

***Long-term landslide monitoring for
understanding of underlying dynamic
processes as basis for an End-User focused
early warning – LAMOND***

Endbericht

*Österreichische Akademie der Wissenschaften
Dr. Ignaz Seipel-Platz 2
1010 Wien*

Mag. D. Ottowitz¹, Mag. S. Hoyer¹, Mag. B. Jochum¹, MSc. Monika Riegler², MSc. Philipp Preuner², Dr. A. Scolobig³, Mag. R. Supper⁴

¹ Geologische Bundesanstalt\Fachabteilung Geophysik, Wien

² IIASA Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse, Laxenburg

³ ETH Eidgenössische Technische Hochschule\Departement Umweltsystemwissenschaften, Zürich

⁴ Geologische Bundesanstalt\Hauptabteilungsleiter Angewandte Geowissenschaften

Wien, März 2018

ISBN-Online: 978-3-7001-8308-2

DOI: 10.1553/ESS-LAMOND

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Inhaltsverzeichnis | i |
| Kurzfassung | iii |
| 1 Einleitung | 4 |
| 2 Monitoring Netzwerk | 7 |
| 2.1 Übersicht..... | 7 |
| 2.2 Relevante Messgrößen und verwendete Messsysteme..... | 10 |
| 2.3 Betrieb und Ergebnisse der Monitoring Sites | 16 |
| 2.3.1 Monitoring Station – Gschlifgraben | 16 |
| 2.3.2 Monitoring Station – Gresten | 22 |
| 2.3.3 Monitoring Station – Pechgraben | 30 |
| 2.3.4 Monitoring Station – La Valette | 38 |
| 2.3.5 Monitoring Station – Bagnaschino..... | 45 |
| 2.3.6 Monitoring Station – Rosano | 51 |
| 2.3.7 Monitoring Station – Navis..... | 58 |
| 2.4 Laufende Datenauswertung (Anwendung, Weiterentwicklung)..... | 69 |
| 2.4.1 Zusätzliche Monitoring Systeme | 69 |
| 2.4.2 Geoelektrisches Monitoring System-Geomon4D | 69 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3 | Numerische Modellierung | 77 |
| 3.1 | <i>Numerische Interpretation der 4D Geoelektrik</i> | 77 |
| 3.1.1 | Einleitung..... | 77 |
| 3.1.2 | Methodik | 78 |
| 3.1.3 | Referenzdatensätze (Zielfunktionen)..... | 78 |
| 3.1.4 | Ergebnisse | 81 |
| 3.1.5 | Schlussfolgerungen | 81 |
| 3.2 | <i>Geotechnikmodellierung</i> | 84 |
| 3.2.1 | Einleitung..... | 84 |
| 3.2.2 | Eingangsparameter und Modellerstellung..... | 86 |
| 3.2.3 | Ergebnisse | 88 |
| 3.2.4 | Schlussfolgerungen | 89 |
| 4 | Stakeholder Prozess zur Entwicklung eines Endnutzer-orientierten Frühwarnsystems..... | 91 |
| 4.1 | <i>Einführung</i> | 91 |
| 4.2 | <i>Theoretischer Hintergrund</i> | 93 |
| 4.3 | <i>Forschungsmethoden</i> | 94 |
| 4.4 | <i>Institutioneller Rahmen und Herausforderungen.....</i> | 95 |
| 4.5 | <i>Stakeholder Diskurse.....</i> | 96 |
| 4.6 | <i>Ergebnisse und Ausblick</i> | 100 |
| 5 | Nationale/Internationale Kooperationen und Dissemination..... | 102 |
| 6 | Projektbezogene Publikationen | 104 |
| 7 | Literatur | 107 |

Kurzfassung

Das dreijährige Forschungsprojekt LAMOND (Projektlaufzeit 2015-2017) widmete sich drei Aspekten der Erforschung von Hangrutschungen.

Ein Schwerpunkt war der Ausbau und die Fortführung eines bereits existierenden Monitoring Netzwerkes. Dieses wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes TEMPEL (FWF TRP 175-N21) aufgebaut. Hauptbestandteil ist das geoelektrische Monitoring mit einem von der Geologischen Bundesanstalt entwickeltem Gerät (GEOMON4D).

Der zweite Bereich des Forschungsvorhabens befasst sich mit der numerischen Modellierung, die als Basis die Daten des Monitoring Netzwerkes verwendet. Hierbei sollte mit der Software „Comsol Multiphysics“ für ausgewählte Monitoring Sites jeweils ein Untergrundmodell entwickelt werden, an dem verschiedene hydrodynamische Modellsimulationen durchgeführt werden. Der Fokus lag hierbei bei der Änderung der Wassersättigung des Untergrundes, die eine zentrale Rolle beim Bewegungsverhalten von Hangrutschungen darstellt. Die Wassersättigung ist der Hauptanknüpfungspunkt an die Daten des Monitoring Netzwerkes, da beim geoelektrischen Monitoring die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes direkt mit der Änderung der Wassersättigung zusammenhängt. Ein weiteres Teilgebiet der Modellierung befasst sich mit der Geotechnischen Modellierung, im dritten Projektjahr wurde der Fokus mehr auf dieses Thema gelegt. Dabei können verschiedene Szenarien durchgespielt werden, die Rückschlüsse auf die Stabilitätsbedingungen im Untergrund erlauben.

Der dritte Teilbereich des Forschungsvorhabens umfasst die Betrachtung der institutionellen und soziokulturellen Aspekte bei der Umsetzung eines Frühwarnsystems an der Hangrutschung am Gschlifgraben. Nach der letzten massiven Reaktivierung im Jahr 2007/2008 und den anschließenden umfangreichen Sanierungsmaßnahmen gab es als Auflage für die dauerhafte Besiedelung der Gefahrenzone, dass ein Monitoring- und Frühwarnsystem zum Einsatz kommen muss. Trotz dieser Vorgabe wurden diverse ausgearbeitete Konzepte aus verschiedenen Gründen auch 10 Jahre nach der Reaktivierung nicht in einem ausreichenden Maß bzw. als Langzeitlösung umgesetzt. Die Aufgabe dieses Arbeitsbereiches war es ein umsetzbares Konzept für ein Frühwarnsystem mit der Einbindung der lokalen Bevölkerung und den Stakeholdern zu entwickeln. Basierend auf mehreren Interviews mit Anrainern und Stakeholdern wurden 3 Umsetzungsvarianten des Frühwarnsystems entwickelt und im Rahmen von Workshops präsentiert und diskutiert sowie ein Kompromissvorschlag entwickelt.

1 Einleitung

Das ESS-Forschungsprojekt LAMOND startete mit 1. Jänner 2015. Das Forschungsvorhaben umfasste grob zusammengefasst drei Teilbereiche (Monitoring Netzwerk, Numerische Modellierung und den Stakeholder Prozess am Gschlifgraben), die in sich verschiedene Aspekte der Erforschung von Hangrutschungen und deren Umgebung umfassten. Der erste Bereich befasste sich mit der Fortführung bzw. dem Ausbau eines bereits zum Teil bestehenden Monitoring Netzwerkes. Dieser Bereich beinhaltet sowohl die technische Umsetzung der kontinuierlichen Datenakquisition mit verschiedenen Monitoring Systemen vor Ort, als auch die Datenaufbereitung, -auswertung, -interpretation und deren Archivierung. Die großen Datenmengen, die im Zuge des Betriebes mehrerer Monitoring Sites generiert wurden, stellten zum Teil eine große Herausforderung an die Datenaufbereitung und -auswertung dar. Hier konnten Aufbereitungs- und Auswerteroutinen, die bereits im vorangegangenen Forschungsprojekt TEMPEL (FWF Projekt Nr.: TRP 175-N21) entwickelt wurden, verwendet bzw. weiterentwickelt werden. Auch bei der technischen Umsetzung der Monitoring Sites (im Zuge des LAMOND-Projektes wurden zwei neue Sites installiert) konnte bereits auf eine fundierte Erfahrung aus vorangegangenen Forschungsprojekten in diesem Bereich zurückgegriffen werden. Dieser Faktor ist nicht zu unterschätzen, da der Langzeitbetrieb von kommerziellen Monitoring Systemen und vor allem von Eigenentwicklungen, die zum Teil zum Einsatz gekommen sind (Goelektrik Monitoring System „Geomon4D“ – entwickelt von der Geologischen Bundesanstalt), mitunter eine große Herausforderung darstellt. Da es sich zum Teil um sehr sensible Messsysteme handelt, lassen sich witterungsbedingte Ausfälle bzw. Beschädigungen nicht ausschließen. Um dennoch möglichst kontinuierliche Datenreihen zu generieren sind neben planmäßigen Wartungen der Monitoring Systeme auch kurzfristig zu planende Einsätze um etwaige Beschädigungen zu beheben unabdingbar. Im Kapitel zu den Monitoring Sites wird ausführlich dargelegt wie sich der Betrieb der verschiedenen Monitoring Sites gestaltet hat bzw. welche Schwierigkeiten bei welcher Lokation aufgetreten sind. In Summe kann auf jeden Fall bezüglich Kontinuität und Qualität der aufgezeichneten Monitoring Daten ein positives Resümee gezogen werden.

Der zweite Bereich des Forschungsvorhabens befasst sich mit der numerischen Modellierung, die als Basis die Daten des Monitoring Netzwerkes verwendet. Das grobe Ziel hierbei war mit der Software „Comsol Multiphysics“ für 2-3 ausgewählte Monitoring Sites (das Auswahlkriterium war die vorhandene Datenlage bzw. Datenqualität) jeweils ein Untergrundmodell zu entwickeln, an dem verschiedene dynamische Modellsimulationen durchgeführt werden. Es wurde angestrebt einen Zusammenhang aus beobachteten Daten und deren Interpretation mit einem hydrodynamischen, physikalischen Modell herzustellen und dadurch die zuvor getätigten Annahmen und Interpretationen zu untermauern oder auf neue Denkansätze gelenkt zu werden. Der Fokus lag hierbei bei der Änderung der Wassersättigung des Untergrundes, die eine zentrale Rolle beim Bewegungsverhalten von Hangrutschungen darstellt. Die Wassersättigung ist auch der Hauptanknüpfungspunkt an die Daten des Monitoring Netzwerkes, da beim geoelektrischen Monitoring die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes direkt mit der Änderung der Wassersättigung (teilweise auch mit der Temperatur des Untergrundes) zusammenhängt. Ein zentraler Punkt bei der Erstellung des Modells ist die Anpassung bestimmter Untergrundparameter (Porosität, Tortuosität, Zementation, ...) auf Basis der vorhandenen realen geoelektrischen Daten. Dieses „Parameterfitting“ stellte einen wesentlichen Teil dieses Arbeitsbereiches dar, da erst im

Verlauf der Tätigkeit klar wurde, dass ein physikalisch sinnvolles, mit den realen Daten ausreichend übereinstimmendes Untergrundmodell zu generieren, deutlich komplexer und schwieriger ist als erwartet. Da weitere Arbeitspakete auf der Qualität des jeweiligen Untergrundmodells aufbauen, wurde für deren Entwicklung und Anpassung deutlich mehr Zeit investiert als vorgesehen. Des Weiteren wurde auch bereits in diesem Arbeitsschritt klar, dass die Definition von genauen Grenzwerten, die mit der Beschleunigung der Hangrutschung zusammenhängen, anhand der generierten Modelle nicht in der Form zu realisieren ist, wie im Projektantrag formuliert. An dieser Stelle muss auch angemerkt werden, dass die fachliche Kooperation und Unterstützung in diesem Tätigkeitsbereich von einem wesentlichen Projektpartner (Universität Mailand – Geotechnische Expertengruppe um Prof. Giovanni Crosta) nicht wie geplant zustande gekommen ist. Diese Einflüsse wirken sich natürlich negativ auf das Erreichen der angestrebten Projektziele in diesem Tätigkeitsbereich aus. Es war unabdingbar in diesem Bereich ein paar Ziele zu adaptieren, was auch zur Folge hatte, dass der Hauptfokus auf nur eine Monitoring Site gelegt wurde.

Im dritten Projektjahr wurde im Bereich der numerischen Modellierung der Fokus mehr auf die Geotechnikmodellierung gelegt. In diesem Bereich konnten interessante Resultate erzielt werden, die Auskunft über den Stabilitätszustand und die potentielle Gefährdung geben. Zusammenfassend konnten durch die umfangreichen Arbeiten im Bereich der Modellierung wichtige Erkenntnisse für die Interpretation vor allem von geoelektrischen Monitoring Daten hinsichtlich hydrodynamischer Prozesse auf Hangrutschungen gewonnen werden. In welchem Umfang diese Interpretationen in ein Frühwarnsystem einfließen können muss im Einzelfall geklärt werden, generell ist der relativ komplexe Zusammenhang zwischen spezifischen elektrischen Widerstand, Wassersättigung des Untergrundes und dem schlussendlichen Einfluss auf das Auslösen bzw. Beschleunigen einer Hangrutschung für eine Berücksichtigung in Frühwarnsystemen eher hemmend.

Der dritte Teilbereich des Forschungsvorhabens umfasst die Betrachtung der institutionellen und soziokulturellen Aspekte bei der Umsetzung eines Frühwarnsystems an der Hangrutschung am Gschlifgraben. Der Gschlifgraben ist diesbezüglich eine sehr interessante Lokation, da nach der letzten massiven Reaktivierung im Jahr 2007/2008 und den anschließenden umfangreichen Sanierungsmaßnahmen, als Vorgabe für die dauerhafte Besiedelung der Gefahrenzone ein Monitoring- und Frühwarnsystem zum Einsatz kommen muss. Trotz dieser Vorgabe wurden diverse ausgearbeitete Konzepte aus verschiedenen Gründen auch 10 Jahre nach der Reaktivierung nicht in einem ausreichenden Maß bzw. als Langzeitlösung umgesetzt. Die Aufgabe dieses Arbeitsbereiches war es, ein umsetzbares Konzept für ein Frühwarnsystem mit der Einbindung der lokalen Bevölkerung und den Stakeholdern zu entwickeln. Basierend auf 21 geführten Interviews mit Anwohnern und Stakeholdern wurden im ersten Projektjahr drei sogenannte „Storylines“ entwickelt, die komplett unterschiedliche Umsetzungsvarianten des Frühwarnsystems darstellen. Diese drei Möglichkeiten der Umsetzung wurden dann im Rahmen von drei Anwohner/Stakeholder Workshops präsentiert und zur Diskussion gestellt, mit dem Ziel, schlussendlich zu einer Kompromisslösung zu kommen. Diese sollte der geforderten Vorgabe entsprechen, sollte allgemein von den Anwohnern akzeptiert sein und muss selbstverständlich auch langfristig finanzierbar sein. Schlussendlich konnte man sich unter den beteiligten Akteuren auf eine Kompromisslösung einigen, allerdings blieben noch ein paar wesentliche Punkte, die den Langzeitbetrieb sichern würden, offen. Schlusspunkt dieses Arbeitsbereiches war ein Empfehlungsschreiben des LAMOND-Projektes an die beteiligten Akteure mit dem Hinweis

welche entscheidenden Fragen im Zuge der Umsetzung des Monitoring- bzw. Frühwarnsystems am Gschliefgraben noch zu klären sind. Auf Basis diverser Rückmeldungen zum Diskussionsprozess der im Rahmen dieses LAMOND-Arbeitsbereiches geführt wurde, kann eine durchaus positive Bilanz gezogen werden. Es wurde zwar mit Projektende das Frühwarnsystem am Gschliefgraben noch nicht in Betrieb genommen, dennoch kann das LAMOND-Projekt für sich beanspruchen, dass der Diskussionsprozess in Gang gebracht wurde und zu einer größtenteils ausgearbeiteten Kompromisslösung geführt hat, die es nun von Seiten der verantwortlichen Akteuren umzusetzen gilt. Schlussendlich kann gesagt werden, dass sich wie so oft die Verteilung der finanziellen Last, als größtes Hindernis bei der Umsetzung herausgestellt hat. Die Lösung dieses Problems liegt allerdings nicht im Verantwortungsbereich des LAMOND-Projektes.

2 Monitoring Netzwerk

2.1 Übersicht

Ein wichtiger Aspekt des LAMOND-Projektes war die Fortführung, Instandhaltung bzw. Erweiterung des an der Geologischen Bundesanstalt seit dem Jahr 2009 etablierten Monitoring Netzwerkes. Daher konnten zu Projektbeginn 6 in Betrieb stehende Monitoring Sites vom vorangegangenen FWF Projekt TEMPEL (Projekt Nr.: TRP 175-N21) direkt übernommen werden. Die großen Vorteile dieser Übernahme waren, einerseits die enorme Kostenersparnis durch die bereits vorhandene Monitoring Infrastruktur und andererseits die zum Teil umfangreichen Datenmengen, die an den jeweiligen Standorten bereits verfügbar waren und somit sofort als Basis für die Arbeitsschritte in der numerischen Modellierung herangezogen werden konnten. Darüber hinaus dienen bereits in der Vergangenheit aufgezeichnete Monitoring Daten im Zuge verstärkter Beschleunigungsphasen der Hangrutschungen als wichtige Referenz für zukünftige Ereignisse und können somit zu einer verbesserten Interpretation führen. Des Weiteren zeichnen sich manche Standorte dadurch aus, dass lediglich einmal jährlich (jahreszeitabhängig) eine entsprechende Reaktivierungsphase auftritt, die erst durch wiederkehrende Beobachtung zu einem gewissen Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse führt. Diesbezüglich ist auch zu beachten, dass die unterschiedlichen Jahre im Hinblick auf den Niederschlag (in den meisten Fällen der bedeutendste Faktor bei der Reaktivierung) nicht immer vergleichbar sind – umso wichtiger ist in diesem Zusammenhang die Verfügbarkeit langfristiger Datenreihen. Ein nicht zu unterschätzender Aspekt ist auch, das bereits in den vorangegangenen Projekten generierte Knowhow über Installation, Betrieb, Wartung und Instandhaltung der verwendeten Monitoring Systeme, das einen wesentlich Beitrag zu einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung liefert – Basis für detaillierte Interpretationen dynamischer Untergrundprozesse an der jeweiligen Hangrutschung.

In Abb. 1 ist die Lage der vom LAMOND-Projekt übernommenen Monitoring Sites und der geplanten Neuinstallation dargestellt. Zu erwähnen ist, dass sich in Bezug auf den Projektantrag eine kleine Änderung ergeben hat – durch das nicht Zustandekommen der Kooperation mit der Universität Mailand (Expertengruppe um Prof. Giovanni Crosta), musste die geplante Neuinstallation an der Lokation Mont de La Saxe (I) durch eine Alternative ersetzt werden. In Kooperation mit der Wildbach- und Lawinenverbauung/Stabsstelle Geologie in Innsbruck konnte eine attraktive Ersatzlokation (Navis) gefunden werden, an der bereits umfangreiche Vorinformationen vorhanden waren und darüber hinaus die Installation eines automatischen Inklinometers, der von der WLV finanziert und betrieben werden sollte, absehbar war. Auch die Monitoring Site in Gresten kann bezüglich vorhandener Monitoring Daten als Neuinstallation gewertet werden, da nur aus organisatorischen Gründen die Installation nicht während der Projektlaufzeit sondern knapp vor Projektstart im November 2014 erfolgte. Unter den übernommenen Sites sind aus unterschiedlichen Gründen der Gschlifgraben (OÖ) und Bagnaschino (Piemont, I) hervorzuheben. Am Gschlifgraben war zum Zeitpunkt des Projektstarts von unserer Seite als Monitoring System lediglich noch ein automatischer Inklinometer in Betrieb (durchgehend seit 2009), der im Zuge des Stakeholder Prozesses durch die Etablierung eines langfristigen Frühwarnsystems ersetzt werden sollte (Details dazu siehe Kapitel 4). Die Besonderheit der Site Bagnaschino ist zum einen der bereits seit Herbst 2010 laufende Betrieb und zum anderen die sehr interessanten Ergebnisse des geoelektrischen Monitorings bisher (siehe dazu Supper et al. 2014), die den Ausgangspunkt

für den Arbeitsbereich der numerischen Modellierung darstellen (in diesem Arbeitsbereich erfolgte aus unterschiedlichen Gründen auch eine Fokussierung auf diese Monitoring Site).

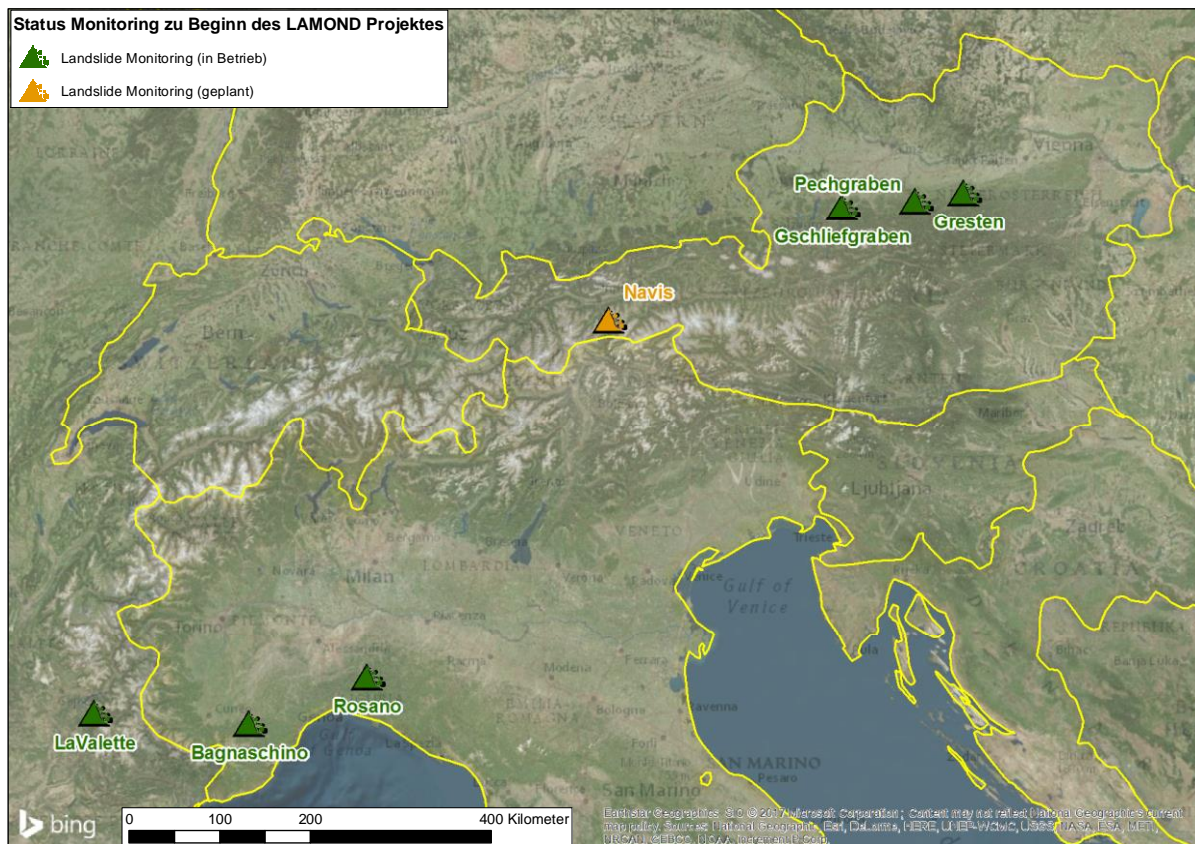


Abb. 1: Lageplan der LAMOND Monitoring Sites zum Zeitpunkt des Projektstarts (Jänner 2015)

Abb. 2 zeigt den Status des Monitoring Netzwerkes zum Zeitpunkt des Projektendes. Um eine gewisse Kontinuität beizubehalten wird der Betrieb der noch aktiven Sites mit internen Budgetmitteln weitergeführt. Der Monitoring Betrieb am Gschliefgraben wurde zwischenzeitlich komplett eingestellt, da im Laufe des Projektes aufgrund der relativ starken Verschiebungen im Untergrund, der eingebaute automatische Inclinometer beschädigt wurde und zur Reparatur geschickt werden musste. Am Gschliefgraben soll ohnedies in absehbarer Zeit, die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Kompromisslösung für ein Monitoring- bzw. Frühwarnsystem, durch die Gemeinde Gmunden umgesetzt werden. Die Monitoring Aktivitäten am Pechgraben wurden im Laufe des LAMOND-Projektes ebenfalls abgeschlossen, da keine forschungsrelevanten Entwicklungen mehr zu erwarten waren (einige Ergebnisse zu dieser Site wurden während der Projektlaufzeit publiziert – siehe Vouillamoz et al. 2017, Provost et al. 2017 und Ottowitz et al. 2017). Die beiden Monitoring Sites in Italien wurden hauptsächlich deshalb zum Abschluss gebracht, da die von den lokalen Gemeinden betriebenen automatischen Inclinometer (deren Daten dem LAMOND-Projekt zur Verfügung gestanden sind) an den jeweiligen Sites, aufgrund des langjährigen Betriebes nicht mehr funktionsfähig waren und keinerlei Interesses an deren Reparatur zu erkennen war. Da Daten zur Bewegungsaktivität der Hangrutschung aber für eine Interpretation der zugrundeliegenden Prozesse essentiell sind und darauf nicht verzichtet werden kann, war die einzig logische Schlussfolgerung den Betrieb der betroffenen Sites einzustellen. Beide Sites

waren ohnedies über einen relativ langen Zeitraum aktiv, sodass eine solide Datenbasis generiert werden konnte, die eine zufriedenstellende Interpretation der Monitoring Daten erlaubt (siehe dazu Supper et al. 2014 bzw. Guardiani et al. 2017). Die Monitoring Site in Frankreich (La Valette) hat einen besonderen Status, da sie ab Februar 2016 von einem parallel laufenden Forschungsprojekt (FWF-Joint Projekt HYDROSLIDE (Projekt Nr.: I 2619-N29)) übernommen wurde, sodass im LAMOND-Projekt keine laufenden Kosten für die Wartung mehr anfallen, die generierten Monitoring Daten aber dennoch weiter verwendet werden können.

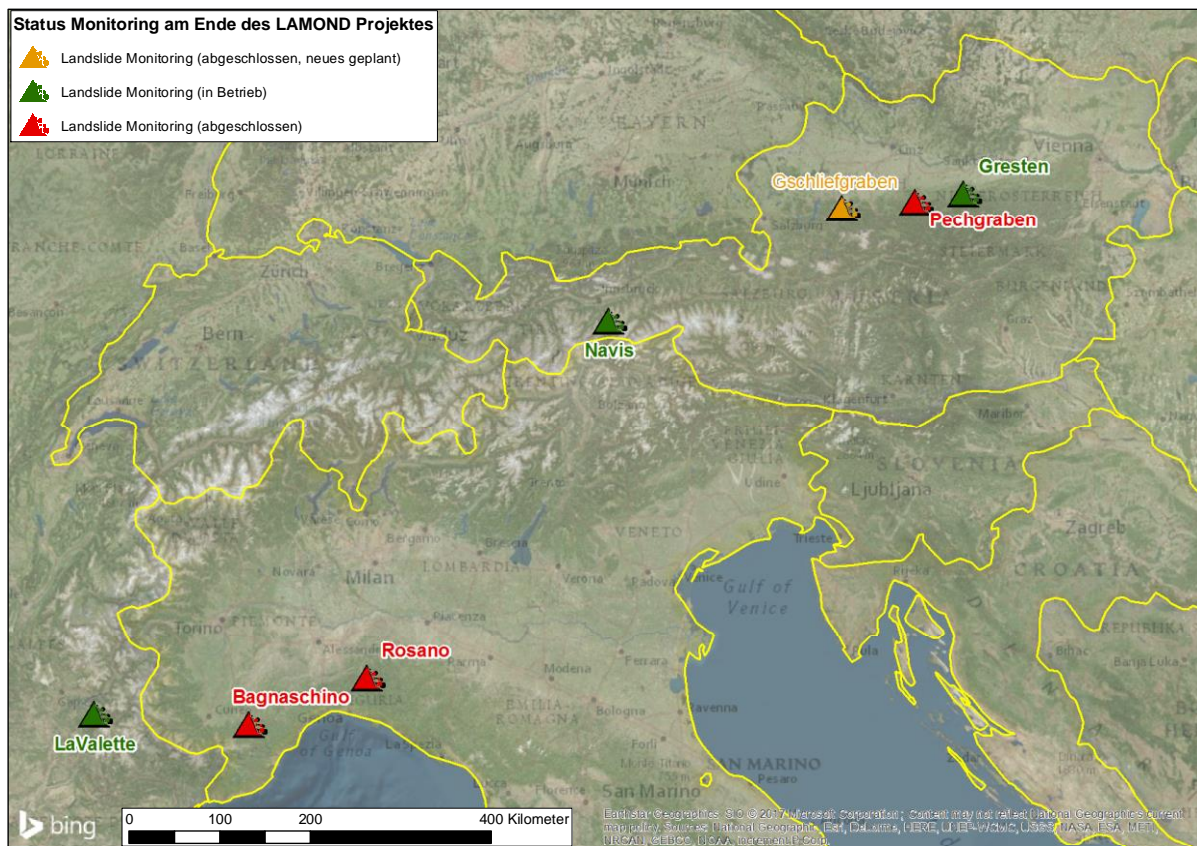


Abb. 2: Lageplan der LAMOND Monitoring Sites zum Zeitpunkt des Projektendes (Jänner 2018)

Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Monitoring Sites und die Darstellung repräsentativer Ergebnisse der akquirierten Monitoring Daten erfolgt in Kapitel 2.3.

2.2 Relevante Messgrößen und verwendete Messsysteme

Die essentiellen Messgrößen, die es ermöglichen gewisse Erkenntnisse über das Verhalten von Hangrutschungen bzw. den zugrundeliegenden Prozessen zu bekommen sind die Bewegung (Verschiebung) an sich und die Wassersättigung des Untergrundes (bzw. die zeitliche Änderung der Wassersättigung), die zumeist die entscheidende Rolle bei Reaktivierungsprozessen spielt. Des Weiteren sind Informationen über die allgemeine geologische Situation und die interne Struktur der Hangrutschung erforderlich (Form und Mächtigkeit des Rutschkörpers, Grundwasserspiegel,...). Zusätzlich sind auch allgemeine meteorologische Daten (Temperatur, Niederschlag,...) von Interesse.

Die zentrale Messmethode, die im LAMOND-Projekt zum Einsatz kommt, ist die Multielektroden Gleichstromgeoelektrik im Monitoring Betrieb. Die damit bestimmte Messgröße ist der spezifische elektrische Widerstand für einen bestimmten Untergrundbereich (entlang eines definierten Messprofils) bzw. dessen zeitliche Änderung. Der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes hängt vom Gesteinstyp, der Porosität, der Wassersättigung und der elektrischen Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit ab. Des Weiteren spielt bei Sedimenten auch der Tongehalt eine zentrale Rolle. Das Ergebnis einer geoelektrischen Einzelmessung liefert die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes entlang des Messprofils und somit wichtige strukturelle Informationen über den internen Aufbau einer Hangrutschung. Im Monitoring Betrieb liegt der Fokus auf der zeitlichen Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes, die hauptsächlich von der Änderung der Wassersättigung und in geringem Maße von der Bodentemperatur abhängt. Somit liefern geoelektrische Monitoring Daten indirekt Informationen über die zeitliche Änderung der Wassersättigung in unterschiedlichen Tiefen entlang des installierten Messprofils. Da die Hangstabilität häufig von Wassersättigung, Porenwasserdruck und Änderungen der Fließcharakteristik abhängt, ermöglicht die Beobachtung der zeitlichen Variation elektrischer Parameter die Interpretation der zugrundeliegenden Prozesse im Untergrund. In Kombination mit Bewegungsdaten lässt sich so, grob gesagt, ein Zusammenhang zwischen den hydrologischen Prozessen im Bereich der Hangrutschung und deren Bewegungscharakteristik herstellen. Das zusätzliche Einbeziehen komplementärer Datensätze (Temperatur, Niederschlag, Grundwasserspiegel,...) kann zu einer umfangreichen Interpretation des Zustandes bzw. des Verhaltens der Hangrutschung führen.

Die geoelektrischen Daten werden mit einem von der Geologischen Bundesanstalt entwickelten Messsystems (Geomon4D) akquiriert (siehe

Abb. 3). Im Gegensatz zu kommerziellen Systemen kann es den jeweiligen Anforderungen entsprechend für jede Hangrutschung optimiert werden und ermöglicht die Aufzeichnung von Rohdaten, die eine optimale Datenfilterung im Zuge der Auswertung ermöglichen. Einmal installiert, misst das Gerät völlig selbstständig und führt täglich eine vorprogrammierte Abfolge von Messzyklen aus. Die Daten werden dann automatisch einmal pro Tag per E-Mail versendet und können somit täglich im Büro ausgewertet werden. Um die Stromversorgung des Systems auch an abgelegenen Lokationen zu gewährleisten, kommt eine Brennstoffzelle zum Einsatz, die über entsprechende Batterien die notwendige elektrische Energie zur Verfügung stellt. Um den Brennstoffverbrauch (Methanol) zu reduzieren, wird das Energiesystem zumeist noch durch ein Solarpanel ergänzt. Bei vorhandener Infrastruktur kann das System selbstverständlich auch mit einem Anschluss an das lokale Stromnetz betrieben werden, allerdings ist man hier von der lokalen Stromnetzstabilität abhängig. Aus

Sicherheitsgründen und um einen möglichst langfristig störungsfreien Betrieb zu gewährleisten werden die geoelektrischen Messkabel für den Monitoring Betrieb im Regelfall unterirdisch installiert (siehe Abb. 4).

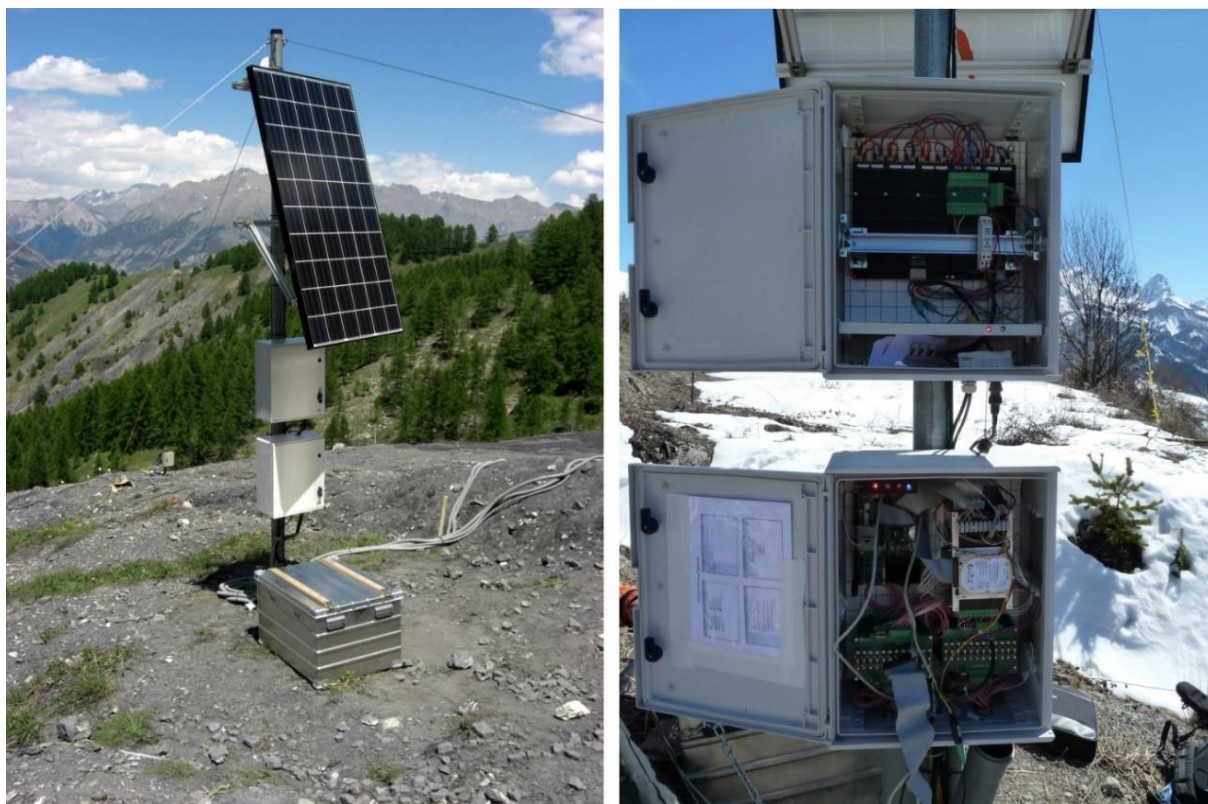


Abb. 3: Geoelektrisches Monitoring System inklusive Brennstoffzellensystem und Solarpanel (links), Detailansicht Innenleben des geoelektrischen Monitoring Systems - Geomon4D (rechts)



Abb. 4: Installation der geoelektrischen Messkabel - Übersicht (links), Detailansicht in Künette (rechts)

Für die Messung der Untergrundverschiebung kommen im Rahmen des LAMOND-Projektes zwei unterschiedliche Messmethoden zur Anwendung. Bei eher geringen Bewegungsraten (Zentimeterbereich pro Jahr) kommt ein automatischer Inklinometer zum Einsatz, der im Bohrloch installiert wird und die Verschiebung mit der Tiefe wiedergibt. Mit dieser Methode lassen sich sehr gut sogenannte Rutschhorizonte (Tiefenbereiche mit erhöhten Verschiebungsraten) bestimmen, die allerdings nur punktuell erfasst werden. Bei höheren Bewegungsraten kann dieses System kaum eingesetzt werden, da bereits nach einer Auslenkung von 10 - 20 cm die Beschädigung oder im schlimmsten Fall sogar der Verlust des Messsystems erfolgen kann. Für die Erfassung höhere Bewegungsraten wurde im LAMOND-Projekt ein eigens entwickeltes Foto Monitoring System eingesetzt, mit dem anhand von Bildabfolgen die Oberflächenverschiebung bestimmt werden kann. Es ist hier weder eine hohe Genauigkeit noch eine Information über die Tiefe der Rutschung vorhanden. Es geht vielmehr um das Erfassen von etwaigen Beschleunigungsphasen und deren Korrelation mit Wassersättigungsänderungen, die keine präzise quantitative Messung der Verschiebung erfordern.

Der zum Einsatz kommende automatische Inklinometer DMS der Firma C.S.G (www.csg-geo.it) besteht aus einer Folge von festen, röhrenförmigen Modulen zu je einem Meter Länge, die miteinander flexibel verbunden sind (siehe Abb. 5). Dadurch kann das System allen Untergrundbewegungen nachgeben und diese registrieren. In jedem Metallrohr befinden sich die anwendungsabhängigen Messsensoren (z.B. Neigungsmesser, Piezometer, Accelometer, Magnetometer), die über ein zentrales Messgerät, in dem sich auch die Stromversorgung und das Datenübertragungsmodul befinden, gesteuert werden. Die Anzahl der Module kann beliebig gewählt werden und somit der Fragestellung an der jeweiligen Lokation angepasst werden.

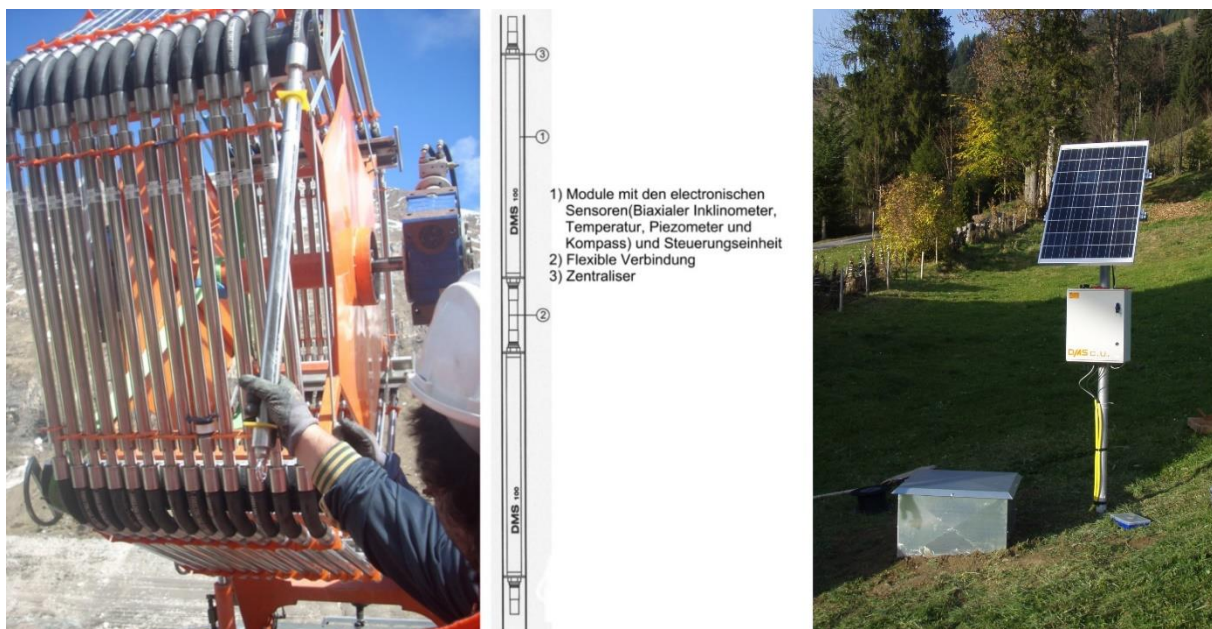


Abb. 5: DMS Inklinometer, röhrenförmige Module bei der Installation (links), Schematischer Aufbau des Inklinometers (Mitte) und Bild der Steuereinheit mit Solarpanel (rechts)

Das verwendete Foto Monitoring System wurde für die spezielle Anwendung aus einzelnen Komponenten zusammengesetzt und stellt somit kein kommerzielles Monitoring System dar.

Zum Einsatz kommt eine hochauflösende Nikon D7000 Fotokamera, die in einem wasserdichten Gehäuse, mit externer Batterie in Kombination mit einem kleinen Solarpanel, betrieben wird (siehe Abb. 6). Die Fotokamera erlaubt die Einstellung einer gewünschten Frequenz der Bildabfolge für eine maximale Anzahl von 999 Bildern. Nach dieser Anzahl muss das System wieder auf den Ausgangsstatus zurückgesetzt werden. Bei den vorliegenden Bewegungsraten ist es ausreichend wenn im 4-6 Stundentakt Bildaufzeichnungen erfolgen, sodass eine Wartung nur etwa halbjährlich erfolgen muss. Entscheidend für eine Abschätzung der Verschiebung ist das Anbringen von Pflöcken im Bildbereich mit genau definierten Längenmarkierungen, um so eine grobe perspektivische Entzerrung zu ermöglichen. Die Bestimmung der Verschiebung erfolgt dann anhand digitalisierter Pflöck Positionen und kann dann als Zeitreihe für die entsprechende Position auf der Rutschmasse dargestellt werden (Beispiele dazu in Kapitel 2.3.3).

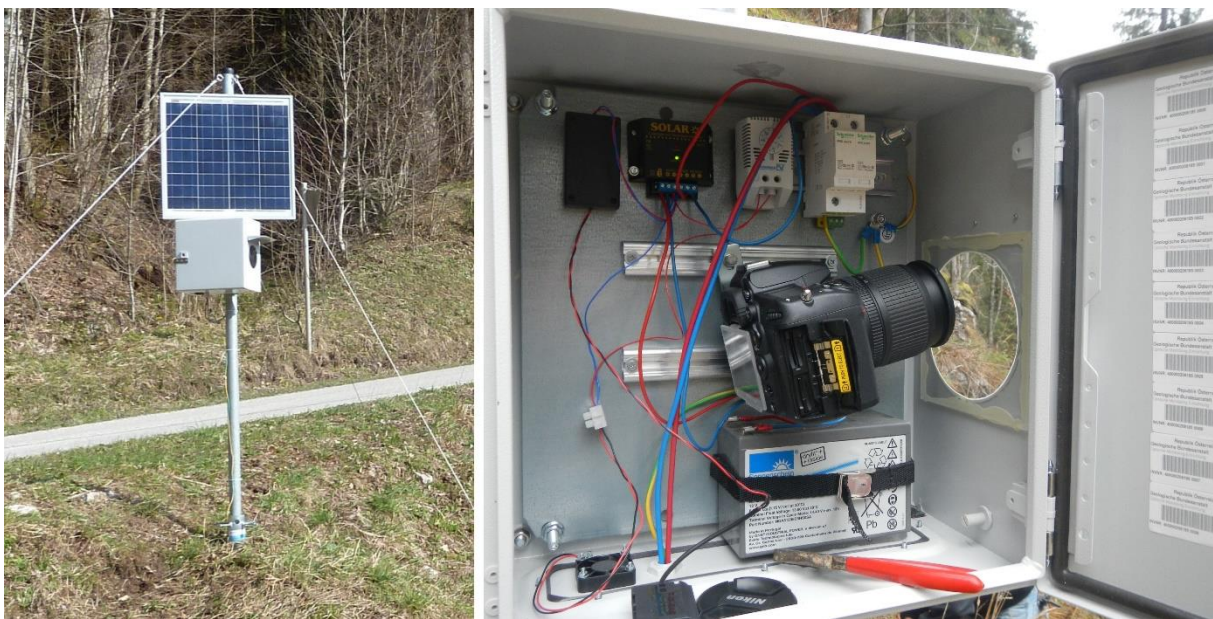


Abb. 6: Im Feld aufgebautes Foto Monitoring System (links), Innenansicht des wasserdichten Gehäuses (rechts)

Die Akquirierung zusätzlicher, komplementärer Monitoring Daten, wie Grundwasserspiegel, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, elektrische Leitfähigkeit und Niederschlag erfolgte durchwegs mit an der Geologischen Bundesanstalt verfügbaren kommerziellen Systemen.

An den Monitoring Lokationen, die über eine ausreichend Tiefe Bohrung verfügen, wurden Piezometer (Drucksensoren) vom Typ DCX-16 (siehe Abb. 7) der Firma Keller (<http://www.keller-druck.ch>) zur Aufzeichnung von Grundwasserspiegelschwankungen eingesetzt. Die Daten müssen bei diesem System etwa einmal jährlich (je nach Messintervall) vor Ort ausgelesen werden, da keine automatische Datenübertragung verfügbar ist. Dies erfolgte im Zuge der ohnedies notwendigen jährlichen Wartungsaktionen anderer Monitoring Systeme und stellte somit keinen Mehraufwand dar.

Die weiteren Untergrundparameter (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, elektrische Leitfähigkeit) wurden mit einem System der Firma Decagon (<http://www.decagon.com>) aufgezeichnet. Der Vorteil hierbei ist, dass ein standardisierter Datenlogger mit fünf Eingängen mit verschiedenen Sensoren bestückt werden kann und somit verschiedene Messungen mit einem System vollzogen werden können. Als Sensor wird auch ein

Niederschlagsmesser angeboten, der an Monitoring Sites, an denen keine meteorologischen Daten aus anderen Quellen (z.B. Messstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) in unmittelbarer Nähe verfügbar waren, eingesetzt wurde. Bei den Bodensensoren wurden folgende Typen verwendet: 5TE, 10HS und RT-1 (technische Details siehe unter <http://www.decagon.com>).



Abb. 7: Piezometer Typ DCX-16 (links), Auslesen der Daten im Feld (rechts)

Der symbolhafte Einbau der Bodensensoren sowie ein im Feld installiertes System mit Niederschlagsmesser sind in Abb. 8 dargestellt.



Abb. 8: Symbolhafter Einbau der Bodensensoren (links) und aufgebauter Decagon Datenlogger mit Niederschlagsmesser an einer LAMOND-Monitoring Site (rechts)

Die nachfolgende Tabelle liefert eine Übersicht in welchen Zeiträumen welche Messsysteme an den jeweiligen LAMOND-Monitoring Stationen in Betrieb waren. Zusätzlich beinhaltet die Tabelle ein paar grundlegende Charakteristiken der jeweiligen Monitoring Installationen.

Tab 1: Übersicht der im Einsatz befindlichen Messsysteme an den LAMOND-Monitoring Stationen

| Messgebiet Geoelektrisches Monitoring | Long [° E] | Lat [° N] | Von | Bis | Elektr.- Abstand [m] | Profil- Länge[m] | Messtiefe max. [m] | Zusätzliche Messparameter | Anmerkungen |
|---|---------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Automatischer Inklinometer | | | Von | Bis | Anzahl Module | Messtiefe [m] | Totalbeweg- ung [mm] | | Anmerkungen |
| Gschlifgraben | 13.81799 | 47.88396 | 24.9.2009 | 11.3.2015 | 3/4 | 120/192 | 20/32 | NS, Abfluss | 2 Profile, Abfluss & NS von IAN Boku |
| | | | 23.9.2009 | 24.10.2016 | 33 | 0-33 | 218 | | Maximale Auslenkung-> Abbau |
| Gresten | 15.01908 | 47.97995 | 20.11.2014 | In Betrieb | 1.8 | 165.6 | 27 | Bofeu, BoTemp | |
| Pechgraben | 14.54067 | 47.92518 | 16.7.2014/ 8.4.2015 | 31.1.2016/ 18.8.2016 | 3/2 | 274/16 | 45/2.5 | Bofeu, BoTemp, NS, Piezo, Kameras | 2 Profile |
| | | | 18.12.2013 | 24.5.2017 | 10/20 | 19-29/0-20 | 10/10 | | 2 Inklinometer, 1 Eigentum der WLV |
| La Valette | 6.64007 | 44.40516 | 12.12.2012 | In Betrieb | 2 | 184 | 30 | Bofeu, BoTemp | |
| Bagnaschino | 7.93384 | 44.33575 | 21.10.2010 | 9.11.2016 | 1 (8, 4, 2, 1) | 224 | 37 | Bofeu, BoTemp, NS, Piezo | Beendet da Inkl. defekt, elektr. Abstand zur Mitte hin geringer |
| | | | 14.6.2010 | 10.2016 * | 20/40 | 0-20/20-60 | 2 Inklin., im Eigentum der Gemeinde | | |
| Rosano | 9.10554 | 44.66238 | 10.7.2012 | 22.4.2015 | 2.5 | 230 | 38 | Bofeu, BoTemp, NS, Piezo | Beendet da Inkl. defekt |
| | | | 1.6.2010 | 2015 * | 17 | 0-17 | im Eigentum der Gemeinde | | |
| Navis | 11.50274 | 47.12907 | 1.7.2015 | In Betrieb | 3.7/5 | 296/200 | 49/33 | Bofeu, BoTemp, NS | 2 Profile, anstatt Mont de le Saxe |
| | | | 28.10.2015 | In Betrieb | 4 | 34-38 | 17.5 | | Eigentum der WLV |

Bofeu – Bodenfeuchte, BoTemp - Bodentemperatur, NS - Niederschlag, Piezo - Wasserstands Messung

*Inklinometermodule fielen nach und nach aus

2.3 Betrieb und Ergebnisse der Monitoring Sites

Alle verwendeten Messsysteme sind prinzipiell für eine lange autonome Datenaufzeichnung konzipiert, sodass relativ lange Intervalle für entsprechende Wartungstätigkeiten bestehen. Diese Wartungstätigkeiten umfassen bei Verwendung des Brennstoffzellensystems für die Stromversorgung vor allem das Nachfüllen des Methanol Vorrates. Das Nachfüllintervall beträgt im Mittel etwa ein Jahr, kann bei optimaler Lage bezüglich Solarstromproduktion aber bis auf 2 Jahre ausgedehnt werden. Ein Teil der LAMOND-Monitoring Stationen wird bzw. wurde mit einem Anschluss an das lokale Stromnetz betrieben, wodurch sich die Wartungsintervalle theoretisch nur nach den von Zeit zu Zeit vor Ort auszulesenden Messsystemen richten (Piezometer, Decagon System). Allerdings muss ganz klar gesagt werden, dass vor allem das geoelektrische Monitoring System (Geomon4D) gegenüber äußeren Einflüssen (z.B. direkter oder indirekter Blitzschlag) zum Teil sehr sensibel reagiert und mitunter (je nach Lokation) mehrmals jährlich Reparaturarbeiten notwendig waren. Die unterschiedliche Anfälligkeit auf äußere Störeinflüsse je nach Lokation konnte trotz bereits mehrjährigen Betriebes mehrerer Systeme nicht gänzlich geklärt werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der einzelnen Monitoring Stationen ausführlich beschrieben und, soweit es die Datenlage zulässt, erfolgt eine mögliche Interpretation des Zusammenspiels von hydrologischen Untergrundprozessen und Reaktivierungsprozessen der Hangrutschung. Neben den Ergebnissen wird auch auf etwaige Besonderheiten, Schwierigkeiten und Herausforderungen des laufenden Monitoring Betriebes eingegangen, um auch darzulegen, dass ein kontinuierlicher Langzeitbetrieb mehrere Monitoring Stationen mitunter einen hohen Arbeitsaufwand mit sich bringt.

2.3.1 Monitoring Station – Gschlifgraben

Der Gschlifgraben (Lageplan siehe Abb. 9) spielt im LAMOND-Projekt vor allem im dritten Arbeitsbereich (Stakeholder Prozess – Entwicklung eines Monitoring- bzw. Frühwarnsystems) eine zentrale Rolle. Die Monitoring Aktivitäten waren hingegen während der Projektlaufzeit eher gering, da die bereits im Jahr 2009 von der Geologischen Bundesanstalt installierten Monitoring Systeme (DMS Inclinometer und Geomon4D (2 Profile)) aus unterschiedlichen Gründen schon am Ende ihrer Einsatzdauer waren (siehe Tab 1). Die Erfahrung aus dem Langzeitbetrieb der Monitoring Systeme und die Kenntnis über die Aussagekraft der unterschiedlichen Monitoring Daten an diesem Standort, konnten aber maßgeblich in die Beratungen rund um die Entwicklung des Frühwarnsystems eingebracht werden. Der Gschlifgraben hat als Hangrutschung bereits eine lange Historie, da es in der Vergangenheit immer wieder in unterschiedlichen Abständen zu Reaktivierungen und zum Teil zu katastrophalen Rutschereignissen gekommen ist. Das älteste dokumentierte Ereignis reicht in das Jahr 1660 zurück. Die letzte massive Reaktivierung erfolgte im Herbst 2007, die umfangreiche Sanierungsmaßnahmen nach sich zog und schlussendlich in die Installation von verschiedenen Monitoring Systemen im Jahr 2009 mündete. Eine umfangreiche Beschreibung der Ereignisse rund um die Reaktivierung und die Sanierungsmaßnahmen ist in einem Synthesebericht (Moser 2009) gegeben. Schlussendlich war die gesetzliche Vorgabe, dass die dauerhafte Wiederbesiedelung der Gefahrenzone nur mit einem entsprechenden Monitoring- bzw. Frühwarnsystem erfolgen darf. Diesbezüglich wurde für den Gschlifgraben ein umfassendes Konzept ausgearbeitet, dass aber hauptsächlich wegen finanzieller Aspekte nicht zur Umsetzung kam. Hier setzt der Stakeholder Prozess des LAMOND-Projektes an, der

zur Entwicklung einer Kompromisslösung hinsichtlich Monitoring- bzw. Frühwarnsystem führen soll.



Abb. 9: Lageplan Gschliefgraben Übersicht (oben), Detail mit Lage der Monitoring Systeme (unten)

Hinsichtlich der geologischen Situation liegt im Gschlifgraben ein tektonisches Fenster des Ultrahelvetikums (UHV) zwischen der penninischen Rhenodanubischen Flyschzone (RFZ) im N und den oberostalpinen Nördlichen Kalkalpen (NCA) im S vor (siehe Abb. 10). Die Flysch Hauptdecke umfasst Quarzsandsteine, glimmerreiche Sandsteine, Siltsteine, Tonsteine und mergel, Kalksandsteine und mergel. In den NCA finden sich überwiegend Karbonate, untergeordnet Haselgebirge, Kieselschiefer und Mergel. Das UHV setzt sich hauptsächlich aus stark deformierten bunten Mergeln und Kalkmergeln der Buntmergelerde (BMS) zusammen. Der oberste Abschnitt des Gschlifgrabens wird durch Moränen und eine quartäre Hang-

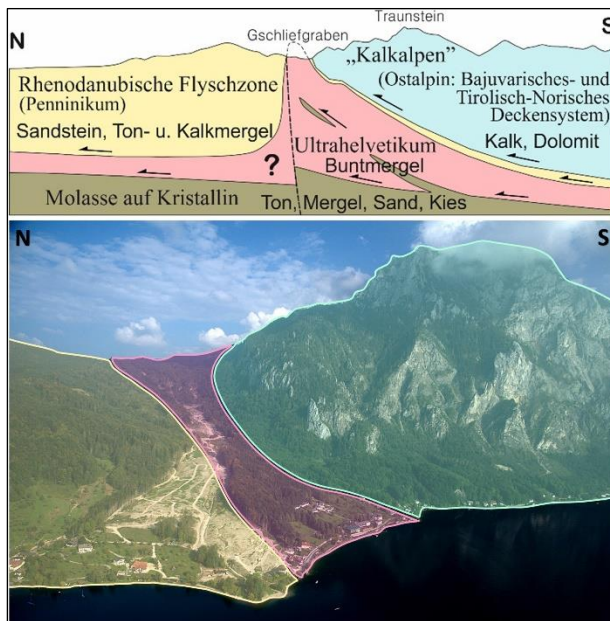


Abb. 10: Hangrutschung Gschlifgraben von W mit einem schematischen N-S Profil des tektonischen Aufbaus

schuttbrekzie, die sich in Riesenblöcke auflöst, überlagert. Durch unterschiedliche Verfügbarkeit des Materials im Laufe der Zeit, durch unterschiedliche Transport- und Ablagerungsbedingungen entstand ein intern inhomogen aufgebauter Schuttkegel mit im Bereich des Schwemmkegels nebeneinander liegenden Paketen von weniger bzw. stärker durchlässigem Material und einer Wechsellagerung von bindigen und weniger bindigen Materialien (Moser 2009). Die im LAMOND-Projekt im Einsatz befindlichen Monitoring Systeme (Inklinometer und Geomon4D) befinden sich praktisch ausschließlich im Bereich des Ultrahelvetikums, wobei hier im zentralen Bereich der Hangrutschung durch umfangreiche Umlagerungsprozesse vor allem auf der Oberfläche die Zusammensetzung des Untergrundes mitunter sehr inhomogen ist – dies zeigt sich auch in der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes der beiden geoelektrischen Monitoring Profile. Die beiden Profile liegen rechtwinkelig zueinander, wobei das Querprofil an dieser Engstelle der Hangrutschung praktisch auf beiden Seiten bis zum Randbereich der Rutschmasse reicht. Das Längsprofil ist demnach in Bewegungsrichtung ausgelegt und führt ähnlich dem Querprofil im zentralen Bereich an der knapp über 30 m tiefen Bohrung vorbei, in der der DMS Inklinometer die Bodenverschiebung über die gesamte Tiefe aufzeichnet. Zusätzlich zu diesen beiden Systemen konnten meteorologische Daten von einer von der Universität für Bodenkultur betriebenen Wetterstation bezogen werden.

Abb.11 zeigt das Ergebnis des seit 2009 in Betrieb stehenden DMS Inclinometers. Dargestellt ist die kumulative Verschiebung mit der Tiefe in zeitlichen Schritten von einem Jahr (unterschiedliche Farbgebung der Kurven). Es zeigt sich in der Tiefe zwischen 10 und 12 m unter GOK ein deutlicher Rutschhorizont, an dem der Großteil der aufgezeichneten Verschiebung auftritt. Klar zu sehen ist auch die Verringerung der Bewegungsraten mit der Zeit. Dieser Umstand wird in Abb. 12 noch wesentlich deutlicher sichtbar, wo lediglich die Verschiebung zwischen den Inclinometermodulen in 10 und 12 m unter GOK als Zeitreihe dargestellt ist. Hier wird klar, dass etwa die Hälfte der Verschiebung an diesem Rutschhorizont

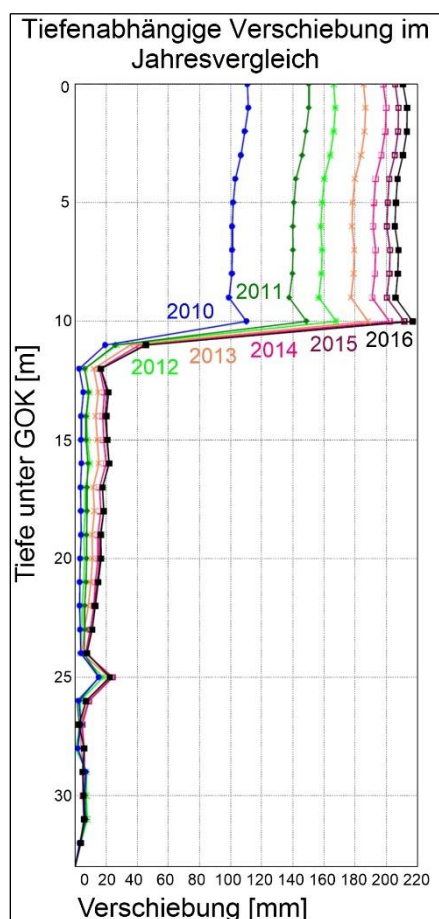


Abb. 11: Vom DMS Inclinometer aufgezeichnete Verschiebung mit der Tiefe im Jahresvergleich

im ersten Monitoring Jahr vonstattengegangen ist. Im Projektzeitraum des LAMOND-Projektes (seit Anfang 2015) wurde lediglich eine Verschiebung von etwa einem Zentimeter beobachtet. Dieses Verhalten deutet ganz klar auf eine Stabilisierung der Hangrutschung hin, die mit Sicherheit auch auf die enorm umfangreichen Sanierungsmaßnahmen zurückzuführen ist. Für diesen Bereich der Rutschung sind hierbei vor allem die installierten Drainagen Systeme von großer Bedeutung, die große Teile der an sonst in den Rutschkörper eindringenden Oberflächenwässer ableiten. Die in Summe doch an die 20 cm große Verschiebung im Bereich des Rutschhorizontes bringt den Inclinometer definitiv an die Belastungsgrenze und es kann der Verlust der darunterliegenden Module nicht mehr ausgeschlossen werden. Daher wurde der Inclinometer, der anteilmäßig im Besitz der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) sowie der Geologischen Bundesanstalt (GBA) steht, im Oktober 2016 von der WLV mittels Kranlastwagen gehoben (siehe Abb. 13) und zur Wartung bzw. Reparatur nach Italien geschickt. Damit wurde der Monitoring Betrieb am Gschlifgraben im Rahmen des LAMOND-Projektes vorläufig beendet und soll, unter klar definierten Rahmenbedingungen, im Zuge der Umsetzung des geplanten Monitoring- bzw. Frühwarnsystems im Laufe des Jahres 2018 in entsprechender Form wieder

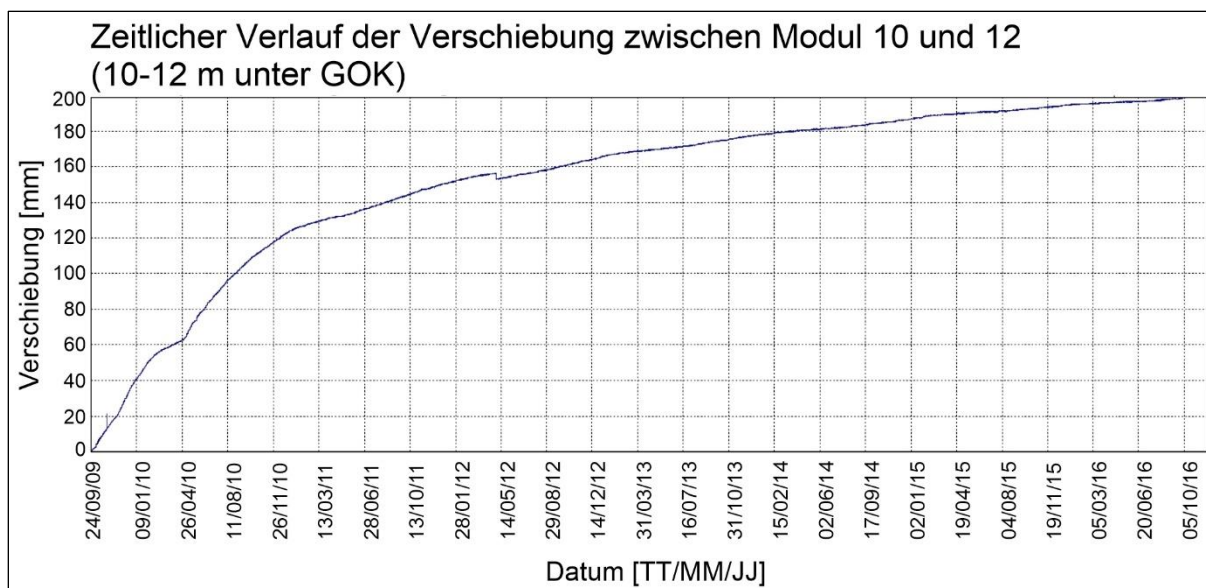


Abb. 12: Vom DMS Inklinometer aufgezeichneter zeitlicher Verlauf der Verschiebung zwischen Modul 10 und 12



Abb. 13: Ausbau des DMS Inklinometers; (A) Einfüllen eines Gleitmittels für das reibungsärmere Ziehen des Inklinometers; (B) und (C) Ziehen des Inklinometers mittels Kranlastwagen

Das geoelektrische Monitoring am Gschlifgraben wurde bereits im März 2015 (3 Monate nach Projektbeginn) aufgrund der fehlenden Aussicht auf weitere neue Erkenntnisse und den fortschreitenden Ausfall von Messelektroden (Defekte am Messkabel durch Relativverschiebungen des Untergrundes, Korrosion,...) deinstalliert. Somit ist die im LAMOND-Projekt generierte geoelektrische Datenreihe eher kurz, daher werden hier nur exemplarisch die wichtigsten Ergebnisse der gesamten geoelektrischen Monitoring Aktivität am Gschlifgraben dargelegt.

In Abb. 14 ist ein repräsentatives Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes, basierend auf den geoelektrischen Monitoring Daten des Querprofils, dargestellt. Mit darübergelegten Plot der Verschiebungsdaten lässt sich sehr gut erkennen inwiefern sich der Rutschhorizont im Widerstandsmodell durch die Grenze zwischen niedrigen und hohen

Werten widerspiegelt (Übergang blauer zu roter Farbbereich). Die genaue Betrachtung des Wertebereiches der Farbskala zeigt recht schnell, dass durchwegs geringe Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes vorhanden sind, was auf den sehr hohen Tongehalt und auch zum Teil die starke Durchfeuchtung zurückzuführen ist. Das relativ heterogene Bild in den obersten 5 – 10 m unter GOK ist größtenteils auf Umlagerungsprozesse zurückzuführen die das Vorhandensein einer klaren vertikalen Schichtabfolge verhindern. Dennoch ist zu erkennen, dass vor allem auf der Oberfläche eher niedrige Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes dominieren. Die Ausnahme bildet die massive Anomalie (hohe Werte) im Bereich des Inklinometers, die auf die tiefgreifende Auskofferung der Forststraße in diesen Bereich zurückzuführen ist und somit anthropogenen Ursprungs ist. Der überwiegende Anteil des Messprofils (auf der Oberfläche) ist damit hinsichtlich der niederschlagsbedingten Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes nur in geringem Maße sensibel, da sich der spezifische elektrische Widerstand von Regenwasser kaum von dem des Untergrundes unterscheidet. Dies hat zur Folge, dass das Infiltrationsverhalten von Oberflächenwässern mit den geoelektrischen Monitoring Daten nicht ausreichend gut erfasst werden kann.

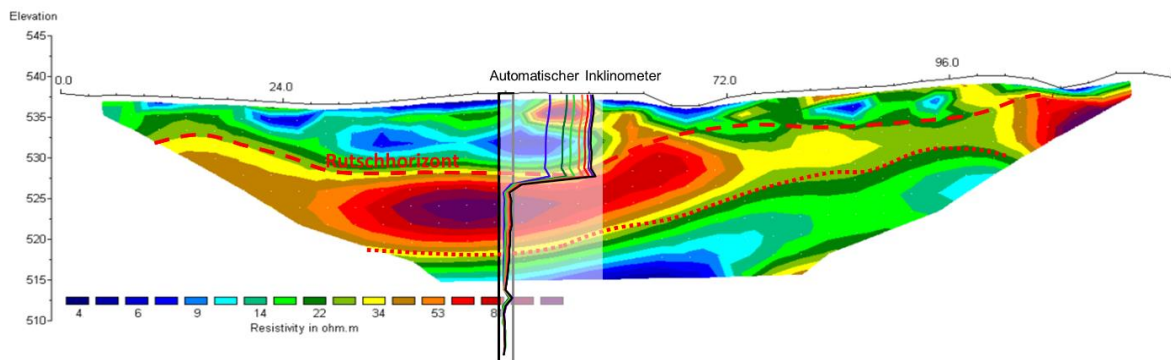


Abb. 14: Repräsentatives Ergebnis des Querprofils des geoelektrischen Monitorings mit hinzugefügten Verschiebungsdaten des Inklinometers

In Abb. 15 ist dieser Umstand anhand eines exemplarischen Beispiels, das die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Zuge eines starken Regenereignisses (40 mm innerhalb eines Tages) zeigt, dargestellt. Gelbe Farbbereiche stellen keine signifikante Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dar, wohingegen grün/blau Farbbereiche eine Abnahme und orange/rote Farbbereiche eine Zunahme darstellen.

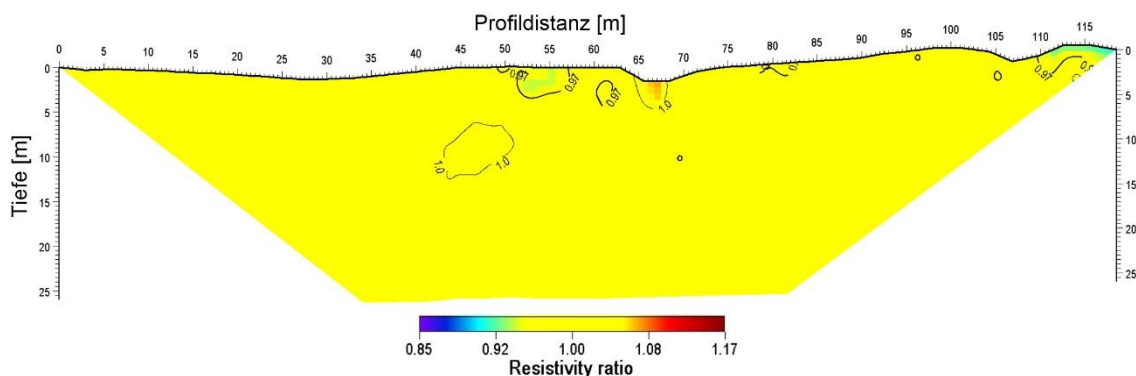


Abb. 15: Differenzbild der 4D-Inversion dargestellt als Verhältnis des spezifischen elektrischen Widerstandes zwischen einem Datensatz vor (30.04.2010) und einem Datensatz nach (05.05.2010) dem 40 mm Niederschlagsereignis

Klar zu sehen ist, dass kaum Änderungen auftreten, wodurch auch keine Aussagen über niederschlagsbedingte Änderungen in der Wassersättigung möglich sind. Einzig der Bereich mit höheren Werten des spezifischen elektrischen Widerstandes knapp unter dem definierten Rutschhorizont (siehe Abb. 14) hätte aufgrund des Wertebereiches das Potenzial Wassersättigungsänderungen anzuzeigen. Trotz umfangreicher Auswertungen konnte in diesem Bereich aber keine signifikante Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes beobachtet werden. Das geoelektrische Monitoring ist hinsichtlich der Aussagekraft der Daten durch den sehr tonreichen Untergrund am Gschlifgraben somit an seine Grenzen gestoßen und findet daher im Konzept für das geplante Monitoring- bzw. Frühwarnsystem auch keine Beachtung.

In Summe kann die Monitoring Aktivität am Gschlifgraben vor allem dahingehend als positiv betrachtet werden, dass die Effizienz der erfolgten Sanierungsmaßnahmen bestätigt wurde (massive Reduzierung der Bewegungsraten beim Inklinometer mit der Zeit). Das geoelektrische Monitoring war von der technischen Umsetzung und dem Betrieb durchaus erfolgreich, allerdings konnten aufgrund der vorliegenden Rahmenbedingungen nicht die erhofften Aussagen bezüglich Oberflächenwasserinfiltration geliefert werden. Dennoch war es vor allem im vorangegangenen Forschungsprojekt ein Innovationssschritt ein geoelektrisches Monitoring in dieser Qualität über den sehr langen Zeitraum (2009-2015) umzusetzen. Die hier gewonnen Erkenntnisse konnten bei diversen anderen Installationen herangezogen werden. Des Weiteren konnte die Erfahrung rund um den Betrieb der Monitoring Systeme und die Kenntnis über die Aussagekraft der jeweiligen Monitoring Daten in die Beratung rund um die Ausarbeitung des Konzepts für das geplante zukünftige Monitoring- bzw. Frühwarnsystem einfließen.

2.3.2 Monitoring Station – Gresten

Die Monitoring Station Gresten wurde aus organisatorischen Gründen knapp vor dem Projektstart von LAMOND im November 2014 in Betrieb genommen. Die Wahl für eine der LAMOND-Neuinstallationen fiel aufgrund der Kooperation mit der Universität Wien/Institut für Geografie und Regionalforschung auf den Standort Gresten (Salcher-Rutschung – Lageplan siehe Abb. 16). Die Universität Wien ist bereits längere Zeit an dieser Hangrutschung tätig, sodass wichtige Vorinformationen zur Verfügung gestellt werden konnten. Zusätzlich werden von der Universität Wien an dieser Rutschung diverse Monitoring Systeme (Inklinometer, Niederschlagsmesser, Piezometer,...) betrieben (siehe dazu Engels 2015), deren Daten natürlich auch bei der Interpretation der geoelektrischen Monitoring Daten hilfreich sind. Des Weiteren wurden auch schon von Seiten der Geologischen Bundesanstalt im Rahmen verschiedener Projekte Untersuchungen speziell in diesem Gebiet durchgeführt (siehe dazu Jochum et al. 2008), auf die natürlich auch zurückgegriffen wurde.

Die Region rund um Gresten gehört zum niederösterreichische Voralpengebiet, das sich durch einen vielfältigen und komplexen lithologischen und tektonischen Aufbau auszeichnet. Vereinfacht lässt sich die Region von Nord nach Süd in drei großtektonische Einheiten gliedern: die penninische Flyschzone, die helvetische Grestener Klippenzone und die ostalpinen Kalkalpen (siehe Abb. 17). Auf der Detailansicht der Geologischen Karte 1:50.000 Blatt 71 Ybbsitz (Ruttner & Schnabel 1988) sind der engräumige Wechsel verschiedenster Gesteine, die großflächige Bedeckung älterer Gesteine mit quartären Lockermaterialbildungen sowie die komplexe tektonische Situation von Grestener Klippenzone und dem benachbarten Flysch und Kalkalpin erkennbar (Abb. 18).

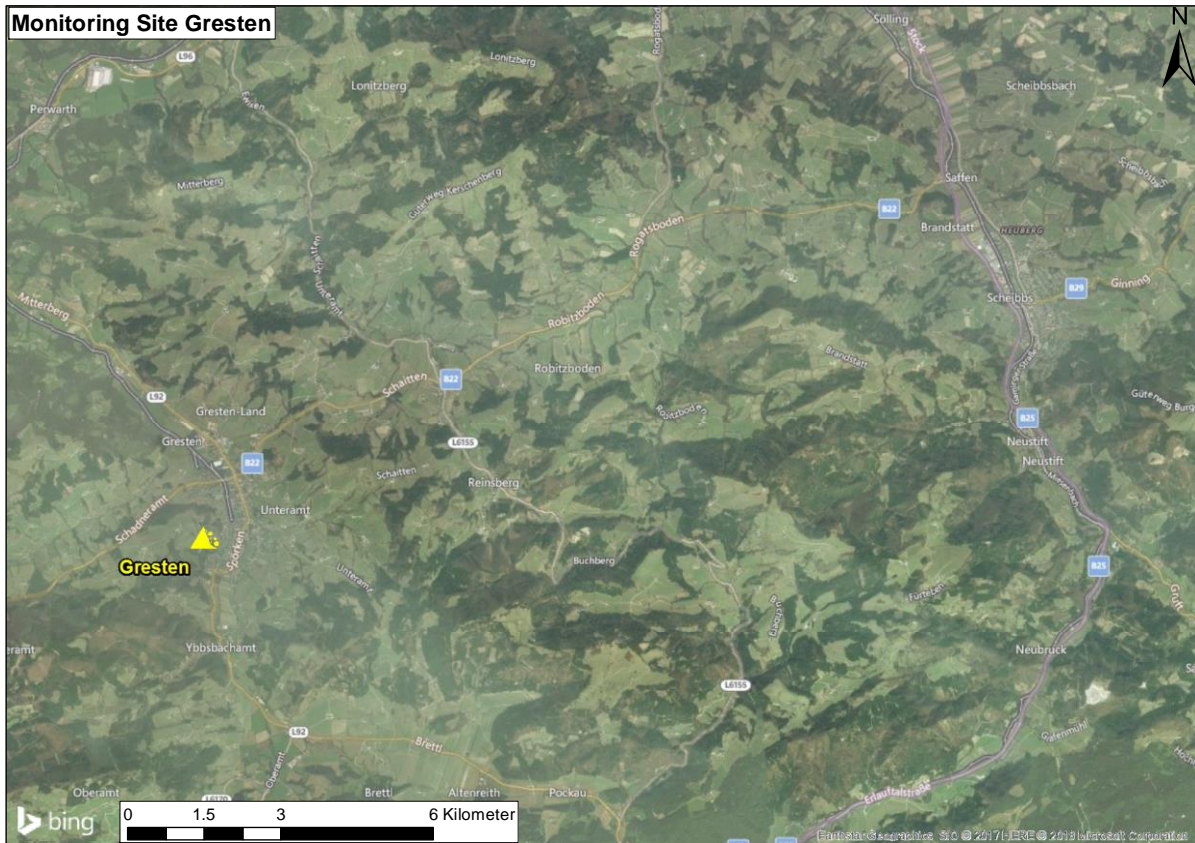


Abb. 16: Lageplan Gresten Übersicht (oben), Detail mit Lage der Monitoring Systeme (unten)

In der unmittelbaren Umgebung des untersuchten Bereichs (gelber Kreis in Abb. 18) verzeichnet die Geologische Karte mit dem Aptychenkalk/Fleckenmergel, den Lampelsberg-Schichten und den Grestener Schichten jurassische Gesteine der Grestener Klippenzone. Der Bereich der betreffenden Hangrutschung ist als quartäres „unaufgeschlossenes Gelände, Periglazialschutt“ bezeichnet. Jedoch finden sich in der näheren und weiteren Umgebung z. B. mit den Signaturen „instabiler Hangbereich mit Rutsch tendenz“ und „Rutschung“ großflächige Hinweise auf Massenbewegungen.



Abb. 17: Ausschnitt aus der Geologischen Übersichtskarte der Republik Österreich 1:2.000.000, GBA Wien 1999

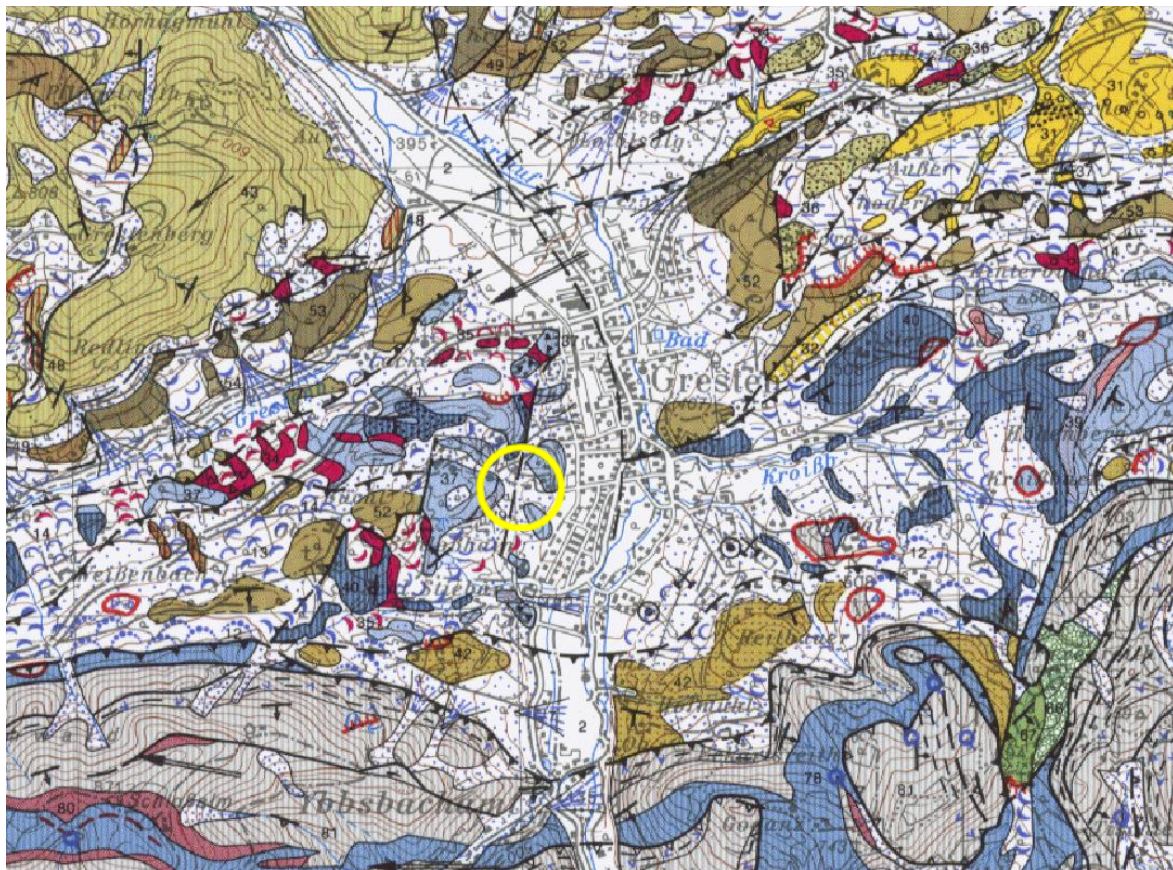


Abb. 18: Ausschnitt aus der Geologischen Karte der Republik Österreich 1:50.000, Blatt 71 Ybbsitz, GBA Wien 1988 (mit Ausschnitt aus der Legende); der gelbe Kreis zeigt den Bereich der sogenannten Salcher Rutschung

Im Rahmen des LAMOND-Projektes wurde lediglich ein geoelektrisches Monitoring Profil installiert, dessen Daten vor allem Informationen über die Infiltration von Oberflächenwasser liefern sollten. Als zusätzliche Datenquelle wurden im Zuge der geoelektrischen Kabelinstallation im zentralen Bereich des Monitoring Profils noch diverse Bodensensoren (Temperatur, el. Leitfähigkeit, volumetrischer Wassergehalt) nahe der Oberfläche installiert. Die Lage der entsprechenden Monitoring Systeme ist in Abb. 16 dargestellt. Die Installation

der geoelektrischen Messkabel erfolgte aus Sicherheitsgründen und um die laufende Bewirtschaftung des Bereiches nicht zu beeinträchtigen unterirdisch. Die Positionierung des Geomon4D Monitoring Systems in unmittelbarer Nähe (unter 20 m) zu den Monitoring Systemen der Universität Wien hatte den Vorteil, dass der dort verfügbare Anschluss an das lokale Stromnetz genutzt werden konnte. Impressionen zur Installation des geoelektrischen Monitoring Systems sind in Abb. 19 dargestellt.



Abb. 19: Situationsfotos zur Installation des geoelektrischen Monitoring Systems

Der geoelektrische Monitoring Betrieb gestaltete sich für die Projektlaufzeit recht positiv. Einzig im letzten Projektjahr ist es aufgrund von technischen Problemen mit einer Systemplatine zu zwei längeren Ausfällen (etwa Mai-Juli und September-Oktober) gekommen (siehe Abb. 20). Die Unterbrechung des Betriebes für den Zeitraum Jänner-Februar 2017 ist darauf zurückzuführen, dass im Rahmen eines parallel laufenden Forschungsprojektes die geoelektrischen Kabel für den Betrieb eines anderen Messsystems von der TU Wien zur Verfügung gestellt wurden. Bei genauer Betrachtung der Änderung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes für die ausgewählten, oberflächennahen geoelektrischen Messpunkte (siehe Abb. 20) ist zu sehen, dass die bei weitem stärkste Änderung (max. 10 Ohmm) auf den jahreszeitlichen Verlauf zurückzuführen ist. Hauptgrund dafür ist die Schwankung in der Bodentemperatur, deren Werte (siehe dunkelrote Kurve in Abb. 20) sich leicht phasenverschoben, jedoch klar gegenläufig zur Änderung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes verhalten. Bei Betrachtung von Messpunkten, die dem tieferen Untergrundbereichen zuzuordnen sind, erhöht sich die entsprechende Phasenverschiebung bei stark abnehmender Amplitude. Dies entspricht auch der Kenntnis, dass der jährliche Temperaturverlauf nur Einfluss auf die obersten paar Meter des Untergrundes hat. Für die vorliegende Fragestellung sind die kurzfristigen Änderungen des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes im Zuge von Niederschlagsereignissen von wesentlich größerem Interesse. Hier zeigt sich allerdings, dass selbst die oberflächennahen Messpunkte (in Abb. 20 dargestellt) maximale Änderungen (z.B. die Messpunkte in den Farben rot und violett Anfang September 2015) von 3-4 Ohmm zeigen. In der Regel sind die Änderungen sogar nur im Bereich von 1-2 Ohmm angesiedelt. Zu beachten ist, dass der Einfluss von Niederschlagsereignissen mit der Tiefe der Messpunkte noch geringer wird. Diese Größenordnungen sind für eine signifikante Interpretation hinsichtlich Änderungen der Wassersättigung sehr klein. Anhand eines repräsentativen Ergebnisses des

goelektrischen Monitorings (Model des spezifischen elektrischen Widerstandes) in Abb. 21 wird der Grund dafür klar ersichtlich. Es ist der bis auf den Bereich zwischen Profilmeter 50 und 75 sehr geringe spezifische elektrische Widerstand (<30 Ohmm), der durch die Infiltration von Oberflächenwasser (ähnlicher Widerstandsbereich) kaum mehr Änderungen zeigen kann.

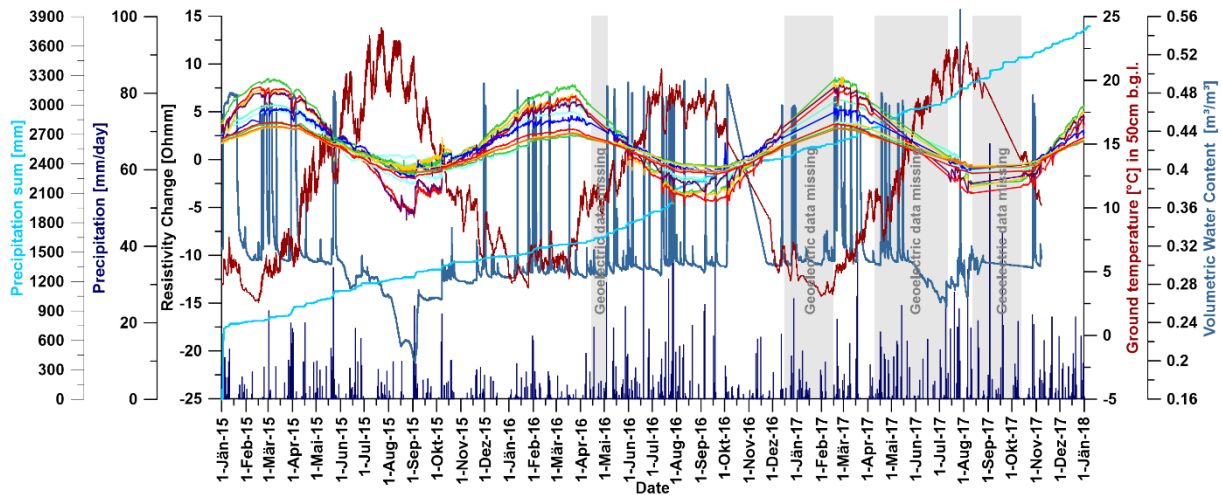


Abb. 20: Zeitreihe der verschiedenen Monitoring Daten (ausgewählte, oberflächennahe Messpunkte des goelektrischen Monitoring Profils, Niederschlag (täglich, kumulativ), Bodentemperatur und Bodenfeuchte) für den Zeitraum des LAMOND-Projektes (die einzelne Kurvenzuordnung erfolgt über die Farbgebung der Achsenbeschriftung, Ausnahme bilden hier die goelektrischen Messpunkte, die verschiedene Farben aber eine geringere Linienstärke haben (Achsenbeschriftung-schwarz))

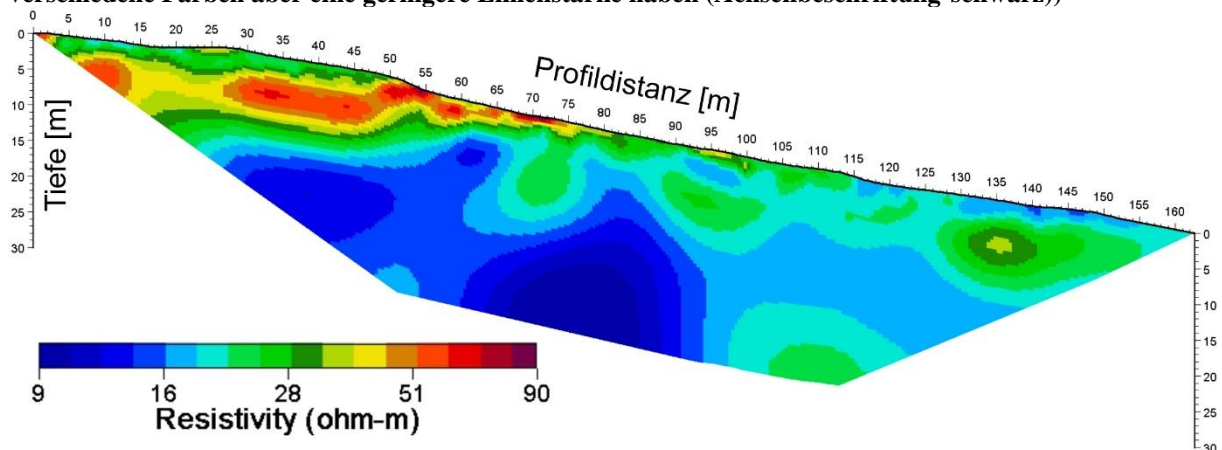


Abb. 21: Repräsentatives Ergebnis des goelektrischen Monitoring Profils - berechnetes Model des spezifischen elektrischen Widerstandes

Das Ergebnis des goelektrischen Monitoring Profils zeigt tendenziell an der Oberfläche höhere Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes. Generell zeigt der erste Teil des Profils (bis Profilmeter 75) eine deutlich andere Charakteristik, als der restliche Teil bis Profilende. Wie bereits aus anderen Untersuchungen (siehe Jochum et al. 2008) bekannt ist, steht dieser Anfangsbereich bereits im Einfluss der benachbarten geologischen Einheit – daher die deutlich höheren Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes. Der Untergrundbereich ab einer Tiefe von etwa 10 m zeigt generell einen sehr niedrigen spezifischen elektrischen Widerstand, der den sehr tonreichen Grestener Schichten zuzuordnen ist. An der Oberfläche sind ab Profilmeter 75 auch eher niedrige Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes anzutreffen, allerdings ist hier auch eine gewisse

Heterogenität auszumachen, die hauptsächlich auf die Umlagerungsprozesse in diesem aktiven Bereich des Hanges zurückzuführen ist. Des Weiteren konnten in diesem Bereich Vernässungszonen unterschiedlicher Intensität beobachtet werden, die ebenfalls zu einer gewissen Heterogenität beitragen. Vor allem in diesem Bereich ist kaum eine Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Zuge von Niederschlagsereignissen zu erwarten. Anhand der Daten der vorhandenen Inklinometer (etwa bei Profilmeter 70 und 90 – Rutschhorizont jeweils bei 2-3 Meter unter GOK) lässt sich recht gut nachvollziehen, dass sich der Rutschhorizont am Übergang zwischen höheren und niedrigeren Werten des spezifischen elektrischen Widerstandes (2-3 m Tiefe) befindet. Der sehr aktive Hangbereich reicht bis ca. Profilmeter 115 – dies entspricht auch dem Bereich der eine etwas höherohmige oberflächennahe Schicht (Rutschmasse) zeigt. Ab Profilmeter 115 zeigt sich an der Oberfläche ein gegenteiliges Bild – dies entspricht dem Bereich welcher die intensivsten Vernässungszonen zeigt. Trotz der eher geringen Widerstandskontraste lässt sich somit das Ergebnis des geoelektrischen Monitoring Profils unter Einbeziehung zusätzlicher Messdaten schlüssig interpretieren.

Interessant ist inwiefern sich die Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes im Zuge von Niederschlagsereignissen interpretieren lassen. Die Charakteristik der Widerstandsänderung wird im Folgenden anhand eines eher durchschnittlichen Niederschlagsereignisses vom Juli 2016 dargestellt. Zwar ist eine Generalisierung der Widerstandsänderung aufgrund der Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen des Untergrundes nicht zulässig, dennoch hat die Untersuchung von Niederschlagsereignissen zu unterschiedlichen Jahreszeiten ein sehr ähnliches Bild gezeigt – demnach können die im Folgenden dargestellten Ergebnisse als repräsentativ bezeichnet werden.

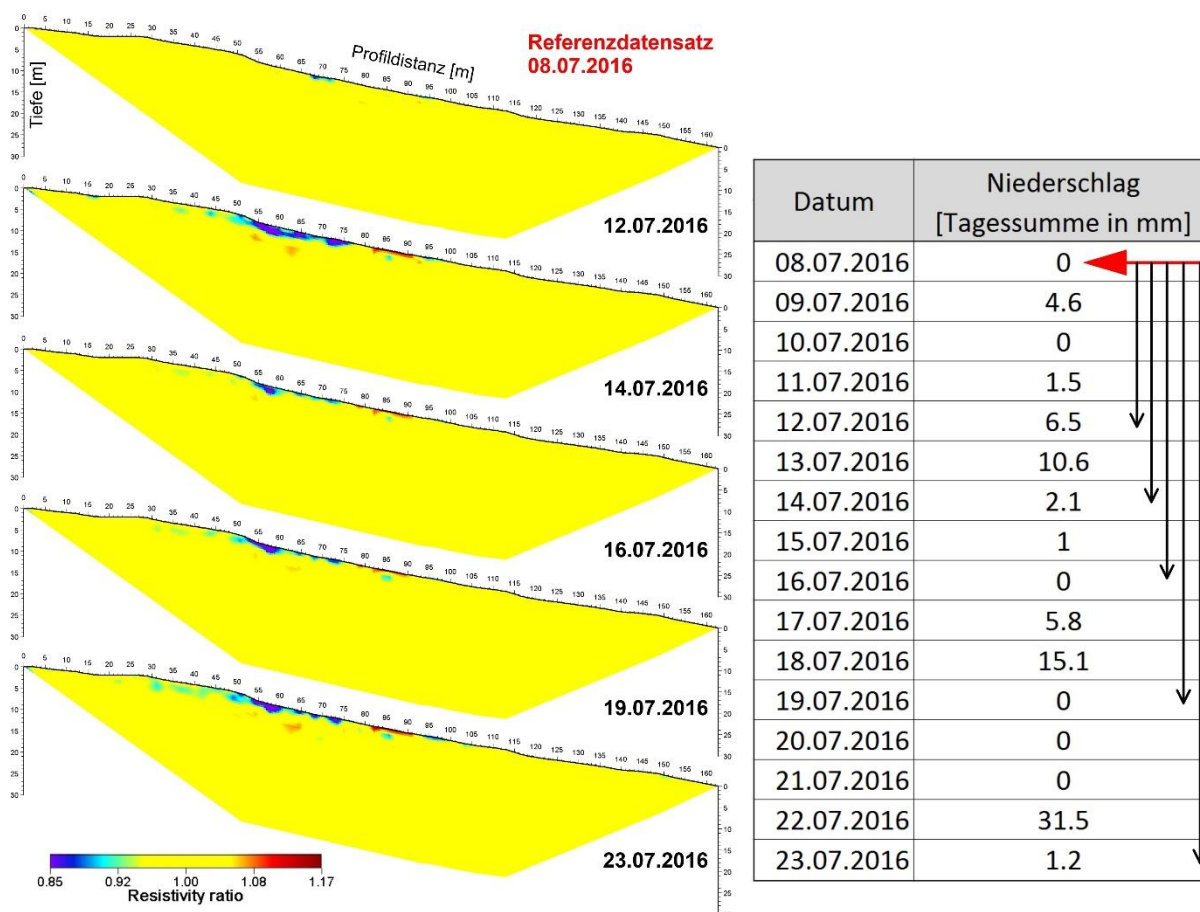


Abb. 22: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz vom 08.07.2016 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdatsätze (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzendarstellung – schwarze Pfeile)

Abb. 22 zeigt die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes während wiederholter Niederschlagsereignisse. Als Referenz dient der Datensatz vom 08.07.2016, der vor der folgenden, niederschlagsreichen Phase gemessen wurde. Der dominierende, gelbe Farbbereich steht für keine signifikante Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes, was auf den Großteil des Untergrundes zutrifft, d.h. hier kommt es zu keinem nennenswerten Einfluss durch den Niederschlag. Der grüne bis blaue Farbbereich steht für die entsprechende Abnahme der Widerstandswerte, die direkt mit einer Erhöhung der Wassersättigung in Verbindung zu bringen sind. Diese Abnahme ist auf oberflächennahe Bereiche, die einen eher höheren spezifischen elektrischen Widerstand (generell geringerer Tonanteil – größeres Potenzial für Wassersättigungsänderung) aufweisen beschränkt (Vergleiche dazu Abb. 22 und Abb. 21). Rote Farbbereiche, die eine Zunahme des spezifischen elektrischen Widerstandes darstellen, sind in signifikantem Ausmaß nur zwischen Profilmeter 80 und 90 an der Oberfläche vorhanden, die einen Bereich mit relativ geringen spezifischen elektrischen Widerstand markieren (vgl. dazu Abb. 21). Hier hat die Infiltration von Regenwasser somit sogar den umgekehrten Effekt (relativ gesehen hat das Regenwasser einen höheren spezifischen elektrischen Widerstand als der Untergrund und führt somit zu einer Erhöhung). Im unteren Bereich des Messprofils kommt es zu keinerlei Änderungen an der Oberfläche, da es hier mit hoher Wahrscheinlichkeit durch den sehr hohen Tonanteil des Untergrundes zu gar keiner Infiltration von Oberflächenwasser kommt. Zusätzlich ist im Bereich der starken

Vernässungen eher gegenteiliges zu erwarten, d.h. dass die austretenden Wässer den spezifischen elektrischen Widerstand des Untergrunds kontrollieren. Die genaue Betrachtung der Ergebnisse in Abb. 22 zeigt, dass nur eine geringe Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Phasen (Niederschlag – kein Niederschlag) möglich ist. Der Informationsgehalt des geoelektrischen Monitorings beschränkt sich hinsichtlich hydrologischer Untergrundprozesse an der Hangrutschung in Gresten somit nur auf den oberflächennahen Bereich zwischen Profilmeter 40 und 75 – hier sind klare Änderungen im Zuge von Niederschlagsereignissen zu erkennen. In welchem Zusammenhang die Variationen des spezifischen elektrischen Widerstandes in diesem Untergrundbereich mit der Bewegungsaktivität stehen, konnte auf Basis der Datenlage (vor allem Inklinometer) nicht bestimmt werden. Aufgrund des kleinräumigen Bereiches der signifikanten Variationen ist allerdings nicht anzunehmen, dass ein deutlicher Zusammenhang herzustellen ist. Dennoch ist im Zuge zukünftiger Forschungstätigkeit mit Sicherheit der Fokus auf diesen Hangbereich, der die stärkste Dynamik im Zuge von Niederschlagsereignissen zeigt, zu legen.

In Summe dienen die im Rahmen des LAMOND-Projektes generierten geoelektrischen Monitoring Daten an der Hangrutschung in Gresten als Grundlage für zwei Masterarbeiten, die an der Universität Wien/Institut für Geografie und Regionalforschung unter Betreuung von Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade angefertigt werden. Beide befassen sich auf unterschiedliche Art und Weise mit dem Zusammenhang zwischen den hydrologischen Untergrundverhältnisse und den geoelektrischen Monitoring Daten.

2.3.3 Monitoring Station – Pechgraben

Die Großhangbewegung am Pechgraben wurde im Jahr 2013 aufgrund von mehreren intensiven Niederschlägen reaktiviert und erreichte ihren Höhepunkt im Juni 2013, wo sogar die kurzzeitige Evakuierung mehrerer Häuser erfolgen musste. Zu diesem Zeitpunkt starteten intensive und umfangreiche Sanierungsmaßnahmen, die schlussendlich zu einer Stabilisierung der relevanten Teile der Großhangbewegung geführt haben. Details zum Hintergrund, zur Chronologie der Ereignisse, den erfolgten Sanierungsmaßnahmen und diversen geophysikalischen und geotechnischen (Langzeit-) Messungen finden sich in Hübl et al. 2015. Die Geologische Bundesanstalt war sowohl im Zuge des Katastropheneinsatzes als auch im Zuge der Sanierungsmaßnahmen mit unterschiedlichen geophysikalischen und geotechnischen Messmethoden vor Ort. Finanziert wurde die Tätigkeit in gewissem Ausmaß von der Wildbach- und Lawinenverbauung zu einem Großteil wurden die Arbeiten jedoch in laufende Forschungsprojekte eingebettet, da die optimale Gelegenheit geboten wurde, Monitoring Daten an einer sehr aktiven Hangrutschung zu akquirieren. Die im Rahmen des LAMOND-Projektes durchgeführten Arbeiten am Pechgraben umfassten somit größtenteils eine Fortführung bereits bestehender Monitoring Systeme, deren Betrieb während der Projektlaufzeit nach und nach eingestellt wurde. Hauptgrund dafür war die bereits sehr lange andauernde Datenakquisition, wodurch keine neuen Erkenntnisse mehr zu erwarten waren. Des Weiteren wurden im sanierten Bereich der Hangrutschung kaum mehr relevanten Bewegungsraten beobachtet, die eine interessante Interpretation (vor allem der geoelektrischen Monitoring Daten) ermöglichen würden.

Der geologische Aufbau am Pechgraben ist durch das Aufeinandertreffen geologischer Großeinheiten und unterschiedlicher Deckensysteme gekennzeichnet und daher als sehr komplex einzustufen. Details zur genauen geologischen Gliederung sind in mehreren Arbeiten abgehandelt (z.B. Widder, 1988; Müller, 1984; Ehrendorfer, 1987; Pavlik, 1989; Janda, 2000).

An dieser Stelle sei nur erwähnt, dass sich die installierten Monitoring System auf der aktiven Hangrutschung alle im Bereich der Buntmergelerde befinden. Generell geht damit ein sehr hoher Tongehalt einher, der mitunter zu gewissen Einschränkungen bezüglich Aussagekraft gewisser Monitoring Daten führen kann, wie es von anderen Monitoring Stationen in dieser geologischen Einheit bereit bekannt ist (siehe dazu Kapitel 2.3.1).

Die Lage der Monitoring Systeme, die während des LAMOND-Projektes aktiv waren, ist in Abb. 23 dargestellt. Wie am Detailplan deutlich zu sehen ist, sind die Monitoring Systeme auf zwei unterschiedliche Bereiche der Hangrutschung aufgeteilt. Im südlichen Bereich, der einer umfassenden Sanierung unterzogen wurde, befinden sich zwei automatische Inklinometer, das geoelektrische Monitoring System (langes Profil) und diverse Bodensensoren. In diesem Bereich stand vor allem die Effizienz der Sanierungsmaßnahmen (vor allem des Drainagen Systems) im Fokus. Im nördlichen Bereich der Hangrutschung, wo hingegen keine Sanierungsmaßnahmen unternommen wurden und während der Projektlaufzeit noch beträchtliche Bewegungsraten beobachtet wurden, kamen mehrere Foto Monitoring System und ein kurzes geoelektrisches Monitoring Profil zum Einsatz. Hier wurde der Schwerpunkt auf die Beobachtung der zum Teil enormen Bewegungsraten mit dem eigens dafür entwickelten Foto Monitoring System gelegt. Durch die Installation des kurzen geoelektrischen Monitoring Profils (Verwendung von lediglich 9 Elektroden) sollte ein einfacher Zusammenhang zwischen Beschleunigungsphasen und dem gemessenen scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand hergestellt werden. Die Gegenüberstellung der beobachteten Beschleunigungsphasen mit Niederschlagsdaten konnte bereits eine nicht ganz überraschende Korrelation liefern. Die Idee war hier, ob auch die geoelektrischen Monitoring Daten (Bodenparameter) eine deutliche Korrelation zeigen und somit auf eine Änderung in der Wassersättigung im oberflächennahen Bereich als zentralen Auslöser für die Beschleunigung hindeuten.

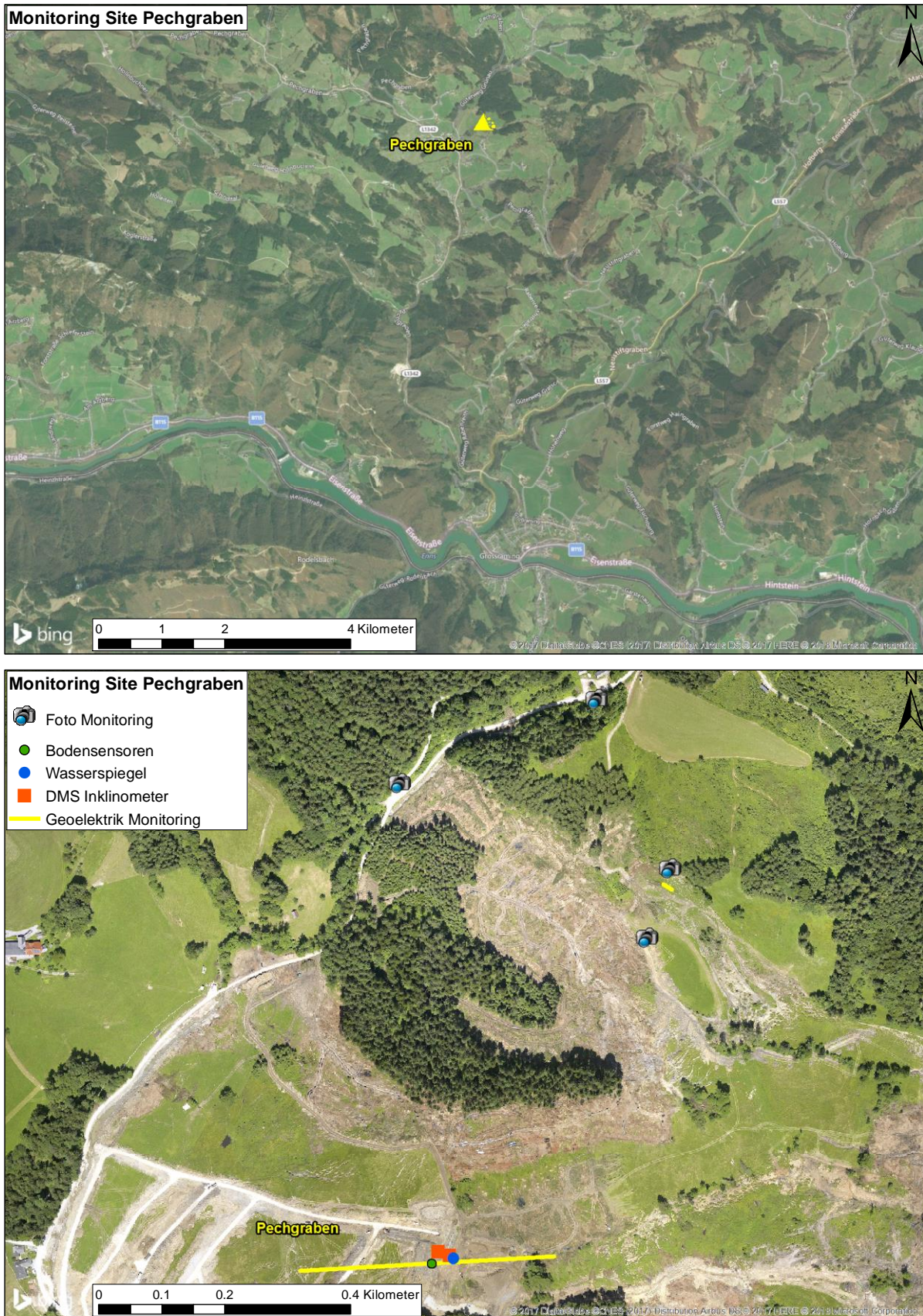


Abb. 23: Lageplan Pechgraben Übersicht (oben), Detail mit Lage der Monitoring Systeme (unten)

Abb. 24 zeigt ein repräsentatives Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes basierend auf den Daten des geoelektrischen Monitoring Profils im südlichen Bereich der Hangrutschung. Zusätzlich wird die tiefenabhängige Verschiebung der beiden Inklinometer (zusammengefasst dargestellt) in unmittelbarer Nähe zum geoelektrischen Monitoring Profil angeführt. Die Betrachtung der beigefügten Farbskala zeigt ein generell sehr niedriges Niveau der Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes (generell hoher Tongehalt). Abgesehen von ein paar wenigen Anomalien mit relativ hohen Werten (40-80 Ohmm) an der Oberfläche (z.B. bei Profilmeter 150) lässt sich das Ergebnis als Zweischichtfall interpretieren. Unter Berücksichtigung der Inklinometer Daten wird auch klar ersichtlich, dass sich der Rutschhorizont bzw. Rutschbereich ziemlich genau in der Tiefe befindet, in der der Übergang zu sehr niedrigen Werten des spezifischen elektrischen Widerstandes auftritt. Dieser hier klar hervorgetretene Zusammenhang konnte natürlich für die Interpretation anderer geoelektrischer Messprofile, die im Rahmen der Tätigkeiten am Pechgraben gemessen wurden, ausgeweitet werden. Dies kann für die grobe Volumsabschätzung des potenziellen Rutschkörpers herangezogen werden (siehe dazu auch Ottowitz et al. 2017).

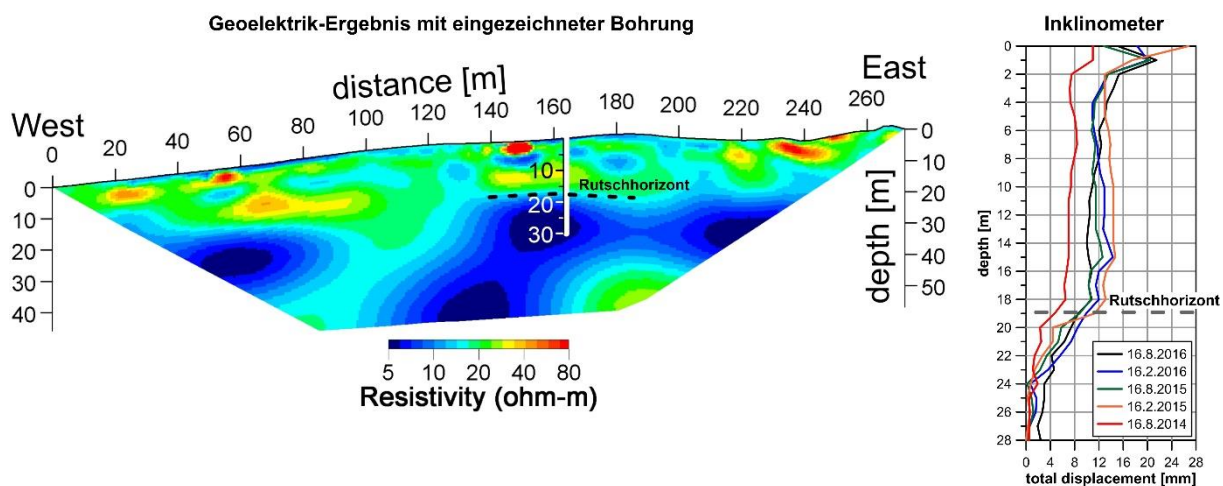


Abb. 24: Repräsentatives Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes basierend auf Daten des geoelektrischen Monitoring Profils mit eingezeichneter Bohrung und Rutschhorizont (links), Ergebnis des Inklinometer Monitorings - tiefenabhängige Verschiebung mit eingezeichnetem Rutschhorizont (rechts) (Grafik nach Ottowitz et al. 2017)

Der Betrieb des geoelektrischen Monitoring Systems war während der Projektlaufzeit bis auf einen etwa 2monatigen Ausfall unproblematisch. Ausgewählte, vorwiegend oberflächennahe geoelektrische Messpunkte und die weiteren verfügbaren Monitoring Daten (Bodensensoren, Niederschlag,...) sind als Zeitreihe in Abb. 25 dargestellt. Zusätzlich ist noch zu erwähnen, dass es im dargestellten Zeitraum zu keinen relevanten Bodenverschiebungen in diesem Bereich gekommen ist (siehe dazu Inklinometer Daten in Abb. 24). Die zeitliche Änderung der Messwerte für die geoelektrischen Messpunkte fällt äußerst gering aus und erreicht über die gesamte, dargestellte Monitoring Periode kaum mehr als 2 Ohmm. Allerdings trifft dies nur auf die langperiodische Änderung zu, die klar mit den Daten der Bodentemperatur korreliert und lediglich auf die temperaturbedingte Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes zurückzuführen ist. Die eigentlich interessanten kurzfristigen Änderungen im Zuge von Niederschlagsereignissen sind von der Amplitude noch wesentlich kleiner. Hierbei ist zu beachten, dass die ausgewählten oberflächennahen Messpunkte die stärkste zeitliche Dynamik aufweisen, d.h. andere Messpunkte die tieferen Untergrundbereichen zuzuordnen

sind zeigen praktisch einen konstanten Messwert. Dies ist als Qualitätskriterium zwar recht erfreulich, da es die zeitliche Stabilität des Messsystems wiedergibt, allerdings kann über hydrodynamische Vorgänge im Untergrund (die in diesem tonreichen Untergrund vlt. auch sehr langsam vonstattengehen) anhand der Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes keine Aussage getroffen werden. Trotz umfassender Auswertung (4D-Inversion) der geoelektrischen Monitoring Daten im zeitlichen Bereich von Starkregenereignissen, konnte keine signifikante Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes festgestellt werden. Lediglich die langfristige Änderung konnte (wie in Ottowitz et al. 2017 beschrieben) dem Einfluss des jahreszeitlichen Bodentemperaturverlaufs zugeordnet werden. Die kaum vorhandene Reaktion der geoelektrischen Monitoring Daten auf auftretende Niederschlagsereignisse lässt sich genau genommen auch durch Betrachtung des mittels Bodensensoren aufgezeichneten (punktuellen) volumetrischen Wassergehalts erklären, da dieser auch nur Änderungen im Bereich von maximal 5% zeigt. Des Weiteren wird das Verhalten der geoelektrischen Monitoring Daten auch durch die Langzeitaufzeichnung des Wasserspiegels im zentralen Bereich des geoelektrischen Monitoring Profils (siehe Abb. 23), die keinerlei Änderung zeigt bestätigt. So kann an dieser Stelle klar gesagt werden, dass die unmittelbare Infiltration von Oberflächenwasser im Zuge von Niederschlagsereignissen, kaum eine Auswirkung auf die Wassersättigung des Rutschkörpers hat. Es ist anzunehmen, dass vielmehr längerfristige, überdurchschnittlich hohe Niederschlagsraten einen Einfluss haben könnten und dieser mitunter über bevorzugte Wasserwegigkeiten im Untergrund (die im Bereich des geoelektrischen Monitoring Profils nicht vorhanden waren) noch verstärkt werden kann. Ein gewisser Einfluss auf das zeitlich überaus stabile Verhalten der geoelektrischen Monitoring Daten könnte natürlich auch auf das umfassende Drainagen System in diesem Bereich der Hangrutschung zurückzuführen sein, da hier doch beträchtliche Oberflächenwassermengen oberhalb der beschriebenen Monitoring Systeme dem Hang entzogen werden. Demnach wäre eine hohe Effizienz der Sanierungsmaßnahmen gegeben, die sich genau genommen auch in der letzten Monitoring Periode der beiden Inklinometer (vor der Deinstallation) widerspiegelt, wo kaum nennenswerte Bewegungsraten beobachtet wurden.

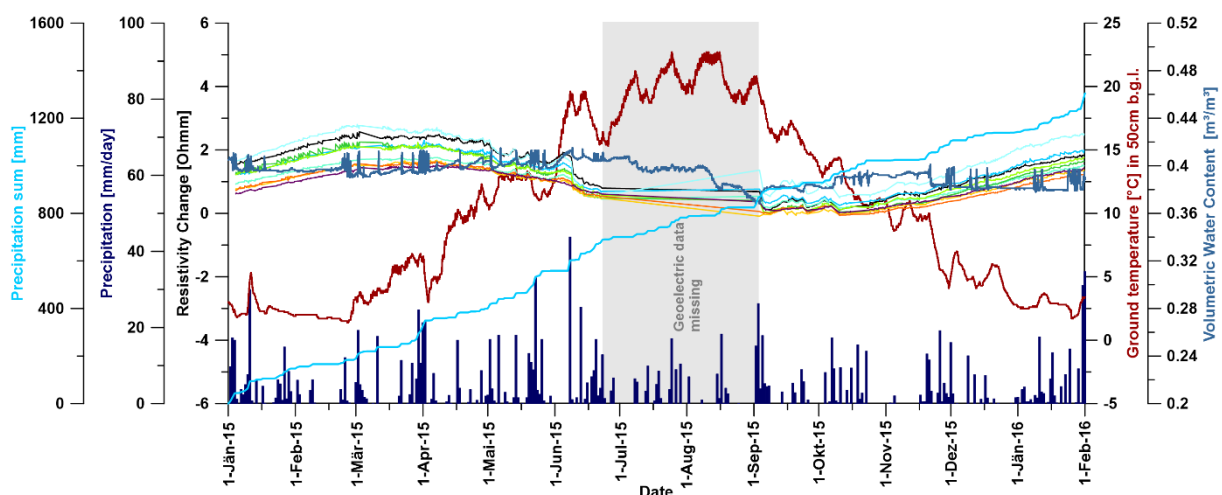


Abb. 25: Zeitreihe der verschiedenen Monitoring Daten (ausgewählte, oberflächennahe Messpunkte des geoelektrischen Monitoring Profils, Niederschlag (täglich, kumulativ), Bodentemperatur, Bodenfeuchte) für den Zeitraum des LAMOND-Projektes (die einzelne Kurvenzuordnung erfolgt über die Farbgebung der Achsenbeschriftung, Ausnahme bilden hier die geoelektrischen Messpunkte, die verschiedene Farben aber eine geringere Linienstärke haben (Achsenbeschriftung-schwarz))

Im Gegensatz zum südlichen Teil der Hangrutschung am Pechgraben, kann im nördlichen Teil von keiner echten Stabilisierung des Untergrundes im Projektzeitraum gesprochen werden. Hier war zu keinem Zeitpunkt die Möglichkeit einer Inklinometerinstallation gegeben, da die Bewegungsraten schlichtweg zu hoch waren. Neben den von der WLV durchgeführten, wiederholten GPS Messungen zur Abschätzung der Bewegungsaktivität dieses Bereiches, wurden, im Zuge der Entwicklung eines Foto Monitoring Systems an der GBA, mehrere Foto Monitoring Stationen, die über unterschiedliche Zeiträume betrieben wurden, installiert (siehe Abb. 23). Im Bereich der höchsten Bewegungsraten wurde nach einer gewissen Monitoring Periode auch das kurze geoelektrische Monitoring Profil installiert, um einen etwaigen Zusammenhang zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstandes und den Beschleunigungsphasen herzustellen.

In Abb. 26 ist die genaue Lage inklusive Sichtbereich der 5 Foto Monitoring Stationen dargestellt. Im Folgenden werden lediglich repräsentative Ergebnisse der Station 1, in dessen Sichtbereich sich auch das kurze geoelektrische Monitoring Profil befindet, diskutiert.

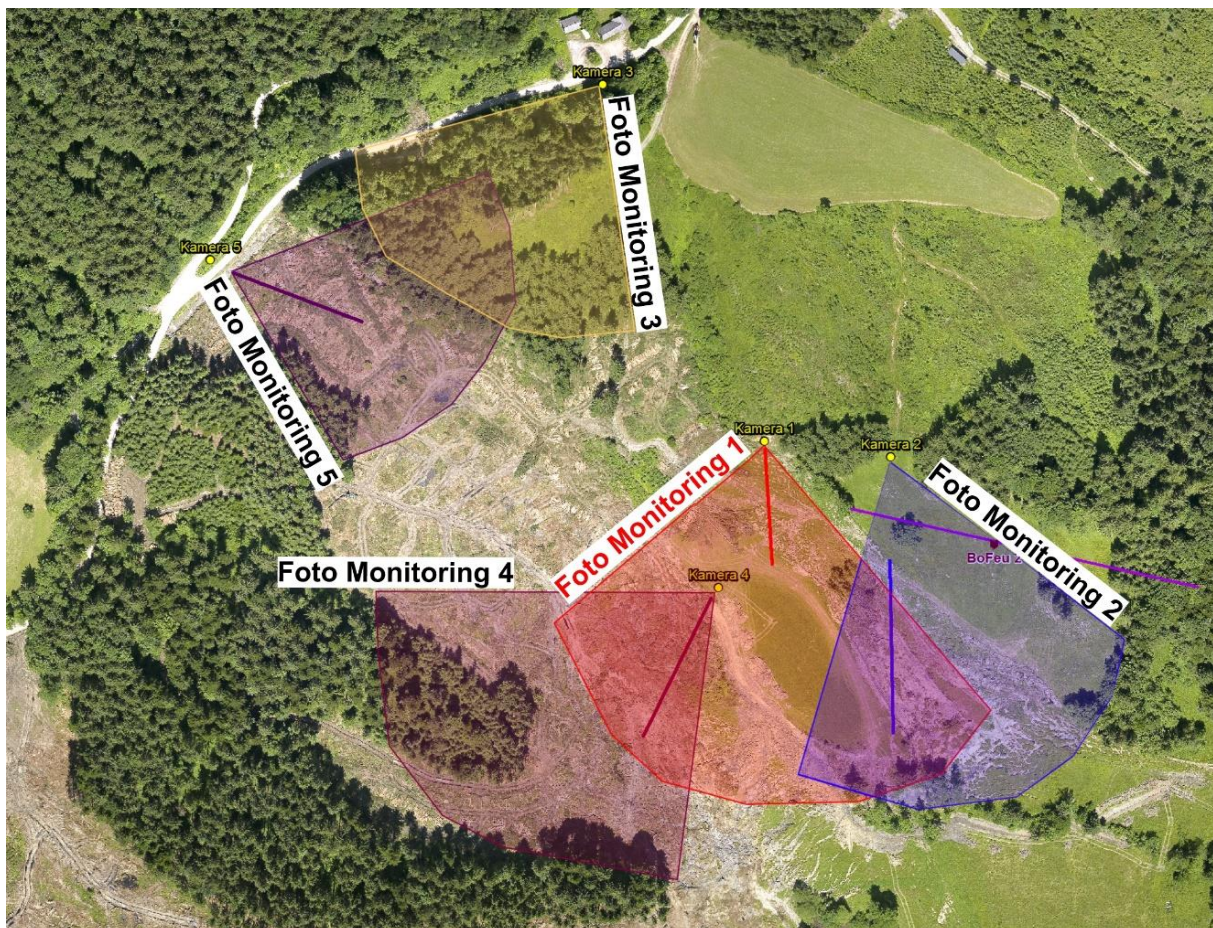


Abb. 26: Lage und Sichtbereich der Foto Monitoring Stationen im nördlichen Teil der Hangrutschung am Pechgraben

Abb. 27 zeigt zwei Beispielbilder für das Foto Monitoring an der Station 1 für eine vergleichsweise sehr aktive Zeitperiode. Deutlich zu sehen (bzw. auch mit den weißen Pfeilen hervorgehoben) ist die enorme Verschiebung, die sich anhand der genau definierten Länge der Farbmarkierung an den Pflöcken auch quantitativ grob bestimmen lässt. Mittels Digitalisierung der jeweiligen Pflöckpositionen für einen bestimmten Zeitraum, lässt sich so

ein zeitlicher Verlauf der Bewegungsraten bestimmen (Beispiel siehe Abb. 28). Dieser Verlauf kann leider nur für ausgewählte Zeitperioden in denen die Pflöcke durchwegs sichtbar sind bestimmt werden, daher bekommt man keine kontinuierliche Datenreihe. Aufgrund des zunehmenden Bewuchses der Rutschmasse nehmen die brauchbaren Zeitperioden mit fortschreitender Zeit massiv ab. Anhand des Beispiels in Abb. 28 lässt sich schon der klare Zusammenhang zwischen Niederschlagsereignissen und der Beschleunigung des Rutschkörpers erkennen. Hervorzuheben sind hier die enormen Bewegungsraten von bis zu einem Meter pro Tag, die zum Teil beobachtet wurden. Dies hatte zur Folge, dass die Pflöcke immer wieder in ihre geradlinige Ursprungsposition zurückversetzt werden mussten, da sie sich sonst aus dem Sichtbereich der Kamera bewegt hätten. In Summe kann dadurch für den gesamten Beobachtungszeitraum keine Gesamtverschiebung angegeben werden, die ohnedies massiv von der genauen Position auf der Rutschung abhängt. Diese kann lediglich anhand von markanten Objekten an der Oberfläche des Rutschkörpers (z.B. Wurzelstock, Baumstamm,...) abgeschätzt werden (bei konservativer Schätzung können etwa 60 Meter in 3 Jahren angegeben werden). Trotz dieser enormen Verschiebung ist es zu keiner größeren Materialakkumulationen im unteren Bereich der Hangrutschung gekommen. Daraus und anhand von geoelektrischen Messergebnissen (siehe dazu Ottowitz et al. 2017) wird gefolgert, dass sich der Rutschhorizont in diesem Bereich in sehr geringer Tiefe (2-5 m unter GOK) befindet. Das absolute Volumen des verschobenen Materials ist somit relativ eingeschränkt bzw. nicht vergleichbar mit den Volumina, die im südlichen Teil der Rutschung (Rutschhorizont in knapp 20 m unter GOK) verschoben wurden.



Abb. 27: Repräsentatives Beispiel des Foto Monitorings (Station 1) für den angegebenen Vergleichszeitraum

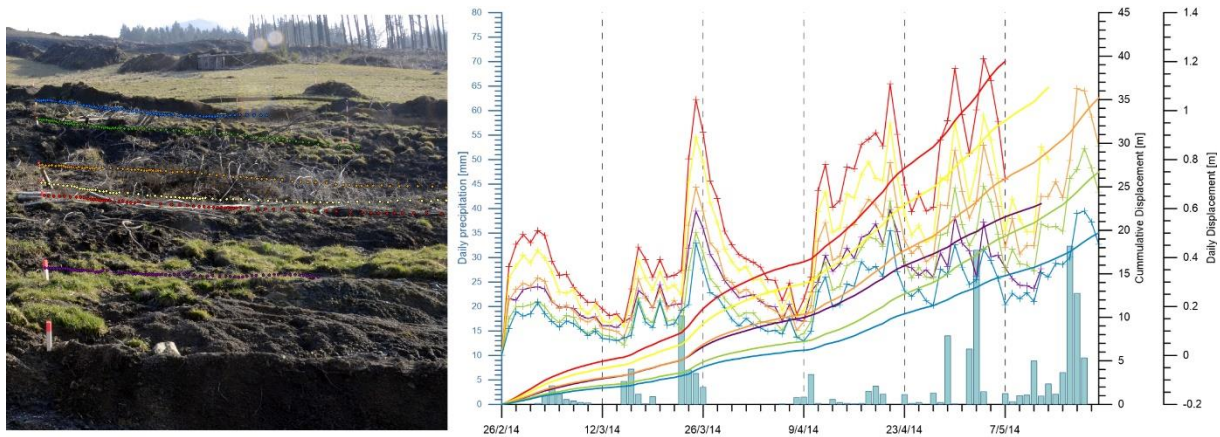


Abb. 28: Beispielhafte Digitalisierung der jeweiligen Pflockpositionen für einen bestimmten Zeitraum (links) und dazugehörige Zeitreihe der täglichen- und kumulativen Verschiebung sowie des täglichen Niederschlags (rechts)

In Abb. 29 sind ausgewählte Messpunkte des kurzen geoelektrischen Monitoring Profils mit weiteren Monitoring Daten dargestellt. Zusätzlich ist für eine kurze Periode (April-Juli 2015) die mittels Foto Monitoring Station 1 bestimmte Verschiebung für diesen Hangbereich dargestellt. Bei genauer Betrachtung ist zu sehen, dass eine Korrelation zwischen der Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes und den Bewegungsraten besteht. Vor den zwei massiven Beschleunigungsphasen ist ein ganz klares lokales Minimum in den geoelektrischen Monitoring Daten zu erkennen, die ihrerseits durch Niederschlagsereignisse verursacht werden. Während der Beschleunigungsphase selber beginnt der spezifische elektrische Widerstand wieder zu steigen und bewegt sich bis zum nächsten massiveren Niederschlagsereignis auf einem höheren Niveau. Der Zusammenhang zwischen Niederschlag und der Veränderung des spezifischen elektrischen Widerstandes ist prinzipiell klar (Änderung der Wassersättigung). Der interessante Effekt hier ist, dass der spezifische elektrische Widerstand während der stärksten Beschleunigungsphase sprunghaft ansteigt – was mit einem langsamen Auftrocknen des Untergrundes (kein Niederschlag) nicht gut in Einklang zu bringen ist. Es wird vermutet, dass hier durch die erhöhte Bewegung des Untergrundes auch eine Änderung der Porosität (Abnahme) auftritt, die dann zu diesem sprunghaften Anstieg des spezifischen elektrischen Widerstandes führt. In der anschließenden Phase geringerer Bewegungsraten kommt es dann wieder zu einer gewissen Rückbildung die dem Ursprungszustand ähneln muss. Diese Vermutung wird durch den langfristigen Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstandes gestützt. Anhand der Aufnahmen an der Foto Monitoring Station 1 wissen wir nämlich, dass die durchschnittlichen Bewegungsraten im zeitlichen Verlauf generell abnehmen, wodurch auch der tendenzielle Anstieg des spezifischen elektrischen Widerstandes (unter Berücksichtigung der Bodentemperatur) zu erklären wäre. In Summe lassen sich mit diesen Monitoring Daten einige interessante Zusammenhänge bzw. Vermutungen über die Änderung des Untergrundes anstellen, allerdings muss beachtet werden, dass die absoluten Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes generell sehr gering sind und somit nur bei optimaler Datenqualität solche Interpretationen zulässig sind. Generell zeigt dieses Beispiel der Kombination aus Foto Monitoring (Oberflächenverschiebung) und geoelektrischen Monitoring das Potenzial ein gewisses Verständnis für die Prozesse im Rutschkörper zu entwickeln.

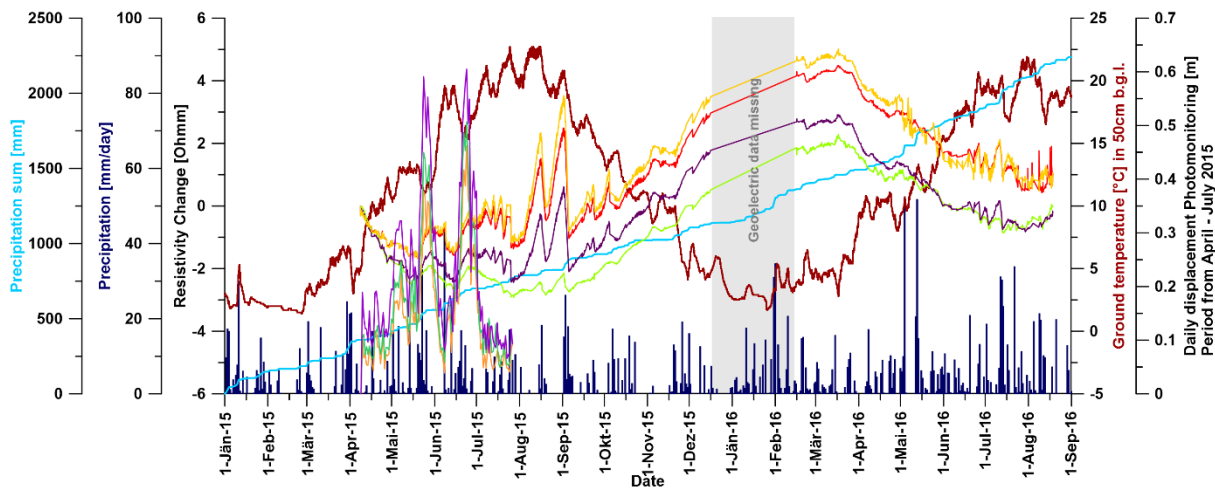


Abb. 29: Zeitreihe der verschiedenen Monitoring Daten (ausgewählte, oberflächennahe Messpunkte des kurzen geoelektrischen Monitoring Profils, Niederschlag (täglich, kumulativ) und Bodentemperatur) für den Zeitraum des LAMOND-Projektes und einer ausgewählten Periode mit Verschiebungsdaten der Foto Monitoring Station 1 (April – Juli 2015), (die einzelne Kurvenzuordnung erfolgt über die Farbgebung der Achsenbeschriftung, Ausnahme bilden hier die geoelektrischen Messpunkte und die Verschiebungsdaten in der Periode April – Juli 2015, die verschiedene Farben aber eine geringere Linienstärke haben (Achsenbeschriftung-schwarz))

2.3.4 Monitoring Station – La Valette

Die Hangrutschung La Valette befindet sich in den südlichen französischen Alpen in der Nähe der Kleinstadt Barcelonnette. Die Aktivierung der Hangrutschung erfolgte im Jahr 1982 – sie gilt seither als eine der bedeutendsten großen, komplexen Hangrutschungen der südlichen französischen Alpen. Dementsprechend viel Forschungsarbeit wurde an dieser Lokation bereits betrieben. Detailreiche Informationen zur Entstehung, Entwicklung und den Hintergründen der Hangrutschung finden sich in einigen Publikationen (siehe z.B. Squarzoni et al. 2003, 2005; Travelletti et al. 2009; Grandjean et al. 2009; Samyn et al. 2012). Die Hangrutschung hat eine enorme Ausdehnung (2 km Länge auf einer Breite von 0.2-0.5 km) mit einem mobilisierten Gesamtvolumen von etwa 3.5 Mio. m³. Die Tiefe des Rutschhorizonts variiert zwischen 25 m im unteren und bis zu 35 m im oberen Bereich der Rutschung. Vom geologischen Aufbau befindet sich die Rutschung im Bereich der Schwarzen Mergel, die für diese Gegend berühmt sind. Details dazu sind in Samyn et al. 2012 gegeben.

Das LAMOND-Projekt hat diese Monitoring Site aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt übernommen und die Datenakquisition mit sehr geringem Aufwand weiter betrieben. Die generelle Lage der Monitoring Site inklusive Detailansicht der beiden Monitoring Systeme ist in Abb. 30 dargestellt. Aufgrund des schlechten Datenaustausches mit ebenfalls an dieser Site tätigen, französischen Forschungsinstitutionen werden im Folgenden nur Ergebnisse der eigenen Monitoring Systeme dargestellt und für die Interpretation verwendet. Des Weiteren muss erwähnt werden, dass die Verantwortung für die Monitoring Site La Valette (vor allem finanzieller Aufwand hinsichtlich Wartung) seit Februar 2016 auf das FWF-Projekt HYDROSLIDE (Projekt Nr.: I 2619-N29) übertragen wurde, das sich schwerpunktmäßig mit tonreichen Hangrutschungen auseinandersetzt. Trotzdem werden hier die Monitoring Daten für die gesamte LAMOND-Projektlaufzeit berücksichtigt.

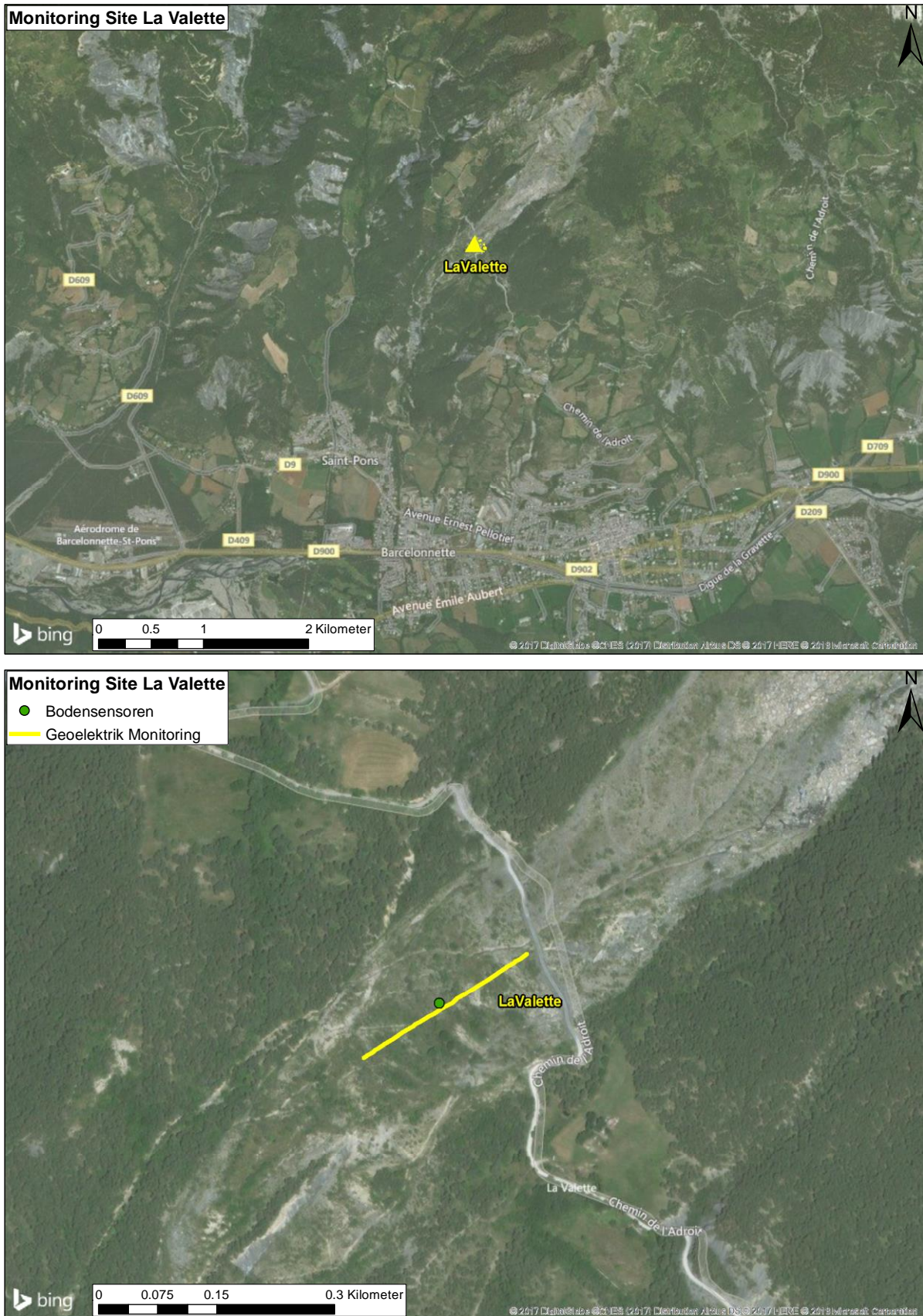


Abb. 30: Lageplan La Valette Übersicht (oben), Detail mit Lage der Monitoring Systeme (unten)

Das geoelektrische Monitoring Profil befindet sich eher im unteren Bereich der Hangrutschung knapp unterhalb einer Straße die über den Rutschkörper führt. Die Profilauslage ist parallel zur Verschiebungsrichtung gewählt – das Hauptaugenmerk wurde auf Infiltrationsprozesse im Zuge von Niederschlagsereignissen gelegt bzw. wie heterogen sich diese entlang des gewählten Profilschnittes verhalten. Aufgrund von fehlenden Verschiebungsdaten für diese Site können keine Aussagen über den Zusammenhang Niederschlag/Infiltration und Beschleunigung der Rutschung getätigt werden. Die maximale Eindringtiefe des gewählten Messaufbaus reicht deutlich unter den Rutschhorizont in diesem Bereich der Rutschung, wodurch prinzipiell auch Änderung der Wassersättigung in diesem Tiefenbereich erfasst werden können. Im zentralen Bereich des geoelektrischen Monitoring Profils wurden zudem diverse Bodensensoren in Tiefen zwischen 15 und 50 cm unter GOK installiert. Die Niederschlagsdaten wurden von einer nahegelegenen Wetterstation (ca. 20 km) bezogen, wodurch hier kleine Abweichungen vom tatsächlichen Niederschlag an der Monitoring Station nicht ausgeschlossen sind.

Abb. 31 zeigt ein repräsentatives Ergebnis des geoelektrischen Monitoring Profils inklusive des vermuteten Rutschhorizontes. Deutlich zu sehen ist, dass bis zur Tiefe des Rutschhorizontes eine eher heterogene Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes vorherrscht. Zieht man die Werte der Farbskala in Betracht, so wird klar, dass bis auf ein paar wenige kleinräumige Anomalien auf der Oberfläche (hoher spezifischer elektrischer Widerstand >100 Ohmm) durchgehend Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes zwischen 30 und 80 Ohmm vorliegen. Erst in der Tiefe des vermuteten Rutschhorizonts (Grenze zum Festgestein) ist der spezifische elektrische Widerstand durchwegs höher und dessen Verteilung kann als mehr oderweniger homogen bezeichnet werden. Im Bereich der maximalen Eindringtiefe nimmt der spezifische elektrische Widerstand zwar tendenziell wieder ab, dies kann allerdings auch auf die geringe Auflösung in diesem Untergrundbereich zurückzuführen sein und muss keinen realen Hintergrund haben. Prinzipiell gehen wir davon aus, dass ab dem Rutschhorizont unterschiedlich stark zerklüftetes Festgestein vorliegt. Interessant ist in welchen Bereichen und ob überhaupt signifikante Änderungen im Zuge von Niederschlagsereignissen bzw. der Schneeschmelze auftreten. Zuerst soll diesbezüglich ein Blick auf die gesamten Monitoring Daten die während des LAMOND-Projektes akquiriert wurden gerichtet werden.

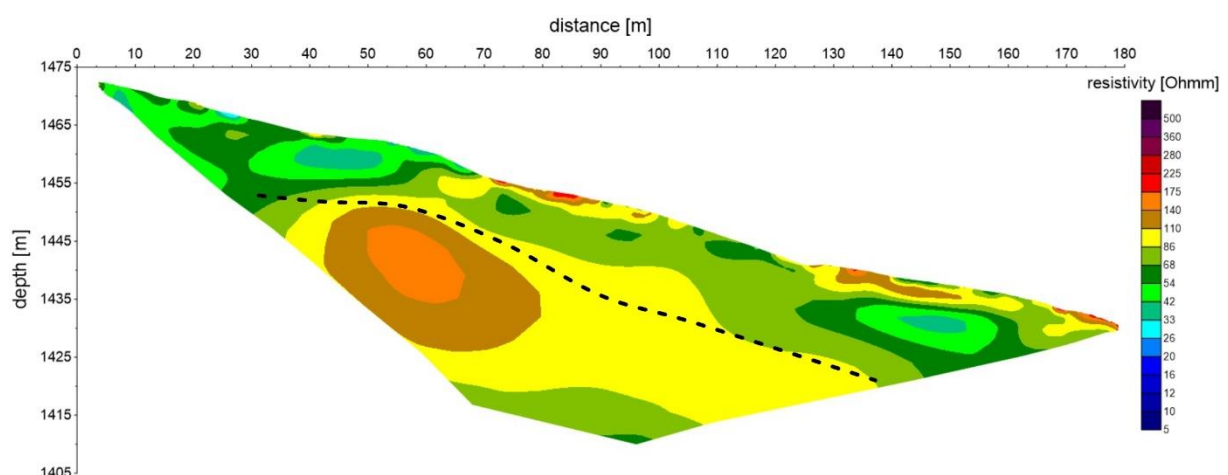


Abb. 31: Repräsentatives Model des spezifischen elektrischen Widerstandes basierend auf Daten des geoelektrischen Monitoring Profils inklusive eingezeichneten Rutschhorizont (gestrichelte Linie)

In Abb. 32 sind die verfügbaren Monitoring Daten für den LAMOND-Projektzeitraum dargestellt. Zu erwähnen ist, dass die Datenreihe der diversen Bodensensoren mit Anfang November 2016 endet, da hier der letzte Wartungseinsatz mit dem Auslesen des Datenloggers erfolgte. Der nächste geplante Wartungseinsatz im Zuge des FWF-Projektes HYDROSLIDE ist leider erst für das Frühjahr 2018 geplant, wodurch diese Daten bei Berichtlegung leider noch nicht verfügbar sind. Bis auf einen kurzen Datenausfall im September und Oktober 2015 sind kontinuierliche geoelektrische Monitoring Daten vorhanden. Neben der temperaturabhängigen jahreszeitlichen Schwankung der Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes ist auffallend, dass die stärksten kurzzeitigen Schwankungen jeweils im Sommer (Juli, August und September) auftreten. Der Grund für dieses Verhalten liegt vorwiegend in der schlechteren Datenqualität in den Sommermonaten, die durch das starke Austrocknen der Oberflächenschicht und den damit einhergehenden schlechteren Elektrodenkontakt zum Untergrund verursacht wird. Des Weiteren ist erkennbar, dass sich scheinbar die Datenqualität mit Herbst 2017 im Zuge der vermehrt auftretenden Niederschläge nicht wie in den Jahren zuvor merklich verbessert (starke kurzfristige Schwankungen bleiben vorhanden). Im Zuge vergangener Wartungsaktionen wurde bereits erkannt, dass die an der Oberfläche installierten Elektroden durch das wiederholte Einfrieren und wieder Auftauen des Untergrundes (in den Wintermonaten) zum Teil deutlich angehoben werden und dadurch die Qualität des Kontaktes zum Untergrund abnimmt. Nun könnte ein Punkt erreicht worden sein wo der Elektrodenkontakt unter ein annehmbares Maß gesunken ist und daher selbst niederschlagsreiche Phasen im Herbst zu keiner signifikanten Verbesserung der Datenqualität mehr führen. Im Nachhinein wäre diesbezüglich eine Wartungsaktion im Herbst 2017 wahrscheinlich sinnvoll gewesen. Der Vergleich zwischen starken Niederschlagsereignissen (am einfachsten zu sehen an der Kurve des kumulativen Niederschlags) und den geoelektrischen Monitoring Daten zeigt in den meisten Fällen eine Korrelation, allerdings sind die Änderungen im spezifischen elektrischen Widerstand bezüglich absoluter Werte sehr gering (maximal im Bereich von 1-2 Ohmm). Dies ist, wie bereits bei anderen Monitoring Lokationen, auf den hohen Tongehalt des Untergrundes und das dadurch generell sehr niedrige Niveau des spezifischen elektrischen Widerstandes zurückzuführen. Interessanterweise zeigt der Bodensensor für die Bodenfeuchte relativ starke Schwankungen (ca. $0.14 - 0.28 \text{ m}^3/\text{m}^3$ - „volumetric water content“), die auf eine entsprechende Dynamik in der Wassersättigung an diesem Messpunkt des Profils hindeuten. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich die Bodensensoren im Bereich der hochohmigen oberflächennahen Anomalie im zentralen Bereich des Profils befinden (ca. bei Profilmeter 85) – hier ist es denkbar, dass ein niedrigerer Tongehalt vorherrscht und somit auch stärkere Änderungen (vor allem kurzzeitig) in der Wassersättigung möglich sind.

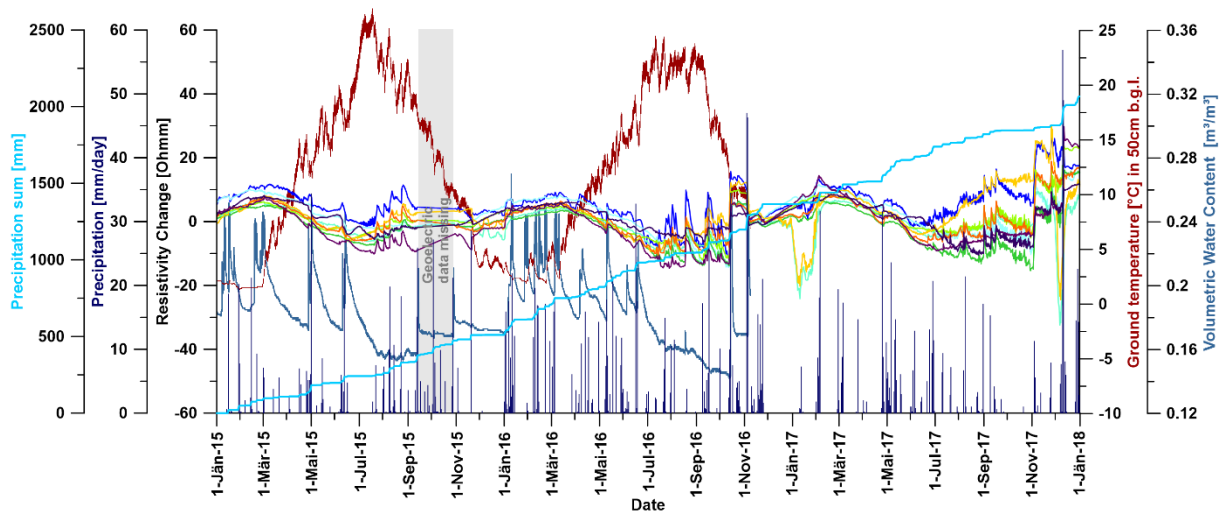


Abb. 32: Zeitreihe der verschiedenen Monitoring Daten (ausgewählte, oberflächennahe Messpunkte des geoelektrischen Monitoring Profils, Niederschlag (täglich, kumulativ), Bodentemperatur und Bodenfeuchte) für den Zeitraum des LAMOND-Projektes (die einzelne Kurvenzuordnung erfolgt über die Farbgebung der Achsenbeschriftung, Ausnahme bilden hier die geoelektrischen Messpunkte, die verschiedene Farben aber eine geringere Linienstärke haben (Achsenbeschriftung-schwarz))

Die räumliche Verteilung der Untergrundbereiche, die eine verstärkte Infiltration von Oberflächenwasser im Zuge eines Niederschlagsereignisses zeigen ist in Abb. 33 dargestellt. Es handelt sich um Ergebnisse der 4D-Inversion der geoelektrischen Monitoring Daten, die die Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes als Widerstandsverhältnis zeigen. Gelbe Farbbereiche stehen für keine signifikante Änderung, blaue Farbbereiche für eine Abnahme und rote Farbbereiche für eine Zunahme des spezifischen elektrischen Widerstandes. In der beigefügten Tabelle ist der Niederschlag als Tagessumme angeführt. Bei diesem konkreten Beispiel ist zu beachten, dass der Referenzdatensatz vom 4.11. gewählt wurde, dieser allerdings zeitlich vor dem markanten Niederschlagsereignis aufgezeichnet wurde. Daher kann dieser auch als Referenz, um die Infiltration darzustellen, verwendet werden. Das Ergebnis vom 5.11. zeigt nur in wenigen Bereichen und nur sehr oberflächennah eine gewisse Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstandes infolge der Infiltration. Erst einen Tag später ist der Effekt deutlich zu sehen, wobei auch hier eine massive Änderung nur in wenigen Bereichen zu beobachten ist (Profilmeter 45-55, 65-90 und 145-160). Dies scheinen die Bereiche zu sein, die hinsichtlich der Bodenbeschaffenheit eine verstärkte Infiltration von Oberflächenwasser zulassen – in manchen Bereichen zeigt sich selbst oberflächennah überhaupt keine Änderung (z.B. Profilmeter 30-45). Diese Bereiche scheinen durch den hohen Tongehalt bezüglich Wasserinfiltration ein sehr dichtes Gefüge zu bilden. Dieses Ergebnis liefert auch die Erklärung, warum der Bodenfeuchtesensor im Bereich von Profilmeter 85 eine deutliche Änderung der Wassersättigung im Zuge von Niederschlagsereignissen zeigt – dies ist genau der Bereich der auch in den geoelektrischen Monitoring Daten die stärkste Reaktion zeigt. In Summe wird am Ergebnis in Abb. 33 klar, dass der Einfluss des Niederschlags nur auf die ersten 4 m des Untergrundes beschränkt ist. In Tiefenbereichen des Rutschhorizontes kommt es zu überhaupt keiner Änderung, was in Anbetracht des kurzen Vergleichszeitraumes auch nicht verwundert, allerdings muss angemerkt werden, dass Beispiele mit längeren Vergleichszeiträumen auch keine Änderungen in größerer Tiefe zeigen (siehe z.B. Abb. 34). Es scheint also so zu sein, dass nur die oberflächennahe Untergrundschicht eine deutliche, aber eher kurzfristige, Beeinflussung durch Niederschlagsereignisse erfährt. Vonseiten der

geoelektrischen Monitoring Daten gibt es keinen Hinweis, dass sich in größeren Tiefenbereichen des Untergrundes im Zuge von längerfristigen, niederschlagsreichen Phasen etwas an der vorliegenden Wassersättigung ändert – dies haben durchgehend auch Auswertungen, die längere Zeiträume betrachten, ergeben. Allerdings muss man beachten, dass aufgrund des kleinen Bereiches der Hangrutschung, der hier beobachtet wird, noch keine generellen Aussagen über den Einfluss des Niederschlages auf Bereiche des Rutschhorizontes möglich sind – die Situation kann im oberen Bereich der Hangrutschung vollkommen anders sein. Insofern sind keine Aussage hinsichtlich des Zusammenhanges Niederschlag/Infiltration und Beschleunigungsphasen der Rutschung möglich.

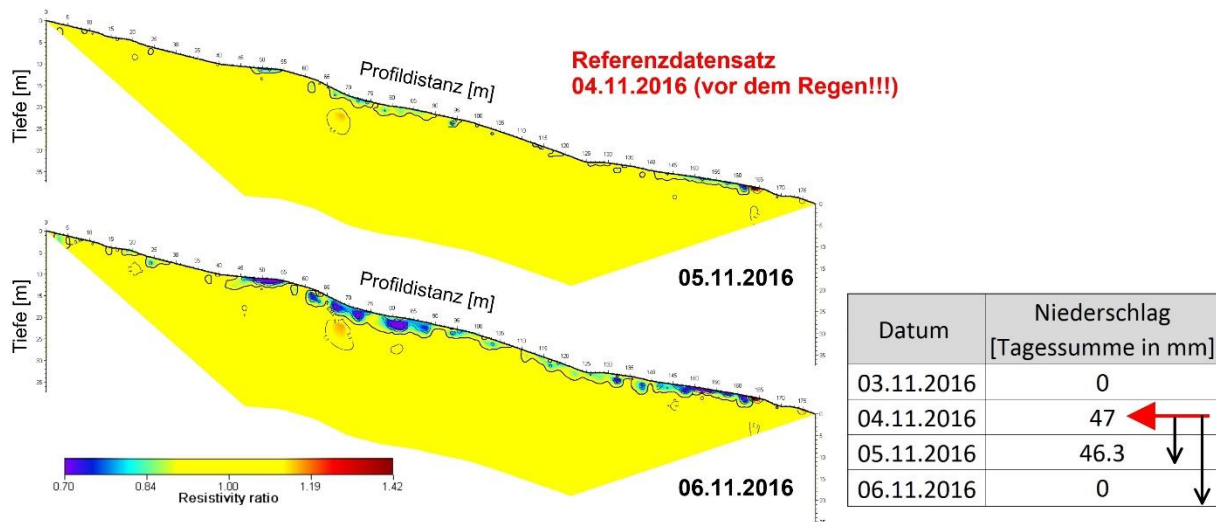


Abb. 33: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz (vor dem Niederschlag) vom 04.11.2016 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdatsätze (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzendarstellung – schwarze Pfeile)

Abb. 34 zeigt ein Beispiel der Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Zuge mehrerer, knapp hintereinander liegender Niederschlagsereignisse mit eher geringerer Intensität. Im Vergleich zum Beispiel in Abb. 33 ist klar zu sehen, dass die Änderung deutlich geringer ausfällt (zusätzlich zu beachten ist, dass aus Darstellungsgründen auch ein anderer Skalenbereich gewählt wurde – ansonsten wäre der Amplitudenunterschied sogar noch deutlicher zu erkennen). Zwar könnte nun direkt der Schluss gezogen werden, dass die geringere Niederschlagsintensität für den schwächeren Effekt verantwortlich ist, allerdings müssen bei derartigen Interpretationen auch die Vorbedingungen des Untergrundes miteinbezogen werden – hier spielt auch die Jahreszeit eine wesentliche Rolle (Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Vegetationsphase,...). Abgesehen von den genannten Faktoren beeinflusst natürlich auch die ursprüngliche Wassersättigung (Referenzdatensatz) inwiefern sich die Infiltration im Zuge eines Niederschlagsereignisses in den geoelektrischen Monitoring Daten widerspiegelt. Die Erwähnung dieser Einflüsse soll nur auf die Komplexität der Interpretation der zeitlichen Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes hindeuten. Im Grunde zeigt das Beispiel in Abb. 34 erneut, dass sich Infiltrationseffekte auf gewisse Profilbereiche und hier nur auf den oberflächennahen Untergrund auswirken. Vor allem das letzte Bild vom 20.5. (längere Phase nach dem etwas stärkeren Niederschlag um den 12.5.) zeigt recht gut, dass sich die Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes

von der Amplitude mit der Zeit abschwächen allerdings gleichzeitig lateral auf größere Bereiche ausweiten – dies entspricht genau dem erwarteten Verhalten im Zuge von Infiltrationsprozessen im oberflächennahen Untergrund.

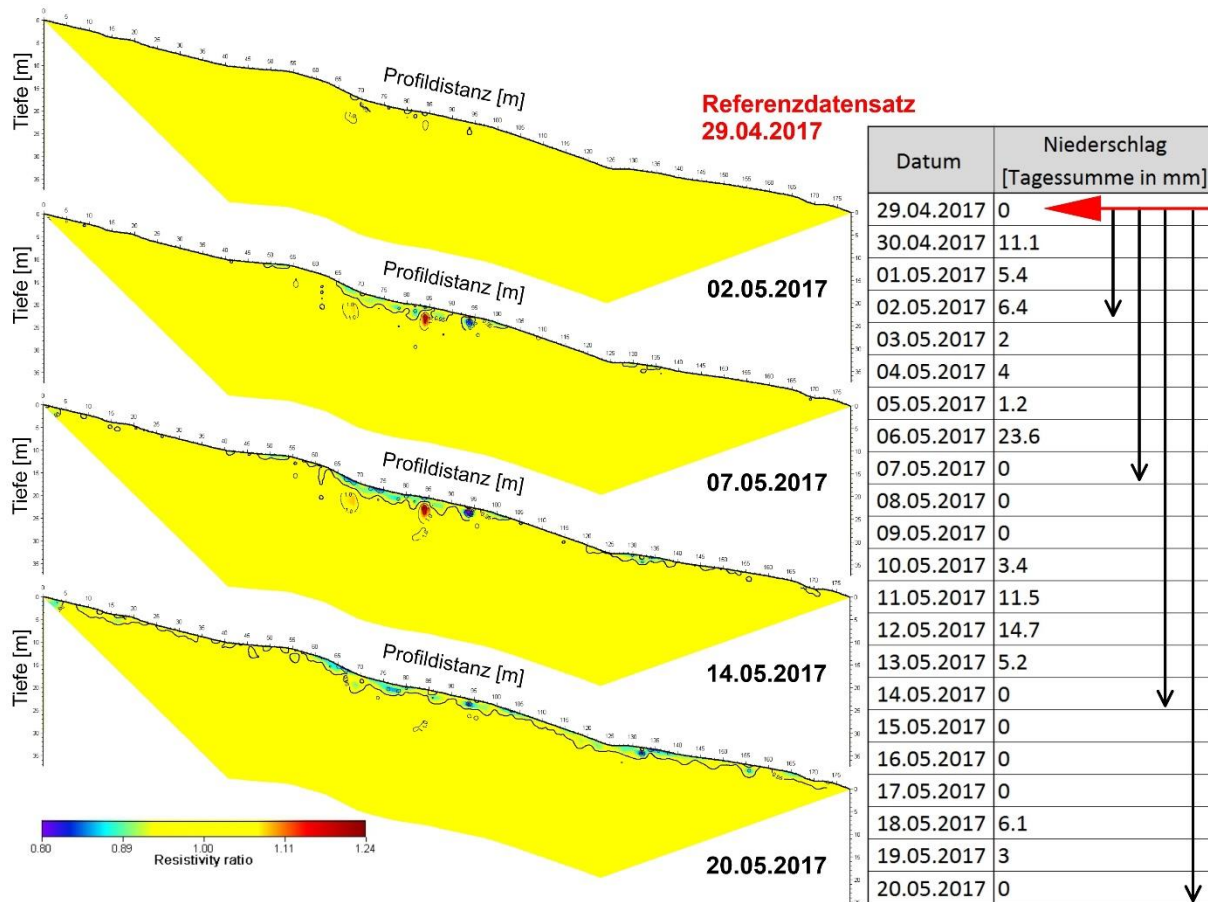


Abb. 34: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz (vor dem Niederschlag) vom 29.04.2017 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdatsätze (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzendarstellung – schwarze Pfeile)

In Abb. 35 ist als deutlicher Kontrast zu den vorangegangenen Beispielen ein Zeitraum mit eher schlechter Datenqualität dargestellt. Für den gewählten Vergleichszeitraum (27.9. – 8.10.) wurde kein Niederschlag registriert, wodurch keine Änderung bzw. wenn doch dann eine Austrocknung der Oberflächenschicht zu erwarten wäre (nur gelber Farbbereich bzw. roter Farbbereich (Zunahme des spezifischen elektrischen Widerstandes) an der Oberfläche). Wie deutlich zu sehen ist zeigt sich ein eher chaotisches Bild aus Zu- und Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstandes (willkürlich verteilt entlang des Messprofils). Dieses Beispiel soll zeigen welche Bedeutung der hohen Datenqualität der geoelektrischen Monitoring Daten beigemessen werden muss, da ansonsten keinerlei Aussagen über etwaige wassersättigungsbedingte Änderungen des Untergrundes möglich sind. Der Vergleich mit dem vorangegangenen Beispiel (gleiche Farbskala) macht deutlich, dass die niederschlagsbedingten Änderungen in der gleichen Größenordnung liegen bzw. zum Teil sogar schwächer sind als die, die der schlechten Datenqualität zuzuschreiben sind.

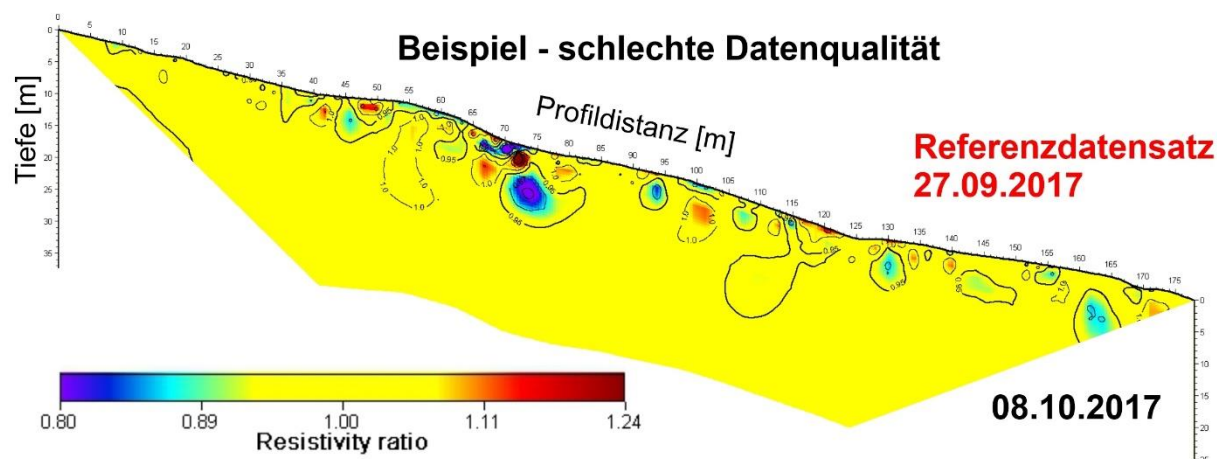


Abb. 35: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz vom 27.09.2017 – Beispiel für schlechte Datenqualität – scheinbar willkürliche Änderungen (positiv und negativ) über das Messprofil verteilt

Abschließend kann zur Monitoring Station in La Valette gesagt werden, dass zwar ein nahezu kontinuierlicher geoelektrischer Monitoring Datensatz generiert wurde (größtenteils mit sehr guter Qualität), dessen Interpretation sich aber aufgrund von fehlenden Verschiebungsdaten (Verantwortung der französischen Partner) rein nur auf Infiltrationsprozesse beschränkt und keinerlei Zusammenhang zur Bewegungsaktivität der Hangrutschung hergestellt werden konnte. Insofern ist diese Art der Abhängigkeit von Kooperationspartner bei zukünftigen Forschungsvorhaben kritisch zu hinterfragen.

2.3.5 Monitoring Station – Bagnaschino

Am Standort Bagnaschino liegt eine Hangrutschung vor, die innerhalb einer alten Erdrutschmasse wieder reaktiviert wurde. Diese liegt an den Hängen des Val Casotto etwa 4 km südöstlich von Torre Mondovì (Piemont, NW Italien) (siehe Abb. 36).

Offensichtliche Hinweise der tiefsitzenden Gravitationsverformung legen nahe, dass die aktuellen Hangneigungen in einem Zustand des Grenzgleichgewichts sind und prädisponiert für langsame Instabilität sind, wahrscheinlich ausgelöst durch Regen und/oder Schneeschmelze und Flusserosion am Hang Fuß. Die jüngste Reaktivierung der Hangrutschung wurde während des Niederschlagsereignisses 1994 verzeichnet. Sie umfasste eine geschätzte Fläche von 150.000 m², wobei Material in der Größenordnung von 1,2 Millionen m³ mobilisiert wurde. Es bestand eine direkte Gefährdung der vorbeiführenden regionalen Straße und eine indirekte durch die Überflutungsgefahr talabwärts liegender Bereiche im Zuge einer möglichen Dammbildung und entsprechender Aufstauung des Flusses. Zur Frühwarnung wurde schlussendlich erst im Oktober 2008 ein automatisches Inklinometer (DMS) mit einer Länge von 60 m installiert. Nachdem dieses durch die erfolgte Hangverschiebung von 60 cm innerhalb von knapp 2 Jahren beschädigt wurde, musste eine entsprechende Erneuerung erfolgen. Diese wurde mit der Installation von zwei neuen automatischen Inklinometern im Jahr 2010 realisiert – im Zuge dessen wurde auch das geoelektrische Monitoring System Geomon4D (siehe Abb. 37) installiert. Das geoelektrische Monitoring Profil ist 224 m lang und parallel zur Hauptbewegungsrichtung orientiert. Die Stromversorgung besteht aus einer Kombination aus Brennstoffzelle und Solarpanel.

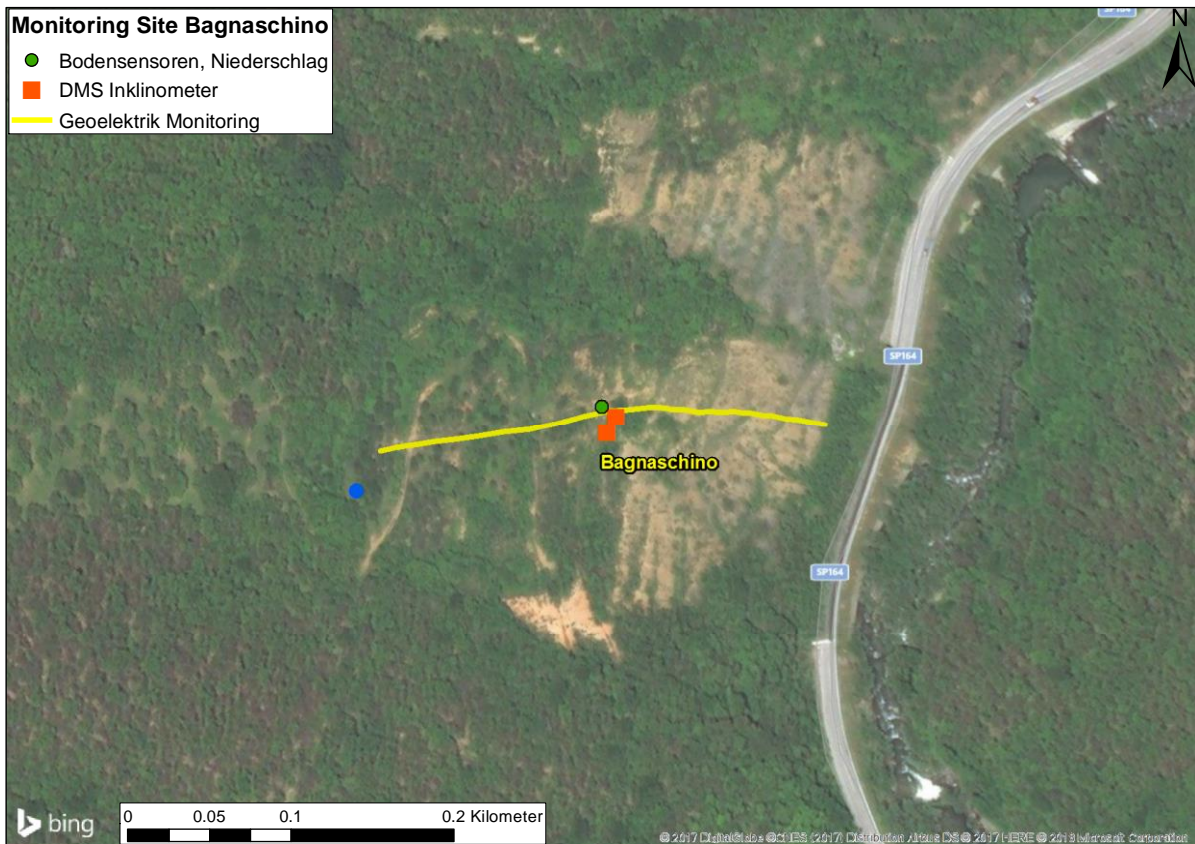


Abb. 36: Lageplan Bagnaschino Übersicht (oben), Detail mit Lage der Monitoring Systeme (unten)



Abb. 37: Lage des geoelektrischen Monitoring Profils in Bagnaschino (rote Linie) innerhalb des aktiven Rutschbereich (gelbe Linie) - Ansicht von gegenüberliegender Talseite

Die von den automatischen Inklinometern aufgezeichneten Verschiebungsdaten zeigen einen klaren Rutschhorizont in der Tiefe von 9 m (siehe Abb. 38). Dies entspricht genau dem Übergang zwischen niedrigen und hohen spezifischen elektrischen Widerstand im Ergebnis des geoelektrischen Monitoring Profils. Dies entspricht auch vom geologischen Schnitt der Grenze zwischen kolluvialen Ablagerungen und dem darunterliegenden Amphibolit. Eine detailreichere Interpretation der Untergrundverhältnisse an der Lokation des geoelektrischen Monitoring Profils erfolgt in Supper et al. 2014. In größerer Tiefe ist anhand der Inklinometer Daten kein Rutschhorizont mehr auszumachen, hier vollzieht sich die Verschiebung, die doch mehrere Zentimeter ausmacht, in Form einer über die Tiefe mehr oder weniger gleichmäßig verteilten Kriechbewegung.

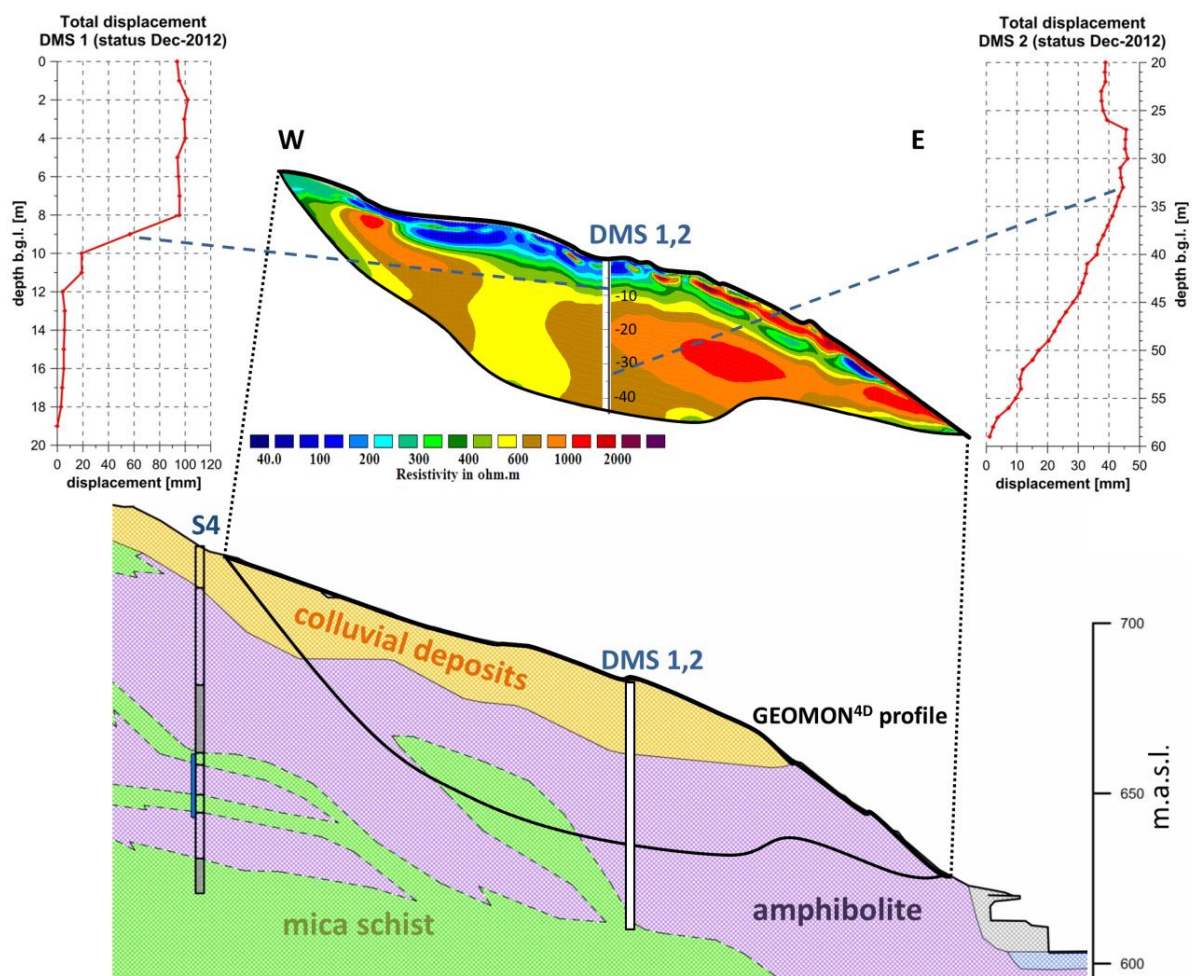


Abb. 38: Vergleich eines repräsentativen Ergebnisses des geoelektrischen Monitoring Profils (Model des spezifischen elektrischen Widerstandes) mit dem geologischen Querschnitts und den Verschiebungsdaten der beiden automatischen Inklinometer

Nach der Installation der Monitoring Systeme ereignete sich im Zuge eines Niederschlagsereignisses im März 2011 am Inklinometer eine signifikante Verschiebung, die innerhalb von 2 Tagen 9.5 cm erreicht hat. Die Verschiebung ereignete sich in der Tiefe des dominanten Rutschhorizontes (9 m unter GOK) und wurde zeitgleich von einem massiven Anstieg des Grundwasserspiegels in den entsprechenden Bohrungen begleitet. Abb. 39 zeigt einerseits eine Zeitreihe ausgewählter Monitoring Daten (Niederschlag, Verschiebung, Wasserspiegel) für den Zeitraum des Verschiebungsereignisses und andererseits Ergebnisse der 4D-Inversion für diesen Zeitraum, die die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes während des Ereignisses wiedergeben. Die der 4D-Inversion zugrundeliegenden Datensätze bzw. deren Zeitpunkt der Aufzeichnung ist in der Zeitreihe an der Zeitachse mittels Pfeilen (rot – Referenzdatensatz vor dem Niederschlag und in blau die Vergleichsdatensätze) dargestellt. Es zeigt sich zeitlich knapp vor der Beschleunigung des Rutschkörpers eine massive Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstandes im Tiefenbereich, der den Rutschhorizont umfasst. Hier kommt es durch die Wasserinfiltration von der Oberfläche oder durch vordefinierte Wasserwegigkeiten aus tieferen bzw. umliegenden Bereichen (könnten auch Klüfte im Amphibolit sein wo aus einer anderen tieferliegenden Schicht Wasser zuströmt) zu einem starken Anstieg der Wassersättigung, der als Auslösegrund für das

Verschiebungsereignis angenommen wird. Hier konnte anhand der geoelektrischen Monitoring Daten zum ersten Mal ein derartiger Zusammenhang gezeigt werden. Gestützt wird diese Interpretation durch die Betrachtung der geoelektrischen Monitoring Daten während anderer vergleichbarer Niederschlagsereignisse, die zu keiner entsprechenden Verschiebung geführt haben. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 40 dargestellt. Hier kommt es im Zuge des Niederschlagsereignisses lediglich zu einer oberflächennahen Beeinflussung des Untergrundes hinsichtlich der Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes. Also kann hier angenommen werden, dass sich die signifikante Änderung der Wassersättigung nur auf die oberflächennahen Schicht beschränkt und es zu keinerlei Beeinflussung des Tiefenbereichs in dem sich der Rutschhorizont befindet kommt. Klar zu sehen ist in Abb. 40 auch, dass es zu keinerlei Verschiebung am automatischen Inklinometer kommt.

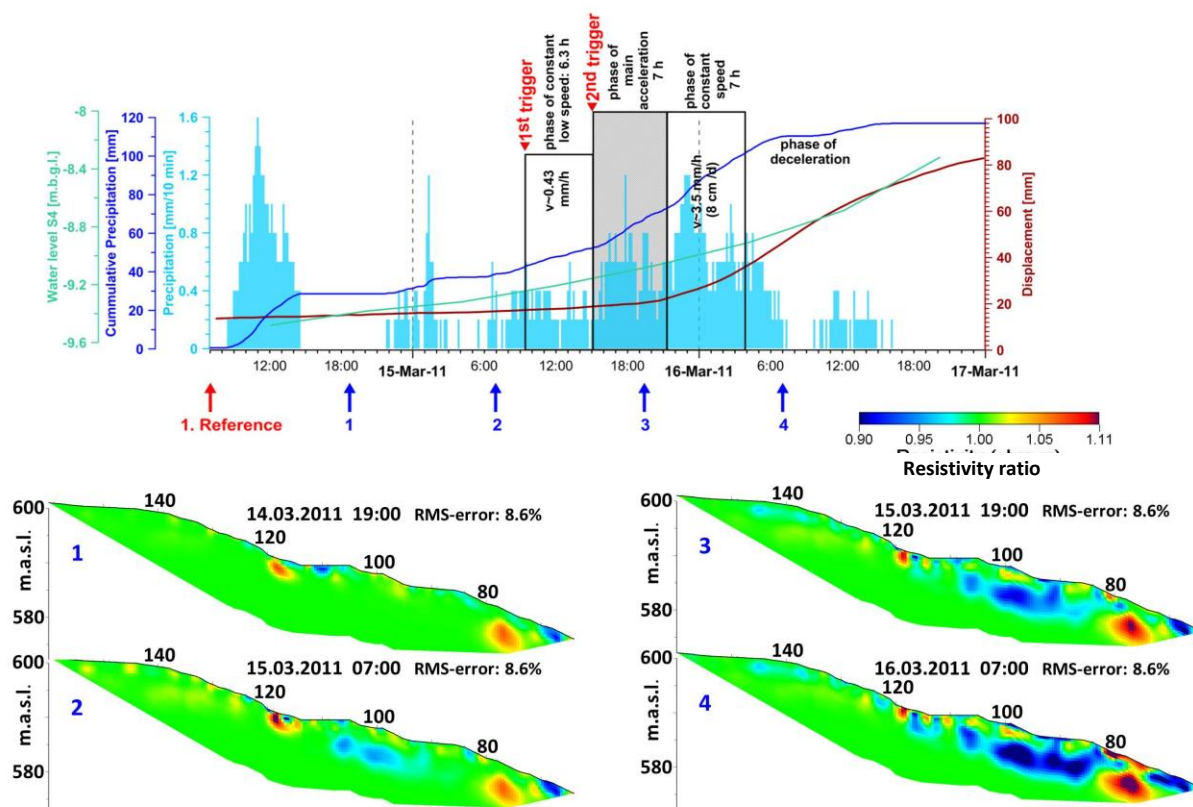


Abb. 39: März „Ereignis“ 2011 – Zeitreihe diverser Monitoring Daten (Niederschlag (hellblau), kumulativer Niederschlag (blau), kumulative Verschiebung (rot) und Wasserstand in S4 (grün)) (oben); Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis (Referenzdatensatz und Vergleichsdatensätze sind in der Zeitreihe mittels roter bzw. blauer Pfeile angegeben) (unten)

In Abb. 41 sind für den LAMOND-Projektzeitraum verschiedene Monitoring Daten als Zeitreihe dargestellt. Zu beachten ist die an allen geoelektrischen Monitoring Stationen beobachtete jahreszeitlich bedingte Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes im oberflächennahen Bereich (Abhängig von der Bodentemperatur). Des Weiteren ist in den Verschiebungsdaten eine scheinbar deutliche Änderung im März 2015 zu erkennen, allerdings muss hier auf die Achsenskalierung verwiesen werden – es handelt sich lediglich um eine Verschiebung von wenigen Millimetern. Die Bodensensoren (insbesondere die Bodenfeuchte) zeigen eine klare Korrelation mit den Niederschlagsereignissen, wobei diese in den

ausgewählten geoelektrischen Messpunkten nicht in dieser Deutlichkeit zu Tage tritt. Diese Diskrepanz lässt sich hauptsächlich durch die unterschiedlichen Untergrundbereiche, die bei den diversen Monitoring Systemen eine Rolle spielen, erklären.

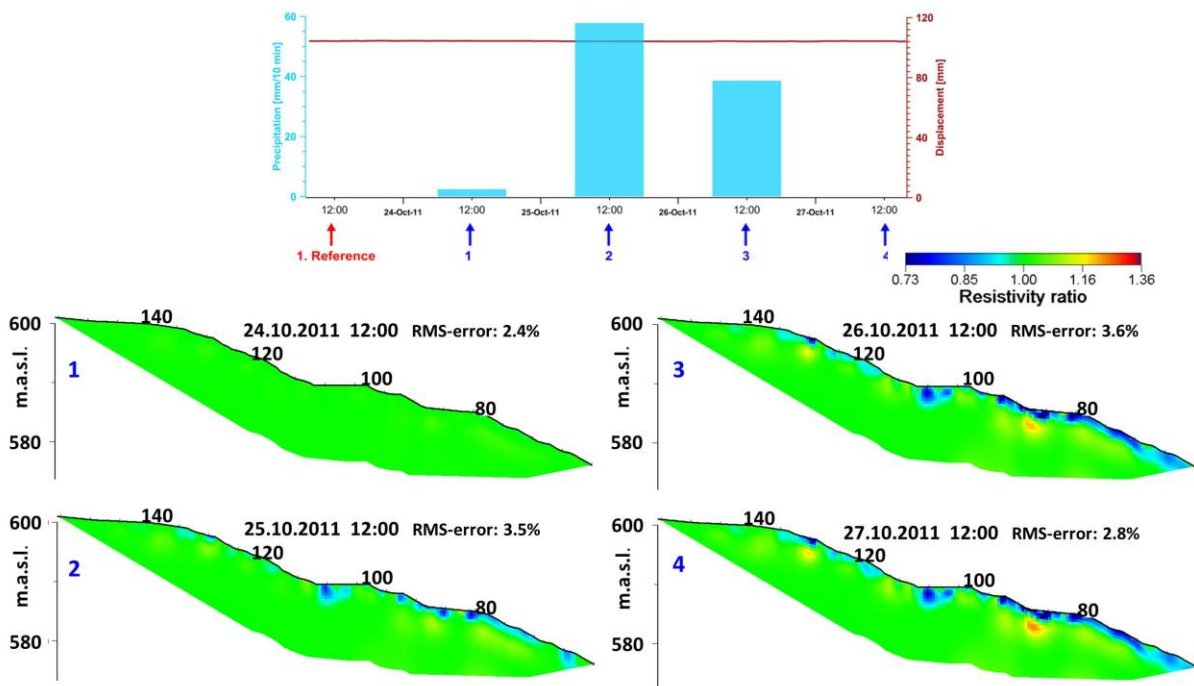


Abb. 40: November „Ereignis“ 2011 - Zeitreihe diverser Monitoring Daten (Niederschlag (hellblau), kumulativer Niederschlag (blau), kumulative Verschiebung (rot) und Wasserstand in S4 (grün)) (oben); Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis (Referenzdatensatz und Vergleichsdatensätze sind in der Zeitreihe mittels roter bzw. blauer Pfeile angegeben) (unten)

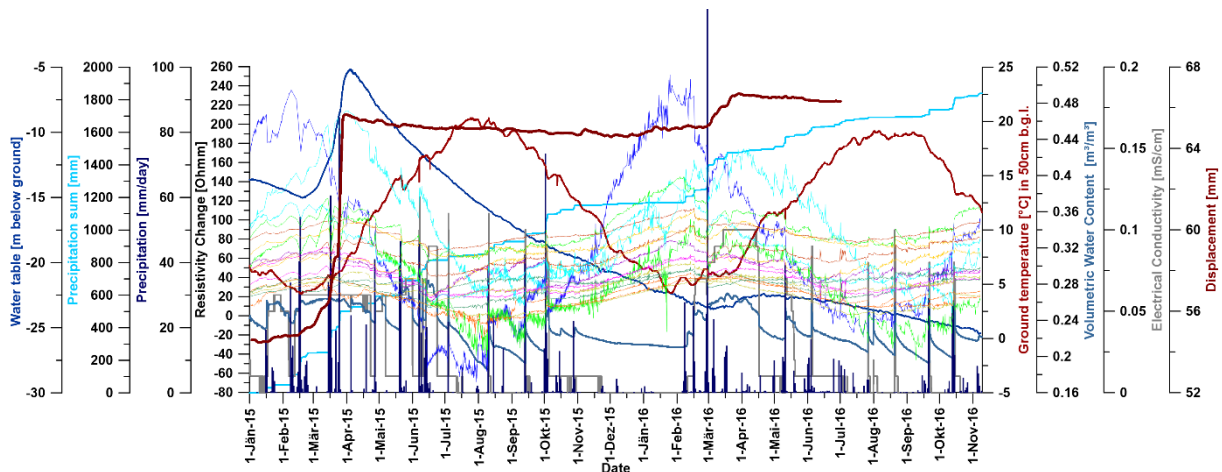


Abb. 41: Zeitreihe der verschiedenen Monitoring Daten (ausgewählte, oberflächennahe Messpunkte des geoelektrischen Monitoring Profils, Niederschlag (täglich, kumulativ), Bodentemperatur, Bodenfeuchte, el. Leitfähigkeit, Verschiebung des Inklinometermoduls am Rutschhorizont) für den Zeitraum des LAMOND-Projektes (die einzelne Kurvenzuordnung erfolgt über die Farbgebung der Achsenbeschriftung, Ausnahme bilden hier die geoelektrischen Messpunkte, die verschiedene Farben aber eine geringere Linienstärke haben (Achsenbeschriftung-schwarz))

Zur Monitoring Station Bagnaschino kann abschließend gesagt werden, dass sie vor allem was das geoelektrische Monitoring betrifft sehr interessante, neue Ergebnisse und Erkenntnisse

geliefert hat. Des Weiteren ist zu betonen, dass das Geomon4D System an dieser Lokation mit Ausnahme von ein paar kurzfristigen Ausfällen (jeweils maximal 2-3 Wochen) von Oktober 2010 bis November 2016 durchgehend in Betrieb war. Vergleichbare geoelektrische Datensätze, vor allem hinsichtlich Dauer und zeitlicher Auflösung (Messung von mindestens 2 Untergundsektionen pro Tag), sind im geowissenschaftlichen Forschungsbereich sehr rar. Sowohl die Qualität der Ergebnisse als auch der Umfang der verfügbaren Monitoring Daten sind der Hauptgrund, dass die Monitoring Station Bagnaschino die zentrale Rolle im Projektbereich der numerischen Modellierung und Simulation (siehe Kapitel 3) spielt und als Grundlage für diverse theoretische Überlegungen dient.

2.3.6 Monitoring Station – Rosano

Die Monitoring Station in Rosano, einem Weiler in der Nähe von Cabella Ligure im Piemont (siehe Abb. 42), wurde im Juli 2012 aufgebaut. Bestandteile der Monitoring Station waren ein permanentes geoelektrisches Monitoring System (Geomon4D), diverse Bodensensoren (Feuchte, Temperatur, el. Leitfähigkeit), ein Piezometer und ein Pluviometer sowie ein Inklinometer der sich im Eigentum der Gemeinde befand. Der Elektrodenabstand des geoelektrischen Monitoring Profils wurde mit 2.5 m gewählt. Bei einer Gesamtauslagenlänge von 230 m lag die maximale Messtiefe bei ca. 38 m. Zum Schutz der geoelektrischen Messkabel wurden diese in einer etwa 40 cm tiefen Künette verlegt (Abb. 43). Aufgrund des fortschreitenden Ausfalls einzelner Module des Inklinometers wurde die Station im April 2015 abgebaut. Diese vom vorangegangenen Forschungsprojekt übernommene Monitoring Station wurde also nur 4 Monate im Rahmen des LAMOND-Projektes betrieben. Aus diesem Grund wird die Beschreibung der Ergebnisse hier auf ein Minimum beschränkt – die über den gesamten Zeitraum des Monitoring Betriebes generierten Daten wurden in einer Masterarbeit (siehe Guardiani 2016) im Detail analysiert und interpretiert.

Der Rutschhang wurde ausgewählt da dieser aufgrund der heftigen Niederschläge Ende 2004 reaktiviert wurde und in Folge dessen massive Schäden an den Gebäuden aufgetreten sind. Der daraufhin installierte automatische Inklinometer (im Besitz der Gemeinde), dessen Daten uns dankenswerterweise zur Verfügung gestellt wurden, und die damit verbundene Information über die Bewegungsaktivität, stellt natürlich eine optimale Grundlage für eine detaillierte Gesamtinterpretation der Monitoring Daten dar. Details zur Historie, Hintergrund und Entwicklung der Hangrutschung in Rosano sind in Guardiani 2016 sowie in Lovisolo 2012 ausgeführt.

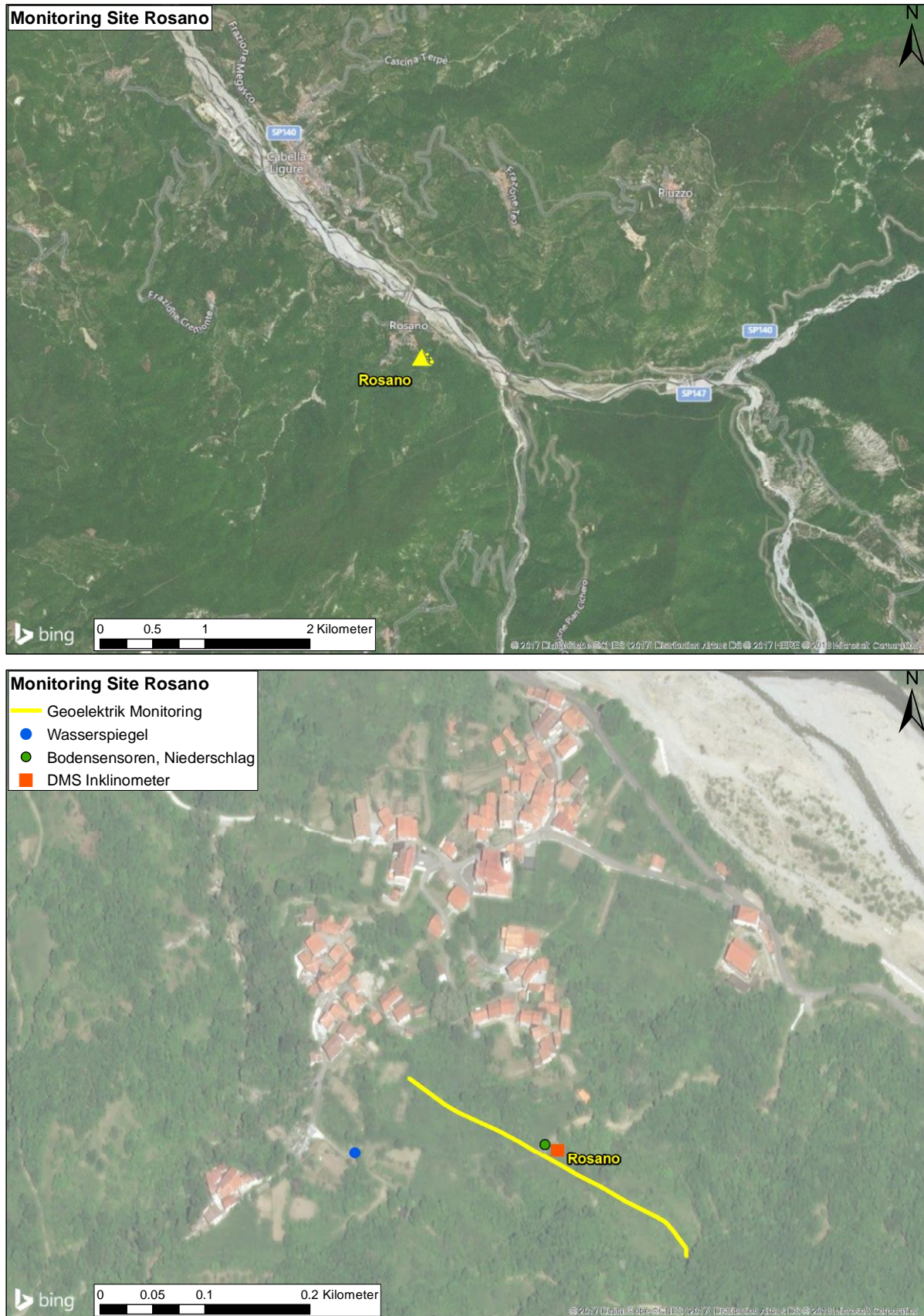


Abb. 42: Lageplan Rosano Übersicht (oben), Detail mit Lage der Monitoring Systeme (unten)



Abb. 43 Aufbau des geoelektrischen Monitoring Profils in Rosano (links), Geomon4D Messsystem (rechts)

Die geologische Situation in Rosano ist sehr komplex und heterogen. Schutt vom Erdbeben lagert über eine wechselnde Abfolge von Mergel und Schiefer, die zum Teil kalkhaltig sein können (siehe Abb. 44). 2 morphologische Stufen können als 2 Anrisse gedeutet werden, die sich beide als langsame Hangrutschung verhalten. Wie die geologische Karte der Umgebung von Rosano in Abb. 45 zeigt, ist die Umgebung der Monitoring Lokation von diversen größeren und kleineren Hangrutschungen betroffen.



Abb. 44: Monte Antola Formation über Monte Pagliaro Schiefer, Aufschluss entlang Straße SP40

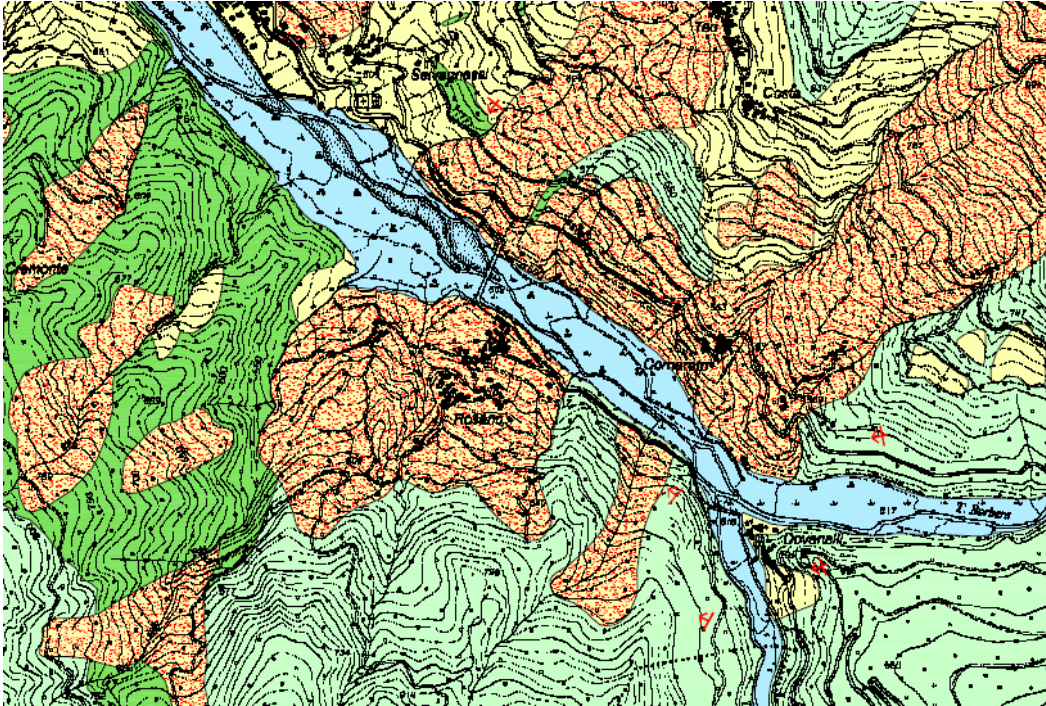


Abb. 45: Geologische Karte der Umgebung von Rosano, 1:10000, Legende: Orange = Erdrutschmassen, Grün = Monte Pagliaro Schiefer, Hellgrün = Monte Antola Formation (Mergel), Hellblau = Alluvium (b).

Abb. 46 zeigt Teile des Aufschlusses der Kernbohrung S1 (Bohrung des automatischen Inklinometers) – deutlich zu sehen sind die unterschiedlichen Einheiten, die je nach Tiefe angetroffen werden. Vor allem die ersten 9 m unter GOK zeigen größtenteils eher lockeres, feinkörniges Material, das recht gut mit dem eher niedrigen spezifischen elektrischen Widerstand des in Abb. 47 dargestellten Ergebnisse des geoelektrischen Monitoring Profils in Einklang zu bringen ist. In größerer Tiefe dominiert festeres Gestein, das unabhängig von der geologischen Einheit (Schiefer oder Mergel) den hohen spezifischen elektrischen Widerstand in Abb. 47 zuzuordnen ist. Anhand des geoelektrischen Ergebnisses und des Aufschlusses der Kernbohrung wäre der logische Schluss, dass im Übergangsbereich zwischen niedrigen und hohen spezifischen elektrischen Widerstand der entsprechende Rutschhorizont anzutreffen sein müsste. Die Daten des automatischen Inklinometers (siehe Abb. 48) zeigen dies allerdings nicht. Bei genauer Betrachtung ist eventuell zwischen Meter 11 und 12 sowie 29 und 30 unter GOK (vor allem für die aktuelleren Daten) ein kleiner Versatz zu erkennen, der allerdings, verglichen mit anderen Monitoring Stationen (z.B. Gschlifgraben (Kapitel 2.3.1)), nicht als deutlicher Rutschhorizont zu bezeichnen ist. Vielmehr vollzieht sich die Verschiebung über die gesamte Länge der Bohrung und entspricht in diesem Sinne eher einer Kriechbewegung, die in Hinsicht auf Beschleunigungsphasen im Normalfall noch wesentlich schwieriger mit äußeren Einflüssen (z.B. Niederschlag) in Zusammenhang zu bringen ist, als Verschiebungen entlang eines klar definierten Rutschhorizontes. Dahingehend ist auch hinsichtlich der geoelektrischen Monitoring Daten kaum ein klarer Zusammenhang zwischen der Infiltration von Oberflächenwasser und der Beschleunigung des Rutschkörpers zu erwarten.



Abb. 46: Teile des Aufschlusses der Kernbohrung S1 (links: 0-10 m unter GOK; rechts oben: 15-20 m unter GOK; rechts unten: 35-40 m unter GOK) in welcher der Inklinometer eingebaut war

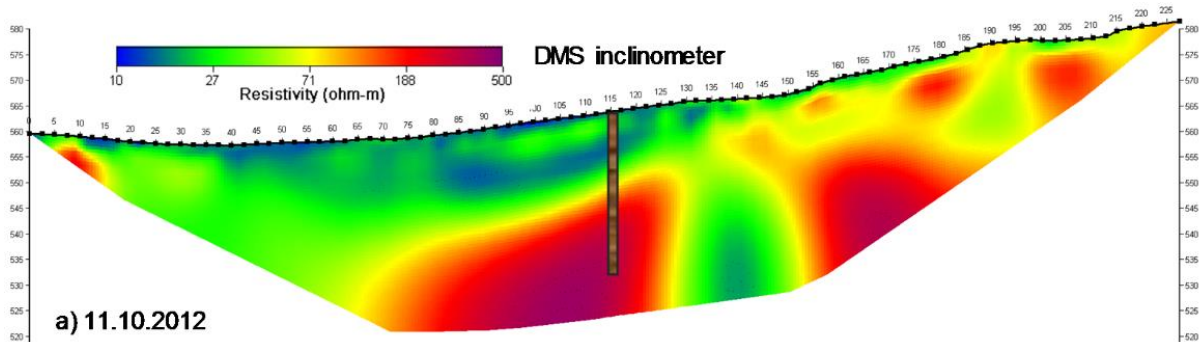


Abb. 47: Repräsentatives Model des spezifischen elektrischen Widerstandes basierend auf Daten des geoelektrischen Monitoring Profils inklusive eingezeichneter Bohrung

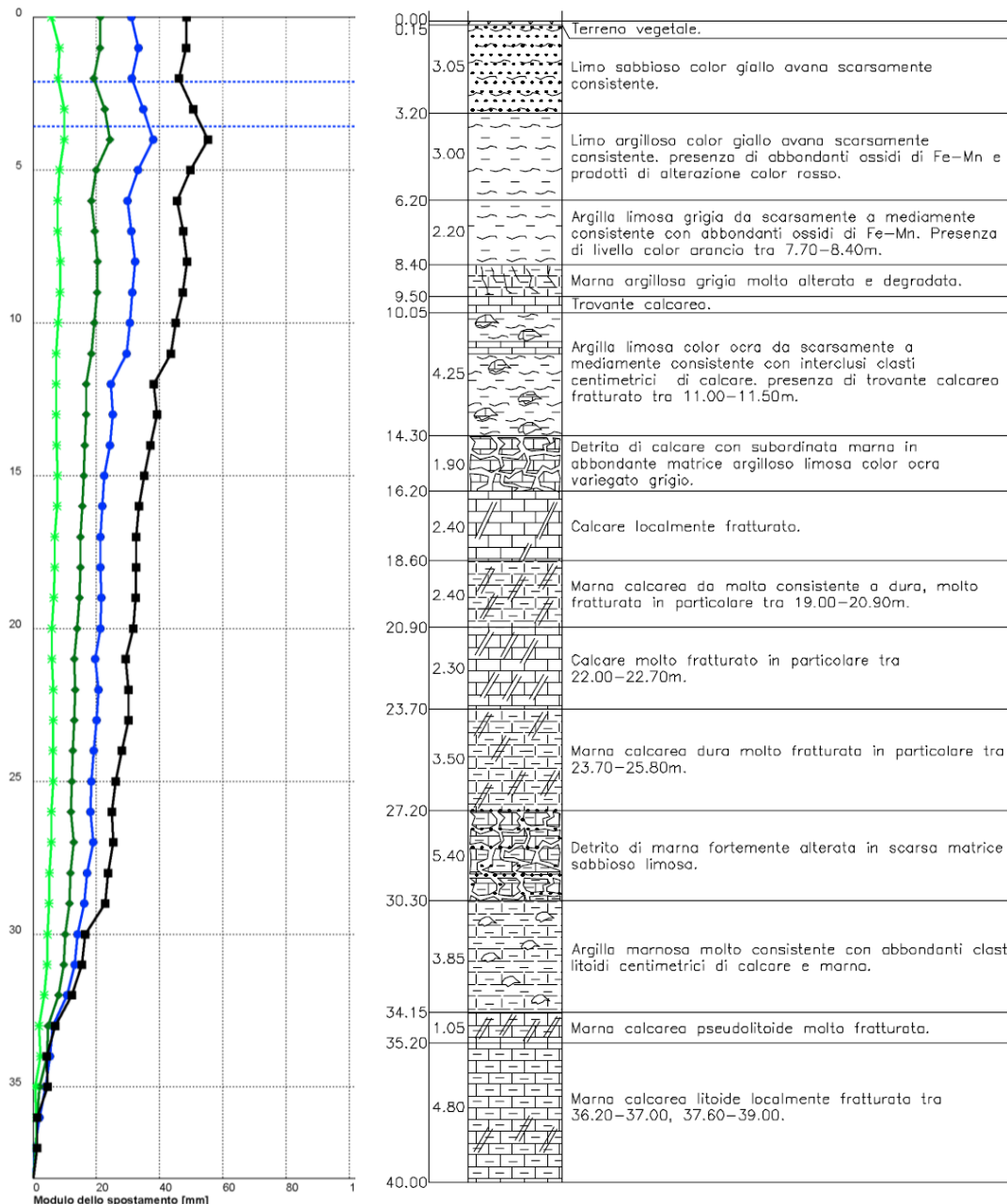


Abb. 48 Gesamtverschiebung des Inclinometers, die unterschiedlichen farbigen Linien entsprechen jeweils einem Intervall von 6 Monaten, rechts: Stratigraphie des Bohrlochs

In Abb. 49 sind die während der LAMOND-Projektzeit generierten Monitoring Daten als Zeitreihe dargestellt. Die ausgewählten, oberflächennahen geoelektrischen Messpunkte zeigen bis auf die dunkelblaue Kurve keinerlei Reaktion auf die auftretenden Niederschlagsereignisse, wobei bei den Bodensensoren sowohl die aufgezeichnete Bodenfeuchte als auch die direkt gemessene elektrische Leitfähigkeit einen Ausschlag nach oben aufweisen. Diese Diskrepanz lässt sich hauptsächlich über die unterschiedlichen Tiefenbereiche, die hier betrachtet werden erklären. Die Bodensensoren sind in maximal 65 cm unter GOK installiert, wohingegen die seichtesten geoelektrischen Messpunkte einen Untergrundbereich der zumindest bis in 2 m Tiefe reicht integral erfassen. Noch dazu sind die geoelektrischen Elektroden in einer Tiefe von etwa 40 cm installiert wodurch sich ein noch

geringerer kurzfristiger Einfluss des Niederschlages ergibt. Dennoch ist die kaum vorhandene Reaktion der geoelektrischen Messpunkte überraschend. Anhand eines Beispielergebnisses der 4D-Inversion kann gezeigt werden dass der Einfluss tatsächlich nur auf einzelne kleinräumige Bereiche entlang des geoelektrischen Monitoring Profils begrenzt ist.

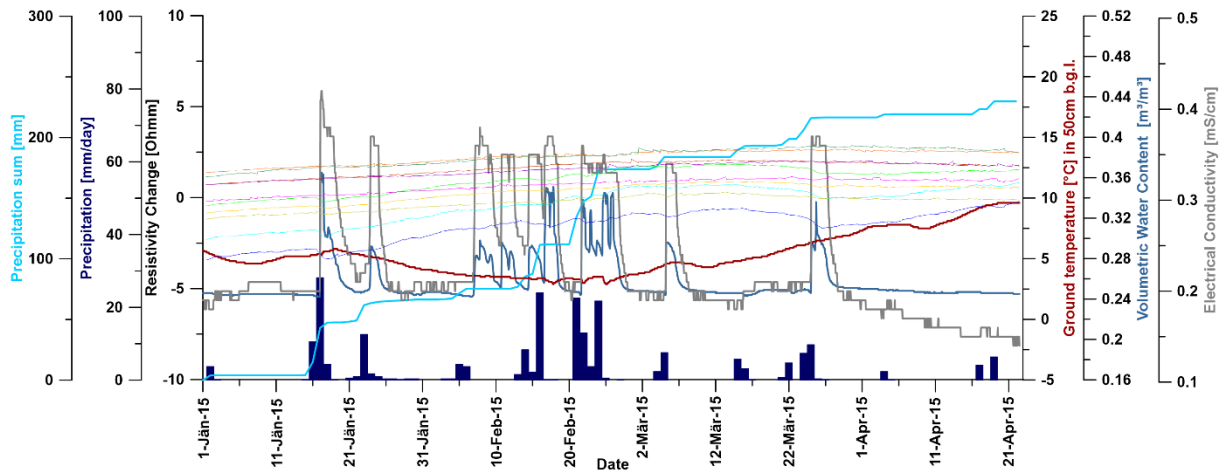


Abb. 49: Zeitreihe der verschiedenen Monitoring Daten (ausgewählte, oberflächennahe Messpunkte des geoelektrischen Monitoring Profils, Niederschlag (täglich, kumulativ), Bodentemperatur, Bodenfeuchte und el. Leitfähigkeit) für den Zeitraum des LAMOND-Projektes (die einzelne Kurvenzuordnung erfolgt über die Farbgebung der Achsenbeschriftung, Ausnahme bilden hier die geoelektrischen Messpunkte, die verschiedene Farben aber eine geringere Linienstärke haben (Achsenbeschriftung-schwarz))

In Abb. 50 ist die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Zuge eines Niederschlagsereignisses als Ergebnis der 4D-Inversion dargestellt. Klar zu sehen ist, dass während des Niederschlagsereignisses (Ergebnis vom 15.10.) kaum ein nennenswerter Effekt zu sehen ist. Das Ergebnis vom 19.10. hingegen zeigt an der Oberfläche eine recht deutliche Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstandes aufgrund der Infiltration von Regenwassers, die allerdings sehr heterogen verteilt ist. Richtig signifikante Änderungen (mehr als 10% - blauer bis dunkelblauer Farbbereich) treten nur in kleinräumigen Bereichen auf, die höchstwahrscheinlich grobkörnigerem Untergrundmaterial zuzuordnen sind. Hinsichtlich Ausdehnung erscheinen diese Bereiche Richtung Profilende größer, was durch den generell höheren spezifischen elektrischen Widerstand in diesem Bereich (siehe Abb. 47) zu erklären ist. Der Untergrund in diesem Bereich zeigt eine wesentlich weniger mächtige (wenn überhaupt vorhandene) tonreiche Überlagerung als im Bereich von Profilmeter 15-140. Daher kann das Oberflächenwasser über die vorhandene Klüftigkeit des Gesteins schneller in größere Tiefe vordringen und sich auch entsprechend ausbreiten. Im Bereich zwischen Profilmeter 15 und 140 reicht die signifikante Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes merklich weniger tief in den Untergrund. Hier wird die Infiltration durch tonreicheres Material erschwert bzw. geht langsamer vonstatten. Der generell nicht sehr tiefreichende Einfluss der Infiltration im Zuge dieses recht intensiven Niederschlags macht, klar dass diese Art von Ereignissen mit Sicherheit keine Beschleunigung der Massenbewegung verursachen können. Es ist anzunehmen, dass ein tiefreichender Einfluss, der dann auch die Bewegungsaktivität der Hangrutschung entsprechend verändert, erst bei längeren zeitlichen Phasen mit überdurchschnittlich hohen Niederschlagsraten (mehrere Monate) eintritt. Eine derartige Phase wurde unserer Ansicht nach während des gesamten Monitoring Betriebes nicht beobachtet, wodurch es auch zu keinerlei markanten Beschleunigungsphasen der

Hangrutschung gekommen ist. Dies wäre allerdings für die Herstellung eines klaren Zusammenhanges zwischen Wassersättigungsänderung und Beschleunigung dringend notwendig gewesen.

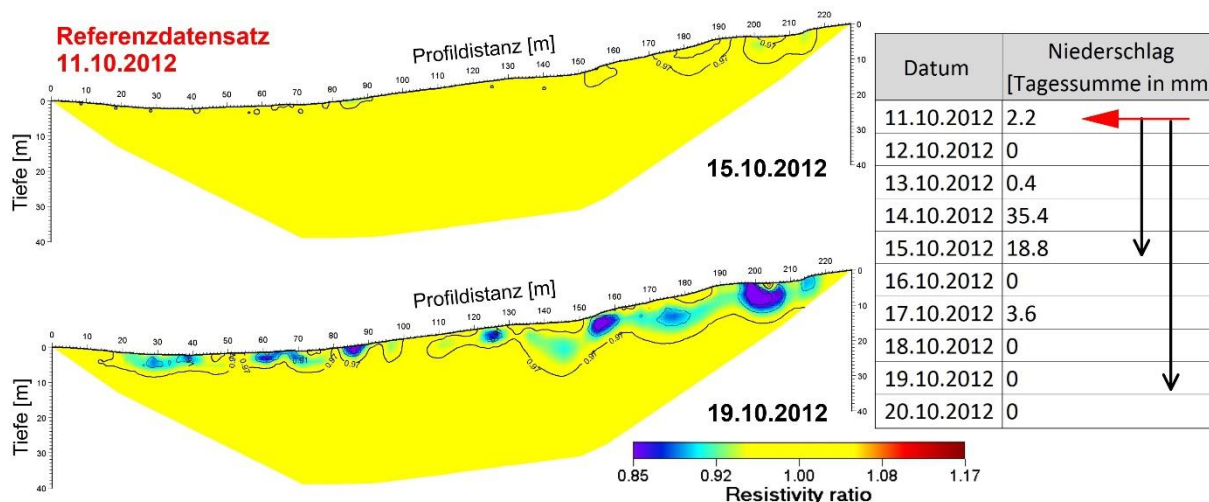


Abb. 50: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz (vor dem Niederschlag) vom 11.10.2012 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdatsätze (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzendarstellung – schwarze Pfeile)

2.3.7 Monitoring Station – Navis

Die Siedlung Kerschbaum in der Gemeinde Navis liegt an den Südabhängen des Misljochs im gleichnamigen Navistal, einem Seitental des Wipptals (Abb. 51).

Ende der 70er Jahre hat die Gemeinde landwirtschaftliche Flächen erstanden und nachfolgend zu Bauland gewidmet. Zu Beginn des Jahrtausends sind Risse im Hang oberhalb der Siedlung aufgetreten. Die zugrundeliegende Bewegungsaktivität des Hanges konnte trotz Maßnahmen vonseiten der WLW (Einbau eines seichten Drainagen Systems) nicht nachhaltig reduziert werden. Erste offensichtliche Schäden an den darunterliegenden Häusern wurden im Jahr 2012 festgestellt. Von 2013-2014 wurden, um den Prozess der Hangbewegung besser zu verstehen, umfangreiche und vertiefende Untersuchungen (Sausgruber 2015) seitens der WLW durchgeführt. Im Zuge dessen wurden erste geoelektrische Messungen (2 geoelektrische Messprofile) von der Geologischen Bundesanstalt, Fachabteilung Geophysik realisiert.

Die umfangreichen Untersuchungen haben ergeben, dass der taleinwärtsliegende Teil der Siedlung Verschiebungen von 1 bis 1.5 cm/a und der talauswärtsliegende Teil von 3 bis 4 cm/a aufweist (Abb. 53) Infolge unterschiedlicher Geschwindigkeiten in den Hangbewegungen zwischen den beiden Teilen der Hangrutschung, kommt es am Übergang zu Scherspannungen und Scherbewegungen, die für die stärksten Schäden an Häusern und Infrastruktur verantwortlich sind. Zudem zeigen die vorhandenen Inklinometer Daten, dass der talauswärtsliegende Teil der Hangrutschung einen deutlich tieferen Rutschhorizont (37 m unter GOK) als der taleinwärtsliegende (15 m unter GOK) aufweist (Sausgruber 2015). Demnach ist es denkbar, dass der Bewegung bzw. dessen Beschleunigung nicht exakt die gleichen Auslösemechanismen zugrunde liegen.

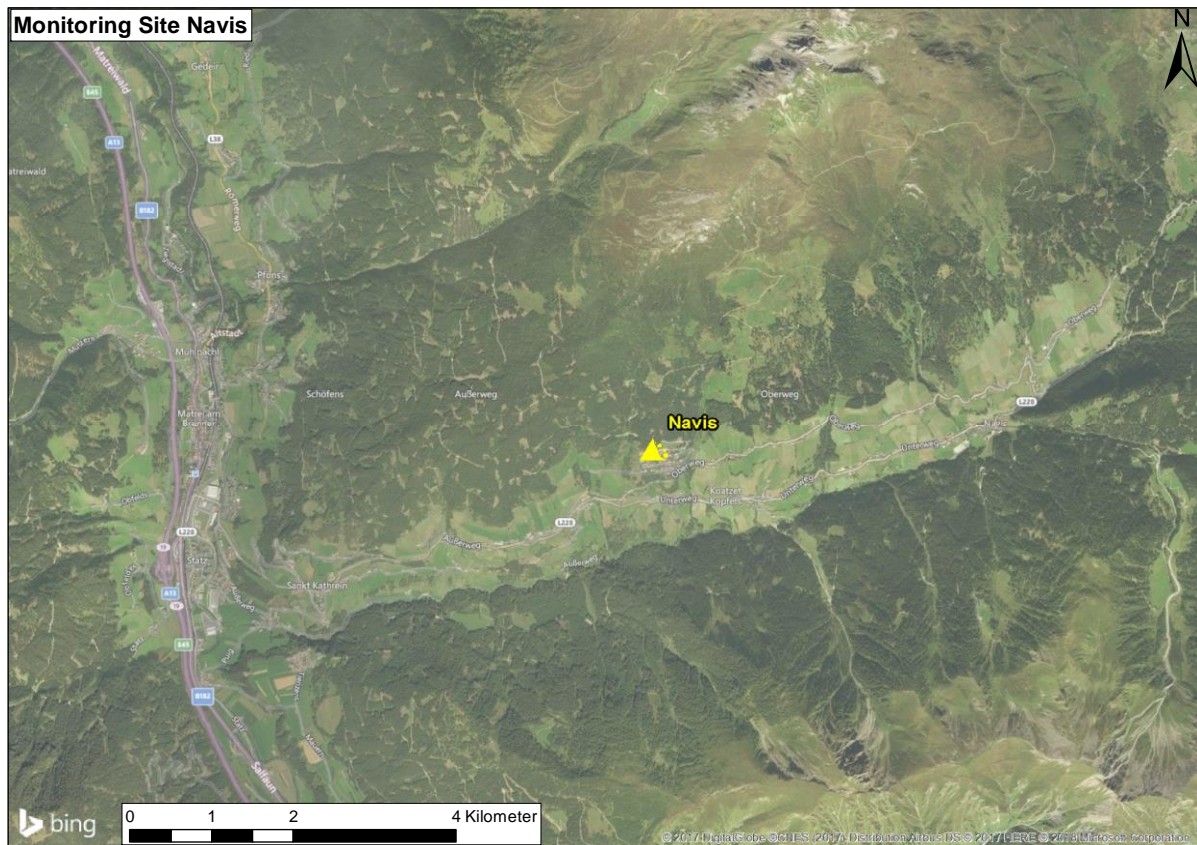


Abb. 51: Lage der Monitoring Station Navis (Übersicht)

Im Profil der Großhangbewegung (Abb. 53) sind die möglichen Wasserwegigkeiten im Untergrund auf Basis der hydrologischen Kartierung, der Messung von qualitativen Parametern (Temperatur und elektrische Leitfähigkeit) und der Kern- und Pegelbohrungen schematisch dargestellt. Im oberen Hangbereich versickert der Großteil des Niederschlags oder des geschmolzenen Schnees in den tieferen Untergrund. Dieses Wasser tritt erst hangabwärts, teils gespannt, wieder aus dem Boden aus. Man geht davon aus, dass der Schuttstrom das Wasser im Fels nach oben hin abdichtet und der Schuttstrom hierdurch eine Auftriebswirkung erhält (Sausgruber 2015).

Aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen wurde beschlossen oberhalb der Siedlung u.a. tiefe Vertikalbrunnen als „Sperrbrunnen“ zu errichten um den Schuttstrom zu entwässern. Begleitend dazu wurde neben verschiedenen Messungen (manuelle Inklinometer, Wasserspiegel, Oberflächenbewegungen) im Rahmen des LAMOND-Projektes von der Geologischen Bundesanstalt ein geoelektrisches Monitoring System, bestehend aus zwei rechtwinkelig zueinander ausgelegten Profilen, aufgebaut (Abb. 54). Ziel des geoelektrischen Monitorings war einerseits die Infiltration von Oberflächenwasser in den Rutschkörper zu erfassen und andererseits wenn möglich die Wirksamkeit der Entwässerungsmaßnahmen zu beobachten.

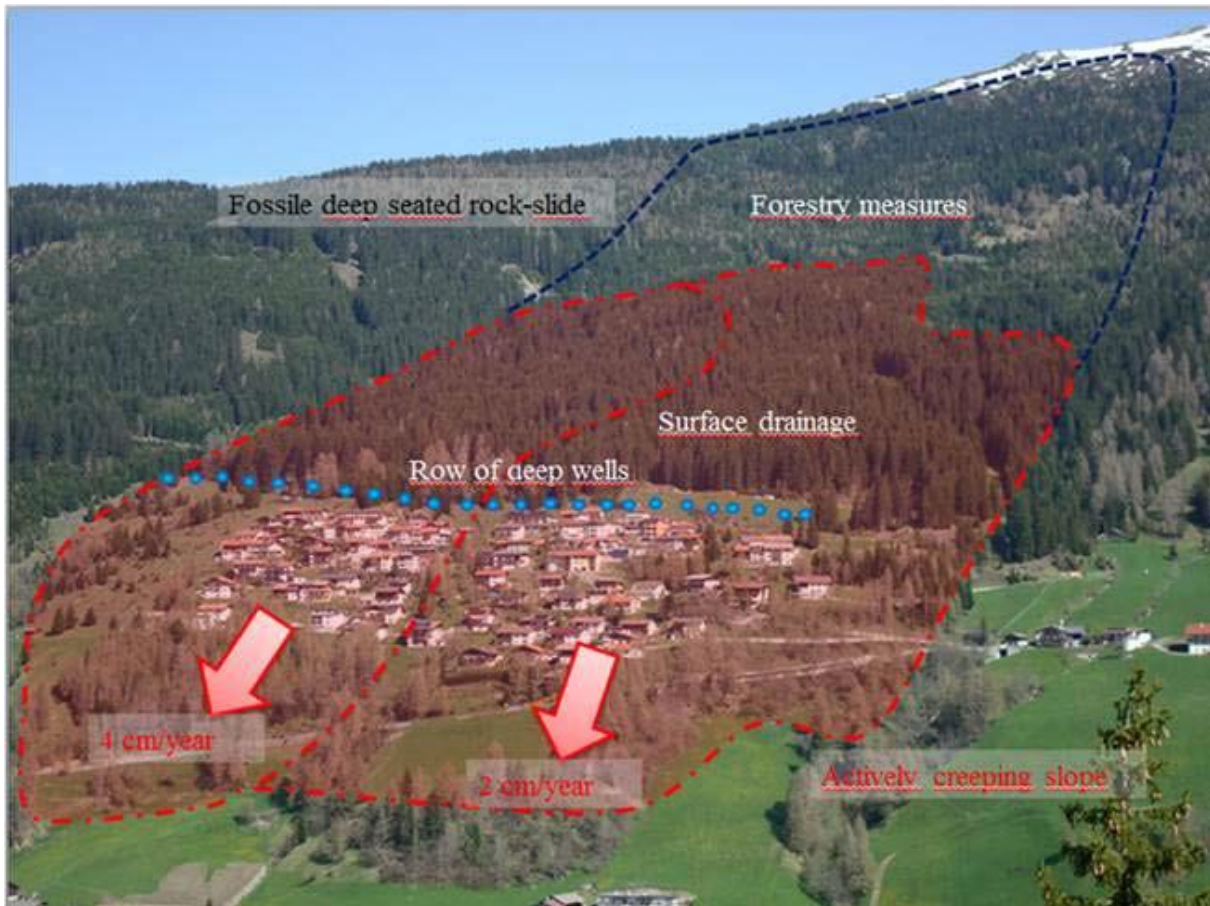


Abb. 52: Skizze der Dimension des Schuttstromes und der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten

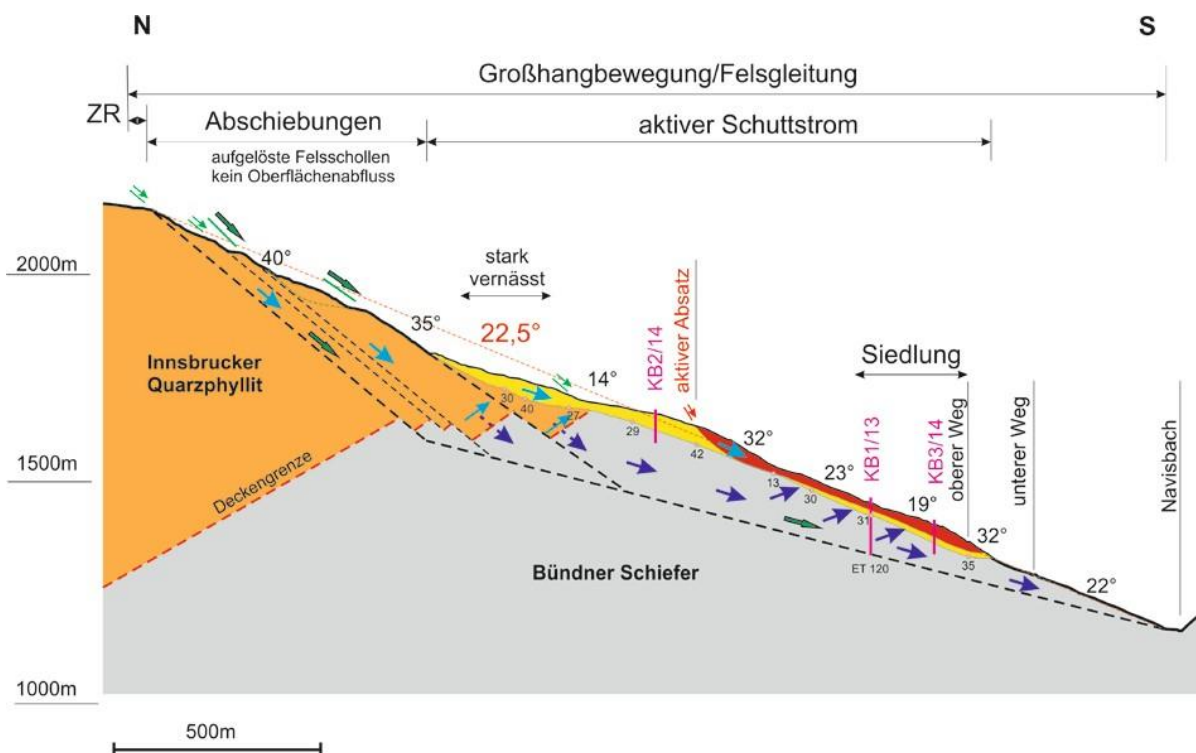


Abb. 53: Schematisches Profil durch die Großhangbewegung Misljoch-Kerschbaumsiedlung-Navisbach (Sausgruber 2015)

Die Monitoring Systeme wurden im Laufe des ersten LAMOND-Projektjahres installiert und umfassen neben den 2 geoelektrischen Monitoring Profilen, diverse Bodensensoren (Temperatur, Feuchte, el. Leitfähigkeit) und einen Niederschlagsmesser. Des Weiteren stehen Verschiebungsdaten eines automatischen Inklinometers (DMS-System) zur Verfügung, der von der WLV betrieben wird. Zu beachten ist, dass die entsprechende Bohrung mindestens 200 m vom geoelektrischen Monitoring Profil entfernt ist, sodass die direkte Gegenüberstellung der Daten und die daraus abgeleiteten Interpretationen mit einer gewissen Vorsicht erfolgen sollten.

Das geoelektrische Monitoring System verfügt an dieser Lokation über einen Anschluss an das lokale Stromnetz, womit die notwendigen Wartungsaktionen hinsichtlich Energieversorgung (Methanol-Kanister-Tausch bei Betrieb einer Brennstoffzelle) wegfallen. Dennoch war das System im Laufe des LAMOND-Projektes nicht ganz wartungsfrei, da immer wieder Probleme in Zusammenhang mit starken Sommergewittern in dieser gebirgigen Region aufgetreten sind. Einerseits war diesbezüglich die Stromversorgung an sich betroffen, aber auch elektronische Bauteile des Messsystems, die in diesem Zusammenhang Schaden genommen haben. Da vor allem die Problematik mit dem Ausfall der Stromversorgung schon im ersten Projektjahr einige Male aufgetreten ist, musste eine Lösung für einen wartungsärmeren Betrieb des Systems gefunden werden. Zu diesem Zweck wurde ein an der GBA verfügbares USV-System (unterbrechungsfreie Stromversorgung) installiert, das sowohl auftretenden Überspannungen als auch kurzfristigen Stromausfällen entgegenwirken sollte. Nach dieser Aufrüstung konnte eine klare Abnahme der gewitterbedingten Ausfälle beobachtet werden. Allerdings betrifft dies nicht Beschädigungen des Monitoring Systems, die durch gewitterbedingte elektrische Überspannungen, die über die Messkabel (direkter Kontakt zum Untergrund) in das System eindringen. Diese Probleme machten in dieser gebirgigen Region leider immer wiederkehrende Wartungseinsätze praktisch während der gesamten Projektlaufzeit notwendig.

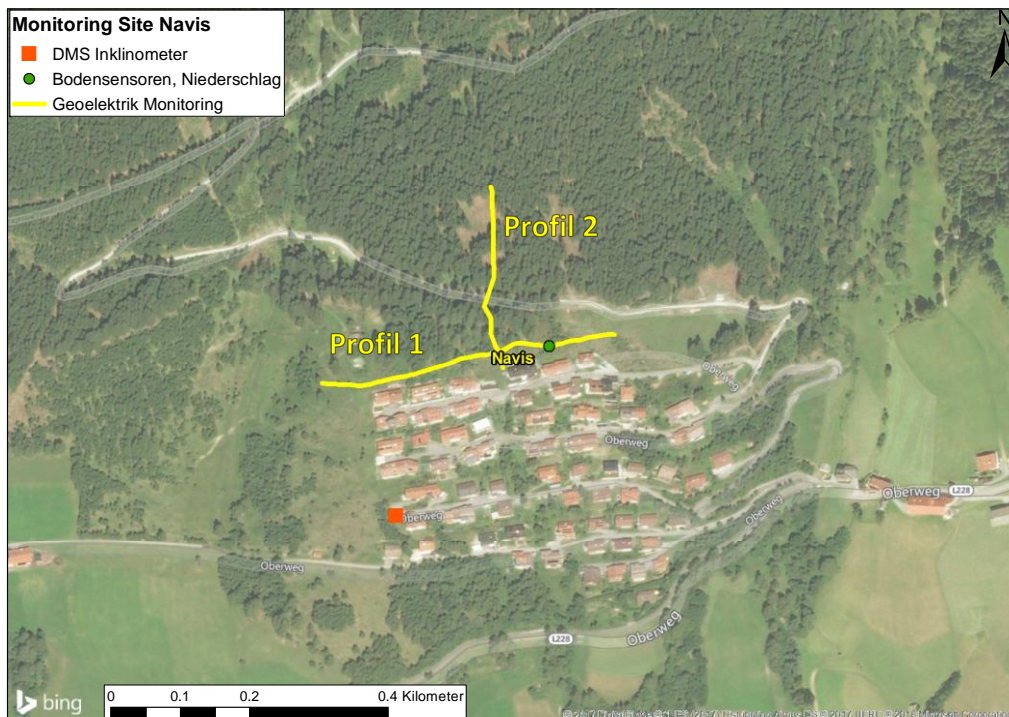


Abb. 54: Detaillierte Lage der Monitoring Systeme im Bereich der Kerschbaumsiedlung

Abb. 54 zeigt einen detaillierten Lageplan der im Rahmen vom LAMOND-Projekt betriebenen Monitoring Systeme.

Der Anfang 2015 seitens der WLV installierte automatische Inklinometer (DMS) besteht lediglich aus 4 Modulen, verfügt aber über eine Stahlseilverlängerung. Diese ermöglicht die optimale Installation der Module im Tiefenbereich des Rutschhorizontes – in diesem Fall in einer Tiefe von 35-39 m unter GOK. Die Daten werden seit Juli 2017 im Monitoring Zentrum der GBA zentral abgerufen und ausgewertet. Man sieht anhand der Daten in Abb. 55, dass die Bewegung vom Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016 sowie April 2017 bis Jänner 2018 von 8.5 mm auf 2 mm zurückgegangen ist. In Anbetracht der durchaus vergleichbaren Niederschlagsraten in den besagten Zeiträumen ist davon auszugehen, dass diese Reduktion der Bewegungsrate auf die umfassenden Sanierungsmaßnahmen zurückzuführen ist. In Abb. 56 sind die verfügbaren Monitoring Daten für diese Station als Zeitreihe dargestellt. In beiden Zeitreihen ist deutlich zu sehen, dass es immer wieder zu Unterbrechungen im Betrieb des geoelektrischen Monitoring Systems gekommen ist, wodurch kein wirklich kontinuierlicher Datensatz verfügbar ist. Generell sind die üblichen jahreszeitlichen Schwankungen in den diversen Monitoring Daten zu erkennen (Bodentemperatur, spezifischer elektrischer Widerstand der ausgewählten, oberflächennahen Messpunkte). Bei genauer Betrachtung ist ein deutlicher Einfluss von Niederschlagsereignissen auf die geoelektrischen Daten auszumachen, der allerdings zwischen den verfügbaren Monitoring Perioden (auch unterschiedliche Jahreszeiten) bezüglich Amplitude relativ stark schwankt. Diese starken Unterschiede müssen generell mit den entsprechenden Vorbedingungen des Untergrundes zu tun haben – dies zeigt sich auch in der späteren Detailbetrachtung anhand der 4D-Inversionsergebnisse.

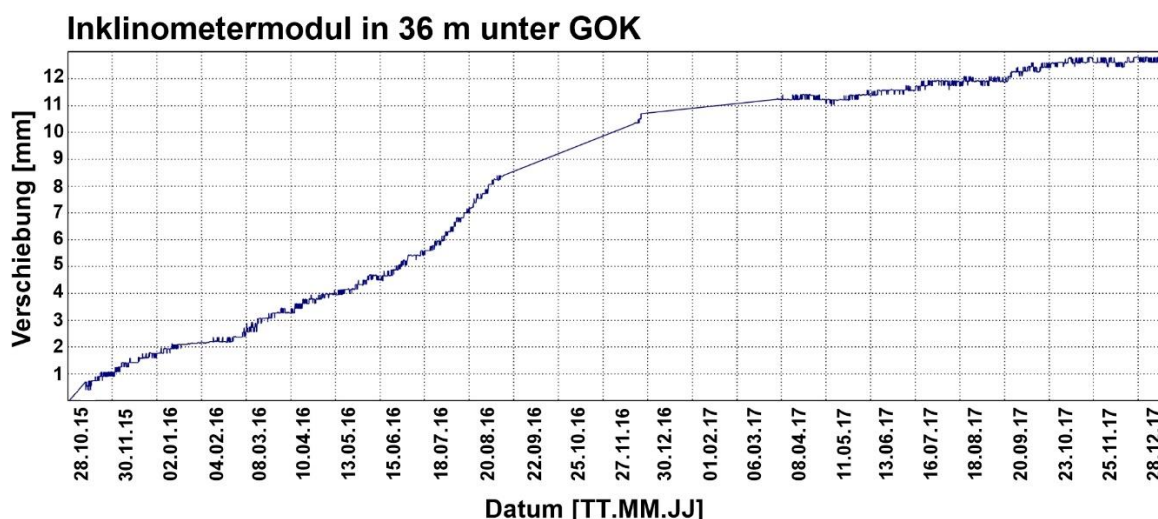


Abb. 55: Zeitlicher Verlauf der Verschiebung am Inklinometermodul in 36 m unter GOK

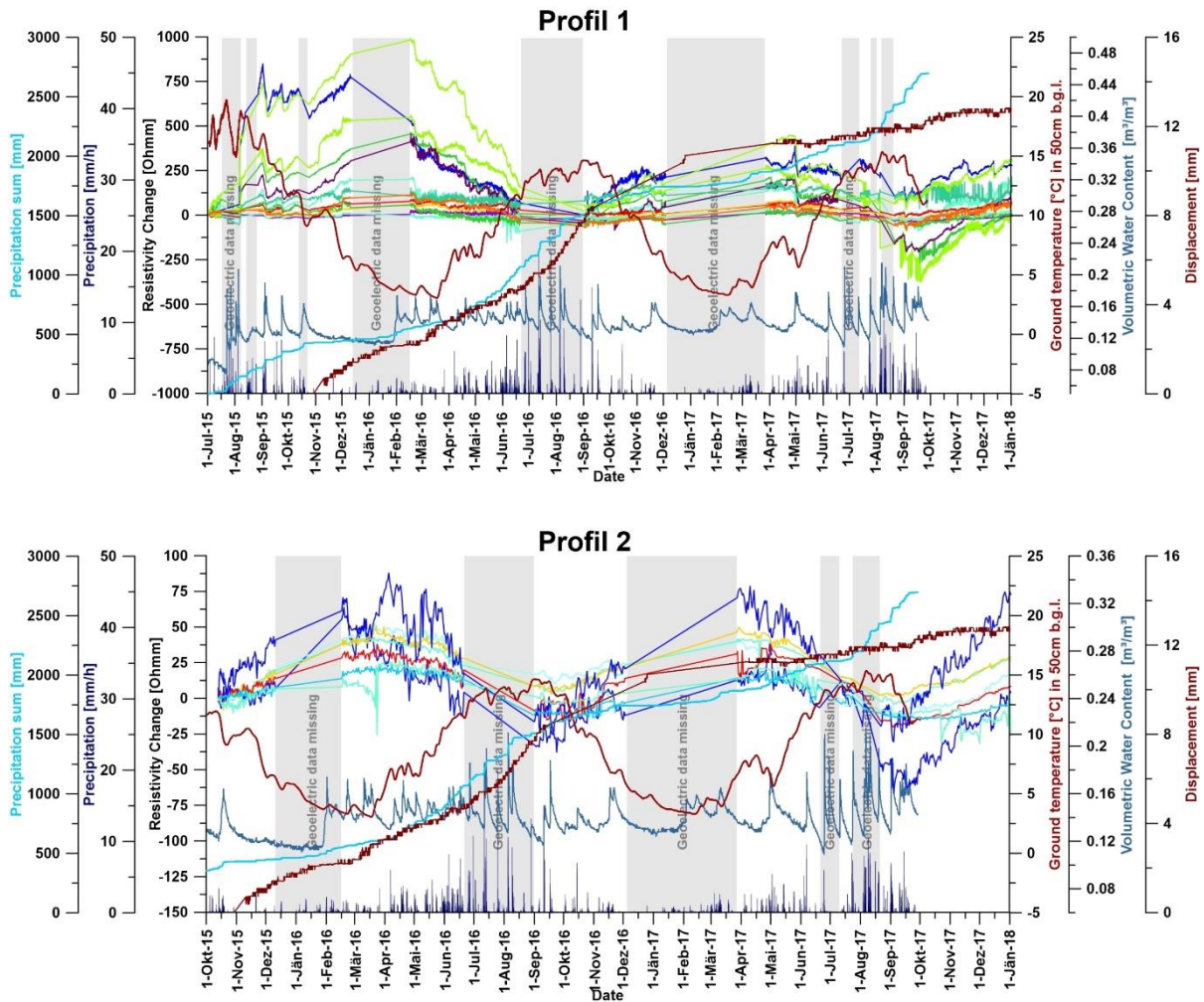


Abb. 56: Zeitreihe der verschiedenen Monitoring Daten (ausgewählte, oberflächennahe Messpunkte der geoelektrischen Monitoring Profile 1 (oben) und 2 (unten), Niederschlag (täglich, kumulativ), Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Verschiebung des Inklinometermoduls am Rutschhorizont) für den Zeitraum des LAMOND-Projektes (die einzelne Kurvenzuordnung erfolgt über die Farbgebung der Achsenbeschriftung, Ausnahme bilden hier die geoelektrischen Messpunkte, die verschiedene Farben aber eine geringere Linienstärke haben (Achsenbeschriftung-schwarz))

Profil 1

Ein repräsentatives Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes für das Monitoring Profil 1 ist in Abb. 57 dargestellt.

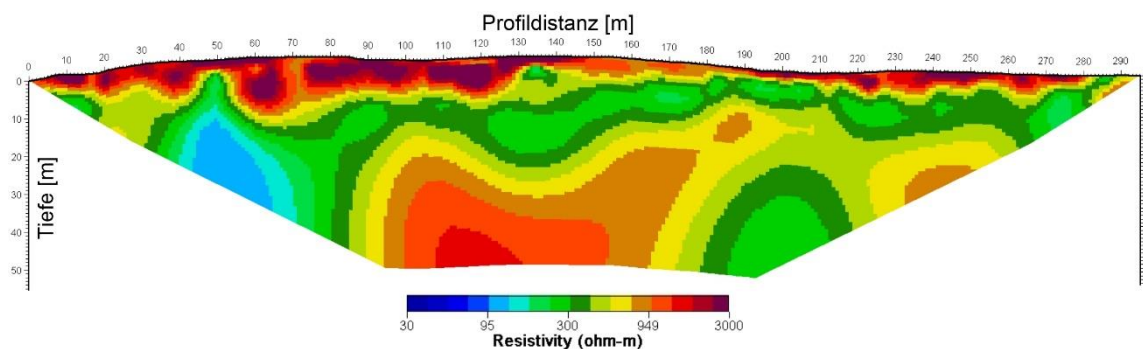


Abb. 57: Repräsentatives Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes basierend auf Daten des geoelektrischen Monitoring Profils 1

Im Ergebnis zeichnet sich eine recht deutliche Oberflächenschicht mit höheren spezifischen elektrischen Widerstand ab, die sowohl eine unterschiedliche Mächtigkeit (1 - 10 m) als auch eine unterschiedliche Ausprägung (ca. 700 - 3000 Ohmm) aufweist. Darunter folgt ein Bereich mit etwas niedrigeren spezifischen elektrischen Widerstand, der in einer Tiefe von etwa 30 m unter GOK wieder tendenziell ansteigt und gleichzeitig eine starke Heterogenität zeigt. Diese macht sich vor allem in der deutlichen Anomalie mit geringen Werten im Bereich von Profilmeter 50 bemerkbar. Als einzige Erklärung für diese starke Heterogenität kommen Unterschiede sowohl in der Zusammensetzung des Materials hinsichtlich Block- bzw. Korngrößen (ev. tektonisch beanspruchter Bereich) als auch im Feuchtegehalt in Frage. Interessant ist ob bzw. in welcher Form in diesem Bereich zeitliche Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes auftreten, da diese ausschließlich von der Änderung der Wassersättigung herrühren können.

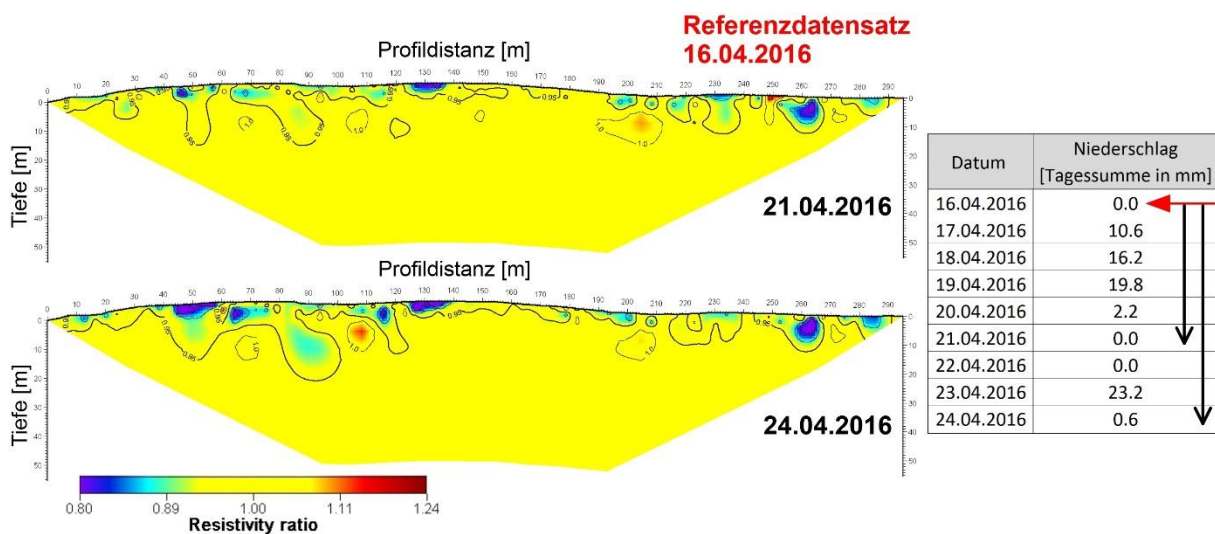


Abb. 58: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz (vor dem Niederschlag) vom 16.04.2016 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdatsätze (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzendarstellung – schwarze Pfeile)

In Abb. 58 soll der Einfluss eines Niederschlagsereignisses verdeutlicht werden. In diesem Beispiel zeigt sich, dass die Änderungen mitunter nicht nur auf den oberflächennahen Bereich beschränkt sind, sondern auch innerhalb relativ kurzer Zeit Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes in größeren Tiefen (bis zu 15 m unter GOK) auftreten können. Auf Basis dieses Ergebnisses ist anzunehmen, dass in manchen Bereichen eine bevorzugte Wasserwegigkeit vorhanden sein muss, da ansonsten innerhalb weniger Tage (und im Zuge eines moderaten Niederschlagsereignisses) nicht diese Tiefenbereiche durch Infiltration zu erreichen wären. Generell bleibt im gegebenen Beispiel der Tiefenbereich des Rutschhorizontes (20-30m unter GOK) aber unbeeinflusst von der Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes, der mit einer nennenswerten Änderung der Wassersättigung in Verbindung zu bringen wäre.

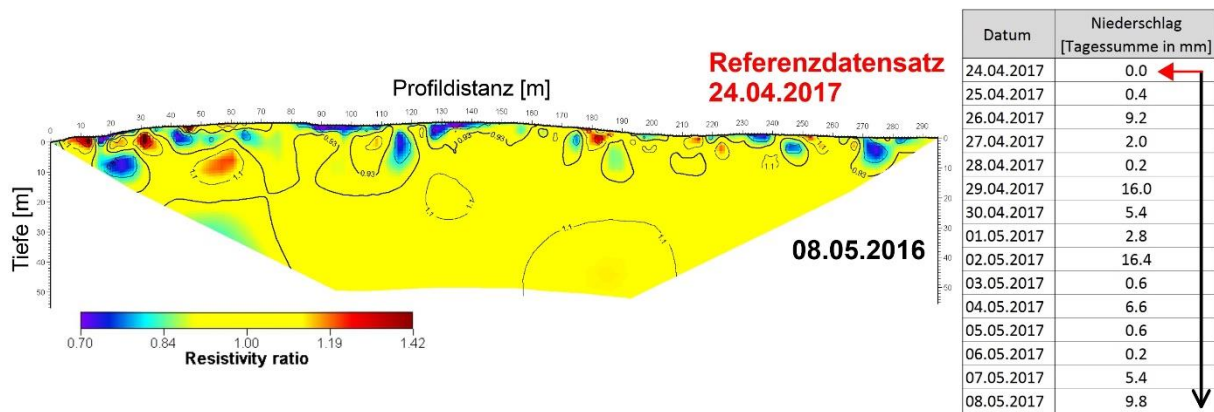


Abb. 59: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz (vor dem Niederschlag) vom 24.04.2017 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdatsätze (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzendarstellung – schwarze Pfeile)

Das Beispiel in Abb. 59 bezieht sich auf einen Zeitraum im April und Mai 2017, der von der Niederschlagssumme durchaus mit dem Zeitraum aus Abb. 58 zu vergleichen ist. Des Weiteren sind die beiden Beispiele etwa im gleichen jahreszeitlichen Bereich angesiedelt, sodass grundsätzlich ähnliche Vorbedingungen des Untergrundes gegeben sein sollten. Bei genauer Betrachtung der Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes in Abb. 59 (zu beachten ist auch der leicht veränderte Wertebereich der Farbskala zu Abb. 58) ist zu erkennen, dass zwar generell eine Abnahme infolge des Niederschlages überwiegt (Infiltration), allerdings sind auch einige Bereiche vorhanden die eine recht signifikante Zunahme zeigen. Dafür gibt es eigentlich keine schlüssige Erklärung, es kann sich lediglich um Inversionsartefakte handeln, die eventuell ihren Ursprung in einigen wenigen fehlerbehafteten Messpunkten haben. Das Beispiel zeigt also, dass es selbst bei ausgeklügelter Datenfilterung und keinerlei Anzeichen auf ein technisches Problem des Systems, schwierig ist, zeitliche Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes schlüssig zu interpretieren. Daher ist es einmal mehr essentiell, dass der Beobachtungszeitraum an einer Monitoring Lokation so lang wie möglich ist, damit zumindest anhand von Vergleichen vieler Ergebnisse (im Zuge von Niederschlagsereignissen) eine gewisse Verifikation der Interpretation erfolgen kann.

Profil 2

Das zweite geoelektrische Monitoring Profil wurde aufgrund der laufenden Sanierungsarbeiten erst im Oktober 2015 installiert (4 Monate nach Profil 1). Ein repräsentatives Model des spezifischen elektrischen Widerstandes für Profil 2 ist in Abb. 60 dargestellt.

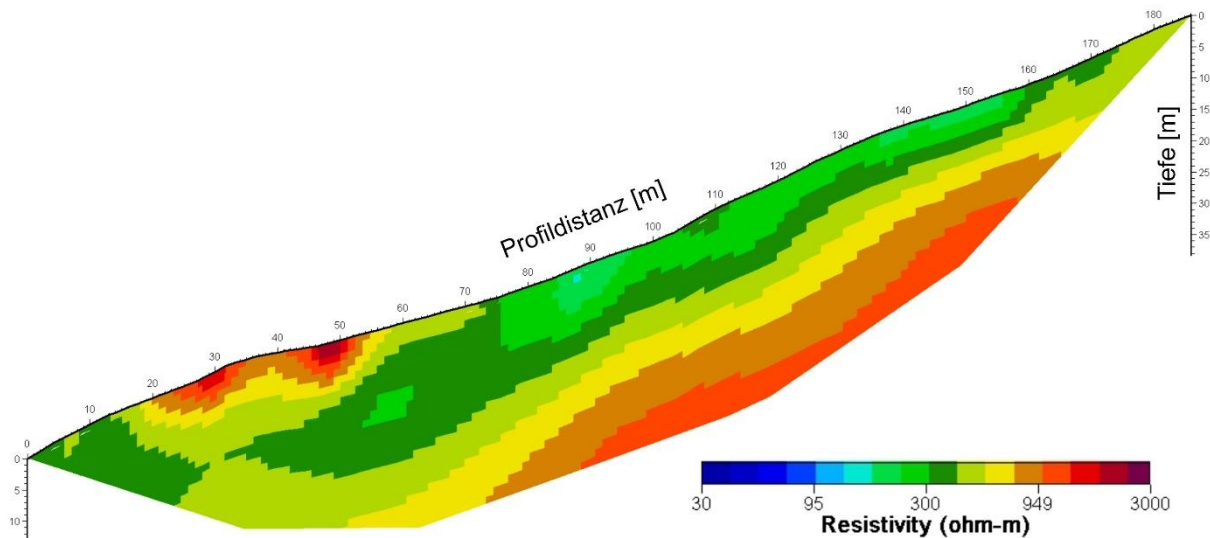


Abb. 60: Repräsentatives Model des spezifischen elektrischen Widerstandes basierend auf Daten des geoelektrischen Monitoring Profils 2

Der Schnittpunkt der beiden Profile liegt bei Profil 1 bei Profilmeter 178 und bei Profil 2 bei Profilmeter 20. An dieser Stelle hat das Profil 2 noch nicht die volle Eindringtiefe erreicht, womit nur ein Vergleich des oberflächennahen Bereichs möglich ist. Generell stimmen die Widerstandsbereiche am Schnittpunkt sehr gut überein. Im ersten Drittel des Profils zeigt sich auf der Oberfläche ein kleinräumiger Bereich mit hohem spezifischen elektrischen Widerstand, der auf eher lockeres und grobblockiges Material hindeutet. Darunter bzw. am restlichen Profil bereits an der Oberfläche wird ein spezifischer elektrischer Widerstand von rund 300 Ohmm beobachtet. Darunter (ab einer Tiefe zwischen 5 und 15 m unter GOK) nimmt der Widerstand wieder deutlich zu. Generell ist diese Widerstandsstruktur des Untergrundes bis auf das teilweise fehlen der hochohmigen Oberflächenschicht sehr gut mit jener von Profil 1 vergleichbar.

In Abb. 61 ist die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Zuge einer längerfristigen, niederschlagsreichen Periode dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass sich selbst über den relativ langen Zeitraum von nahezu 3 Wochen nur im Bereich der oberflächennahen Anomalie mit hohem spezifischen elektrischen Widerstand eine niederschlagsbedingte Änderung ausbildet. Es ist anzunehmen, dass dieser Bereich, wie vorher beschrieben, durch lockeres, grobblockiges Material gekennzeichnet ist, wodurch natürlich ein verstärktes Potenzial für die Infiltration von Oberflächenwasser besteht. Vom zeitlichen Verlauf der Änderung ist ganz klar zu sehen, dass sich diese mit der Zeit und mit wiederkehrenden Niederschlägen in hangabwärts gerichteter Richtung ausdehnt. Bezüglich Tiefenausdehnung der Infiltration ist der Übergang zum Untergrundbereich mit geringeren spezifischen elektrischen Widerstand (max. 10 m unter GOK) ganz klar als Grenze zu sehen. Also kann auch bei diesem Profil im Zuge eines derartigen Niederschlagsereignisses gefolgert werden, dass keine signifikante Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes (Änderung der Wassersättigung) in Tiefenbereichen des Rutschhorizontes erfolgt.

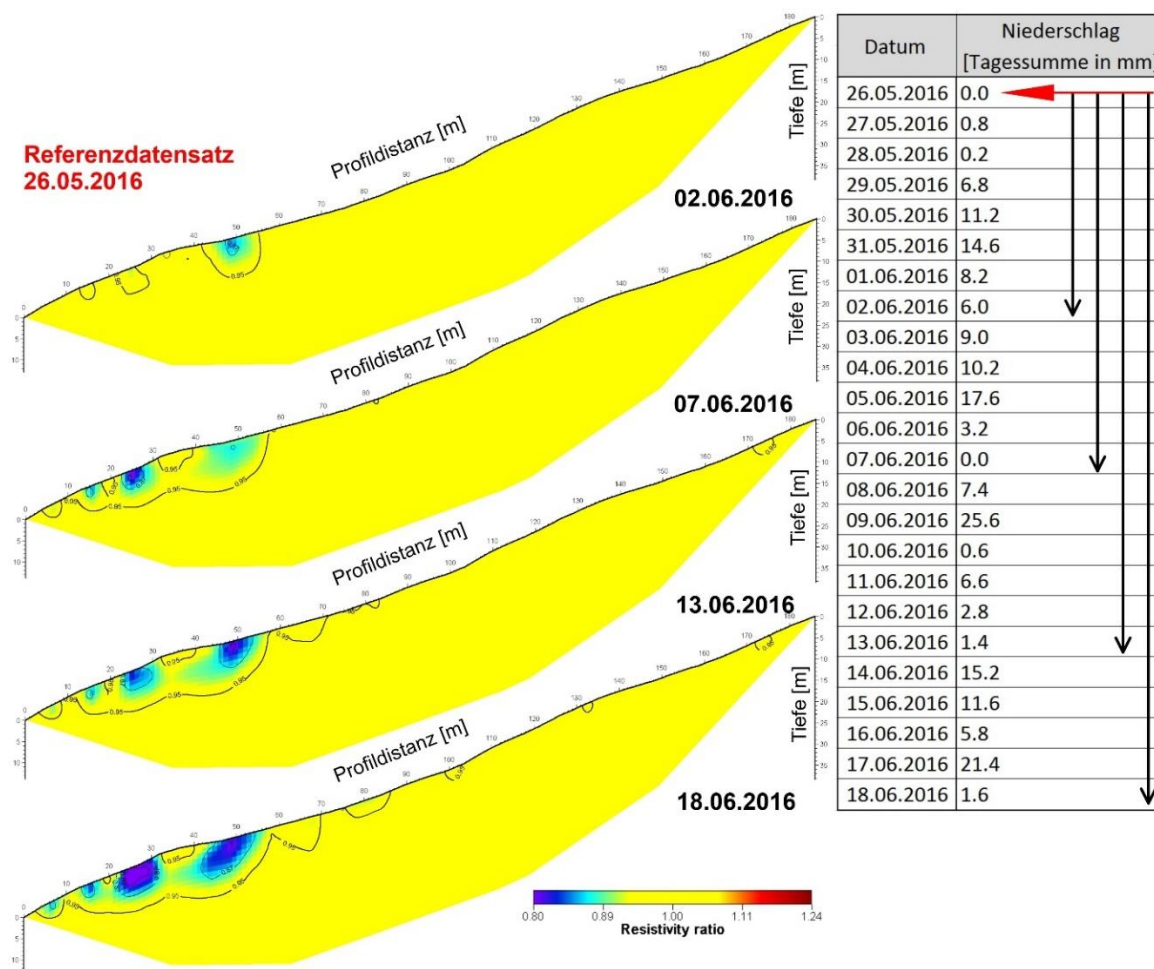


Abb. 61: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz (vor dem Niederschlag) vom 26.05.2016 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdarstellungen (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzdarstellung – schwarze Pfeile)

In Abb. 62 ist ein Beispiel für Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes vom Zeitraum 22.05. bis 12.06.2017 dargestellt. Bezüglich Niederschlagssumme sind die beiden Beispiele (Abb. 61 und Abb. 62) praktisch ident, allerdings zeigt sich ein deutlich anderes Verhalten hinsichtlich der Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes. In diesem Fall tritt die Änderung (vor allem für die Datensätze vom 07. und 12.06.) auch in anderen Bereichen des geoelektrischen Monitoring Profils auf. Die Amplitude ist zwar wesentlich geringer, allerdings ist vor allem im zentralen Bereich des Profils doch ein größerer, oberflächennaher Bereich mit einer signifikanten Änderung vorhanden. Es ist unklar wie dieses veränderte Verhalten (zwischen 2016 und 2017) zu erklären ist, es kann angenommen werden, dass die Vorbedingungen des Untergrundes eine Rolle spielen. Allerdings sind die beiden Zeiträume sowohl jahreszeitlich als auch bezüglich vorangegangener Niederschläge vergleichbar, was dieser Annahme eher widerspricht. Der einzige Unterschied, der eventuell geltend gemacht werden kann, ist der etwas unterschiedliche Wassergehalt des Untergrundes an der Lokation der Bodensensoren (siehe Abb. 56) zu den beiden Zeitpunkten (Anfang Juni 2016 und 2017). Im Juni 2017 scheint der oberflächennahe Untergrundbereich generell eine etwas geringere Bodenfeuchte aufzuweisen, wodurch dann diese flächendeckendere Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstandes (geringe Amplitude) entlang des Profils

im Zuge des Niederschlagsereignisses zu erklären wäre. Offen bleibt allerdings warum im Bereich zwischen Profilmeter 10 und 55 keine massivere Änderung wie sie beim Beispiel in Abb. 61 beobachtet wurde auftritt. Unabhängig vom unterschiedlichen Verhalten ist aber auch in diesem Beispiel die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes auf die oberflächennahe Schicht begrenzt, womit kein Einfluss des Niederschlagsereignisse auf die Tiefenbereiche des Rutschhorizontes anzunehmen ist.

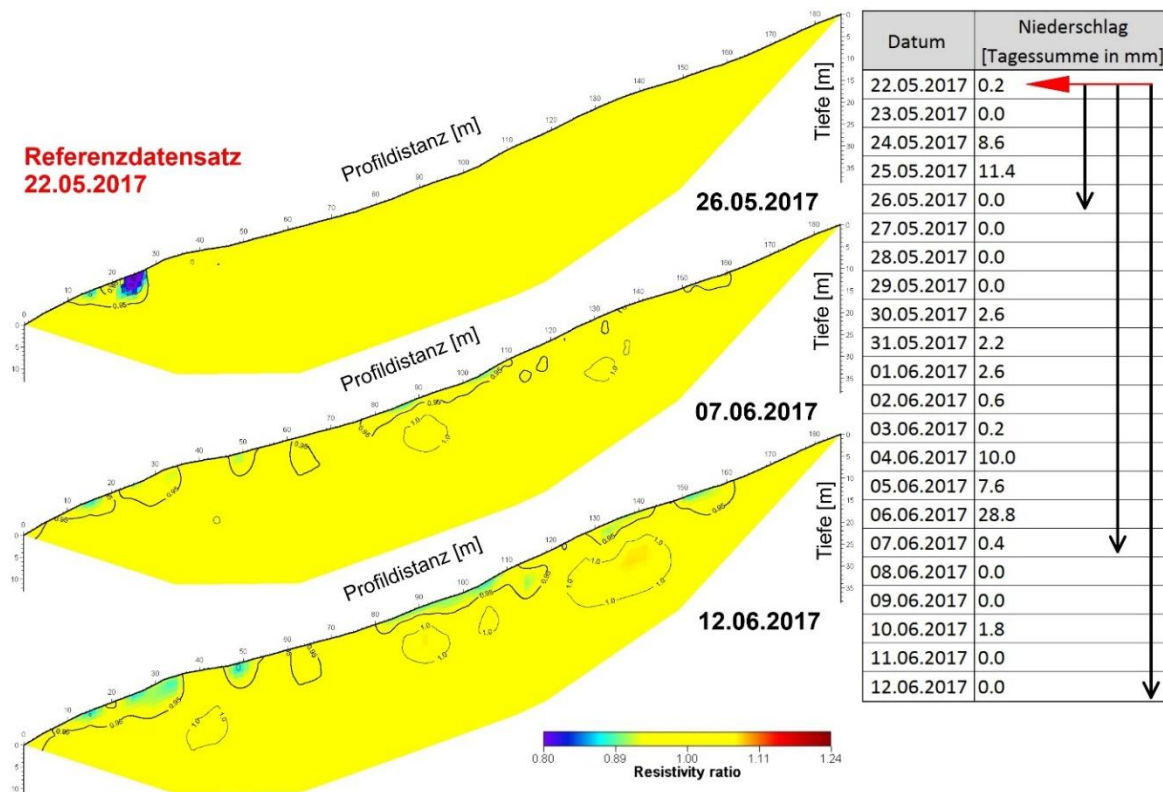


Abb. 62: Ergebnis der 4D-Inversion - Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt als Widerstandsverhältnis, als Referenz dient der Datensatz (vor dem Niederschlag) vom 22.05.2017 (links), Tabelle mit dem Niederschlag (Tagessumme) für den entsprechenden Zeitraum mit Hinweis auf den Zeitpunkt der Vergleichsdarstellungen (Referenzdatensatz – roter Pfeil, jeweilige Differenzdarstellung – schwarze Pfeile)

Durch die vielen technisch bedingten Ausfälle des geoelektrischen Monitoring Systems an dieser Lokation wird auf jeden Fall eine Fortsetzung des Betriebes über den Projektzeitraum des LAMOND-Projektes angestrebt (im Rahmen der finanziellen und organisatorischen Möglichkeiten flankierender Projekte), um einen längeren, kontinuierlicheren Datensatz zur Klärung noch offener Fragen zur Verfügung zu haben. Abschließend muss gesagt werden, dass in den bisher vorliegenden geoelektrischen Monitoring Daten keinerlei Anzeichen darauf hinweisen, dass die Inbetriebnahme der Entwässerungsmaßnahmen (Vollbetrieb ab November 2015) in irgendeiner Form zu erkennen sein könnte. Dies stellt deren Effizienz natürlich in keiner Weise in Frage, es zeigt lediglich, dass keine Auswirkung auf den spezifischen elektrischen Widerstand des Untergrundes vorhanden ist. Zusätzlich muss noch angemerkt werden, dass für einen aussagekräftigen Nachweis des Einflusses der Entwässerungsmaßnahmen der Zeitraum des geoelektrischen Monitoring Betriebes vor deren Inbetriebnahme leider auch etwas zu kurz erscheint (wenige, ausfallsbehaftete Monate).

2.4 Laufende Datenauswertung (Anwendung, Weiterentwicklung)

Für die große Datenmenge, die die in Betrieb stehenden Monitoring Stationen liefern, wurde bereits im vorangegangenen Projekt (FWF-TEMPEL (TRP 175-N21)) ein Workflow entwickelt, der die weitere Handhabung der Daten erleichtern soll. Diesbezüglich sind eigentlich ausschließlich die Daten des geoelektrischen Monitoring Systems gemeint, da sowohl deren Umfang als auch die Komplexität der notwendigen Auswerteschritte deutlich aufwendiger ist, als bei den Daten der zusätzlichen Monitoring Systeme (Inklinometer, Bodensensoren (Wassergehalt, Temperatur,...), Foto Monitoring,...).

2.4.1 Zusätzliche Monitoring Systeme

Die Daten der zusätzlichen Monitoring Systeme werden, sofern keine Onlineübertragung besteht, zu bestimmten Zeiten vor Ort ausgelesen und entsprechend in die vorhandene Datenstruktur eingebettet. Je nach Datensatz sind neben der notwendigen manuellen Kontrolle auf Plausibilität auch minimale Bearbeitungsschritte, die hauptsächlich bestimmte Umformatierungen betreffen, durchzuführen. Zusätzlich wurden mit entsprechender Darstellungssoftware standardisierte Prozesse entwickelt, die von den Rohdaten zur gewünschten Darstellung der jeweiligen Monitoring Daten führt.

2.4.2 Geoelektrisches Monitoring System-Geomon4D

Im Vergleich zu den Daten der zusätzlichen Monitoring Systeme muss beim geoelektrischen Monitoring ein wesentlich größerer Aufwand betrieben werden, um zu interpretierbaren Ergebnissen zu kommen. Die Daten des geoelektrischen Monitoring Systems (Geomon4D), werden täglich per E-Mail verschickt und durchlaufen dann zum Teil automatisch unterschiedliche Auswerteprozesse, deren Ziel von der schnellen Qualitätskontrolle bis zum fertigen Ergebnis der 4D-Inversion reicht.

Ein Auswerteprozess, der vor allem für die Qualitätskontrolle herangezogen wird, umfasst die Darstellung aller gemessenen Messpunkte in einem Grid und die automatische Dateninversion mit einer Standardsoftware (Res2Dinv). Das Grid liefert einen schnellen Überblick über die Dynamik der Messdaten und ermöglicht eine grobe, visuelle Qualitätsbewertung der geoelektrischen Daten. Für die Grid-Darstellung wird jeder aktuell gemessene Datenpunkte (in Summe bei einer Standardauslage 4300 Punkte) mit dem Medianwert der gesamten Zeitreihe dieses Messpunktes verglichen. Der schlussendliche Wert für die Grid-Darstellung ist eine relative Änderung des jeweiligen Messwertes zu diesem Medianwert. Da realistische Änderungen im Untergrund immer einen kontinuierlichen Verlauf zeigen, lassen sich mit dieser Methode vor allem abrupte Änderungen, die durch technische Probleme oder andere massive äußere Einflüsse (Beschädigung des Kabels in einem Profilbereich,...) hervorgerufen werden, erkennen. Ein exemplarisches Beispiel für eine derartige Grid-Darstellung ist in Abb. 63 gegeben. Neben der jahreszeitlichen Änderung der geoelektrischen Messwerte sind zumindest an einem Großteil der Messpunkte auch klare Änderungen im Zuge von Niederschlagsereignissen zu erkennen. Deutlich zu sehen sind auch die Messpunkte mit besonders schlechter Datenqualität (zum Teil schwarze Linien), die aufgrund unterschiedlicher Gründe für eine Interpretation keinen ausreichend konstanten Messwert liefern. Auf diese Art können mit einem Blick Probleme des Monitoring Systems erkannt werden und sogar einzelnen Komponenten (z.B. Geräteplatinen) zugeordnet werden.

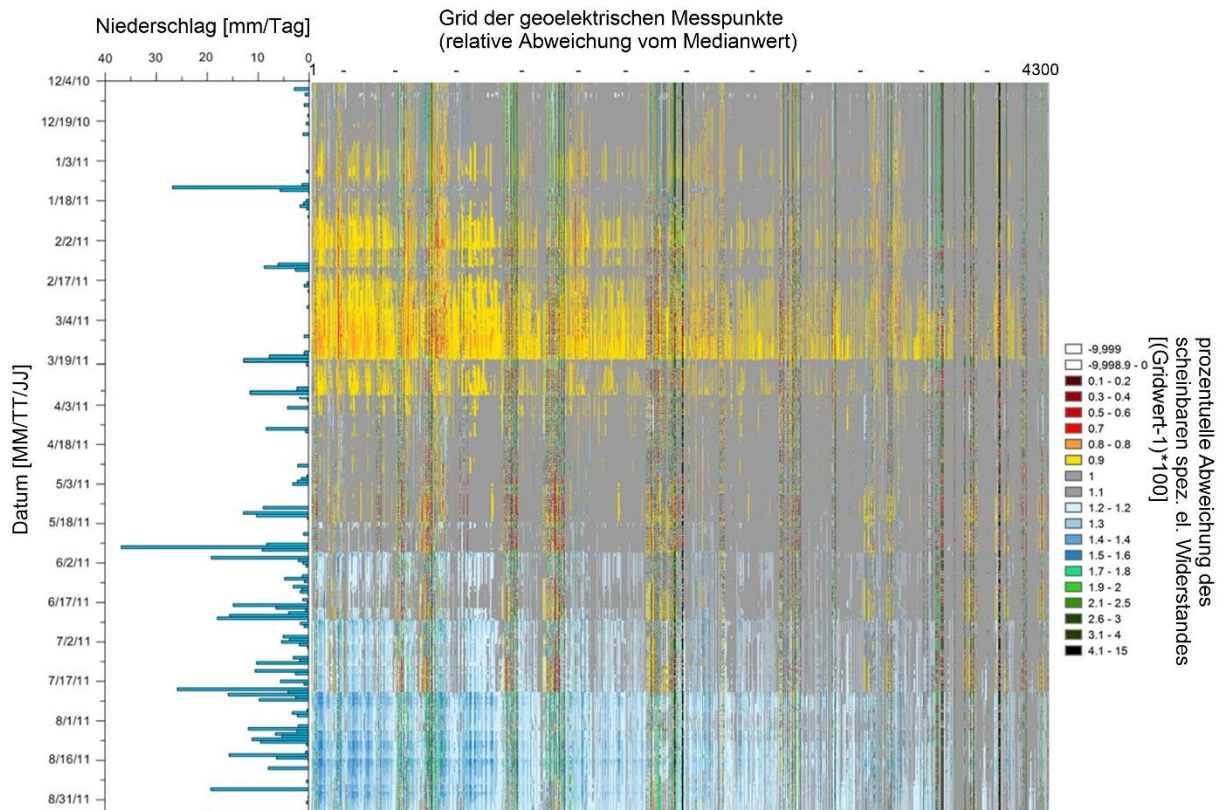


Abb. 63: Exemplarische Grid-Darstellung geoelektrischer Monitoring Daten inklusive Niederschlagsdaten für einen entsprechenden Zeitraum

Ein weiterer, etwas aufwendigerer Auswerteprozess umfasst die automatisierte Dateninversion mit der Standardsoftware Res2Dinv, der zu jedem Datensatz ein Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes und einen Fehlerwert („rms-error“) liefert. Die verschiedenen Schritte des automatisierten Auswerteprozesses (Datenformatierung, Filterung,...) erfolgen mittels Script-Programmen in der frei zugänglichen Software „Octave“. Der erhaltene Fehlerwert bei der Dateninversion („rms-error“-Wert) ist ein relativ zuverlässiges Maß für die Datenqualität und liefert schnell den Hinweis ob bzw. bei welchen Datensätzen entsprechende Datenfilterung vor dem eigentlichen Inversionsprozess notwendig ist. Im Zuge der Auswertung wird eine Standard-Datenfilterung (individuell für jede Monitoring Site definiert) durchgeführt, woraufhin die entsprechenden Fehlerwerte der einzelnen Datensätze analysiert werden. Bei zu hohen Fehlerwerten werden die jeweiligen Datensätze einer strengeren Filterung unterzogen und erneut der Dateninversion zugeführt. Dieser Schritt wird mitunter wiederholt bis ein zufriedenstellender Fehlerwert, bei ausreichender Anzahl der verfügbaren Messpunkte (etwa 70 % der ursprünglichen Messpunktanzahl), erreicht wird. Nur in wenigen Ausnahmefällen müssen einzelne Datensätze aus dem Prozess genommen werden, da kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden kann (betrifft deutlich weniger als 1% der Datensätze). Die hier berechneten Modelle des spezifischen elektrischen Widerstandes werden nach finaler Überprüfung in einem entsprechenden Ordnersystem abgelegt und können jederzeit für eine Interpretation herangezogen werden. Neben den Ergebnisdateien der Inversionssoftware Res2Dinv, werden auf automatischem Weg auch Bilddateien aller Ergebnisse produziert, sodass ohne viel Aufwand einzelne Ergebnisse grafisch miteinander verglichen werden können. In Summe führt dieser gesamte Auswerteprozess mit einem Mausklick von den per E-Mail ankommenden

Rohdaten zu fertigen Ergebnisbildern jedes einzelnen Datensatzes der geoelektrischen Monitoring Daten.

Die zuvor beschriebene automatische Dateninversion liefert lediglich Einzelauswertungen der zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessenen Datensätze – es besteht im Grunde kein zeitlicher Zusammenhang der Ergebnisse. Für eine detaillierte Betrachtung und Interpretation der zeitlichen Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes ist der Vergleich der Ergebnisse der Einzelauswertung nicht ausreichend, da in diesem Fall vor allem Inversionsartefakte, die auf kleinste Messwertänderungen zurückzuführen sind, interpretiert werden. Für die Betrachtung zeitliche Änderungen kommt eine eigens dafür entwickelte 4D-Inversionssoftware zum Einsatz. Diese Software wurde in enger Kooperation mit dem koreanischen Experten auf diesem Gebiet Dr. Jung-Ho Kim (KIGAM) im Rahmen des TEMPEL Projekts entwickelt (siehe dazu Kim et al. 2009, 2013 und 2014). Einfach gesagt berücksichtigt diese Methode die zeitliche Komponente der geoelektrischen Monitoring Daten als zusätzliche Dimension im Inversionsprozess, sodass ein Paket an Datensätzen (ein bestimmter Zeitraum) in einem Rechenschritt gemeinsam invertiert wird – Regularisierung des Inversionsprozesses sowohl im Raum- als auch im Zeitbereich. Auf diese Art lassen sich zeitliche Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes optimal darstellen und die angesprochenen Inversionsartefakte werden dadurch auf ein Minimum reduziert.

Das Hauptproblem dieser Auswertemethode stellt die enorme Rechenleistung dar, die bei der Berechnung größerer Datenpakete notwendig ist. Momentan werden detaillierte Berechnungen ausschließlich für Zeiträume durchgeführt, in denen deutliche Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes zu erwarten sind (auf Basis von Informationen aus den anderen Auswerteprozessen und den zusätzlichen Monitoring Systemen). Dieses grundlegende Problem, dass nicht alle verfügbaren geoelektrischen Monitoring Daten einer Monitoring Site in einem Stück der 4D-Inversion zugeführt werden können (keine ausreichende Rechenleistung verfügbar), konnte trotz intensiver Suche nach alternativen Ansätzen nicht gelöst werden. Die Tatsache, dass nur eine stückweise 4D-Inversion des gesamten Monitoring Zeitraums möglich ist, beinhaltet ein entscheidendes Problem für die gesamtheitliche Interpretation der Daten. Und zwar können die einzelnen zeitlich begrenzten Datenblöcke (gewisse Anzahl von Datensätzen eines bestimmten Zeitraums), die den separat durchgeführten Inversionsberechnungen entstammen, nur mit Einschränkungen miteinander verglichen werden. Natürlich sind die erhaltenen Modelle des spezifischen elektrischen Widerstandes nahezu identisch, allerdings mittels detaillierter Differenzendarstellung überwiegen, bei einer verschiedene Datenblöcke (separate Inversionsberechnung) übergreifenden Betrachtung, Inversionsartefakte, die keinerlei reale Bedeutung haben und die tatsächlichen Widerstandsänderungen stark maskieren. Auch eine Überlappung der Datenblöcke, in welcher Ausprägung auch immer, führt nicht zum gewünschten Ziel, dass die entsprechenden Ergebnisse untereinander im Detail vergleichbar wären. Hier bleibt leider nur die Möglichkeit, dass im Rahmen der verfügbaren Rechenleistung, entsprechende Datenblöcke (maximal möglicher Datenumfang) dem Inversionsprozess zugeführt werden und nur einzeln interpretiert werden können. Betrachtet man die real zu erwartenden Widerstandsänderungen des Untergrundes, dann wird klar, dass diese Einschränkung sich kaum auf die Interpretation auswirkt, allerdings eine umfangreiche Auswertung der Daten mit wesentlich mehr Aufwand verbunden ist, da unterschiedliche Zeiträume separat zu betrachten sind. Tatsache ist, dass einerseits kurzfristige Änderungen

aufgrund von Infiltrationsprozessen und andererseits langfristige Änderungen, die durch saisonale Temperaturschwankungen verursacht werden, von Interesse sind. Je nachdem welche Zusammenhänge (kurzfristig oder langfristig) für die konkrete Fragestellung wichtig sind, muss der Datenblock (max. Anzahl an Datensätzen) entsprechend zusammengesetzt werden. Bei der Betrachtung langperiodischer Änderungen ist klar, dass eine Ausdünnung der vorhandenen Daten erfolgen muss, was zu einer geringeren Auflösung für kurzfristige Untergrundprozesse in den konkreten Ergebnissen führt. Im Gegensatz dazu wird bei der Betrachtung kurzperiodischer Änderungen, durch das Heranziehen aller verfügbaren Daten für einen entsprechend kurzen Zeitraum, eine maximale zeitliche Auflösung gewährleistet. Bei der 4D-Inversion kann durch eine optimale Kombination dieser beiden gegensätzlichen Herangehensweisen eine umfangreiche und verschränkte Interpretation sowohl von kurzfristigen als auch von langfristigen Änderungen des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes erreicht werden.

Im Laufe des ersten Projektjahrs wurde die bestehende 4D-Inversionsoftware durch ein zusätzliches Modul ergänzt, das vor allem auf eine optimale Datenfilterung im Vorfeld des Inversionsprozesses hinzielt. Dieses zusätzliche Modul macht sich die Besonderheit des an der Geologischen Bundesanstalt entwickelten geoelektrischen Messsystems (Geomon4D) zunutze, dass alle einzelnen Samples eines Messpunktes aufgezeichnet werden. Übliche kommerzielle Systeme liefern lediglich einen einzelnen Wert pro Messpunkt, der sich einfach als Mittelwert aus den gemessenen Samples errechnet. Genau in den Samples an sich, stecken aber wichtige Informationen über die Datenqualität. Da es unmöglich ist die Gesamtheit der aufgezeichneten Samples pro Messung (4300 Messpunkte zu je 600 Samples) ohne großen Aufwand zu versenden, werden vor Ort am Messgerät statistische Kenngrößen zu den einzelnen Messpunkten auf Basis der Samples berechnet. Diese kondensierte Information zur Datenqualität wird dann per E-Mail verschickt und stellt die Grundlage für die entsprechend entwickelten Filteroperationen in dem genannten Softwaremodul dar. Die Filteroptionen sind sehr vielfältig und können separat für jeden verfügbaren Datensatz manuell angepasst und umgesetzt werden. Dies wird allerdings nur in Ausnahmefällen durchgeführt, da bei der enormen Datenmenge, die durch die Monitoring Stationen produziert wird, diese Vorgangsweise jeglichen zeitlichen Rahmen sprengen würde. Stattdessen gibt es ein paar extra für den Monitoring Betrieb adaptierte Filteroperationen, die sich auf die Gesamtheit der Daten einer Monitoring Station mit einer gewählten Einstellung umsetzen lassen. Allerdings muss hier betont werden, dass dieser Auswerteprozess nicht automatisiert ist, sodass nach wie vor sowohl die Filterung als auch die Datenbereitstellung (für einen bestimmten Zeitraum (Datenblock)) für die anschließende 4D-Inversion manuell erfolgt. Im Folgenden werden die verfügbaren Filteroperationen anhand von ein paar exemplarischen Beispielen beschrieben.

Den ersten Schritt der Datenfilterung bildet eine einfache Grenzwertfilterung, die im Zuge des Dateneinlesens in die Software umgesetzt wird. Hierbei ist vor allem entscheidend, dass durch die berechneten statistischen Kenngrößen zu jedem einzelnen Messpunkt eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter für die Filterung verfügbar ist, was natürlich ein optimales Filterergebnis gewährleistet. Abb. 64 zeigt das entsprechende Eingabefenster in dem die unterschiedlichen Grenzwerte für die Filterung eingestellt werden können. Diese Parameter reichen von den direkt gemessenen elektrischen Spannungen („Uf“ und „Ur“) über den eingespeisten elektrischen Strom („Cf“ und „Cr“) bis zu den Standardabweichungen einzelner Parameter. Des Weiteren ist ein Signal-Rauschverhältnis definiert, das die Qualität des einzelnen Messpunktes wiedergibt.

| | Min. | Max. |
|---------------|--------|--------|
| - Uf | -50 | 50 |
| - Ur | -50 | 50 |
| - Uf-Ur | 0.0001 | 1000 |
| - Cf | 0.0005 | 50 |
| - Cr | 0.0005 | 50 |
| - Cf-Cr | 0 | 1000 |
| - Resis. | 0.0001 | 100 |
| - SP | -2 | 2 |
| - App. R. | 0.0003 | 1e+006 |
| - S Dev. (R) | 0 | 100 |
| - S/N Ratio | 0.05 | 1e+035 |
| - S Dev. (C) | 0 | 100 |
| - S Dev. (Uf) | 0 | 200 |
| - S Dev. (Ur) | 0 | 200 |
| - Slope (Uf) | 0 | 1000 |
| - Slope (Ur) | -1000 | 1000 |

Abb. 64: Parameter für die Grenzwertfilterung

Nach dem Dateneinlesen und der entsprechenden Grenzwertfilterung erfolgt im nächsten Schritt eine Analyse der einzelnen Elektrodenpositionen hinsichtlich Datenqualität. Dies kann anhand der Betrachtung der Standardabweichung des berechneten Widerstandes oder anhand der Steigung der gemessenen elektrischen Spannung erfolgen. Hier wird jeweils der Medianwert des gesamten Datensatzes mit dem Medianwert der Messpunkte jeder einzelnen Elektrode verglichen. Eine entsprechend hohe Abweichung zwischen den Medianwerten kann als Hinweis für eine nicht funktionierende Elektrode gewertet werden. Um nicht zu sensibel auf bestimmte Schwankungen der Datenqualität entlang des Profils zu sein, ist hier standardmäßig als Grenzwert das 5fache vom Gesamtmedianwert eingestellt – dies lässt sich natürlich individuell einstellen und muss hin und wieder (zum Teil je nach genereller Datenqualität (jahreszeitabhängig)) angepasst werden. Diese Filterung erfolgt im Prinzip für jeden gemessenen Datensatz separat ist aber in der Software so implementiert, dass sich die Filterung in einem Zug auf den gesamten Monitoring Datensatz anwenden lässt. Dieser Unterschied in den beiden Teilen ist in Abb. 65 dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung wird das Beispiel der Elektrodenfilterung für einen einzelnen Datensatz gezeigt. Die Auswertung der Elektroden erfolgt separat je nach deren Verwendung beim entsprechenden Messpunkt (Potenzialelektrode 1 oder 2 (entsprechend M oder N) bzw. Stromelektrode 1 oder 2 (entsprechend A oder B)). Die dargestellten Balken entsprechen dem berechneten

Medianwert für die jeweilige Elektrode. Die horizontale schwarze Linie entspricht dem Medianwert des gesamten Datensatzes. Die in Schwarz dargestellten Balken (Elektroden) übertreffen diesen Wert um den definierten Grenzwert und werden damit zur Filterung empfohlen. Der untere Teil von Abb. 65 zeigt im Prinzip lediglich die Darstellung für Potzialelektrode 1 (M), hier allerdings für einen bestimmten Zeitraum eines Monitoring Datensatzes. Die entsprechenden schwarzen Pixel sind einzelne Elektroden, die für den jeweiligen Datensatz (entsprechend der Zeitachse) zu Filtern wären. Die Filterung selber kann in mehreren Schritten erfolgen, da nach deren Anwendung immer eine Neuberechnung der Medianwerte (entsprechend den noch verfügbaren Datenpunkten) erfolgt.

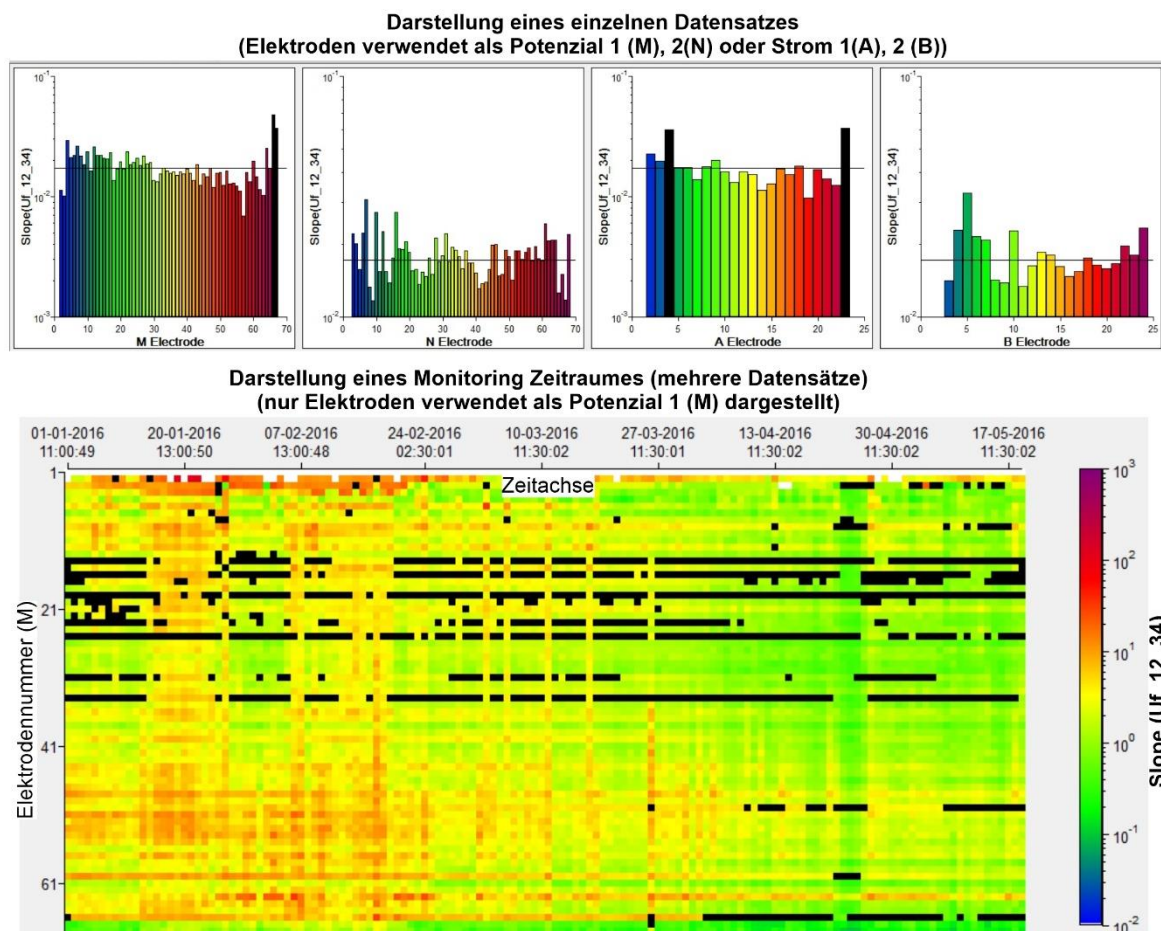


Abb. 65: Darstellung der Elektrodenfilterung für einen einzelnen Datensatz (oben) bzw. für die Potzialelektrode 1 (M) der Datensätze eines entsprechenden Monitoring Zeitraumes (unten) (schwarze Balken (oben) bzw. Pixel (unten) entsprechen den zu filternden Elektroden)

Im nächsten Schritt der Datenfilterung wird der Fokus auf noch immer im Datensatz vorhandene „ungewöhnliche“ Datenpunkte gelegt. Hier erfolgt die endgültige Bestimmung dieser Punkte in einem dreistufigen Verfahren, dass die Häufigkeitsverteilungen des Datensatzes hinsichtlich scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand, des Signal-Rauschverhältnisses und der Standardabweichung des Widerstandes analysiert. Die genaue Vorgehensweise bei der Filterung wird in Abb. 66 dargestellt. Als erstes werden anhand der Häufigkeitsverteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes ungewöhnlich hohe bzw. niedrige Werte (± 2 *Standardabweichung) des Datensatzes als genauer zu betrachtende Datenpunkte definiert. Im nächsten Schritt wird kontrolliert, in welchem

Bereich der Häufigkeitsverteilungen des Signal-Rauschverhältnisses und der Standardabweichung des Widerstandes diese Datenpunkte liegen. Befinden sie sich in diesen Häufigkeitsverteilungen außerhalb der jeweiligen Standardabweichung ($\pm\sigma$) werden diese Datenpunkte aus dem Datensatz herausgefiltert. In diesem letzten Schritt lässt sich das Filterkriterium insofern definieren, dass die zu filternden Datenpunkte nur in jeweils einer dieser Häufigkeitsverteilungen außerhalb der Standardabweichung liegen müssen oder in beiden. Wenn gewünscht, kann auch nur eine Häufigkeitsverteilung (Signal-Rauschverhältnis oder Standardabweichung des Widerstandes) für diese Filterung als Kriterium herangezogen werden. Diese mehrstufige Bewertung gewährleistet ein optimales Filterergebnis. Der Filterprozess kann auch direkt an einem Monitoring Datensatz erfolgen – die jeweiligen Rechenschritte erfolgen für jeden Datensatz separat. Klarerweise ist hierfür bei einem umfangreichen Monitoring Datensatz die erforderliche Rechenleistung nicht zu unterschätzen und es muss eine entsprechende Rechenzeit (die durchaus 10-15 min betragen kann) gerechnet werden.

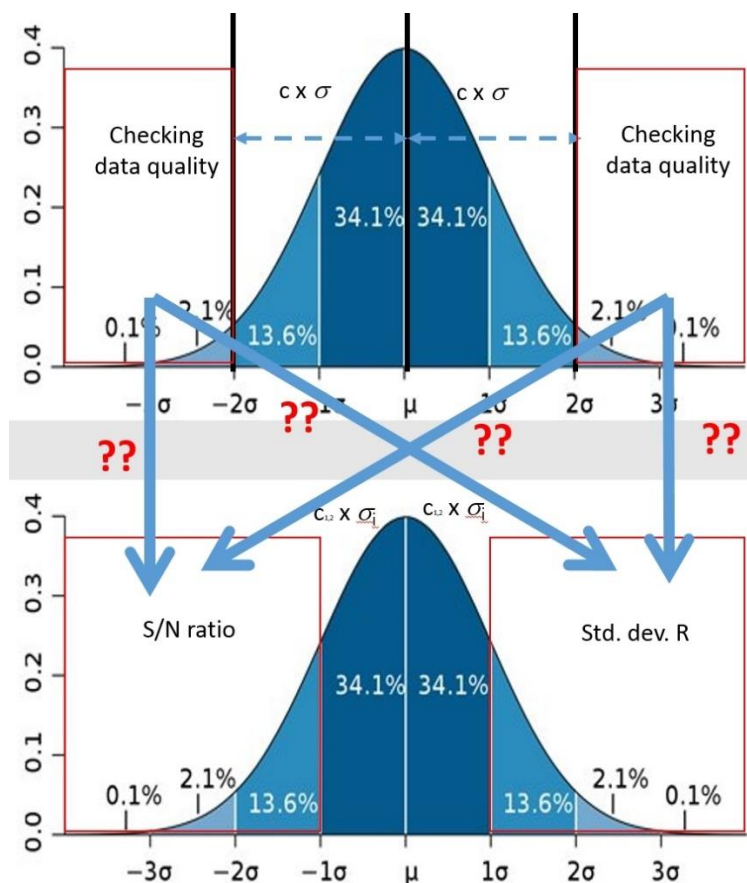


Abb. 66: Schematische Darstellung der Vorgangsweise bei der Filterung ungewöhnlicher Datenpunkte eines Datensatzes; oben: Häufigkeitsverteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes mit dem Hinweis (rot umrandeter Bereich) welche Datenpunkte der genaueren Betrachtung unterzogen werden; unten: Häufigkeitsverteilungen von Signal-Rauschverhältnis (links) und Standardabweichung vom Widerstand (rechts) mit Hinweis auf den Bereich außerhalb der jeweiligen Standardabweichung (rot umrandeter Bereich)

Nach diesen Filterschritten wird abschließend eine Filterung durchgeführt die ausschließlich für die Monitoring Daten konzipiert wurde. Es handelt sich um eine Zeitreihenfilterung, die den zeitlichen Verlauf des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes der einzelnen

Datenpunkte betrachtet und anhand der Kurvenkrümmung und der kurzfristigen Änderung des Wertes mittels klar definierter Kriterien (zu betrachtende Fensterlängen, Grenzwerte für die Filterung) eine Eliminierung der entsprechenden Punkte vornimmt. In Abb. 67 ist ein derartiges Beispiel für nur 5 ausgewählte Datenpunkte exemplarisch dargestellt. Es ist zu beachten, dass bei einem Standarddatensatz 4300 Datenpunkte der Filterung unterzogen werden. Auch diese Art der Filterung kann in mehreren Schritten erfolgen, wobei immer eine der neuen Datenlage entsprechende Berechnung erfolgt.

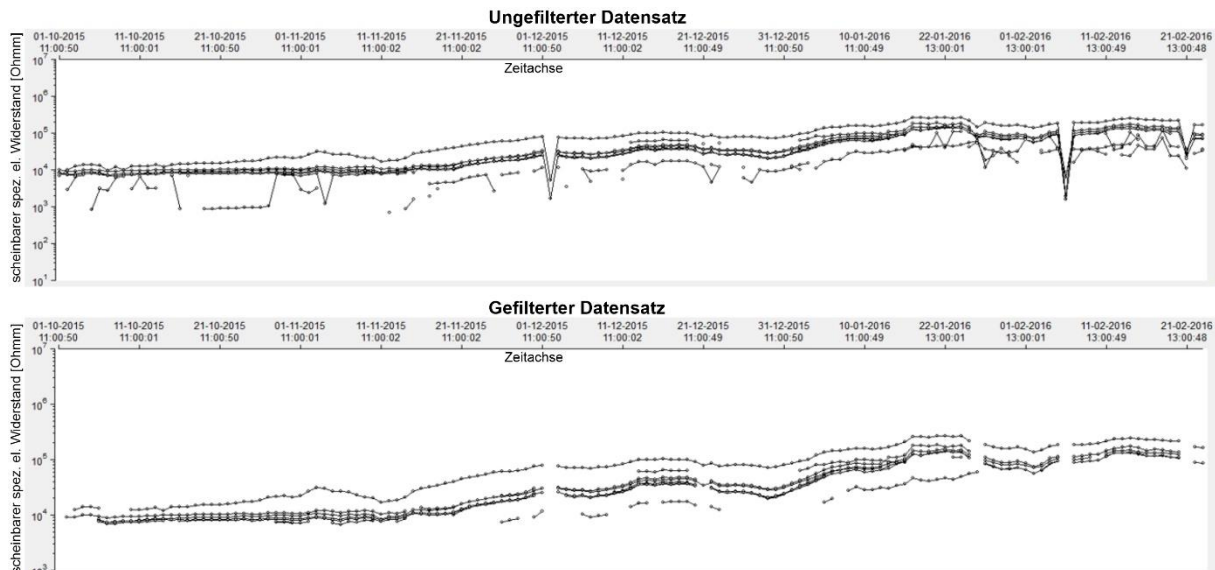


Abb. 67: Exemplarisches Beispiel für die Zeitreihenfilterung anhand von 5 ausgewählten Datenpunkten; Zeitreihe vor der Filterung (oben), Zeitreihe nach der Filterung (unten)

Im Großen und Ganzen wurden hier nur die Filtermethoden, die sich in mehr oder weniger automatischer Weise anwenden lassen beschrieben. Es bestehen natürlich noch diverse Möglichkeiten in der Software auf manuelle Weise Daten zu eliminieren, dies wird allerdings im Zuge der Bearbeitung von Monitoring Daten aufgrund des enormen Zeitaufwandes nur in Einzelfällen, wo mit den hier beschriebenen Filtermethoden keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden können, durchgeführt.

Der Vergleich der 4D-Inversionsergebnisse vor und nach der Einführung dieses zusätzlichen Softwaremoduls hat klar gezeigt, dass das Auftreten von Inversionsartefakten, die auf einzelne Datenpunkten mit geringere Qualität zurückzuführen sind, deutlich reduziert werden konnte. Klarerweise wirkt sich eine Verbesserung der Inversionsergebnisse auch unmittelbar auf die Qualität der Interpretation aus.

Die Entwicklung, die entsprechende Implementierung und Aufnahme des regulären Betriebes dieses neuen Softwaremoduls und den damit einhergehenden Softwareanpassungen an den Monitoring Systemen selbst, wurden im Zuge des ersten Jahres des LAMOND-Projektes umgesetzt. Gewisse Anpassungen und Optimierungen folgten in den weiteren beiden Projektjahren, sodass spätestens mit Projektende ein standardisiertes Vorgehen bei der Qualitätsbewertung und Filterung der geoelektrischen Monitoring Daten im Zuge der Vorbereitung für die 4D-Inversion vorliegt.

3 Numerische Modellierung

3.1 Numerische Interpretation der 4D Geoelektrik

3.1.1 Einleitung

Für die hydrodynamische Interpretation der geoelektrischen Resultate wird Finite Elemente Modellierung eingesetzt. Aufgrund der guten Datenlage wurde Bagnaschino als erste Testsite ausgewählt. Das Monitoring an dieser Lokation ist bereits seit 2010 im Einsatz, zusätzlich ist die Site mit Regenmesser, Inklinometer, Bodenfeuchte- und Temperatursensoren und einem Piezometer ausgestattet. Der für die Testsite Bagnaschino entwickelte Workflow sollte in weiterer Folge verallgemeinert auch für andere Hangrutschungen angewendet werden. Als Grundlage für die Modellierung und Interpretation werden mehrere vergleichbare Ereignisse (Niederschlags- und/oder Rutschereignisse) benötigt. Da es allerdings innerhalb der Projektlaufzeit nicht gelungen ist, an anderen Sites genügend relevante und untereinander vergleichbare Daten zu sammeln, beschränkt sich die Modellierung auf die Site Bagnaschino. Dazu mehr in Kapitel 2.3 Betrieb und Ergebnisse der Monitoring Sites.

Für den Prozess des „parameter fittings“ wird die Sättigungsverteilung (S) mit Hilfe der Archiegleichung in eine elektrische Widerstandsverteilung (ρ) umgerechnet, und mit dem Resultat der 4D Inversion verglichen.

$$\rho = \frac{\rho_w \cdot a}{\phi^m \cdot S^n} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die weiteren Parameter sind die Tortuosität (a), der spezifische Widerstand des Porenwassers (ρ_w), die Porosität (ϕ) sowie der Sättigungsexponent (n) und der Zementationsexponent (m). Dieser Zusammenhang wird zur Kalibrierung des hydraulischen Modells eingesetzt. Das Ziel der Modellkalibrierung ist es, die Parameter der Archie-Gleichung automatisiert solange anzupassen, bis die modellierte Feuchteverteilung der geoelektrisch bestimmten Widerstandsverteilung entspricht. Hierbei gibt es mehrere freie Parameter, die zeitliche Änderung des elektrischen Widerstands beruht jedoch nur auf der Sättigungsänderung, alle anderen Parameter (Tortuosität, Porosität, Sättigungs- und Zementationsexponent) werden als zeitlich konstant, jedoch räumlich variabel, angesehen. Das Ergebnis des geoelektrischen Monitorings wird üblicherweise als Quotient des spezifischen elektrischen Widerstands dargestellt. Unter der zuvor getätigten Annahme, dass sich nur die Änderung der Wassersättigung maßgeblich auf den spezifischen Widerstand auswirkt, lässt sich die Archiegleichung in der Quotientendarstellung stark vereinfacht ausdrücken:

$$\frac{\rho(t=2)}{\rho(t=1)} = \left(\frac{S(t=2)}{S(t=1)} \right)^n \quad \text{Gleichung 2}$$

Alle anderen Terme der Archiegleichung werden gekürzt und verschwinden daher. Im Parameter-Fitting Prozess werden sowohl Gleichung 1 als auch Gleichung 2 als Zielfunktionen verwendet um die Freiheitsgrade einzuschränken.

Werden nun mehrere Ereignisse miteinander verglichen und gemeinsam ausgewertet kann ein Gleichungssystem erstellt werden, mit dessen Lösung einigermaßen fundierte Aussagen über die Verteilung der Parameter im Untergrund getroffen werden können. Daher ist es auch notwendig, mehrere gut interpretierbare Ereignisse von einer Site zu haben.

Auf den Ergebnissen dieser kalibrierten Modelle aufbauend wurde auch die Infiltration des Regenwassers in den Untergrund simuliert. Dabei wird die Richardsgleichung (Fluidströmung in der vadosen Zone) herangezogen, die Niederschlagsmenge wird an der Oberfläche infiltriert. Die Porosität des Untergrunds wird aus den vorangegangenen Berechnungen übernommen, und es wird versucht die Permeabilität soweit anzupassen, dass sich die

berechnete Infiltration mit der Widerstandsänderung deckt. Damit können grundsätzliche Überlegungen validiert bzw. falsifiziert werden. In der Frage, ob der Triggermechanismus auf infiltrierendes Regenwasser oder auf steigenden Bergwasserdruck zurückzuführen ist kann auf Grundlage dieser Ergebnisse klar gegen die Infiltrationstheorie argumentiert werden. Es gelingt nicht, die Permeabilität soweit zu erhöhen, dass das Regenwasser derart schnell in so hohe Tiefen infiltriert, wie aus der Geoelektrikinversion ersichtlich ist. Somit muss die Erniedrigung des Widerstands in der Tiefe des Rutschhorizonts auf einen anderen Mechanismus zurückzuführen sein.

Tab 2: Wertebereich der verwendeten Materialparameter

| Parameter | Wertebereich | | Eigenschaften | |
|---|------------------------|------------------------|---------------|--|
| | Min | Max | Räumlich | Zeitlich |
| Tortuosität | 0.5 | 1.5 | Variabel | Konstant |
| Sättigungsexponent | 1.8 | 2.2 | Variabel | Konstant |
| Zementationsexponent | 1.3 | 1.9 | Variabel | Konstant |
| Porosität | 0.01 | 0.5 | Variabel | Konstant |
| Wassersättigung (mehrere Zustände) | 0.3 | 1 | Variabel | Variabel |
| Widerstand des Porenwassers | 10 $\Omega \cdot m$ | 90 $\Omega \cdot m$ | Konstant | Variabel, jedoch konstant für ein Ereignis |

3.1.2 Methodik

Für numerische Interpretation wurde COMSOL Multiphysics, ein Softwarepaket zur Finiten Elemente Modellierung (FEM) eingesetzt. COMSOL ist Modulweise aufgebaut, für die hier behandelte Modellierungen wurde das Optimierungsmodul eingesetzt. Im Optimierungsmodul stehen verschiedene Algorithmen zur Verfügung, für die vorliegende Fragestellung wurde SNOPT (Sparse Nonlinear Optimizer, Gill et al., 2002) als am geeignetsten identifiziert. Dieser Algorithmus erlaubt es zum Beispiel, die freien Parameter mit Ober- bzw. Untergrenzen zu versehen. Generell funktioniert die Optimierung so, dass auf der einen Seite eine (oder mehrere) Zielfunktion definiert wird, und auf der anderen Seite stehen freie Parameter. Zwischen den freien Parametern und der Zielfunktion wird nun ein Zusammenhang definiert, der Algorithmus wird versuchen, die Parameter möglichst gut anzupassen, sodass die Zielfunktion erfüllt wird. Im vorliegenden Fall besteht die Zielfunktion aus sechs verschiedenen Zuständen (3 Ereignisse mit je zwei Zuständen, vor und nach dem Niederschlag), der Zusammenhang zwischen freien Parametern und Zielfunktion wird durch die Archiegleichung hergestellt, und die freien Parameter sind die Parameter in Tabelle 2. Die Güte der Anpassung ist für die drei Ereignisse unterschiedlich, man vergleiche dazu die Abbildungen 68ff und 75ff.

3.1.3 Referenzdatensätze (Zielfunktionen)

Es wurden aus verschiedenen Gesichtspunkten Datensätze als Referenz für die Modellierung ausgewählt. Die Kriterien für die Auswahl sind unter anderem gute Datenqualität in der Akquisition, die Interpretierbarkeit des Ergebnisses und dass mit wenigen Datensätzen eine gute Bandbreite an unterschiedlichen Events abgedeckt wird.

März 2011:

Im März 2011 ereignete sich ein größeres Rutschereignis mit etwa 95 mm Verschiebung in Verbindung mit einem stärkeren Regenereignis. In Ermangelung weiterer Rutschereignisse wird dieses Event nach wie vor als Referenz für die Site Bagnaschino herangezogen. Es ist eine Abnahme des elektrischen Widerstands in größeren Tiefen deutlich erkennbar, das wird mit einer Erhöhung der Wassersättigung im Bereich des Rutschhorizonts assoziiert. Im Zusammenhang mit diesem Event wurde öfters diskutiert, ob diese Aufsättigung auf versickerndes Regenwasser im Bereich der Rutschung selbst oder auf den Anstieg des Bergwasserspiegels in Verbindung steht. Durch die Modellierung der Infiltration kann gezeigt werden, dass eine Versickerung von Niederschlagswasser in so große Tiefen und so kurzer Zeit als sehr unwahrscheinlich zu beurteilen ist. Diese Antwort auf diese Frage ist insofern von Bedeutung, als damit mögliche Stabilisierungsmaßnahmen besser gelenkt werden können. (Drainagierung des Rutschkörpers vs. Reduktion des Bergwasserdrucks durch Tiefbohrungen)

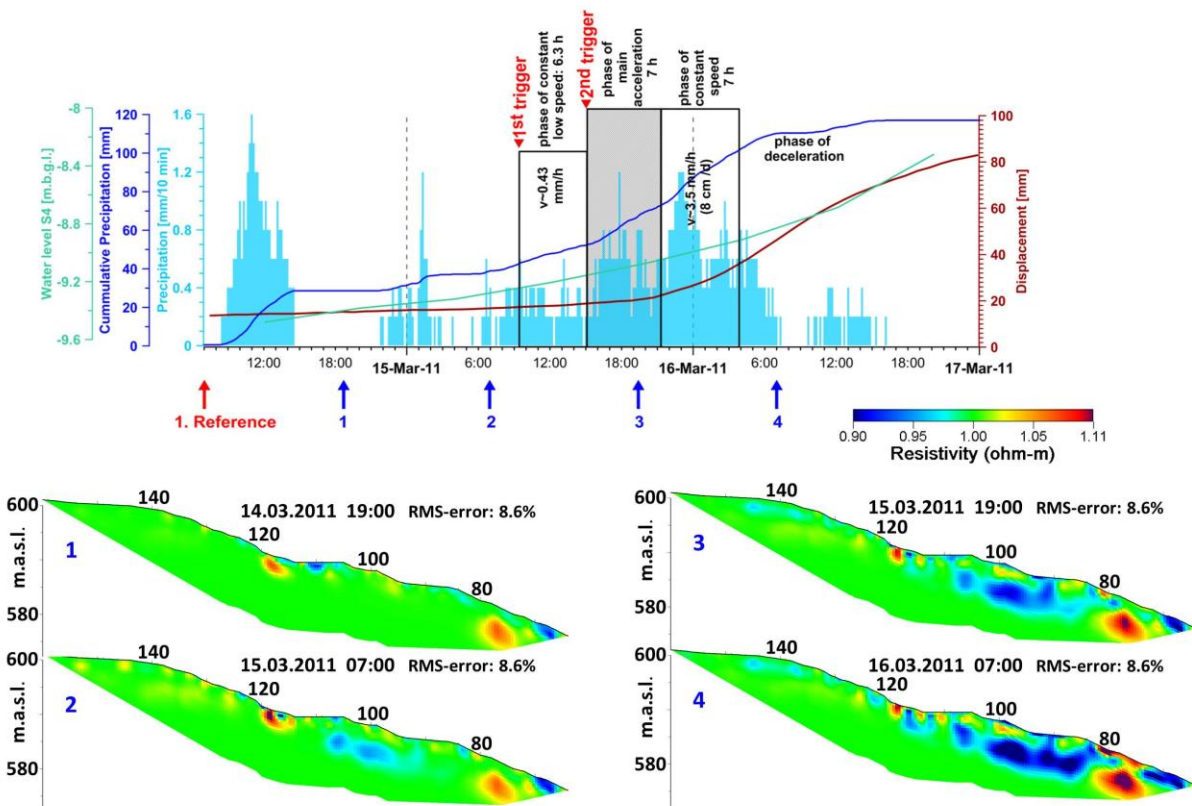


Abb. 68: Quotient des elektrischen Widerstands; Messreihe „A“

November 2011:

Dieses Regenereignis ist ein Beispiel für ein Niederschlagsereignis mit vergleichbaren Niederschlagsmengen wie im März 2011, allerdings führte dieser Niederschlag nicht zu einer Reaktivierung der Hangrutschung. In der 4D Inversion wird das unterschiedliche Verhalten klar ersichtlich. Während der elektrische Widerstand in den Oberflächen-nahen Schichten sogar stärker reduziert wird als im März, kommt es zu keiner Veränderung in den tieferliegenden Bereichen des Hanges. Es findet also keine Durchfeuchtung des Rutschhorizonts statt, folglich kommt es zu keiner nennenswerten Bewegung.

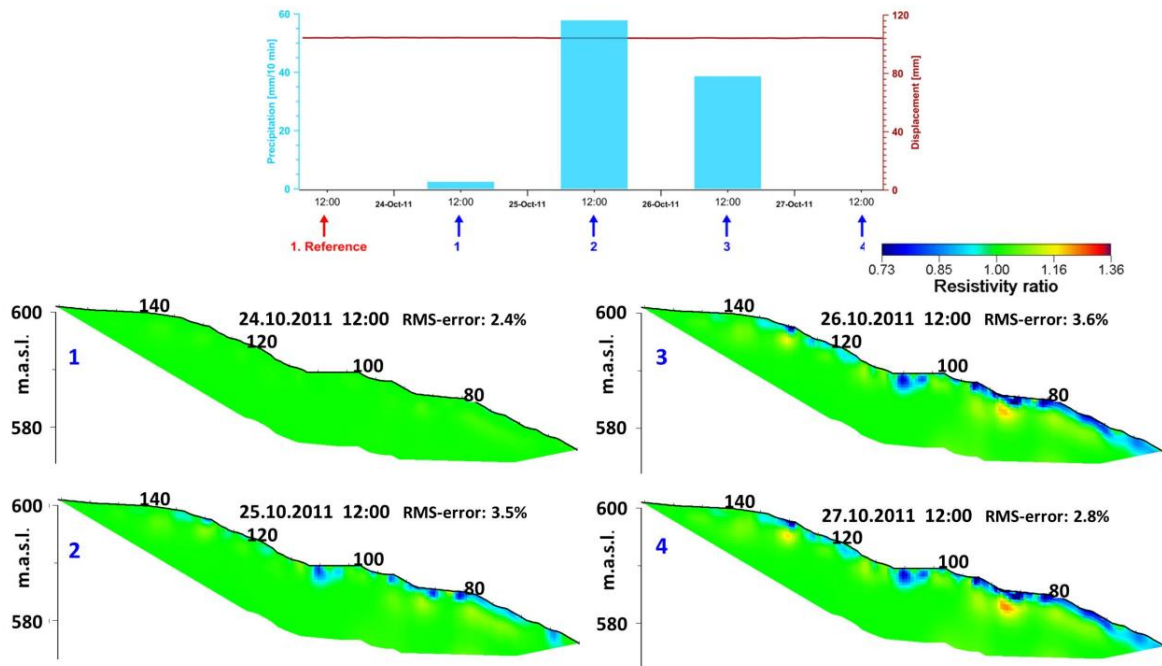


Abb. 69: Quotient des elektrischen Widerstands; Messreihe „B“

Oktober / November 2014:

Diese Messreihe ist ein Beispiel für eine Messreihe mit markantem Temperatureffekt. Durch die Länge der Messreihe (20. 10. – 21. 11.) ist die Abkühlung an der Oberfläche deutlich erkennbar, da die Abkühlung an der Oberfläche zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstands führt. Dieser Effekt überlagert teilweise das erwünschte Messsignal, nämlich die Abnahme des Widerstands durch höhere Wassersättigung im Untergrund. Dennoch ist eine Abnahme in größeren Tiefen zwischen Profilmeter 80 und 90 erkennbar. Die durch die sinkende Umgebungstemperatur beeinflussten Bereiche werden für die Modellkalibrierung vernachlässigt, dennoch liefert auch diese Messreihe einen guten Input für die Modellierung. Mit diesen drei Messreihen kann ein guter Überblick über unterschiedliche Verhalten des Untergrunds in verschiedenen Situationen gegeben werden.

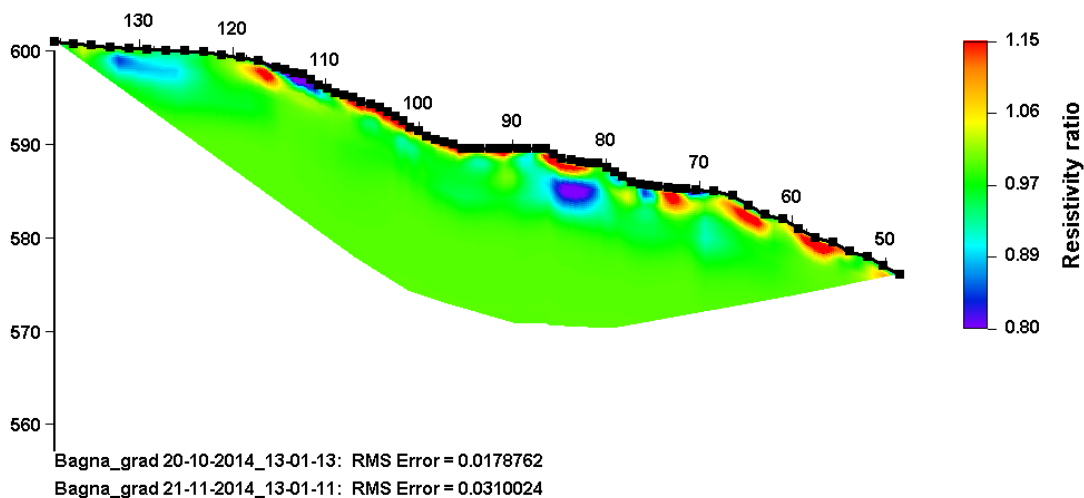


Abb. 70: Quotient des elektrischen Widerstands; Messreihe „C“

3.1.4 Ergebnisse

Das Ergebnis des Parameterfitting Prozesses ist die räumliche Verteilung der Untergrundparameter, die in die Archiegleichung einfließen. Diese Parameter sind in den folgenden Abbildungen dargestellt und können einer geologischen Interpretation zugeführt werden. Es ist festzuhalten, dass die Archiegleichung eine Vereinfachung der Realität darstellt und auch andere Effekte den elektrischen Widerstand beeinflussen können. Daher sind die Ergebnisse eher qualitativ auszuwerten. So kann ein Bereich, der in den Ergebnissen mit niedriger Porosität beispielsweise auch als Bereich mit einem gewissen Tongehalt interpretiert werden, da der Tongehalt zwar den Widerstand beeinflusst, aber in der Archiegleichung nicht berücksichtigt werden kann. Von Interesse ist insbesondere die Zementation, da dieser Parameter einen direkten Rückschluss auf die Konsolidierung und damit auf den Stabilitätszustand ermöglicht.

3.1.5 Schlussfolgerungen

Der Parameterfitting-prozess scheint geeignet, um im Rahmen einer wissenschaftlichen Detailbetrachtung weitere Informationen aus den gewonnenen Daten zu ziehen. Für eine bessere Kalibrierung der Ergebnisse wäre allerdings eine bessere Datenlage wünschenswert, so könnten zum Beispiel Probeanalysen aus Kernbohrungen helfen, den Datenraum der Materialparameter besser einzuschränken.

Um eine Parameterfitting Routine zu entwickeln, die in die Auswertung von Monitoringdaten implementiert wird, ist der hier entwickelte Workflow zu arbeitsintensiv und zu sehr abhängig von User-Input. Dafür müsste das Parameterfitting der Archiegleichung direkt in die Geoelektrikinversion eingebaut werden, an solchen Routinen wird international gearbeitet (zum Beispiel Chambers et al, 2017). Nachdem mit dem geoelektrischen Monitoring nur ein relativ kleiner Bereich des Hanges abgedeckt werden kann, für die nachfolgende Geotechnikmodellierung allerdings ein sehr großer Bereich betrachtet werden muss um numerische Stabilität des Modells zu gewährleisten, sind die Ergebnisse leider nicht direkt für die Geotechnik einsetzbar.

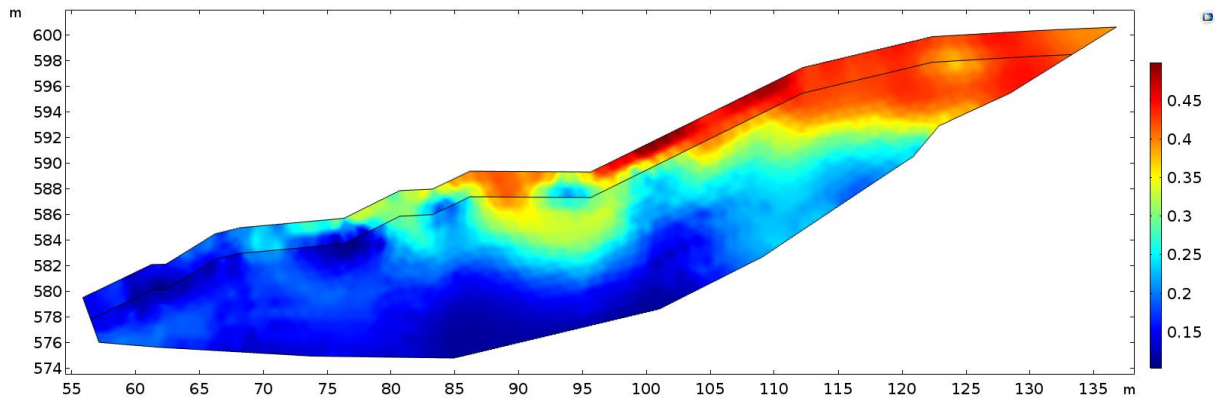


Abb. 71: Porositätsverteilung, errechnet durch den Parameter fitting prozess.

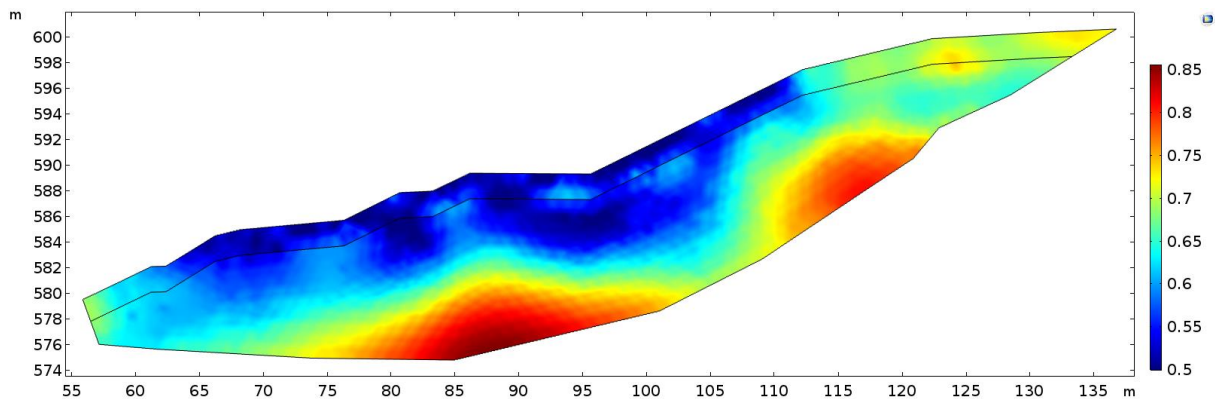


Abb. 72: Tortuosität, errechnet durch den Parameter fitting prozess.

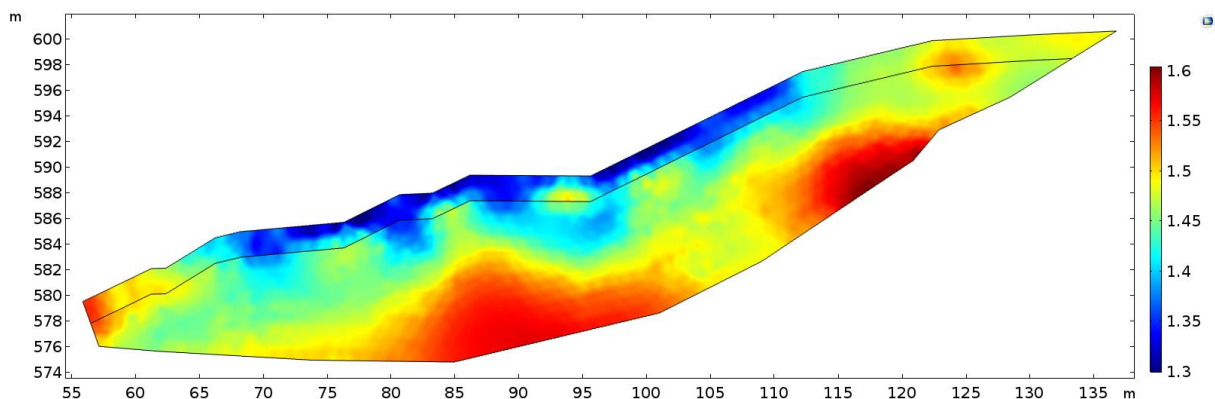


Abb. 73: Zementation, errechnet durch den Parameter fitting prozess.

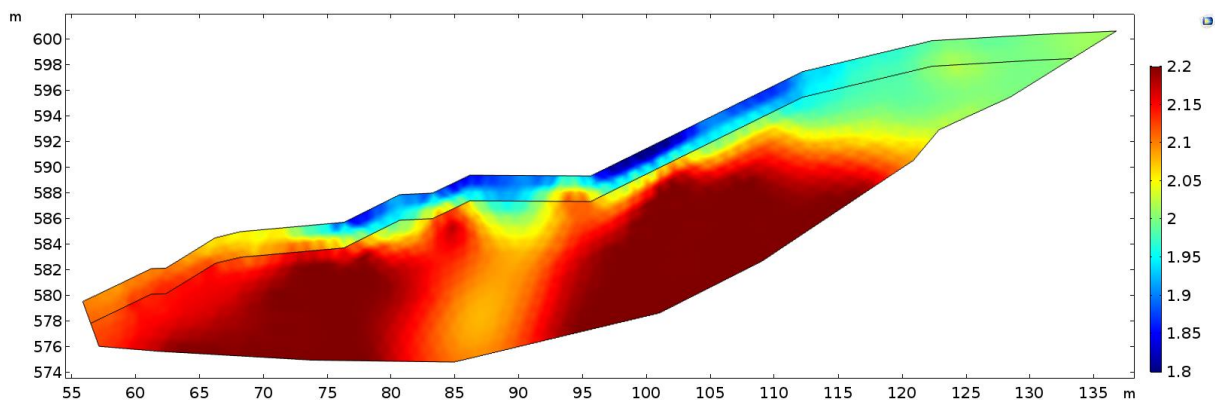


Abb. 74: Sättigungsexponent, errechnet durch den Parameter fitting prozess.

In Abb. 75ff sind die aus dem numerischen Modell errechneten Widerstandsquotienten der drei in Betracht gezogenen Ereignisse dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine zufriedenstellende Anpassung der modellierten Werte mit den Eingangsdaten, vergleiche mit Abb. 68ff.

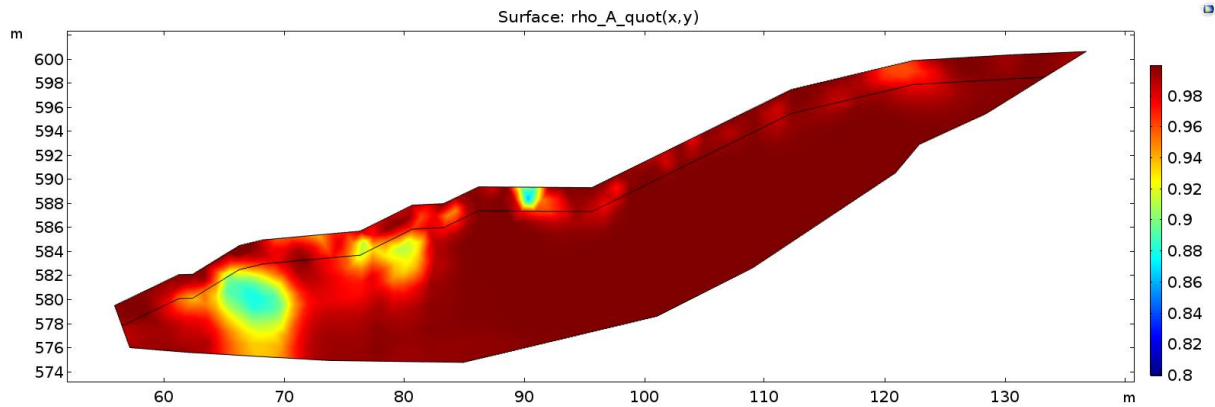


Abb. 75: Modellierter Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstands in der Quotientendarstellung, Event „A“; März 2011

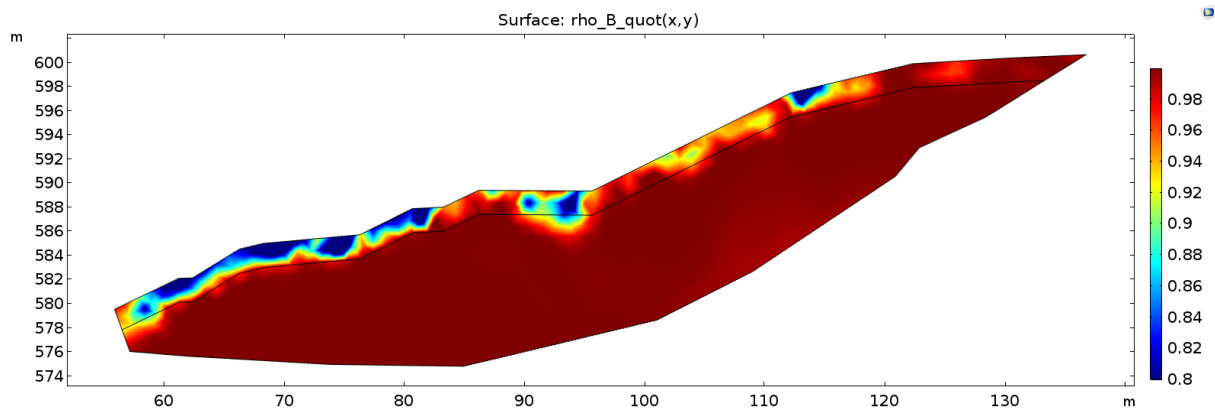


Abb. 76: Modellierter Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstands in der Quotientendarstellung, Event „B“; November 2011

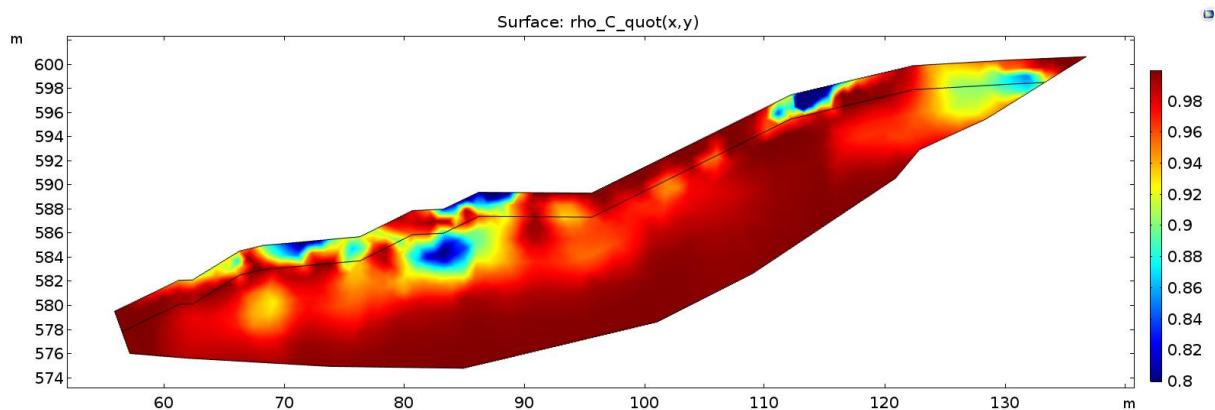


Abb. 77: Modellierter Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstands in der Quotientendarstellung, Event „C“; Oktober/November 2014

3.2 Geotechnikmodellierung

3.2.1 Einleitung

Die Geotechnikmodellierung ermöglicht es den Stabilitätszustand eines Hanges abzuschätzen und darüber hinaus ein tieferes Verständnis für die Versagensmechanismen zu erlangen. Das Auftreten von Hangrutschungen ist von mehreren Faktoren abhängig, das sind einerseits intrinsische beziehungsweise strukturelle Faktoren wie die Geologie, Geomorphologie und Hydrogeologie und andererseits externe unter anderem triggernde Faktoren wie klimatische Randbedingungen, anthropogene Einflüsse oder seismologische bzw. vulkanische Aktivität.

Das Versagen eines Hanges tritt entlang eines Sliphorizonts ein, wenn sich das Verhältnis zwischen treibender Kraft (Gravitation) und Kohäsionskraft zugunsten der treibenden Kraft soweit verschiebt, dass der Reibungswinkel überschritten wird. Das kann einerseits an einem Ansteigen der treibenden Kraft, zum Beispiel durch ein seismisches Event oder zusätzlicher Auflast (Schutttablagerung oder Konstruktionen) oder andererseits an einer Abnahme der Kohäsion zum Beispiel durch Erhöhung der Wassersättigung und damit einhergehend erhöhtem Porenwasserdruck liegen.

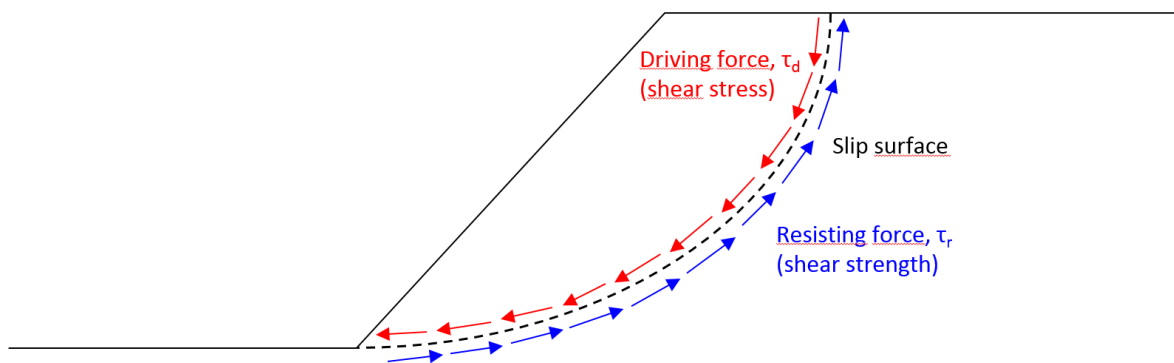


Abb. 78: Die auf einen Hang einwirkenden Kräfte. Solang zwischen Scherbelastung und Scherstärke ein Gleichgewicht besteht, ist der Hang als stabil anzusehen.

Für die Modellierung wurde das Geomechanik Modul der Finite Elemente Software COMSOL Multiphysics eingesetzt. Einer der größten Vorteile der Finiten Elemente Methode gegenüber der konventionellen Limit Equilibrium Analyse (Griffiths und Lane 1999) ist, dass keine a-priori Annahmen über die Form und Lage des Sliphorizonts getroffen werden müssen. Diese werden durch die Finite Elemente Modellierung mittels Spannungsanalyse ermittelt.

Aus mechanischer Sicht wird der Untergrund zunächst als perfekt elastoplastisch angenommen, das dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium unterliegt. Es werden zunächst unter elastischen Bedingungen die Normal- und Scherspannungen für jeden Gauss Punkt des numerischen Netzes berechnet und mit dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium verglichen. Solange an einem Punkt der berechnete Mohrsche Spannungskreis unter der Bruchgeraden liegt, wird das betreffende Element als stabil und elastisch angenommen. Berührt der Spannungskreis jedoch die Bruchgerade, wird ein Bruch angenommen.

Um diesen Zustand zu berechnen, wird die „Strength Reduction“ Methode (SRM) angewandt. Dabei wird iterativ derart vorgegangen, dass das Modell mehrmals gelöst wird, bei jedem Durchlauf werden die Reibungsparameter Kohäsion c' und der innere Reibungswinkel Φ'

schrittweise reduziert bis die Lösung einen instabilen Zustand beschreibt. Das bedeutet, die Lösung wird so oft gerechnet, bis das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium erreicht wird, kein Gleichgewicht zwischen Spannung und innerer Reibung mehr hergestellt werden kann, und folglich das Versagen der Hangstabilität eintritt (Tschunnig, Schweiger & Sloan, 2015). Numerisch macht sich dieser Zustand dadurch bemerkbar, dass der Löser nicht mehr in der Lage ist, ein konvergentes Ergebnis zu liefern. Die letzte konvergente Lösung beschreibt also gerade den Zustand des Untergrunds bei Versagen des Hanges, also den Zeitpunkt der Triggerung der Hangrutschung.

$$c'_{mobilised} = \frac{c'}{FS}$$

$$\Phi'_{mobilised} = \frac{\Phi'}{FS}$$

Case Study Bagnaschino

Laut Geotechnischem Bericht Bagnaschino (2009) können in Bagnaschino Rutschhorizonte in verschiedenen Tiefen, sowohl seichter als auch tiefer liegende, identifiziert werden. Die seichteren Horizonte befinden sich innerhalb der kolluvialen Ablagerungen, das Authochthon ist aus stark zerklüftetem Glimmerschiefer und Amphibolit aufgebaut. Mithilfe des installierten Inclinometers konnte im Sommer 2009 ein Versatz von etwa 60 cm in einer Tiefe von 7 m festgestellt werden, bei einem weiteren Ereignis 2010 konnte ein weiterer seichter Horizont in etwa 8 – 10 m Tiefe bestätigt werden. In größeren Tiefen (20 – 60 m, innerhalb des Anstehenden) konnten lediglich sehr kleine, langsame Kriechvorgänge erfasst werden.

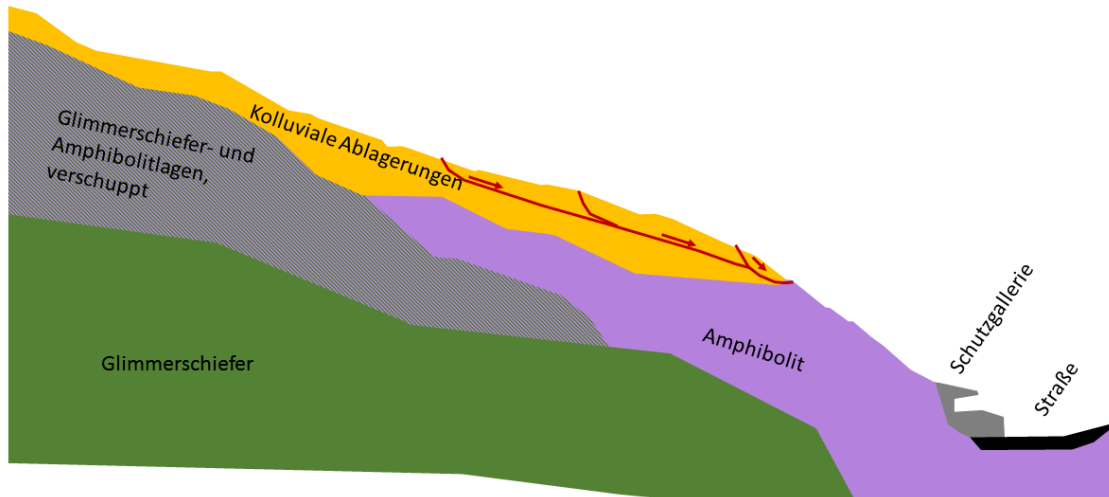


Abb. 79: Geologische Situation und Rutschhorizonte aus internen Projektunterlagen.

3.2.2 Eingangsparmeter und Modellerstellung

Die wichtigsten Inputparameter für die FE Stabilitätsmodellierung sind:

- Die Hanggeometrie (2D)
- Die geotechnischen Parameter, siehe Tab 3
- Für die hydraulische Randbedingungen müssen gewisse Annahmen getroffen werden, um den Porenwasserdruck bestimmen zu können.

Tab 3: Eingangsparmeter

| Parameters | Symbol | measure unit |
|-------------------|----------|-------------------|
| Elastizitätsmodul | E | kPa |
| Poissonzahl | ν | - |
| Dichte | γ | kg/m ³ |
| Kohäsion | c' | kPa |
| Reibungswinkel | Φ' | degrees |

Die Bestimmung der geomechanischen Parameter wird üblicherweise durch Laborexperimente durchgeführt. Solche Resultate sind allerdings nicht verfügbar, daher wurden die Parameter vorerst aus der lithologischen Information mittels Literaturwerten geschätzt. Der Hang besteht kolluvialen Ablagerungen mit variabler Mächtigkeit zwischen 10 und 20 m, die auf einer Basis aus stark beanspruchten Amphibolit und Glimmerschiefervorkommen abgelagert wurden. Die zugewiesenen Parameter für die beiden Einheiten sind in Tab 4 ersichtlich.

Tab 4: Initiale Eingangsparmeter, Werte

| Parameter | Kolluvium | Basis | Einheit |
|-------------------|-----------|-------|-------------------|
| Elastizitätsmodul | 100 | 1500 | MPa |
| Poissonzahl | 0.3 | 0.3 | - |
| Dichte | 2000 | 2800 | kg/m ³ |
| Kohäsion | 25 | 500 | kPa |
| Reibungswinkel | 30 | 30 | Grad |

Um zu untersuchen, wie sich die Änderung eines einzelnen Parameters auf das Gesamtsystem auswirkt, wurde zunächst eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei wurden die Parameter für das Kolluvium in einem gewissen Bereich verändert. Mit diesen abgeänderten Parametern wurde eine vereinfachte Strength reduction Simulation durchgeführt. Bei der vereinfachten SRM wird nur der Reibungswinkel schrittweise reduziert, die Kohäsion wird schon vorab mit einem geringen Wert angenommen. Aus den Resultaten wurden Ergebnisse ausgewählt, die die Form und Lage der Rutschhorizonte, wie sie im geotechnischen Bericht ausgezeichnet sind annähern. Basierend auf den Ergebnissen der Parameterstudie wurde durch weitere Anpassung der plastischen Parameter wird noch weiter versucht, die Form und Lage der Rutschhorizonte noch besser anzupassen. Alle Ergebnisse, sowohl der Parameterstudie als auch des darauf aufbauenden Modells sind im folgenden Kapitel dargestellt.

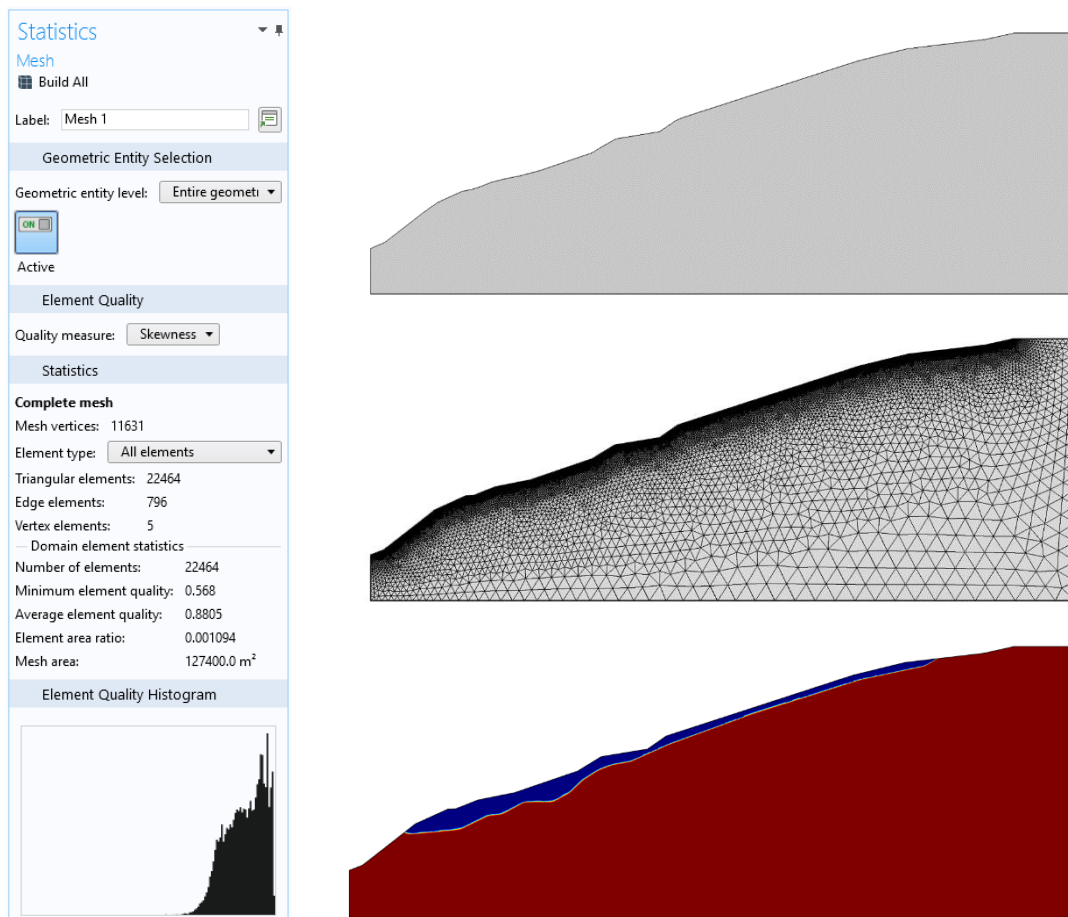


Abb. 80: Geometrie und numerisches Gitter. Unten: Das Kolluvium wurde nicht geometrisch vom Anstehenden unterschieden, es wurden durch Interpolationsfunktionen aber verschiedene Materialparameter zugewiesen.

3.2.3 Ergebnisse

Wie in der Einleitung erklärt, wird bei der „Strength Reduction“ Methode das Initialmodell unter Reduktion der Festigkeitsparameter iterativ sooft gelöst, bis der elastoplastische Bereich verlassen wird und somit keine konvergente Lösung mehr errechnet werden kann. Das Ergebnis der letzten möglichen Lösung ist also der Zustand des Hanges bei Eintritt des Versagens der Stabilität. Die Lage des errechneten Rutschhorizonts lässt sich am besten durch die plastische Zerrbelastung darstellen (sh. Abb. 81).

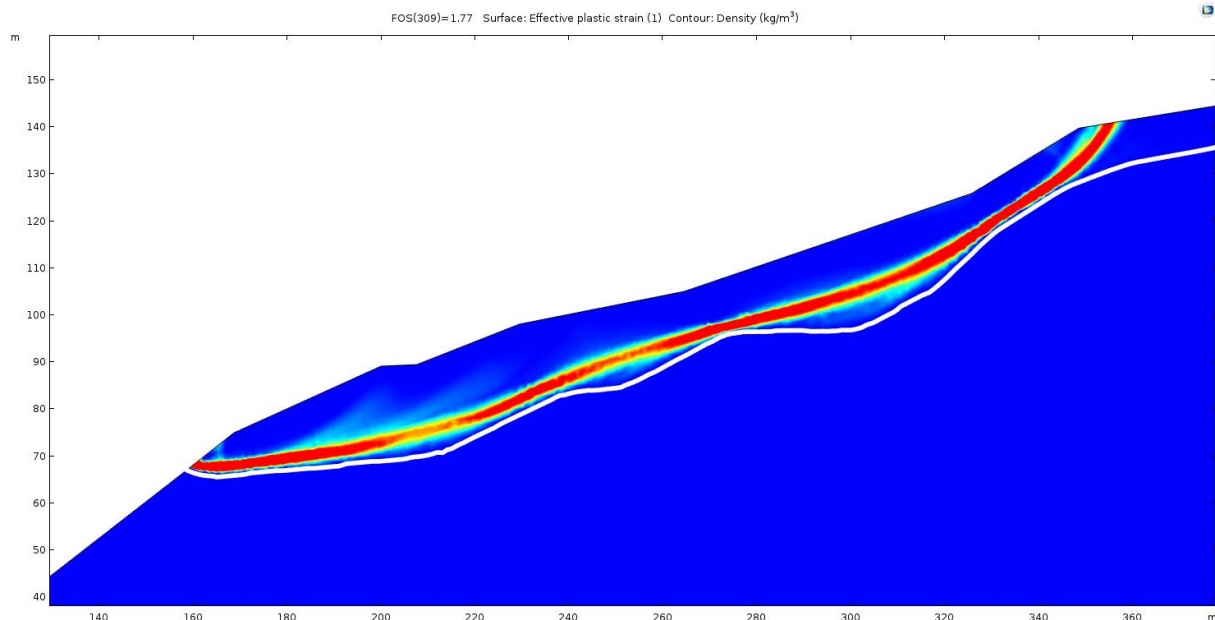


Abb. 81: „Effective plastic strain“ des Startmodells bei Eintreten des Versagens.

Auf Grundlage dieses Startmodells wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Das Ziel dieser Studie ist es herauszufinden, mit welchen Parameterkombinationen sich der modellierte Rutschhorizont in Form und Lage an den im Feld beobachteten annähert. In Tab 5 sind die für die Parameterstudie verwendeten Werte zusammengestellt. In Tab 5 sind die Ergebnisse der Parameterstudie zusammengestellt. Wie zu erwarten war, hat die Kohäsion den stärksten Einfluss auf den errechneten Rutschhorizont, bei genauerer Betrachtung zeigen sich jedoch auch bei der Variation der anderen Parameter deutliche Unterschiede. Durch den Vergleich mit Abb. 79 werden nun verschiedene Parameterkombinationen getestet um den Grad der Anpassung zu erhöhen. Dabei wurde neben der Tiefenlage des Rutschhorizonts auch in Betracht gezogen, dass sich der Horizont in mehrere Bereiche einteilen lässt. Im finalen Modell sind, ähnlich wie in Abb. 79 deutlich mehrere Bereiche auszumachen. Als zusätzliche Annahme wurde ein Anstieg der Kohäsion mit der Tiefe angenommen. Diese Annahme scheint plausibel, da das Kolluvium durch die höhere Auflast mit der Tiefe sicherlich besser kompaktiert ist. Es wurden verschiedene Zusammenhänge getestet, am geeignetsten erscheint ein linearer Zusammenhang. Die Ergebnisse des finalen Modells sind in den Abbildungen 82 – 84 dargestellt. Am stärksten beansprucht scheint der Bereich am Hangfuß, das ist auch der Bereich der in der nahen Vergangenheit am aktivsten einzustufen war, daher waren auch ebenda Monitoringsysteme installiert.

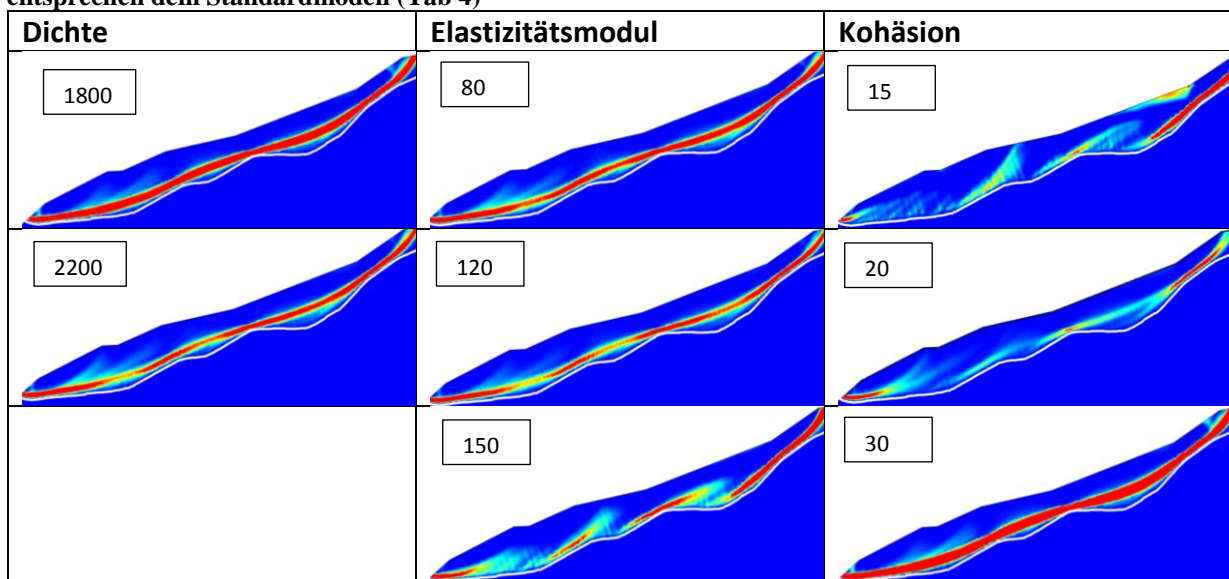
3.2.4 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Ergebnisse sind als „proof of concept“ zu verstehen. Der klare Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Materialkennwerte „in situ“, flächen- und tiefendeckend erhoben werden können, im Gegensatz dazu sind Laborwerte immer nur für einen Punkt gültig und man muss davon ausgehen, dass das Material bei der Probenahme verändert wird. Dennoch wären, um die Ergebnisse validieren zu können, mittels Laborversuch erhobene Materialkennwerte von Nöten. Damit kann das Modell dann an den Probenahmepunkten eingehängt werden.

Tab 5: Wertebereiche der Parameterstudie, die fett markierten Werte wurden für das finale Modell verwendet

| Parameter | Werte | Einheit |
|-----------|---------------------------|-------------------|
| E-modul | 80 100 120 | 1500 |
| Dichte | 1800 2000 2200 | kg/m ³ |
| Kohäsion | 15 20 25 30 | kPa |

Tab 6: Ergebnisse der Parameterstudie. Es wurde jeweils nur ein Wert verändert, die anderen Werte entsprechen dem Standardmodell (Tab 4)



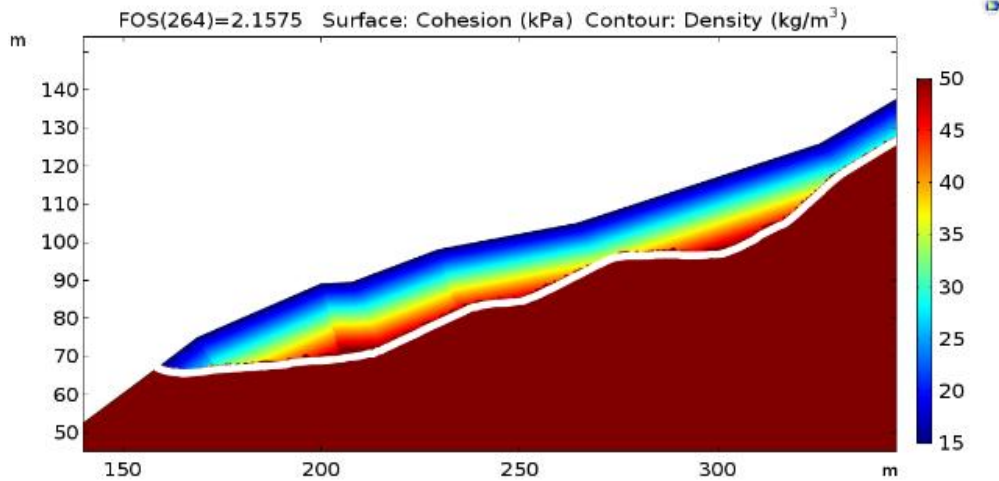


Abb. 82: Ein linearer Anstieg der Kohäsion mit der Tiefe wurde nur im finalen Modell berücksichtigt.

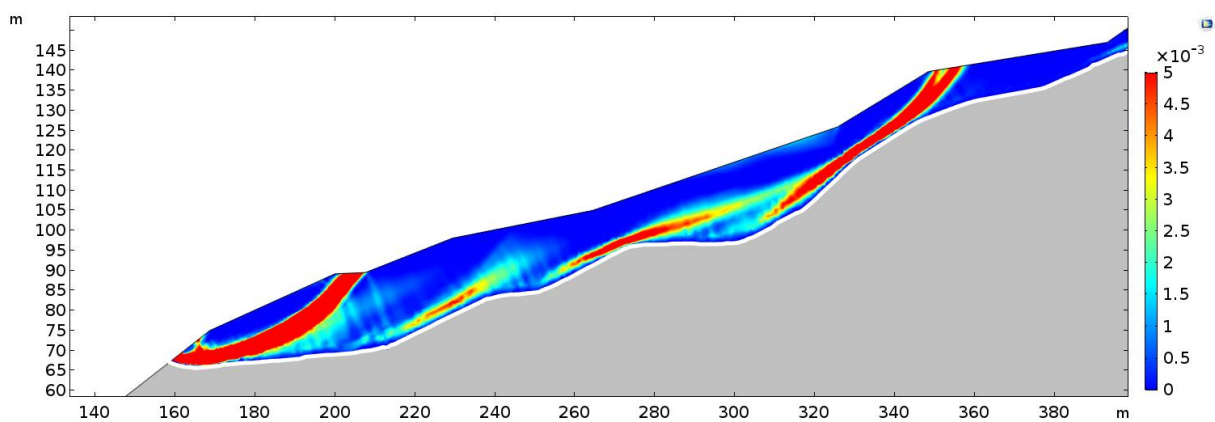


Abb. 83: Errechnete Lage der Rutschhorizonte des finalen Modells.

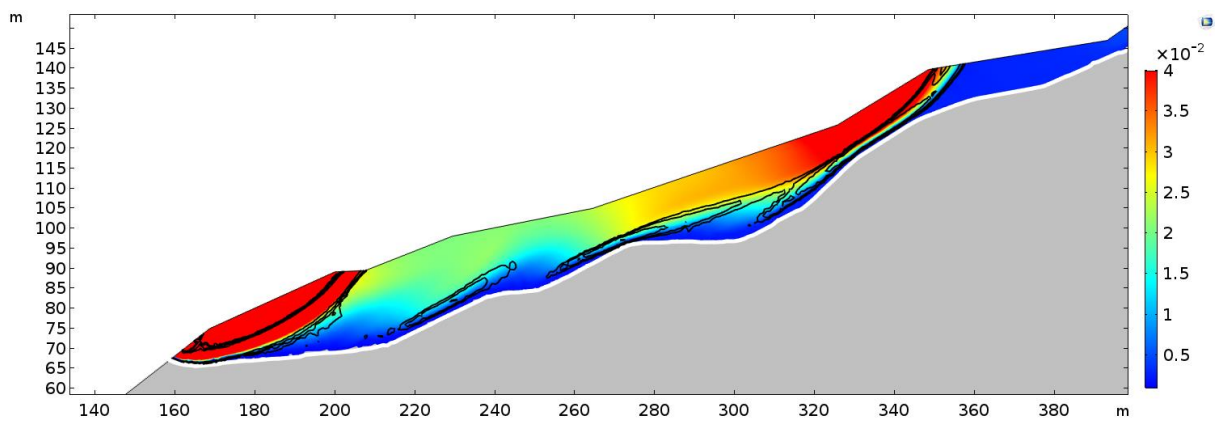


Abb. 84: Die errechnete Verschiebung ist hier farbkodiert dargestellt. Für bessere Lesbarkeit ist der colorbar bei 4 cm begrenzt, der unterste Bereich des Hanges weist jedoch kleinräumig deutlich höhere Werte auf.

4 Stakeholder Prozess zur Entwicklung eines Endnutzer-orientierten Frühwarnsystems

4.1 Einführung

Im Sinne des integrativen Ansatzes des LAMOND Projektes wurden bei der Entwicklung eines Frühwarnsystems zusätzlich zu den geologischen und technischen Dimensionen auch institutionelle und soziokulturelle Aspekte miteinbezogen. Durch den Austausch zwischen WissenschaftlerInnen, politischen Entscheidungsträgern und Betroffenen wurde sichergestellt, dass die Gestaltung eines Frühwarnsystems von allen mitgetragen, somit sozial nachhaltig und langfristig effektiv wird. Diese partizipative Herangehensweise betraf die Monitoring Technologie selbst sowie deren Verknüpfung mit einem Notfallplan. Die Ziele dieses Workpackage 5 wurden folgendermaßen definiert: Die Identifikation der Diskurse der Beteiligten in Bezug auf ein Frühwarnsystem, der Vorschlag mehrerer Optionen auf Basis der Diskurse, die Entwicklung eines Beteiligungsprozesses für Hangrutsch Frühwarnsysteme sowie eine Endnutzer-orientierte Lösung für ein Frühwarnsystem. Für die Umsetzung dieses Vorhabens wurde das Fallbeispiel Gschlifgraben in Gmunden, Oberösterreich ausgewählt.

Der Gschlifgraben weist eine jahrhundertelange Geschichte von Hangrutschungen auf, die im letzten verheerenden Ereignis in den Jahren 2007/2008 gipfelte. Diese Bewegungen hatten monatelange Evakuierungen, Schäden an Gebäuden und Grundstücken und Sanierungsmaßnahmen in Millionenhöhe zur Folge. Um solche Bewegungen in Zukunft frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig geeignete Maßnahmen zu treffen, ist ein Monitoring- und Frühwarnsystem Bedingung einer Wiederbesiedlung. Stark divergierende Zugänge zur Frage, in welcher Weise diese Bedingung erfüllt werden könnte, machte den Gschlifgraben zu einem typischen Anwendungsfall der Cultural Theory, die die theoretische Basis dieses Workpackage darstellt.

Im Rahmen von LAMOND wurde 2015 ein Beteiligungsprozess zum Gschlifgraben eingeleitet, der mit einer Serie an Interviews und der Analyse von verfügbaren Dokumenten begann. Es konnten daraufhin die wichtigsten Ansichten zu einem Frühwarnsystem gesammelt und mit Hilfe sozialwissenschaftlicher Methoden zentrale Diskurse definiert werden. In Kombination mit den Erkenntnissen der Work Packages 1 bis 4 wurden diese Diskurse zu drei Optionen entwickelt. Das Spektrum an vorherrschenden Meinungen reflektierend, dienten diese Optionen einem ersten Workshop im Jänner 2017 als Diskussionsgrundlage.

Darauf folgten zwei weitere Workshops im Februar und März 2017, bei denen Gelegenheit für Interessierte geboten wurde, ihre Meinung, Bedürfnisse hinsichtlich eines zukünftigen Frühwarnsystems einzubringen und gemeinsam mit anderen Beteiligten und Wissenschaftlern zu diskutieren. Das Hauptziel war es, Empfehlungen und Leitlinien für ein zukünftiges Frühwarnsystem, Notfallplanung und Prävention zu sammeln und ein sozial und wirtschaftlich angepasstes Frühwarnsystem zu entwickeln. Dabei wurden neue Erkenntnisse über partizipative Planung von Hangrutsch Frühwarnsystemen gewonnen.

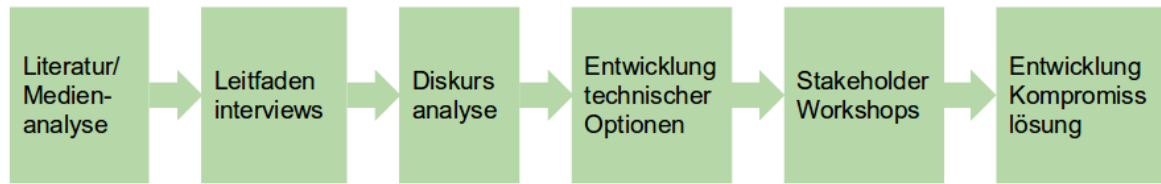


Abb. 85: Projektverlauf des Work Packages

Das Workpackage 5 wurde im Juni 2017 nach fast drei Jahren Projektlaufzeit zum Abschluss gebracht. Auf den folgenden Seiten werden der Hintergrund und das Forschungsdesign, bisherige Ergebnisse sowie die Stakeholder Workshops und deren Ziele skizziert.

4.2 Theoretischer Hintergrund

Frühwarnsysteme werden als Kombination von Maßnahmen definiert, die darauf abzielen, Betroffene, Gemeinschaften und Organisationen rechtzeitig und effektiv über eine Gefahr informieren um adäquat zu reagieren (UNISDR 2007). Damit wird das Hangrutsch Risiko minimiert, um geringere ökonomische und ökologische Auswirkungen im Vergleich zu Sanierungsmaßnahmen zu erreichen (Intrieri et al. 2013).

Frühwarnsysteme waren bisher eher auf Technologie fokussiert und sollten in Zukunft auch den institutionellen Kontext, Kommunikation von Unsicherheit, Verantwortungsteilung zwischen Wissenschaft und Entscheidungsträgern sowie den Informationsbedarf der Betroffenen berücksichtigen. Zuletzt war dieser Anspruch innerhalb der Sozialwissenschaften eher auf Gestaltung und Verbreitung der Warnung fokussiert (Parker et.al. 2009), immer öfter wird jedoch auch gefordert, die ökonomischen, sozialen und rechtlichen Komponenten zu integrieren, um Frühwarnsysteme nachhaltig effektiv zu gestalten (Basher 2006, Bell et.al. 2010, Parker et.al. 2009). Das heißt, zum Beispiel, dass die Installation der bestmöglichen Monitoring Technologie mit deren Akzeptanz unter Betroffenen und dem existierenden Bewusstsein über die Gefahr einhergeht. Weiters kann dies heißen, dass Ungleichheiten und existierende Machtstrukturen durch deren Mitdenken nicht reproduziert werden.

Das hierfür zentrale Politikpapier auf internationaler Ebene ist der Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015. In Bezug auf Frühwarnsysteme sollen demnach eine Endnutzer-Orientierung ("People-Centered") Beachtung finden, die grundsätzlich die Einbeziehung folgender Bereiche umfasst: die Erforschung des Risikos, Monitoring und Vorhersagen der Gefahr, die Kommunikation von Warnungen sowie die lokalen Kapazitäten adäquat zu reagieren (UNISDR 2007).

Ein solch pluralistischer Zugang zu Frühwarnsystemen mit einer erweiterten Reihe an zu berücksichtigenden Aspekten kann dazu führen, dass der Planungsprozess komplex und umstritten wird. In der Cultural Theory bezeichnet man dies als "contested terrain", definiert durch divergierende und sich ausschließende Ansichten zu Problem und Lösung sowie keiner Möglichkeit eines Konsens oder einer sogenannten "eleganten Lösung" (Scolobig et.al. 2016). Soziale und kulturelle Gegebenheiten führen zu einer Lösung, die als Kompromiss und nicht als Konsens verstanden wird. Das liegt daran, dass bei unterschiedlichen Akteuren und komplexen Problemstellungen kulturelle Motive und soziale Realitäten ins Spiel kommen. Dabei wird grundsätzlich unter den Typen hierarchisch, individualistisch, egalitär und fatalistisch unterschieden (Linnerooth-Bayer et.al. 2016). Unter den Ansichten der Beteiligten eines Frühwarnsystems treten diese Typen in dynamischer und gemischter Art und Weise auf und sind Grundlage zur Formulierung von Diskursen. Diese Diskurse dienen der Kategorisierung und Eingrenzung von Ansichten und Meinungen zu einem potentiellen Frühwarnsystem. Diskurse sind also ein Set von Ideen und Konzepten die durch bestimmte Praktiken produziert, reproduziert und transformiert werden und dadurch der physischen und sozialen Realität Bedeutung geben (Hajer 1995). Die Formulierung solcher Diskurse bewirkt zum einen eine Eingrenzung der Anzahl an Zugängen und bildet die Grundlage der Entwicklung von verschiedenen Varianten, wie ein Frühwarnsystem gestaltet werden könnte.

4.3 Forschungsmethoden

Die sozialwissenschaftliche Betrachtung auf Basis der Cultural Theory bedient sich einer systemischen Herangehensweise, die ein Frühwarnsystem als Gesamtheit unterschiedlicher Subsysteme sieht. Qualitative Methoden ermöglichen dabei das Erfassen des soziokulturellen Gefüges sowie eine umfassende Recherche des rechtlichen, politischen und ökonomischen Kontexts des Frühwarnsystems. Der Beteiligungsprozess begann mit der Identifizierung der wichtigsten Beteiligten und ersten Kontakten mit der Stadtgemeinde und den involvierten Fachleuten. Neben einer Analyse der verfügbaren Literatur und Dokumente wurden leitfadengestützte Interviews mit insgesamt 21 Personen geführt und transkribiert. Unter den wichtigsten Stakeholdern sind Vertreter der Gemeinde, der Wildbach- und Lawinenverbauung, lokaler Ziviltechniker, Einsatzkräfte und Anwohner. In den Interviews waren folgende Fragen zentral: Frühwarnsystem und Notfallplan, Verantwortungsverteilung, Kommunikation, Finanzierung und lokale Kapazitäten. Es wurden zusätzliche Interviewpartner identifiziert, die zur Klärung weiterer Detailfragen historischer sowie aktueller Natur herangezogen wurden. Mittels Diskursanalyse wurden aus den Interviews drei sogenannte "Geschichten" (Storylines) konstruiert, die sich anhand von sieben Kriterien aus der Literatur unterscheiden (siehe unten). In weiterer Folge wurden in Zusammenarbeit mit den Experten der Geologischen Bundesanstalt und dem sozialwissenschaftlichen Team des IASA auf Basis dieser Geschichten bzw. Diskurse drei Möglichkeiten der Umsetzung in ein Frühwarnsystem entwickelt. Die darauf folgende dreiteilige Workshoprunde stellte den eigentlichen Kern des Workpackage dar. Dabei wurde das Ziel verfolgt in mehreren Schritten und mittels Scientist-Stakeholder Dialogen eine diskursive Plattform zu schaffen um zu einer gemeinsamen Kompromisslösung für ein Frühwarnsystem zu kommen (Löschner et.al. 2016, Scolobig et.al. 2016). Für die konsequente Einbeziehung aller Betroffenen, die bei Workshops verhindert waren, wurden diese zusätzlich nach jedem Workshop mit einer schriftlichen Zusammenfassung informiert und um Ihre Ideen gebeten.

Tab 7: Überblick der Forschungsdesigns

| Phase | Ziele | Methoden |
|---------------------|--|--|
| Analyse | Stakeholder Ansichten ermitteln, Optionen entwickeln | Dokumentenanalyse, Medienanalyse, 21 Interviews, Diskursanalyse |
| Beteiligungsprozess | Kompromissfindung | Stakeholder Workshops, Zusammenfassungen aussenden und Feedbackrunden |
| Dissemination | Ergebnisse veröffentlichen, breite Bevölkerung informieren | Empfehlungsdokument aussenden, GBA Tagung, wissenschaft. Publikationen |

4.4 Institutioneller Rahmen und Herausforderungen

Die Gschlifgraben Thematik involviert viele unterschiedliche Institutionen und Akteure. Durch den Fokus auf Endnutzer-Orientierung wurden vor allem Beteiligte auf lokaler Ebene eingebunden. Dazu zählten das Bauamt und der Stadtgeologe der Gemeinde, Freiwillige Feuerwehr und Polizei Gmundens, die Gebietsbauleitung West der Sektion Oberösterreich der Wildbach- und Lawinerverbauung sowie Ziviltechniker und Anwohner. Verantwortlich ist in erster Linie die Stadtgemeinde, die einzelne Kompetenzen auslagert. Im Zuge der Diskursanalyse wurden unterschiedliche Herausforderungen identifiziert die unter anderem mit Kommunikation und Risikowahrnehmung zusammenhängen. Dazu zählen zum Beispiel tradiertes Misstrauen basierend auf Konflikten während der Rutschkatastrophe vor 10 Jahren oder die Verweigerung von Dienstbarkeiten zur Wartung bestehender Monitoring Anlagen.

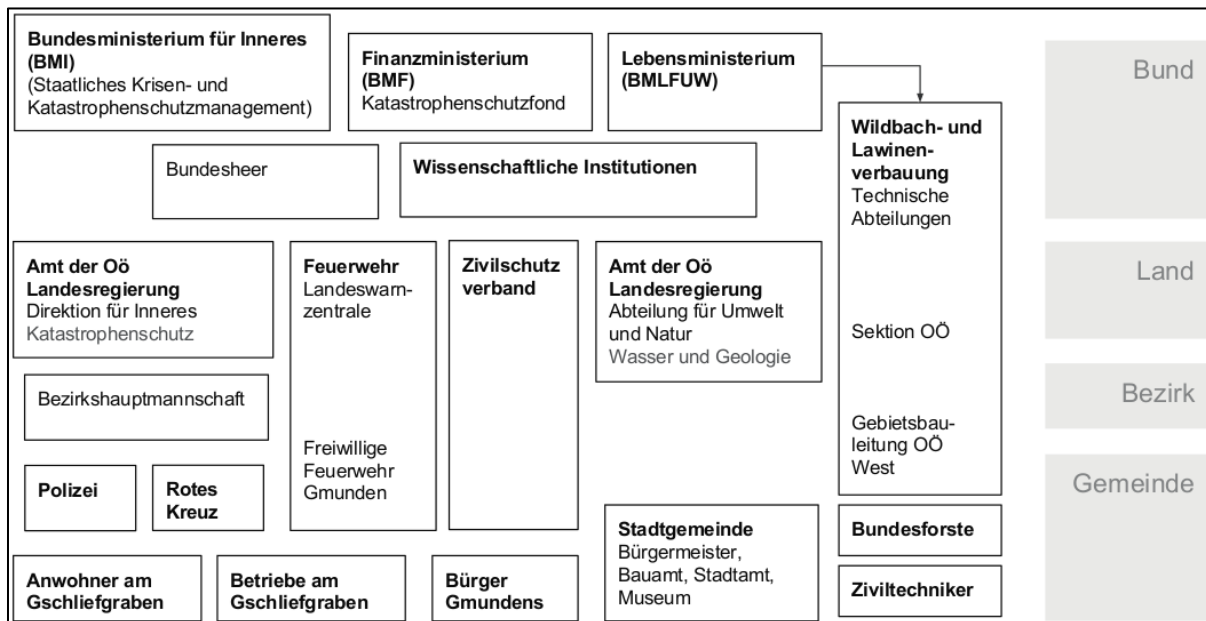


Abb. 86: Übersicht der an einem Frühwarnsystem am Gschlifgraben beteiligten Institutionen

Wer genau die Endnutzer sind, hängt vom Design des Frühwarnsystems ab und sind nicht per se nur die Anwohner. Je nach Verantwortungsverteilung bei Wartung und Betrieb des Frühwarnsystems kann dies auch die Stadtgemeinde oder Ziviltechniker sein. Somit war der institutionelle Rahmen sowohl Analysegegenstand als auch Teil der Ausgestaltung des Frühwarnsystems.

4.5 Stakeholder Diskurse

- Option 1: Minimales “Frühwarnsystem”
- Option 2: Frühwarnung als technisches Expertensystem
- Option 3: Anwohner-zentriertes Frühwarnsystem

Die drei Varianten unterscheiden sich vor allem durch folgende Kriterien:

- Wahrnehmung des Hangrutschungsrisiko
- Wer ist für die Komponenten des Frühwarnsystems verantwortlich?
- Kosten und Finanzierung
- Technologische Ausstattung
- Rolle der Katastrophenschutzplanung
- Rolle der AnwohnerInnen
- Kommunikation und Bedürfnisse der AnwohnerInnen

Tab 8: Übersicht der drei Optionen basierend auf Interviews und Medienanalyse

| | Option 1 - Minimal | Option 2 - Technologisch | Option 3 - Anwohner-zentriert |
|----------------------------|---|--|--|
| Grundannahme | kaum Risiko | geringes Risiko, Gefahrenzone muss überwacht werden | geringe Bedrohung für Siedlungsbereich, starke Dynamik im oberen Bereich |
| Verantwortung | Gemeinde | Gemeinde, WLV, Ziviltechniker | Eigene Person in der Gemeinde, Anwohner |
| Kosten | nur laufende Kosten | 200.000,- plus laufende Kosten | 100.000,- plus laufende Kosten |
| Finanzierung | Gemeinde | Drittlösung plus Anwohnerbeteiligung | Drittlösung |
| Technologie | | <ul style="list-style-type: none"> - 2 Inklinometer - Piezometer - Wetterstation und Abflussmessung - Laserscan Befliegung | <ul style="list-style-type: none"> - Inklinometer - Wetterstation und Abflussmessung |
| Notfallplan | nicht notwendig | regelt Verantwortung und Ablauf | regelt Verantwortung, Ablauf und Dokumentation |
| Anwohnerbeteiligung | keine | Genossenschaft gründen | eingebunden in Design und durch Institutionalisierung von Beobachtungen |
| Kommunikation | keine sozialen Medien, zu viel Kommunikation erzeugt Unsicherheit | Anwohner nicht frühwarnen aber alarmieren; Informationsveranstaltungen | Automatischer Alarm, Datentransparenz, Geotrail |

Beim Vergleich der drei Varianten (siehe Übersicht oben) wird sichtbar dass sich die unterschiedlichen Standpunkte in einigen Aspekten ähneln. Anhand der Kriterien werden allerdings auch ihre Unterscheidungsmerkmale sichtbar. Zum Beispiel liegt der größte Unterschied zwischen den Optionen 2 und 3 in der Frage der Anwohnerbeteiligung, dass mit Verantwortung, Finanzierung, Kommunikation zusammenhängt.

Workshop 1

Das erste Treffen fand am 12.01.2017 im Erkudok Museum in Gmunden statt und wird auf den folgenden Seiten zusammengefasst. Ziel des ersten Treffens war es, ein reichhaltiges Bild von bisherigen Ereignissen und Maßnahmen zum Gschlifgraben und ein besseres Verständnis kritischer Punkte bei Frühwarnsystemen zu bekommen. Zusätzlich wurden die drei vorgestellten Varianten am runden Tisch diskutiert, um in weiterer Folge zu einer Kompromisslösung zu kommen.

Zu dem Treffen wurden Vertreter der folgenden beteiligten Akteure eingeladen:

- Wildbach- und Lawinenverbauung
- Ziviltechnikbüro Moser-Jaritz
- Stadtgemeinde Gmunden (Bürgermeister, Stadtamt, Bauamt, Museum)
- Wissenschaftliche Institutionen (GBA, IIASA)
- Land OÖ (Umwelt und Natur)
- Einsatzkräfte (FF Gmunden, Polizei)
- Bundesforste
- Anwohner

Die drei Optionen einer möglichen Ausgestaltung eines Frühwarnsystems dienten beim ersten Treffen als Diskussionsgrundlage. Als ersten Schritt fanden sich jene an einem Tisch zusammen, die sich mit der gleichen Variante identifizieren konnten, um ihr Verständnis der einzelnen Komponenten zu vertiefen. Folgende Diskussionsfragen wurden zusätzlich zu den Optionen vorgegeben:

- Was sind Ihrer Meinung nach die Prioritäten bzw. kritische Punkte bei einem Frühwarnsystem?
- Wie kann man die Optionen verbessern, damit sie ihre Ansichten zu einem zukünftigen Frühwarnsystem besser abbilden?
- Welche Informationen möchten Sie von einem Frühwarnsystem erhalten?
- Wer genau soll wofür verantwortlich sein?
- Brauchen Sie noch weitere Informationen, um diese Fragen beantworten zu können?

Es ging dabei noch nicht darum, die Varianten zu vergleichen und die unterschiedlichen Standpunkte ausdiskutieren, sondern vielmehr um die gemeinsame Reflexion des eigenen Standpunktes. Im Sinne der Cultural Theory beugt diese Vorstufe im Beteiligungsprozess der Gefahr vor, dass Beteiligte während des Workshops zustimmen aber zurück in der gewohnten sozialen Umgebung wieder ihre ursprüngliche Haltung einnehmen.



Abb. 87: Diskussion beim ersten Workshop (Foto: Preuner)

Die Diskussionen waren jeweils vom Fokus der Optionen geprägt, beim “Technischen Expertensystem” ging es vorwiegend um die finanziellen und technischen Möglichkeiten, die dort vertretenen Fachleute nahmen eine erklärende Rolle ein. Es wurden zum Beispiel grundsätzliche Dimensionen einer möglichen Kostenbeteiligung geklärt, wobei sich herausstellte, dass die KritikerInnen von viel größeren Summen als angedacht ausgingen. Im Zuge von Diskussionen um die Grundgrenzen, die noch seit den Verschiebungen vor 10 Jahren noch vermessen werden müssen, waren sich die Anwesenden einig, dass die Dienstbarkeiten eine Grundbedingung sein müssen, um an einem Strang zu ziehen was ein Frühwarnsystem betrifft. Unter den Befürwortern des “Anwohner-zentrierten Frühwarnsystem” wurden rechtliche und institutionelle Möglichkeiten der Anwohnerbeteiligung diskutiert. Der Aspekt des besseren Informationsflusses (Option 3) wurde zusätzlich von den Proponenten der hierarchischen Option 2 gefordert, wodurch sich erste Aspekte einer Kompromisslösung zeigten. Es gab also eine Diskussionsbasis zur Anwohnerbeteiligung, die Streitpunkte lagen jedoch im Detail. Das hing damit zusammen, dass Anwohner und Experten die Frühwarnung als Service für Betroffene wahrnahmen, während die Gemeinde Kapazitäten aktiv auf Anwohner übertragen mochte.

Die Fronten zwischen den Fachleuten und der Politik wurden beim ersten Workshop deutlich sichtbar. Parallel zu deren Positionen im Rahmen des Beteiligungsprozesses gab es seit Beginn des LAMOND Projektes Bemühungen, zu einer Lösung zu kommen. Es wurde die Erstellung eines Notfallplanes in Auftrag gegeben und ein schon längere Zeit nicht funktionierendes Inklinometer für die Reparatur entnommen. Dies schadete jedoch nicht der Funktion der Workshops als Informationsplattform.

Workshop 2

Darauf aufbauend waren der zweite und dritte Workshop das Aufeinandertreffen und Ausdiskutieren der unterschiedlichen Positionen. Mittels der Anregungen im Zuge des ersten Workshops wurde beim zweiten am 16.02.2017 eine Kompromisslösung vorgeschlagen, die nun mit mehr Detailtiefe weiterentwickelt wurde. Eine kurze Zusammenfassung des bisherigen Beteiligungsprozesses und die Möglichkeit Experten zu befragen sollte neue Teilnehmer einbinden und alle auf den aktuellen Stand bringen. Der konzeptuelle Vorschlag eines möglichen Frühwarnsystems wurde bei einer gemeinsamen Diskussion besprochen und weiterentwickelt. Bei den Themen Monitoring, Information und Verantwortungsteilung standen konkrete Bedürfnisse und Zugänge der Beteiligten zur Diskussion. Die vorgeschlagene Monitoring-Technologie (Inklinometer, Niederschlags- und Abflussmessung, Piezometer, Laserscan) fand in Bezug auf die Automatisierung breite Zustimmung: „Menschen kommen und gehen!“ (Workshop Mitschnitt, A18, Gruppe Anwohner). Dies wurde mit einem offenen Umgang mit Information kombiniert. Dazu zählen einerseits die Frühwarnung der AnwohnerInnen bereits nach der ersten Warnstufe, die nur von Experten beurteilt wird: „Wir würden uns eine frühere Information schon wünschen, weil es uns alle betrifft!“ (Workshop Mitschnitt, A17, Gruppe AnwohnerInnen). Andererseits soll durch regelmäßige Informationsveranstaltungen bei den Betroffenen sowie durch Schautafeln am Gelände in der breiten Öffentlichkeit Bewusstsein geschaffen werden.

Workshop 3

Das für den dritten Workshop am 28.03.2017 offene Thema war die Frage der rechtlichen und finanziellen Regelung der Verantwortung und Aufgabenverteilung. Das Thema

Verantwortungsteilung sollte weiter vertieft und diskutiert werden. Dabei sollte der Fokus auf Finanzierung und rechtlichen Fragen bei der Instandhaltung des Frühwarnsystems liegen. Da diese Kontroverse einer Steigerung der Eigenverantwortung der betroffenen GrundbesitzerInnen bzw. von öffentlicher und privater Verantwortung handelte, spielten hierbei die egalitären bzw. hierarchischen Diskurse der Cultural Theory eine wichtige Rolle. Es stellte sich die Frage, ob über eine Genossenschaft der Beitrag der AnwohnerInnen zu den jährlichen Erhaltungskosten sowie deren Mitbestimmung durch eine Vertretung im Monitoring Komitee geregelt werden soll. Im Zuge der Diskussion konnte man sich zwar nicht auf die Gründung einer Genossenschaft einigen, es wurde allerdings die Bereitschaft zur Mitsprache und Kostenbeteiligung in Aussicht gestellt. Generell steigerte sich das Interesse am Beteiligungsprozess seitens der AnwohnerInnen während des Workshops. Für die Forderung der Fachleute und Stadtgemeinde nach einer institutionalisierten AnwohnerInnenbeteiligung bei der Instandhaltung des Frühwarnsystems breite Zustimmung zu erhalten, würde allerdings noch mehr Information und Bewusstseinsbildung erfordern. Die nach dem dritten Workshop vorliegende Kompromisslösung (siehe Abb. 88) beinhaltet somit Detailfragen zum Aspekt der Verantwortungsteilung, die in einem lokal weitergeführten Diskussion Prozess gelöst werden soll.

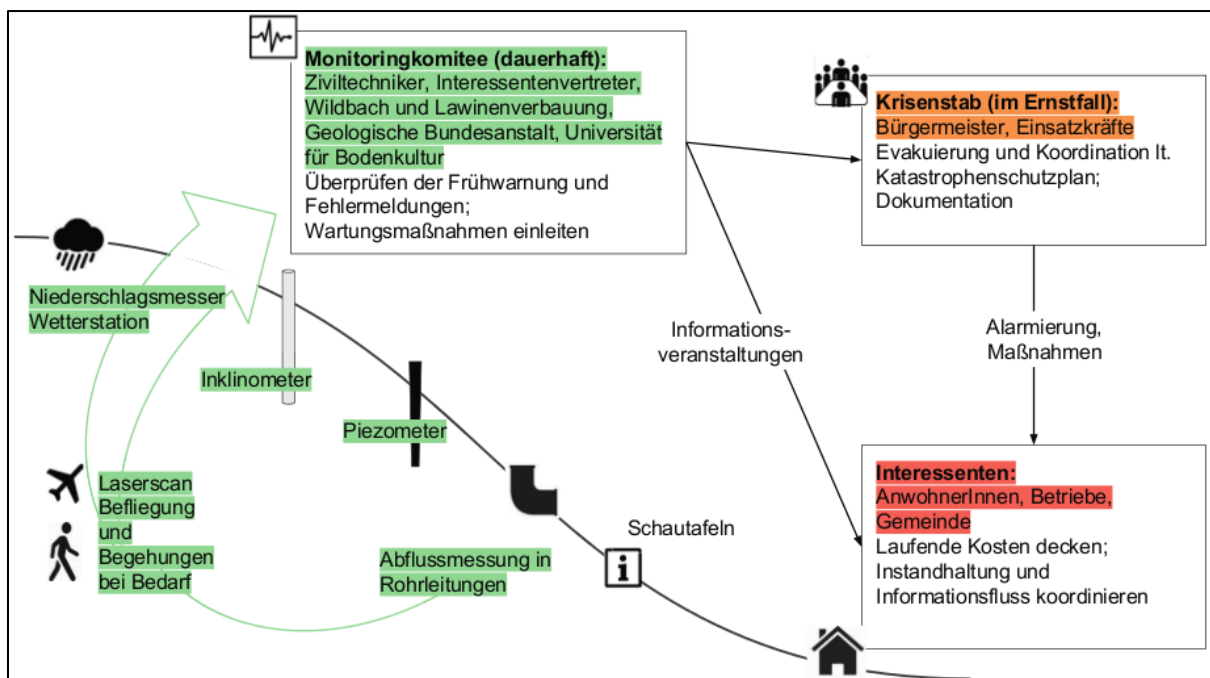


Abb. 88: Konzeptuelle Darstellung der Kompromisslösung am Ende der Workshops

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in schriftlichen Zusammenfassungen allen Interessierten zur Verfügung gestellt. Außerdem wurden die Forschungsergebnisse bei der Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt am 22. Juni 2017 vorgestellt, zu der auch die betroffenen AnwohnerInnen eingeladen wurden. Des Weiteren wurden die Ergebnisse in Form von zwei wissenschaftlichen Papieren publiziert.

4.6 Ergebnisse und Ausblick

Für die Sicherung der in der roten Gefahrenzone wohnhaften Gmundner Bevölkerung hatte man sich von 2015 bis 2017 schrittweise an die Ausgestaltung eines Frühwarnsystems angenähert. Ein solch partizipativer und integrativer Ansatz wird in der Literatur als immer wichtiger erachtet, um eine nachhaltige Funktionsweise zu garantieren. Nach einer umfassenden Diskursanalyse und der Einbeziehung aller Beteiligten konnten von Fachleuten Optionen entwickelt werden, die gemeinsam mit den EndnutzerInnen weiterentwickelt und zu einer Lösung ausgearbeitet wurden. Des Weiteren wurden die Betroffenen über die derzeitige geologische Situation am Gschlifgraben sowie über grundlegende Komponenten eines zukünftigen Frühwarnsystems informiert. Nach anfänglicher Skepsis entwickelte sich eine Dynamik unter den Beteiligten, die eine Kompromisslösung begünstigt. Am Anfang des Diskussionsprozesses in Gmunden war eine breite Palette an Aspekten offen. Auf das Thema Technologie und Information konnte sich recht schnell verständigt werden, während das Thema Verantwortungsteilung sich als kontrovers darstellte.

Grundlegend für das Verständnis unter allen Beteiligten war, die Sanierungsmaßnahmen (Drainagen, Brunnen, usw.) sind vom Frühwarnsystem (Inklinometer, Piezometer, usw.) zu unterscheiden. Ersteres ist seit fast 10 Jahren in Betrieb und wird vollständig von öffentlicher Hand getragen. Zweiteres ist rechtliche Bedingung der Wiederbesiedlung und derzeit in Planung, wobei die Kosten für die Installation von Bund/Land/Gemeinde getragen werden und für die Instandhaltungskosten eine Interessentenbeteiligung angedacht wird. Diese Kosten beruhen auf der technischen Kombination aus Wetterstation, Abflussmessung, Inklinometern, Piezometern und Laserscanbefliegungen sowie Begehungen. Diese Geräte liefern Informationen für die Beurteilung des Hangrutschungsrisikos. Wenn gewisse Schwellenwerte überschritten werden, dienen diese Daten dem Monitoring Komitee als Grundlage für die Entscheidung, ob gewarnt werden soll. Das Monitoring Komitee besteht aus den geotechnischen Institutionen, die mit dem Datenmanagement und der Wartung der Geräte betraut sind, und soll von einer Vertretung der EndnutzerInnen koordiniert werden. Die EndnutzerInnen, auch Interessentinnen, sind all jene, die von den Schutzmaßnahmen einen Vorteil erlangen. Dazu zählen die BesitzerInnen von Liegenschaften im Gefahrenbereich sowie die Gemeinde als Betreiberin des betroffenen Straßenabschnittes und im Interesse des Tourismus. EndnutzerInnen sind verantwortlich für die laufenden Kosten und sollen regelmäßig von den Fachleuten informiert werden. Wenn das Monitoring Komitee eine kritische Änderung am Gschlifgraben feststellt, wird der Bürgermeister kontaktiert, der einen Krisenstab einberuft. Dieser besteht aus GemeindevertreterInnen, Einsatzkräften, Ziviltechniker und der WLV. Der Krisenstab koordiniert und dokumentiert alle nötigen Maßnahmen im Ernstfall.

Im Folgenden werden die zentralen Empfehlungen an die lokalen Entscheidungsträger zusammengefasst:

Technologie: Die eingesetzte Technologie soll weitestgehend automatisiert sein; Datenmanagement, Frühwarnung und Fehlermeldungen zu beurteilen, sowie die Wartungsmaßnahmen (Begehungen, Reparaturen) durchzuführen, wird an ExpertInnen vergeben.

Information: Die InteressentInnen sollen regelmäßig über den Stand der Dinge informiert werden, etwa durch jährliche Informationsveranstaltungen. Dabei kann Aktuelles zur Geologie und zum Frühwarnsystem besprochen werden und der für den Hangrutsch relevante Teil des Katastrophenschutzplans aktualisiert werden.

Verantwortung: Die Gemeinde koordiniert die Instandhaltung in Zusammenarbeit mit WLV und Ziviltechnikern. Eine innerhalb der Gemeinde dafür zuständige Ansprechperson sollte idealerweise auch die regelmäßigen Informationsveranstaltungen - unter Mitwirken engagierter AnwohnerInnen oder anderer Institutionen - initiieren.

AnwohnerInneneinbindung: In den für das Frühwarnsystem relevanten Gremien sollen neben Ziviltechnikern und Gemeindebeamten auch die AnwohnerInnen vertreten sein. Die jährlichen Informationsveranstaltungen könnten dazu genutzt werden, einen Sprecher oder eine Sprecherin zu wählen. Von Vorteil wäre, sich dafür auf eine rechtliche Basis (WRG 1959, VerG 2002, o.ä.) zu einigen. Der Vorteil der Gründung einer Wassergenossenschaft wären stärkere Mitspracherechte, zum Beispiel durch eine Mehrheitsbildung unter den AnwohnerInnen, die bindend für jeweiligen Entscheidungen ist. Mitsprache wäre aber auch informell oder auf freiwilliger Basis wie in Form eines Vereines denkbar, wie von einigen AnwohnerInnen bevorzugt. Im Zuge der notwendigen Dienstbarkeiten für die Wartung des Frühwarnsystems sollen auch alle ausstehenden Dienstbarkeiten für die Sanierungsmaßnahmen unterzeichnet werden.

Kostenbeitrag: Gegenstand des Dialogs unter den InteressentInnen - unabhängig ob genossenschaftlich, vereinsrechtlich oder informell - ist unter anderem die Finanzierung der Instandhaltungskosten. Die Gemeinde behält sich vor, den Liegenschaften in der Gefahrenzone einen Interessentenbeitrag für die laufenden Kosten einzuheben. Die Größenordnung dafür variiert je nach Grundstücksgrenze. Zusätzlich hängt dies von der diesbezüglichen politischen Willensbildung ab.

Öffentlichkeit: Zum verbesserten Bewusstsein über die Maßnahmen und die Gründe der Gefahrenzone sowie zur besseren Transparenz der wissenschaftlichen Aktivitäten sollen Schautafeln dienen. Dafür eignet sich der bereits von Museum und WLV entworfene "Geotrail" der am Gschlifgraben geplant ist.

Diese Empfehlungen sind das vorläufige Ergebnis des LAMOND Beteiligungsprozesses in Gmunden. Die Installation des Frühwarnsystems wird im Rahmen eines mehrjährigen Projektes seitens Gemeinde, WLV und Ziviltechnikern durchgeführt und dann an die EndnutzerInnen/Interessentinnen übergeben werden. Neben den geklärten Punkten zum Thema Technologie und Information soll die Diskussion um die administrative Ausgestaltung der Instandhaltung unter den EndnutzerInnen weitergehen. Es liegt an den Entscheidungsträgern, diese umzusetzen, um die Liegenschaften am Gschlifgraben in einer angemessenen und langfristigen Weise vor der Hangrutschgefahr zu schützen.

5 Nationale/Internationale Kooperationen und Dissemination

Das vorhandene Monitoring Netzwerk baut sehr stark auf nationalen und internationalen Kooperationen auf, die zum Teil schon in den vorangegangenen Projekten etabliert wurden. Auf nationaler Ebene ist hier vor allem die Wildbach- und Lawinerverbauung (verschiedene Sektionen und Gebietsbauleitungen) hervorzuheben, wo für die Standorte Gschlifgraben (OÖ), Pechgraben (OÖ) und Navis (T) enge Kooperationen bestehen. Eine weitere nationale Kooperation besteht mit dem Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien, die an der Hangrutschung in Gresten (NÖ) aktiv ist. An den Hangrutschungen Pechgraben (OÖ) und Gschlifgraben (OÖ) wird zudem mit der ebenfalls dort tätigen Universität für Bodenkultur Wien (Institut für Alpine Naturgefahren) in unterschiedlichen Ausmaß zusammengearbeitet. Bei den Monitoring Stationen im Ausland (Frankreich und Italien) bestehen sowohl Kooperationen mit den lokalen Gemeinden als auch mit den an den entsprechenden Rutschungen aktiven, führenden Forschungsinstitutionen. Hier muss allerdings angemerkt werden, dass manche Kooperationen nicht immer im gewünschten Ausmaß erfolgen, sodass zum Teil vorhandene Messdaten und Ergebnisse nicht in die Gesamtinterpretation von Monitoring Stationen einfließen können. Einen wesentlichen Teil der internationalen Kooperationen stellt die Zusammenarbeit mit Dr. Jung-Ho Kim vom KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) im Bereich der Softwareentwicklung dar. Diese bereits in den vorangegangenen Projekten gewachsene Zusammenarbeit wurde in diesem Projekt intensiv fortgeführt.

Durch die direkte Involvierung in das Projekt besteht auch eine enge Kooperation mit der IIASA (Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse, MSc. Monika Riegler bzw. MSc. Philipp Preuner) und der ETH Zürich (Dr. Anna Scolobig).

Ein weiterer wichtiger Punkt der sowohl in den Bereich internationale Kooperationen als auch Dissemination fällt, ist die operative Betreuung von zwei Diplomarbeiten, die sich mit der detaillierten Auswertung und Interpretation der Monitoring Daten einer bereits geschlossenen und einer im Laufe des LAMOND-Projektes geschlossenen Monitoring Station befassen. Dies betrifft die Stationen Laakirchen (OÖ, A) und Rosano (I). Die entsprechenden Diplomarbeiten wurden im Jahr 2016 fertiggestellt und an den jeweiligen Universitäten im Rahmen der Abschlussprüfungen approbiert (siehe Publikationen: Amabile 2016 und Guardiani 2016). Im zweiten LAMOND-Projektjahr startete auch die operative Betreuung zweier Diplomarbeiten an der Universität Wien/Institut für Geographie und Regionalforschung, die sich in ähnlicher Weise mit der Auswertung und Interpretation der bisher akquirierten Monitoring Daten an der Hangrutschung Gresten beschäftigen. Hier wurden einerseits die geoelektrischen Daten zur Verfügung gestellt und andererseits wurde die entsprechende Erfahrung in den Prozess der Datenanalyse und Auswertung eingebracht. Zum Zeitpunkt des Projektendes waren die beiden Diplomarbeiten noch in Bearbeitung.

Die im LAMOND-Projekt erzielten Ergebnisse wurden in diversen Journalen publiziert und bei diversen Tagungen in unterschiedlicher Form präsentiert. Die Auflistung der entsprechend projektrelevanten Publikationen findet sich in Kapitel 6.

Zwei wichtige Meilensteine der Dissemination waren die beiden zum Teil im Rahmen des LAMOND-Projektes organisierten GELMON-Workshops („3rd International Workshop on Geoelectrical Monitoring“ und „4th International Workshop on Geoelectrical Monitoring“). Beide Veranstaltungen wurden in Räumlichkeiten, die das BMWFW im Palais Harrach zur

Verfügung gestellt hat, durchgeführt. Die Teilnehmeranzahl lag bei beiden Veranstaltungen in etwa bei 85 Personen. Darunter waren weltweit führende Wissenschaftler dieses Forschungsbereichs. Die wissenschaftlichen Beiträge der Workshops wurden von der Geologischen Bundesanstalt als „Berichte der Geologischen Bundesanstalt“ publiziert.

6 Projektbezogene Publikationen

Peer reviewed

Scolobig A., Riegler M., Preuner P., Linnerooth Bayer J., Ottowitz D., Hoyer S., Jochum B., (2017): Warning system options for landslide risk: a case study in Upper Austria, Resources 6: 37. doi: 10.3390/resources6030037

Preuner P., Scolobig A., Linnerooth-Bayer J., Ottowitz D., Hoyer S., Jochum B., (2017): A participatory process to develop a landslide warning system: paradoxes of responsibility sharing in a case study in Upper Austria, Resources 6(4): 54. doi: 10.3390/resources6040054

Ottowitz D., Jochum B., Pfeiler S., Gruber S., Supper R., Kim J.-H., (2017): Pechgraben landslide: evaluation of geophysical/geotechnical methods in terms of remediation support. In: Mikos M., Tiwari B., Yin Y., Sassa K. (eds) Advancing Culture of Living with Landslides. WLF 2017. Springer, Cham

Hoyer S., Ottowitz D., Jochum B., Pfeiler S., Supper R., Kim J.-H., (2017): Numerical Modelling of Hydrological Parameters for an Enhanced Interpretation of ERT Monitoring Data. In: Mikos M., Tiwari B., Yin Y., Sassa K. (eds) Advancing Culture of Living with Landslides. WLF 2017. Springer, Cham

Nicht peer reviewed

Guardiani C., Ottowitz D., Jochum B., Pfeiler S., Supper R., (2017): Long-term electrical resistivity data analysis for landslide monitoring: the case study of Rosano. – In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C. (Red.), Arbeitstagung 2017 - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 19.-22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, 247-248, Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Ottowitz D., Jochum B., Supper R., Pfeiler S., Gruber S., Ita A., Baron I., (2017): Das internationale Geomonitoringnetzwerk der GBA. – In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C. (Red.), Arbeitstagung 2017 - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 19.-22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, 229-230, Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Jochum B., Ottowitz D., Gruber S., Supper R., Ita A., (2017): Geophysikalisches und Geotechnisches Monitoring am Gschliefgraben. – In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C. (Red.), Arbeitstagung 2017 - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 19.-22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, 202-203, Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Vouillamoz N., Rothmund S., Joswig M., Jochum B., (2017): Patterns of endogenous seismicity at active clay-rich landslides. – In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C. (Red.), Arbeitstagung 2017 - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 19.-22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, 268, Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Jochum B., Ottowitz D., Gruber S., Pfeiler S., Supper R., Peresson M., Moser G., Gasperl W., (2017): Katastropheneinsatz in Pechgraben. – In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C. (Red.), Arbeitstagung 2017 - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 19.-22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, 201, Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Römer A., Supper R., Kreuzer G., Jochum B., Ottowitz D., Pfeiler S., (2017): Entwicklung des geoelektrischen Messsystems der GBA. – In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C. (Red.), Arbeitstagung 2017 - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 19.-22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, 213-214, Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Preuner P., Riegler M., Scolobig A., (2017): Sozialwissenschaftliche Aspekte beim Aufbau eines Frühwarnsystems am Gschlifgraben– In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C. (Red.), Arbeitstagung 2017 - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 19.-22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, 185-190, Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, Wien

Guardiani C., Amabile A. S., Jochum B., Ottowitz D., Supper R., (2017): Geoelectrical monitoring of landslides: results from the sites of Laakirchen (Austria) and Rosano (Italy). - Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-14718-1, EGU General Assembly, Vienna Austria, 2017

Vouillamoz N., Rothmund S., Joswig M., Malet J.-P., Jochum B., (2017): Passive seismic monitoring of landslides' creep: Case studies at Super-Sauze (Southeastern France) and Pechgraben (Upper Austria) clay-rich landslides. - Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-9561, EGU General Assembly, Vienna Austria, 2017

Provost F., Hibert C., Vouillamoz N., Malet J.-P., Ottowitz D., Jochum B., (2017): Catalogs of micro-seismicity recorded at the Pechgraben landslide (Upper Austria). - Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-14490, EGU General Assembly, Vienna Austria, 2017

Hoyer, S. (Ed.), (2017): GELMON 2017: Fourth International Workshop on Geoelectrical Monitoring: Book of Abstracts: November 22nd to November 24th, 2017, Vienna, Austria. – Berichte der Geologischen Bundesanstalt, 124, 61 S., Wien

Jochum B., Ottowitz D., Pfeiler S., Gruber S., Hoyer S., Supper R., Schattauer I.: Geophysical measurements and monitoring on the Pechgraben Landslide in Upper Austria - Geophysical Research Abstracts Vol. 18, EGU2016-5583-1, 2016, EGU General Assembly, Vienna Austria, 2016.

Hoyer S., Ottowitz D., Supper R., Jochum B., Riegler M., Scolobig A., Pfeiler S.: Hydrological Interpretation of ERT Monitoring Data on active landslides by implementation of numerical modelling at sites of the LAMOND Long-Term Landslide Monitoring Network - Geophysical Research Abstracts Vol. 18, EGU2016-13308-1, 2016, EGU General Assembly, Vienna Austria, 2016.

Riegler M. Scolobig A., Ottowitz D., Supper R., Hoyer S.: Stakeholder procedure to develop an end user focused early warning system. Proceedings of Society for Risk Analysis Europe Conference 2016, 20th – 22th June, Bath, United Kingdom, 2016.

Gruber, S. (Ed.), (2015): GELMON 2015: 3rd International Workshop on Geoelectrical Monitoring: Collection of Abstracts: November 24th – November 26th, 2015, Vienna: International Workshop in the frame of the ÖAW project LAMOND and the BMWF project GEOMONITORING. – Berichte der Geologischen Bundesanstalt, 112, 88 S., Wien

Eingereicht

Hauck C., Stummvoll M. J., Jochum B., Guardiani C., Glade T., (2018): The influence of hydro-meteorological conditions on landslide dynamics – an application to the Salcher landslide in Gresten, Lower Austria. - Geophysical Research Abstracts Vol. 20, EGU2018-15672, EGU General Assembly 2018

Lidauer S., Jochum B., Ottowitz D., Stummvoll M. J., Glade T., (2018): Geoelectric long-time monitoring: Changes and pattern within subsurface resistivity during different precipitation events in the Salcher landslide, Gresten (Lower Austria). - Geophysical Research Abstracts Vol. 20, EGU2018-12679-1, EGU General Assembly 2018

Diplomarbeiten laufend

Lidauer S.: Entwurf: Analyse von Geoelektrikdaten einer gravitativen Massenbewegung in Gresten (Supervisor: Thomas GLADE) am Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien

Hauck c.: Hydrological analysis of the Lower Austrian Salcher-Slide based on 4D-ERT data (Supervisor: Thomas GLADE) am Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien

Diplomarbeiten abgeschlossen

Amabile A.S., (2016): Geoelectrical methods for landslide monitoring: the case study of Laakirchen, Upper Austria (Unpublished Master thesis). University of Salerno, Fisciano, Italy, 2016

Guardiani C., (2016): Long-term electrical resistivity data analysis for landslide monitoring: the case study of Rosano (Unpublished Master thesis). Politecnico di Milano, Milano, Italy

7 Literatur

Amabile A.S., (2016): Geoelectrical methods for landslide monitoring: the case study of Laakirchen, Upper Austria (Unpublished Master thesis). University of Salerno, Fisciano, Italy, 2016

Basher R., (2006): Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. *Phil. Trans. R. Soc.*, 364, 2167-2184

Bell R., (2010): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). *Monitoring, Modellierung, Implementierung*. 270 S., Klartext Verlag, Essen

Chambers J., Meldrum P., Wilkinson P. Gunn D., Uhlemann S., Swift R., Inauen C., Kuras O., Sibbett L., Whiteley J., Slater N., Butler S., (2017): Towards a geophysical system for the remote autonomous monitoring of the near surface. In: Hoyer, S. (Ed.): *GELMON 2017: 4th International Workshop on Geoelectrical Monitoring: Book of Abstracts: November 22nd – November 24th, 2017, Vienna, Austria.* – *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 124, p. 29, Vienna

Ehrendorfer T., (1987): *Zur Geologie der Weyerer Bögen im Gebiet von Großraming a.d. Enns (OÖ).*- unveröff. Diplomarbeit Formal- u. Naturwiss. Fak., Univ. Wien, 84 S., Wien

Engels A., (2015): *Landslide dynamics - from historical data to monitoring systems.* Masterarbeit, Universität Wien. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie

Gill P.E., Murray W., Saunders M. A., (2002): SNOPT: an SQP Algorithm for large-scale constrained optimization. *SIAM H.OPTIM.*, Vol. 12, No. 4, pp. 979-1006.

Grandjean G., Hibert C., Bitri A., Travelletti J., Malet J.-P., (2009): Geophysical data fusion applied to the characterization of the La Valette landslide. In: Malet, J.-P., Remaître, A., Boogard, T.A. (Eds.): *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling*, Strasbourg, CERIG Editions, pp. 119-124

Griffiths, D. V. & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite element. *Geotechnique* 49, No. 3, 387-403, DOI: 10.1680/geot.1999.49.3.387

Guardiani C., (2016): *Long-term electrical resistivity data analysis for landslide monitoring: the case study of Rosano* (Unpublished Master thesis). Politecnico di Milano, Milano, Italy

Hajer M. A., (1995): *The Politics of Environmental Discourses. Ecological Modernization and the Policy Process.* Oxford University Press, Oxford

Hübl J., Schraml K., Lindner G., Tartarotti T., Gruber H., Gasperl W., Supper R., Jochum B., Ottowitz D., Gruber S., Marschallinger R., Moser G., (2015): Synthesebericht der Höhenberg- Rutschung im Pechgraben/Großraming. IAN Report 158, Universität für Bodenkultur, Wien

Intrieri E., Gigli G., Casagli N. and Nadim F., (2013): Brief communication "Landslide Early Warning System: toolbox and general concepts", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 85-90, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-85-2013>

Janda C., (2000): Geologisch-fazielle Untersuchungen in der Lunzer Decke süd-westlich von Weyer (Oberösterreich).- unveröff. Dipl.-Arb., Formal- u. Naturwiss. Fak., Univ. Wien, 99 S., Wien

Jochum B., Lotter M., Ottner F., Tiefenbach K., (2008): Geophysikalische und ingenieurgeologische Methoden zur Untersuchung von durch Massenbewegungen bedingte Bauschäden in Niederösterreich (Fallstudie Gresten - BBK-Projekt NC-62/F (2007) und ÜLG-35 (2007)). Geologische Bundesanstalt und Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich

Kim J.-H., Yi M.-J., Park S.-G., & Kim J. G., (2009): 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model. *Journal of Applied Geophysics*, 68(4), 522–532

Kim J.H., Supper R., Tsourlos P. and Yi M.J., (2013): Four-dimensional inversion of resistivity monitoring data through Lp norm minimizations. – *Geophysical Journal International*, 195(3), 1640-1656, Doi: 10.1093/gji/ggt324. (No OA)

Kim J.-H., Yi M.-J., Supper R. and Ottowitz D., (2014): Simultaneous Inversion of Resistivity Structure and Electrode Locations in ERT, *Proceedings of Near Surface Geoscience 2014*, Athens

Linnerooth-Bayer J., Scolobig A., Ferlisi S., Cascini L. et al., (2016): Expert engagement in participatory processes: translating stakeholder discourses into policy options. *Nat Hazards* 81(S1):69–88

Lovisolò M., (2012): Case histories – Analysis of real monitoring data: Rosano, in: Baron & Supper (Eds.): *The Safeland Project, Deliverable 4.6, Report on evaluation of mass movement indicators*, p. 284-294, Vienna, 2012.

Löschner L., Nordbeck R., Scherhauser P., Seher W., (2016): Scientist–stakeholder workshops: A collaborative approach for integrating science and decision-making in Austrian flood-prone municipalities, *Environmental Science & Policy*, Volume 55, Part 2, 2016, Pages 345-352, ISSN 1462-9011

Moser G., (2009): Hangbewegung Gschlifgraben, Fachübergreifender Synthesebericht, Gmunden

Müller A., (1984): Die neokome Aptychenkalkfazies der Schneebergmulde im Bereich der Weyerer Bögen (Reichraminger Decke, Nördliche Kalkalpen, OÖ).- un-veröff. Vorarbeit Formal- u. Naturwiss. Fak. Univ. Wien, 86 S., Wien

Ottowitz D., Jochum B., Pfeiler S., Gruber S., Supper R., Kim J.-H., (2017): Pechgraben landslide: evaluation of geophysical/geotechnical methods in terms of remediation support. In: Mikos M., Tiwari B., Yin Y., Sassa K. (eds) Advancing Culture of Living with Landslides. WLF 2017, P. 289-300. Springer

Parker D. J., Priest S. J. and Tapsell S. M., (2009): Understanding and enhancing the public's behavioural response to flood warning information. *Met. Apps*, 16: 103–114. doi:10.1002/met.119

Pavlik H., (1989): Zur Geologie der Weyerer Bögen südlich von Großraming im Ennstale (Oberösterreich).- unveröff. Dipl.-Arb., Formal- u. Naturwiss. Fak., Univ. Wien, 97 S., 55 Abb., 2 Beil., Wien

Ruttner A. & Schnabel W., (1988): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000 Blatt 71 Ybbsitz.- Geol. B.-A.; Wien

Samyn K., Travelletti J., Bitri, A., Grandjean G., Malet J.-P., (2012): Characterization of a landslide geometry using 3D seismic refraction travelttime tomography: The La Valette landslide case history. *Journal of Applied Geophysics* 86 (2012), P. 120-132

Sausgruber T., (2015): Ingenieurgeologischer Bericht zum Projekt „Hangbewegung Kerschbaumsiedlung, Navis“, Geologische Stelle Forsttechnischer Dienst für Wildbach- Und Lawinenverbauung, Innsbruck

Scolobig A., Thompson M. & Linnerooth-Bayer J., (2016): Compromise not consensus: designing a participatory process for landslide risk mitigation. *Nat Hazards* (2016) 81 (Suppl 1) 45-68

Supper R., Ottowitz D., Jochum B., Kim J.-H., Römer A., Baron I., Pfeiler S., Lovisolo M., Gruber S., Vecchiotti F., (2014): Geoelectrical monitoring: an innovative method to supplement landslide surveillance and early warning. – *Near Surface Geophysics* 12(1), pp. 133-150, February 2014. Doi: 10.3997/1873-0604.2013060. Gold OA

Squarzoni C., Delacourt C., Allemand P., (2005): Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps). *Engineering Geology*, 79(3-4): 215-229

Squarzoni C., Delacourt C., Allemand P. (2003): Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, 68(1-2): 53-66

Travelletti J., Malet J.-P., Hibert C., Grandjean G., (2009): Integration of geomorphological, geophysical and geotechnical data to define the 3D morpho-structure of the La Valette mudslide (Ubaye Valley, French Alps). In: Malet J.-P., Remaître A., Boogard T.A. (Eds.): *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling*, Strasbourg, CERG Editions, pp. 203-208

Tschunnig F, Schweiger HF, Sloan SW, Lyamin AV, Raissakis I. Comparison of finite element limit analysis and strength reduction techniques. *Geotechnique* 2015;65(4):249-57 <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.022>

UNISDR, (2007): Terminology. <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology#letter-e>

Widder W. R., (1988): Zur Stratigraphie, Fazies und Tektonik der Grestener Klip-penzone zwischen Maria Neustift und Pechgraben, OÖ.- unveröffentl. Dissertation, Formal- u. Naturwiss. Fak., Univ. Wien, Wien