
- BENDEL, E. (1949):** Ingenieurgeologie. Springer Wien. 1. Bd.
- BERTLE H., 1998:** Pilotprojekt Schesasanierung; Geologischer Abschlussbericht im Rahmen der erweiterten Hauptstudie
- CHEN, C. (1987):** Comprehensive review of debris flow modeling concepts in Japan, in: Debris flows/avalanches, process, recognition and mitigation, Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology, 7, S 13-29.
- CHEN, Y., ZHAO, H. (1995):** A preliminary Approach of the Classification Index of debris flow, Proc. Of the Int. SABO Symposium. Hydrology and sediment problems in volcanoes and steep lands, s 129-136, Tokyo, Japan.
- COSTA, J.E. (1984):** Physical geomorphology of debris flows, Developments and applications of geomorphology (ed. by COSTA, J.E. and FLEISHER, P.J.), S 268-317, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- COSTA, J.A. (1988):** Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows and debris flows, Flood geomorphology, Wiley Verlag, New York.
- COSTA, J.E., JARRETT, R.D. (1981):** Debris Flows in Small Mountain stream Channels of Colorado and their Hydrologic Implications, Bulletin of the Association of Engeneering Geologists, 18, S 309-322.
- DAVIES, T.R.H. (1988):** Debris flow surges – a laboratory investigation, Mitt. D. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 96, ETH, Zürich.
- GENG, D. (2000):** Broad sense warning system of landslide and debris flow hazards – a model study of Baoji and Chongqing. Dissertation am Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Universität für Bodenkultur, Wien
- HAEBERLI, W., RICKENMANN, D., ZIMMERMANN, M. (1992):** Murgänge. Mitt. D. BA f. Wasserwirtschaft Nr. 4, Bern; S 77-88

- HÜBL, H. (1995):** Muren: Prozesse und Ablagerungsformen. Bedeutung für die Gefahrenzonenplanung. Dissertation am Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Universität für Bodenkultur, Wien, S 63.
- HÜBL, H. (1996):** Muren als Transportprozessform in Einzugsgebieten, Internationales Symposium Interpraevent 1996 – Garmisch Partenkirchen, Tagungspublikation, Band 3, S 93-101.
- IVERSON, R.M., DENLINGER, R.P. (1987):** The physics of debris flows – a conceptual assessment, IAHS Publication. Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, 165, s 155-165.
- IVERSON, R.M., LAHUSEN, R.G. (1993):** Friction in Debris flows: Inferences from Large-scale Flume Experiments, unveröffentlichtes Manuskript.
- JINGRI, C. (1989):** A study on debris flow warning in China: aus , The Japan – China Symposium on Landslides and Debris Flows; Niigata, Tokyo, Japan; p 177-182
- JORDAN, R.P. (1994):** Debris Flows in the Southern Coast Mountains, British Columbia: Dynamic behaviour and physical properties, Dissertation, University of British Columbia.
- KEUSEN, H.R. (1997):** Warn- und Überwachungssysteme (Frühwarndienste); aus dem Tagungsband des FAN (Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren) Forums 1997 an der ETH Zürich.
- KOCH, T. (1998):** Simulation des Fliess- und Ablagerungsprozesses. in: Zusammenfassung der Referate „Fachtagung Murgänge“. Kompetenzzentrum Naturgefahren, ETH Zürich.
- KLAUS, W. (1999):** Literaturstudie Murenwarnsysteme, Report 17, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Universität für Bodenkultur, Wien
- MAJOR, J.J., PIERSON, T.C. (1992):** Debris flow Rheology: Experimental Analysis of Fine-Grained Slurries, Water Resources Research, Jg. 28, 3, s 841-857.
- MARKART G., KOHL B. und ZANETTI P., 1995/1996:** Beurteilung des Abflussverhaltens von Wildbacheinzugsgebieten anhand boden- und vegetationskundlicher Grundlagen; Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen des Pilotprojektes Schesastudie 1995/1996
- PIERSON, T.C. (1986):** Flow behaviour of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington, Hillslope Processes, S 269-296, Allen&Unwin Verlag, Boston.

- PIERSON, T.C., COSTA, J.E. (1987):** A rheologic classification of subaral sediment-water flowa, in: Debris flows/avalanches, process, recognition and mitigation, Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology, 7, S 1-12.
- PREGL (1993):** Laboratoriumsübungen zu Bodenmechanik, Auszug für die Lehrveranstaltung, Handbuch der Geotechnik
- RICKENMANN, D. (1995):** Beurteilung von Murgängen; Schweizer Ingenieur und Architekt SI+A; Sonderdruck aus Heft Nr. 48/1995
- RICKENMANN, D. (2001):** Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung; Internationales Wasserbau-Symposium; Aachen 2001
- SCHMIDT R., 2002:** Dissertation; Frühwarnung in Wildbacheinzugsgebieten; Stand der Technik und Evaluierung auf Basis eines Pilotprojektes in Österreich
- SOMMER, 2001:** Sommer Mess-Systemtechnik, Strassenhäuser 27, A-6842 Koblach, Firmenprospekte, Produktinformation, Prospekte, technische Merkblätter
- TAKAHASHI, T. (1978):** Mechanical characteristics of debris flow, J. Hydraulics Div., ASCE, Vol. 104, Nr. HY8, S 1153-1169.
- TAKAHASHI, T. (1991):** Debris Flow, IAHR AIRH Monograph, Balkema Verlag, Rotterdam, Brookfield.
- WAN, Z., WANG, Z. (1994):** Hyperconcentrated Flow, IAHR AIRH Monograph, Balkema Verlag, Rotterdam, Brookfield.

Anhang

2. und 3. Versuch:

Terrestrische Vermessung und koordinative Bestimmung des Speichersees			
Punktnummer	X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Höhe
1	-42813,628	222230,669	1115,275
2	-42808,957	222230,018	1115,349
3	-42806,809	222228,061	1115,226
4	-42802,380	222229,452	1115,275
5	-42800,719	222232,676	1115,408
6	-42782,870	222232,804	1115,317
7	-42767,105	222225,001	1115,232
8	-42770,344	222220,604	1115,337
9	-42788,660	222212,340	1115,528
10	-42797,453	222209,125	1115,295
11	-42803,398	222206,879	1115,371
12	-42807,156	222203,785	1115,554
13	-42813,876	222203,361	1115,323
14	-42825,014	222200,265	1115,262
15	-42887,683	222205,183	1115,409

4. Versuch:

Terrestrische Vermessung und koordinative Bestimmung des Speichersees			
Punktnummer	X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Höhe
1	-42846,589	222228,404	1115,270
2	-42824,222	222228,365	1115,231
3	-42820,100	222229,964	1115,398
4	-42810,903	222230,703	1115,325
5	-42799,939	222234,007	1115,325
6	-42794,801	222236,792	1115,308
7	-42785,335	222242,622	1115,248
8	-42779,919	222240,804	1115,306
9	-42768,202	222232,065	1115,258
10	-42766,340	222225,671	1115,301
11	-42771,432	222220,064	1115,338
12	-42804,168	222206,816	1115,230
13	-42812,673	222202,924	1115,309
14	-42825,420	222200,148	1115,255
15	-42843,653	222199,940	1115,309
16	-42846,543	222198,626	1115,344
17	-42876,541	222195,450	1115,291
18	-42888,879	222202,375	1115,276
19	-42883,627	222221,133	1115,286
20	-42881,390	222222,338	1115,255
21	-42874,648	222223,171	1115,260
22	-42872,508	222222,412	1115,234
23	-42863,559	222225,839	1115,274
24	-42854,392	222226,433	1115,241
25	-42852,340	222227,936	1115,295

5.Versuch:

Terrestrische Vermessung und koordinative Bestimmung des Speichersees			
Punktnummer	X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Höhe
4	-42817,161	222227,880	1115,863
6	-42812,874	222228,876	1115,943
7	-42807,554	222230,708	1115,948
8	-42806,757	222228,863	1115,010
9	-42798,638	222232,730	1115,757
10	-42797,831	222232,983	1115,721
11	-42797,196	222237,007	1115,783
12	-42791,700	222240,183	1115,585
13	-42786,003	222240,280	1115,738
14	-42782,108	222238,733	1115,773
15	-42778,126	222236,083	1115,657
16	-42776,785	222235,599	1115,767
17	-42774,023	222232,755	1115,787
18	-42776,460	222231,692	1114,801
19	-42771,139	222233,142	1115,590
20	-42764,672	222234,610	1115,774
21	-42762,866	222233,733	1115,840
22	-42760,282	222230,976	1115,829
23	-42759,326	222225,708	1115,836
24	-42762,483	222224,803	1115,714
25	-42766,461	222223,407	1115,703
26	-42767,500	222223,762	1114,331
27	-42771,402	222218,278	1115,885
28	-42777,150	222215,500	1115,781
29	-42782,170	222213,047	1115,941
30	-42783,195	222214,355	1114,756
31	-42787,546	222210,860	1115,953
32	-42792,976	222208,933	1116,010
33	-42798,027	222206,347	1115,966
34	-42806,480	222203,450	1115,918
35	-42806,926	222205,167	1114,997
36	-42813,872	222200,385	1115,999
37	-42813,020	222203,497	1114,999
38	-42817,313	222200,544	1116,030
39	-42819,363	222206,233	1116,037
40	-42824,261	222214,529	1116,047
41	-42826,776	222222,467	1115,978
42	-42822,471	222226,545	1116,003
43	-42818,895	222228,161	1116,053