

# Monitoring mit Time Domain Reflectometry (TDR)

John SINGER und Kurosch THURO

*Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Organisationskomitee als „reviewed paper“ angenommen.*

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren ist die Zeitbereichsreflektometrie (engl: Time Domain Reflectometry, TDR) als ein neues System zur Überwachung von Hangbewegungen eingeführt worden. Das Funktionsprinzip von TDR ist dem des Radars ähnlich: Stromimpulse werden durch ein in den Untergrund eingebrachtes Koaxialkabel (Messstrecke) geschickt und deren Reflexionen in Abhängigkeit von deren Laufzeit betrachtet. Tritt eine Störung in der Kabelgeometrie auf - verursacht z.B. durch die Bewegung des Hanges - kann dies anhand der Reflexe erkannt werden. Dabei wird die Tiefenlage der Störung über eine genaue Zeitmessung zwischen dem Zeitpunkt der Emission des Stromimpulses und dem Empfang des reflektierten Signals bestimmt, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im Kabel konstant ist. Durch eine Analyse der reflektierten Signale können zudem Informationen über Ausmaß und Art der Störung gewonnen werden.

Die Qualität von TDR Messungen ist stark von den verwendeten Einbauparametern (Typ des Koaxialkabels, Injektionsgut etc.) abhängig, die nach Möglichkeit jeweils auf die vorliegende Situation (Bewegungsraten, Mechanismus) angepasst werden müssen.

Mit Hilfe von Scherversuchen im Labor an einem eigens dafür entworfenen Versuchsstand werden momentan optimierte Einbaustandards für verschiedene typische Hangbewegungsarten entwickelt. Des Weiteren wird an softwaregestützten Auswertungsverfahren gearbeitet, die auf Grundlage dieser standardisierten TDR Messungen eine schnelle Interpretation der gewonnenen Daten ermöglichen sollen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Daten mehrerer TDR Messstellen zusammengefügt werden sollen, um ein 3D Modell der Deformationszone zu erstellen.

Da die Installationskosten im Vergleich zu Inklinometern verhältnismäßig gering ausfallen (kleinerer Bohrdurchmesser, niedrige Materialkosten) und die Messdaten kontinuierlich und auch per Fernabfrage gewonnen werden können, kann mit einem TDR-System bei der Überwachung von Hangbewegungen bei gleichem Kostenaufwand räumlich wie zeitlich eine deutlich höhere Datendichte erzielt werden. Diese ist für die Kalibrierung von numerischen Modellen der Hangbewegungen von großem Vorteil und insbesondere wichtig, um den Einfluss von Triggerereignissen (wie z.B. starken Regenfällen) auf die Deformationszone schnell feststellen zu können.

## 1 Einführung

Obwohl in den letzten Jahren große Fortschritte in der Erkennung, Vorhersage und Risikominderung von Hangbewegungen gemacht wurden, verursachen vor allem in alpinen Regionen große Ereignisse immer noch große ökonomische Schäden. Insbesondere bei Extremwetter-Ereignissen, wie z.B. dem Starkregen im August 2005, können instabile Hänge aktiviert werden und Menschen, Siedlungen und Wirtschaftsgüter in seiner Umgebung bedrohen. Momentan ist durch den Klimawandel eine Verschärfung dieser Problematik zu erkennen.

Hangbewegungen, die sich in der jüngeren Vergangenheit im alpinen Raum ereigneten, zeigen den Bedarf für ein besseres Verständnis der geologischen und physikalischen Prozesse, die zu einem spontanen Versagen eines natürlichen Hanges führen können. Große Hangbewegungen, wie z.B. Vajont (1963, Italien) oder Randa (1991, Schweiz) und kleinere Ereignisse wie Sibratsgfall (1999, Österreich) zeigen das zerstörerische Potential dieser Massenbewegungen und die Notwendigkeit für das Verständnis der Mechanik solcher Prozesse. Fortschritte in der Ermittlung des Risikos, das von Hangbewegungen ausgeht, werden nur dann erreicht werden, wenn die auslösenden Einflüsse und die Kinematik der Bewegungen besser verstanden werden.

Um dies zu erreichen, muss ein mutmaßlich instabiler Hang ingenieurgeologisch untersucht und anschließend mit einem geeigneten Überwachungssystem kontinuierlich überwacht werden. Verschiedene Instrumente und Methoden sind für diese Aufgabe verfügbar, aber aus ökonomischen Gründen werden diese nur selten angewendet. Gleichzeitig steigt jedoch die Anzahl der Lokalitäten mit Überwachungsbedarf merklich. Deshalb ist das Ziel der momentan an der Technischen Universität München und der Universität der Bundeswehr München durchgeführten Forschungsarbeiten ein relativ ökonomisch arbeitendes und einfach und universell anwendbares Überwachungssystem und Frühwarnsystem für instabile Hänge zu entwickeln.

Das Überwachungssystem basiert dabei auf der Integration von innovativen und ökonomischen Messtechnologien zu einem Geo-Sensor-Netzwerk. Eines von diesen ist das Time Domain Reflectometry (TDR) System, das verwendet werden soll, um Bewegungen im Untergrund zu detektieren.

Time Domain Reflectometry ist vielerorts bereits als System zur Messung der Bodenfeuchte im Einsatz (TOPP et al. 1980). Mit wenigen Modifikationen kann TDR auch für die Überwachung von örtlich begrenzten Deformationen im Untergrund verwendet werden. Bis heute hat diese Anwendung nur in Nordamerika einen größeren Anwenderkreis; in Europa ist sie weitestgehend noch unbekannt. Dies liegt sicher in der Tatsache begründet, dass bislang die meiste Entwicklungsarbeit an der Northwestern University (Evanston/Chicago, Illinois) unter der Leitung von Ch. H. Dowding und K. M. O'Connor durchgeführt worden ist. Sie haben zweifelsfrei die Verwendbarkeit von TDR bei der Überwachung von Hangbewegungen nachgewiesen (O'CONNOR & DOWDING 1999).

Vor allem die vergleichbar einfache und günstige Installation, gepaart mit der Möglichkeit eine kontinuierliche und per Datenfernübertragung abrufbare Messung zu realisieren, machen das TDR System zu einer interessanten Alternative zu klassischen Inklinometern.

Momentan sind TDR Systeme in der Lage, die exakte Tiefe einer Deformationszone zu ermitteln, während über den Betrag der Bewegung nur halbquantitative Aussagen getroffen werden können. Die Orientierung der Bewegung kann nicht bestimmt werden. Des Weiteren ist die Anwendung momentan meist auf Hangbewegungen beschränkt, bei denen die Deformationen entlang einer diskreten Scherbahn verlaufen, wie es für Bewegungen in Festgesteinen typisch ist (z.B. Scherung entlang von Klüftflächen) (KANE ET AL. 2001).

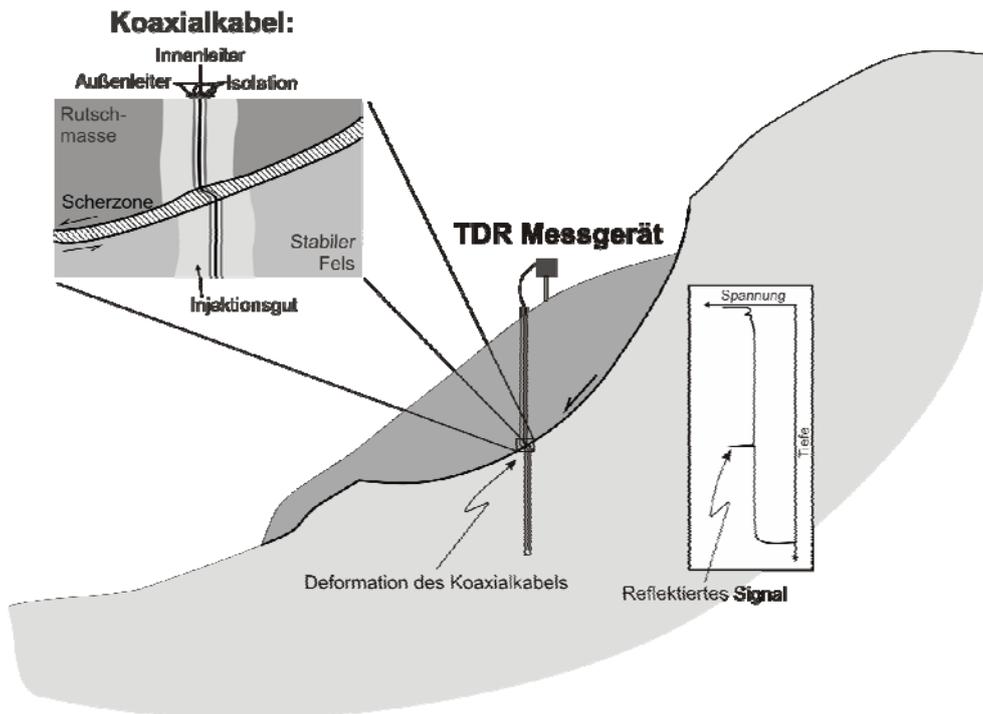
Nach Meinung der Autoren können einige der genannten Einschränkungen des TDR Systems durch die Definition standardisierter auf die jeweiligen geologischen Verhältnisse angepasster Installations- und Auswertungsverfahren überwunden werden. Des Weiteren sind noch Arbeitsverfahren zu entwickeln, wie Messdaten mehrerer TDR Messstellen untereinander und mit anderen Messdaten verknüpft werden können, um ein kinematisches 3D Modell der Hangbewegung zu erstellen. Dieser Beitrag stellt das geplante Forschungsprojekt vor und präsentiert erste Ergebnisse.

## 2 Grundprinzip der TDR Messungen

Die Funktion eines TDR Systems ist vergleichbar mit der eines Radarsystems: Dort werden elektromagnetische Wellen von einem Sender ausgestrahlt. Sobald diese auf ein Hindernis treffen (wie z.B. ein Flugzeug) werden diese zum Sender bzw. zu dem dort installierten Empfänger reflektiert, wo sie aufgenommen und analysiert werden. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen bekannt ist (Lichtgeschwindigkeit), kann die Distanz zwischen Sender und Hindernis bestimmt werden, indem die Zeitspanne ermittelt wird, die zwischen dem Aussenden des Signals und dem Empfang der Reflexion liegt. Des Weiteren können durch eine Analyse des Signals Informationen über das Hindernis wie z.B. dessen Größe oder Form gewonnen werden.

Das TDR System kann als „kabelgebundenes Radar“ beschrieben werden: Das TDR Messgerät schickt wiederholt elektrische Pulse durch ein Koaxialkabel (vgl. Abbildung 1). Das Koaxialkabel besteht aus einem Innenleiter, der getrennt durch einen Isolator (z.B. PE Schaum), röhrenförmig von einem Außenleiter umgeben wird. TV-Kabel sind typische Beispiele für Koaxialkabel. Wenn die eingespeisten TDR Signale auf eine Deformation des Koaxialkabels treffen, werden die Signale teilweise zum Messgerät zurückgeworfen, wo sie empfangen und aufgezeichnet werden. Wie beim Radar kann über die Bestimmung der Laufzeit des Signals die Entfernung zwischen Messgerät und Deformation bestimmt werden, da auch hier die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im Kabel konstant und bekannt ist. Des Weiteren können über die Analyse des empfangenen Signals (Amplitude, Breite, Form usw.) weitere Informationen über Art und Betrag der Deformation gewonnen werden.

Für die Überwachung von Hangbewegungen wird das Kabel in ein Bohrloch eingebracht und mit dem umgebenden Gebirge mit Hilfe eines Injektionsguts (z.B. Zement-Bentonit-Mischung) verbunden. Wenn sich das umgebende Gebirge differenziell bewegt, wird das Koaxialkabel im Bereich der Scherbahn deformiert. Dabei wird der Abstand zwischen dem Innen- und Außenleiter des Kabels verändert, was zu einer Veränderung der Impedanz (Wellenwiderstandes) an dieser Stelle führt und mit dem TDR Messgerät erfasst werden kann. Eine detaillierte Schilderung der physikalischen Grundlagen des TDR Systems ist bei O'CONNOR & DOWDING (1999) zu finden.



**Abb. 1:** Skizze eines TDR Systems zur Überwachung von Hangbewegungen. Das Koaxialkabel wird in den instabilen Hang installiert und mit dem TDR Kabeltester verbunden. Sobald das Koaxialkabel durch die im Hang auftretenden Bewegungen deformiert wird, wird eine Reflexion im TDR Messgerät sichtbar, deren Amplitude direkt von dem Deformationsbetrag abhängt.

### 3 Installation des TDR Systems

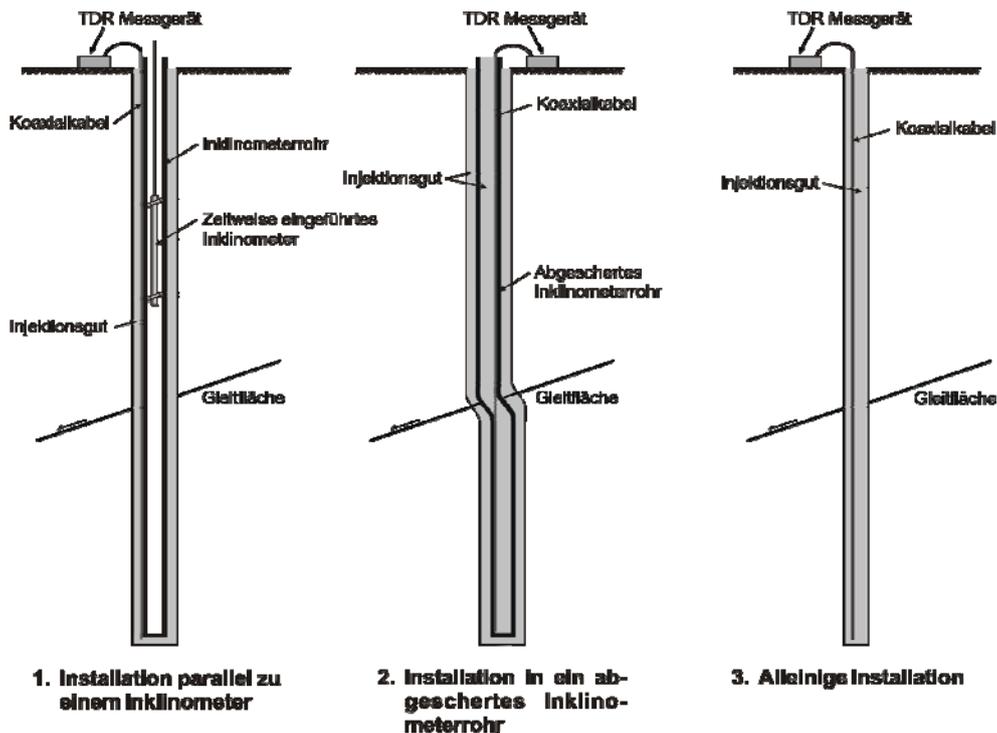
Wie bereits erwähnt, besteht ein TDR System im Wesentlichen aus zwei Komponenten: dem TDR Messgerät und dem Koaxialkabel. Bei der Überwachung von Hangbewegungen wird das Koaxialkabel in ein Bohrloch installiert und mit Hilfe eines Injektionsguts mit dem Gebirge verbunden. Drei verschiedene Installations-Szenarien sind prinzipiell denkbar (vgl. Abbildung 2):

1. Installation eines TDR Kabels parallel zu einem Inklinometer;
2. Installation eines TDR Kabels in ein abgeschertes Inklinometerrohr;
3. eigenständige Installation eines TDR Kabels.

Die Installation parallel zu einem Inklinometer in dem selben Bohrloch ist sicherlich vor allem während der Entwicklung des TDR Systems interessant, da hier ein direkter Vergleich zwischen der Inklinometer- und der TDR-Messung möglich gemacht wird. Deshalb

wird diese Methode – wann immer möglich – während der Erprobungsphase dieses Forschungsvorhabens angewandt werden. Dies ist auch in der Vergangenheit bereits mehrfach geschehen (vgl. KANE & BECK 1996, KANE ET. AL. 1996 und FREEMAN 1996).

Die Installationsmethoden 2 und 3 sind sicher eher von kommerziellem Nutzen. Option 2, da sie die Verlängerung der Lebensdauer eines Inklinometer-Bohrlochs möglich macht; Option 3, da eine TDR Messstelle aufgrund des im Vergleich geringeren Bohrdurchmessers mit vergleichsweise geringen Kosten erstellt werden kann. (O'CONNOR & DOWDING 1999).



**Abb. 2:** Mögliche Installationsanordnungen eines Koaxialkabels in ein Bohrloch mit und ohne Inklinometer.

#### 4 Einflussfaktoren auf die TDR Messung

Viele verschiedene Faktoren haben Einfluss auf die Messung von Deformationen mit Hilfe eines TDR Systems (O'CONNOR & DOWDING 1999). Diese können grob in drei Gruppen eingeteilt werden:

1. Die Deformation des Kabels selbst,
2. die Installationsparameter beim Einbau des Koaxialkabels in das Bohrloch,
3. äußere Fremdeinflüsse auf das TDR System.

## 4.1 Deformation

Die Grundlage der Deformationsmessung mit dem TDR System ist die Erfassung von TDR Signalen, die durch die Deformation des Koaxialkabels verursacht werden. Die Form und die Größe der aus der resultierenden TDR Signale hängen im Wesentlichen von der Art der Deformation, dem Betrag der Deformation und der Breite der Deformationszone (Länge des Kabelabschnitts, welches deformiert wird) ab. Innerhalb bestimmter Messbereiche, die je nach verwendetem Koaxialkabel verschieden sind, ist die Amplitude der gemessenen Signale direkt abhängig vom Betrag der Deformation des Kabels (SU 1987).

Durch die Analyse der Wellenform können gewisse Aussagen über die Art der Deformation (Unterscheidung von Scherung, Dehnung, Knickung und Stauchung) getroffen werden. Die Breite der Deformationszone spiegelt sich direkt in der Breite des empfangenen Signals wieder. Allerdings nimmt bei sequentieller Deformation die Sensibilität der Messmethode deutlich ab – im Extremfall kann ein langsames Biegen des Kabels über eine längere Strecke gar nicht erfasst werden. Dies beschränkt den Einsatzbereich des TDR Systems auf Hangbewegungen mit stark lokalisierter Scherbahn.

## 4.2 Installationsparameter

Natürlich haben die verwendeten Komponenten eines TDR Systems und die Art und Weise, wie das System in einer Hangbewegung installiert ist, einen großen Einfluss auf die Messung. Vor allem zwei Parameter sind hier hervorzuheben: die Art des verwendeten Koaxialkabels und die physikalischen Eigenschaften des Injektionsguts, mit dem das Kabel an das Gebirge gekoppelt wird.

Nicht nur das Material (Leiter, Nichtleiter, Ummantelung), aus dem das Kabel hergestellt ist, sondern vor allem auch der Durchmesser des Kabels hat entscheidenden Einfluss auf die Messung. Generell können dickere Kabel größere Mengen an Deformation aufnehmen, bevor sie abscheren und unbrauchbar werden; gleichzeitig nimmt aber die Sensibilität für geringe Deformationen ab. So muss der Durchmesser des Kabels immer in Relation zu den erwarteten Bewegungsraten gewählt werden: dünnere Kabel eignen sich eher für „langsame“ Bewegungen (mm/a), dickere Kabel eher für „schnelle“ (> cm/a). Eine parallele Installation von Kabeln verschiedenen Durchmessers in ein Bohrloch ist möglich.

Das Injektionsgut verbindet das Koaxialkabel mit dem Gebirge. Dementsprechend ist es wichtig, die physikalischen Eigenschaften des Injektionsmittels auf die vorliegende Geologie anzupassen. Dies gilt besonders in Lockergesteinen mit geringer Festigkeit. Wenn hier ein zu festes Injektionsmittel gewählt wird, kann es zu einem „Pfahl-Effekt“ kommen: der Boden bewegt sich um den Bohrstrang aus Injektionsgut und Kabel herum, was zu verringerten oder gar keinen Deformationen im Messkabel führt und das entsprechende Messergebnis verfälscht.

Ein Anpassen der Installationsparameter des TDR Systems an die vorliegende geologische Situation und den zu erwartenden Deformationsraten kann so die Qualität der Messung beträchtlich erhöhen. Dies ist eines der Ziele des laufenden Forschungsvorhabens: die Definition von standardisierten Installationsparametern für verschiedene typische Geologien und Deformationsraten.

### 4.3 Äußere Einflüsse

Da die TDR Messungen auf elektromagnetischen Pulsen basieren, die durch das Koaxialkabel wandern, könnten die elektrischen bzw. magnetischen Eigenschaften des umgebenden Gebirges Einflüsse auf die Messung haben. Glücklicherweise sind die elektromagnetischen Pulse, die für die Messung von Deformationen verwendet werden, größtenteils auf den Bereich innerhalb des Koaxialkabels beschränkt, welcher konstante und definierte elektrische Eigenschaften besitzt. Deshalb scheinen die äußeren Einflüsse vernachlässigbar zu sein, was jedoch noch durch entsprechende Versuche nachgewiesen werden muss.

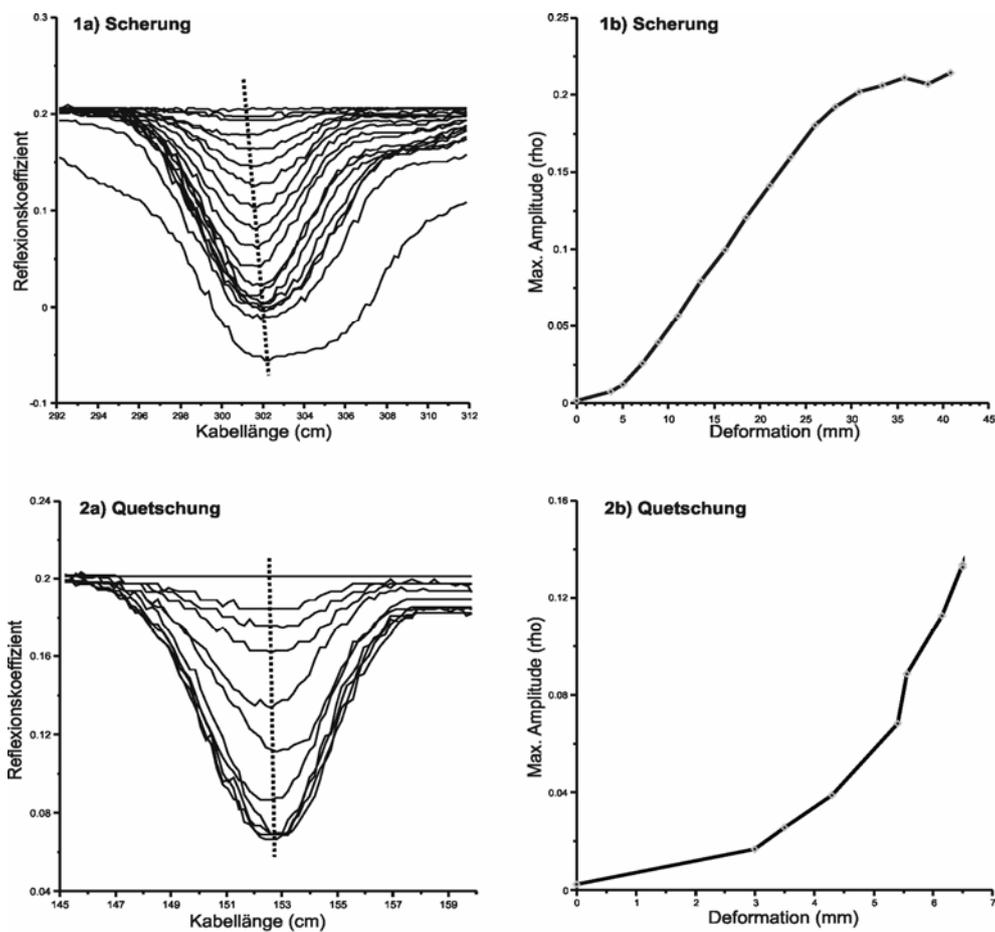
## 5 Das Forschungsvorhaben

Die Anwendung von TDR Systemen für die Überwachung von Hangbewegungen ist in der Vergangenheit bereits in mehreren Labor- und Feldtests als praktikabel bewiesen worden (z.B. KANE et al. 2001, KANE & BECK 1996, DUSSUD 2002). Allerdings sind bislang nur wenige systematische Versuchsreihen durchgeführt worden, so dass noch keine optimierte Installationsparameter für wechselnde geologische und geomechanische Umgebungsbedingungen entwickelt werden konnten. Vor allem die richtige Kombination von Koaxialkabeltyp und Festigkeit des Injektionsguts spielt eine große Rolle. Zusätzlich kommen Sondermaßnahmen bei der Installation in Betracht, wie z.B. die Realisierung von Sollbruchstellen im Injektionsgut bei der Installation in Lockergesteinen.

Die Definition und Erprobung solcher Einbaustandards ist ein wesentliches Ziel des voraussichtlich von dem deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsvorhabens. Dazu werden momentan im ersten Schritt verschiedene Kabel- und Injektionsgut-Kombinationen in einer großen Anzahl von einfachen Scherversuchen auf ihre charakteristischen geomechanischen Eigenschaften hin geprüft und die entsprechenden TDR Messsignale bezüglich der Nutzbarkeit für die Deformationsmessung ausgewertet. Aus diesen Daten werden mehrere auf verschiedene geologische Rahmenbedingungen optimierte Installationsmethoden entwickelt, die dann in einem zweiten Schritt in Feldversuchen erprobt werden müssen. Dabei sollten die TDR Messungen nach Möglichkeit parallel zu Inklinometermessungen durchgeführt werden, um diese direkt miteinander vergleichen und so die TDR Messungen verifizieren zu können. Falls nötig, müssen die zuvor entwickelten Installationsstandards nach den Erfahrungen aus den Feldversuchen nochmals weiter angepasst und optimiert werden.

## 6 Erste Ergebnisse

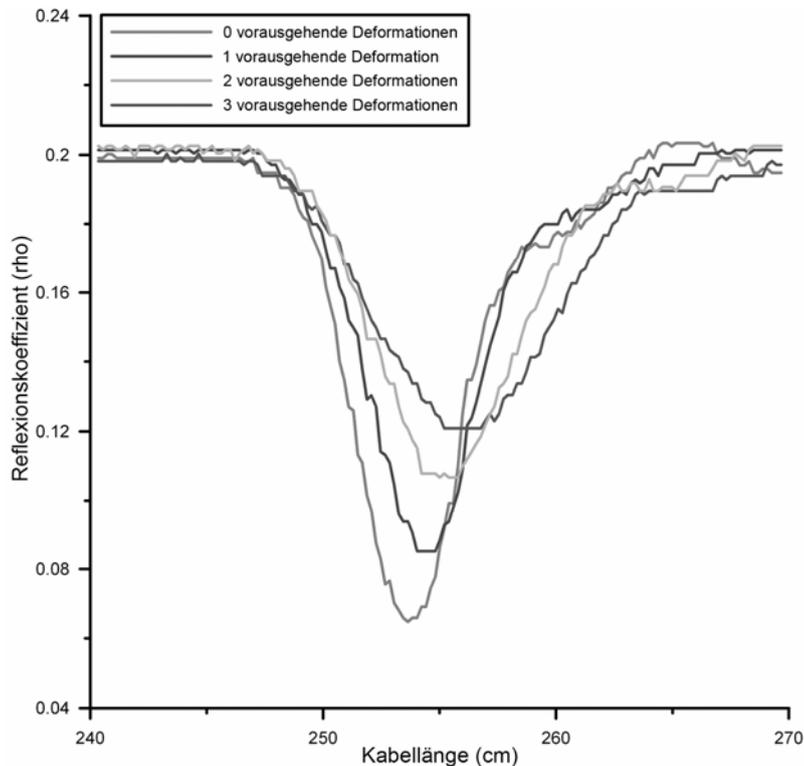
Die ersten einfachen Scherversuche konnten die Abhängigkeit zwischen dem Deformationsbetrag und der Amplitude des empfangenen Signals bestätigen, wie dies bereits zuvor bei verschiedenen Autoren geschehen ist (z.B. SU 1987). Dieser Zusammenhang, der in Abbildung 3.1b dargestellt ist, ist nicht linear. Vor allem am Anfang und am Ende des Scherversuchs ist das Verhältnis Amplitude / Deformation deutlich reduziert und das TDR System deshalb weniger empfindlich.



**Abb. 3:** Ergebnisse von TDR Messungen bei einer Scherung (1) und einer Quetschung (2) des Koaxialkabels. Bei der Scherung ist mit zunehmender Deformation ein langsames Abwandern der Höchstwerte nach hinten zu beobachten (1a). Bei der Quetschung ist dieses Verhalten nicht zu beobachten – die Maxima bleiben an derselben Stelle (2a). Dieses Verhalten kann möglicherweise zur Unterscheidung von Deformationstypen herangezogen werden. Der Anstieg der maximalen Amplitude der Reflexe mit zunehmender Deformation ist in den Diagrammen 1b und 2b zu sehen. Die Messungen wurden mit einem Campbell Scientific TDR 100 Time Domain Reflectometer und einem CommScope P3 500 CA Koaxialkabel mit 12 mm Durchmesser durchgeführt.

Diese Abhängigkeit ändert sich für verschiedene Deformationsarten (vgl. Abbildung 3): während eine Scherdeformation von 5 mm ein Signal mit einer Amplitude von 0.01 rho (Reflexionskoeffizient) verursacht, erhält man bei Quetschung des Kabels um den selben Betrag ein deutlich stärkeres Signal von 0.06 rho.

Folglich ist die Bestimmung des Deformationsmechanismus entscheidend für eine quantitative Analyse der TDR Messsignale. Oft kann mit zunehmender Deformation die Art der Deformation anhand der Signale zumindest abgeschätzt werden. Bei Hangbewegungen wird in den meisten Fällen die Scherdeformation dominieren, so dass zunächst diese Annahme zur Auswertung herangezogen werden kann.



**Abb. 4:** Einfluss von multiplen Deformationen auf die TDR Messungen. Zunächst wurde ein „crimp“ (Quetschung des Kabels) bei einer Kabellänge von 250 cm gesetzt und mit dem TDR Kabeltester gemessen (Linie mit größter Amplitude). Dann wurden nach und nach drei weitere crimps vor den bereits bestehenden an den Positionen 50, 100 und 150 cm gesetzt und wiederum mit dem TDR Messgerät vermessen. Die Erniedrigung der Amplitude des reflektierten Signals durch die im Kabel weiter vorne liegenden crimps kann bis zu 30 % erreichen.

In die Analyse der TDR Messdaten muss zudem die Entfernung zwischen Messgerät und Deformation einfließen. Aufgrund der Dämpfung des elektromagnetischen Signals im Kabel, werden die reflektierten Signale bei gleicher Deformation immer schwächer und breiter je größer der Abstand zum Messgerät ist. Dies führt zu einer Verringerung der räumlichen Auflösung (kleinster Abstand zwischen zwei Kabeldeformationsstellen, der noch erfasst werden kann). Der Effekt der Dämpfung kann jedoch durch nachträgliche Korrekturen

(z.B. über Korrelationskurven, die die Dämpfung in Abhängigkeit der Länge des Kabels zeigen) eliminiert werden. Dieses Vorgehen wurde bereits von KIM (1989) vorgeschlagen.

Mit dem TDR System können auch multiple Deformationen in einem Koaxialkabel untersucht werden. Allerdings werden die Messungen der weiter hinten im Kabel liegenden Deformationen stark von denen weiter vorne beeinflusst (vgl. Abbildung 4). Im Gegensatz zu den Beobachtungen von PIERCE et al. (1994), der nur minimale Abweichungen der Messungen aufgrund multipler Deformationen feststellte, haben die neuerdings durchgeführten Versuche einen Abfall in der max. Amplitude von 30 % auf Grund von 3 vorhergehenden Deformationen gezeigt. Diese Veränderung der Messergebnisse ist nur schwer zu korrigieren, da sie von der Position, Anzahl und Größe der vorangegangenen Störungen des Kabels abhängig ist. Dies führt zu einer deutlich erschwerten quantitativen Interpretation solcher Signale. Die Anwendung sogenannter „Crimps“ (Quetschungen des Kabels in definierten Abständen), wie sie von einigen Autoren (z.B. KANE ET AL. 2001) zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit eingesetzt werden, kann deshalb nicht unterstützt werden.

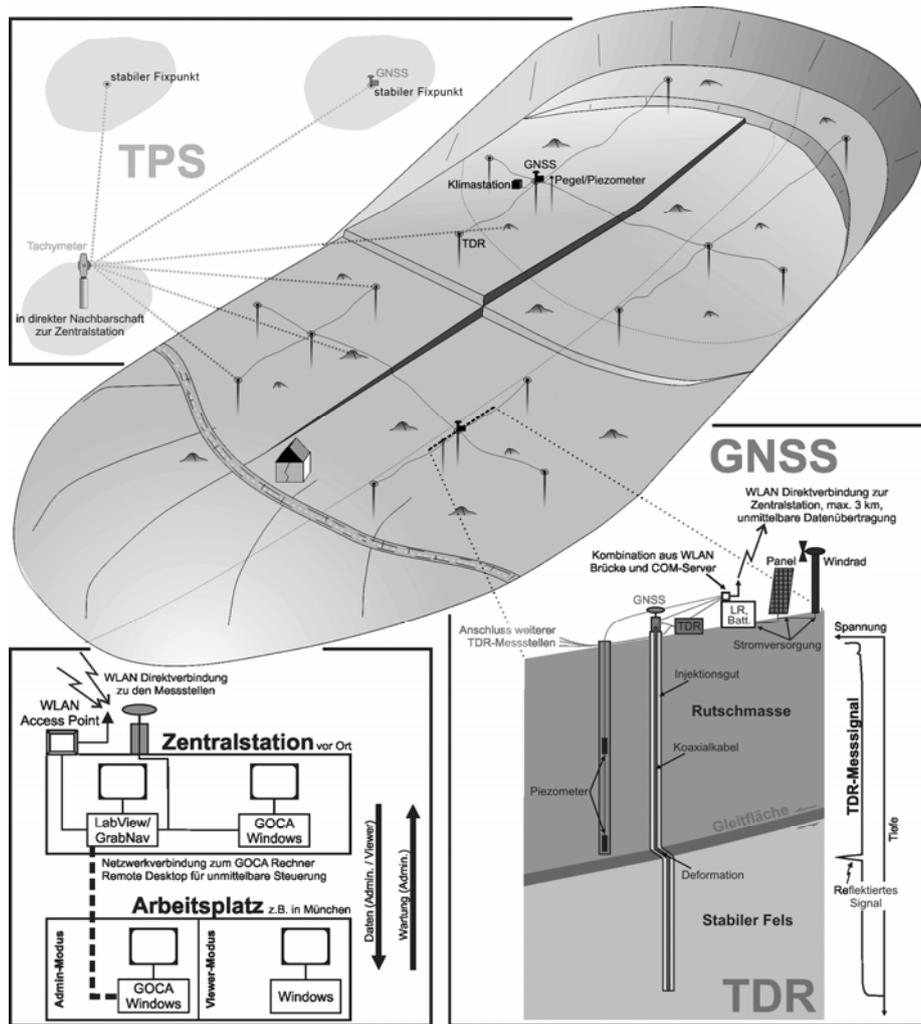
## 7 Ausblick

Das Gesamtziel des voraussichtlich vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens, das in den nächsten 3 Jahren an der TU München (Lehrstuhl für Ingenieurgeologie (Prof. Thuro) und Lehrstuhl für Geodäsie (Prof. Wunderlich)) und UniBW München (Institut für Geodäsie (Prof. Heunecke)) durchgeführt werden wird, ist die Entwicklung eines kontinuierlich messenden 3D-Monitoring Systems für instabile Hänge, welches unter anderem auf der TDR Technologie basiert. Dies soll erreicht werden, indem mehrere TDR Messstellen über den instabilen Hang verteilt installiert werden (vgl. Abbildung 5), die die Deformationen im Untergrund kontinuierlich überwachen. Zusätzlich sollten die Oberflächenbewegungen mit Hilfe von geodätischen Messmethoden (Tachymetrie und/oder GPS) überwacht werden.

Parallel zu den Bewegungsmessungen müssen die Porenwasserdrücke oder der Grundwasserspiegel, sowie die klimatischen Bedingungen (Niederschläge, Temperaturen, Schneetiefe) im Bereich des Hanges erfasst werden. Auf diese Art und Weise können die 3D Bewegungen des Hanges, welche nahezu in Echtzeit bestimmt werden, mit den Umgebungsbedingungen verglichen werden und so auf Triggermechanismen hin untersucht werden.

Durch die große Menge an gesammelten Daten – sowohl in Raum, wie auch in Zeit – sollte es möglich sein, temporale und kausale Abhängigkeiten zwischen den wichtigsten die Hangbewegung beeinflussenden Faktoren und den Bewegungsraten der Hangbewegung in relativ kurzer Zeit (6 bis 9 Monate) zu ermitteln. Dies wird die Definition von kritischen Schwellenwerten für die Triggerfaktoren ermöglichen. Werden diese überschritten, können über eine automatisierte Alarmfunktion die zuständigen Behörden informiert werden. So kann ein vollständiges Frühwarnsystem realisiert werden.

Zusätzlich zu diesem empirischen Ansatz werden die durch das Überwachungssystem gewonnenen Daten sowie die Informationen aus der obligatorischen ingenieurgeologischen Kartierung in ein numerisches Modell des instabilen Hanges fließen. Dies wird zu einem besseren Verständnis der der Hangbewegung zugrunde liegenden mechanischen Vorgänge führen. Auf Basis der numerischen Modellierung ist dann eine bessere Gefahrenanalyse möglich.



**Abb. 5:** Schematische Zeichnung eines integrativen 3D Frühwarnsystems für instabile Hänge. GNSS (Global Navigation Satellite System; z.B. GPS oder GALILEO) und TDR generieren punktuell laufend hochgenaue Informationen zu den ablaufenden Bewegungen über bzw. unter der Erde. Das GNSS basiert auf vier Low-Cost L1-Empfängern (nicht RTK fähig), von denen eine im mutmaßlichen Stabilbereich in der Nähe des Rutschgebietes installiert wird. Die optionsgesteuerte Auswertung beim Postprocessing soll mit der Software LabVIEW/GravNav erfolgen. Die so ermittelten Basislinien werden über eine offene Schnittstelle dem Auswertesystem GOCA (GPS Control and Alarmsystem; entwickelt an der FH Karlsruhe (s. z.B. KÄLBER & JÄGER 2001) zugeführt. Das TPS (Terrestrial Positioning System) z.B. in Form der reflektorlosen Tachymetrie kann zusätzlich Bewegungen über die ganze Oberfläche der Hangbewegung detektieren.

Die gewonnenen Messdaten werden via WLAN zu einer Zentralstation übermittelt und dort im Computer gespeichert. Von dort können diese dann via Modem von einem externen Computer (z.B. im Projektbüro) für die weitere Auswertung abgerufen werden.

Neben den relativ niedrigen Installationskosten kann die Anwendung von Fernabfrage-techniken einen großen Kostenvorteil bringen, da kostenintensive Messfahrten entfallen. Alle wichtigen Funktionen des Messsystems können über ein Modem vom Projektbüro aus eingesehen und gesteuert werden.

Das entworfene 3D Frühwarnsystem für instabile Hänge wird also gegenüber den heute verfügbaren Messsystemen deutlich mehr Messdaten zu geringeren Kosten produzieren können und so eine qualitativ sehr hochwertige Überwachung eines instabilen Hanges auf relativ wirtschaftliche Weise ermöglichen.

## Literatur

- Dussud, M.L. (2002): TDR Monitoring of Soil Deformation: Case Histories and Field Techniques. Master Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Freeman, E.L. (1996): Time Domain Reflectometry at Cloverdale Landslide, U.S. Highway 101, Sonoma County, California. Technical Research Report CE-96-03, Department of Civil Engineering, University of the Pacific, April 1996.
- Kälber, I. & Jäger, R. (2001): Realisierung eines GPS-basierten Online Kontroll- und Alarmsystems (GOCA) und Diskussion adäquater geometrischer und systemanalytischer Ansätze zum online Monitoring im Talsperrenbereich. Wasserwirtschaft – Zeitschrift für Wasser und Umwelt, Heft 2, S. 84-89.
- Kane, W.F. & Beck, T.J. (1996): An Alternative Monitoring System for Unstable Slopes. Geotechnical News 14, Nr. 3, S. 29-31.
- Kane, W.F., Beck, T.J. & Hughes, J.J. (2001): Application of Time Domain Reflectometry to Landslide and Slope Monitoring. TDR 2001 – Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Infrastructure Technology Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois, U.S.A.
- Kane, W.F., Perez, H., Anderson, N.O. (1996): Development of Time Domain Reflectometry System to Monitor Landslide Activity. Final Report, June 1996, FHWA/CA/TL-96/09.
- Kim, M.H. (1989): Quantification of Rock Mass Movements with Grouted Coaxial Cables. Master Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- O'Connor, K.M. & Dowding, C.H. (1999): GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes. CRC Press, Boca Raton.
- Pierce, C.E., Bilaine, C., Huang, F.-C. & Dowding, C.H. (1994): Effects of Multiple Crimps and Cable Length on Reflection Signatures from Long Cables. Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Northwestern University, Evanston, Illinois, S. 540-554.
- Su, M.B. (1987): Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry. Ph.D. Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, U.S.A.
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P. (1980): Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research 16, Nr. 3, S. 574-582.