

Computergestützte Auswertung von Time Domain Reflectometry Messdaten zur Überwachung von Hangbewegungen

John SINGER, Judith FESTL und Kurosch THURO

Zusammenfassung

Time Domain Reflectometry (TDR) Messungen, die mit einem Koaxialkabel in einem Bohrloch erfolgen, sind eine interessante Alternative oder Ergänzung zu Inklinometermessungen bei der Überwachung von Hangbewegungen. Durch den Einsatz von Datenloggern und/oder einer Datenfernübertragungs-Einrichtung können die Messdaten mit sehr hoher zeitlicher Auflösung kontinuierlich gewonnen werden, was gerade bei schnellen Hangbewegungen von großem Vorteil ist. TDR Messungen von in Bohrlöchern installierten Koaxialkabeln ermöglichen auf einfache und kostengünstige Weise die genaue Bestimmung der Tiefenlage einer Scherzone. Die Angabe eines Deformationsbetrages stellt jedoch nach wie vor eine Herausforderung dar.

Mit Hilfe von Kalibriermessungen, sowie einer genauen Analyse der mit hoher Messfrequenz gewonnenen TDR-Messdaten sind jedoch genaue Aussagen über den Deformationsmechanismus sowie über den relativen Deformationsbetrag möglich. Die Auswertung der großen Datenmengen erfolgt dabei computergestützt mit Hilfe von Software-Routinen, die mit Hilfe der Entwicklungsumgebungen von LabView (National Instruments) und Matlab (The MathWorks) erstellt wurden.

Die Integration des TDR-Messsystems in ein Geo-Sensorennetzwerk ist Ziel des im Forschungsförderungsprogramm „Geotechnologien“ des BMBF geförderten Forschungsprojektes alpEWAS. Dieses Frühwarnsystem besteht aus verschiedenen Messsystemen zur Überwachung von Oberflächenbewegungen und verschiedenen Triggerfaktoren (z.B. Niederschlägen und Bergwasserspiegel), so dass nahezu in Echtzeit 3D-Informationen der im Hang ablaufenden Bewegungen erhalten werden können.

1 Time Domain Reflectometry (TDR)

Time Domain Reflectometry (deutsch: Zeitbereichsreflektometrie) ist ein in den 60er Jahren entwickeltes Verfahren der Elektrotechnik zur Ortung von Kabelstörungen und Kabelbrüchen in Koaxialkabeln, weshalb das Messverfahren im deutschsprachigen Raum auch häufig als „Kabelradar“ bezeichnet wird. Das Messverfahren wird heute vor allem in der Geotechnik zur Bestimmung des Wassergehalts von Böden verwendet (u.a. Topp et al. 1980 und Stacheder 1996). In den letzten Jahren findet TDR immer häufiger bei der Deformationsüberwachung in Hangbewegungen und Böschungen sowie bei Bauwerken Anwendung (Dowding & O'Connor 2000, Turner 2006).

1.1 Messprinzip

Das TDR Messgerät untersucht den Wellenwiderstand (Wellenimpedanz) eines Koaxialkabels. Dazu werden kurze Spannungsimpulse von wenigen Millisekunden Dauer mit einer ultrasteilen Signalfanke (wenige Picosekunden) in den Innenleiter des Koaxialkabels eingespeist. Diese Signale breiten sich dann durch den Leitungsstrang aus bis sie am Leitungsende oder an Störungen im Kabel teilweise oder total reflektiert werden. Die Reflexionen werden von dem TDR Messgerät aufgezeichnet und mit dem Ausgangssignal verglichen (O'Connor & Dowding 1999).

Tritt eine Reflexion auf, kann über deren Laufzeit (Zeitspanne zwischen Aussenden des Messsignals und Empfangen der Reflexion) die Entfernung zum Messgerät bestimmt werden, da sich die Messsignale in einer Koaxialleitung mit einer konstanten Geschwindigkeit ausbreiten.

Reflexionen entstehen immer dann, wenn sich der Wellenwiderstand der Übertragungsleitung verändert. Dies ist z.B. der Fall, wenn sich deren Geometrie oder elektrischen Eigenschaften ändern. Ersteres wird bei der Deformationsmessung, letzteres unter Verwendung von speziellen Messsonden (Stacheder 1996) bei der Wassergehaltsbestimmung mittels TDR ausgenutzt.

1.2 Deformationsmessungen

Grundlage der TDR Deformationsmessungen ist also die Änderung des Wellenwiderstandes eines Koaxialkabels aufgrund dessen Verformung. Entscheidend ist, dass sich der Abstand zwischen dem Innen- und dem Außenleiter des Koaxialkabels ändert, da dies letztlich zur Änderung des Wellenwiderstandes führt. Dabei bedeutet eine zunehmende Deformation auch eine immer stärkere Änderung des Wellenwiderstandes, was eine Quantifizierung des Deformationsbetrags erlaubt (Singer et al. 2006).

Zu beachten ist, dass bei einer nur leichten Biegung eines Koaxialkabels über eine bestimmte Wegstrecke meist keine ausreichende Geometrieänderung eintritt und die Deformation so unentdeckt bleibt. Dies hat zur Folge, dass sich TDR Deformationsmessungen in der Regel nur für die Untersuchung von Deformationen entlang diskreter Bewegungsbahnen eignet. Durch einen geeigneten Einbau des Koaxialkabels kann der Einsatzbereich jedoch ausgeweitet werden.

Ein typisches TDR Deformations-Messsystem für Hangbewegungen besteht aus einem TDR Messgerät, einem koaxialen Zuleitungskabel sowie einem Koaxial-Messkabel, das in einem Bohrloch installiert die Scherbahn an der Basis einer Hangbewegung durchteuft (Abb. 1). Damit auftretende Bewegungen möglichst optimal auf das Koaxialkabel übertragen werden, wird das Kabel mit einem geeigneten Injektionsmittel – häufig einer Zement-Bentonit-Suspension – mit dem Gebirge kraftschlüssig verbunden.

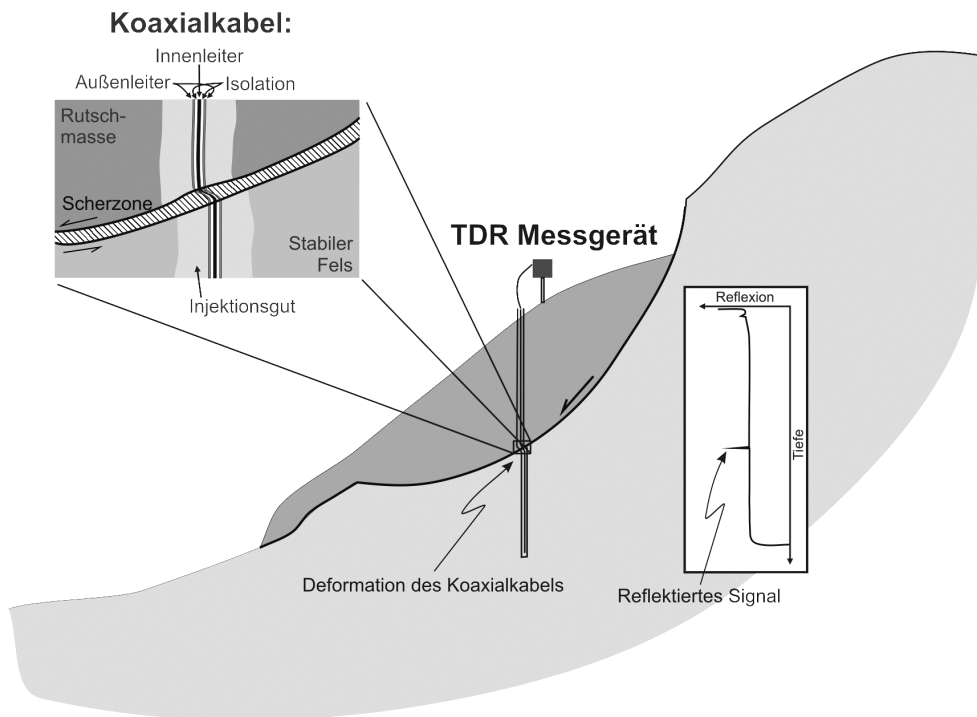


Abb. 1: Installationsschema eines TDR Deformationsmesssystems für Hangbewegungen. Das die Scherzone durchteufende koaxiale Messkabel wird mit einem Injektionsgut mit dem Gebirge verbunden. Bei der Deformation des Messkabels treten Reflexionen auf, die Rückschlüsse auf Art und Betrag der Deformation erlauben. Aus Singer et al. (2006).

2 Installation

Die Qualität der später gewonnenen Messdaten hängt in großem Maße von den gewählten Installationsparametern ab. So haben z.B. das verwendete Messkabel und das Injektionsmittel einen großen Einfluss auf die Messungen, so dass deren Auswahl immer mit Blick auf die örtlichen geologischen Gegebenheiten geschehen sollte.

2.1 Messkabel

Generell kann jedes Koaxialkabel für TDR Messungen verwendet werden. Aufgrund ihrer besonderen mechanischen und elektrischen Eigenschaften haben sich aber halbsteife Koaxialkabel für die Deformationsbestimmung als besonders günstig erwiesen (Dowding et al. 1989, O'Connor & Dowding 1999). Bei diesen Kabeln besteht der Außenleiter aus einem biegsamen Rohr aus Kupfer oder Aluminium. Sie bieten gegenüber vergleichbaren flexiblen Kabeln mit Drahtgeflechten bessere elektrische Eigenschaften, wie eine geringere Dämpfung sowie eine höhere Übertragungsleistung (Micro-Coax o.J.). Gleichzeitig sind diese Kabel in der Regel sehr sensitiv gegenüber Deformationen, d.h. bereits geringe De-

formationen führen zu einer messbaren Änderung des Wellenwiderstandes des Kabels. Weitere Vorteile bietet die hohe Steifigkeit der Kabel bei der Installation in das Bohrloch. In der Regel können problemlos Zentrierhilfen an das Kabel angebracht und zusammen mit diesem in das Bohrloch geschoben werden, was eine gute Zentrierung des Kabels im Bohrloch ermöglicht.

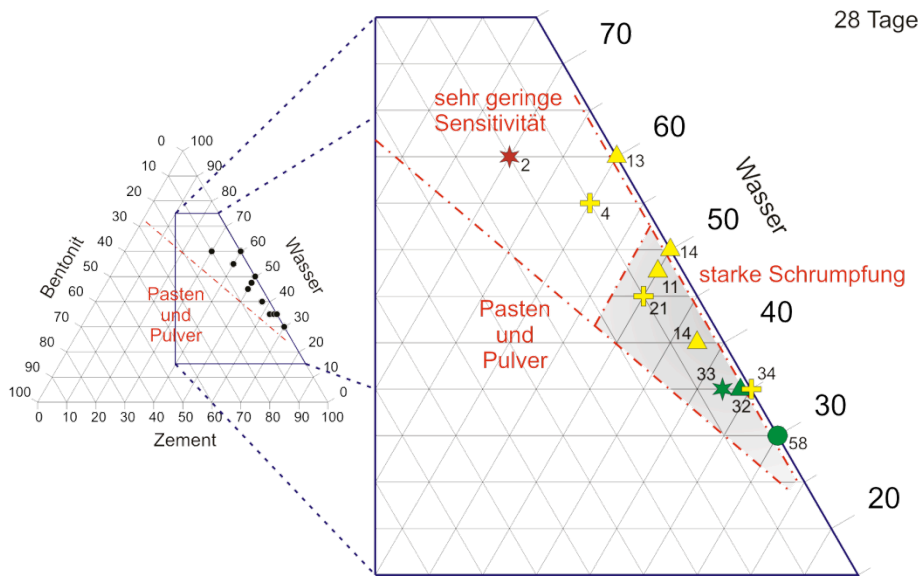
Ein wichtiges Kriterium bei der Wahl des Messkabels ist zudem dessen Durchmesser, denn dieser beeinflusst im Zusammenspiel mit dem Injektionsmittel den maximal möglichen Scherweg, also die Lebensdauer, sowie die Sensitivität des Messsystems: mit zunehmendem Durchmesser nimmt in der Regel die Sensitivität gegenüber Deformationen ab, die Lebensdauer des Messsystems aber zu. Die Scherversuche im Labor an unterschiedlichen Koaxialkabeltypen haben gezeigt, dass im ungünstigsten Fall mit einer Lebensdauer von in etwa dem doppelten bis dreifachen Kabeldurchmesser zu rechnen ist, häufig jedoch eine deutlich höhere Lebensdauer (über dem 10-fachen Kabeldurchmesser) zu erzielen ist.

2.2 Injektionsmittel

Dem Injektionsmittel kommt bei den TDR Deformationsmessungen eine große Bedeutung zu, denn es ist dafür verantwortlich, dass die im Gebirge auftretenden Verformungen in geeigneter Form auf das Messkabel übertragen werden. Wie bereits erläutert wurde, ist eine punktuelle Übertragung der Scherdeformation auf das Kabel am günstigsten, da es so schnell zu einer messbaren Änderung der Kabelgeometrie kommt.

Generell sollte das Gebirge eine vergleichbare oder höhere (Scher-)Festigkeit und Steifigkeit besitzen als das Injektionsmittel und dieses wiederum eine höhere als das verwendete Koaxialkabel. Nur so kann die Deformation des Gebirges in geeignetem Umfang auf das Injektionsmittel und dann auf das Kabel übertragen werden. Im Idealfall bricht das Injektionsmittel unter der Belastung des Gebirges im Bereich der Scherzone entlang einer einzelnen Bruchlinie, so dass die gesamte Deformation im Bereich dieses Bruches punktuell auf das Koaxialkabel übertragen wird. Treten z.B. bei mächtigeren Scherzonen mehrfache Brüche des Injektionsmittels auf, so kann jede einzelne Bruchzone untersucht und die dort aufgetretenen Scherdeformationen bestimmt werden. Aufgrund der vielen möglichen komplexen Bruchmuster z.B. mit Schrägstellung kurzer Kabelabschnitte (nicht messbar) ist hier allerdings eine sichere Angabe der Gesamtdeformation unmöglich.

Um geeignete Injektionsmittelzusammensetzungen im häufig verwendeten 3-Phasen-System Zement-Bentonit-Wasser zu ermitteln, wurde eine große Anzahl von Scherversuchen an Injektionsmittel-Messkabel-Strängen durchgeführt (Festl 2008), deren Ergebnisse teilweise in Abb. 2 zusammengefasst sind. Injektionsmittel mit Norm-Festigkeiten ab etwa 10 MPa sind für eine Übertragung der Deformation auf das hier verwendete halbsteife Kabel Commscope P3-500 JCA gut geeignet, was sich vor allem in einer niedrigen Anfangssensitivität (Deformation des Stranges bis eine messbare Reflexion auftritt) äußert. Mit weiter zunehmender Festigkeit des Injektionsmittels nimmt dann jedoch die Lebensdauer der Messungen unter gleichen Rahmenbedingungen ab.



Anfangssensitivität der TDR Messungen

(Betrag der Scherdeformation [mm] bis zum ersten Erkennen einer Bewegung)

- > 30 mm
- 15-30 mm
- 7-15 mm
- 0-7 mm

Gesamtdeformation der TDR Messungen

(Betrag der Scherdeformation [mm] bis zum ersten Bruch des Kabels)

- < 20 mm
- 20-40 mm
- 40-60 mm
- > 60 mm

Zahlenwerte: Druckfestigkeit [MPa] angelehnt an DIN EN 196-1 (2005)

Abb. 2: Darstellung der in Schertests ermittelten Gesamtdeformationen und Anfangssensitivitäten von TDR Deformationsmessungen sowie der getrennt ermittelten Druckfestigkeiten für verschiedene Zement-Bentonit-Suspensionen in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung. Unter Berücksichtigung der Gesamtdeformation, der Sensitivität, der Viskosität und des Schrumpfungsverhaltens wird der Bereich der für den Ausbau von TDR Messstellen (mit dem Commscope P3-500 JCA Koaxialkabel) geeigneten Suspensionen eingegrenzt (grauer hinterlegter Bereich). Verändert nach Festl (2008).

2.3 Zuleitungen

Da alle Messsignale das koaxiale Zuleitungskabel durchlaufen, hat dieses einen großen Einfluss auf die Messergebnisse. Dabei spielen vor allem die frequenzabhängige Signaldämpfung und der elektrische Widerstand pro Laufmeter Kabel bzw. in diesem Zusammenhang die Kabellänge eine entscheidende Rolle. Bereits Pierce et al. (1994) zeigen ausführlich den Einfluss der Kabellänge auf TDR Messungen. Die Signalstärke nimmt exponentiell mit der Kabellänge ab. Abhängig vom verwendeten Kabel sind in der Regel Zulei-

tungskabellängen von über 50 bis 150 m nicht umsetzbar, wenn man einen zu großen Signalverlust vermeiden möchte. Grundsätzlich sollten die Zuleitungslängen so kurz wie möglich gehalten werden. Die Verwendung von möglichst dämpfungsarmen Kabeln empfiehlt sich entsprechend. Des Weiteren muss sichergestellt sein, dass die Zuleitungen nicht mechanisch beansprucht und deformiert werden. Dazu ist die Verwendung von armierten Kabeln oder Panzerrohren und bei langfristigen Installationen zusätzlich eine Verlegung unter der Erde zu empfehlen.

2.4 Messgerät

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde ausschließlich das Campbell Scientific TDR 100 Messgerät verwendet. Dieses zeichnet sich durch eine hohe Erfassungsgenauigkeit und der Möglichkeit aus, über einen Multiplexer mehrere Messleitungen an ein Messgerät anschließen zu können. Damit können über entsprechende Zuleitungen an mehrere Messstellen mit einem Messgerät ausgelesen werden. Über ein Datenlogger- und Kontrollmodul kann eine automatisierte Datenerfassung mit nahezu beliebiger Messfrequenz realisiert werden. Über ein entsprechendes Funkmodul oder über einen WLAN COM-Server können die Messdaten drahtlos auf einen Rechner übertragen und dort ausgewertet werden. Ebenso ist eine Anpassung der Messparameter und damit die Steuerung der TDR Messungen per Datenfernübertragung möglich (Campbell Scientific, Inc. 2007).

Hieraus leiten sich die großen Vorteile der TDR Deformationsmessungen gegenüber Inklinometermessungen ab: es können sehr kostengünstig und flexibel auch an schwer zugänglichen Stellen Messdaten mit sehr hoher Frequenz gewonnen werden. Dies kann ggf. bei der Beurteilung einer Hangbewegung insbesondere im Hinblick auf ihre Triggerfaktoren einen entscheidenden Vorteil bedeuten.

3 Kalibration

Für die Auswertung der TDR Deformationsmessungen wird hier ein empirischer Ansatz mit Hilfe von im Labor ermittelten Kalibrierkurven und Korrekturfaktoren verwendet. Dabei wird vor allem der Zusammenhang zwischen der Signalstärke einer durch die Deformation eines Koaxialkabels verursachten Reflexion mit dem entsprechenden Deformationsbetrag hergestellt. Des Weiteren müssen noch Korrekturfaktoren für die Dämpfung der Signale entlang der Zuleitung eingeführt werden.

3.1 Scherversuche

Für die Durchführung der Scherversuche wurde ein Versuchsstand entwickelt, mit dem eine weggesteuerte Scherung von Koaxialkabel-Injektionsmittel-Strängen möglich ist. Neben dem Deformationsbetrag und den TDR Signalen wird dabei auch die auf den Messstrang aufgebrachte Kraft aufgezeichnet. So ist es möglich die Eignung verschiedener Koaxialkabel-Injektionsmittel-Kombinationen für die TDR Deformationsmessung zu untersuchen (vgl. Abb. 2) und eine Kalibration eines solchen Systems vorzunehmen (Singer & Thuro 2006).

In Abb. 3 sind exemplarisch die Ergebnisse von je 4 Scherversuchen an Messsträngen unterschiedlicher Injektionsmittelzusammensetzung unter Verwendung des gleichen Messka-

bels (Commscope P3-500 JCA) gegenübergestellt. Für die verschiedenen Injektionsmittel ergibt sich jeweils eine deutlich unterschiedliche Beziehung zwischen der TDR Signalstärke und dem Deformationsbetrag. Für die Ermittlung der Ausgleichspolynome 3. bzw. 4. Grades gehen alle Datenpunkte ab der Erkennung eines reflektierten Signals ein. Der bis dahin verstrichene Deformationsbetrag ist die bereits in Kap. 2.2 erwähnte Anfangssensitivität.

Trotz der absolut identischen Probenherstellung und Versuchsdurchführung streuen die Ergebnisse der Scherversuche für ein Injektionsmittel noch immer deutlich. Dies ist auf das bereits durch winzige Inhomogenitäten beeinflusste Bruchverhalten des Injektionsmittels zurückzuführen. Im Idealfall können so Reproduktionsgenauigkeiten von durchschnittlich ca. ± 3 mm erreicht werden. Insbesondere zu Beginn der Messungen kann die Genauigkeit verhältnismäßig hoch sein, mit zunehmender Deformation (spätestens ab dem doppelten Kabeldurchmesser) nimmt die Genauigkeit in der Regel ab.

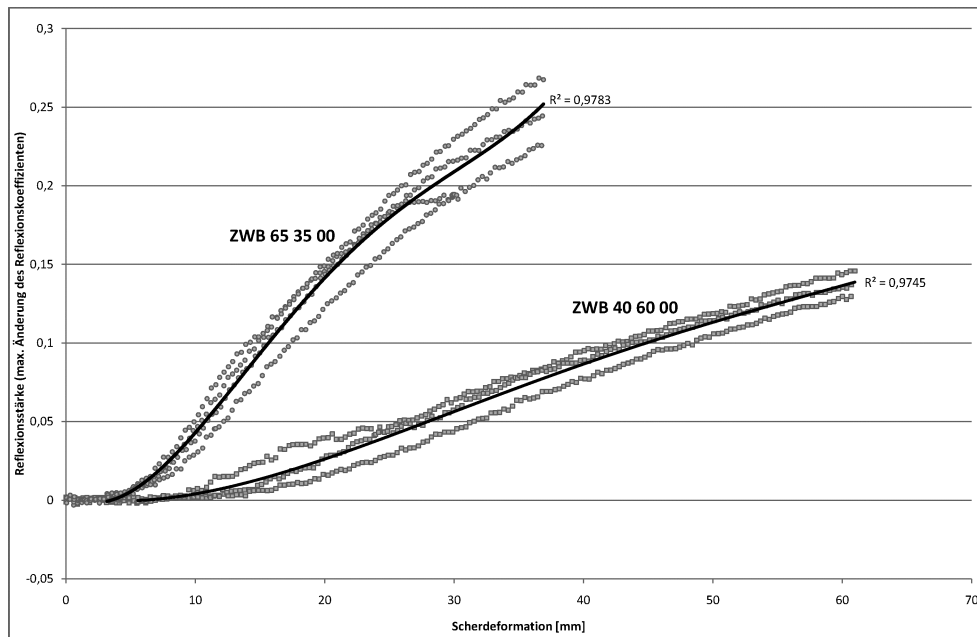


Abb. 3: Zusammenhang zwischen der Reflexionsstärke und der Scherdeformation bei Scherversuchen an Messsträngen mit Zement-Wasser-Suspensionen als Injektionsmittel in den Mischungsverhältnissen von 65:35 bzw. 40:60 Massen-%. Die Scherversuche wurden jeweils mit dem halbsteifen Commscope P3-500 JCA als Messkabel und einer Scherbreite von 15 mm durchgeführt.

3.2 Ermittlung von Dämpfungs-Korrekturfunktionen

Wie in Kapitel 2.3 bereits erläutert wurde, hat die Dämpfung der TDR Messsignale durch die Zuleitungstrecken einen großen Einfluss auf die Stärke und Form der reflektierten Signale. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurden Scherversuche an gleichartigen Injektionsmittel-Koaxialkabelsträngen bei unterschiedlichen Zuleitungskabelängen durch-

geführt (Woytowitz 2008). Dabei zeigt sich eine exponentielle Abnahme der Signalstärke mit zunehmender Deformation (Abb. 4). Lin & Tang (2006) haben bereits ein numerisches Modell zur Berechnung des Dämpfungseinflusses bei TDR Messungen entwickelt. Um dieses zu überprüfen und um eigene empirisch ermittelte Daten zur Verfügung zu haben, ist geplant standardisierte Störungen in Messkabeln (Quetschungen des Koaxialkabels mit unterschiedlichen Beträgen und Breiten) mit Zuleitungskabeln unterschiedlicher Länge zu vermessen und die jeweiligen maximalen Signalstärken zu bestimmen. So sollte es möglich sein Korrekturfunktionen, die den Einfluss der Dämpfung auf die Messsignale quantifizieren zu entwickeln.

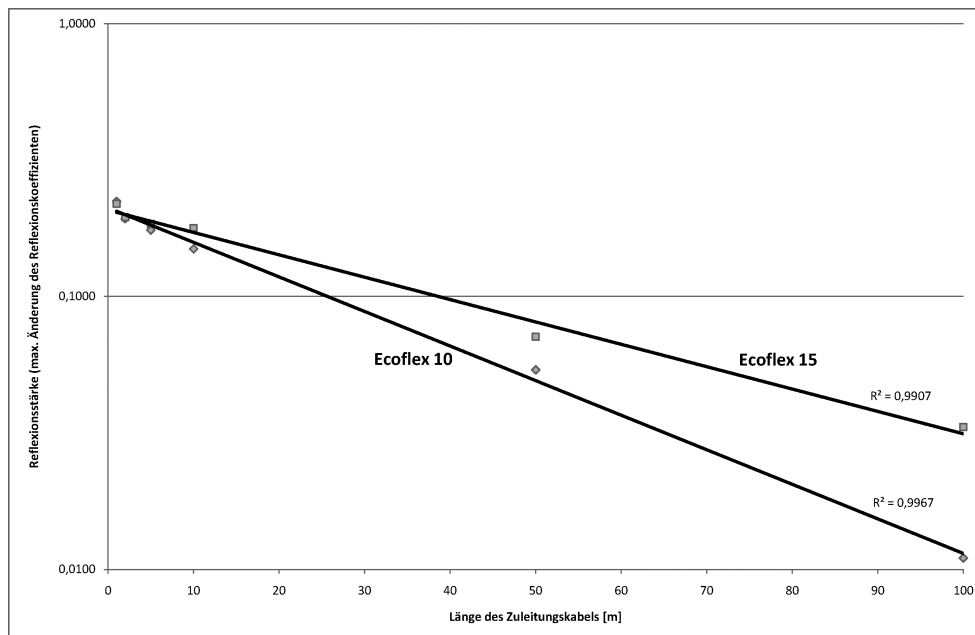


Abb. 4: Auswirkung der Signaldämpfung mit zunehmender Kabellänge für zwei verschiedene Koaxialkabeltypen (Ecoflex 10 & Ecoflex 15) in halblogarithmischer Darstellung. Ergebnisse von Scherversuchen an gleichartigen Injektionsmittel-Koaxialkabelsträngen (Zement-Bentonit-Wasser-Suspension mit einem Mischungsverhältnis von 64:35:1 Massen-%; Messkabel: Commscope P3-500 JCA) mit verschiedenen Zuleitungskabeltypen und -längen. Dargestellt ist die Reflexionsstärke bei jeweils 30 mm Scherdeformation.

4 Computergestützte Auswertung

Da bei den TDR Deformationsmessungen in der Regel eine große Anzahl an Messdaten anfallen, ist eine computergestützte Auswertung unerlässlich. Dazu werden mit Hilfe der optischen Entwicklungsumgebung LabView der Fa. National Instruments (www.ni.com) Programme entwickelt, die in der Lage sind, die komplette Prozessierung der Daten – von dem Auslesen der Daten aus dem Messgerät bis zur Darstellung und Speicherung der Ergebnisse – zu bewerkstelligen. Das Prozessierungsschema nach dem die Daten verarbeitet

werden ist in Abb. 5 dargestellt. Die Software befindet sich momentan in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung, erste Testläufe an realen Daten wurden bereits erfolgreich absolviert. Dennoch sind einige Prozessierungsschritte noch nicht vollständig umgesetzt, so dass mit Ergänzungen und Änderungen im Laufe der weiteren Entwicklung zu rechnen ist.

Bevor die Datenprozessierung nach den im Folgenden beschriebenen Schritten erfolgen kann, müssen die Installationsparameter definiert und die entsprechenden Laborversuche zur Ermittlung der Kalibrationskurven / Korrekturfunktionen durchgeführt werden. An der Technischen Universität München wird momentan noch an der Definition von standardisierten und an bestimmte geologische Untergrundverhältnisse angepassten Installationsvorschriften gearbeitet, für die auch die Kalibrationsdaten ermittelt werden. Beim Einsatz dieser Standardinstallationen wird dann eine erneute aufwendige Kalibration nicht notwendig sein.

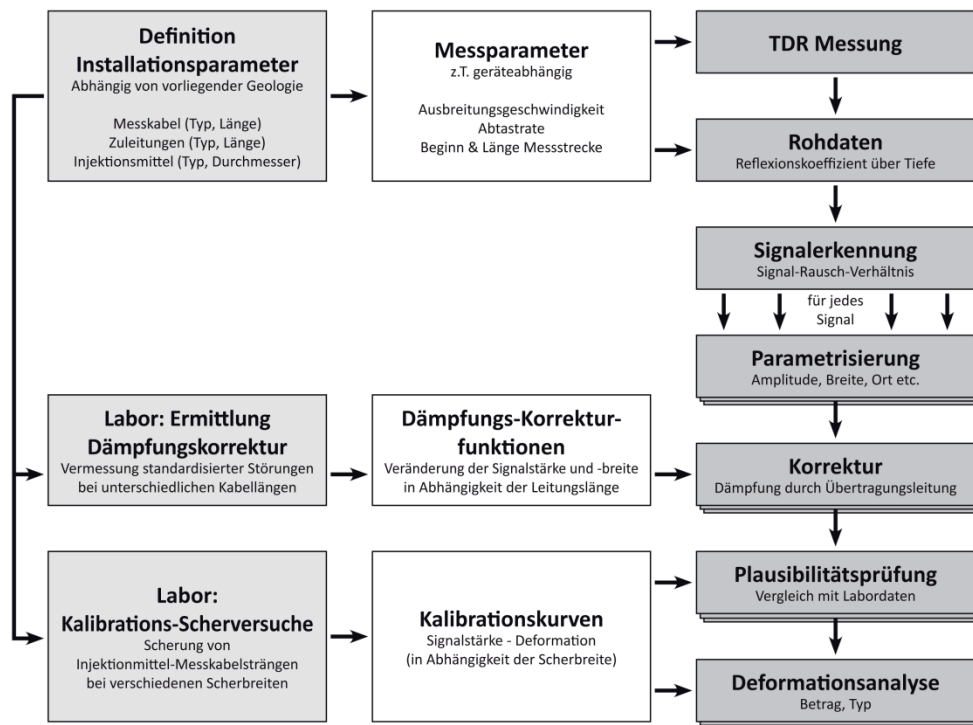


Abb. 5: Prozessierungsschema der TDR Messdaten (hellraugrau, rechte Seite) mit den notwendigen Eingangsgrößen sowie Korrektur- und Kalibrationskurven.

4.1 Ansteuerung der Messgeräte und Datenerfassung

Bei Verwendung des Campbell Scientific TDR100 Messgeräts kann die Ansteuerung direkt vom PC aus mit Hilfe eines mit LabView neu entwickelten Softwaremoduls (kabelgebunden oder via WLAN) erfolgen. Unter Zuhilfenahme eines Datenlogger- und Kontrollmoduls der Fa. Campbell Scientific kann aber auch bei Vorhalten einer entsprechenden Stromversorgung z.B. durch Solarpanels ein autarker Betrieb ermöglicht werden. Zugleich ist dann die Integration weiterer Messsonden (z.B. Piezometer, Wetterstation) möglich, da der Datenlogger über entsprechende analoge Messeingänge verfügt.

Die Messdaten werden entsprechend entweder direkt in Form von ASCII Tabellen auf dem PC oder im internen Speicher des Datenloggers (optional auch auf einer CF-Speicherkarte) abgelegt, von wo aus diese direkt in die Auswertungssoftware überführt werden können.

4.2 Datenimport und Visualisierung der Rohdaten

Beim Import der Messdaten in die Analysesoftware werden diese zunächst hinsichtlich ihrer Integrität und Eignung für die weitere Prozessierung überprüft. So müssen z.B. alle TDR Messungen mit den gleichen Geräteeinstellungen erfolgt sein, allen Messungen muss eine eindeutige, in der Regel in der Reihenfolge der Erfassung aufsteigend sortierte Mess-ID zugewiesen sein und ggf. doppelt vorhandene Messungen (gleicher Datumsstempel) werden verworfen. Die Daten können natürlich auch zu bereits vorhandenen, zuvor ausgelesenen Messdaten hinzugefügt werden. Die Messdaten können zudem mit Metadaten ergänzt werden, die neben den Installationsparametern und Kalibrationsdaten auch Informationen über das jeweilige Projekt enthalten.

Bevor mit der eigentlichen Prozessierung der Messdaten begonnen wird, ist es in der Regel sinnvoll die Rohdaten – d.h. den Reflexionskoeffizienten über die Länge des Messkabels ggf. bereits bezogen auf die Nullmessung - in verschiedenen Diagrammen darzustellen, da diese dem erfahrenen Betrachter oft bereits intuitiv Einblick in die erfolgten Deformationen, insbesondere in den Deformationsmechanismus, erlauben (Abb. 6).

Mit Hilfe dieser Darstellungen können auch ggf. einzelne Fehlmessungen, die gelegentlich auftreten können, identifiziert, ausgewählt und von der späteren Prozessierung ausgeschlossen werden.

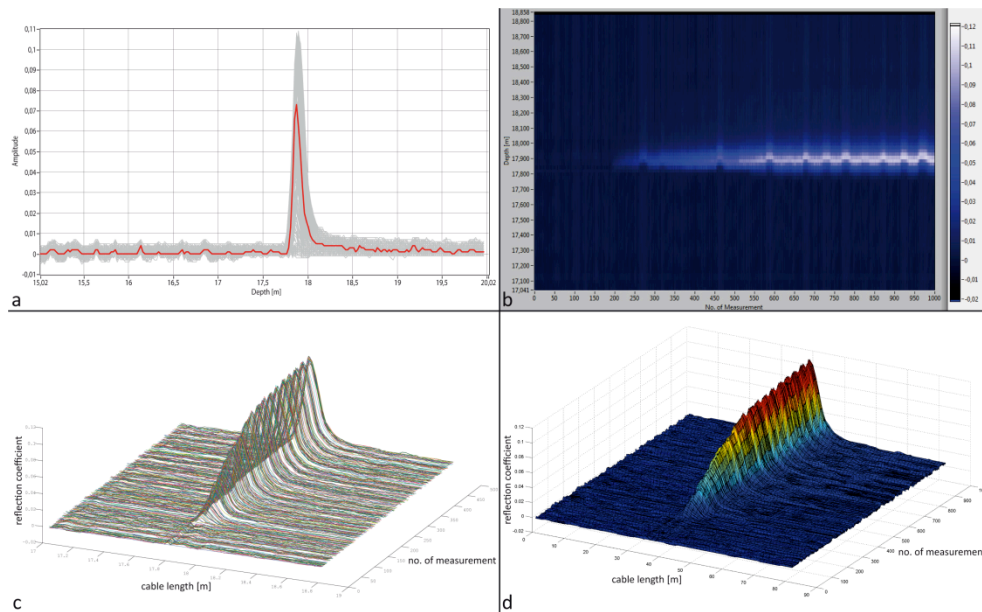


Abb. 6: Visualisierungsmöglichkeiten für die TDR Rohdaten (Änderung des Reflexionskoeffizienten im Vergleich zur Nullmessung): a, Diagramm Reflexionskoeffizient – Tiefe. Alle Messungen werden übereinandergelegt (grau); die Auswahl und Abfrage der Informationen zu einer Einzelmessung ist möglich (rot). b, farbkodierte Darstellung des Reflexionskoeffizienten (dunkel: niedrig, hell: hoch) über die Tiefe und über die Zeit (mehrere Messungen). c, und d, 3-dimensionale Darstellungen.

4.3 Automatische Signalerkennung

Bei den TDR Messungen tritt immer ein unterschiedlich starkes Hintergrundrauschen auf, das von verschiedenen Faktoren wie z.B. dem verwendeten Koaxialkabel (Abschirmung) und der Umgebungstemperatur abhängt (O'Connor & Dowding 1999). So kann das Rauschen im Verlauf einer Messstrecke auch lokal variieren. Um zuverlässig ein durch eine Deformation des Kabels verursachtes Signal erkennen zu können muss zunächst das üblicherweise normal verteilte Signalrauschen quantifiziert werden. Dazu werden für jeden einzelnen Datenpunkt der Mittelwert und die Standardabweichung aus einer relativ großen Anzahl vorangegangener Messungen ermittelt (Abb. 7). Dann wird ein gleitender Mittelwert üblicherweise der letzten 3 bis 10 Messungen berechnet. Weicht dieser um mehr als mit einem frei wählbaren Schwellenwert (z.B. einfache Standardabweichung) definiert wurde von dem ersten Mittelwert ab, wird dieser Messpunkt mit „Signal erkannt“ markiert. Als zusätzlichen Filtermechanismus kann noch eine Mindestanzahl zeitlich wie räumlich benachbarter Messpunkte definiert werden, die positiv auf ein Signal getestet werden müssen, bevor der entsprechende Abschnitt an die Parametrisierung weitergereicht wird. Bereiche die einmal als deformiert erkannt wurden, werden in Folgemessungen immer wieder bei der Prozessierung berücksichtigt, auch wenn die oben genannten Kriterien nicht mehr erfüllt sind. So wird eine Deformationsstelle auch bei Stillstand der Bewegungen weiter

beobachtet. Die Parameter der Signalerkennung müssen jeweils an die Messfrequenz und die räumliche Auflösung (Messpunkte / Meter Kabel) der vorliegenden Daten angepasst werden.

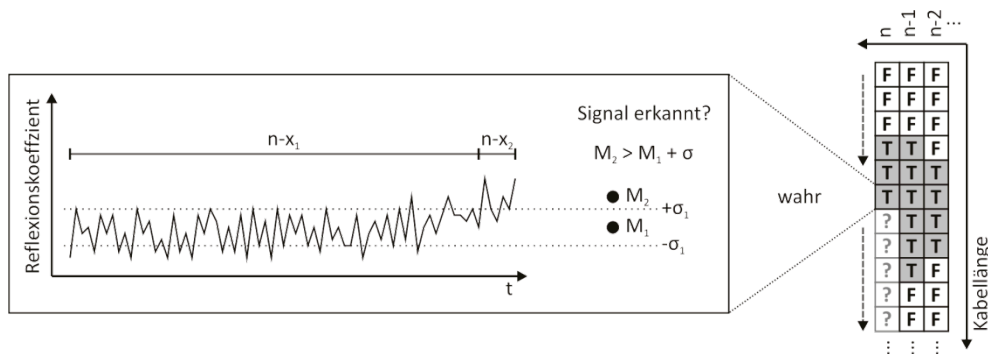


Abb. 7: Schematischer Ablauf der Signalerkennung. Zunächst werden zwei gleitende Mittelwerte gebildet: einer beinhaltet eine große Anzahl (x_1) von zurückliegenden Messungen, der andere nur verhältnismäßig wenige (x_2). Weicht der Mittelwert M_2 um einen bestimmten Betrag (hier die Standardabweichung σ) vom Mittelwert M_1 ab, wird dieser Messwert für die weitere Prozessierung markiert.

4.4 Parametrisierung

Die für die weitere Analyse markierten Abschnitte, die jeweils die Information eines reflektierten Signals enthalten, werden mit eindeutigen IDs gekennzeichnet (fortlaufende Nummerierung) und im Folgenden jeweils getrennt voneinander weiterverarbeitet.

In der Regel bildet sich ein Signal ähnlich den in Abb. 6 gezeigten aus: mit einem klar definierten Maximum und mehr oder minder gekrümmten Flanken. Häufig zeigt sich gerade bei Scherdeformationen eine deutliche Asymmetrie des Signals. Um die Wellenform zu beschreiben werden mehrere Parameter, wie z.B. die Amplitude, die Breite, die Position ggf. vorhandener Wendepunkte sowie die Fläche unter der Kurve bestimmt (Abb. 8).

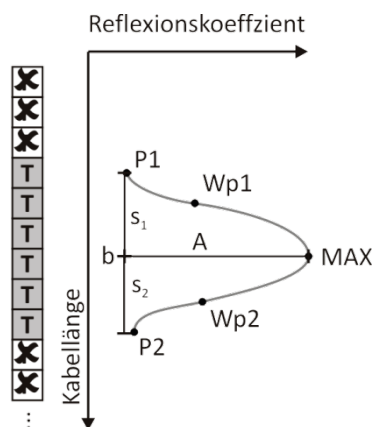


Abb. 8: Schematische Darstellung eines typischen Messsignals mit den bei der Parametrisierung ermittelten Werten:

- die Orte P1, P2 und MAX (Beginn, Ende und Maximum des Signals);
- die maximale Amplitude A;
- die Breite des Signals b;
- die Fläche unter der Kurve F;
- das Verhältnis zwischen s_1 und s_2 als Maß für die Symmetrie;
- falls möglich die Position der Wendepunkte Wp1 und Wp2.

Problematisch kann hierbei vor allem bei schwachen Signalen häufig die geringe Anzahl an Messpunkten sein, was ggf. dazu führen kann, dass nicht alle Parameter (insb. die Wendepunkte) bestimmt werden können.

Die so gewonnenen Parameter werden getrennt für jeden Abschnitt in einem Daten-Array gespeichert und für die weitere Verarbeitung bereit gehalten.

4.5 Dämpfungs-Korrektur

Es ist geplant eine Korrektur der Parameter für die entlang des Leitungsstranges auftretende Dämpfung anhand der bereits in Kap. 3.2. erläuterten Korrekturfunktionen durchzuführen. Dabei wird es voraussichtlich genügen die Änderung der Amplitude und der Breite des Signals zu korrigieren. Die anderen Parameter können entsprechend skaliert werden.

Durch den Verlust der räumlichen Auflösung bei langen Zuleitungen können die Messsignale auch in der Form stark verändert werden. Dieser Effekt bzw. Genauigkeitsverlust kann nicht korrigiert werden.

4.6 Plausibilitätsprüfung

Bei der Plausibilitätsprüfung werden die in Kap. 4.4. ermittelten Messparameter mit denen der Kalibrationsmessungen verglichen. Dabei ist insbesondere die Amplitude und die Breite des Signals sowie das Symmetriekriterium (s_1 / s_2) von Bedeutung. Erstere sind entscheidend für die Quantifizierung der Deformation, letzteres gibt Aufschluss über den Deformationsmechanismus (Quetschung oder Scherung). Nur wenn die Parameter in engen Grenzen übereinstimmen, können die Kalibrierungskurven angewandt werden (Kap. 4.7).

Die genannten Parameter werden mit den entsprechenden Parametern jeder Kalibrationsmessung (insgesamt mehrere Hundert) verglichen. Dabei wird für die verschiedenen Parameter jeweils die prozentuale Abweichung ermittelt (z.B. 10 % größer, 5 % kleiner) und die so erhaltenen Beträge miteinander multipliziert. Je kleiner das Endergebnis ist, desto besser stimmen die Signale überein. Durch die Definition eines Schwellwertes kann eine maximal erlaubte Abweichung eingestellt werden. Nur wenn der errechnete Wert unter diesem liegt, kann die entsprechende Kalibrierkurve verwendet werden.

Die Definition, Gewichtung und Auswertung der verschiedenen zu vergleichenden Messparameter befindet sich noch in der Entwicklung. Erst nach Durchführung einer größeren Anzahl von Feldversuchen wird es möglich sein diese genauer festzulegen und zu evaluieren.

4.7 Deformationsbestimmung

Ist die Plausibilitätsprüfung erfolgreich, kann die Deformation anhand der Kalibrierkurve bestimmt werden. Dabei kommt diejenige zum Einsatz, die bei der Plausibilitätsprüfung die Messung mit der größten Übereinstimmung beinhaltet hatte.

Nach Ausgabe des Deformationswertes beginnt die Prozessierung der nächsten Messung. Die so ermittelten Deformationswerte werden dann als Zeitreihe angezeigt und können für die weitere Bearbeitung in Tabellenform ausgegeben werden (Abb. 9).

Erste Feldversuche und Vergleichsmessungen mit Inklinometermessungen haben ergeben, dass das hier aufgezeigte Verfahren durchaus nachvollziehbare Ergebnisse liefert. Im Rah-

men eines vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Sonderforschungsprogramms „Geotechnologien“ (www.geotechnologien.de) geförderten Forschungsvorhabens, das momentan an der TU München (Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Lehrstuhl für Geodäsie) und UniBW München (Institut für Geodäsie) durchgeführt wird, werden weitere Feldversuche durchgeführt werden und die TDR Signalverarbeitung weiter optimiert werden.

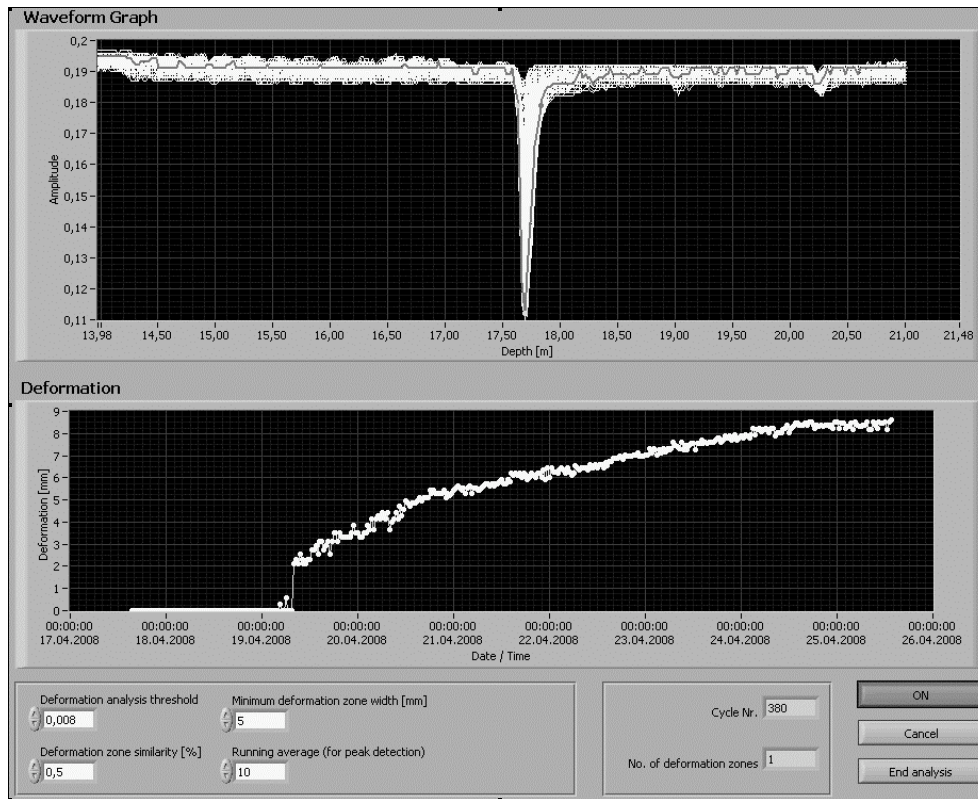


Abb. 9: Screenshot der TDR Auswertesoftware. Das Ergebnis der Deformationsanalyse - eine Deformations-Zeitreihe - wird laufend aktualisiert unten dargestellt. Oben wird während der Analyse die momentan verarbeitete Messung hervorgehoben und die Punkte P1, P2 und MAX angezeigt (vgl. Abb. 8). Die Analyseparameter können vor Beginn der Prozessierung angepasst werden.

5 Systemintegration

Im Vordergrund dieses Forschungsvorhabens steht jedoch die Integration des TDR Messsystems in ein kontinuierlich messendes 3D-Monitoring System für instabile Hänge. Dies wird erreicht, indem mehrere TDR Messstellen über den instabilen Hang verteilt installiert werden, die die Deformationen im Untergrund kontinuierlich überwachen. Zusätzlich werden die Oberflächenbewegungen mit Hilfe von innovativen geodätischen Messmethoden (reflektorlose Tachymetrie und Low Cost GNSS) überwacht (Singer et. al. 2008).

Parallel zu den Bewegungsmessungen werden verschiedene Triggerfaktoren, wie die Porenwasserdrücke oder die klimatischen Bedingungen (insb. Niederschlag) im Bereich des Hanges erfasst. Auf diese Art und Weise können die 3D Bewegungen des Hanges, welche nahezu in Echtzeit bestimmt werden, mit den Umgebungsbedingungen verglichen und so auf Triggermechanismen hin untersucht werden.

Die verschiedenen Sensoren werden dabei mittels WLAN drahtlos von einem zentralen Rechner aus gesteuert, so dass mit Ausnahme der TDR Zuleitungskabel aufwendige Infrastrukturmaßnahmen nicht notwendig sind. Wo kein Netzanschluss vorhanden ist, erfolgt die Stromversorgung über Solarpanels.

Das Zusammenführen der verschiedenen Messdaten, sowie deren Auswertung und Speicherung erfolgt ebenfalls größtenteils mit Hilfe von in LabView erstellten Programmen. Es ist geplant, die erfassten Daten nach einer ersten Auswertung im Rechner vor Ort nahezu in Echtzeit dem Projektbetreuer oder anderen Nutzern online zur Verfügung zu stellen.

Auf diese Weise wird es möglich sein, kostengünstig stets aktuelle Informationen über die Triggerfaktoren und die Bewegungen an der Oberfläche und in der Tiefe der Hangbewegung zu erhalten, was gerade in Krisensituationen von entscheidender Bedeutung sein kann.

Literatur

- CAMPELL SCIENTIFIC, INC. (2007), TDR100 Instruction Manual. Logan, USA.
- DOWDING, C.H. & O'CONNOR, K.M. (2000), Comparison of TDR and Inclometers for Slope Monitoring. In: MARR, A.W. (Hrsg.), Geotechnical Measurements Lab and Field, Proceedings of Sessions of Geo-Denver, 5.-8. August 2000, Denver, USA. Denver, S. 80-90.
- DOWDING, C.H., SU, M.B. & O'CONNOR, K.M. (1989), Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables. In: Rock Mechanics and Rock Engineering Nr. 22, S. 1-23.
- FESTL, J. (2008), Eignungsprüfung von Zement-Bentonit-Suspensionen als Injektionsgut bei TDR Deformationsmessungen. unveröff. MSc.-Arbeit, Lst. f. Ingenieurgeologie, TU München.
- LIN, C.P. & TANG, S.H. (2006), Comprehensive Wave Propagation Model to Improve TDR Interpretations for Geotechnical Applications. In: Geotechnical Testing Journal Nr. 30, 2, S. 1-8.
- MICRO-COAX (o.J.), Semi-rigid coaxial cable. – Informationskatalog. Pottstown, USA.
- O'CONNOR, K.M. & DOWDING, C.H. (1999), GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes. Boca Raton, USA.
- PIERCE, C.E., BILAINÉ, C., HUANG, F. & DOWDING, C.H. (1994), Effects of Multiple Crimps and Cable Length on Reflection Signatures from Long Cables. In: O'CONNOR, K.M., DOWDING, C.H. & JONES, C.C. (Hrsg.), Proceedings of the Symposium and Workshop

- on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, 7.-9. September, Evanston, USA. Minneapolis, USA, S. 540-554.
- SINGER, J. & THURO, K. (2006), Development of a continuous 3D-monitoring system for unstable slopes using Time Domain Reflectometry. In: CULSHAW, M. REEVES, H., SPINK, T. & JEFFERSON, I. (Hrsg.), IAEG Engineering geology for tomorrow's cities. Proceedings of the 10th IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom, 6.-10. September 2006. Nottingham, 7 S.
- SINGER, J. THURO, K. & SAMBETH, U. (2006), Development of a Continuous 3d-Monitoring System for Unstable Slopes using TDR. In: Felsbau Nr. 24, 3, S. 16-23.
- SINGER, J., WASMEIER, P., SCHUBÄCK, S., THURO, K., WUNDERLICH, T., & HEUNECKE, O. (2008), The Aggenalm slide – a testing site for an integrative 3D early warning system – alpEWAS status report. Geotechnologien Statusreport, 8.-9. Oktober, Universität Osnabrück. Osnabrück, 10 S.
- STACHEDER, M. (1996), Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik – Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport. In: CZURDA, K. & HÖTZL, H. (Hrsg.), Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe. Karlsruhe.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. (1980), Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. In: Water Resources Research Nr. 16, 3, S. 574-582.
- TURNER, J.P. (2006), Time Domain Reflectometry for Monitoring Slope Movements. Web: <http://dot.state.wy.us/Default.jsp?sCode=rectd> (05.08.2008).
- WOYTOWITZ, F. (2008), Untersuchung des Einflusses der Koaxialkabel-Zuleitungslänge auf TDR Deformationsmessungen. unveröff. BSc.-Arbeit, Lst. f. Ingenieurgeologie, TU München.