

Monitoring und Frühwarnung von Murgängen – Vergleichsanalyse und Einsatzoptimierung eines Puls-Kompressionsradars

TOBIAS SCHÖFFL, GEORG NAGL,
JOHANNES HÜBL

Organisation(en):

BOKU, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Institut für Alpine Naturgefahren

tobias.schoeffl@boku.ac.at, georg.nagl@boku.ac.at, johannes.huebl@boku.ac.at

Abstract

Das Prozessverständnis von Murgängen stellt einen zentralen Aspekt bei dem Schutz vor dieser Naturgefahr da. Die Fließgeschwindigkeit ist dabei ein wichtiger Parameter und findet zum Beispiel Eingang bei der Dimensionierung von Schutzbauwerken, beim technischen Gebäudeschutz, sowie bei Frühwarnsystemen. Die Messung der Oberflächengeschwindigkeit im Feld welche als maximal auftretende Geschwindigkeit innerhalb eines Murgangs angesehen wird, bildet daher ein essentielles Glied in der Verkettung von fundamentaler Prozessforschung und angewandtem Schutz vor Naturgefahren. Eine berührungsfreie Messung der Oberflächengeschwindigkeit eines Murganges hat sich in den letzten Jahren durch Weiterentwicklung verschiedenster Technologien wie in der Hochfrequenz- und Videotechnik deutlich verbessert. Das Hochfrequenz-Radar (HF-Radar) besitzt ein breites Einsatzspektrum für Massenverlagerungsprozesse wie Murgänge, Lawinen und Stein- und Blockschlag. Darunter fällt

auch die Messung der Oberflächengeschwindigkeit. Im Einsatz befindet sich der Typ des HF-Radar neben der Monitoringstation am Lattenbach (Pians, Tirol) seit 2011, auch bei der Messstation am Gadriabach seit 2018 (Südtirol, Italien). Am 26. Juli 2019 konnte ein Murgang in Gatria mit dem HF-Radar und der HD-Videokamera aufgezeichnet werden. Um aus dem Videomaterial Oberflächengeschwindigkeitsdaten zu erhalten, wurde es mittels Digital Particle Image Velocimetry im frei zugänglichen ADD-On »PIVlab« in der Software MATLAB analysiert und ausgewertet. Im August 2020 erfolgten drei weitere erfolgreiche Aufzeichnungen von Murgängen. Mit der Vergleichsanalyse konnte das System auf den Einsatz speziell auf Murgänge validiert und optimiert werden. Die dritte, mobile Version des HF-Radars wurde als Frühwarnsystem am Dawinbach (Stengen, Tirol) im Juli 2020 als Teil eines Frühwarnsystems installiert.

Einleitung

Das Institut für Alpine Naturgefahren hat derzeit drei Hochfrequenz-Radar Einheiten im Einsatz. Bei der Monitoringstation am Lattenbach in Tirol konnten seit 2011 zwölf Murgänge erfolgreich detektiert und gemessen werden (Hübl 2018). Aus den gewonnenen Daten wurde ein speziell für den Prozess ausgelegter Alarmierungsalgorithmus entwickelt (Koschuch 2015) Mit der Installation bei einer weiteren Monitoringstation beim Gadriabach in Südtirol konnte das HF-Radarsystem durch weitere Messungen von Murgängen und Vergleichsanalysen zunehmend optimiert werden. Besonders der Vergleich mit den Oberflächengeschwindigkeitsdaten, die aus der Auswertung von Videomaterial mittels Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) gewonnen wurden, trug wesentlich zu den gewonnenen Erkenntnissen bei. Seit Juli 2020 befindet sich das dritte mobile HF-Radar im Einsatz. Am 31. August 2019 wurde der Ortsteil Klaus der Gemeinde Stengen (Tirol) von einem Murgang schwer getroffen. Es kam dabei glücklicherweise nur zu Sachschäden. In Zusammenarbeit mit der Wildbach- und Lawinerverbauung und dem IBTP Koschuch wurde ein Frühwarnsystem bestehend aus dem mobilen HF-Radar und einem Reißleinen-system installiert.

Funktionsprinzip und Spezifikationen

Das HF-Radar strahlt ein keulenförmiges elektromagnetisches Feld aus. Die Sendefrequenz dieses Felds befindet sich dabei im X-Band (10,1 – 10,3 GHz). Die Geschwindigkeit eines Ziels kann dabei über den Doppler-Effekt berechnet werden. Durch die Frequenzbestimmung eines reflektierten Signals lässt sich die Dopplerverschiebung f_D definieren. Über diese Verschiebung kann die relative Radialgeschwindigkeit v_{rel} des Ziels ermittelt werden (Koschuch 2015).

$$f_D = f_r \pm f_0 \text{ [Hz]} \quad (1)$$

f_0 ... Frequenz des gesendeten Signals
 f_r ... Frequenz des zugehörigen Echos

Die Dopplerverschiebung ergibt sich aus der Funktion der Wellenlänge des gesendeten Signals λ und der relativen Radialgeschwindigkeit des Ziels v_{rel} .

$$f_D = \frac{-2v_{rel}}{\lambda} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

Wobei sich λ über $\lambda = \frac{c}{f_0}$ definiert und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Berücksichtigt man den Antennenöffnungswinkel θ setzt für λ ein und formt nach v_{rel} um, so erhält man:

$$v_{rel} = \frac{cf_D}{2f_0 \cos \theta} \text{ [m/s]} \quad (3)$$

Das HF-Radar besitzt zwei Sendeverfahren. Das erste System ist das des einfach gepulsten Radars. Die Signale werden durch eine Amplitudenmodulation in eine Rechteckform umgewandelt. Die Sendung der Signale erfolgt gepulst und in zusammenhängenden Reihen (Skolnik 2008). Die Anzahl der gesendeten Pulse pro Sekunde wird als pulse repetition frequency (PRF) [Hz] bezeichnet. Das HF-Radar weißt eine PRF von bis zu 90

kHz auf. Bildet man den Kehrwert erhält man das pulse repetition interval (PRI). Das PRI [s] setzt sich aus der Sendedauer eines Pulses τ und der Zeit, die vergeht, bis der nächste Puls gesendet wird zusammen (Alabaster 2012).

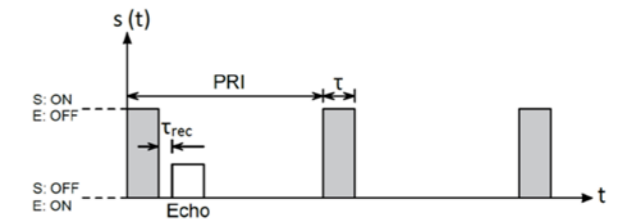


Abbildung 1: Einfache Pulsfolge mit Pulsdauer τ und dem pulse repetition interval (PRI) (nach Alabaster 2012).

Durch das gepulste Sendeverfahren wird ein Hang somit zu diskreten Zeitpunkten mit elektromagnetischen Wellen bestrahlt. Dabei entspricht eine Rangegatelänge r_{RG} genau der räumlichen Pulslänge und kann in mehrere Rangegates (RG) eingeteilt werden. Die Rangegatelänge ist daher wie folgt definiert:

$$r_{RG} = c\tau \text{ [m]} \quad (4)$$

Beim einfachen Puls kann das Echo erst detektiert werden, sobald der Empfänger eingeschaltet wurde (Abbildung 1). Dazu muss das Pulssignal den Sender zur Hälfte verlassen haben. Ein weiterer Faktor spielt die Erholungszeit τ_{rec} , die der Zirkulator oder Oszillator benötigen um gänzlich umzuschalten. Aus diesem Grund kommt es zu einem blinden Bereich (blind) direkt vor dem Radar (Alabaster 2012).

Bei der zweiten Sendeform wird der gesendete Puls durch eine Phasenumtastung moduliert und einem Binärcodeschema (Barker-Code) zugeordnet. Durch Phasenumtastung die Pulsdauer τ in Subpulse mit der Dauer τ_c aufgesplittet werden (Abbildung 2). Die sogenannte Sendeform der Pulskompression bietet Vorteile hinsichtlich eines geringeren Stromverbrauchs und besserer Detektionseigenschaften (Mahafza 2013). Ein Nachteil besteht jedoch bei Nahbereichsmessungen durch einen erhöhten Blindbereich. Der Empfänger kann erst eingeschaltet werden, sobald die gesamte Pulsfolge den Sender verlassen hat (Ludloff 2009).

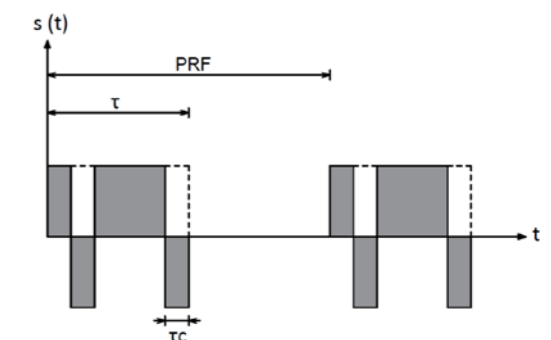


Abbildung 2: Beispiel einer Signalfolge mit Pulskompression

Das HF-Radar weißt eine maximale Reichweite von 2500 m auf, wobei Geschwindigkeiten zwischen 1 und 300 km/h detektiert werden können (Koschuch 2015).

Einsatz als Monitoringsystem / Gadriabach

Der Begriff Monitoring definiert sich durch eine ständige Beobachtung oder Kontrolle eines Prozesses oder eines Systems (Hübl und Matjaž 2014). Hinsichtlich eines alpinen Massenverlagerungsprozesses lassen sich nach Hübl und Matjaž (2014) drei Ziele formulieren:

- Durch die dauerhafte Beobachtung werden Daten gewonnen und diese werden in weiterer Folge dazu verwendet um Modelle zu entwickeln, zu testen oder zu kalibrieren. Auch wenn dieses Ziel auf den ersten Blick rein wissenschaftlich motiviert scheinen mag, bildet es jedoch die Grundlage für alle später folgenden praktischen Anwendungen.

- Die Erstellung und Erkennung von Schwellenwerten können dazu verwendet werden in den laufenden Prozess einzugreifen. Bei Murgängen könnte zum Beispiel eine Querschnittsänderung bei einem Retentionsbauwerk herbeigeführt werden, um in Folge den Abfluss zu regulieren.

- Bei Überschreitung von Schwellenwerten kann neben dem direkten Eingriff ein Frühwarnsystem in Form eines Alarmsystems eingesetzt werden.

Der Gadriabach eignet sich durch die außerordentlich hohe Frequenz an Murgängen über die Sommermonate (durchschnittlich 1 bis 2) besonders zum Monitoring. Er liegt in der autonomen Provinz Bozen in Südtirol und weist ein Einzugsgebiet von ca. 6,3 km² auf. Das Amt für Bevölkerungsschutz und die Freie Universität Bozen begannen 2011 mit der Installation von Abflusssensoren, Niederschlagswippen, Geophonen und Kameras (Comiti 2014). Im Jahr 2016 wurde schließlich ein Forschungsbauwerk von der Universität für Bodenkultur in Zusammenarbeit mit dem Amt für Bevölkerungsschutz der autonomen Provinz Bozen im unteren Gerinnebereich errichtet (Nagl 2020).

Zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeit wurde 2018 am Retentionsbauwerk ein HF-Radar installiert. Dabei können je nach Sendeverfahren und Rängegategrößen Geschwindigkeits-

daten von 9 bis 13 Rängegates erhoben werden (Abbildung 4). Um Vergleichswerte zu erhalten, sowie Korndurchmesser auch optisch bestimmen zu können wurde 2019 zusätzlich eine HD-Kamera mit Blick auf die Messstation eingerichtet (Abbildung 4).

Aus dem Videomaterial lässt sich mittels Particle Image Velocimetry (PIV) ebenfalls die Oberflächengeschwindigkeit von Murgängen berechnen (Theule 2018). Dabei können Pixelverschiebungen von Bild B zu Bild A entweder durch Kreuzkorrelation oder durch eine FFT-Analyse von Bildausschnitten verfolgt und in Geschwindigkeitsvektoren wiedergegeben werden (Thielicke und Buma 2014).

Ergebnisse

Am 26. Juli 2019 und am 10. August 2020 konnte jeweils ein Murgang von der Kamera sowie vom HF-Radar vollständig aufgezeichnet werden. Die vergleichende Datenanalyse (Abbildung 5) wurde mit den Maximalwerten durchgeführt. Die Datensätze wurden zuerst auf einen Wert pro Sekunde gebinnt und danach mit dem Bestimmtheitsmaß R² (Abbildung 13 c.) auf ihren Zusammenhang geprüft. Das Sendeverfahren beim HF-Radar war zu diesem Zeitpunkt die der Pulskompression mit einer Rängegategröße von 15 m. Die beste Übereinstimmung mit den Geschwindigkeitswerten aus dem Video konnte erst nach einer Zeitverschiebung und Mittelung der Daten aus RG4/5 erzielt werden. Aus diesem Grund wurde ab dem Jahr 2020 auf das Sendeverfahren mit einfachem Puls (Abbildung 4) umgestellt. Im August 2020 kam es zu drei Murgängen, wovon alle erfolgreich vom HF-Radar detektiert und gemessen wurden. In Abbildung 6 sind vom Ereignis am 10. August 2020 signifikante Ausschnitte der vorlaufenden Welle a.) und der Murgang b.) dargestellt.

Einsatz als Frühwarnsystem / Dawinbach

Durch den Murgang am 31. August 2019 kam es in der Gemeinde Strengen im Ortsteil Klaus zu 2-3 Meter mächtigen Verschüttungen der B-316 und Sachschäden an Häusern. Um ein solches Ausmaß bei einem weiteren Ereignis abzuwenden, startete die Wildbach- und



Abbildung 3: HF-Radar auf Retentionsbauwerk.

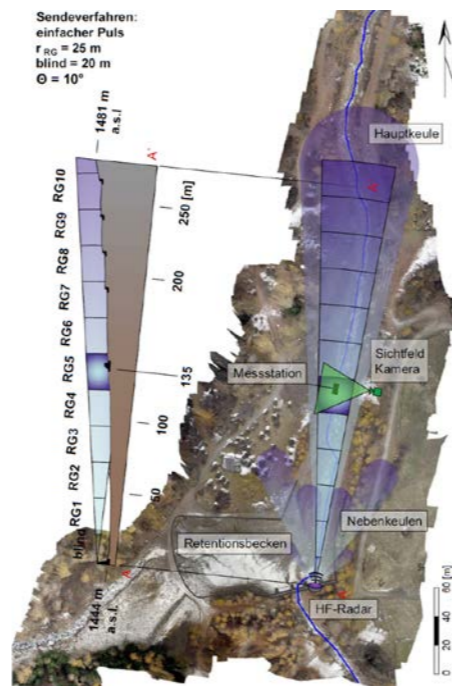


Abbildung 4: Teststätte am Gadriabach. Die Messstation befindet sich in RG5 und im Zentrum des Sichtfelds der Kamera. Die Haupt- und Seitenkeulen sind hier schematisch dargestellt.

Lawinerverbauung mit einer Verbauung. Diese beinhaltet eine Gerinneverlegung, um somit das Abflussprofil wesentlich zu vergrößern, außerdem wird die Landesstraßenbrücke von der STRABAG neu verlegt.

Da während der Errichtung der Verbauung das Risiko für den gefährdeten Straßenabschnitt, aber auch für die Arbeiter besonders hoch ist, wurde vom Institut für Alpine Naturgefahren und dem IBTP Koschuch ein Frühwarnkonzept entwickelt und umgesetzt.

Die Detektionssensoren (HF-Radar und Reißleine) wurden etwa 800 m bachaufwärts installiert. Dadurch ergibt sich im

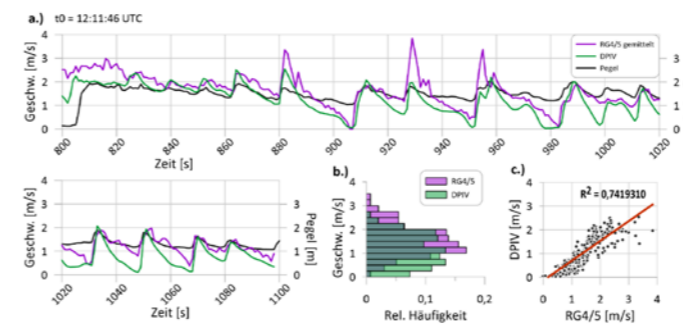


Abbildung 5: Datenvisualisierung des vollständig aufgezeichneten Murgangs bestehend aus mehreren Schüben vom 26. Juli 2020. a.) Maximaler Oberflächengeschwindigkeitsverlauf und Pegelkurve. b.) Vergleich der relativen Häufigkeit. c.) Regressionsgerade und Bestimmtheitsmaß.

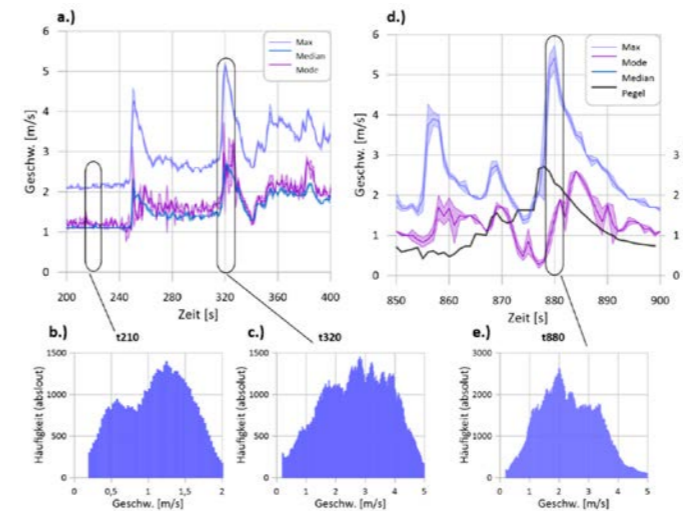


Abbildung 6: Signifikante Ausschnitte des Murgangs vom 10. August 2020. a.) Vorlaufende Wellen b.) Zeigt die Häufigkeitsverteilung bei normalem Abfluss und c.) die Verteilung einer Welle mit erhöhter Geschwindigkeitskonzentration. d.) Langsam eintreffende sehr grobblockige Murgangswelle (Pegel steigt stetig) wird von einer folgenden schnellen Welle überströmt. e.) Wesentlich höhere Häufigkeit (mehr reflektierte elektromagnetische Wellen) deutet auf einen großen sich bewegenden Körper hin.



Abbildung 7: HF-Radar mit »Blick« auf den Dawinbach.

Falle eines Ereignisses eine Reaktionszeit von 75-200 Sekunden (abhängig von der Fließgeschwindigkeit). Der gefährdete Bereich der Straße wird dabei durch eine mögliche Rot-Schaltung von drei Ampeln geregelt. Zur Baustellensicherung wurde eine Sirene an das System angeschlossen, die während den Arbeitszeiten vor der drohenden Gefahr mit einem akustischen Signal die Arbeiter warnen kann. Außerdem wird im Falle einer Detektion eine SMS-Kette verschickt, die über Prozessart und auslösendes System informiert.

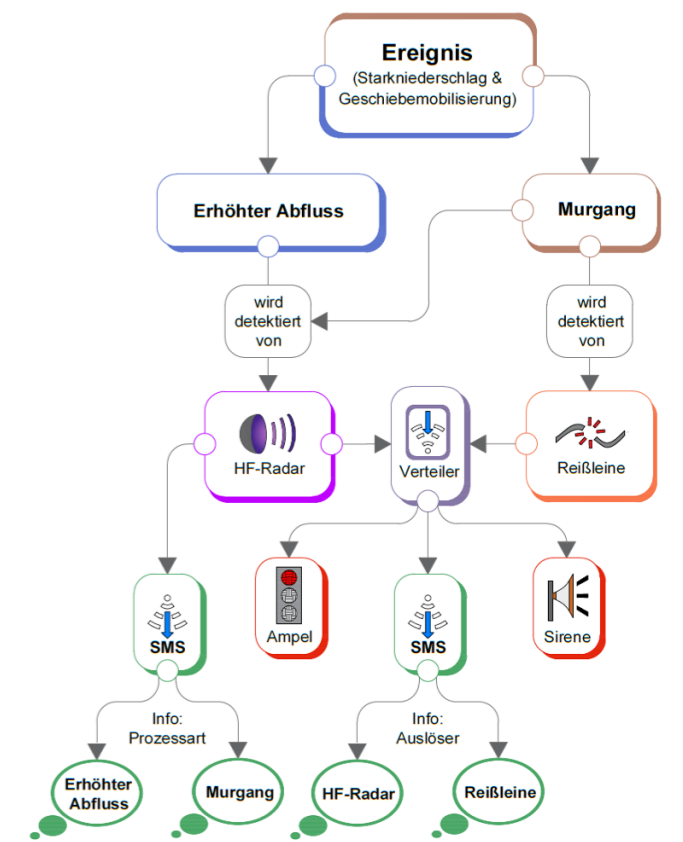


Abbildung 8: Fließdiagramm der einzelnen Komponenten des Frühwarnsystems am Dawinbach.

Literaturverzeichnis

Alabaster, C. (2012): Pulse Doppler radar: Principles, technology, applications, Sci-Tech Publishing.

Comiti, F., Marchi, L., Macconi, P., Arattano, M., Bertoldi, G., Borga, M., Brardinoni, F., u. a. (2014): A New Monitoring Station for Debris Flows in the European Alps: First Observations in the Gadria Basin. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 73 (3), S. 1175-98.

Hübl, J., Matjaž, M. (2014): Monitoring von Murgängen. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 78 (Juli), S. 50-66.

Hübl, J., Schimmel, A., Koschuch, R. (2018): Evaluation of Different Methods for Debris Flow Velocity Measurements at the Lattenbach Creek. *Interpraevent 2018 - Conference Proceedings, Volume (1)*, S. 2-8.

Koschuch, R., Jocham, P., Hübl, J. (2015). One Year Use of High-Frequency RADAR Technology in Alpine Mass Movement Monitoring: Principles and Performance for Torrential Activities. *Engineering Geology for Society and Territory*, 3 (14), S. 69-72.

Ludloff, A. K. (2009): *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*. Vieweg+Teubner Verlag, 4. Auflage.

Mahafza, B. R. (2013): *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. Boca Raton, London: Taylor & Francis Inc., 3. Edition.

Nagl, G., Hübl, J., Kaitna, R. (2020): Velocity Profiles and Basal Stresses in Natural Debris Flows. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45 (8), S. 1764-1776.

Skolnik, M. I. (2008): *Radar Handbook*, Third Edition. New York: McGraw-Hill Education, 3. Auflage

Theule, J. I., Crema, S., Marchi, L., Cavalli, M., Comiti, F. (2018): Exploiting LSPIV to Assess Debris-Flow Velocities in the Field. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (1), S. 1-13.

Thielicke, W. (2014): *The Flapping Flight of Birds: Analysis and Application*. [S.l.]: [S.n.].