

# Detektion von Steinschlag und Muren an Eisenbahnstrecken

## DESME

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2011  
(VIF2011)

10/2012



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Renngasse 5  
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

AIT Austrian Institute of Technology  
Giefinggasse 2  
1210 Vienna  
Austria



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A – 1090 Wien



# **Detektion von Steinschlag und Muren an Eisenbahnstrecken DESME**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2011)

**AutorInnen:**

**Mag. Karoline ALTEN**  
**Ing. Stefan WITTMANN**  
**DI Reinhard FIEL**  
**DI Peter WIPPLINGER**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
ÖBB-Infrastruktur AG  
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

## INHALTSVERZEICHNIS

|   |    |
|---|----|
| Einleitung.....   | 7  |
| Detailuntersuchung: Radarsonde.....   | 8  |
| Versuche zur Erkennung von Steinschlag.....   | 12 |
| Detailuntersuchung: Erschütterungssensoren.....   | 36 |
| Laborversuche: Tests mit Erschütterungssensoren und Datenauswertung .....                         | 51 |
| Vorschläge für die Realisierbarkeit eines Frühwarnsystems mittels<br>Erschütterungssensoren ..... | 62 |
| Beurteilung der Machbarkeit eines Frühwarnsystems mit Erschütterungssensoren .....                | 73 |
| Kombination der Messsysteme .....   | 78 |
| Schlussfolgerung – Machbarkeit .....  | 81 |

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1. Geschwindigkeit: großer Stein 8 m Abstand .....   | 15 |
| Abbildung 2. Signalstärke: großer Stein 8 m Abstand .....  | 16 |
| Abbildung 3. SNR: großer Stein 8 m Abstand .....   | 16 |
| Abbildung 4. Signalstärke: 32 m Abstand, in Schwingrichtung .....  | 17 |
| Abbildung 5. SNR: 32 m Abstand, in Schwingrichtung .....   | 17 |
| Abbildung 6. Wahrnehmungsbereich für eine maximale Nachweisgrenze von 35 m .....   | 19 |
| Abbildung 7. Mehrfache Spektren von Regen .....  | 20 |
| Abbildung 8. Mehrfache Spektren von Bäumen im Wind .....   | 21 |
| Abbildung 9. Geschwindigkeiten von einem Zug .....   | 22 |
| Abbildung 10. Signalstärke von einem Zug .....   | 22 |
| Abbildung 11. Mehrfache Spektren von laufendem Mensch .....  | 23 |
| Abbildung 12. Geschwindigkeit von laufendem Mensch sich nähernd und entfernend .....   | 24 |
| Abbildung 13. Signalstärke von laufendem Mensch sich nähernd und entfernend .....  | 24 |
| Abbildung 14. Pöllingergraben Ereignis vom 20.07.2012 bis 21.07.2012 .....   | 32 |
| Abbildung 15. Pöllingergraben Ereignis vom 05.08.2012 .....  | 32 |
| Abbildung 16. Rohdaten der Erschütterungssignale während eines Murgangs im Moscardo Wildbach, aus Arratano (1999) .....  | 37 |
| Abbildung 17. Bearbeitete Daten aus Abbildung 16 (hochlaufender Mittelwert) zur Verdeutlichung bestimmter Signale .....  | 37 |
| Abbildung 18. Erschütterungszeitverlauf an 2 Geophonen während einer Mure im Acquabona Bach, siehe Berti et al. (2000) .....   | 39 |
| Abbildung 19. Zeitverlauf an einem Geophon im Lattenbach während eines Murganges (Kogelnig et al. 2011) .....  | 40 |
| Abbildung 20. Power Spectrum eines Ereignisses im Lattenbach (Kogelnig et al. 2011). 40  |    |
| Abbildung 21. Beispiel einer Acoustic Flow Monitoringstation nach Marcial et al. (1996). 44  |    |
| Abbildung 22. (a): Vertikale Bodenschwingung beim Auftreffen eines 12 kg Blockes aufs trockene Bachbett, Fallhöhe 1.5 m. (b): Zugehöriges Spektrum, mit Spitzen zwischen 80 – 120 Hz; aus Huang et al. (2007). ..... | 46 |
| Abbildung 23. Seismische Signale aufgrund verschiedener Ursachen, aufgezeichnet an den 3-Komponenten Geophonen am Åknes Hang (aus SafeLand Deliverable 4.6, 2012). 24 Kanäle über einen Ausschnitt von 16 sec. ....  | 48 |
| Abbildung 24. Minimale, mittlere und maximale Anzahl an Instrumenten einer bestimmten Art pro Monitoringstation (aus SafeLand Deliverable 4.8, März 2012) .....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 25. Kombination von Radargeräten und Erschütterungsmessungen zur Steinschlagüberwachung..... | 78 |
| Abbildung 26. Kombination von Radargeräten und Erschütterungsmessungen zur Murgangüberwachung.....     | 80 |

## EINLEITUNG

In der 1.Phase der vorkommerziellen Beschaffung von DESME ging es um die Untersuchung der Eignung von Radar- und Erschütterungssensoren für ein kombiniertes Frühwarnsystem entlang von Eisenbahnstrecken. Der Schwerpunkt lag hier in der zuverlässigen Detektion von energieintensiven Massenbewegungen wie Stein-/Felschlag und Murgängen. Da die aufwendige Absicherung aller von diesen Naturgefahren betroffenen Gleiskörper nicht möglich ist, spielt die frühzeitige Detektion eine wesentliche Rolle in der Schadensbegrenzung. Die Detektion von Hochwasser und Lawinen wurde in diesem Projekt explizit ausgeschlossen, da es vor allem in Hinblick auf Unwetterwarnung bereits ausgereifte Systeme im Naturgefahren Management der ÖBB gibt.

Die grundlegendste Anforderung an ein potientielles Frühwarnsystem ist Verlässlichkeit: Zum einen im Sinne von Ausfallsicherheit, so dass ein bestimmter Streckenabschnitt unabhängig von Tageszeit und Witterungsbedingungen überwacht werden kann; zum anderen im Sinne der Detektionsfähigkeit, die im Falle eines Ereignisses eine Alarmierung auslöst bzw. Fehlalarme möglichst vermeidet. Vor allem für die Detektionsverlässlichkeit spielt Redundanz eine große Rolle in der Planung des Frühwarnsystems. Diesbezüglich war der Vorschlag der DESME Partner (AIT Austrian Institute of Technology GmbH und Fa. Sommer Messtechnik) eine Kombination aus Radarsonden und Erschütterungssensoren zu testen und anschließend die Machbarkeit im Hinblick auf Technik und Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Der im Folgenden dargelegte Ergebnisbericht fasst die gewonnen Erkenntnisse der Studien und Versuche aus den drei Arbeitspaketen der 1.PCP Phase zusammen:

AP 2: State-of-the-art

AP 3: Detailuntersuchung: Radarsonde

AP 4: Detailuntersuchung: Erschütterungssensoren

Der ermittelte Stand-der-Technik (AP2) bezüglich der einzusetzenden Sensorik wurde im Rahmen der jeweiligen Detailuntersuchungen beschrieben.

## DETAILUNTERSUCHUNG: RADARSONDE

### Ziel

Das Ziel der Untersuchungen sind konkrete Aussagen über den potentiellen Einsatz von Radarsensoren in der frühzeitigen Erkennung von Naturgefahren. Das vorrangige Ziel ist dabei eine Aussage über die technische Umsetzbarkeit. Unter welchen Bedingungen können Naturgefahren verlässlich detektiert werden? Welche Nachweisgrenzen existieren für unterschiedliche Prozesse?

Zugleich soll auch die wirtschaftliche Machbarkeit der Prototypenentwicklung geprüft werden. Ist die Erstellung von Prototypen im vorgegebenen Zeitraum mit den vorhandenen Ressourcen möglich?

Eine zusätzliche Fragestellung ist die Verwendung als mobiles Messsystem. Kann das Messgerät schnell und einfach installiert werden? Sind aussagekräftige und verlässliche Alarmierungen möglich?

### Radarsysteme

Im Bereich der Naturgefahren kommen hauptsächlich drei unterschiedliche Radarsysteme zum Einsatz.

**CW-Radar (Continuous Wave):** CW-Radargeräte oder Dauerstrichradargeräte strahlen während der Dauer des Messvorgangs ununterbrochen ein unmoduliertes Sendesignal ab. Das reflektierte Echosignal wird ständig empfangen und verarbeitet. Dabei erfolgt eine frequenzmäßige Trennung und nur das Dopplersignal wird aufgezeichnet. Über die Frequenzänderung aufgrund des Doppler-Effekts können die Geschwindigkeiten von bewegten Objekten erfasst werden. Entfernungen können nicht bestimmt und verschiedene Ziele nicht unterschieden werden.

**FMCW-Radar (Frequency Modulated Continuous Wave):** Bei dieser Methode wird ein kontinuierliches Signal ausgesendet, das sich periodisch in der Frequenz ändert. Dadurch hat das empfangene Echosignal neben der Frequenzänderung auch eine Laufzeitverschiebung, wodurch ein Zeitbezug zur Messung der Entfernung hergestellt wird. Neben der Geschwindigkeit kann somit über einen Vergleich des empfangenen Signals mit einer Referenz - meist das Sendesignal - die Entfernung gemessen werden.

**Pulsed Doppler Radar:** Im Gegensatz zu den oben genannten Methoden mit kontinuierlichen Sendesignalen verwendet dieses Verfahren kurze Sendeimpulse. Durch Entfernungsfilerung und Korrelationsverfahren können die Geschwindigkeiten in



diskreten Entfernungsbereichen erfasst werden. Dadurch können Störeinflüsse durch Wetter und bewegte Äste eliminiert werden

## Radargerät RG-30

Die Basis für die Untersuchungen ist das bestehende Radargerät RG-30 der Firma Sommer. Das Radargerät ist ein CW-Radargerät mit 24 GHz. Es wurde speziell zur Geschwindigkeitsmessung von Fließgewässern entwickelt. Dabei wird das Radarsignal in einem bestimmten Winkel zur bewegten Wasseroberfläche gerichtet. Das Signal wird dort an Rippeln und Wellen reflektiert und das reflektierte Signal empfangen, gefiltert und die Oberflächenfließgeschwindigkeit bestimmt. Da durch die geneigte Ausrichtung ein Winkelfehler entsteht, wird intern der Aufhängungswinkel gemessen und die Geschwindigkeit korrigiert.

Da es sich um ein CW-Radar handelt, können nur die Geschwindigkeiten von bewegten Objekten erfasst werden. Entfernungen oder Unterscheidungen von Zielen sind nicht möglich. Die Bewegungen müssen im Wahrnehmungsbereich der Radarantenne auftreten und sich auf den Radarsensor zu oder vom Sensor weg bewegen. Bewegungen normal auf den Abstrahlkegel des Radarsensors verursachen kein Doppler-Signal und können daher nicht erfasst werden.

Das Doppler-Radar hat den großen Vorteil, dass es keine unbewegte Objekte detektiert und dadurch in beliebige Richtungen ausgerichtet werden kann. Zudem wird ein Produkt verwendet, das bereits auf dem Markt etabliert ist. Das Gerät ist für den Einsatz unter rauen Umweltbedingungen konzipiert und ist sehr stromsparend ausgelegt, damit es mit Batterie und Solarpanel autark betrieben werden kann. Das Radargerät hat sich unter diesen Bedingungen bereits über mehrere Jahre bewährt. Da es sich um eine Eigenentwicklung der Firma Sommer handelt, können Anpassungen der Software sowie auch der Hardware vorgenommen werden.

## Vorgaben und Voraussetzungen

Um Naturgefahren erkennen zu können, müssen Radarsensoren bestimmte Vorgaben und Voraussetzungen erfüllen. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

**Messparameter:** Die zwei wesentlichen Messparameter des verwendeten Radargeräts sind die Bewegungsgeschwindigkeit und die Bewegungsintensität.

Die Geschwindigkeit wird an Objekten gemessen, die sich im Erfassungsbereich des Radargeräts befinden. Im Normalfall wird nicht die absolute Geschwindigkeit bestimmt, da

sämtliche Bewegungen, die nicht direkt auf das Radar zu oder weg gerichtet sind, Winkel-  
fehlern unterliegen, wodurch die Geschwindigkeit geringer erfasst wird.

Die Bewegungsintensität ist eine Aussage über die Signalstärke, die von Bewegungen  
verursacht werden. Je größer ein bewegtes Objekt ist, desto höher ist auch die Intensität  
des Doppler-Signals. Weiters hängt die Intensität von der Entfernung und dem  
Reflexionsvermögen der bewegten Objekte ab. Feuchte oder wasserhaltige Objekte  
sowie metallische Objekte verursachen größere Intensitäten.

**Kurze Messdauer:** Ein wesentliches Kriterium zur Erkennung von Stein- und Blockschlag  
stellt die Messdauer dar. Die relevanten Prozesse können sehr schnell ablaufen und den  
Wahrnehmungsbereich des Radargerätes rasch durchqueren. Daher sind eine  
entsprechend kurze Messdauer und ein hohes Messintervall notwendig.

**Detektionsgrenzen:** Die Grenzen der Detektion ergeben sich einerseits aus der  
Entfernung der Bewegung vom Radargerät und andererseits aus der Größe der bewegten  
Objekte. Die Ermittlung dieser Nachweisgrenzen ist eine wesentliche Aufgabe der  
folgenden Untersuchungen.

**Bewegungen im Radarbereich:** Im Wahrnehmungsbereich des Radargeräts können  
Bewegungen auftreten, die nicht durch die untersuchten Naturprozesse ausgelöst  
werden. Bäume und Äste können sich im Wind bewegen. Niederschlag in Form von  
Regen und Schnee kann Bewegungen verursachen. Personen, Wild und Züge können  
sich im Messbereich befinden und Bewegungen ergeben. Die Einflüsse solcher Bewe-  
gungen müssen untersucht werden, um Limitierungen festzustellen und eventuell die Ein-  
flüsse beseitigen zu können.

**Alarmierung:** Das Erkennen von Prozessen soll zu eindeutigen Alarmierungen führen.  
Solche primären Alarmierungen betreffen den Prozess an sich und sollen in Stufen  
generiert werden (z.B. Voralarm und Hauptalarm). Auslöser der Alarmierungen sind  
Schwellenwerte, die beim Radargerät für die Parameter Geschwindigkeit und Intensität  
gesetzt werden. Zusätzliche Alarmierungen betreffen den Zustand des Gerätes. So  
werden zum Beispiel Systemausfälle oder niedrige Batteriespannungen gemeldet. Die  
Alarmmeldungen sollen per Leitung oder Funk zu einer Fernwirkanlage hin übertragen  
werden, wo sie einfach entgegengenommen und weitergeleitet werden können.

**Kopplung von Sensoren:** Die Kopplung von Radargeräten muss möglich sein. Durch die Verwendung von mehreren parallelen Messgeräten kann einerseits ein größerer Beobachtungsraum abgedeckt werden. Andererseits können sich Beobachtungsräume überschneiden und dadurch die Aussagekraft erhöht werden.

**Redundante Messungen:** Das Zusammenführen von redundanten Messmethoden in ein System muss möglich sein. So ergänzen sich zum Beispiel Radarmessung und Erschütterungsmessung und können die Verlässlichkeit von Alarmierungen erhöhen und Fehlalarme vermeiden. Zum Beispiel können Erschütterungssensoren Züge erkennen und diese Information an die Radargeräte weitergeben.

**Umweltbedingungen:** Das Radargerät muss unter allen Witterungsbedingungen das ganze Jahr über verlässlich funktionieren. Das Ausgangsgerät RG-30 der Firma Sommer erfüllt bereits dieses Kriterium und hat sich schon mehrere Jahre im Einsatz bewährt. Trotzdem können extreme Witterungsverhältnisse temporäre Ausfälle verursachen (extremer Schneesturm, Einschneien der Anlage,...)

**Energieversorgung:** An vielen Einsatzorten ist keine Infrastruktur vorhanden. Daher sollte ein Messgerät auch mit einer autonomen Energieversorgung, wie zum Beispiel Solarzellen, versorgt werden können. Speziell bei mobilen Systemen ist dies eine Grundvoraussetzung. Die Firma Sommer besitzt langjährige Erfahrung mit autonomen Systemen und sämtliche Geräte sind entsprechend konzipiert. Es gilt abzuklären, ob die autarke Versorgung mit den verwendeten Geräten und Messzyklen gewährleistet ist.

**Datenspeicherung und -weitergabe:** Mit Geräten der Firma Sommer ist eine Speicherung und selbstständige Weitergabe der Messdaten der Sensoren möglich. Einerseits können die Daten per GPRS an Webserver übergeben werden, andererseits ist zur Fernparametrierung und redundanten Datenabfrage ein Remotezugriff per GSM möglich.

## VERSUCHE ZUR ERKENNUNG VON STEINSCHLAG

**Ziel:** In Versuchen wurde die Eignung des Radargeräts zur Erkennung von Steinschlag untersucht. Speziell wurde auf die Wahrnehmungsgrenze und den Wahrnehmungsbereich sowie auf den Einfluss von unterschiedlichen Steingrößen geachtet. Weiters wurden die Störeinflüsse aus der Umwelt untersucht.

**Anpassungen des Radargerätes:** Um die gewünschten Versuche durchführen zu können, mussten Modifikationen am bestehenden Radargerät RG-30 der Firma Sommer vorgenommen werden.

Eine grundlegende Anpassung stellt die Minimierung der Messzeit dar. Da Prozesse wie Steinschlag sehr schnell ablaufen können, musste die Messdauer der Einzelmessungen deutlich verringert werden. Die minimale Messdauer beträgt mit dem modifizierten Radargerät nun 0,25 s.

Die Auswertung des Radarsignals erfolgt über Frequenzspektren, wobei die Frequenz der Geschwindigkeit entspricht. Diese Spektren sind ein wichtiges Analysewerkzeug für die Beurteilung der Messperformance. Die nunmehrige geringe Messdauer verhindert jedoch eine fortlaufende Ausgabe der Spektren nach den einzelnen Messungen. Der Zeitraum zwischen den Messungen reicht nicht mehr aus, um die Spektren über die Schnittstelle zu übertragen. Daher wurde eine Adaption vorgenommen. Das Radargerät zeichnet 16 Einzelmessungen auf, behält die Spektren im internen Speicher und gibt diese nach Beendigung der Messungen geblockt aus. Somit wird die Aufzeichnung und Analyse der Frequenzspektren ermöglicht.

### Schaukelversuche

**Beschreibung:** Die Versuche sollten möglichst wirklichkeitsnah Bewegungen von Steinen simulieren. Dazu war es notwendig mit „echten“ Steinen zu arbeiten, da dadurch das Reflexionsverhalten nicht verfälscht wird. Die Größe der Steine sollte entsprechend der geforderten Wahrnehmungsschwelle von einem mittleren Durchmesser von 30 cm gewählt werden. Wenn diese Steine erkannt werden, kann angenommen werden, dass auch größere Steine sicher detektiert werden. Weiters wurde darauf geachtet, dass die Steine trocken und nicht mit Flechten und Moos bewachsen waren. Feuchtigkeit am Stein und in den Pflanzen erhöht das Reflexionsvermögen und Steine sind daher besser zu erkennen. Daher wurden die Versuche mit ungünstigeren trockenen Steinen durchgeführt.

Die Bewegungen der Steine sollten reproduzierbar, wiederholbar und einfach durchzuführen sein. Daher wurde der Entschluss gefasst, die Steine in eine Pendelbewegung zu versetzen. Dies hat die Vorteile, dass die Bewegungen länger andauern, dass die Entfernung und die Ausrichtung des Radargerätes einfach geändert werden kann und dass bei einem Aufbau im freien Feld Hintergrundbewegungen vermieden werden.

Der Versuchsaufbau bestand aus einem 4 m hohen Gerüst aus verschraubten Holzbalken. Am Querbalken wurden Seile befestigt, an die unterschiedliche Steine angebracht werden konnten.



**Foto 1. Schaukel**



**Foto 2. Schaukel**

Es wurden drei Steine verwendet. Die Steine wurden gereinigt und angebohrt, um sie einfach an der Schaukel befestigen zu können. Für die Messungen wurden die Steine manuell in Schwingung und Rotation versetzt. Dabei wurde auf eine ähnliche Auslenkung bei den verschiedenen Steinen geachtet.



**Fotos 3 a und b. Großer Stein (ca. 45 x 30 x 20 cm)**



**Foto 4 a und b. Mittlerer Stein (ca. 35 x 25 x 20 cm)**



**Foto 5 a und b. Kleiner Stein (ca. 30 x 20 x 15 cm)**

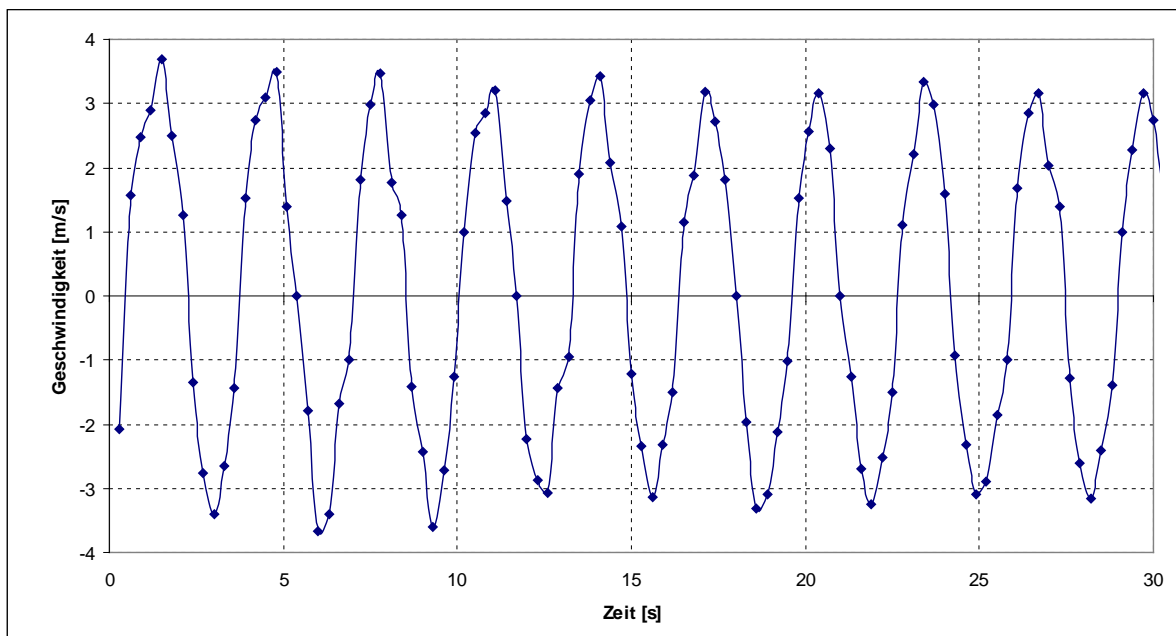
Die Messungen wurden mit dem modifizierten Radargerät durchgeführt. Das Messintervall betrug 0,3 s und es wurde die Geschwindigkeit, die Signalstärke und das Signal-To-Noise Verhältnis (SNR) der Bewegungen gemessen. Die Daten wurden mit einem Laptop aufgezeichnet. Zudem konnten die Frequenzspektren von Einzelmessungen ausgegeben und aufgezeichnet werden.

Das Radargerät war auf einem Dreibein montiert und konnte dadurch leicht bewegt werden. Dadurch waren Messungen aus unterschiedlichen Entfernungen und mit verschiedenen Ausrichtungen zu den pendelnden Steinen möglich.



**Foto 6. Radargerät auf Dreibein**

Bei einem schwingenden Pendel entspricht die Bewegung einer gedämpften Sinusschwingung. Dabei werden die maximalen Geschwindigkeiten beim Durchgang durch den Fußpunkt erreicht, die Geschwindigkeiten von Null befinden sich bei der Bewegungsumkehr bei voller Auslenkung. Dieses theoretische Verhalten konnte mit dem Geschwindigkeitsradar beobachtet werden.



**Abbildung 1. Geschwindigkeit: großer Stein 8 m Abstand**

Als weitere Parameter wurde die Signalstärke und das Signal-To-Noise Verhältnis bestimmt. Die Signalstärke beschreibt die Intensität des gemessenen Signals. Das SNR sagt aus, wie gut sich das Signal vom Hintergrundrauschen abhebt.

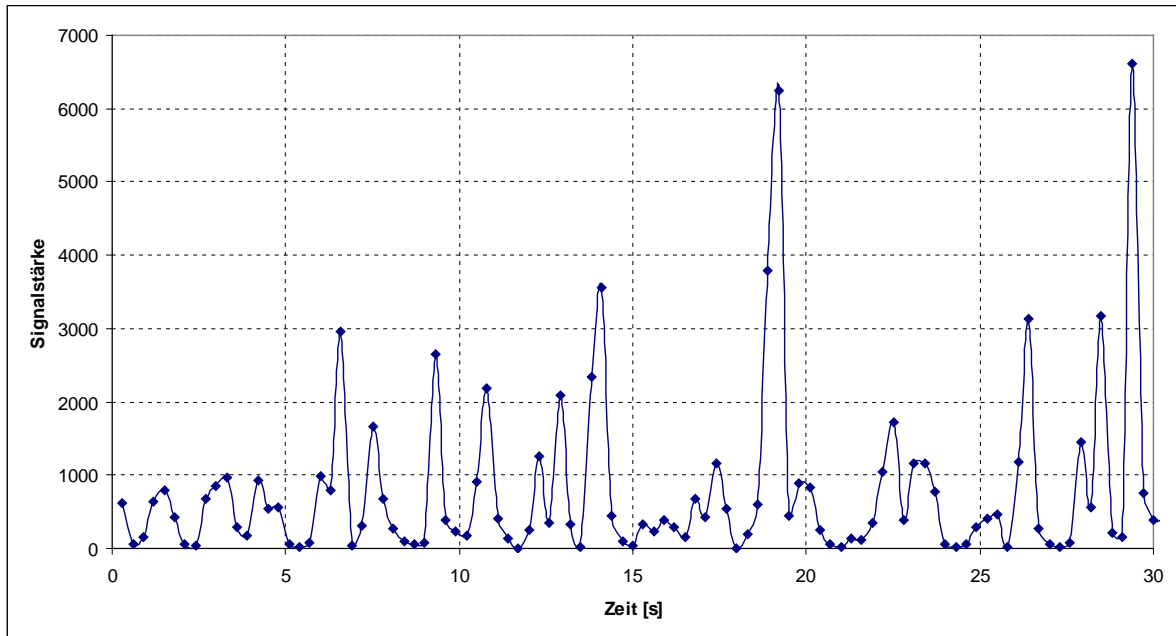


Abbildung 2. Signalstärke: großer Stein 8 m Abstand

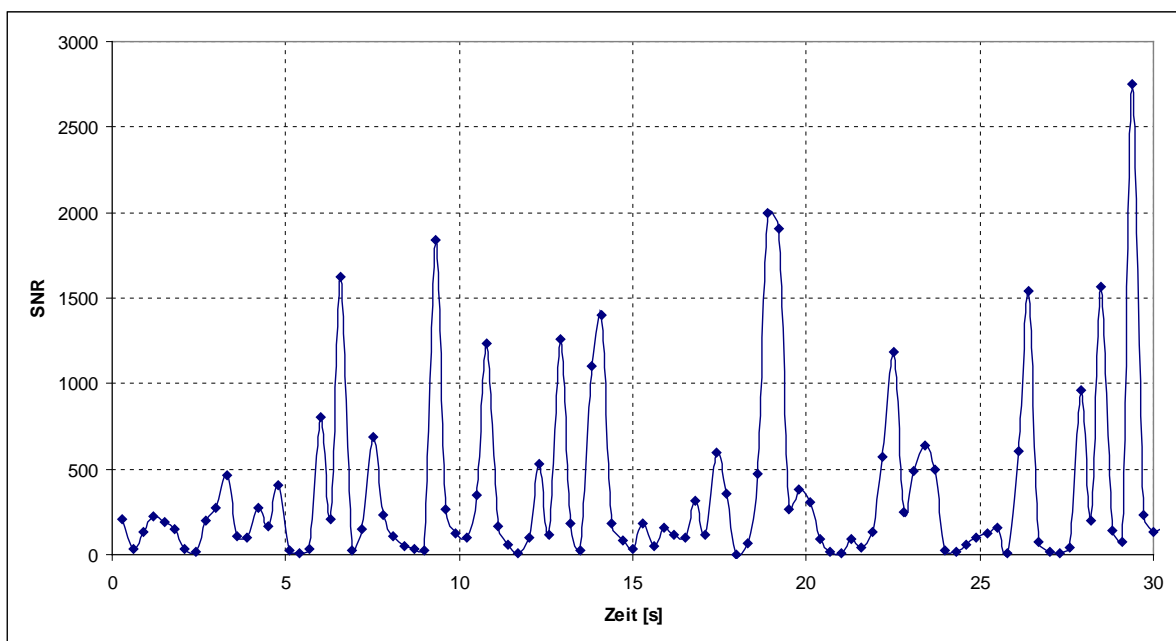


Abbildung 3. SNR: großer Stein 8 m Abstand



Die Signalstärke und das SNR hängen sehr stark von der Ausrichtung des Steines ab. Ebene Flächen können stärker reflektieren als runde Formen. Da die Steine in Rotation versetzt wurden, ist dies in der unterschiedlichen Ausprägung der Signale zu erkennen. In den Umkehrpunkten kommt es zu starken Rückgängen der Signalstärke.

## Ergebnisse

**Vergleich der Steine:** Der Einfluss der drei Steine wurde untersucht. Dazu wurden die Signalstärke und die SNR der drei Steine bei gleichen Abständen und Ausrichtungen verglichen.

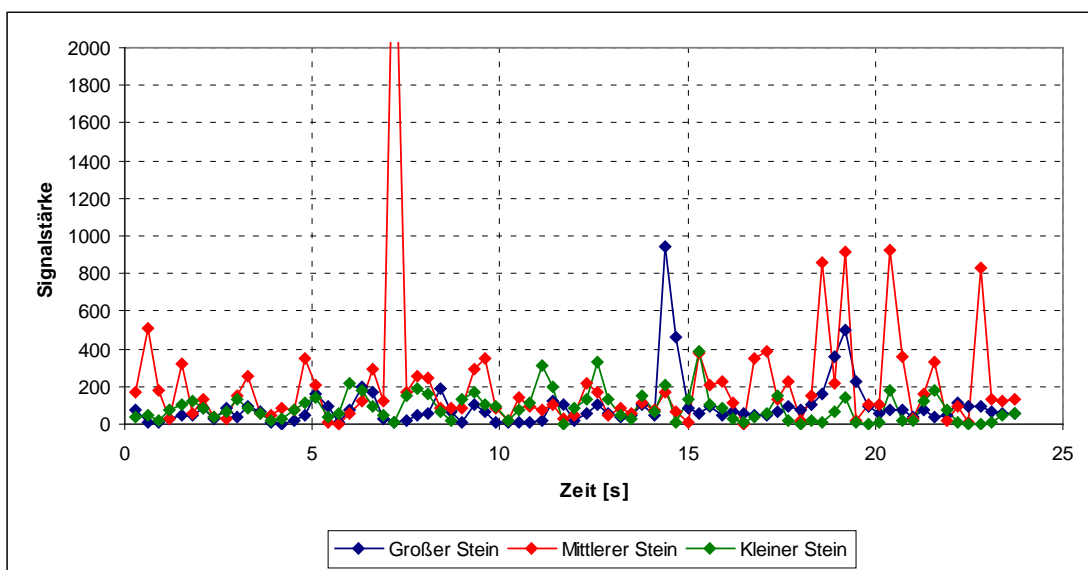


Abbildung 4. Signalstärke: 32 m Abstand, in Schwingrichtung

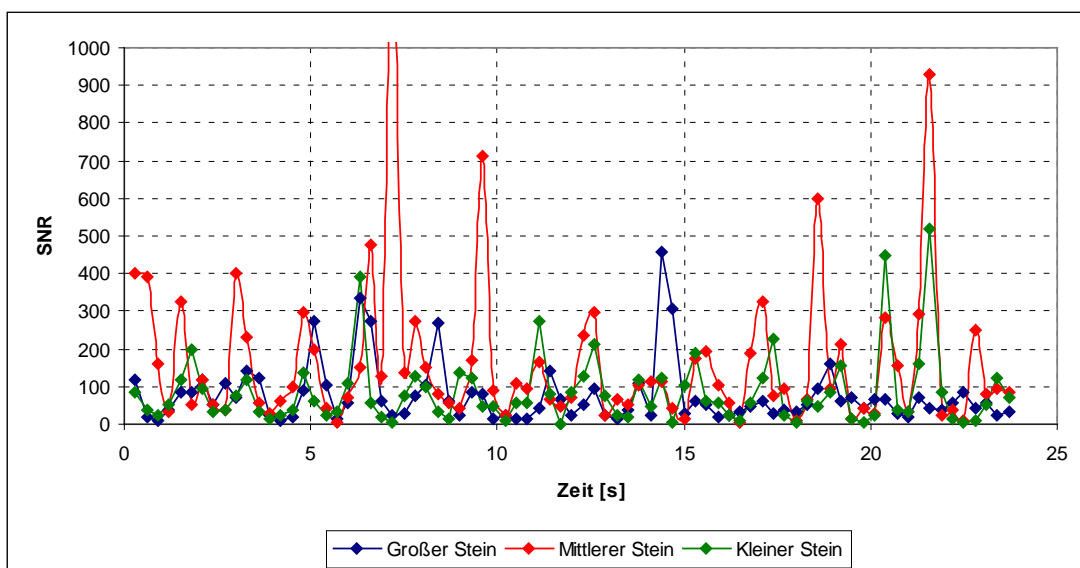


Abbildung 5. SNR: 32 m Abstand, in Schwingrichtung

**Tabelle 1. Vergleich Steine (32 m, in Schwingungsrichtung, Mittelwerte über 24 s)**

|              | Großer Stein | Mittlerer Stein | Kleiner Stein |
|--------------|--------------|-----------------|---------------|
| Signalstärke | 91,4         | 214,8           | 86,5          |
| SNR          | 75,3         | 164,1           | 84,3          |

Es zeigt sich kein signifikanter Unterschied aufgrund der Größe. Der große und der kleine Stein ergeben in etwa dieselbe Signalstärke und SNR. Lediglich der mittlere Stein zeigt deutlich höhere Werte. Die Ursache dafür liegt in der Form des Steines. Der Stein ist quaderförmig, wodurch sich bei der Rotation öfters eine Seitenfläche normal zum Radar befinden kann. Dadurch wird das Signal sehr stark reflektiert, was sich in den hohen Spitzen in der Signalstärke und SNR wiederfindet.

**Nachweisgrenze:** Für das Austesten der Nachweisgrenze wurden die Signalstärke und das SNR von Messungen miteinander verglichen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde jeweils ein Mittel für die Signalstärke und die SNR über einen Zeitbereich gebildet. In den untenstehenden Tabellen ist dies für den großen Stein mit einem Mittel von 52,2 s dargestellt. Die Messungen erfolgten einerseits mit Ausrichtung des Radars zentral in Schwingungsrichtung und andererseits 4 m seitlich parallel versetzt dazu. Bei der Leermessung wurde der Stein nicht bewegt und nur die Bewegungen des Hintergrunds gemessen (Bewegungen von Gras im Wind,...).

**Tabelle 2. Entfernungstest (großer Stein, in Schwingungsrichtung, Mittel über 52,2 s)**

|              | 16 m   | 32 m  | 48 m  | Leermessung |
|--------------|--------|-------|-------|-------------|
| Signalstärke | 2280,5 | 454,8 | 186,5 | 62,8        |
| SNR          | 1393,5 | 114,9 | 40,4  | 11,0        |

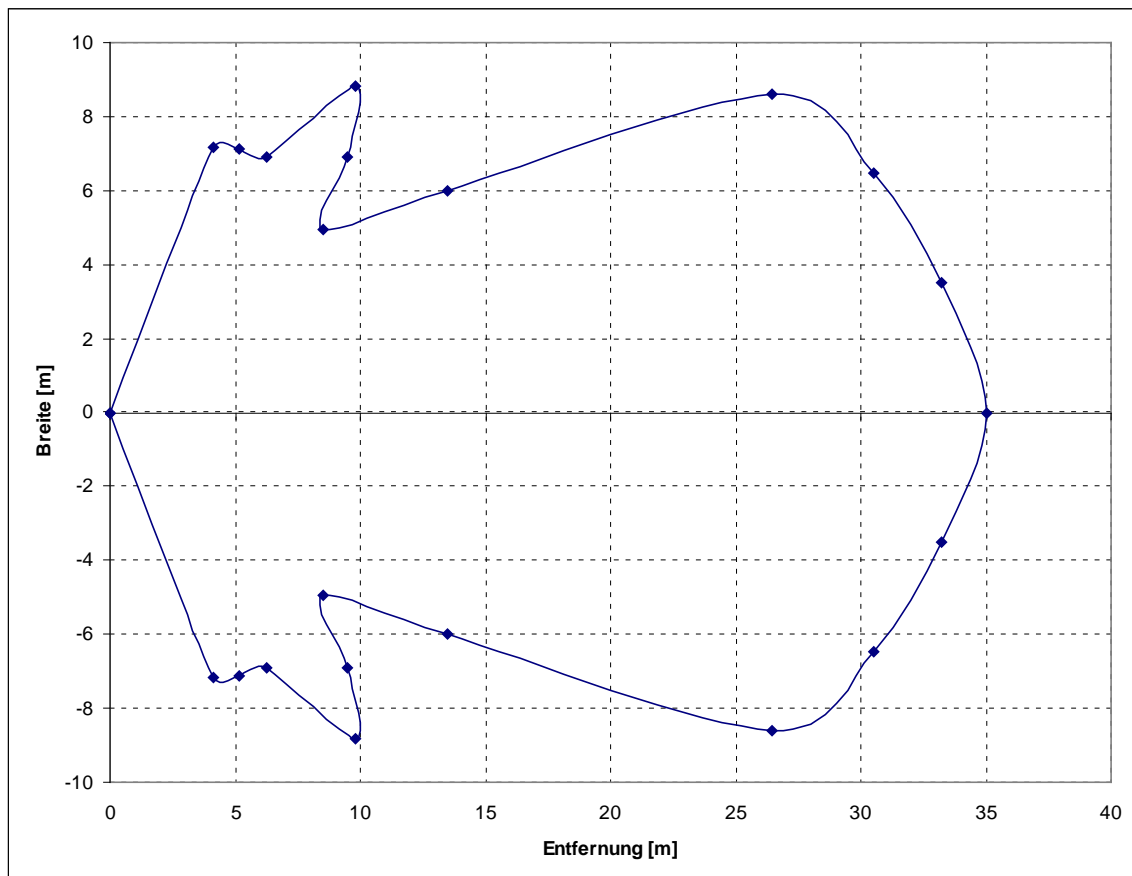
**Tabelle 3. Entfernungstest (großer Stein, versetzt zur Schwingungsricht., Mittel über 52,2 s)**

|              | 16 m   | 32 m  | 48 m  | Leermessung |
|--------------|--------|-------|-------|-------------|
| Signalstärke | 1418,0 | 254,4 | 124,4 | 62,8        |
| SNR          | 459,3  | 59,0  | 32,2  | 11,0        |

Es zeigt sich, dass wie zu erwarten, die Signalstärke und die SNR mit der Entfernung abnehmen. Die maximale Nachweisgrenze für Steine mit einem mittleren Durchmesser von

30 cm kann mit ca. 35 m festgelegt werden. Die minimale Messdistanz beträgt 5 m, da sich die gemessenen Geschwindigkeiten bei sehr hohen Detektierungswinkeln sehr stark verringern und daher gedämpft werden.

**Wahrnehmungsbereich:** Jede Radarantenne besitzt eine bestimmte Charakteristik. Die verwendete Antenne hat einen theoretischen Abstrahlkegel von  $16^\circ$  horizontal und  $7^\circ$  vertikal, jedoch besitzt sie eine eigene Ausprägung (Antennenrichtdiagramm). Mit Hilfe dieses Antennenrichtdiagramms und der zuvor ermittelten geraden Nachweisgrenze von 35 m ergibt sich die horizontale Ausdehnung für die sichere Erkennung eines 30 cm großen Steins wie folgt.



**Abbildung 6. Wahrnehmungsbereich für eine maximale Nachweisgrenze von 35 m**

In der Darstellung ist die maximale Nachweisgrenze von 35 m für die laterale Breite 0 dargestellt. Die Breite, in der noch eine sichere Wahrnehmung erfolgt, beträgt an der schmalsten Stelle ca. 4,8 m auf jede Seite hin.

## Untersuchung von Störbewegungen

In weiteren Versuchen wurden mögliche Bewegungen im Wahrnehmungsbereich des modifizierten Radargerätes untersucht. Es sollte festgestellt werden, welche Geschwindigkeiten und Signalstärken die jeweiligen Störbewegungen besitzen.

**Bewegungen durch Niederschlag (Regen und Schnee):** Zur Untersuchung von Regen wurde das modifizierte Radargerät in ca. 45° nach oben in den Himmel gerichtet und Regen aufgezeichnet.

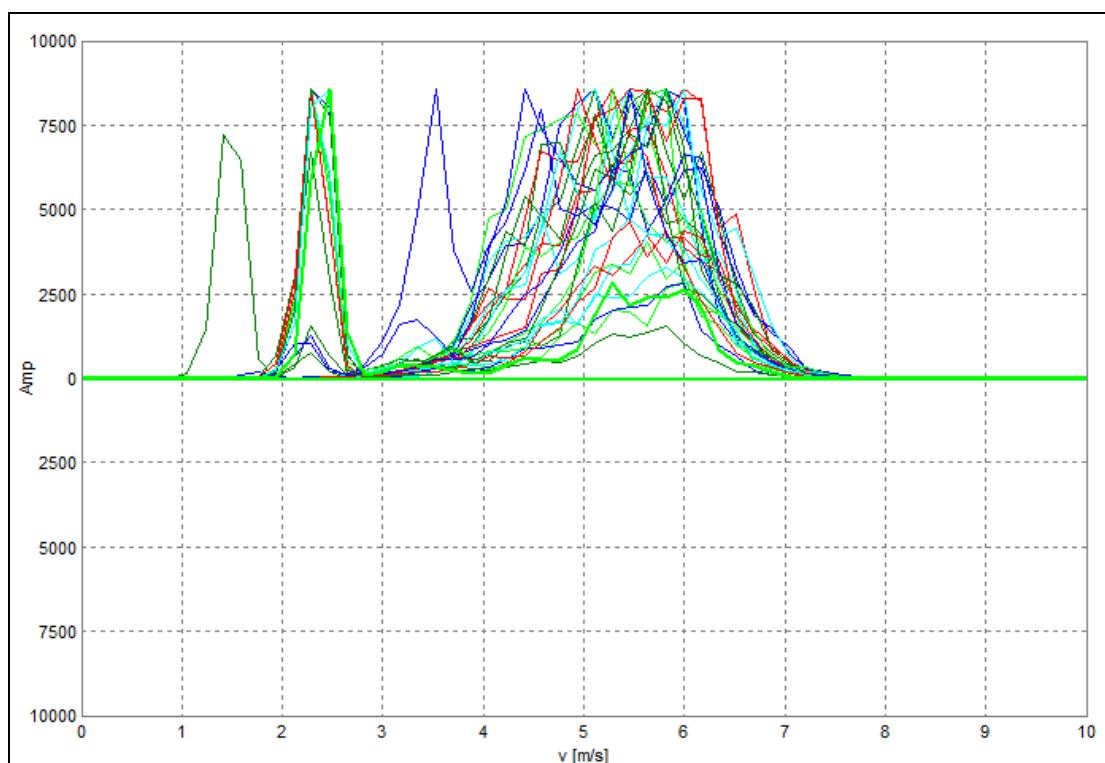
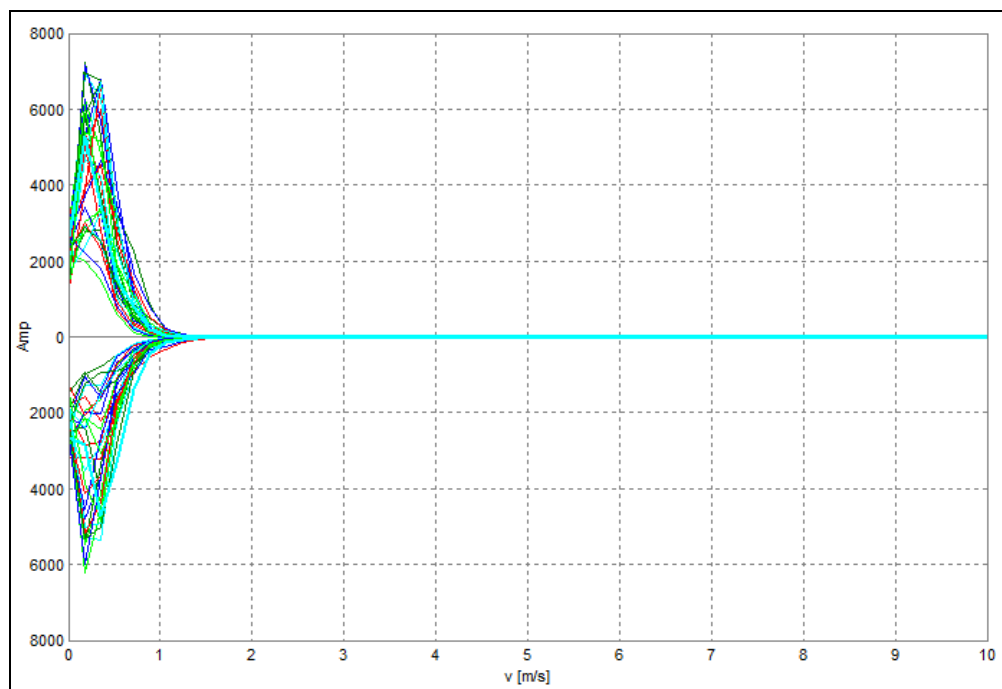


Abbildung 7. Mehrfache Spektren von Regen

In den Regenspektren – jedes Spektrum entspricht einer Einzelmessung – kann die Geschwindigkeitsverteilung erkannt werden. Die dominierenden Geschwindigkeiten befinden sich im Bereich von 3 bis 7 m/s. Die Spitzen bei ca. 2,4 m/s wurden von Wassertropfen verursacht, die wiederkehrend von einem Dach durch den Wahrnehmungsbereich des Radars fielen. Deutlich ist zu erkennen, dass nur Bewegungen vorliegen, die sich zum Radar hinbewegen. Bewegungen vom Radargerät weg, die sich nach unten hin zeigen würden, sind nicht zu erkennen.

Messung bei Schneefall konnten über den Sommer nicht durchgeführt werden. Generell sind dabei geringere Geschwindigkeiten als bei Regen zu erwarten. Jedoch werden Schneeflocken leichter durch Wind verweht, was zu deutlich höheren Geschwindigkeiten führen kann.

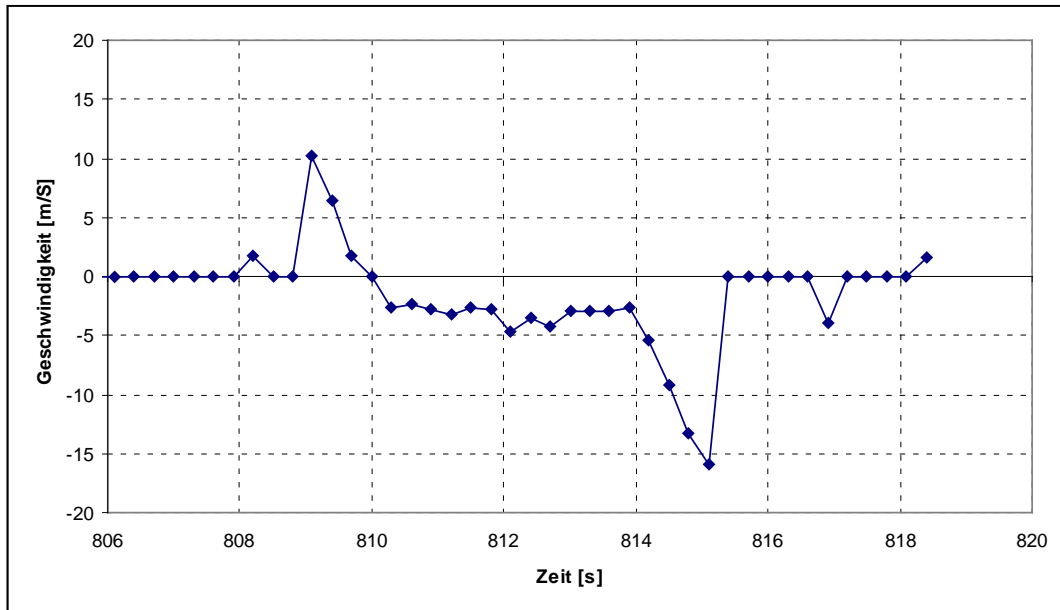
**Bewegungen von Vegetation im Wind:** Während böigen Windes wurde das Radargerät auf Bäume gerichtet, deren Äste sich im Wind bewegten.



**Abbildung 8. Mehrfache Spektren von Bäumen im Wind**

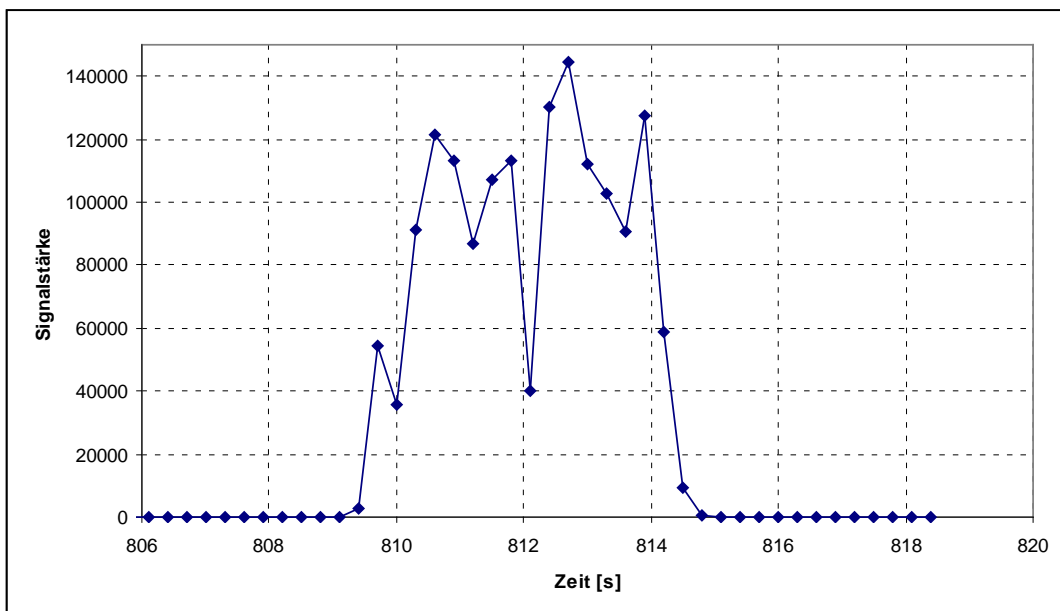
Sämtliche auftretenden Geschwindigkeiten waren kleiner als 1 m/s, bei stärkerem Wind können jedoch Geschwindigkeiten bis zu maximal 5 m/s auftreten. Da sich Äste vor und zurück bewegen, zeigen sich Bewegungen in Richtung zum Radar hin, als auch vom Radar weg. Bewegungen von Gras konnten auch beobachtet werden, zeigten jedoch deutlich kleinere Ausprägungen.

**Bewegungen von Zügen:** Aufgrund des geringen Wahrnehmungsbereichs der Radargeräte müssen diese im Bereich des Gleiskörpers montiert werden. Daher müssen die Einflüsse von Zügen untersucht werden. Das Radargerät wurde dazu in einer Entfernung von 50 m annähernd im rechten Winkel auf einen Gleiskörper gerichtet und die Signale von einem vorbeifahrenden Zug aufgezeichnet.



**Abbildung 9. Geschwindigkeiten von einem Zug**

Bei der Annäherung des Zuges wurde zuerst eine sich nähernde Geschwindigkeit aufgezeichnet. Als der Zug fast normal zum Radar fuhr, verursachte dies eine geringe Geschwindigkeitsanzeige. Als sich der Zug aus dem Abstrahlkegel bewegte, wurde eine sich entfernende Geschwindigkeiten gemessen.



**Abbildung 10. Signalstärke von einem Zug**

Die Signalstärken von Zügen sind sehr hoch. Metall besitzt ein sehr hohes Reflexionsvermögen. Dadurch dominieren Signale von Zügen auch noch aus 50 m Entfernung bei weitem über Steinschlag.

**Bewegungen von Menschen und Wild:** Ein weiterer Störeinfluss im Sichtbereich des Radargeräts sind Menschen und Wild. Durch den hohen Wasseranteil im Körper ist das Reflexionsvermögen hoch und die Signalstärke entsprechend stark. Die Geschwindigkeiten liegen im Bereich von bis zu 10 m/s.

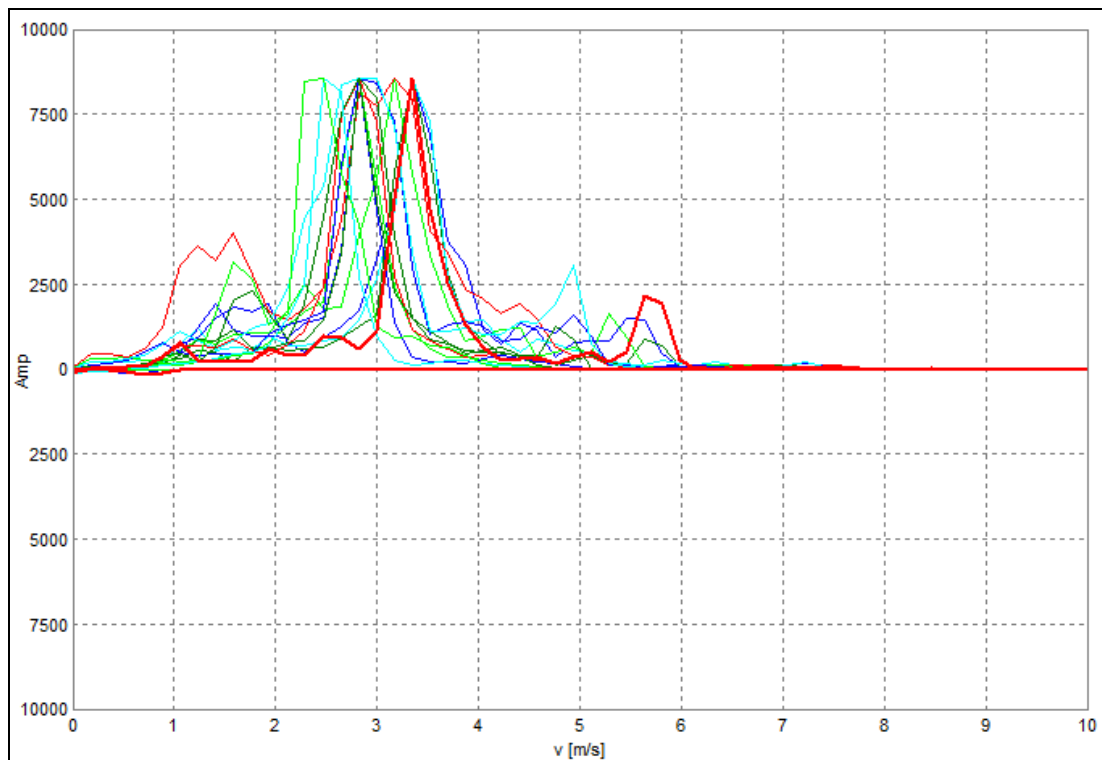


Abbildung 11. Mehrfache Spektren von laufendem Mensch

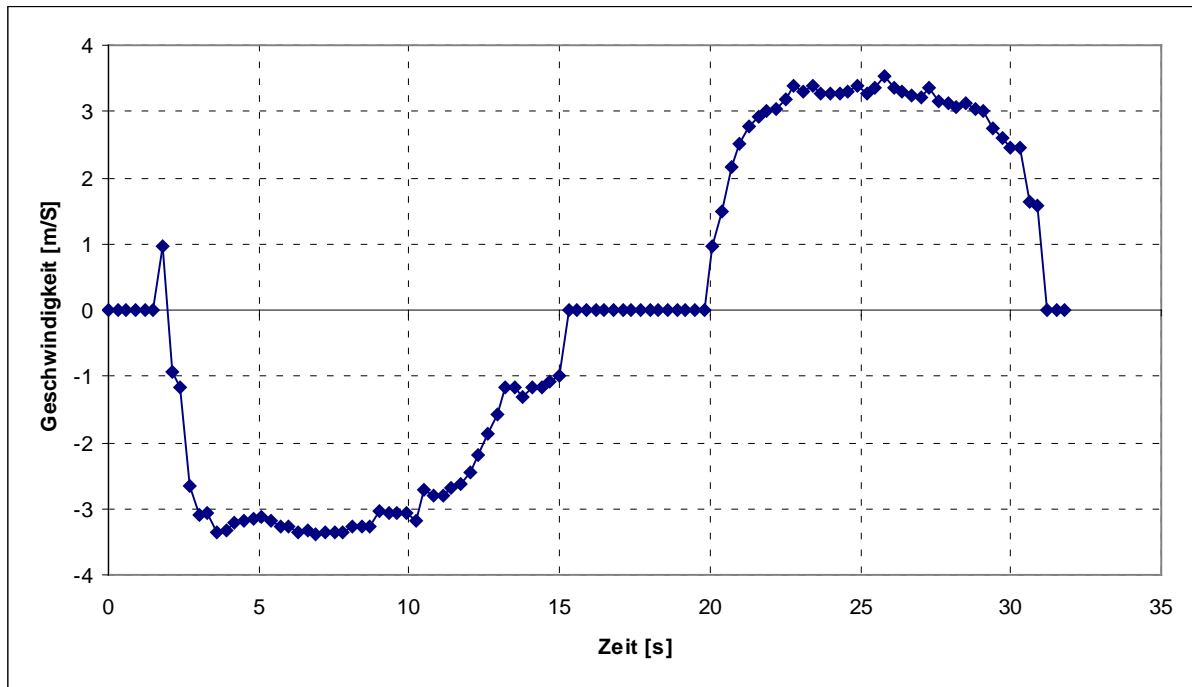


Abbildung 12. Geschwindigkeit von laufendem Mensch sich nähernd und entfernend

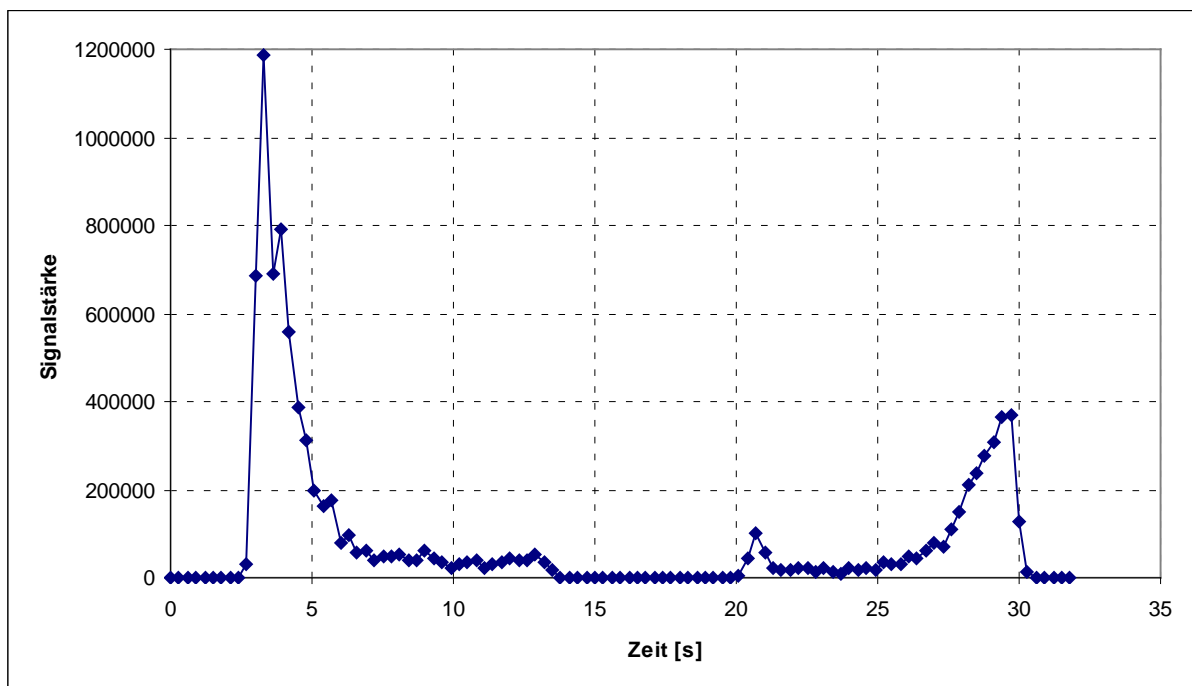


Abbildung 13. Signalstärke von laufendem Mensch sich nähernd und entfernend



**Zusammenfassung:** Das modifizierte Radargerät wird sehr stark von Störbewegungen beeinflusst. Die Einflüsse sind in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 4. Einfluss von Störbewegungen**

|               | <b>Signalstärke</b> | <b>Geschwindigkeit</b> |
|---------------|---------------------|------------------------|
| Bäume im Wind | Stark               | < 5 m/s                |
| Regen         | Stark               | bis 10 m/s             |
| Züge          | Extrem stark        | > 10 m/s               |
| Wild/Menschen | Stark               | 0 bis 10 m/s           |

Im Wind bewegte Blätter und Äste können sehr starke Signale erzeugen, die jedoch 5 m/s nicht übersteigen. Regen kann ebenfalls starke Signale mit Ausläufern bis zu 10 m/s erzeugen. Bei Blick in Richtung Bahnkörper können Züge sehr starke Signale auslösen, auch wenn die Entfernung relativ hoch ist. Auch Wildwechsel und Menschen erzeugen starke Ausschläge.

Sämtliche Störbewegungen können Signale erzeugen, die deutlich größer als die von fallenden einzelnen Steinen sind. Daher können mit dem modifizierten Radargerät nur einzelne Steine und Blöcke eindeutig detektiert werden, die Geschwindigkeiten über 10 m/s haben. Dies entspricht in etwa einer Fallhöhe von 5 m.

### **Messdauer**

Bei einer sinnvollen Messdauer von 0,25 s und eines Messbereichs von 30 m ergibt sich eine maximal ermittelbare Fallgeschwindigkeit von 60 m/s (216 km/h). Dies beinhaltet, dass mindestens zwei Messungen eines bewegten Objekts gemacht werden können und der Messbereich durch das Gelände voll ausgeschöpft werden kann.

### **Energieversorgung**

Der Stromverbrauch für ein Radargerät mit einem Messintervall von 0,25 s im Dauerbetrieb beträgt 100 mA, ein Funkgerät benötigt 15 mA. Damit kann mit einer 72 Ah Batterie ein einzelner Radarsensor mit Funkgerät 24 Tage betrieben werden. Ein 50 W Solarpanel reicht aus, um eine dauerhafte Energieversorgung zu gewährleisten. An den meisten Standorten im Schatten oder in Gräben muss jedoch ein 100 W Solarpanel verwendet werden.

## Vorschläge für Warnsysteme

Zur Erstellung von Vorschlägen für Warnsysteme wurden die zwei Szenarien Stein- und Blockschlag sowie Murgänge mit Hochwasser, Geschiebe- und Unholzablagerungen betrachtet. Die vorgeschlagenen Systeme unterschieden sich aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik der Prozesse.

### Stein- und Blockschlag

**Situation:** Stein- und Blockschläge haben die Eigenschaften, dass die Prozesse sehr schnell ablaufen und die auftretenden Massen relativ klein sein können. Dies stellt hohe Anforderungen an die Messgeschwindigkeit und die Empfindlichkeit der Messungen. Zudem muss meist ein großer Bereich überwacht werden, da das Auftreten von Stein- und Blockschlag räumlich nur schwer eingegrenzt werden kann.

**Lösungskonzept:** Die Detektion sollte möglichst im Transfergebiet erfolgen. Im Einwirkungsraum verkehren Züge, die nicht selbstständig erkannt werden können. Dies ist nur durch redundante Erschütterungssensoren möglich, die den durchfahrenden Zug erkennen und dem Radargerät melden. Dadurch werden keine Fehlalarmierungen ausgelöst, jedoch sind während des Durchgangs des Zuges keine Alarmbildungen möglich.

Die Nachweisgrenze beträgt 35 m für eine Wahrnehmungsschwelle von Steinen mit einem mittleren Durchmesser von 30 cm. Das Radargerät besitzt eine Wahrnehmungsbreite von bis zu 4,8 m ab der Mitte nach links und rechts. Bei breiten Einwirkungsräumen müssen daher mehrere Radargeräte in einem Abstand von maximal 8 m montiert werden, wodurch eine Überdeckung der Nachweisbereiche erzielt wird.

Eine Erhöhung der Reichweite durch die Verwendung von höher fokussierenden Antennen und Anpassungen des Radargerätes wurden im Rahmen der 1.Phase des Projekts nicht durchgeführt. Zudem wird befürchtet, dass die störenden Nebensignale durch diese Maßnahmen nicht nur nicht eliminiert sondern eher verstärkt werden.

Durch eine minimale Messdauer von 0,25 s können Steine bis zu einer maximalen Fallgeschwindigkeit von 60 m/s erkannt werden, unter der Voraussetzung, dass der Stein zweimal gemessen werden soll.

Prinzipiell sollten die Radargeräte in Fallrichtung mit dem Blick von oben nach unten montiert werden. Bei einem Blick nach oben können Belegungen des Radargeräts mit Wasser oder Schnee zu starken Dämpfungen führen.

Die Alarmmeldungen mit Warnstufen werden von den einzelnen Radargeräten zu einer Basisstation übertragen und dort miteinander gekoppelt. Die ermittelten Warnstufen werden über Schaltausgänge ausgegeben. Dadurch können sie einfach an bestehende Fernwirkanlagen übergeben werden.

Die Alarmdaten und zusätzlich auch die Messdaten der einzelnen Radargeräte können vor Ort gespeichert und per GPRS an einen Messserver übergeben werden. Dadurch sind nachträgliche Anpassungen der Schwellwerte möglich.

**Schwierigkeiten:** Die Detektion von Steinschlag wird sehr stark von Störgrößen beeinflusst. Wie oben gezeigt, können Signale aufgrund von im Wind bewegten Blättern und Ästen, Regen, Schnee und Wild die empfangene Signalstärke von einzelnen Steinen um ein Vielfaches übersteigen. Bei Blick in Richtung Bahnkörper können zudem Züge sehr starke Signale auslösen, auch wenn die Entfernung relativ hoch ist.

Daher ist das Radargerät zur Detektion von Stein- und Blockschlag nur verlässlich, wenn eine Beschränkung auf Steine und Blöcke mit einer Geschwindigkeit über 10 m/s erfolgt.

**Technische Machbarkeit:** Das aktuelle Radargerät kann mit den bestehenden Einschränkungen der Reichweite und Geschwindigkeit prinzipiell eingesetzt werden. Die notwendigen Modifikationen zur Erzielung einer Messdauer von 0,25 s müssen noch ausprogrammiert und ein verlässlicher Betrieb gewährleistet werden. Weiters muss das Radargerät für einen erweiterten Winkelbereich angepasst werden, da die Ausrichtung je nach Standort stark variieren kann.

Das Alarmmodul in der Basisstation, die zentrale Einheit zur Auswertung und Kombination der einzelnen Alarmierungen sowie der Weitergabe von Meldungen an Fernwirkanlagen, existiert noch nicht und muss von Grund auf entwickelt werden.

**Wirtschaftliche Machbarkeit:** Die Adaptionen des Radargeräts kann im vorgesehen Zeitraum von Phase 2 und mit den geplanten Ressourcen durchgeführt werden. Die zusätzliche Neuentwicklung des umfangreichen Alarmmoduls zur Kombination der Meldungen einer Vielzahl von Radargeräten wird im Projektzeitraum von 15 Monaten nur bedingt möglich sein.

**Überblick:**
**Tabelle 5. Überblick für Warnsystem für Stein und Blockschlag**

|   |   |
|---|---|
| Komponenten                               | Mehrere Radargeräte im Abstand von 8 m mit Funkgeräten<br>Zentrale Basisstation mit Alarmmodul<br>Zentraler Datensammler<br>Modem GPRS/GSM<br>Energieversorgung<br>Blitzschutz                                    |
| Parameter zur Prozessüberwachung          | Geschwindigkeit<br>Signalstärke   |
| Systemüberwachung                         | Batteriespannung  |
| Meldungsausgabe                           | Schaltausgänge  |
| Messdaten                                 | Speicherung in Datensammler<br>Übergabe an Messdatenserver per GPRS<br>Redundante Datenabfrage über GSM   |
| Fernwartung                               | Datensammler per GSM<br>Radargeräte per GSM möglich   |
| Installation                              | Im Transfergebiet   |
| Messbereich                               | 5 bis 35 m  |
| Radiale Messbreite                        | 8 m (4 m links und rechts des Radars)   |
| Messintervall                             | $\geq 0,25$ s   |
| Prozessgeschwindigkeit                    | $> 10$ m/s  |
| Energieverbrauch<br>(bei 12 V Versorgung) | 100 mA pro Radargerät<br>15 mA pro Funkgerät<br>150 mA für zentrale Einheiten   |
| Energieversorgung                         | Autark jeweils mit Batterie und Solarversorgung   |
| Vorteile                                  | Kurze Messintervalle<br>Kopplung von Sensoren<br>Kombination mit Erschütterungsmessung<br>Berührungslos<br>Wartungsarm<br>Energieautonom  |
| Nachteile                                 | Beeinflussung durch Störbewegungen aus der Umwelt oder nur für hohe Prozessgeschwindigkeiten<br>Geringe Messdistanz (35 m) und geringe radiale Breite (8 m)<br>Geringer Abstand zwischen gekoppelten Radargeräten |

|                          |   |
|--------------------------|---|
|                          | Während Zugdurchfahrten keine Alarmauslösung möglich  |
| Technische Erweiterungen | Volle Adaptierung des Radargerätes für 0,25 s Messintervall<br>Erweiterung des Winkelbereichs<br>Entwicklung des Alarmmoduls<br>Kombination mit Erschütterungsmessung |

## Murgang sowie Hochwasser-, Geschiebe- und Unholzablagerungen

**Situation:** Die Prozesse im Bereich der Murgänge sowie Hochwasser-, Geschiebe- und Unholzablagerungen unterscheiden sich in wesentlichen Punkten von Stein- und Blockschlägen. Ein entscheidender Faktor ist das Wasser. Sämtliche Prozesse laufen unter Anwesenheit von Wasser ab, wodurch das Reflexionsvermögen der Bewegungen deutlich erhöht wird. Zudem sind generell die auftretenden Massen größer. Durch diese Umstände wird sich die Signalstärke der bewegten Masse deutlich von den Störsignalen der Umgebung abheben.

Weiters sind die Transfergebiete räumlich eingegrenzt. Die zu erwartenden Prozesse laufen meist in Gräben oder vorhandenen Bachbetten ab. Diese Bereiche können zumeist gut mit einem oder zwei Radargeräten abgedeckt werden und die zu beobachtenden Entfernungen übersteigen kaum 25 m. Zudem sind die auftretenden Geschwindigkeiten wesentlich kleiner als bei Stein- oder Blockschlägen und dadurch sind wesentlich größere Mittelungsdauern möglich. Die Störanfälligkeit bezüglich Regen und Schneefall ist aufgrund der Ausrichtung des Radars gerinneaufwärts deutlich geringer.

**Lösungskonzept:** Die Detektion von Bewegungen erfolgt an geeigneten Stellen im Transfergebiet. Es werden ein Radargerät zum Erkennen von Bewegungen und eine Pegelmessung installiert. Es können auch jeweils mehrere Sensoren verwendet werden, wobei sämtliche Sensoren räumlich voneinander getrennt sein können. Die Messdaten werden über Kabel an einen Datensammler übertragen, der außerhalb des gefährdeten Bereichs montiert wird.

Je nach Prozess kann ein Parameter besser für eine Alarmierung geeignet sein. Bei Murgängen ist die Geschwindigkeit sicher sehr aussagekräftig. Bei langsamen Prozessen oder bei Hochwasser ist wahrscheinlich der Pegel verlässlicher.

Die Überschreitungen der Schwellwerte für die Geschwindigkeits- oder Pegelmessung können daher entweder getrennt voneinander interpretiert werden und zum Beispiel eine

Warnung oder einen Voralarm auslösen. Zusätzlich können die Werte auch kombiniert werden, sodass ein Hauptalarm nur bei Geschwindigkeits- und Pegelüberschreitung ausgelöst wird.

Weiters sollte überwacht werden, ob der Radarsensor selbst bewegt wurde. Prozesse können den Sensor verschieben oder aus der Verankerung reißen. Mit der Messung des vertikalen Winkels des Radarsensors kann gut erkannt werden, ob die Aufhängung des Sensors verändert wurde. Außerdem besteht die Möglichkeit ein vollständiges Wegreißen der Sensoren zu erkennen, indem die Leitung zwischen Sensoren und Datensammler überwacht wird. Wird die dazu verwendete Leitung unterbrochen, wird der Ausfall erkannt und eine Alarmierung generiert.

Die Kombination und Überprüfung der Messwerte sowie die Erzeugung der Alarmmeldungen in mehreren Stufen wird vom Datensammler durchgeführt. Die Meldungen werden über eine serielle Schnittstelle ausgegeben und per Leitung oder per Funk an eine Basisstation in der Nähe einer Fernwirkanlage übertragen. Dort werden die Alarmmeldungen entgegengenommen, der Empfang bestätigt, eventuell mit einer redundanten Erschütterungsmessung kombiniert und die kombinierten Alarmmeldungen per digitalem Ausgang an die Fernwirkanlage weitergegeben.

Die Messdaten selbst werden im Datensammler gespeichert und per GPRS an einen Messserver übergeben. Eine redundante Datenabfrage und die Fernparametrierung der Anlage sind über GSM möglich.

Die komplette Anlage ist energieautark ausgelegt. Das Gesamtsystem kann zudem als mobile Einheit gestaltet werden. Die Messeinheit mit Datensammler, Datenübertragung und Batterie wird dazu in einer Kiste eingebaut, die Sensoren und ein optionales Solarpanel werden an diese angeschlossen. Im Notfall kann die gesamte Einheit schnell zu einem Einsatzort gebracht und dort in Betrieb genommen werden.

**Schwierigkeiten:** Die Geschwindigkeitsmessung ist ein guter Messwert für Alarmierungen, solange eine ständige Fließgeschwindigkeit vorhanden ist. Die Signalstärke der Radarmessung kann ein Parameter sein, der aussagt, ob der Geschwindigkeitsmessung noch zu trauen ist. So können etwa Alarmierungen aufgrund hoher Geschwindigkeiten erst ab bestimmten Signalstärken ermöglicht werden.

Die Signalstärke könnte auch für Alarmierungen herangezogen werden, sie kann jedoch je nach Bachverlauf stark variieren. Ist zudem das Gerinne im Normalfall trocken, ist es schwierig, Erfahrungswerte zur Festlegung der Schwellwerte zu sammeln.

Der Pegel ist ebenfalls ein guter Alarmierungsparameter. Jedoch treten Probleme auf, wenn sich das Bachbett ändert. Der Messfleck der Abstandsmessung ist relativ groß. Daher können Störgegenstände wie Blöcke oder höherliegende Trockenbereiche driftende oder prellende Pegelmessungen verursachen. Daher sollte eher ein entsprechend hoher Schwellwert gewählt werden. Eine weitere Möglichkeit ist ein dynamisches Mitführen des Schwellwerts, wodurch die Pegelmessung an Abtragungen und Anlandungen im Querprofil angepasst wird.

**Beispiel:** Ein Beispiel für die Messung von Geschwindigkeit, Signalstärke und Pegel ist die Installation im Pöllingergraben in der Steiermark.

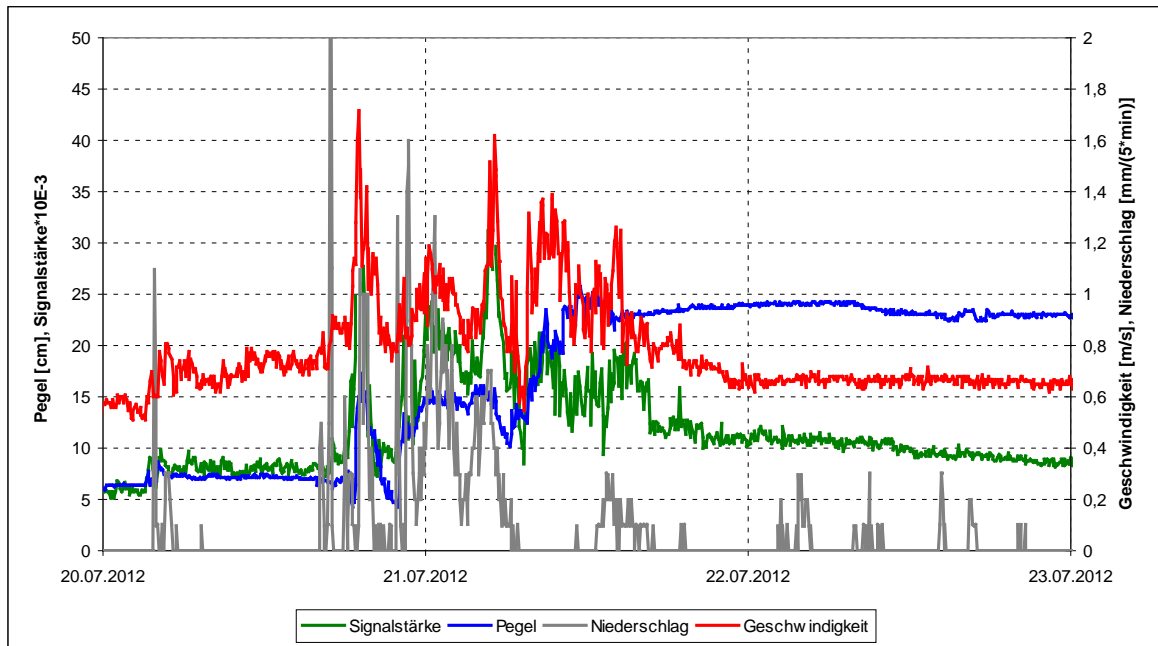


**Foto 7. Pöllingergraben**



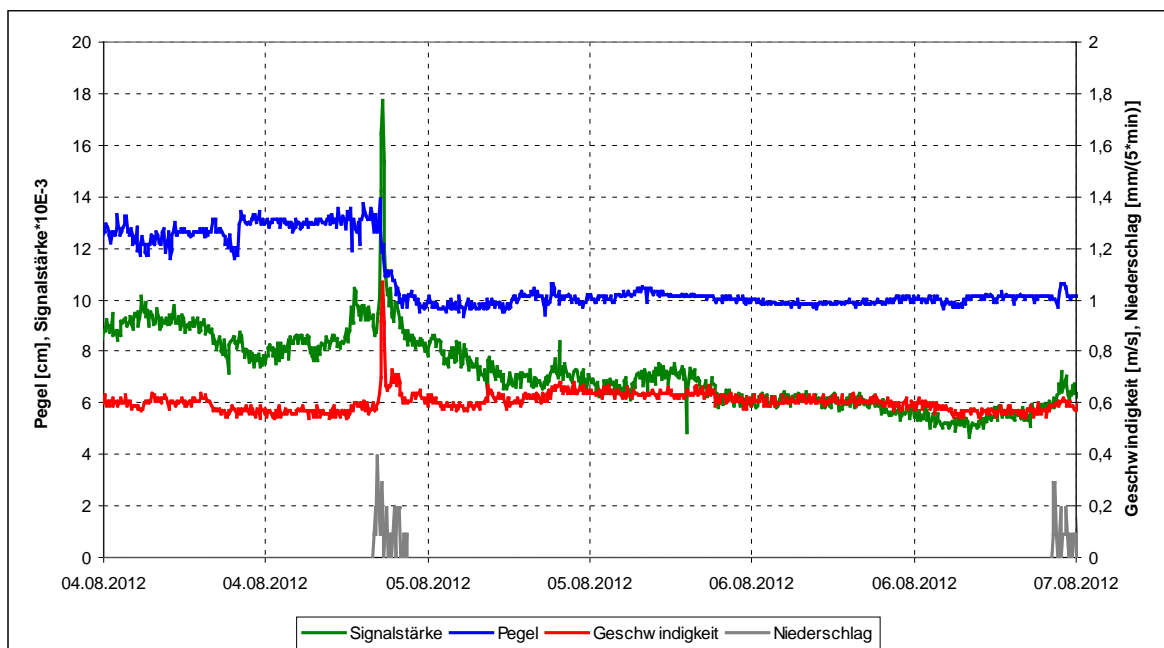
**Foto 8. Geschwindigkeits- und Pegelsensor**

In der Abbildung 14 sind die Parameter für ein Ereignis dargestellt. Die Niederschlagsdaten stammen von einer Station in Radmer. Mehrfache starke Niederschläge führen zu Prozessen mit stark erhöhten Geschwindigkeiten und Signalstärken. Die Pegelmessung zeigt die Anstiege des Wasserstandes, andererseits gibt es Bereiche in denen der Pegel abnimmt. Die Ursache dafür sind Veränderungen des Bachbetts. Nach dem Ereignis wird der Pegel mit einem ca. 18 cm höheren Niveau gemessen.



**Abbildung 14. Pöllingergraben Ereignis vom 20.07.2012 bis 21.07.2012**

Ein kleineres Ereignis ist in der Abbildung 15 dargestellt. Auf Grund des Niederschlags am 4. August ist deutlich ein starker Anstieg der Geschwindigkeit und der Signalstärke zu erkennen. Der Pegel jedoch nimmt ab diesem Zeitpunkt um 3 bis 4 cm ab. Die Ursache dafür sind Veränderungen des Bachbetts, die im Gegensatz zum vorherigen Ereignis zu einem niedrigeren Pegelniveau führen.



**Abbildung 15. Pöllingergraben Ereignis vom 05.08.2012**



**Technische Machbarkeit:** Die Geschwindigkeit und Signalstärke kann bereits mit dem bestehenden Gerät RG-30 gemessen werden. Es muss jedoch mit einem erweiterten Winkelbereich betrieben werden können, um den Abstrahlkegel besser auf die erwarteten Bewegungen richten zu können. Für die Pegelmessung werden bestehende Radar- oder Ultraschall-Abstandsensoren verwendet.

Eine Messung der Neigung zur Lotrechten ist bereits im Radargerät implementiert. Sie wird jedoch nur beim Start des Gerätes durchgeführt und nicht gespeichert. Daher muss erst noch eine kontinuierliche Messung in den Messablauf und in die Datenübergabe integriert werden. Die Ausfallsüberwachung des Sensors über die Leitung muss im Detail ausgearbeitet werden.

Die Schwellwerte und eine einfache Kopplung der Messwerte sind bereits in eingeschränktem Umfang im Datensammler möglich. Jedoch existiert zurzeit nur eine Schnittstelle zur Alarmausgabe. Daher muss ein Konzept zur Festlegung und Kopplung von Schwellwerten sowie eine mehrfache Ausgabe von analogen Alarmmeldungen noch entwickelt werden.

Die Speicherung der Messdaten im Datensammler und die Übertragung auf einen Messserver sind ebenso wie die Fernparametrierung der Geräte mit bestehenden Komponenten der Firma Sommer realisierbar.

Das Alarmmodul in der Basisstation zur Entgegennahme der Alarmmeldungen, der Kombination mit der Erschütterungsmessung und der Weitergabe an Fernwirkanlagen muss erst noch entwickelt werden.

In Bezug auf die Energieversorgung ist davon auszugehen, dass die Messungen dauerhaft laufen sollten. Dennoch kann eine komplette Anlage, abhängig von der endgültigen Konfiguration, mit einem 100 W Solarpanel (120 x 60 cm) versorgt werden. Bei der Verwendung von kleineren Panels oder in Schattenlagen muss das Messintervall vergrößert werden oder die Messungen gepulst betrieben werden.

Ein mobiles Messsystem kann noch konzipiert werden.

Generell sind alle technischen Entwicklungen realisierbar, der Schwierigkeitsgrad der einzelnen Punkte ist gering bis mäßig anspruchsvoll und dadurch das Entwicklungsrisiko relativ gering.

**Wirtschaftliche Machbarkeit:** Da bestehende Geräte und Komponenten der Firma Sommer erweitert werden, ist eine wirtschaftliche Umsetzung eines stationären und

mobilen Messsystems in dem angestrebten Zeitraum mit den vorgesehenen Ressourcen eindeutig möglich.

**Überblick:**

**Tabelle 6. Überblick für Warnsystem Murgang sowie Hochwasser-, Geschiebe- und Unholzablagerungen**

|                    |  |
|--------------------|--|
| Komponenten        | Geschwindigkeitsradar<br>Pegelsensor<br>Datensammler<br>Modem GPRS/GSM<br>Datenfunk<br>Energieversorgung<br>Blitzschutz<br>Basisstation mit Alarmmodul |
| Parameter          | Geschwindigkeit<br>Signalstärke<br>Pegel<br>Winkelmessung<br>Leitungsunterbrechung   |
| Prozessüberwachung | Mehrere Schwellwerte<br>Kombination aus Geschwindigkeit und Pegel<br>Eventuell auch Signalstärke   |
| Systemüberwachung  | Neigungssensor<br>Leitungsüberwachung<br>Batteriespannung  |
| Meldungsausgabe    | Digitale Schaltausgänge von Basisstation<br>Zusätzlich auch SMS für Systemüberwachung möglich  |
| Messdaten          | Speicherung in Datensammler<br>Übergabe an Messdatenserver per GPRS<br>Redundante Datenabfrage über GSM  |
| Fernwartung        | Per GSM  |
| Installation       | In kleinräumigen Gräben im Transfergebiet,<br>Bevorzugt bei unveränderlichen Querschnitten   |
| Messbereich        | Geschwindigkeitsradar 0,5 bis 30 m<br>Pegelsensor 0,5 bis 15 m   |
| Messintervall      | 10 s   |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Energieverbrauch         | 200 mA   |
| Energieversorgung        | Autark mit Batterie und Solarversorgung<br>Alternativ Netzversorgung   |
| Vorteile                 | Redundant durch Geschwindigkeitsradar und Pegelmessung<br>Kombination mit Erschütterungsmessung möglich<br>Niedrige und hohe Prozessgeschwindigkeiten<br>Ausfalls- und Zerstörungsüberwachung<br>Berührungslos<br>Wartungsarm<br>Energieautonom<br>Mobile Ausführung   |
| Nachteile                | Pegelmessung empfindlich auf Änderungen des Querschnitts<br>Nur kleinräumig verwendbar   |
| Technische Erweiterungen | Erweiterter Winkelbereich für Radargeräte<br>Volle Implementierung der Neigungsmessung<br>Leitungsunterbrechung<br>Mehrere analoge Ausgänge am Datensammler<br>Verbesserte Kopplung von Messwerten<br>Alarmmodul für Basisstation zum Empfang und Kombination von<br>Alarmmeldung von Radarsystem und<br>Erschütterungsmessung sowie Übergabe an Fernwirkanlagen |

## DETAILUNTERSUCHUNG: ERSCHÜTTERUNGSSENSOREN

Im Vorfeld zu den praktischen Versuchen mit verschiedenen Erschütterungssensoren wurde eine Literaturstudie über Mess- und Monitoringsysteme durchgeführt, die nach einem ähnlichen Messprinzip wie das in DESME angestrebte System funktionieren. Es fand sich eine Vielzahl an Berichten und Veröffentlichungen, die den Einsatz von Erschütterungssensoren und/oder Radarsonden im Bereich gravitativer Massenbewegungen dokumentierten, jedoch kein derzeit am Markt erhältliches System das fertig einsetzbar zur Streckenüberwachung dienen könnte.

Bei den beschriebenen Systemen handelt es sich großteils um geologische oder hydrologische Untersuchungen, bei denen die Frühwarnung teilweise nur ein „Nebenprodukt“ zur eigentlichen Studie darstellt. Bei den Fallbeispielen, die eine Frühwarnung als Hauptziel der Studie sehen, ist der Einsatzbereich sehr allgemein und nicht auf Schieneninfrastruktur bezogen. Es werden jedoch anschließend die Vor- und Nachteile dieser Frühwarnsysteme für den Einsatz entlang von Eisenbahnstrecken hervorgehoben.

Anhand folgender Beispiele wird der Einsatz von Erschütterungssensoren zur Frühwarnung bei Massenbewegungen erläutert:

### Fallbeispiel 1: Moscardo Wildbach/Italien

Referenz: Arattano (1999), Marchi et al. (2002)

Diese Studie untersuchte den Einsatz von seismischen Sensoren für Monitoring- und Frühwarnzwecke im Moscardo Wildbach (murgang-gefährdetes Gebiet in den Italienischen Alpen). Es kamen 4 Seismometer mit einer Eigenfrequenz von 1 Hz zum Einsatz, die in jeweils 100 m Abstand entlang der Seite eines Gerinnes (nahe am Schüttkegel) platziert wurden. Dieser Sensorabstand ermöglichte eine genaue Ermittlung der Fließgeschwindigkeit des Murkopfes, sowie eine möglichst lange Vorwarnzeit, da die Bodenwellen sich um eine Größenordnung schneller ausbreiten ( $> 100$  m/s) als die direkte Fließgeschwindigkeit des Murgangs (1 – 10 m/s). Zusätzlich gestaltete sich hier die Installation wesentlich einfacher als weiter oben im steilen Gelände. Die Sensoren selbst wurden in 30 cm tiefen, aufgefüllten Löchern montiert, die sich in etwa 20 m Entfernung von der Gerinnesohle befanden (es lagen vorher keine Erfahrungswerte vor, bis zu welchem seitlichen Abstand die Massenbewegungen detektierbar sein würden).

Tests wurden auch mit 4.5 Hz Geophonen durchgeführt, lieferten aber schwächere Signale.

Beispiele für die durch einen Murgang verursachten Erschütterungen im Moscardo Wildbach sind in Abbildung 16 zu sehen. Das Signal hebt sich bereits in den Rohdaten deutlich vom Grundrauschen ab, wurde aber durch gezielte Processingschritte noch weiter hervorgehoben: In Abbildung 17 sind die zugehörigen bearbeiteten Daten zu sehen, in denen das arithmetische Mittel aus 100 Werten/sec gebildet wurde, um die Peaks des Ereignisses besser ersichtlich zu machen. Zu beachten ist in diesen Darstellungen vor allem die Zeitachse: Die Tatsache, dass sich das Signal über mehrere Minuten zieht, könnte bei der Auswertung als Kriterium verwendet werden um einen Murgang von anderen Störeinflüssen wie z.B. Vorbeifahrten von Zügen/anderen Verkehrsmitteln zu unterscheiden.

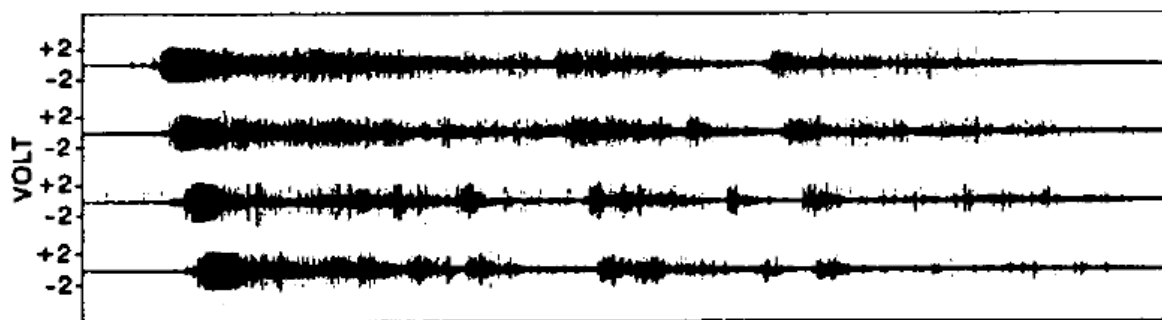


Abbildung 16. Rohdaten der Erschütterungssignale während eines Murgangs im Moscardo Wildbach, aus Arratano (1999).

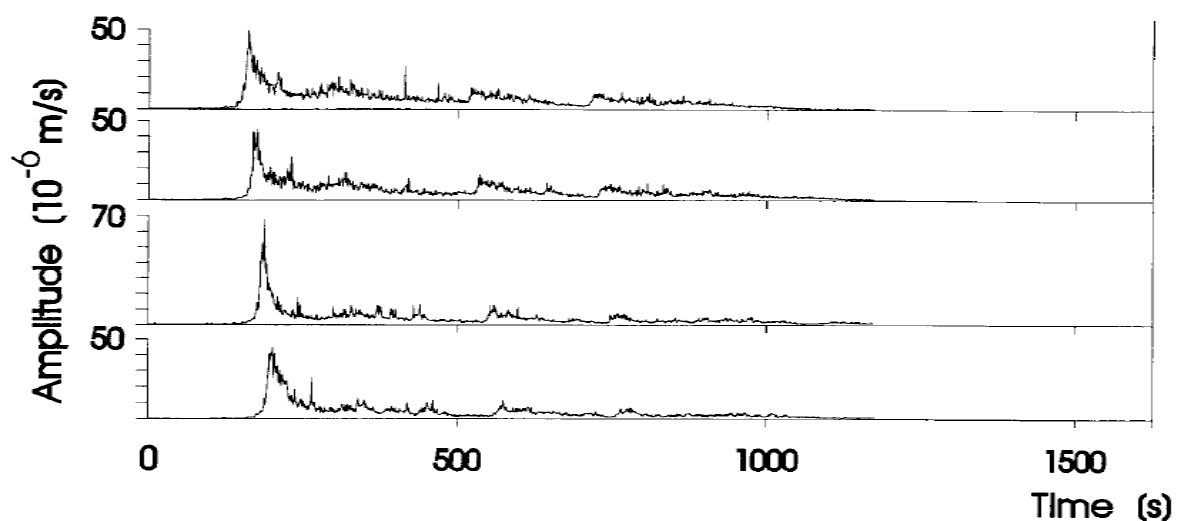


Abbildung 17. Bearbeitete Daten aus Abbildung 16 (hochlaufender Mittelwert) zur Verdeutlichung bestimmter Signale.

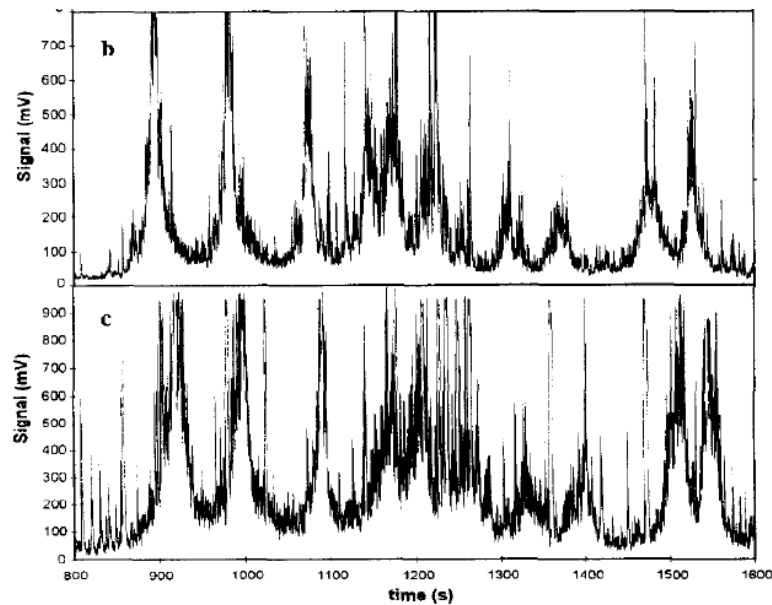
Zusammenfassend sind aus diesem Beispiel folgende Eckdaten des Warnsystems und Erfahrungswerte für DESME relevant:

|  |
|--|
| Sensortyp: Seismisch                                     |
| Eigenfrequenz der Sensoren: 1 Hz                         |
| Sensoranzahl: 4  |
| Sensorposition: Parallel zum Gerinne, im unteren Verlauf |
| Sensorabstand: 100 m                                     |
| Laterale Entfernung vom Gerinne: 20 m                    |
| Sensortiefe im Boden: 30 cm                              |

## Fallbeispiel 2: Acquabona Bach/Italien

Referenz: Berti et al. (2000)

Bei diesem Murgang-Überwachungssystem im Acquabona Einzugsgebiet (Ostdolomiten) handelt es sich um 3 separate Stationen: eine im Entstehungsgebiet, sowie zwei weitere 600 m und 1200 m talabwärts. Neben der Niederschlagsmessung, Porendruckmessung und Abflusstiefe wurden auch Sensoren zur Detektion von Bodenerschütterungen aufgrund von Massenbewegungen installiert. Die Stationen kommunizieren im „Pre-Event Modus“ über Funkwellen mit einer Basisstation die in 1.3 km Entfernung in regelmäßigen Abständen die Daten empfängt. Dort wird einmal pro Sekunde ein doppelter Schwellenwert überprüft: zum einen die Niederschlagsintensität und zum anderen die Geophonsignale. Bei Überschreitung der vordefinierten Werte wechselt die Akquisition auf „Event Modus“ und speichert Daten lokal an den Messstationen mit einer Frequenz von 5 Hz. Anmerkung: Hierbei handelt es sich um eine heute unüblich geringe Abtastfrequenz, die zum damaligen Zeitpunkt aufgrund mangelnder Datenspeicherkapazitäten gewählt wurde. Typische Werte moderner Systeme würden um einen Faktor 100 darüber liegen. Die Fernwartung des Systems funktioniert via Modemverbindung an die Basisstation, wo die Schwellenwerte sowie Datenübertragungsintervalle festgelegt werden können. Bei der Auswertung konnte die Fließgeschwindigkeit des Murkopfes in den verschiedenen Abschnitten des Gerinnes aus den Zeitdifferenzen zwischen den Erschütterungsmaxima berechnet werden. Ein typischer Signalverlauf ist in Abbildung 18 dargestellt.



**Abbildung 18. Erschütterungszeitverlauf an 2 Geophonen während einer Mure im Acquabona Bach, siehe Berti et al. (2000)**

Probleme ergaben sich laut Berti et al. bei der Auswertung während Stürmen/Schlechtwetter. Das dadurch verursachte Rauschen spielte sich in der gleichen Größenordnung wie kleine Murgänge ab.

Zusammenfassend sind aus diesem Beispiel folgende Eckdaten des Warnsystems und Erfahrungswerte für DESME relevant:

Sensortyp: Geophon

Frequenzbereich der Sensoren: 10 – 300 Hz

Sensoranzahl: 7 (in 3 Gruppen)

Sensorposition: Parallel zum Gerinne

Sensorabstand: 600 m

Laterale Entfernung vom Gerinne: 8 – 10 m

Probleme: Schlechtwetterereignisse nicht von kleinen Murgängen im Transfergebiet unterscheidbar

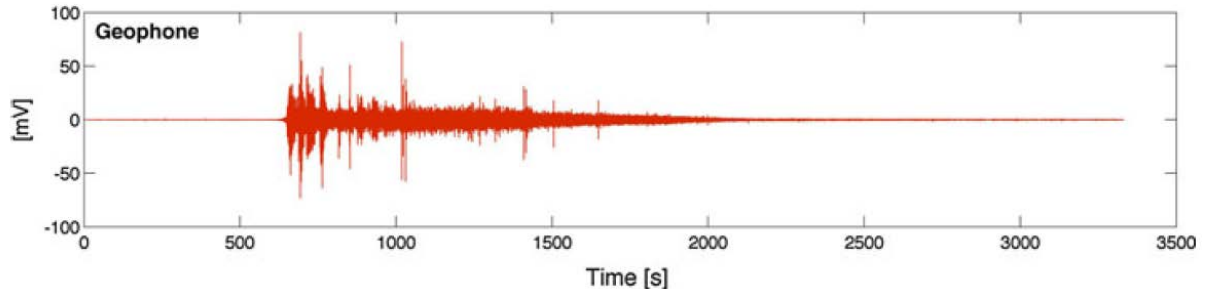
### Fallbeispiel 3: Lattenbach/Österreich

Referenz: Kogelnig et al.(2011)

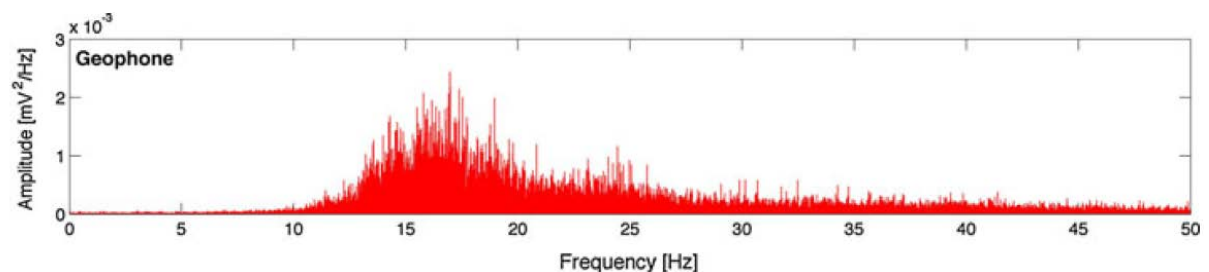
Massenbewegungen im Lattenbach wurden in dieser Studie mittels einer Kombination aus Erschütterungssensoren und Infraschallsensoren untersucht. Dabei wurden zwei

Messstationen im Einzugsgebiet positioniert, so dass die Energieversorgung durch genügend Sonneneinstrahlung an Solarzellen abgedeckt werden konnte und gleichzeitig ein leichter Zugang zur Station möglich war. Bei den zum Einsatz kommenden Sensoren handelte es sich um SM4 Geophone mit einer Empfindlichkeit von 28.8 V/m/s und einem Frequenzbereich von 10 – 180 Hz, die mit einer Abtastrate von 100 Hz gesampelt wurden.

Probleme bei der Auswertung von Ereignissen entstanden durch erhöhtes Grundrauschen aufgrund menschlicher Aktivität oder störender Wettereinflüsse die das Nutzsignal maskierten. Die Auswertung an sich erstellte laufend ein Frequenzspektrum der Eingangsdaten mit 50 % Überlappung der Fenster. Die Amplitude der Erschütterungen während eines Ereignisses war um Faktor 100 größer als die Amplitude des Grundrauschens, siehe Abbildung 19; die Massenbewegungen waren also deutlich erkennbar und spielten sich Großteils in einem Frequenzbereich zwischen 10 – 25 Hz ab (siehe Abbildung 20). Hier ist jedoch zu beachten, dass die Geophone Signale erst ab 10 Hz auflösen können, die Massenbewegung also durchaus noch tiefere Frequenzen enthalten könnte.



**Abbildung 19. Zeitverlauf an einem Geophon im Lattenbach während eines Murganges (Kogelnig et al. 2011).**



**Abbildung 20. Power Spectrum eines Ereignisses im Lattenbach (Kogelnig et al. 2011).**



Aus den Erschütterungssignalen ergaben sich beim Monitoringsystem im Lattenbach Vorwarnzeiten von ca. 50 sec, bevor der Murgang die Messstation passierte. Möglicherweise hätten sich hier noch etwas längere Frühwarnzeiten ergeben, wenn der messbare Frequenzbereich der Sensoren < 10 Hz gelegen wäre und dadurch die im Boden weniger attenuierten Komponenten aufgelöst worden wären.

Zusammenfassend sind aus diesem Beispiel folgende Eckdaten des Warnsystems und Erfahrungswerte für DESME relevant:

Sensortyp: SM4 Geophon  
 Empfindlichkeit der Sensoren: 28.8 V/m/s  
 Frequenzbereich der Sensoren: 10 – 180 Hz  
 Abtastrate: 100 Hz  
 Sensorposition: Im unteren Teil des Gerinnes  
 Ereignisamplitude: ca. 70 mV (entspricht ca. 2.4 mm/s)  
 Signalfrequenz bei Ereignis: 10 – 25 Hz  
 Stromversorgung: Solar  
 Probleme: Nutzsignal maskiert durch menschliche Aktivität, störende Wettereinflüsse

#### **Fallbeispiel 4: Illgraben/ Schweiz**

Referenz: Hürlimann et al. (2003), Graf et al. (2009), Badoux et al. (2009), Berger et al. (2011)

Bei diesem Fallbeispiel handelt es sich um ein Frühwarnsystem für Murgang- und Hochwasserereignisse im Illgraben (Wildbachgerinne in den Schweizer Alpen). Die Sensoren des Detektionssystems sind zum Zweck einer möglichst langen Vorwarnzeit und der Notwendigkeit eines kontinuierlichen GSM Empfangs so weit wie möglich gerinneaufwärts positioniert. An der obersten Betonsperre entlang des Gerinnes gibt es allerdings Probleme mit zu kurzer Sonneneinstrahlungsdauer um die Batterie aufzuladen, sowie schlechten GSM-Empfang und Gefährdung durch Steinschlag.

Die Datenübertragung und Fernwartung erfolgen bei diesem System via GSM-Netz. Die Digitalisierung und Auswertung der Geophondaten erfolgt direkt am Sensor um das Datenvolumen zu reduzieren. Redundanz wird durch den Einsatz verschiedener Sensoren garantiert und betreffend Funktionskontrolle gibt es tägliche Statusmeldungen per Email. Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich unter anderem um

Erschütterungssensoren und Abflusshöhenmessgeräte, die beide an Betonsperren befestigt wurden. Laut den Dokumentationen über dieses Warnsystem genügen die verwendeten Sensortypen, um das Auftreten von Murgängen oder geschiebeführenden Hochwässern verlässlich zu erfassen. Die Geophone vom Typ Geospace Technologies GS-20DX wurden dabei zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit sowie als Trigger der restlichen Aufnehmer verwendet.

Die Radarsensoren wurden immer paarweise kurz vor einer Betonsperre montiert. Dadurch konnten Probleme aufgrund weit über die Geschiebesohle herausragender Steine/Felsen vermieden werden, die im Falle einer Ablagerung/Verkläusung eine untypisch hohe Abflusshöhe anzeigen würden.

Da die Geophone direkt an der Betonsperre montiert sind, wird durch das Aufschlagen des transportierten Geschiebes eine Serie deutlicher Impulse verursacht. Übersteigt die Anzahl an Impulsen pro Sekunde einen vordefinierten Grenzwert für länger als 5 sec, wird eine Alarmierung ausgelöst. Laut Berger et al. (2011) wurde ein Kriterium von 40 Impulsen in 5 sec als Trigger gewählt.

Durch die Sensorstaffelung an verschiedenen Betonsperren erfolgte die Detektion unabhängig von einander an verschiedenen Positionen im Gerinne. Die Alarmierung selbst erfolgte in zwei Stufen: Zum einen jene Alarme, die eine Gefahr für Personen im Gerinnebereich signalisieren und jene, bei denen zwar wegen erhöhten Abflussmengen alarmiert wird, aber das Ereignis weitgehend ungefährlich verläuft. Die Grenze zwischen den Stufen wurde durch die Abflusshöhe ( $< 0.3$  m) definiert. Während einer Alarmierungsphase werden aggregierte Daten (Anzahl der Impulse, keine Rohdaten) mit einer Frequenz von 1 Hz ausgelesen. Wenn das Signal unter die Detektionsschwelle zurückfällt, wird der aktive Modus (1 Hz Sampling) für weitere 10 min fortgeführt, bevor das System wieder in den Ruhemodus fällt.

Die Vorwarnzeit hängt von der Fließgeschwindigkeit der Massenbewegung ab und erreichte im besten Fall bis zu 15 min. Wenn eine Alarmierung ausgelöst wurde, wird der Sensorstatus alle 5 min überprüft; eine an der obersten Betonsperre ausgelöste Alarmierung hat normalerweise eine Dauer von 20 min, wird jedoch nach 10 min wieder zurückgesetzt wenn das Ereignis an den gerinneabwärts befindlichen Sperren nicht bestätigt wurde.

Anmerkung: Bei einem ähnlichen System im Schipfenbach wurden 2 Geophone am anstehenden Felsboden neben dem Gerinne befestigt und 2 weitere auf großen Blöcken

in der Nähe des Uferdamms. Die im unkonsolidierten Gestein montierten Sensoren lieferten im Vergleich zu den Geophonen am Fels nur sehr schwache Signale und waren dadurch nicht ideal für die verlässliche Detektion geeignet.

Zusammenfassend sind aus diesem Beispiel folgende Eckdaten des Warnsystems und Erfahrungswerte für DESME relevant:

|   |
|---|
| Sensortyp: Geophon GS-20DX; Radarsonden   |
| Abtastrate: aggregierte Daten bei Ereignis mit 1 Hz ausgelesen  |
| Sensorposition: Im oberen Teil des Gerinnes an den Betonsperren   |
| Ereignisamplitude: > 200 mV   |
| Alarmierungskriterium: > 8 Impulse/sec für 5 sec (pro Impuls > 200mV)                                   |
| Stromversorgung: Solar  |
| Datenübertragung/Fernwartung: GSM Netz/Tägliche Statusmeldung   |
| Probleme: Teilweise zu kurze Sonneneinstrahlungsdauer, schlechter GSM Empfang und Steinschlaggefährdung |

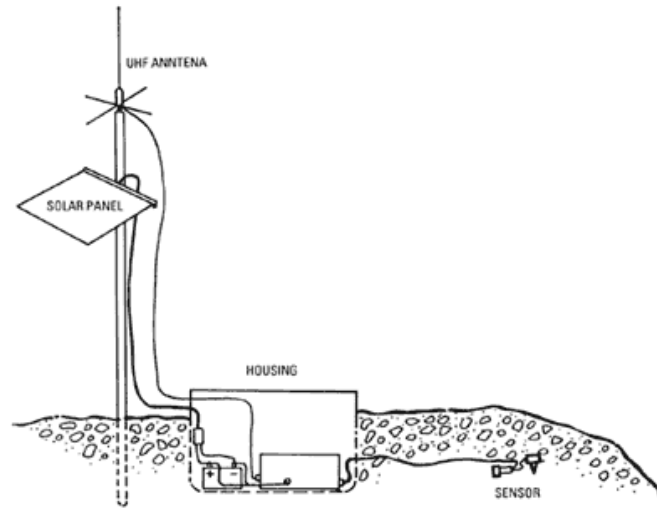
### Fallbeispiel 5: Lahar-Monitoring

Referenz: Marcial et al. (1996), Lahusen (1996), Lavigne et al. (2000)

Während Lahare (von einem Vulkan ausgehender Schlammstrom) zwar keine für Österreich relevanten Naturgefahren darstellen, wurden im Zuge der State-of-the-art Ermittlung die diesbezüglich verwendeten Warn- und Monitoringsysteme auf ihre eventuelle Einsetzbarkeit im geplanten DESME Warnsystem untersucht. Die Studie von Lavigne et al. verwendet ein umfassendes Messsystem am Mt. Merapi, Indonesien, das unter anderem auch Erschütterungssensoren als Trigger einsetzt. Beispielsweise wird eine Videokamera ausgelöst, wenn die Bodenschwingungen  $10 \text{ cm/s}^2$  überschreiten. Zusätzlich dient ein Stolperdraht in 1 m und 2 m Höhe als Auslöser im Falle einer Massenbewegung im Gerinne. Weiters umfasst die Monitoringstation ein Acoustic Flow Monitoring (AFM). Dieses besteht aus einem Mark L10-AR Geophon mit Verstärker und Digitalwandler, von dem die Daten an eine Basisstation gefunkt werden.

Beim Lahar Monitoring am Mount Pinatubo, Philippinen, wurde laut den Studien von Marcial et al. und Lahusen ein konventionelles 1 Hz Seismometer für die Detektion vulkanischer und tektonischer Seismizität eingesetzt, sowie ein 10 – 300 Hz Explorationsgeophon in Kombination mit Stolperdrähten. Alle im Feld montierten

Stationen wurden über eine 12 V Batterie versorgt, die durch Solarpanele gespeist wurden (siehe Abbildung 21). Wie oben erwähnt, wurde auch hier ein L10AR Geophon zwecks Erschütterungsüberwachung verwendet, das 1 m tief im Boden platziert wurde um Störeinflüsse durch Wind und Regen zu vermeiden.



**Abbildung 21. Beispiel einer Acoustic Flow Monitoringstation nach Marcial et al. (1996).**

Da das niederfrequente Seismometer nur einen Frequenzbereich von 1 – 10 Hz auflösen konnte, wurden Erschütterungen aus der gesamten Umgebung aufgezeichnet. Die genaue Lokalisierung und Zuordnung der Erschütterungsquelle wurde somit erschwert, da viele Signale andere Ursachen als Lahare hatten (z.B. Tremors).

Die Alarmierung fand bei Überschreiten eines Schwellenwerts für eine Zeitdauer > 30s statt. Wie in Lahusen erwähnt, liegt der Hauptanteil der Bodenschwingungen aufgrund eines Murgangs oder Flutwellen zwischen 50 – 250 Hz, was den Einsatz von niederfrequenten Seismometern ausschließt.

Zusammenfassend sind aus diesem Beispiel folgende Eckdaten des Warnsystems und Erfahrungswerte für DESME relevant:

Sensortyp: Geophon L10AR

Sensorposition: 1 m Tiefe in der Nähe des Gerinnes

Signalfrequenz bei Ereignis: 50 – 250 Hz

Alarmierungskriterium: Signal > Schwellenwert für mehr als 30 sec

Stromversorgung: 12 V Batterie

## Fallbeispiel 6: Studie über Erschütterungssignale durch Steinschlag und Massenbewegungen

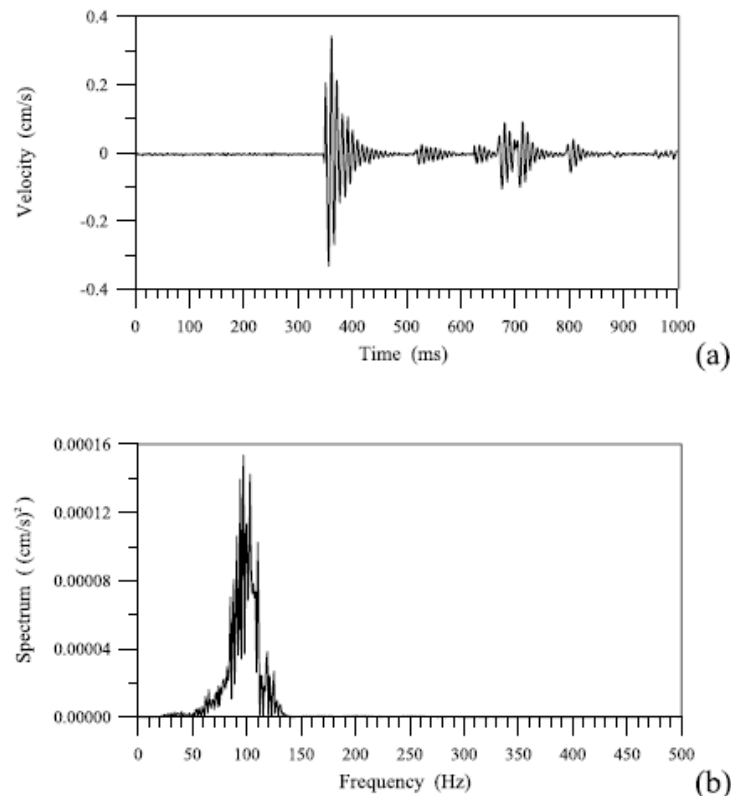
Referenz: Huang et al. (2007), Huang et al. (2008)

In den beiden Studien von Huang et al. wurde das allgemeine Erschütterungsprofil von Murgängen anhand einer Testserie in einem trockenen Bachbett in Taiwan untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass Erschütterungen aufgrund einzelner Blöcke zwischen 10 – 150 Hz liegen (siehe Abbildung 22 (b)), wobei größere Blöcke Spitzen in tieferen Frequenzbereichen verursachen. Dies ist am Verlauf eines Murganges zu erkennen, wo die Frequenzspitzen des Murkopfes bei 10 – 30 Hz liegen, während das Murschwanz zwischen 60 – 80 Hz verursacht. Die Amplitude der Erschütterungen ist der Abflussmenge proportional.

Der Versuchsaufbau im Gerinne bestand aus einem Geophonprofil mit 3 Sensoren, die je nach Messung in 2 m oder 5 m Abstand aufgestellt wurden. Steine/Blöcke á 12 kg bis zu 50 kg wurden dabei auf das Bachbett fallen gelassen und die Erschütterungen aufgezeichnet. Wie beim Alarmierungssystem im Illgraben kamen hier auch Geophone der Marke GS 20-DX zum Einsatz. Diese haben einen Messbereich von 8 – 1500 Hz und wurden mit 1000 Hz abgetastet. Ein typischer Signalverlauf verursacht durch das Auftreffen eines 12 kg Blockes am trockenen Bachbett aus 1.5 m Höhe ist in Abbildung 22 (a) dargestellt.

Weitere Tests untersuchten die Erschütterungen aufgrund eines echten Murganges im gleichen Bachbett. Dafür wurden die Geophone an die Betonverkleidung eines Brückenpfeilers montiert. Da hier zwischen Sensor und Boden kein direkter Kontakt herrschte, wurde der Hauptfrequenzinhalt der Erschütterungen durch die Geometrie und Masse der zur Montage herangezogenen Brückenpfeiler bestimmt. Die Detektion eines Murganges erfolgte gänzlich durch die an den Pfeilern hervorgerufenen Schwingungen, welche wesentlich schwächer als die zuvor am Boden aufgenommenen Vibrationen waren.

Erschütterungen aufgrund von Massenbewegungen in einem Gerinne können nur innerhalb einer relativ kurzen Distanz detektiert werden, da diese Vibrationen im Vergleich zu Erdbeben sehr geringe Amplituden aufweisen und die Erschütterungen im Allgemeinen höhere (und dadurch stärker attenuierte) Frequenzen enthalten. Für den Versuchsaufbau waren daher lange Kabelstrecken nötig, die zu Übertragungsproblemen und Risiken vor Allem in gebirgigen Gebieten führten.



**Abbildung 22. (a): Vertikale Bodenschwingung beim Auftreffen eines 12 kg Blockes auf trockene Bachbett, Fallhöhe 1.5 m. (b): Zugehöriges Spektrum, mit Spitzen zwischen 80 – 120 Hz; aus Huang et al. (2007).**

## Fallbeispiel 7: Studie über Erschütterungssensoren und deren Einsatz bei der Detektion von Massenbewegungen

Referenz: Itakura et al. (2000)

In dieser Studie wurden drei verschiedene Sensoren zum Zweck der Detektion von Massenbewegungen in Wildbächen in Japan getestet:

- Akustische Sensoren (Panasonic Mikrofon RP-VC2) – detektiert Vibrationen im Boden die durch das Aneinanderstoßen von Blöcken in einer Mure verursacht werden (unterirdisches Mikrofon in einem Stahlrohr). Von den drei getesteten Methoden liefert dieser Sensor das beste Signal-Rausch-Verhältnis.
- Piezoelektrische Sensoren (Keyence Co. model GA-245, Sensorkopf GH-313A)

- Sensor basierend auf einer bewegten Spule (Oyo Geospace GS-20DH) – Im Vergleich zu den beiden obigen Methoden, weist dieser Sensor das geringste Signal-Rausch-Verhältnis auf.

Die drei Sensoren wurden in Bezug auf folgende Kriterien verglichen: Signal-Rausch-Verhältnis, Signal delay und Frequenzspektrum. Dafür wurden sie auf einem Testgebiet in Löchern im Abstand von 2 m montiert und eine 7.3 kg Testmasse aus einer Höhe von 1.5 m fallen gelassen.

Der akustische Sensor eignete sich am besten, sowohl für die Detektion von Murgängen, als auch zum Erkennen einzelner rollender Blöcke oder Bäume, wobei sich die Signaldauer als Unterscheidungsmöglichkeit anbot. Prinzipiell stellten sich aber auch die anderen beiden Sensortypen als geeignet für die Detektion von Murgängen heraus.

### **Fallbeispiel 8: Åknes Hang/Norwegen**

Referenz: Ergebnisbericht des Projekts SafeLand

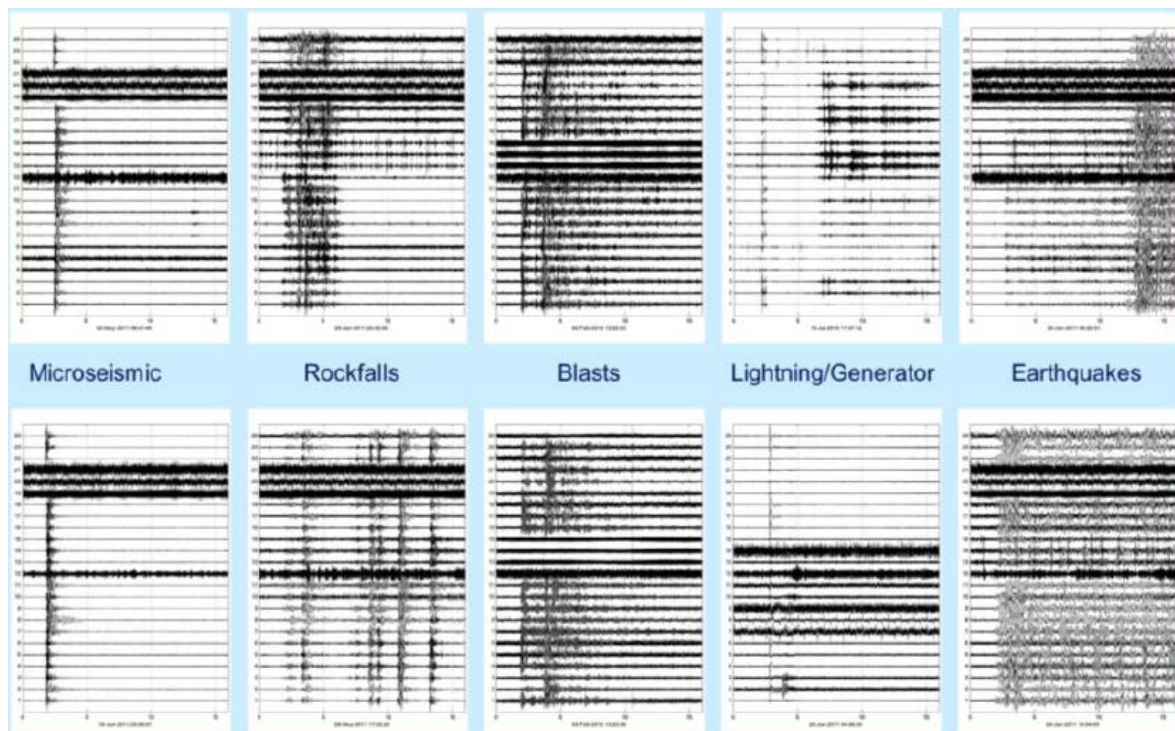
Bei SafeLand handelt es sich um ein large-scale Projekt im 7.Rahmenprogramm der Europäischen Kommission, bei dem es um die Erstellung einer quantitativen Risikobeurteilung sowie eines Management Tools im Falle von Massenbewegungen auf lokaler, regionaler und Europäischer Ebene geht. Die Ergebnisse sollen die Möglichkeit zur verbesserten Prognose und Detektion von Hangrutschungen und Risikozonierung bieten. Dazu wurde das Projekt in 5 Themengebiete, sogenannte Work Areas, unterteilt:

1. Ermittlung des Wissensstandes bezüglich Auslösung von Naturgefahren, inklusive klimatischer und anthropogener Ursachen
2. Quantitative Risikobeurteilung und folglich die Erstellung von Gefahrenkarten
3. Untersuchung der zukünftigen Entwicklung von Gefahrenzonen in Europa auf Grund klimatischer und demografischer Veränderungen
4. Technische und praktische Aspekte hinsichtlich Monitoring und Frühwarnsysteme für Hangrutschungen, State-of-the-art Messsysteme
5. Strategien zur Risikominimierung und Risikomanagement

Für DESME sind hier vor allem die Erkenntnisse aus Work Area 4 „Development of monitoring technology, especially early warning systems and remote sensing techniques, and applications“ von Relevanz. Im Hinblick auf den Einsatz von Radar und

Erschütterungssensoren beim DESME-System werden folglich die wichtigsten Ergebnisse aus SafeLand zusammengefasst:

Eines der im Projekt dokumentierten Fallbeispiele ist die Microseismic-Monitoring Station des Åknes Hanges in Norwegen. Bei diesem Felshang handelt es sich um etwa 70 Millionen m<sup>3</sup> instabiles Gestein, das sich mit einer Geschwindigkeit von 2-15 cm/Jahr bewegt. Über die gesamte Fläche von 150 x 250 m wurde ein seismisches Netzwerk aus 8 drei-Komponenten Geophonen installiert, deren Daten via Kabel an eine zentrale Akquisitionseinheit übermittelt wurden. Die Batterie für den Betrieb des Messcomputers sowie des GSM Relais wurde über einen Dieselgenerator aufgeladen. Die im Triggermodus (Signal-Rauschverhältnis >2 an min. 10 Kanälen) aufgezeichneten Daten (Samplerate 1000 Hz) wurden automatisch via Internet zur Auswertung weitergeleitet. Typische Schwinggeschwindigkeitsverläufe der Messstation sind in Abbildung 23 zu sehen. Die an den Geophonen aufgezeichneten Signale wurden dabei aufgrund von mikroseismischen Ereignissen (Tremors), Steinschlag, Sprengungen, Blitzeinschlägen und Erdbeben verursacht.

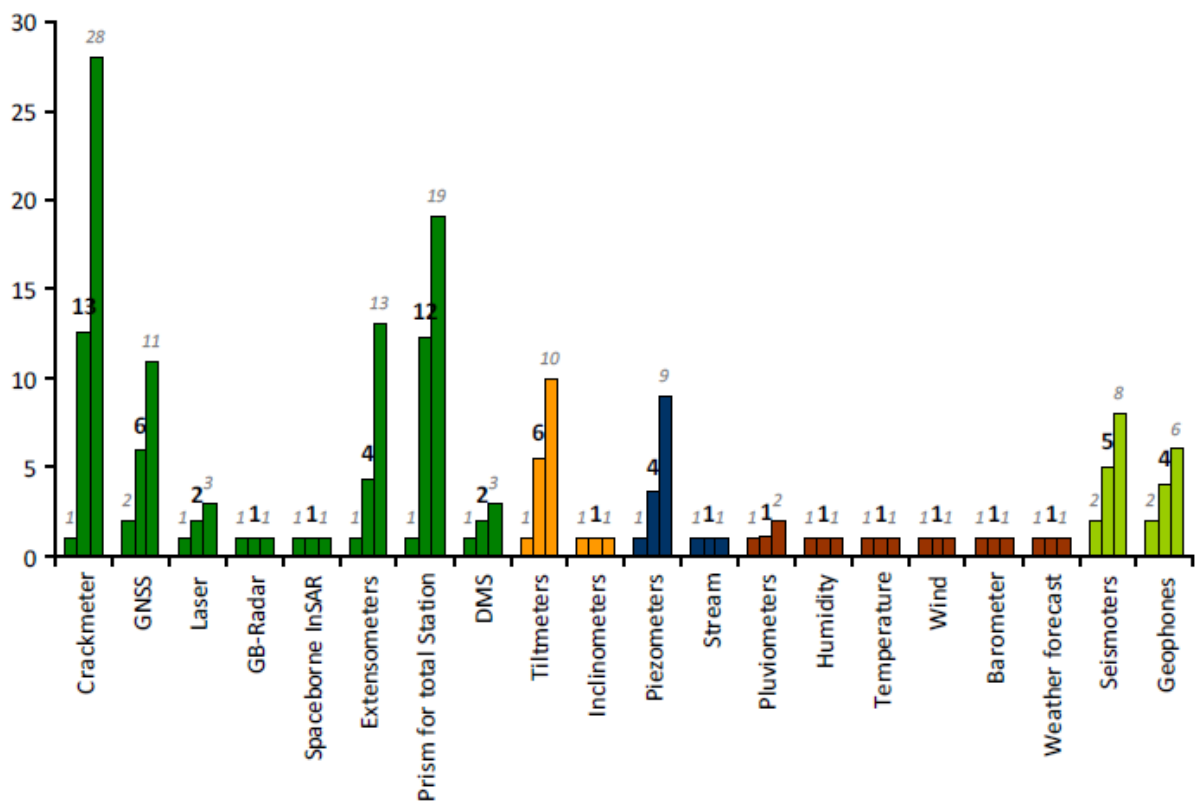


**Abbildung 23. Seismische Signale aufgrund verschiedener Ursachen, aufgezeichnet an den 3-Komponenten Geophonen am Åknes Hang (aus SafeLand Deliverable 4.6, 2012). 24 Kanäle über einen Ausschnitt von 16 sec.**



Um einen Überblick über existierende und potentielle zukünftige Frühwarnsysteme für Hangrutschungen zu gewinnen, wurde im Rahmen von SafeLand ein Fragebogen an etwa 100 Organisationen und Institute verschickt, die bereits Frühwarnsysteme (FWS) betreiben.

Ein für DESME interessanter Anhaltspunkt war dabei die Frage über die Anzahl der üblicherweise zum Einsatz kommenden Sensoren eines bestimmten Typs. Aus Abbildung 24 geht hervor, dass bei den untersuchten Hangrutschungen üblicherweise nur 2 – 6 Geophone zum Einsatz kamen.



**Abbildung 24. Minimale, mittlere und maximale Anzahl an Instrumenten einer bestimmten Art pro Monitoringstation (aus SafeLand Deliverable 4.8, März 2012)**

Die Ergebnisse der Literaturstudie zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Systeme vorrangig im Transportbereich der Massenbewegungen montiert waren, was darauf zurückzuführen ist, dass es sich ausschließlich um Hangrutschungs- und Murgang-Monitoringsysteme handelt. Eine Überwachung von Steinschlagprozessen mit Erschütterungssensoren ist im Entstehungs- oder Transportgebiet allerdings schwer bis kaum praktikabel. Da DESME ein System sowohl für die Warnung bei Steinschlag als

auch bei Murgängen entlang von Eisenbahnstrecken anstrebt, ist eine einheitliche Montagevariante der Erschütterungssensoren anzupfeilen (siehe dazu nächstes Kapitel „Vorschläge für die Realisierbarkeit eines Frühwarnsystems mittels Erschütterungssensoren“).

Gegenüber anderen Detektionsmöglichkeiten wie zum Beispiel Stolperdrähten, haben Erschütterungssensoren den Vorteil, dass mehrere Ereignisse detektiert werden können ohne dass ein Austausch notwendig ist. Unterbrechungen durch Wildtiere sind bei Drähten ein weiterer Grund für wartungsintensive Erneuerungen. Einwirkungen durch Menschen wie auch durch Wildtiere im Messbereich können zwar bei Erschütterungssensoren ebenfalls Störsignale verursachen, jedoch sollte deren Elimination durch geeignete Filterkriterien möglich sein. Betreffend die Auslösung einer Alarmierung, können die in den Fallbeispielen angegebenen Kriterien als erster Anhaltspunkt herangezogen werden z.B. Anzahl an Impulsen pro Sekunde mit einer bestimmten Amplitude, sowie Anzahl der betroffenen Kanäle, jedoch sollte dies an die genauen Bedingungen der Teststrecke adaptiert werden (keine a-priori Auskunft über die Ereignisamplitude möglich).

## LABORVERSUCHE: TESTS MIT ERSCHÜTTERUNGSSENSOREN UND DATENAUSWERTUNG

Um die erforderlichen Spezifikationen der zum Einsatz kommenden Erschütterungssensoren zu untersuchen, wurden im Labor verschiedenen Sensortypen getestet und deren Eignung für das DESME-System kommentiert. Beim Sensorvergleich handelt es sich um folgende Typen:

| Marke          | Messgröße              | Empfindlichkeit   | Messbereich                            | Preis      |
|----------------|------------------------|---|--|------------|
| Geosig GSV-310 | Schwinggeschwindigkeit | 2.5V peak bei $\pm 1$ mm/s, $\pm 10$ mm/s oder $\pm 100$ mm/s | 1 – 315 Hz, triaxial                   | ca. € 2500 |
| Wilcoxon 731A  | Schwingbeschleunigung  | 10 V/g  | 0.1 – 300 Hz, 0.5g peak, einaxial      | ca. € 1500 |
| B&K 4370       | Schwingbeschleunigung  | 10 pC/ms <sup>-2</sup>  | 0.2 – 3500 Hz                          | ca. € 800  |
| Kistler 8688   | Schwingbeschleunigung  | 1 V/g   | 0.5 – 3000 Hz, 5g peak, triaxial       | ca. € 1300 |
| Kistler 8640   | Schwingbeschleunigung  | 1 V/g   | 0.5 – 3000 Hz, 5g peak, einaxial       | ca. € 400  |
| KAS 901-05A    | Schwingbeschleunigung  | 1.2 V/g   | Auflösung 0.2 mg, bis 50 Hz, einaxial  | ca. € 150  |
| KAS 903-02A    | Schwingbeschleunigung  | 0.17 V/g  | Auflösung 2 mg, bis 1000 Hz, zweiaxial | ca. € 200  |

Prinzipiell müssen folgende Punkte bei der Auswahl der Sensoren beachtet werden:

- Es werden relativ große Stückzahlen notwendig sein, um einen Streckenabschnitt flächendeckend zu überwachen. Unter Annahme eines ca. 200 m langen Abschnittes mit z.B. 10 m Abständen zwischen den Sensoren, werden 20 Stück benötigt (die Festlegung der Sensorabstände wird im folgenden Kapitel im Rahmen der praktischen Tests behandelt). Sensoren der teuersten Kategorie wären somit unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen des Projekts nicht wirtschaftlich, abgesehen von ihrer zu geringen Robustheit in Hinblick auf Umwelteinflüsse, die einen Dauereinsatz im Gelände nicht erlauben.
- Da einer der im nächsten Kapitel untersuchten Montagevarianten direkt am Oberbau wäre, ist auf die Abmessungen der Sensoren zu achten, so dass diese kein Hindernis an den Gleisen darstellen. Zusätzlich soll es durch die Montage zu keiner Einschränkung der Tragfähigkeit beliebiger Oberbaukomponenten kommen; daher ist ein möglichst kleiner und leichter Sensor zu bevorzugen, der entweder mittels Sicherheitsschrauben oder Klebung befestigt werden kann.

- Die Signale auf Grund einer Zugvorbeifahrt müssen eindeutig von den Signalen auf Grund einer Massenbewegung die sich am Oberbau abgelagert unterscheidbar sein. Das erfordert einen hinreichend großen Messbereich in Bezug auf Frequenz- und Amplitudenumfang.

Im Rahmen von Phase 1 wurden Labortests mit 3 der oben genannten Sensoren (Wilcoxon 731A, KAS 901-05A, KAS 903-02A) durchgeführt: Dabei wurden Massenbewegungen durch den Aufprall von Gewichten simuliert und die verursachten Signale an den verschiedenen Sensoren verglichen. Bei den dafür verwendeten Massen handelt es sich um ein Fallgewicht, das aus einer Höhe von 1 – 1.2 m auf gewachsenen Boden bzw. auf den Schotteroberbau eines aufgelassenen Gleises fallen gelassen wurden. Diese verwendeten Massen sind wesentlich kleiner als die vorgegebene Wahrnehmungsschwelle eines Steins mit 30 cm Durchmesser. Es wurde davon ausgegangen, dass wenn selbst kleinere Massen detektierbar sind, größere kein Problem darstellen. Da es sowieso nicht möglich ist, für Steinschlag oder Murgänge vorab einen Schwellenwert für die Erschütterungsamplitude zu definieren (schwankt je nach Fallhöhe, Steinmasse, mehrfaches Abprallen am Fallweg, Bodensteifigkeit am Punkt des Einschlags etc.), ging es in diesem Versuch lediglich um die Unterscheidung zwischen Zugvorbeifahrten, Störsignalen durch Menschen/Wild und einwirkenden Massenbewegungen. Bei den Massenbewegungen, insbesondere bei Steinschlag aber auch bei Murgängen die im Gleisbereich einwirken, wird von einem stoßartigen Einschlag ausgegangen, der durch Fallversuche simuliert wurde. Das Gewicht wurde dabei jeweils auf eine der Schwellen mit einem Sensor fallen gelassen.

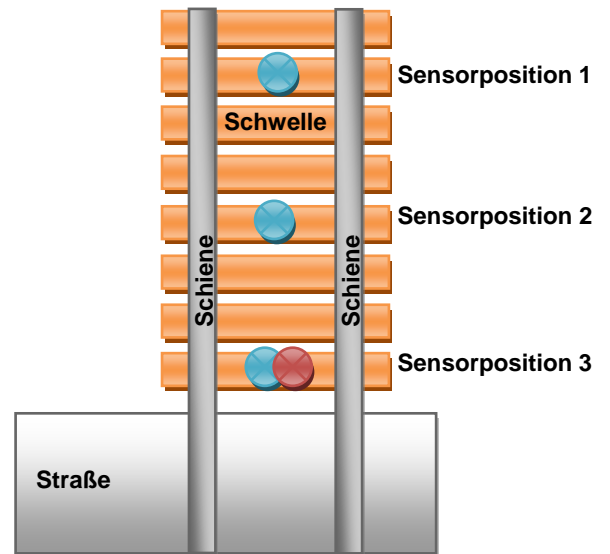
Beim Versuchsaufbau wurden 3 Sensoren der Marke Wilcoxon in jeweils 2 m Abstand auf den Schwellen platziert (siehe Foto 9 und Foto 10). Dies sind die empfindlichsten für die Versuche zur Verfügung stehenden Sensoren, deren Signale ein „Best case“ Szenario für die Auswertung darstellen und somit Aufschluss geben, welche möglichen Signalkriterien zur Unterscheidung herangezogen werden können. Die Montage erfolgte auf Stahlwürfeln, durch deren Gewicht eine gute Ankopplung an die Schwellen erzeugt wurde, ohne für den Versuch die Schwellen anbohren zu müssen bzw. die Sensoren anzukleben. Auf einem der Stahlwürfel wurde zusätzlich ein KAS 901-05A montiert, um die Signale mit den präziseren Sensoren zu vergleichen.




**Foto 9. Erschütterungssensoren an den Schwellen eines aufgelassenen Gleises.**



**Foto 10. Wilcoxon und KAS Sensor auf einem Stahlwürfel zwecks Ankopplung.**



Wilcoxon Sensor: 

KAS Sensor: 

Abstand zwischen Sensoren: ca. 2 m

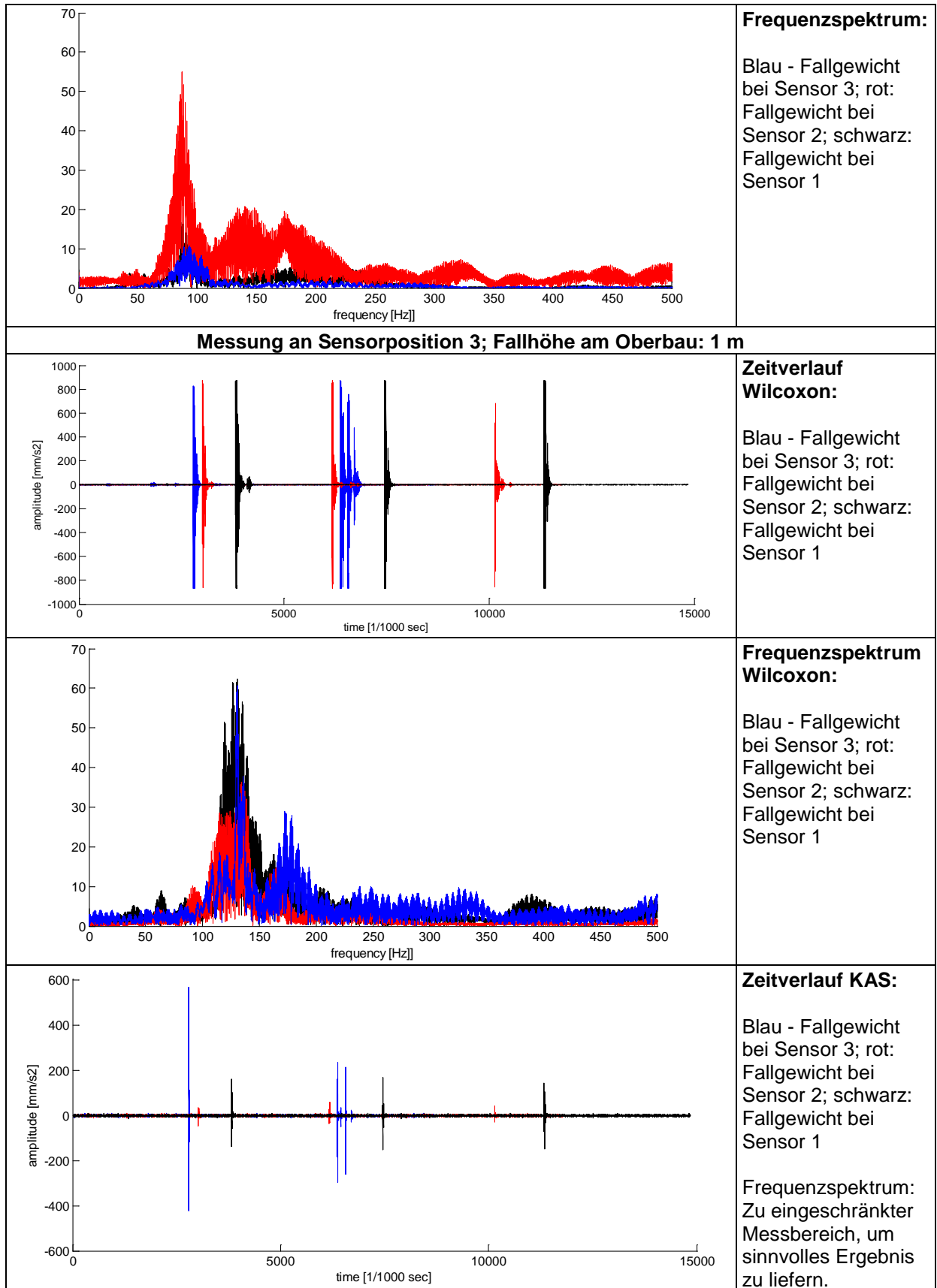
Bei den Fallversuchen (Tabelle 7) ist ein markanter Peak zwischen 90 – 150 Hz ersichtlich, sowie teilweise zwischen 150 – 200 Hz. Im Gegensatz dazu ist das Spektrum bei Schritten durch gehende Menschen am Oberbau viel schmaler (Tabelle 8); dieser Peak befindet sich ebenfalls zwischen 100 – 150 Hz, darüber sind jedoch kaum mehr Frequenzen enthalten. Im Weiteren war zu erkennen, dass die Amplitude der Erschütterungen im Fall einer am Gleis gehenden Person sehr gering war: Spitzen lagen bei etwa  $150 - 300 \text{ mm/s}^2$ , was selbst durch die extrem kleinen Fallgewichte um ein 3-faches überschritten wurde ( $600 - 800 \text{ mm/s}^2$ ). Vorausgesetzt es befinden sich also genügend Sensoren im Messbereich, könnte durch reine Amplitudenschwellwerte zwischen Menschen bzw. Wild und Stein-/Felsschlag unterschieden werden. Bei zu großen Sensorabständen von z.B. 50 – 100 m kann nicht eindeutig zwischen einem

Wildwechsel unmittelbar am Sensor oder einer weiter entfernten Massenbewegung unterschieden werden.

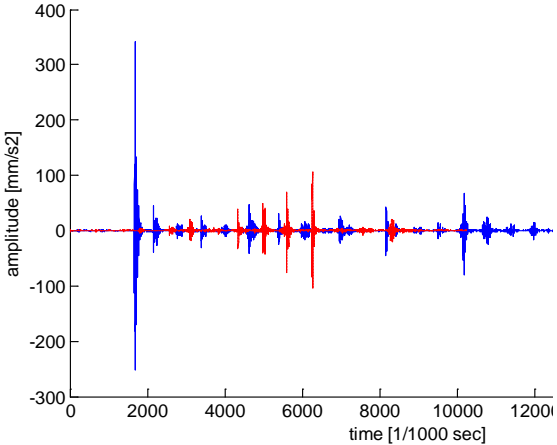
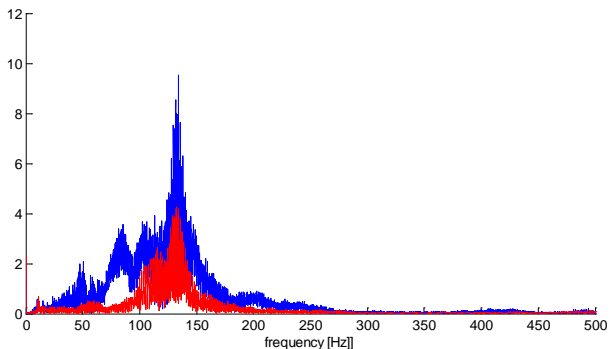
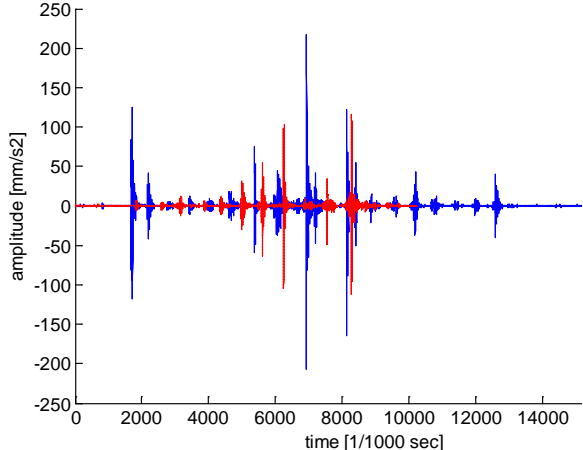
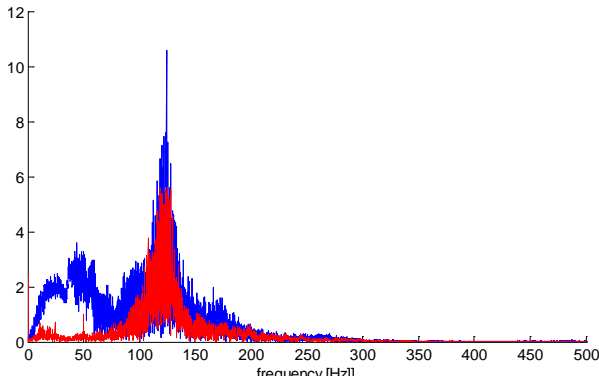
Bezüglich der Sensorik erwies sich der KAS 901-05A als ungeeignet, da durch den begrenzten Frequenzbereich (Aufnahme nur bis 50 Hz) die wichtigsten Signalanteile nicht ausreichend erfasst werden können. Der KAS 903-02A mit einer Auflösung bis 1000 Hz ist wesentlich besser geeignet.

**Tabelle 7. Messungen an den Schwellen: Fallversuche**

| <b>Messung an Sensorposition 1; Fallhöhe am Oberbau: 1 m</b> |   |
|--|---|
|  | <p><b>Zeitverlauf:</b></p> <p>Blau - Fallgewicht bei Sensor 3; rot: Fallgewicht bei Sensor 2; schwarz: Fallgewicht bei Sensor 1 (einmal übersteuert)</p>                                |
|  | <p><b>Frequenzspektrum:</b></p> <p>Blau - Fallgewicht bei Sensor 3; rot: Fallgewicht bei Sensor 2; schwarz: Fallgewicht bei Sensor 1 (Gleichspannungsanteil aufgrund Übersteuerung)</p> |
| <b>Messung an Sensorposition 2; Fallhöhe am Oberbau: 1 m</b> |   |
|  | <p><b>Zeitverlauf:</b></p> <p>Blau - Fallgewicht bei Sensor 3; rot: Fallgewicht bei Sensor 2; schwarz: Fallgewicht bei Sensor 1</p>   |



**Tabelle 8. Messungen an den Schwellen: Gehen/Schritte**

|   |   |
|---|---|
|    | Zeitverlauf an Sensor 1 durch Schritte am Oberbau (blau: Versuch 1; rot: Versuch 2) |
|   | Spektrum an Sensor 1 durch Schritten am Oberbau: (blau: Versuch 1; rot: Versuch 2)  |
|  | Zeitverlauf an Sensor 3 durch Schritte am Oberbau (blau: Versuch 1; rot: Versuch 2) |
|  | Spektrum an Sensor 3 durch Schritte am Oberbau (blau: Versuch 1; rot: Versuch 2)    |



Zu Vergleichszwecken wurden diese Versuche mit in der Vergangenheit (2010) am Oberbau gemessenen Daten von Zugvorbeifahrten untersucht. Diese Messdaten enthielten Signale von triaxialen Beschleunigungssensoren die direkt am Gleis und in der Mitte der Schwelle montiert waren (siehe dazu Foto 11 und Foto 12). Bei Betrachtung dieser Signale im Zeitverlauf lässt sich die typisch zu erwartende Vorbeifahrtdauer der Züge ablesen, sowie ein Anhaltswert für die maximale Amplitude erkennen. Bei der damals vermessenen Strecke handelt es sich um einen zweigleisigen Abschnitt auf dem hauptsächlich Personenverkehr mit relativ niedriger Geschwindigkeit im innerstädtischen Bereich verkehrt. Die Zeitverläufe der an den Gleisen und Schwellen gemessenen Erschütterungswerte sind in Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt. Hierbei handelt es sich jeweils um Schwingungen in x, y, und z Richtung (x = parallel zur Fahrtrichtung, y = normal zur Fahrtrichtung und z = vertikal). Typische Werte für die Vorbeifahrtdauer einer S-Bahn waren ca. 15 sec, mit Amplituden von 2-4  $\text{m/s}^2$  an den Gleisen und 0.5-1.5  $\text{m/s}^2$  an den Schwellen (je nach Messrichtung). Für die erfassten Güterzüge betrug die Dauer einer Vorbeifahrt ca. 35 sec und – je nach Messrichtung – die Amplitudenmaxima an den Schienen 4-10  $\text{m/s}^2$  und an den Schwellen 0.5-2  $\text{m/s}^2$ . Da diese Messwerte je nach Streckenklasse variieren, würde eine Anpassung an die Referenzstrecke für die Prototypentests notwendig sein, um die Charakteristiken der dort verkehrenden Züge zu beschreiben und die Filterung einzustellen.

Die Werte dieser Messungen liegen wieder ein Vielfaches über den durch Umwelteinflüsse/Menschen/Wild verursachten Amplituden. Ob sich Güterzugvorbeifahrten allerdings stark in den Amplituden von kleineren Massenbewegungen unterscheiden, kann a-priori nicht gesagt werden. Hier stellt vorerst nur die Fahrtrichtung ein eindeutiges Unterscheidungsmerkmal dar.



**Foto 11. Beschleunigungssensor in der Mitte einer Betonschwelle**



**Foto 12. Beschleunigungssensor am Gleis**

Tabelle 9. Erschütterungssignale aufgrund einer Güterzugvorbeifahrt

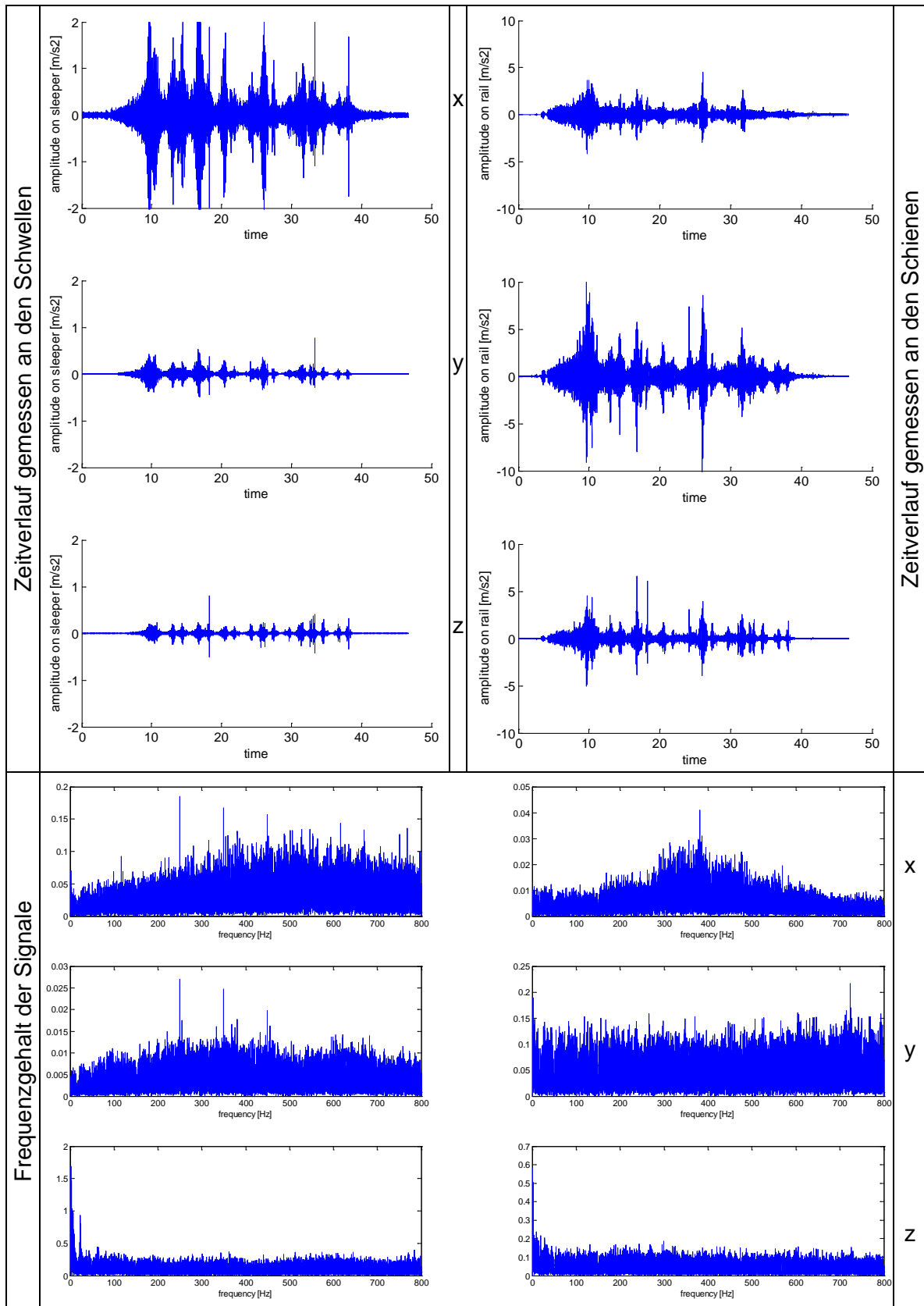
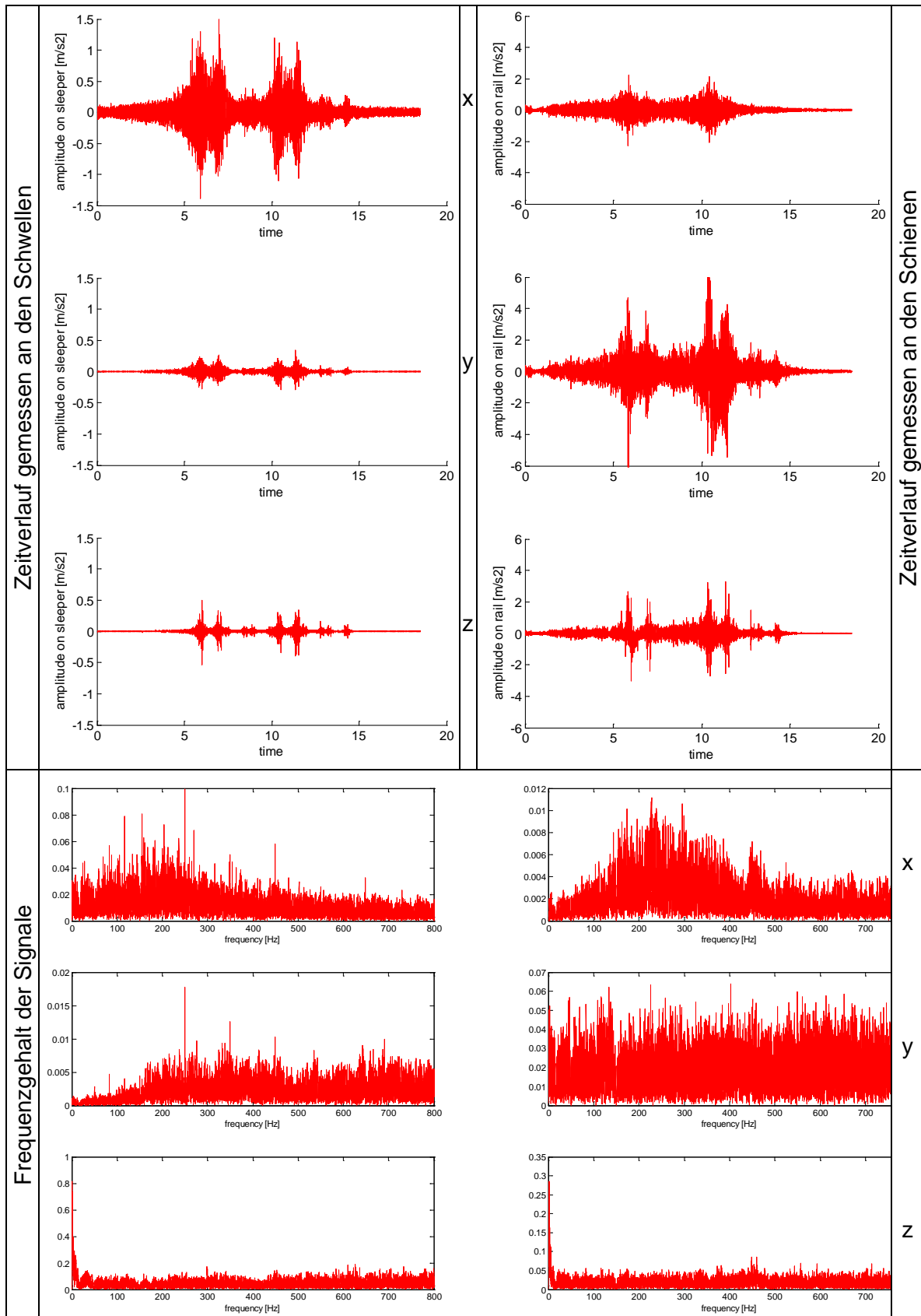


Tabelle 10. Erschütterungssignale aufgrund einer Personenzugvorbeifahrt



## Unterscheidung zwischen Zugvorbeifahrten und Massenbewegungen

Steinschlag: Hauptunterscheidungskriterium ist hier die Signaldauer. Während bei vereinzelt oder mehreren Steinen immer von sehr kurz anhaltenden hohen Amplituden ausgegangen werden kann, würde eine Zugvorbeifahrt – je nach Geschwindigkeit – mehrere Sekunden im Signal erkennbar sein (da es sich bei der besichtigten Referenzstrecke vorrangig um eine Güterzugstrecke handelt, ist hier mit Vorbeifahrt Dauern von 20 – 40 sec zu rechnen). Ausgehend von Erschütterungssensoren im Einwirkungsbereich (entlang der Strecke) ist hier eine Abstimmung unter den Sensoren erforderlich: durch Zuordnung einer genauen Position kann im Processing aus den Daten ermittelt werden, ob das Signal nur in der Mitte des überwachten Abschnittes vorkommt, oder sukzessive an allen Sensoren und von einer bestimmten Richtung kommend auftritt. Letzteres ist bei einer Zugfahrt im überwachten Abschnitt zu erwarten, ersteres bei einer Ablagerung im Einwirkungsbereich. Betreffend Frequenzinhalt könnte hier ein weiteres Unterscheidungskriterium eingesetzt werden, jedoch nicht zur eindeutigen Bestimmung des Signalursprungs sondern eher als weiteres Hilfsmittel: Güterzüge, zum Beispiel, verursachen in x- und y-Richtung – je nach Geschwindigkeit und Masse – verstärkte Frequenzen im Bereich 300 Hz bis 500 Hz, S-Bahnen hingegen zeigen verstärkte Signale im Bereich 150 Hz – 350 Hz, während bei den Aufprallmessungen Spitzen zwischen 100 – 150 Hz, sowie teilweise bei 150 – 200 Hz, festgestellt werden konnte (Vergleich Huang et al. aus Fallbeispiel 6).

Murgänge: Ähnlich wie bei Steinschlag kann hier von keiner typisch zu erwartenden Amplitude ausgegangen werden, da das Volumen und die Geschwindigkeiten von Massenbewegungen sehr variabel sein können. Erschwerend kommt hinzu, dass die Einwirkdauer eines Murgang im Allgemeinen länger als bei Steinschlag ist, somit die Dauer eines Signals mit Amplituden über dem Grundrauschen kein eindeutiges Unterscheidungskriterium zu einer Zugvorbeifahrt darstellt. Wieder ausgehend von Sensorik entlang der Strecke statt im Gelände, wäre hier die Position der gemessenen Amplituden das einzige charakteristische Merkmal: Zugvorbeifahrten würden die Sensorkette aus einer der beiden Fahrrichtungen kommend anregen, während Ablagerungen mitten im Monitoringabschnitt an beliebigen Sensoren erhöhte Amplituden bewirken.

Eliminieren von Umwelteinflüssen wie z.B. Regen und Hagel kann aufgrund der Amplitude erfolgen, da hier über einen breiten Frequenzbereich kleinere Erschütterungen zu erwarten sind.

## VORSCHLÄGE FÜR DIE REALISIERBARKEIT EINES FRÜHWARNSYSTEMS MITTELS ERSCHÜTTERUNGSSENSOREN

Entsprechend der VIF Ausschreibung gilt es folgende technische Anforderungen bei der Entwicklung eines Frühwarnsystems zu erfüllen:

1. **Kapselung:** Eigenständiges, insulares System (bzgl. Energieversorgung und Datenübertragung)
2. **Sicherheit:** Hohe Datenverfügbarkeit, selbständige Fehlermeldung/suche sowie redundante Informationsweitergabe.
3. **Vernetzbarkeit:** Schnittstelle zu den Verkehrssteuerungssystemen der Infrastrukturbetreiber.
4. **Alternativ fix montiert oder mobil**, jedoch rasch zu installieren jedoch gegen Diebstahl und Vandalismus geschützt
5. **Frei konfigurierbar**, Fernwartung möglich
6. **Kostengünstig, Umweltfest** (Angriff von Sekundärprozesse)

Im Folgenden werden die von DESME vorgeschlagenen Lösungen für den Einsatz von Erschütterungssensoren, in Ergänzung zu den bereits dargestellten Möglichkeiten mittels Radar, für die jeweiligen Anforderungen präsentiert, sowie deren Vor- und Nachteile und mögliche Tests die im Rahmen der Prototypenentwicklung noch durchzuführen sind.

### Anforderung 1: Kapselung/autarkes System

#### *Variante 1: Stromversorgung durch Akku/Autobatterie*

Vorteil: Eine transportierbare und entkoppelte Stromversorgung mittels Akku wäre eine praktische Lösung für entlegene Streckenabschnitte. Das Messsystem könnte dadurch an einem beliebigen Standort installiert werden, ohne von Anschlussmöglichkeiten oder Wetterbedingungen (wie bei Solarzellen) abhängig zu sein.

Nachteil: Selbst bei extrem stromsparenden Messanlagen wäre der Akku-Betrieb nur für eine begrenzte Dauer möglich. Ein konventioneller PC für die Aufzeichnung und Bearbeitung von Erschütterungsdaten im „idle-mode“ (ca. 1.5 A Stromverbrauch) würde mit einer Autobatterie nur etwa 3 Tage im 24h-Betrieb laufen. Regelmäßige Wartung/Austausch der Batterien wären in Folge notwendig. Bei größeren Messsystemen (bestehend aus mehreren Erschütterungssensoren) mit höherem Processing-bedarf würde die Lebensdauer der Batterie immer kürzer werden.

### *Variante 2: PV Modul in Kombination mit Akku*

Vorteil: Ähnlich wie bei Lösung 1, bietet der Akku eine flexible Lösung, die relativ Standortunabhängig ist und somit entlegene Streckenabschnitte bedienen könnte. Zusätzlich wird durch das Wiederaufladen mittels PV Modul ein längerer Betrieb als bei reiner Akkuversorgung gewährleistet. Derartige Komplettlösungen sind bereits am Markt erhältlich.

Nachteil: Um längere Betriebszeiten mittels Lademöglichkeit zu garantieren, muss zumindest das PV Modul an einem geeigneten Standort platziert werden (ausreichende Stunden Sonneneinstrahlung pro Tag). Dies konnte sich vor allem in engen, bewachsenen Tälern als schwierig erweisen. Wie sich bei der Streckenbegehung am 04.07.2012 entlang der Referenzstrecken Hieflau – Selzthal und Weyer – Hieflau zeigte, ist die Anzahl der Sonnenstunden pro Tag teilweise sehr begrenzt.

### *Variante 3: Netzstrom*

Vorteil: Bei vorhandener Anschlussmöglichkeit an einen 220V Versorgungspunkt, ist dies die einfachste und kostengünstigste Variante. Zusätzlich würde dies einen durchgehend Betrieb sicherstellen, unabhängig von der anfallenden Datenprocessing-Anforderung oder der zum Einsatz kommenden Sensoranzahl, da auch bei mangelnder Sonneneinstrahlung, besonders bei Schlechtwetter oder an kurzen Tagen im Winter, die Energieversorgung sichergestellt ist. Eventuelle Stromausfälle könnten mit USV-Anlagen überbrückt werden.

Nachteil: Längere Kabelstrecken könnten notwendig sein, falls sich die nächste Anschlussmöglichkeit in großer Entfernung befindet. Lange Kabel sind außerdem anfällig auf mechanische Beschädigung: Blitzschlag, biologische/chemische Angriffe, Spritzzüge etc.

**In DESME angestrebte Lösung:** Trotz der Problematik der anfallenden Kabelstrecken ist aus Sicht der Erschütterungsmessung die einzige realistische Variante innerhalb des vorgegebenen Zeit- und Budgetrahmens von Phase 2 eine Versorgung mittels Netzstrom. Die notwendigen Kabelstrecken müssen dafür ausreichend vor chemischen Einflüssen geschützt werden (z.B. Hüllrohre und Kabelverschraubungen mit Schutzklasse IP69K, wobei 6 = Staubdicht, 9 = Schutz gegen Hochdruck-/Dampfstrahlreinigung und K = Schutz gegen Heißwasser). Idealerweise könnten lange Kabel auch im neben der Strecke befindlichen Kabeltrog verlaufen. Hier ist jedoch bei der Kabelverlegung auf notwendige

Stopfarbeiten zu achten. Aufgrund der erforderlichen Dauerüberwachung mit hohen Abtastraten (1-2 kHz), wird dieser Kompromiss hinsichtlich der insularen Eigenschaften des Systems als notwendig erachtet. Selbst eine Kombination aus Akku + PV kann einen derartigen Dauerbetrieb nicht zu 100% garantieren: ein System bestehend aus einem Messmodul, Datenlogger und Processing-board (stromsparendes Pandaboard), das in Summe einen Stromverbrauch von ca. 750mA aufweist, kann mittels einer 100Ah Batterie nur etwa 5 Tage ohne Zusatzversorgung betrieben werden. Ein 50 W Solarpanel würde eine dauerhafte Energieversorgung nur dann gewährleisten, wenn im Aufstellungsgebiet genügend Sonneneinstrahlung herrscht. Um Ausfälle des Warnsystems aufgrund der Stromversorgung aber zu vermeiden und angesichts der vorgesehenen Montagevariante (siehe Anforderung 4), wäre eine Anbindung an Netzstromversorgung am zielführendsten.

## **Anforderung 2: Sicherheit**

### *Detektionssicherheit bzw. Alarmierungssicherheit*

Zur Erfüllung dieser Anforderung soll das gesamte Sensorsystem redundant ausgelegt werden, so dass auch im Falle einzelner Sensorausfälle die Alarmierungskriterien überprüft werden können. Dies bezieht sich sowohl auf den Einsatz mehrerer Erschütterungssensoren, also auch auf die Kombination mit Radarsensoren.

Vorteil: Durch die Kombination verschiedener Sensortypen (Erschütterungssensoren und Radar), sowie dem möglichen Einsatz mehrerer Geräte jedes Typs (modular erweiterbares System), ist die Toleranz bezüglich ausfallender Sensorik größer. Kommt es zu einem Ereignis, das mittels eines Systems nicht eindeutig zuordenbar ist, kann die andere Sensorik weitere Alarmierungskriterien anbieten. Wie bereits im Kapitel „Detailuntersuchung: Radarsonde“ erwähnt, ist dies zum Beispiel bei Zugsvorbeifahrten im überwachten Abschnitt der Fall: Diese können mittels Radar nicht eindeutig erkannt werden, jedoch durch die Erschütterungssensoren im Einwirkungsbereich als Störeinfluss identifiziert werden. Umgekehrt können Erschütterungssensoren entlang der Strecke wenig bzw. keine Auskunft über Massenbewegungen im Transportbereich (entlang eines Bahn-nahen Gerinnes) geben.

Einzelne Alarmierungen (von bestimmten Sensoren oder einem der Sensortypen) können in einer Basisstation zu einem Gesamtergebnis aggregiert werden, um eine klare Alarmierungsstufe zu generieren.

Nachteil: Für jeden Sensortyp sind eigene Algorithmen zwecks Auswertung notwendig. Es muss eine gemeinsame Überwachung der jeweiligen Alarmierungskriterien erfolgen, um



zu einem kombinierten und verlässlichen Ergebnis zu kommen. Auch betreffend andere Faktoren wie Selbsttests, Montage oder Stromverbrauch können sehr unterschiedliche Anforderungen bei einem kombinierten System anfallen.

### *Datensicherheit*

Lokale Zwischenspeicherung der Rohdaten; Datenübertragung nur bei Alarmierung.

Vorteil: Bei einer Alarmierung werden im Normalfall nur bestimmte Kenngrößen übertragen, wie z.B. die genaue Position der betroffenen Sensoren und deren max. Amplitude der Messgröße. Die Rohdaten an sich bleiben an einer Zwischenstation gespeichert, können aber auf Wunsch über z.B. UMTS Netz abgerufen werden bzw. gelöscht werden um Speicherplatz freizumachen. Zusätzlich könnte ein Live-View der Daten über einen Browser ermöglicht werden.

Nachteil: Die Übertragung der Rohdaten könnte sich als zeitaufwendig erweisen und große Speicherkapazitäten erfordern. Da es grundsätzlich bei dieser Studie um ein Warnsystem geht, sollte sich die Menge an übertragenen Daten auf ein Minimum bzw. auf die Alarmierungen beschränken. Es müssten allerdings regelmäßige Selbsttests oder Überwachungsmöglichkeiten für alle Sensoren eingeführt werden, wenn die Rohdaten nicht ständig live kontrolliert werden.

### *Diebstahlsicherheit*

Mögliche Lösung: Diebstahlsichere Schrauben, Sensoren an Masten.

Vorteil: Der heutige Stand der Technik im Hinblick auf diebstahlsichere Montage erlaubt eine relativ rasche Installation und Demontage der Geräte. Im Idealfall lässt sich die diebstahlsichere Montage mit wetterfesten Gehäuse kombinieren, um einen ganzheitlichen Schutz auch vor Temperatur/Niederschlag/Blitzschlag zu erzielen. Bei den Erschütterungssensoren könnten mit Dübeln am Boden montierte, lackierte Gusseisengehäuse zum Einsatz kommen; diese sind robust (auch evtl. gegen kleineren Steinschlag) und diebstahlsicher.

Nachteil: Diebstahlsichere Montage lässt sich im Allgemeinen leichter an bereits vorhandener Infrastruktur durchführen, als mitten im Gelände (siehe dazu auch Anforderung 4), denn dort wäre die Erstellung zusätzlicher Hilfsmittel wie zum Beispiel Betonfundamente oder Masten notwendig.

**In DESME angestrebte Lösung bezüglich Detektionssicherheit:** Ausnutzung der Stärken von jeweils Radarsensoren und Erschütterungssensoren als Kombination in verschiedenen Geländen und bei verschiedenen Gefahrenmechanismen. Während die Detektion von einzelnen Steinen/Felsblöcken vor allem in bewachsenen Tälern und entlang steiler Hänge für Radarsonden eine Herausforderung darstellt, bieten sich Radarsysteme sehr gut für Massenbewegungen in Gerinnen zur Detektion von Murgängen an. Umgekehrt sind seismische Sensoren geeignet für die Detektion von Erschütterungen im Einwirkungsbereich (entlang der Gleise) aufgrund von Steinschlag (da sich die Signale gut von Zugvorbeifahrten unterscheiden lassen sollten), hingegen ist die eindeutige Detektion von Murgängen im Vergleich zu normalem Abfluss mittels Erschütterungen alleine schwierig. Schwellenwerte für jeweils Erschütterungsamplituden und Geschwindigkeitswerte der Radarsonden müssen vom Betreiber anhand der vorherrschenden Bedingungen festgelegt werden.

**In DESME angestrebte Lösung bezüglich Datensicherheit:** Lokale Speicherung der Rohdaten und Übertragung von Kenngrößen bei Überschreitung der Alarmierungskriterien. Daten können auf Wunsch über UMTS Netz abgerufen werden bzw. über Browser in einer Live-Ansicht mitverfolgt werden, bleiben aber prinzipiell vor Ort gespeichert um unnötigen und teuren Datentransfer zu vermeiden. Um die Funktionalität zu garantieren, werden regelmäßige Selbsttests durchgeführt: dabei handelt es sich um Parameter wie PC Auslastung (Systemtest), oder gemessene Amplituden bzw. Frequenzinhalt der Signale bei Messung des Grundrauschens (Sensortest). Bei Ausfall des Gesamtsystems oder einzelner Sensoren soll eine Benachrichtigung verschickt werden.

**In DESME angestrebte Lösung bezüglich Diebstahlsicherheit:** Montage der Erschütterungssensoren mittels diebstahlsicherer Schrauben an vorhandener Infrastruktur. Dafür würden sich besonders die Schwellen anbieten: die Größe der oben vorgeschlagenen KAS Sensoren stellt hier kein Problem bezüglich Abstand zu den Rädern/Waggons dar, während die Montage direkt am Oberbau eine gute Ankopplung an den zu untersuchenden Einwirkungsbereich garantiert. Erschütterungen aufgrund eintreffender Steinschläge oder Murgänge können hier an Hand der Amplituden, sowie der zeitlichen Abfolge der durch Eisenbahnverkehr verursachten Schwingungen unterschieden werden. Dies geschieht allerdings auf Kosten der Flexibilität, da der Umbau

der Sensoren von einem Abschnitt auf den anderen zwar prinzipiell möglich ist, jedoch nicht innerhalb der in der Ausschreibung erwähnten 2 Stunden.

### Anforderung 3: Vernetzbarkeit

Lösung: Anbindung an Fernwirkanlagen der ÖBB

Vorteil: Streckenbetreiber werden im Fall eines Ereignisses direkt und nachvollziehbar informiert. In einer ersten Testphase könnte die Alarmierung auch mittels SMS oder Email stattfinden, bevor der Prototyp fertiggestellt wird.

Nachteil: Aufgrund der vorhandenen Relaisverbindung in die Fernwirkanlage muss die Alarmierung als diskretes Ja/Nein bzw. konkrete Alarmierungsstufe ausgegeben werden. Die Interpretation der Messergebnisse muss also bereits in der Bearbeitung an der Zwischenstation gemäß den Parametrierungen der Anwender erfolgen.

### Anforderung 4: Montage fix oder mobil, rasch

*Variante 1: Montage der Erschütterungssensoren im Gelände (Einzugsgebiet/Quellgebiet)*



**Foto 13. Gleisstrecke mit Stützmauer und steiler Konglomeratbank**



**Foto 14. Transfergebiet: Wildbach mit Geschiebeablagerungen**



**Foto 15. Transfergebiet: Schuttablagerungen im Planspitzgraben**

Vorteil: Durch die Detektion eines Murgangs oder Steinschlags direkt im Entstehungsbereich oder Transportbereich (siehe Foto 14 und Foto 15) erhöht sich die mögliche Vorwarnzeit für ein Ereignis.

Nachteil: Die Wahrscheinlichkeit eines Fehlalarms, insbesondere aufgrund der gemessenen Erschütterungen, ist größer als bei einer Montage im Einwirkungsbereich, da zum einen die Massenbewegung vor Erreichen der Gleise abgebremst werden könnte, zum anderen eine sehr komplexe und teilweise nicht 100% korrekte Filterung der Daten notwendig ist, um alle potentiellen Störeinflüsse (durch Wind, bewegte Vegetation, Regen, Wild/Menschen, etc.) zu eliminieren. Problematisch könnte außerdem die Montage der Erschütterungssensoren direkt im Gelände werden; verschiedenste Boden- und Untergrundbedingungen, sowie Hangneigungen würden ein einheitliches Fundament erfordern, damit eine homogene Ankopplung erzielt werden kann und eine diebstahlsichere Montage möglich ist. Die Installation solcher Fundamente bildet einen Zusatzaufwand gegenüber der Nutzung bestehender Masten/Gleisinfrastruktur zur Befestigung.

*Variante 2: Montage direkt im Einwirkungsbereich z.B. Gleis oder Schwelle*



**Foto 16. Verschiedene Schwellen entlang einer Strecke**



**Foto 17. Durchlass unter der Bahnstrecke (Brücke)**



**Foto 18. Bestehende Bahninfrastruktur. Oberbau, Masten, Fernsprechanlage.**

Vorteil: Eine Messung direkt im Einwirkungsbereich verringert die Wahrscheinlichkeit einer Fehlalarmierung aufgrund von z.B. erhöhtem Grundrauschen bei Vegetation oder Ereignisse, die vor Erreichen der Gleise abgebremst werden und den Gefahrenraum nie durchqueren. Außerdem ist durch die bessere Zugänglichkeit gegenüber dem steilen/bewachsenen Gelände neben den Gleisen eine leichtere Wartung möglich.

Die Nutzung bestehender Infrastruktur erleichtert eine diebstahlsichere Montage auf fixem Untergrund wie an den Schwellen, Schienen oder bestehenden Masten. Bezogen auf die Erschütterungssensoren erlauben diese Komponenten außerdem eine gute Ankopplung an den Boden, da es sich hier nicht um eine kontaktlose Messung handelt.

Nachteil: Eine Alarmierung findet erst bei Eintritt der Massenbewegung in den Gefahrenraum statt. Keine Vorwarnzeit für Züge, die sich bereits am Ort der Einwirkung befinden. Was die Kabel betrifft, wäre bei einer Langzeitinstallation noch zu beachten, dass diese die Instandhaltungsarbeiten (z.B. Stopfen) nicht stören bzw. die Installation selbst nicht beschädigt wird.

### *Variante 3: Montage an Schutzbauten*



**Foto 19. Geschieberechen**



**Foto 20. Schrägrechen mit seitlichen Stahlbetonscheiben**



**Foto 21. Fundament eines Stehers für ein Steinschlagnetz**



**Foto 22. Stahlsteher eines Steinschlagnetzes**

Vorteil: Ähnlich wie bei der Montage an bestehender Eisenbahninfrastruktur, besteht hier die Möglichkeit eines soliden Ankerpunktes der sowohl gute Ankopplung an den Untergrund garantiert, als auch eine diebstahlsichere Montage erlaubt. Da sich Schutzbauten im Allgemeinen im Transportgebiet der Massenbewegungen befinden, wäre die Montage hier statt direkt am Oberbau zwecks längerer Vorwarnzeiten zu bevorzugen. Die Wahrscheinlichkeit von anthropogenen Erschütterungsstöreinflüssen ist in entlegenen Gebieten reduziert; dies ist jedoch fallspezifisch zu prüfen, da vorbeiführende Straßen/Nähe zu Anrainern trotzdem Störquellen am Bauwerk darstellen.

Nachteil: Die Bauten befinden sich oft in dicht bewaldeten Abschnitten der Wildbäche, was zum einen den Einsatz von PV + Akku zwecks Stromversorgung erschwert, zum anderen keinen direkten Sichtkontakt für das Radar ins Gelände zulässt. Folglich kann es auch zu schlechtem Empfang bei der Kommunikation mit dem Aufnahmesystem kommen. Weiters setzt diese Form der Montage einen Abschnitt mit Schutzbauten voraus.

**In DESME angestrebte Lösung:** Montage der Erschütterungssensoren im Einwirkungsbereich. Hierdurch wird zwar in den meisten Fällen auf die längere Vorwarnzeit verzichtet, allerdings kann durch die Sensorpositionierung direkt an der Strecke die notwendige Datenauswertung vereinfacht werden. Wartung und Montage gestalten sich um ein Vielfaches einfacher und rascher als in steilen und entlegenen Quellgebieten, wo außerdem die Energieversorgung nicht immer gewährleistet werden kann. Durch Befestigung der Erschütterungssensoren an den Schwellen ist das System nicht für den mobilen Einsatz geeignet, sondern für eine Fix-Montage vorgesehen (es muss außerdem darauf geachtet werden, dass das befestigte Element durch Luftdruckschwankungen bei einer Vorbeifahrt nicht weggerissen wird). Es wurde auch überlegt, autarke Sensor Nodes (sogenannte „Motes“) statt verkabelte Sensoren zu verwenden. Hieraus ergeben sich aber einige Probleme, die einen aufwendigen Entwicklungsbedarf mit sich bringen würden: Zum einen müsste jeder Sensor ein kleines, lokales Solarpanel benötigen und zum anderen würden sehr große Funkstrecken anfallen, über die es gilt Daten zu übertragen. Vergangene hausinterne Projekte dazu haben gezeigt, dass dies einen zu hohen Stromverbrauch mit sich bringen würde und nur durch ein Multi-hop Routing der Daten bewältigt werden könnte. Trotz neuerer am Markt erhältlicher Systeme ist dieses Routingsystem voraussichtlich nicht innerhalb des vorgesehenen Projektzeitraums fehlerfrei implementierbar. Weiters würde sich mit den insularen Sensor nodes immer noch das Problem der diebstahlsicheren Montage ergeben.

Die zusätzliche Instrumentierung eines Gerinnes mit Erschütterungssensoren (z.B. im Falle von Murgängen, wo längere Vorwarnzeiten möglich wären) stellt einen unwirtschaftlichen Zusatzaufwand dar, da dieses Vorgehen die Notwendigkeit von speziell angefertigten Fundamenten sowie die Implementierung von Funkverbindung mit sich bringt (aus Sicht von AIT nicht innerhalb der vorgegebenen 15 Monate machbar, da diese Systeme erst entwickelt werden müssten).

### Anforderung 5: Konfiguration

Lösung: Freikonfigurierbar über Remotelogin (UMTS Modem)

Vorteil: Beliebige Parameter sind jederzeit einstellbar, ohne vor Ort sein zu müssen. Dies betrifft sowohl die Datenakquisition (z.B. Samplerate), wie auch die Grenzwerte, die das Alarmierungskriterium bilden. Vor allem in der Testphase, wo diese Werte für das jeweilige Szenario eingestellt werden müssen, sind Remoteeinstellungen von Vorteil.

Nachteil: Es muss immer UMTS bzw. GSM Empfang bestehen, um das System zu konfigurieren. Bei Absturz des Systems muss es außerdem eine verlässliche (eventuell sogar automatische) Möglichkeit eines Neustarts/Resets geben.

### Anforderung 6: Kostengünstig/Umweltfest

Lösung: siehe Anforderung 4 bezüglich umweltfester Montage und Gehäuse der Sensoren. Die zentrale Basisstation, an der sowohl die Daten aller Erschütterungssensoren als auch die Daten der Radarsensoren zusammenlaufen, besteht aus einem PC, Eventsammler und USV, die in einen wetterfesten Schrank eingebaut sind. An sich ist diese Einheit relativ transportabel um schnell andernorts in Betrieb genommen zu werden.

Die kostengünstige Gestaltung des Systems ergibt sich aus einer Kombination von ressourcensparendem Betrieb (minimale Datenübertragung, Netzstromversorgung) wie auch einer möglichst wartungsfreien und robusten Installation. Das geplante System seitens der Erschütterungssensorik umfasst dabei folgende Komponenten für die Prototypenentwicklung:

|          |   |
|----------|---|
| Sensorik | Bei den angedachten Erschütterungssensoren handelt es sich um Geräte der Firma KAS. Diese zeichnen sich durch sehr hohe Schockfestigkeit und Robustheit aus, sowie Temperaturwiderstand |
|----------|---|

|                             |   |
|-----------------------------|---|
|                             | <p>über große Bereiche. Sie erfüllen somit genau die Anforderungen an ein System das wetterfest im Gelände Stand halten muss (siehe Kapitel „Laborversuche: Tests mit Erschütterungssensoren und Datenauswertung“). Die verschiedenen KAS-Typen unterscheiden sich vorrangig in den auflösbaren Messbereichen und Frequenzbereich, sind jedoch von den Kosten her ähnlich.</p> <p>Notwendige Zusatzkomponenten wie Kabel, Steckverbindungen und wetterfeste Gehäuse sind problemlos am Markt erhältlich.</p>  |
| <p>Wandler &amp; Logger</p> | <p>Dies sind die aufwendigsten Posten im Messsystem. Da es sich beim DESME System um eine Dauerüberwachung handelt, muss eine kontinuierliche Datenerfassung und folglich auch eine kontinuierliche Auswertung ermöglicht werden. Diese Komponenten würden sich an einer Zwischenstation in einigen Metern Entfernung zu den Sensoren befinden. In dieser Messbox würden sich dann auch weitere Komponenten wie PC, Modem und Stromversorgung befinden.</p> <p>Da es in vielen Fällen um die Detektion von Aufprallen geht, sind dementsprechend hohe Abtastraten notwendig um die maximalen Amplituden der Stöße zu registrieren. Die Auswertung erfolgt danach in Echtzeit.</p> |
| <p>Processing</p>           | <p>Als stromsparende und kleinere Alternative zu regulären PCs käme hier ein sogenanntes Pandaboard in Frage. Zur Speicherung der Daten kann eine beliebig große SD Karte eingebaut werden. Die notwendige Auswertung kann direkt am Pandaboard erfolgen, während der Stromverbrauch nur 50% eines normalen PCs darstellt.</p> <p>Nach der Auswertung wird eine Nachricht über den Alarmbus an die Basisstation übermittelt, die wiederum mittels Relaiskontakt die Fernwirkanlage informiert.</p> <p>USV zum Aufrechterhalten der Datenerfassung und –auswertung wird ebenfalls an der Basisstation benötigt.</p>  |



## BEURTEILUNG DER MACHBARKEIT EINES FRÜHWARNSYSTEMS MIT ERSCHÜTTERUNGSSENSOREN

**Technische Machbarkeit:** Die Detektion von gravitativen Massenbewegungen im Einwirkungsbereich ist mittels Erschütterungssensoren technisch möglich. Alle der im System vorgesehenen Komponenten wurden in bestimmter Form bereits in existierenden Monitoringsystemen von AIT implementiert, die in Gebäuden oder Infrastrukturbauten wie Brücken zum Einsatz kommen; es handelt sich beim DESME System also um eine Erweiterung bzw. marginale Abänderung bereits vorhandener Technologien, was als die wirtschaftlichste und praktikabelste Lösung erscheint. Tabelle 11 enthält eine Zusammenfassung des Systems aus Sicht der Erschütterungssensorik.

**Tabelle 11. Überblick der Charakteristika des DESME Systems seitens der Erschütterungssensoren; gilt für Steinschlag und Murgangprozesse**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Komponenten                      | Sensorik:<br>Erschütterungssensoren (KAS) in regelmäßigen Abständen von 10 – 15 m an den Schwellen; Kabelverbindung zur Zwischenstation<br>Zwischenstation:<br>Logger, Wandler<br>Modem<br>Zwischenspeicherung<br>Basisstation:<br>Kombination mit Radar oder direkte Meldung an Fernwirkanlage<br>Energieversorgung |
| Parameter zur Prozessüberwachung | Ausbreitung der Schwingungen (Fahrtrichtung bei Zügen) bzw. Sensorposition bei Aufzeichnung eines Events<br>Schwingungsamplitude<br>Schwingungsdauer über bestimmtem Grenzwert<br>Frequenzinhalt<br>Alarmierung mit mehreren Stufen möglich  |
| Systemüberwachung                | PC Leistung<br>Signal von einzelnen Sensoren   |
| Meldungsausgabe                  | Schaltausgänge   |
| Messdaten                        | Lokale Zwischenspeicherung<br>Übergabe an Messdatenserver per UMTS   |

|  |   |
|--|---|
|  | Redundante Datenabfrage über GSM prinzipiell machbar  |
| Fernwartung                                      | Konfiguration per UMTS  |
| Installation                                     | Im Einwirkungsgebiet  |
| Messbereich                                      | Über die Breite des Oberbaus  |
| Abtastfrequenz                                   | 1 – 2 kHz   |
| Energieverbrauch                                 | ca.<br>170 mA für „Sensorbox“ (Zwischenstation)<br>170 mA für „Serverbox“ (Basisstation)<br>300 mA für PC   |
| Energieversorgung                                | Netzstrom   |
| Vorteile   | Dauerüberwachung eines Abschnitts möglich<br>Kombination mit Radarmessung (Redundanz)<br>Systemkomponenten bereits am Markt erhältlich (keine vorangehende Entwicklung mehr notwendig)<br>Wartungsarm<br>Selbsttests des Systems und der Sensoren möglich<br>Sowohl für Murgang als auch Steinschlag einsetzbar |
| Nachteile  | Beeinflussung durch Störeinflüsse aus der Umwelt eventuell trotz Filterkriterien möglich<br>Sensoren nicht schnell an anderen Streckenabschnitten einsetzbar<br>Kein Erkennen von Prozessen außerhalb des Einwirkbereichs   |
| Technische Erweiterungen zu bestehenden Systemen | Koppeln mehrerer Sensoren eines Typs<br>Kombination mit Radarsonden bzw. deren Alarmierungen<br>Weiterentwicklung bestehende AIT Auswertelgorithmen   |
| Fazit  | Technisch und wirtschaftlich prinzipiell umsetzbar  |

**Wirtschaftliche Machbarkeit:** Die Arbeiten sind im vorgesehen Zeitraum (15 Monate) und mit den geplanten personellen Ressourcen möglich.

## Literaturliste

Arattano, M. (1999) On the Use of Seismic Detectors as Monitoring and Warning Systems for Debris Flows. *Natural Hazards* 20, 197–213.

Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., McArdell, B.W. (2009) A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. *Natural Hazards* 49, 517–539.

Berger, C., McArdell, B.W., Schlunegger, F. (2011) Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116

Berti, M., Genevois, R., LaHusen, R., Simoni, A., Tecca, P.R. (2000) Debris Flow Monitoring in the Acquabona Watershed on the Dolomites (Italian Alps). *Phys. Chem. Earth (B)* Vol. 25, No. 9, pp. 707-715.

Graf, C., Badoux, A., McArdell, B.W. (2009) Alarmsystem Illgraben – Erfahrungen während der Pilotbetriebsphase. *Wasser Energie Luft* – 101. Jahrgang, Heft 2, CH-5401 Baden.

Huang, C.-J., Yin, H.-Y., Chen, C.-Y., Yeh, C.-H., Wang, C.-L. (2007) Ground vibrations produced by rock motions and debris flows. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Graf, C. (2003) Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal* 40: 161–175

Itakura, Y., Fujii, N., Sawada, T. (2000) Basic Characteristics of Ground Vibration Sensors for the Detection of Debris Flow. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, Vol. 254, No. 9, pp. 717-720.

Kogelnig, A., Hübl, J., Suriñach, E., Vilajosana, I., McArdell B.W. (2011) Infrasound produced by debris flow: propagation and frequency content evolution. Natural Hazards, Springer.

Kunnath, A.T., Ramesh, M.V., Selvan, V. (2010) Signal Processing for Wireless Geophone Network to Detect Landslides. International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE 2010), December 5-7, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia.

Lahusen, R.G. (1996) Detecting Debris Flows Using Ground Vibrations. U.S. Geological Survey Fact Sheet 236-96

Lavigne, F., Thouret, J.-C., Voight, B., Young, K., LaHusen, R., Marso, J., Suwa, H., Sumaryono, A., Sayudi, D.S., Dejean, M. (2000) Instrumental lahar monitoring at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. Journal of Volcanology and Geothermal Research 100, pp. 457–478.

Marchi, L., Arattano, M., Deganutti, A.M. (2002) Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). Geomorphology Vol. 46 pp. 1–17.

Marcial, S., Melosantos, A.A., Hadley, K.C., LaHusen, R.G., Marso, J.N. () Instrumental Lahar Monitoring at Mount Pinatubo. In: Fire and Mud: Eruption and Lahars of Mt. Pinatubo, Philippines. Univ. Washington Press, pp. 1015–1022.

SafeLand – “Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies”, 7th Framework Programme. Deliverable 4.1: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring, Februar 2012.

SafeLand – “Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies”, 7th Framework Programme.

Deliverable 4.5: Evaluation report on innovative monitoring and remote sensing methods and future technology, Juli 2011.

SafeLand – “Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies”, 7th Framework Programme.  
Deliverable 4.6: Report on evaluation of mass movement indicators, April 2012.

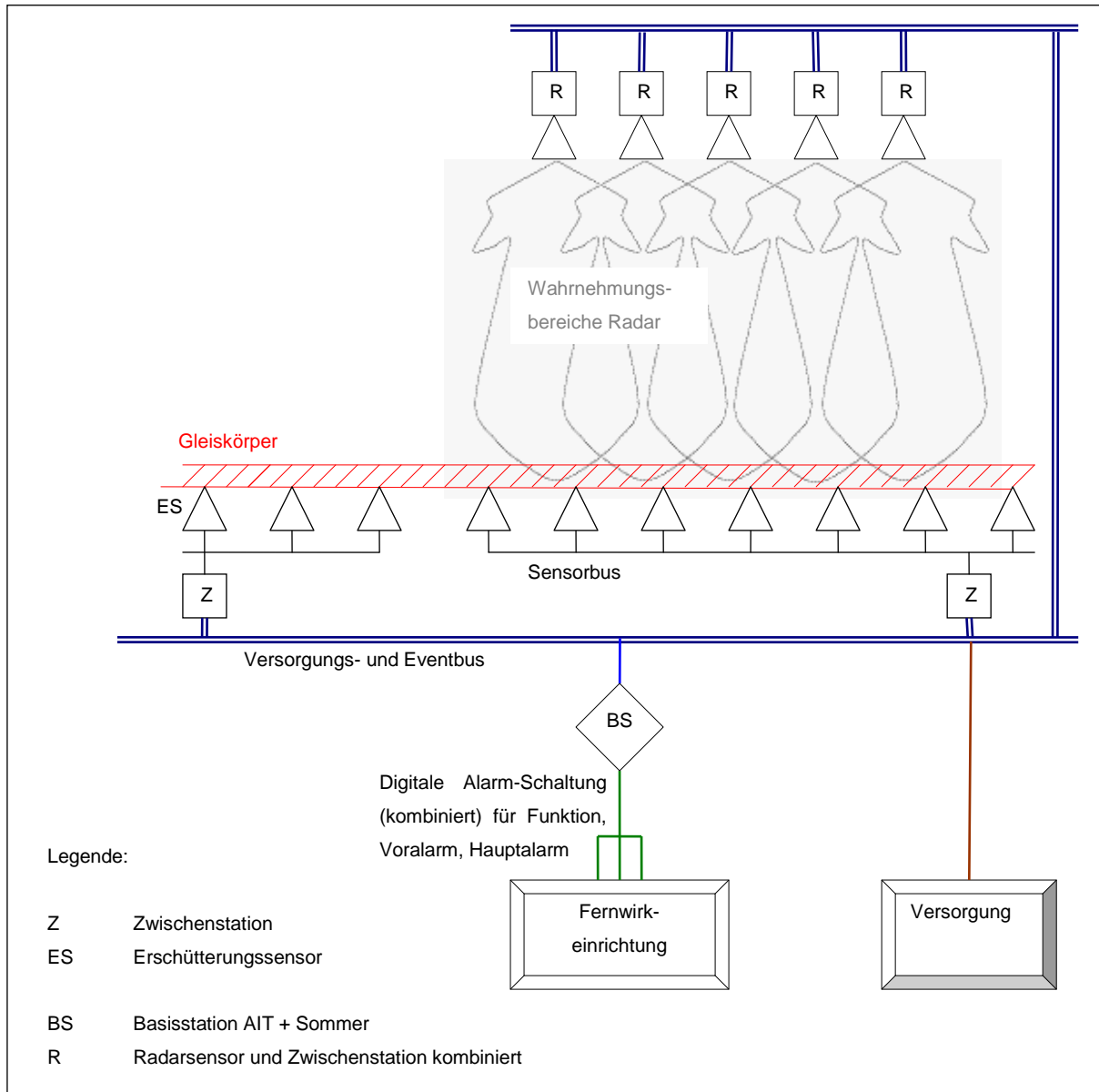
SafeLand – “Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies”, 7th Framework Programme.  
Deliverable 4.8: Guidelines for monitoring and early warning systems in Europe - design and required technology, März 2012.

Sosio, R., Crosta, G.B., Frattini, P. (2007) Field observations, rheological testing and numerical modelling of a debris-flow event. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 290–306.

## KOMBINATION DER MESSSYSTEME

### Technische Umsetzung für Warnsystem bei Stein- und Blockschlag

Die technische Umsetzung für ein Warnsystem bei Stein- und Blockschlag ist in Abbildung 25 schematisch dargestellt.



**Abbildung 25. Kombination von Radargeräten und Erschütterungsmessungen zur Steinschlagüberwachung**

Oberhalb des Gleiskörpers befinden sich überlappende Radargeräte, die auf das Einwirkgebiet hin gerichtet sind und jeweils einzeln die Bewegung von passierenden

Steinen melden. Am Gleiskörper selbst sind Erschütterungssensoren montiert, die das Aufschlagen von Steinen detektieren. Die jeweiligen Alarmmeldungen werden in einer Basisstation empfangen, gekoppelt und an eine Fernwirkanlage übergeben.

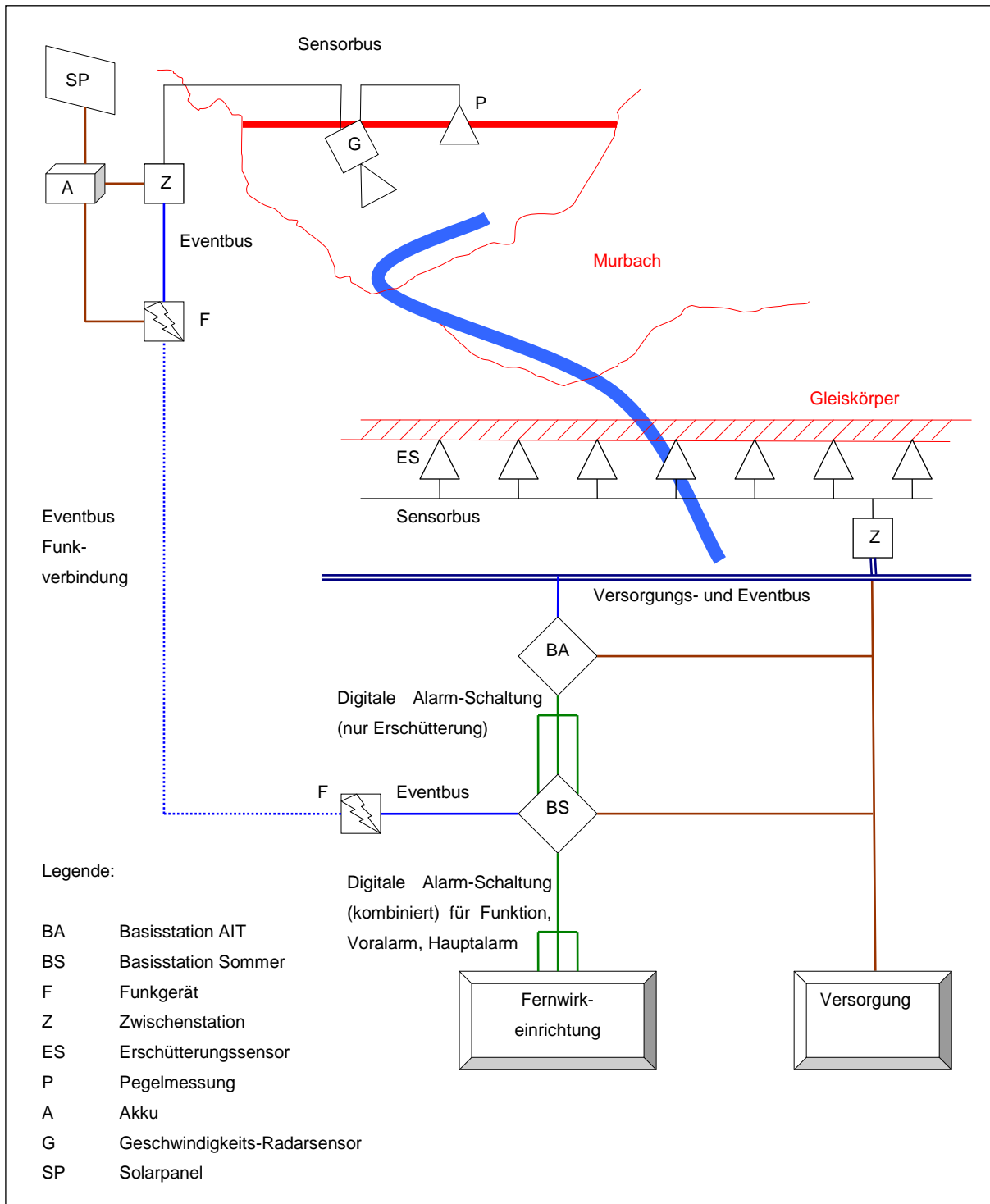
### **Technische Umsetzung für Warnsystem bei Murgängen**

Die technische Umsetzung für ein Warnsystem bei Stein- und Blockschlag ist in Abbildung 26 schematisch dargestellt. Im Transfergebiet befindet sich ein Radarsystem mit Radargerät und Pegelsensor. Das Auftreten von Murgängen wird im Datensammler der Zwischenstation gemeldet und eine Alarmmeldung per Funk versendet. Die Erschütterungssensoren sind wiederum am Gleiskörper montiert und melden das Auftreten des Murgangs im Einwirkungsbereich. Die Alarmmeldungen von beiden Messsystemen werden in einer Basisstation empfangen, ausgewertet und an eine Fernwirkanlage übergeben.

Die oben behandelten Detailuntersuchungen der Radar- und Erschütterungssensoren zeigen, dass sich die verwendeten Radarsensoren und die Erschütterungsmessung nicht in dem gewünschten Maß ergänzen:

Erschütterungsmessungen erlauben die Überwachung eines ausgedehnten Bereichs im Einwirkungsgebiet entlang von Gleisanlagen. Dabei sind die Erschütterungssensoren fix montiert und eine Netzversorgung wird benötigt. Um eine solche Situation mit Radargeräten zu überwachen, müssen oberhalb des Einwirkbereichs mehrere Radargeräte in einem Abstand von ca. 8 m aufgestellt werden. Dies ist relativ kostenintensiv und wirtschaftlich nur bedingt gerechtfertigt.

Im Gegensatz dazu ist ein Radarsystem zur Erkennung von Murgängen sehr gut geeignet. Die Sensoren sind berührungslos und können an Balken oder Seilen über Gräben im Transfergebiet installiert werden. Das System kann zudem auch mobil ausgelegt werden. Erschütterungssensoren wiederum können in der Regel nicht im Transfergebiet installiert werden und sind nicht mobil auslegbar. Eine fixe Installation im Einwirkungsgebiet ist jedoch möglich.



**Abbildung 26. Kombination von Radargeräten und Erschütterungsmessungen zur Murgangüberwachung**



## SCHLUSSFOLGERUNG – MACHBARKEIT

Der in diesem Ergebnisbericht erläuterte Prototyp, bestehend aus Radarsonden und Erschütterungssensoren ist technisch und wirtschaftlich machbar, unter folgenden Bedingungen:

Der Einsatz von Erschütterungssensoren an den Schwellen ist sowohl für Stein-/Blockschlagdetektion als auch Murgangdetektion prinzipiell möglich, stellt jedoch immer erst eine Detektion im Einwirkungsbereich dar und somit keine Frühwarnung für Züge, die sich bereits im betroffenen Abschnitt befinden. Eine Umstellung des bei AIT derzeit verwendeten Systems auf Wireless Sensor Nodes ist prinzipiell möglich, da diese auch bereits zu gewissem Maße fertig am Markt erhältlich sind. Es gibt allerdings keine Garantie, dass ein Umstieg auf „Motes“ innerhalb der 15 Monate von Phase 2 zu einem funktionierenden Prototyp führt – dazu sind längere Testphasen notwendig. Eine Anpassung des bestehenden verkabelten Monitoringsystems für den Einsatz an Eisenbahnstrecken ist somit wirtschaftlicher.

Der Einsatz von Radarsonden ist für Stein-/Blockschlagdetektion technisch möglich, jedoch nicht wirtschaftlich, da die Sonden in sehr kurzen Abständen erforderlich wären (große Stückzahlen) und einen unverhältnismäßig großen Aufwand hinsichtlich Montage und einzusetzender Geräte darstellen. Wie oben erwähnt würde dies außerdem keine Frühwarnung für bereits im Abschnitt befindliche Züge darstellen.

Für den Einsatz bei Murgängen hat sich das Radargerät der Firma Sommer aber bereits technisch und wirtschaftlich bewährt: insularer/autarker Betrieb ist implementierbar und stellt eine Möglichkeit zur Frühwarnung dar, die je nach topografischen Bedingungen sogar mehrere Minuten sein kann.

Die Kombination der Messsysteme ist prinzipiell möglich. Jedoch erscheint sie zum jetzigen Zeitpunkt nur zur Überwachung von Murgängen sinnvoll, bei denen ein Radarsystem im Transfergebiet und eine Erschütterungsmessung im Einwirkungsgebiet fest installiert werden.