

Terrestrische Radarinterferometrie und terrestrisches Laserscanning zur Überwachung alpinen Geländes: Praxiserfahrungen und Theorie

JEMIL BUTT, ZAN GOJCIC, LORENZ SCHMID & ANDREAS WIESER

Terrestrische Radarinterferometrie (TRI) und terrestrisches Laserscanning (TLS) sind Technologien, die sich dank ihrer für Langdistanzmessungen geeigneten, quasi flächenhaften Aufnahmeverfahren insbesondere zur Erfassung grossräumiger Deformationsphänomene eignen. Im Rahmen eines von der ETH durchgeführten Projektes zur Evaluierung geodätischer Messkonzepte für die Überwachung hangrutschungs- und felssturzbezogener Geogefahren in der Südschweiz wurden im Sommer 2019 Messungen mit TRI und TLS in hochalpinem Gelände durchgeführt.

Aufbau und autonomer Betrieb der Instrumente sowie die Auswertung der unter solchen Bedingungen erhobenen Daten bringen besondere Herausforderungen mit sich. Diese beinhalten hardwaretechnische Aspekte wie die Bereitstellung geeigneter Wetterschutzmassnahmen und einer über Monate stabilen Stromversorgung aber auch entsprechende Prozessierungsstrategien zur Verminderung des Einflusses atmosphärischer Effekte oder zur Extraktion von Verschiebungsfeldern aus Folgen von Punktwolken. Wir präsentieren Lösungsansätze, deren Umsetzung in der Praxis und diskutieren deren Leistungsfähigkeit vor dem Hintergrund der während des Projektes gesammelten Erfahrungen. Besondere Beachtung erfahren die Quantifizierung und Korrektur atmosphärischer Effekte in der terrestrischen Radarinterferometrie mit Hilfe von Hilberträumen mit reproduzierendem Kern sowie die merkmalsbasierte Verarbeitung von Punktwolken mit Hilfe neuronaler Netze.

1. Einleitung

Die Erfassung von Oberflächenverschiebungen ist eine typisch geodätische Aufgabe mit oft sicherheitsrelevanten Aspekten. Sobald bestimmte Anforderungen an die räumliche oder zeitliche Abtastungsdichte überschritten werden, ist diese Art von Deformationsmonitoring nur noch unter grossem Aufwand mit klassischem Instrumentarium wie etwa Nivellement, GNSS oder Tachymetrie umsetzbar. Deshalb kommen vermehrt für flächenhafte Ausnahmen prädestinierte Technologien wie terrestrisches Laserscanning (TLS) und terrestrische Radarinterferometrie (TRI) zum Einsatz.

Insbesondere die Überwachung alpinen Geländes bezüglich des Auftretens von nicht apriori vorher exakt räumlich festzulegenden Geogefahren wie Hangrutschungen, Felsstürzen oder Gletscherabbrüchen profitiert von den durch TLS und TRI gebotenen Möglichkeiten. Beide Instrumente nutzen die von Teilen des Untersuchungsgebietes zurückgeworfenen Echos

elektromagnetischer Wellen, um diese Teile hinsichtlich ihrer absoluten Position oder relativer Verschiebung zu quantifizieren. Eine automatische Strategie zur Partitionierung des Untersuchungsgebietes garantiert die Aufnahme tausend Datenpunkte pro Sekunde, welche aggregierte Informationen über die insgesamt abgetastete Oberfläche bereitstellen. Trotzdem verfügen TLS und TRI über Funktionsspektren, die die der klassischen Instrumente nicht zwangsläufig generalisieren.

Die Aufnahmegeschwindigkeit beim TLS übersteigt bei prinzipiell gleicher Distanzmessmethodik die Aufnahmegeschwindigkeit klassischer Tachymetrie deutlich. Allerdings treten aufgrund der Geländeabtastung in fixen Winkelinkrementen statt zu durch Signalisierung mit Prismen wohldefinierten materiellen Punkten komplett andere Interpretabilitätsproblematiken auf. So enthält aufgrund des nicht-infinitesimalen Footprints ein einzelner Datenpunkt Informationen über die über den gesamten Footprint zurückgestreute Welle und ist prinzipiell als gewichtetes Mittel anzusehen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie zwei aus TLS Messungen generierte Punktwolken zum Schätzen der sie ineinander transformierenden Deformationsvektorfelder herangezogen werden können, wenn apriori keine in beiden Punktwolken bekannten korrespondierenden Punkte vorliegen. Bei der terrestrischen Radarinterferometrie ist die Problematik des untersuchungswürdigen Zusammenhanges zwischen Daten und dem die Daten generierenden Objekt noch ausgeprägter, da der Footprint des Radarsignales signifikant grösser ist als bei TLS und die rohen Messungen erst via Applikation mehrerer Fouriertransformationen zu dem vom Instrument ausgegebenen visuell interpretierbaren Output werden. Weiterhin sind bei grossen Beobachtungsdistanzen autokorrelierte Artefakte in den Daten zu finden, deren Struktur sich nicht zwangsläufig von der Struktur der zu erwartenden Deformation unterscheiden lässt. In einem alpinen Umfeld treten die eben umrissenen Herausforderungen theoretischer Natur in Konjunktion mit praktischen und logistischen Problemen auf, die auf die Notwendigkeit autarken Langzeitbetriebes zurückzuführen sind. Sowohl TLS als auch TRI sind bereits für Zwecke alpinen Monitorings eingesetzt worden und die etwa in CADUFF, R. ET AL.(2014), RIESEN, P. ET AL. (2011) und VOYTENKO, D. ET AL (2012) beschriebenen Problematiken decken sich mit den von uns beobachteten, wobei im Gegensatz zu den in anderen Quellen vorgebrachten Ansätzen wie etwa IGLESIAS, R. ET AL. (2014) die von uns eingenommene primär stochastische Perspektive die Qualität des abzuleitenden Schätzers über die Optimierung einer regularisierten Wahrscheinlichkeit zu wahren versucht. Wir gehen im folgenden Kapitel ein auf Zielsetzung und Durchführung eines vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt in Auftrag gegebenen und von der ETH Zürich durchgeführten Forschungsprojektes zur vergleichenden Überwachung einer felssturzgefährdeten Hangflanke im Mattertal mit GNSS, TRI und TLS. Einer explorativen Datenanalyse folgend beschäftigt sich Kapitel 3 mit den Besonderheiten der von TLS generierten Messungen und präsentiert ein auf Dimensionsreduktion mit neuronalen Netzen basierendes Verfahren zur Identifikation korrespondierender Punkte in Punktwolken mit dem Ziel einer regularisierten Schätzung von Deformationsfeldern durch approximative Lösung eines globalen Optimierungsproblem. Im darauf folgenden Kapitel 4 werden die Eigenschaften der mit TRI aufgenommenen Daten analysiert. Dabei wird der Fokus auf die Beschreibung des stochastischen Modelles für Rauschen, atmosphärische Abweichungen, und Deformationen gelegt, die allesamt als zufallsverteilte räumliche Funktionen

mit multivariater Gaussverteilung und somit als Elemente eines Hilbertraumes mit reproduzierendem Kern interpretiert werden. Diese Perspektive ermöglicht eine Trennung der Messdaten in Signale verschiedenen Ursprungs. Ein zusammenfassendes Kapitel stellt die Resultate der vorherig beschriebenen Prozessierungsschritte vergleichend gegenüber und weist auf Limitationen und potentielle Weiterentwicklungen der in diesem Paper vorgestellten Methoden hin.

2. Messkampagnenbeschrieb

2.1. Untersuchungsgebiet und Instrumentarium

Bei dem zu überwachenden Hangareal handelt es sich um einen von Quartärschutt und Augengneisen dominierten ca. 4 km² umfassenden Abschnitt des östlichen Mattertales im Kanton Wallis in der Südschweiz. Die in diesem Gebiet vorherrschende mittlere Steigung von etwa 50 % in Kombination mit hausgrossen Felsfragmenten unklaren Abgleitwiderstands, Bewegungsgeschwindigkeiten von mehreren dm/Jahr und ein besiedelter Talgrund werfen Fragen nach der Quantifizierbarkeit und Überwachbarkeit der Georisiken auf. Abbildung 1 gibt einen Überblick des Gebietes in Form einer Panoramaaufnahme vom Gegenhang aus sowie einer kartographischen Darstellung, die zusätzlich Informationen über bereits installierte GNSS Stationen des ebenfalls von der ETH Zürich mitbetriebenen X-sense Projektes enthält. Als Standort von TLS und TRI wurde ein auf etwa gleicher Höhe wie das Untersuchungsgebiet liegender Standpunkt am Gegenhang ausgewählt. Bei terrestrischem Laserscanning wird ein zu vermessendes Objekt durch einen Laserstrahl abgetastet. Ein typischerweise um eine Horizontalachse rotierender Spiegel leitet den von einer Diode erzeugten Laserstrahl ab und erzeugt so eine Schar von Strahlen umspannend eine diskrete Teilmenge aller möglichen Vertikalwinkel. Da der Spiegelaufbau angetrieben von einem Schrittmotor selber um die Vertikalachse rotiert, wird die Umgebung des TLS im Abstand diskreter Horizontal- und Vertikalwinkelinkremente abgetastet. Durch eine Analyse des von der angestrahnten Oberfläche zurückgeworfenen Signales lässt sich die Distanz zu ihr bestimmen; es resultieren Folgen von Kugelkoordinaten, welche nach Umrechnung ins Kartesische auch als Punktwolken bezeichnet werden.

Im Rahmen des Projektes wurde der auf Langdistanzmessungen ausgelegte VZ-4000 von Riegl Laser Measurement Systems verwendet. Mit einer Maximalreichweite von 4km, einem Abtastinkrement von ca 0.002° und einer von uns gewählten entfernungsabhängig einstellbaren azimuthalen Rotationsgeschwindigkeit von ca 0.015°/Sekunde ist dieses Instrument in der Lage, eine das Überwachungsgebiet repräsentierende Punktwolke innerhalb von etwa 2 Stunden aufzunehmen. Da die Deformationsgeschwindigkeiten mancherorts mehrere Meter pro Jahr betragen und das Rauschen des TLS in 150 m Entfernung eine Standardabweichung von 10 mm aufweist (RIEGL 2017) und sublinear skaliert, sollte die zwischen Monate auseinanderliegenden Aufnahmezeitpunkten eingetretene Deformation in den Punktwolken zu erkennen sein.

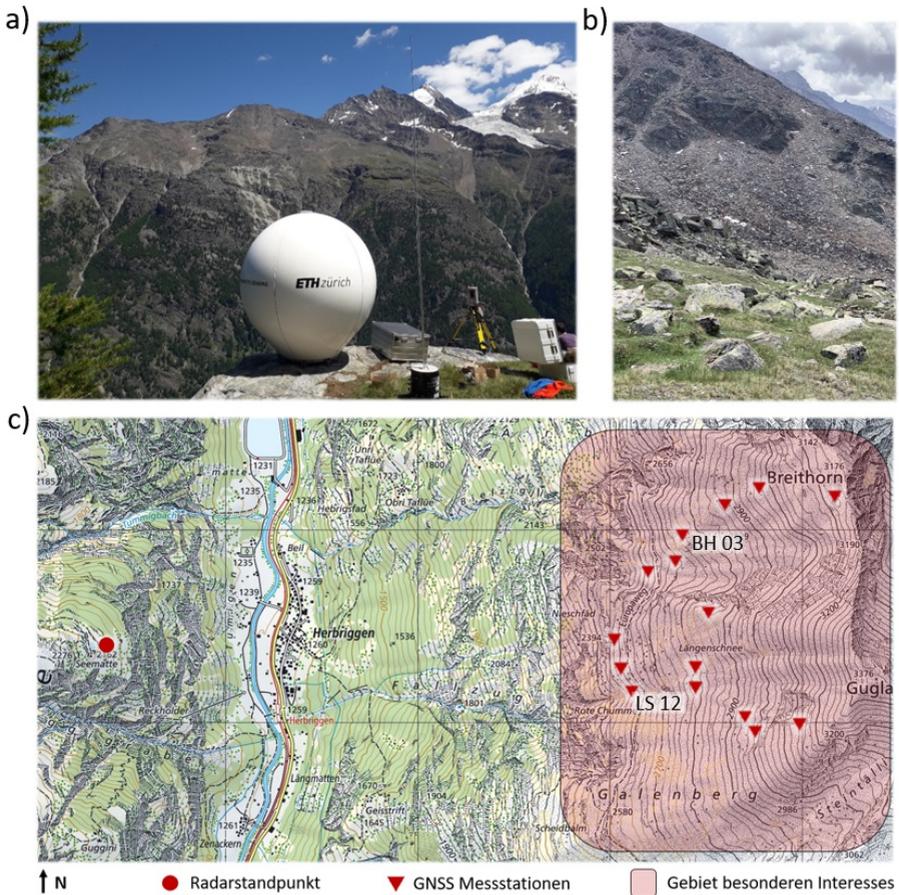


Abbildung 1: a) Fotografie des zu überwachenden Gebietes (Hintergrund) vom Gegenhang aus mit bereits installierten TLS und im Radom verborgenem TRI im Vordergrund. b) Beispielhafte Detailaufnahme des Quartärschutts im zu überwachenden Gebiet. c) Kartographische Illustration inkludierend die Lokationen der Fotografien in a) (Radarstandort) und b) (Nähe GNSS Messstation BH 03). Kartenmaterial ©2017 swisstopo (JD100042).

Tabelle 1: Instrumentenparameter für den VZ-4000 und das GPRI-II

Typ	TLS	TRI
Modell	Riegl VZ-4000	GPRI-II
		
Output	Punktwolke	Komplexe Matrix
Auflösung	Horizontalwinkel 0.002 ° Vertikalwinkel 0.002 °	Horizontalwinkel 0.1 ° Sichtlinienrichtung 0.75m
Geschwindigkeit	0.015 ° Azimuth / Sekunde	2.5° Azimuth / Sekunde
Wellenlänge	Infrarotbereich (1.5 μm)	Mikrowellenbereich (17.4 mm)
Messrauschen	$\sigma \leq 10$ mm in 150 m	$\sigma \leq 0.1$ mm

Im Vergleich zum TLS sind die Messungen des TRI weniger lokal und punkthaft. Bei den für die in diesem Paper beschriebenen Messungen wurde ein Radar realer Apertur des Typs GPRI-II der Firma Gamma Remote Sensing AG verwendet. Es sendet eine in Azimutrichtung stark fokussierte frequenzmodulierte elektromagnetische Welle mit einer mittleren Frequenz von 17.2 GHz und einer azimuthalen Halbwertsbreite von 0.4° aus. Das von der gesamten Oberfläche eines Geländeabschnittes zurückgeworfene Signal wird hinsichtlich Amplitude und Phase erfasst und in Form einer komplexen Zahl gespeichert. Durch Rotation des Antennenturmes um die Vertikalachse wird eine azimuthale Auflösung von 0.1° generiert sodass das letztendliche Produkt der Aufnahme eine komplexe Matrix ist. Zwei aufeinanderfolgende Messungen können zu einem Interferogramm verarbeitet werden, das Informationen über die räumliche Verteilung der Phasendifferenzen beider Messungen beinhaltet und indikativ für zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten eingetretene Deformationen ist. Eine einzelne Aufnahme des Beobachtungsgebietes ist innerhalb einer halben Minute möglich, sodass eine bedeutend höhere zeitliche Auflösung als beim TLS erreicht werden kann. Eine Zusammenfassung der Instrumentendetails findet sich in Tabelle 1. Es handelt sich dabei jedoch teils um noch an den genauen Kontext anzupassende Richtwerte, die eher den von uns für das oben beschriebene Projekt ausgewählten Betriebsmodus denn technische Limitationen widerspiegeln.

TLS und TRI wurden im alpinen Bereich bereits erfolgreich für die Vermessung (digitale Höhenmodelle) (FRIEDLI, E. ET AL. 2018), STROZZI T. ET AL. 2012) und für das Geomonitoring in der Ausprägung Gletschermonitoring (FRIEDLI, E. ET AL. 2019, BUTT, J. ET AL. 2017, VOYTENKO, D. ET AL 2012), Vulkanbeobachtung (RÖDELSPERGER, S. ET AL. 2010), sowie zur Überwachung von Erd- und Hangrutschungen (MARTINO, S. & MAZZANTI, P. 2014, TEZA G. ET AL. 2008, CADUFF, R. ET AL. 2014) eingesetzt. In jeder der oben genannten Fälle jedoch stellt sich die Frage nach Zuverlässigkeit und Interpretierbarkeit der Daten. Insbesondere ist für eine Deformationsanalyse eine genaue Beschreibung der mit der Entfernung zunehmenden atmosphärischen Einflüsse sowie eines Vorgehens zur Extraktion von Verschiebungsfeldern aus TLS Daten erforderlich (FRIEDLI, E. ET AL. 2019, BUTT, J. 2019).

2.2. Durchführung und explorative Datenanalyse

Das differenzielle Messprinzip terrestrischer Radarinterferometrie erfordert eine zeitlich höhere Auflösung der Messungen als beim TLS nötig, um durch Deformation, Atmosphäre oder Rauschen induzierte Ambiguitäten so gut als möglich zu vermeiden. Während die TLS Messungen als sporadisch wiederkehrend mit einem zeitlichen Abstand von einem Monat eingeplant werden, ist das TRI über den Erhebungszeitraum von eineinhalb Monaten unterbrechungsfrei zu betreiben. Um Informationen auch über die potentiell zeitlich hochfrequenten Effekte zu sammeln, wird mit einer Aufnahme alle zwei Minuten ein quasikontinuierlicher Betrieb angezielt, der jedoch das Vorhandensein von Stromversorgung, Datenübertragungsmöglichkeiten und Wetterschutz voraussetzt. Der Standpunkt des Radars muss zudem auf Monate stabil sein bei gleichzeitiger nahezu rückstandsfreier Dekonstruierbarkeit. Das abschliessend in die Realisierung überführte Konzept beinhaltet eine 110W Brennstoffzelle mit 200W Solarpanel, ein mit Gewindestangen im Fels verschraubtes und das GPRI schützende Radom sowie eine direktionale Antenne für mobiles Internet. Die Konfiguration ist in Abb 2 dokumentiert.

Mit Reflektorfolie ausgekleidete Cornerreflektoren wurden im Untersuchungsgebiet montiert und ermöglichen die Identifikation von Messpunkten in den TRI und TLS Datensätzen. Während die drei TLS Messungen zwischenfallsfrei verliefen, kam es bei den vom 11.07.2019 bis zum 28.08.2019 ausgeführten Betrieb des TRI zu zwei mehrtägigen Ausfällen, in denen das TRI aus bisher ungeklärten Gründen den ordnungsgemässen Betrieb einstellte. Als exemplarisches Produkt ist ein Aussagen über die Phasenqualität erlaubendes Interferogramm in Abbildung 3 zu sehen; aus TLS Daten generierte Punktwolken befinden sich in Abbildung 4.

Die Region primären Interesses um den talwärts des Breithorn gelegenen Hanges weist hohe Phasenqualität auf (Kohärenz ≈ 1) auf. Niedrigere Kohärenz ist vor allem auf Vegetation oder Radarschatten zurückzuführen. Die Daten legen zudem einen signifikanten Anteil an Rauschen und atmosphärischen Effekten nahe, die mit zunehmender Entfernung in ihrer Varianz ansteigen. Atmosphärische Einflüsse sind auch in den TLS Daten zu beobachten, wo sie sich als vertikalstreifenförmige Artefakte bei der Deformationsanalyse bemerkbar machen, siehe Abschnitt 3.1..

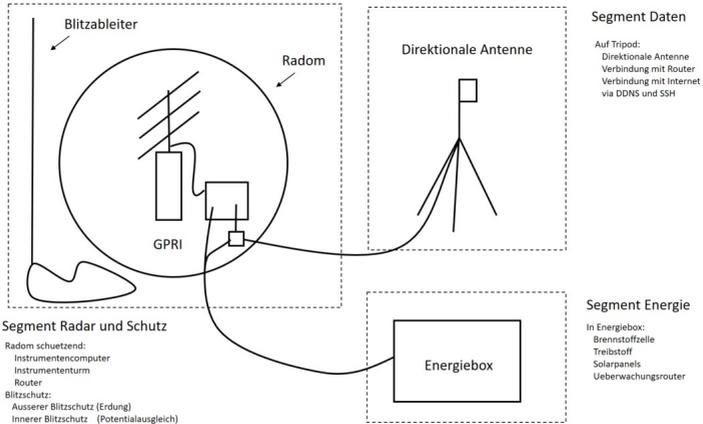


Abbildung 2: Das für die TRI Messungen zu installierende Material inklusive der Interaktionen untereinander. Die TLS Messungen erfordern lediglich ein Stativ sowie den VZ-4000 mit Ersatzbatterien.

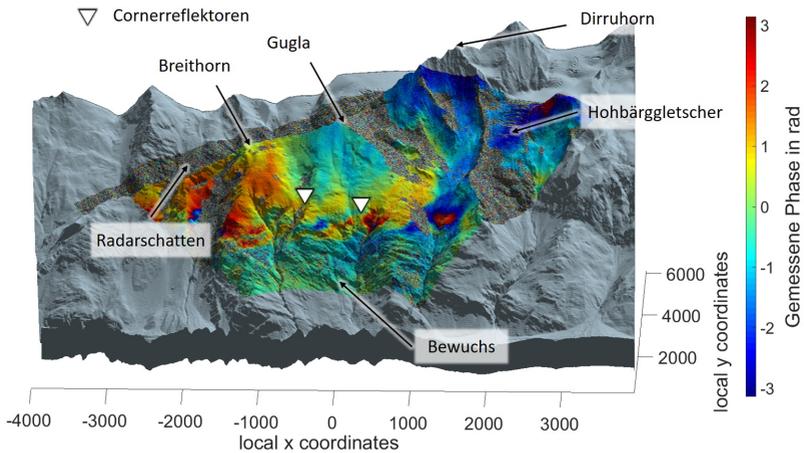


Abbildung 3: Die Phase eines aus TRI Messungen erstellten Interferogrammes als Funktion des Ortes geplottet auf ein DEM. Zur zusätzlichen Orientierung sind die wichtigsten Landmarken als Beschriftungen eingefügt.

3. Prozessierungsstrategien: TLS

3.1. Problematik der Deformationsanalyse

Das im Vorkapitel beschriebene Aufnahmeprinzip von TLS impliziert einige besondere Problematiken für die Deformationsanalyse von Punktwolken. So ist das von TLS empfangene und zu einem Einzelpunkt assoziierte Signal die Superposition der von der Geländeoberfläche rückgestreuten Welle und somit nicht im eigentlichen Sinne repräsentativ für einen Einzelpunkt im Gelände. Gerade über grössere Entfernung nimmt der Footprint des TLS nicht zu vernachlässigende Grössen an (Radius Footprint VZ-4000 15 cm in 1km, linear mit der Entfernung skalierend (RIEGL 2017)). Dies resultiert in einer Punktwolke, in der sich die tatsächlichen Geländemerkmale nur in geglätteter Form widerspiegeln und die im Wesentlichen aus gewichteten Mitteln besteht. Dies impliziert auch Vergleichbarkeitsprobleme bei der Aufnahme von unterschiedlichen Standpunkten aus. Darüber hinaus existieren noch folgende Probleme, die der Deformationsschätzung auf Basis von Langdistanz-Laserscanning in besonderem Masse abträglich sind:

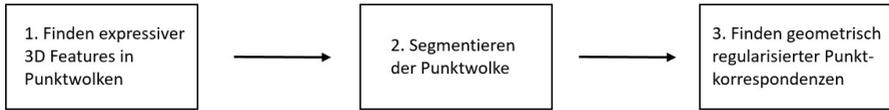
- Die über die Zeit schwankende Atmosphärenzusammensetzung führt durch geänderte Refraktionsbedingungen entlang des Ausbreitungspfades zu einer Krümmung des emittierten Laserstrahles. Zwei von der geometrischen Aufnahmesituation her völlig identische Messungen zu unterschiedlichen Zeiten messen somit Distanzen zu unterschiedlichen Geländeabschnitten (FRIEDLI, E. ET AL. 2019).
- Die üblichen Arten der Distanzberechnung zwischen Punktwolken ermitteln die Distanz jeden Punktes einer Punktwolke zum geometrisch nächsten Punkt (oder einer Oberfläche generiert aus) der Referenzpunktwolke. Da keinerlei Identifikation tatsächlich zugehöriger materieller Echtpunktwolken erfolgt, führen diese Verfahren nur bei geometrisch sehr regulären Transformationen zu aussagekräftigen Distanzen und sind bei komplizierterem, nicht parametrischem Deformationsverhalten weitestgehend aussagefrei (GOJCIC, Z. ET AL. 2018).

Um zu einer Deformationsschätzung mit besseren Eigenschaften zu gelangen, schlagen wir das von einem der Autoren dieses Papers in GOJCIC, Z. ET AL. (2019b) präsentierte Schema vor, das aus einer geometrisch regularisierten Identifizierung korrespondierende Punkte mit anschliessender Distanzberechnung besteht und im nachfolgenden beschrieben wird.

3.2. Neuronale Netze zur Vektorfeldschätzung

Neuronale Netze $\Phi : X \rightarrow Y$ sind flexible nichtlineare Funktionsapproximatoren mit weitem Einsatzgebiet und bewährten Verfahren zur optimalen Wahl der das Netzwerkverhalten bestimmenden Parameter θ mit dem Ziel, ein gewünschtes Input-Output Verhältnis nachzubilden (HASTIE, T. ET AL. 2013, p.389). Sie formen damit ein grundlegendes Werkzeug primär des überwachten Lernens und kommen in dem folgenden Dreischritt zur

Extraktion von Bewegungen aus Paaren von Punktwolken in den Schritten 1 und 3 vor.



Expressive 3D Features in Punktwolken Wir definieren einen maximal expressiven Satz von Merkmalen $f(x) \in \mathbb{R}^m$ einer Punktmenge $x \subset \mathbb{R}^3$ als einen m -dimensionalen Vektor, der für ähnliche Punkt Mengen x_1, x_2 ähnlich und für unähnliche Punkt Mengen x_1, x_3 maximal verschieden im Sinne der ℓ_2 -Norm ist, d.h.

$$\|f(x_1) - f(x_2)\|_2 \rightarrow \min \qquad \|f(x_1) - f(x_3)\|_2 \rightarrow \max. \tag{1}$$

Die Zuweisung $f : \mathbb{R}^3 \supset x \mapsto f(x) \in \mathbb{S}^m$ von normierten Merkmalsvektoren zu Teilmengen der Punktwolke soll über ein neuronales Netz Φ_θ mit Parametern θ realisiert werden, das direkt auf einer standardisierten Voxelrepräsentation von x arbeitet. Die zu Gleichung 1 führenden Überlegungen zu den besten Merkmalen f_{optimal} finden dann in der Formulierung

$$f_{\text{optimal}}(\cdot) = \Phi_{\theta^*}(\cdot) \tag{2}$$

$$\theta^* = \underset{\theta \in \Theta}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \exp \left(\underbrace{\|\Phi_\theta(x_i^1) - \Phi_\theta(x_i^2)\|_2^2}_{\text{Ähnliche Punkte} \rightarrow \text{Ähnliche Features}} - \underbrace{\min_{i \neq j} \|\Phi_\theta(x_i^1) - \Phi_\theta(x_j^2)\|_2^2}_{\text{Unähnliche Punkte} \rightarrow \text{Verschiedene Features}} \right) \right) \tag{3}$$

Niederschlag. Hierbei ist $\{(x_i^1, x_i^2)\}_{i=1}^n$ eine Folge von korrespondierenden Paaren von Teilmengen in zwei Punktwolken (d.h. x_i^1 und x_i^2 repräsentieren dieselben Objekte i in zwei verschiedenen Punktwolken). Θ ist die Menge valider Parametervektoren. Dieser Ansatz ist als 3D SmoothNet bekannt (GOJCIC, Z. ET AL. 2019a). Da er das Vorhandensein von Punktkorrespondenzen voraussetzt, wird dieser Deskriptor auf Referenzdatensätzen trainiert; die Anwendung auf unsere Geomonitoringdaten erfolgt im Sinne der direkten Generalisierung mit der prä-trainierten Merkmalsabbildung Φ_{θ^*} .

Segmentation der Punktwolke Ziel der Segmentation ist es, die Punktwolke so zu partitionieren, dass die zur Partition assoziierten Echtweltpunkte sich hinsichtlich der erfahrenen Deformationen ähnlich verhalten. Dazu ist es nötig, eine Energiefunktion über Partitionen

z einzuführen, die ihre Minima annimmt, wenn die in eine Partition geclusterten Punkte mit hoher Wahrscheinlichkeit zum selben Objekt gehören. Die Energiefunktion $E(z)$ mit

$$E(z) = \underbrace{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_{ij} d(p_i, p_j)}_{\text{Unähnlichkeiten der Punkte in einer Partition}} + \lambda \underbrace{|N(z) - N_{\text{prior}}|}_{\text{Anzahl Partitionen}} \quad (4)$$

$$d(p_i, p_j) = 1 + \frac{1}{r} \left(\|p_i - p_j\|_2^2 - | \langle n_{p_i}, n_{p_j} \rangle | \right) \quad (5)$$

erfüllt diese Anforderungen (LIN, Y. ET AL. 2018). Hierbei sind $\{p_i\}_{i=1}^n$ die dreidimensionalen Koordinaten der n Punkte, n_{p_i} die geschätzten Normalenvektoren im Punkt p_i , λ ein nichtnegativer Koeffizient der die Regularisierung steuert und $N(z)$, N_{prior} sind die Anzahlen von Klassen in der Partition z respektive gemäss einer apriori Schätzung an der der Algorithmus sich orientieren soll. Die optimale $n \times n$ matrix z^* mit binären Einträgen $z_{ij} \in \{0, 1\}$ indizierend ob p_i Repräsentant einer Klasse und p_j in dieser Klasse ist, ergibt sich folglich als

$$z^* = \underset{z_{ij} \in \{0,1\}, \sum_{i=1}^n z_{ij}=1 \forall j}{\text{argmin}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_{ij} d(p_i, p_j) + \lambda |N(z) - N_{\text{prior}}|. \quad (6)$$

Eine genaue Erklärung der von $E(\cdot)$ bevorzugten Partitionen sowie Hinweise zur praktischen Implementation finden sich in LIN, Y. ET AL. (2018).

Geometrisch regularisierte Punktkorrespondenzen Folgend der Segmentierung der Punktwolken werden mit Hilfe der im ersten Schritt bestimmten Merkmalsfunktion und einer Abstandsfunktion im Merkmalsraum (üblicherweise die ℓ_2 -Norm) korrespondierende Punkte durch Vergleich der ihnen zugewiesenen Merkmale identifiziert. Zur Elimination fehlerhafter Korrespondenzen wird ein weiteres neuronales Netz auf Referenzdaten trainiert, welches die Konfidenz in die durch Merkmalsabgleich erhaltenen Korrespondenzen zu präzisieren sucht. Gegeben einen Datensatz mit bekannten Punktkorrespondenzen, für den nach dem obigen Schema die Punktkorrespondenzen zusätzlich noch geschätzt werden, soll das neuronale Netz

$$\Psi_\theta : (x^1, x^2) \mapsto \Psi_\theta(x^1, x^2) =: s \in [0, 1]^{N_c} \quad (7)$$

die Konfidenzen für jede einzelne der N_c Korrespondenzen mit einer reellen Zahl s_j , $j = 1, \dots, N_c$ zwischen 0 und 1 beziffern. Hierbei ist $x = [x^1, x^2] \in \mathbb{R}^{N_c \times 6}$ und x^1, x^2 sind Matrizen der Grösse $\mathbb{R}^{N_c \times 3}$, deren j -te Zeile $x_j = [x_j^1, x_j^2]$ x, y und z Koordinaten des j -ten korrespondierenden Punktpaares in beiden Punktwolken beinhaltet. Da zumindest bei den Referenzdaten bekannt ist, ob jede einzelne Korrespondenz korrekt ($y = 1$) oder inkorrekt ($y = 0$) ist, wird das neuronale Netz Ψ_θ mit diesen Labels als Inputdaten trainiert, um eine Mischung aus binärer Kreuzentropie $E^1(x, \theta)$ und geometrischem Regularisierungsterm $E^2(x, \theta)$ zu minimieren.

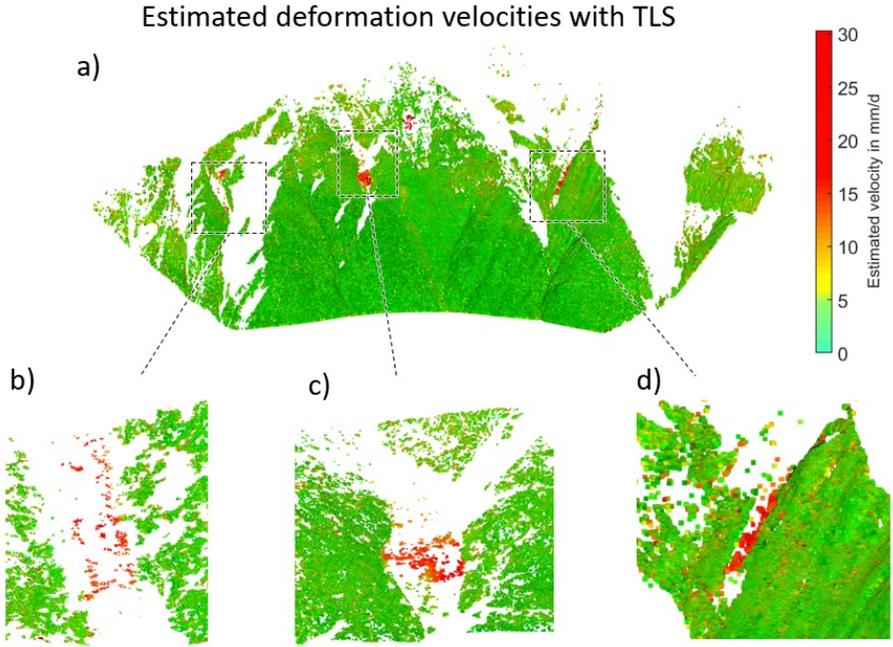


Abbildung 4: Resultat der Deformationsschätzung mit dem im obigen Abschnitt vorgestellten Verfahren.

Die zugehörige Optimierungsaufgabe lautet (GOJCIC, Z. ET AL. 2019b)

$$\theta^* = \underset{\theta \in \Theta}{\operatorname{argmin}} E^1(x, \theta) + \lambda E^2(x, \theta) \tag{8}$$

$$E^1(x, \theta) = - \underbrace{\sum_{i=1}^{N_c} [y_i \log [h(\Psi'_\theta(x_j))]]}_{\text{Penalisiert unentdeckte Korrespondenzen}} \tag{9}$$

$$+ \underbrace{\sum_{i=1}^{N_c} (1 - y_i) \log [1 - h(\Psi'_\theta(x_j))]}_{\text{Penalisiert fälschlicherweise angenommene Korrespondenzen}} \tag{10}$$

$$E^2(x, \theta) = \|R - g(x, \Psi_\theta(x))\|_F^2 \tag{11}$$

Hierbei ist $\Psi_\theta(x_j) \approx h(\Psi'_\theta(x_j))$ die vom Netzwerk prädizierte Konfidenz in Punktkorrespondenz j , λ eine positive Konstante, die den Regularisierungsgrad festlegt und Θ die Menge valider Parameter θ . Der Term $E^2(x, \theta)$ penalisiert die Abweichung von aus Daten

geschätzten Rotationen $g(x, \Psi_\theta(x))$ auf Basis der Singulärwertzerlegung von der wahren Rotation R durch die Frobeniusnorm der Differenzen beider Matrizen. Letztendlich werden Merkmalsberechnung, Segmentierung und Ausreisserelimination mit den auf Referenzdaten prä-trainierten neuronalen Netzen durchgeführt. Obwohl die Referenzdaten eine Innenraumszene darstellen und unsere Anwendung ein mehrere Quadratkilometer grosses Aussenareal beinhaltet, ist die Performance von Merkmalsdeskriptoren und Ausreisserdetektion durchweg zufriedenstellend. Ergebnisse der Prozessierung sind in Abbildung 4 illustriert.

4. Prozessierungsstrategien: TRI

4.1. Implikationen TRI Messprinzip

Bei der terrestrischen Radarinterferometrie werden elektromagnetische Wellen ausgestrahlt, propagieren durch die Atmosphäre, werden von der Geländeoberfläche gemäss Geometrie und Materialeigenschaften reflektiert und die empfangenen Echos hinsichtlich Amplitude und Phase ausgewertet. In jedem der obigen Schritte kann es trotz einer Absenz physischer Deformationen zu Einflüssen auf die Phase und somit fehlerhaft quantifizierten Deformationen kommen. Das Aufnahmeschema beim GPRI ist in Abbildung 5 illustriert.

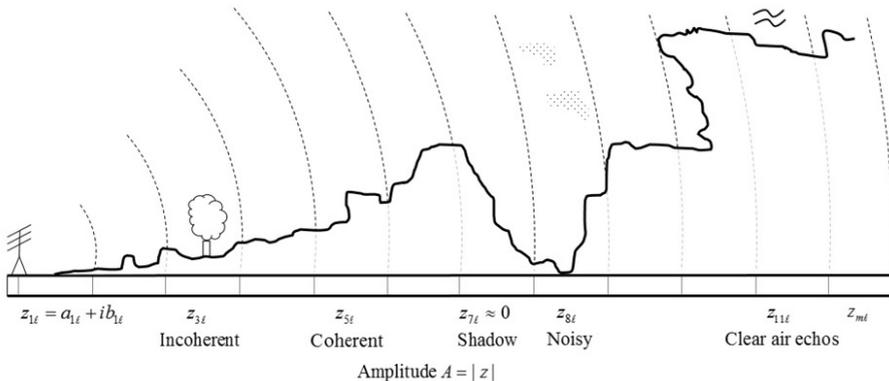


Abbildung 5: Aufnahmeprinzip beim TRI. Die resultierende Messung enthält nicht nur Information über die Geometrie des Geländes sondern auch über Abschattungen, Atmosphäre und Materialparameter. Abbildung modifiziert entnommen aus der Publikation BUTT, J. (2019, p.2011) einer der Autoren dieses Papers.

Zumindest die folgenden zwei Aspekte erschweren die Interpretierbarkeit von Interferogrammen und müssen für eine Deformationsanalyse im allgemeinsten Fall berücksichtigt werden.

- Das empfangene Signal ist eine Superposition aller von Objekten der Auflösungszelle Q zurückgeworfenen Wellen und damit repräsentierbar als die komplexe Phasorsumme $z_{\text{empfangen}} = \sum_{\text{Objekt} \in Q} z_{\text{Objekt}}$. Die einzelnen Rückstreuamplituden $|z_{\text{Objekt}}|$ variieren je nach Materialeigenschaft und Geometrie, sodass gerade in Szenen mit heterogener Reflektanz einige flächenmässig kleine Objekte die beobachteten Messwerte dominieren können. Gerade wenn Objektbewegungen nicht uniform sind, sorgt dies für Ambiguitäten.
- Das empfangene Signal hat auf seinem Weg Ausbreitungsverzögerungen erfahren, die dazu führen, dass optische Weglänge und geometrische Weglänge nicht übereinstimmen. Dieser von Refraktionsindexänderungen induzierte Sachverhalt ist primär auf die zeitlich sowie räumlich inhomogenen meteorologischen Bedingungen zurückzuführen (BUTT, J. 2019, p.230). Die Magnitude dieser Effekte nimmt im Mittel mit der Messentfernung zu.

Für das Geomonitoring eines Geröllhanges gehen wir davon aus, dass das von den Objekten in den ca 5 m^2 grossen Auflösungszellen zurückgestreute Signal ein für die Auflösungszelle repräsentatives Mittel ist und nicht von einzelnen, atypischen Rückstreuern dominiert wird wie es in urbanen Szenen der Fall sein kann. Der Einfluss von Rauschen und Atmosphäre allerdings ist nicht vernachlässigbar und legt das Modell

$$\varphi_{\text{Messung}} = \varphi_{\text{Deformation}} + \varphi_{\text{Atmosphäre}} + \varphi_{\text{Rauschen}} \quad (12)$$

nahe. Hierbei interpretieren wir die von Deformationen, Atmosphäre und Rauschen induzierten Phasen φ als Zufallsfelder und fixieren als Ziel des nächsten Abschnittes die statistisch optimale Trennung der drei Effekte auf Basis der gemessenen Werte. Im Fall der Annahme räumlich und zeitlich unkorrelierter Störeffekte, ist eine simple zeitliche Mittelung der Daten optimal (BUTT, J. 2019). Abbildung 6 zeigt das Resultat einer solchen grundlegenden Prozessierung.

4.2. Optimale Signaltrennung in Hilberträumen

Ein Hilbertraum \mathcal{H} ist ein typischerweise unendlichdimensionaler Vektorraum mit einem bilinearen inneren Produkt $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathcal{H}} : \mathcal{H} \times \mathcal{H} \rightarrow \mathbb{R}$ der vollständig ist im Bezug auf die von der Norm $\| \cdot \|_{\mathcal{H}} = \sqrt{\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathcal{H}}}$ induzierte Topologie (HELMBERG 1997). Eine bestimmte Klasse von Hilberträumen —genannt Hilberträume mit reproduzierendem Kern (RKHS)— ist interpretierbar als Ansammlung von Räumen von Funktionen auf einer Indexmenge S mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung über dem Funktionenraum (LARKIN, F. 1972).

Estimated deformation velocities with TRI

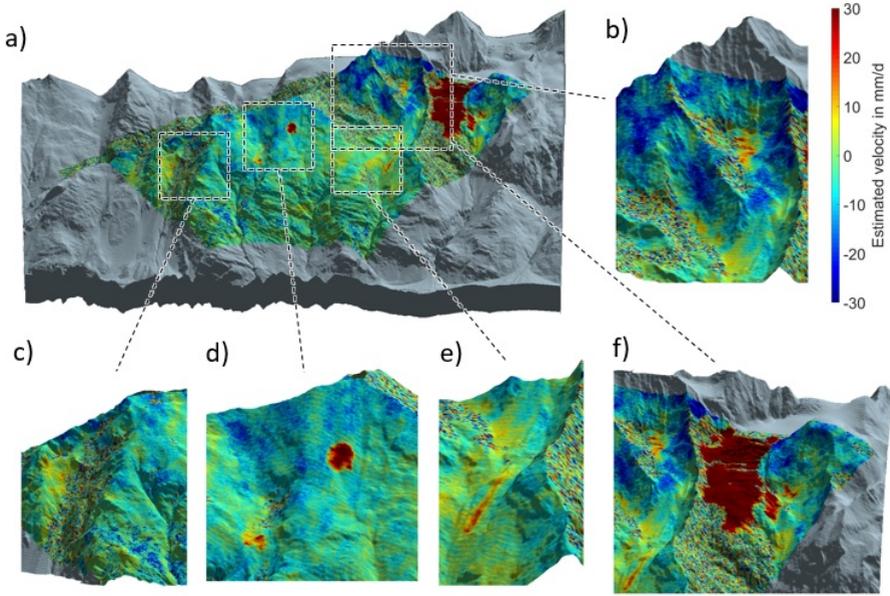


Abbildung 6: Die Abbildung zeigt das Mittel aus einem Monat an Radardaten. Panel a) gibt einen Überblick über die Gesamtregion, während Panels b) - f) vergrößerte Detailausschnitte zeigen. In den Geröllhalden der Panels b), d), e) sind klar Deformationen zu erkennen, Panel f) zeigt eine sich schnell bewegende Gletscherzunge.

Sie zeichnen sich durch die Existenz eines reproduzierenden Kern $K(\cdot, \cdot)$ mit $K(s, \cdot) \in \mathcal{H} \forall s \in S$ aus, der $\forall f(\cdot) \in \mathcal{H}$ die Gleichungen

$$\langle f(\cdot), K(s, \cdot) \rangle_{\mathcal{H}} = f(s) \qquad \langle K(s, \cdot), K(t, \cdot) \rangle_{\mathcal{H}} = K(s, t) \qquad (13)$$

erfüllt, also als Repräsentant des Evaluationsfunktional nach dem Riesschen Repräsentationstheorem angesehen werden kann BERLINET, A. & THOMAS-AGNAN, C. (2011, p.9). Von der stochastischen Perspektive aus gesehen sind die positiv definiten Kerne als Kovarianzfunktionen zu interpretieren. Sie determinieren die Korrelationsstruktur der Zufallsfelder und spielen eine zentrale Rolle bei der Definition abstrakter Splines — Lösungen von Norm-Minimierungsproblemen in RKHS. Da die Norm $\|f\|_{\mathcal{H}}, f \in \mathcal{H}$ in einem RKHS \mathcal{H} in einem inversen Verhältnis zur Wahrscheinlichkeit des Elementes $f \in \mathcal{H}$ steht, kann Norm-Minimierung mit Maximum-Likelihood Schätzung unter einer Gausschen Verteilungsannahme gleichgesetzt werden (LARKIN, F. 1972). Bezeichnen $\mathcal{H}_{K_M}, \mathcal{H}_{K_D}, \mathcal{H}_{K_A}, \mathcal{H}_{K_N}$ die Hilberträume von Messungen, Deformation, Atmosphäre und Rauschen mit den entsprechenden Kernen K_M, K_D, K_A und K_N , so ist folgender Spline ein Schätzer für die

Verteilung der Deformationen als Funktion der räumlichen Variable $s \in S$ auf Basis der Messungen m (BUTT, J. 2019, p.270).

$$d(\cdot) = \underset{d(\cdot) \in \mathcal{H}_{K_D}}{\operatorname{argmin}} \|Ad(\cdot) - m\|_{A \otimes A\mathcal{H}_{K_M}/\mathcal{H}_{K_D}}^2 + \|d(\cdot)\|_{\mathcal{H}_{K_D}}^2 \quad (14)$$

$$\mathcal{H}_{K_M} = \mathcal{H}_{K_D} \oplus \mathcal{H}_{K_A} \oplus \mathcal{H}_{K_N} \quad K_M = K_D + K_A + K_N \quad (15)$$

Hierbei ist $d(\cdot) \in \mathcal{H}_{K_D}$ mit $d(\cdot) : S \ni s \mapsto d(s) \in \mathbb{R}$ ein Schätzer für die Deformation, \oplus denotiert die orthogonale direkte Summe von Hilberträumen, \otimes ist das Tensorprodukt von Operatoren oder Hilberträumen und $A : \mathcal{H} \ni f \mapsto [f(s_1), \dots, f(s_n)]^T \in \mathbb{R}^n$ ist ein Evaluationsfunktional, das auf die Beobachtungen abbildet. $\mathcal{H}_1/\mathcal{H}_2$ ist der Quotientenraum von Äquivalenzklassen von Elementen aus \mathcal{H}_1 unter $f_1 \sim f_2 \Leftrightarrow f_1 - f_2 \in \mathcal{H}_2$ und der Hilbertraum $A \otimes A\mathcal{H}_K$ ist definiert als $\mathcal{H}_{A \otimes AK}$ mit reproduzierendem Kern $A \otimes AK(\cdot, \cdot)$. Man bemerke, dass der erste Term die Magnituden der Residuen $Ad(\cdot) - m$ penalisiert, während der zweite die Wahrscheinlichkeit von $d(\cdot)$ selber zu maximieren sucht. Die volle raumzeitliche Schätzung von Funktionen f^\otimes auf $S \times T$ mit T der Zeitachse lässt sich als Tensorspline wie folgt darstellen (BUTT, J. 2019, p.105).

$$d^\otimes(\cdot) = \underset{d^\otimes(\cdot) \in \mathcal{H}_{K_D^\otimes}}{\operatorname{argmin}} \underbrace{\|A^s \otimes A^t d^\otimes(\cdot) - m\|_{A^\otimes \otimes A^\otimes \mathcal{H}_{K_M^\otimes}/\mathcal{H}_{K_D^\otimes}}^2}_{A^\otimes} + \|d^\otimes(\cdot)\|_{\mathcal{H}_{K_D^\otimes}}^2 \quad (16)$$

$$\mathcal{H}_{K_M^\otimes} = (\mathcal{H}_{K_D}^s \oplus \mathcal{H}_{K_A}^s \oplus \mathcal{H}_{K_N}^s) \otimes (\mathcal{H}_{K_D}^t \oplus \mathcal{H}_{K_A}^t \oplus \mathcal{H}_{K_N}^t) \quad (17)$$

Hierbei stehen s und t jeweils für 'räumlich' und 'temporal', d.h. \mathcal{H}_K^s und \mathcal{H}_K^t sind Hilberträume von Funktionen im Raum- bzw Zeitargument und deren Tensorprodukt $\mathcal{H}_K^s \otimes \mathcal{H}_K^t =: \mathcal{H}_K^\otimes$ beinhaltet Funktionen $f : S \times T \rightarrow \mathbb{R}$ auf dem Raumzeitargument. Die Lösungen für diese Splines lassen sich explizit angeben und hängen nur ab von den Messdaten und den Korrelationsstrukturen in den Daten. Man findet (BUTT, J. 2019, p.267)

$$d^\otimes = \Sigma^s \otimes \Sigma^t m \quad (18)$$

$$\Sigma^s = [A^s K_D^s]^T [A^s \otimes A^s K_M^s]^{-1} \quad (19)$$

$$\Sigma^t = [A^t K_D^t]^T [A^t \otimes A^t K_M^t]^{-1} \quad (20)$$

mit den topographieabhängigen und nicht stationären Kernen $K_M^s(s_1, s_2) = \sigma_s^2 \delta_{s_1 s_2} + K_D^s(s_1, s_2) + \int_{s_0}^{s_1} \int_{s_0}^{s_1} K_{\text{Refraktion}}^s(u, v) dudv$ und $K_M^t(t_1, t_2) = \sigma_t^2 \delta_{t_1 t_2} + K_D^t(t_1, t_2) + K_A^t(t_1, t_2)$, die entweder aus Daten extrahiert werden können ($K_A^{s,t}, K_N^{s,t}$) oder aus a priori Annahmen herrühren müssen ($K_D^{s,t}$). Die Resultate einer solchen Signaltrennung unter der Annahme, dass die Deformationen sich differenzierbar in Zeit und Ort ändern findet sich in Abbildung 5.

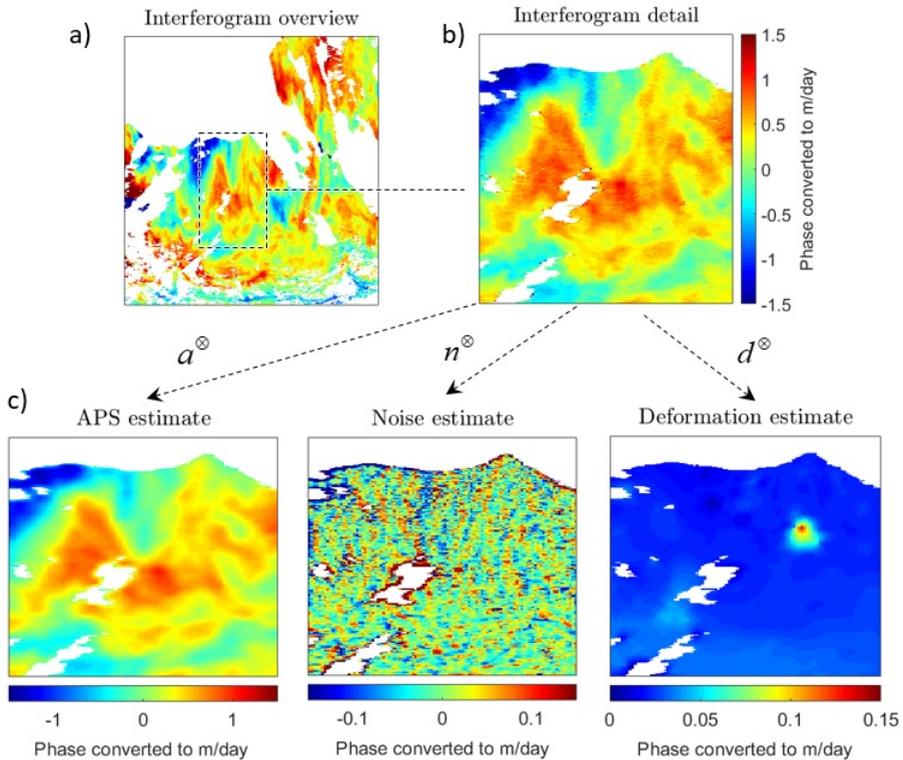


Abbildung 7: a) zeigt die Phase eines Interferogrammes, b) einen kleineren Ausschnitt davon, der mit Panel d) aus Abbildung 6 zu identifizieren ist. Werden die in Gleichung 18 verwendeten Formeln zur Schätzung von Deformation, Atmosphäre und Rauschen verwendet, so ergeben sich die in c) dargestellten Schätzer. Gegenüber alternativen Methoden wie dem einfachen Mittel von Interferogrammen oder dem Fitten parametrischer Funktionen zur Modellierung der Atmosphäre, sind diese Schätzungen deutlich verbessert (Butt, J. 2019).

5. Resultatinterpretation und Zusammenfassung

Die in den vorigen Kapiteln dargestellten Methoden erlauben es, einen Schätzer für das Deformationsverhalten des Untersuchungsareales auf Basis von TLS- und TRI-Daten abzuleiten. Die Ergebnisse der Auswertung der Radarmessungen und der Laserscans sind in Abbildungen 4 und 7 zu finden. Die Deformationsschätzungen wirken visuell und in physikalischer Hinsicht plausibel, werden jedoch von den räumlich sporadisch aber zeitlich dicht durchgeführten Überwachungsmessungen mit GNSS nicht bestätigt. Ein direkter Vergleich offenbart, dass mittels TRI und TLS geschätzte Geschwindigkeiten sich ähneln aber beide deutlich über den aus GNSS-Daten extrahierten Geschwindigkeiten liegen. Die

Ursache dafür ist nicht abschliessend geklärt, mag aber in der unterschiedlichen Sensitivität der Messverfahren gegenüber kleinflächigen Änderungen der Gesteinsschuttfelder und der Installation der GNSS-Messstationen auf besonders massiven Felsblöcken zu suchen sein.

Obwohl die obigen Abweichungen und Inkonsistenzen verschiedener Messtechnologien untereinander weiterer Untersuchungen bezüglich ihrer statistischen Verteilung und der sie hervorrufenden Ursachen bedarf, kann die Frage nach der Extrahierbarkeit gleichartiger Deformationsschätzungen aus TLS- und TRI-Daten grundsätzlich bejaht werden. Indem die Schätzungen als flexible nichtparametrische Lösungen für statistisch motivierte Optimierungsprobleme formuliert werden, gelingt es, merkmalsbasierte und geometrisch regulalisierte Punktkorrespondenzen aus Punktwolken abzuleiten und zu Deformationsvektorfeldern weiterzuverarbeiten sowie in zeitlichen Abfolgen von Interferogrammen Signal und Rauschen zu unterscheiden. In der Zukunft mag es nötig sein, TLS und TRI komplementär zu benutzen — TRI ist hochgenau aber liefert aggregierende Werte während TLS weniger präzise ist aber die Möglichkeit bietet, lokale dreidimensionale Verschiebungen abzuleiten. In jedem Fall wird es möglich sein, die mit den extrahierten Deformationen assoziierten Unsicherheiten zu quantifizieren und an einer Laufzeitoptimierung der TLS-Prozesskette zu arbeiten, welche momentan für die Auswertung einer Szene wie in Abbildung 4 etwa 5 Tage Rechenzeit auf einem handelsüblichen Desktop PC benötigt.

Danksagung

Die hier analysierten Messungen wurden durchgeführt im Rahmen eines vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt in Auftrag gegebenen und finanzierten Projektes, das auch durch die schweizerische geodätische Kommission finanziell unterstützt wurde. Familie Fux stellte den Autoren freundlicherweise ihre Ferienhütte zu Übernachtungszwecken zur Verfügung. Wir möchten ihnen für diese grosszügige und freiwillige Unterstützung danken.

Dank gebührt auch Herr Cornelius Senn aus dem Bereich ETH-Werkstätten D-BAUG für die Anfertigung der Cornerreflektoren sowie seine Unterstützung bei deren Installation. Robert Presl (Verwaltungsgruppe IGP, ETH) sowie Alexander Wolf (Elektronikwerkstatt IGP, ETH) waren massgeblich beteiligt an der Herstellung auxiliärer Infrastruktur umfassend insbesondere mechanische Fixierungen und die Details der Stromversorgung. Jan Beutel (Computer Engineering Group, ETH) stand beratend bei in Angelegenheiten der Datenübertragung. Andreas Baumann unterstützte insbesondere in logistischen Angelegenheiten und die Kollegen Zan Gojic und Caifa Zhou (alle IGP, ETH) halfen bei der praktischen Durchführung der Messkampagne mit. Rafael Caduff der GPRI-Herstellerfirma Gamma Remote Sensing AG trat den Durchführenden im Vorfeld der Vorbereitung insbesondere in Aspekten betreffend Gerätekonfigurationen und hardwaretechnischer Limitierungen unterstützend zur Seite. Hugo Raetzo vom Bundesamt für Umwelt unterstützte logistisch und administrativ durch die Einholung der notwendigen Genehmigungen.

Literatur

- BEARTH, P. (1964): Randa (LK 1328). Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern, Schweiz.
- BERLINET, A. & THOMAS-AGNAN, C. (2011): Reproducing Kernel Hilbert Spaces in Probability and Statistics. Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg.
- BUTT, J. (2019): An RKHS approach to modelling and inference for spatiotemporal geodetic data with applications to terrestrial radar interferometry. PhD thesis, ETH Zurich, Zurich.
- BUTT, J., WIESER, A., CONZETT, S. (2017): Intrinsic random functions for mitigation of atmospheric effects in terrestrial radar interferometry. *Journal of applied geodesy*, 11(2):89-98.
- CADUFF, R., KOS, A., SCHLUNEGGER, F., MCARDELL, B., WIESMANN, A. (2014): Terrestrial radar interferometric measurement of hillslope deformation and atmospheric disturbances in the illgraben debris-flow catchment, Switzerland. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(2):434-438.
- FRIEDLI, E., BANZ, J., GOJCIC, Z., WIESER, A. (2018): Fusion of laser scanning and photogrammetric data for the documentation and VR visualization of an archaeological tomb complex. In *Proceedings FIG 2018, S.I. s.n. FIG Congress 2018; Conference Location: Istanbul, Turkey; Conference Date: November 6-11, 2018*.
- FRIEDLI, E., PRESL, R., WIESER, A. (2019): Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2019), Athens, Greece, May 15-17, 2019*.
- GOJCIC, Z., ZHOU, C., WEGNER, J. D., WIESER, A. (2019a): The perfect match: 3D point cloud matching with smoothed densities. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 5545-5554.
- GOJCIC, Z., ZHOU, C., WIESER, A. (2018): Learned compact local feature descriptor for TLS-based geodetic monitoring of natural outdoor scenes. volume IV-2 of *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 113 - 120. Göttingen. Copernicus. *ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020"*; Conference Location: Riva del Garda, Italy; Conference Date: June 4-7, 2018.
- GOJCIC, Z., ZHOU, C., WIESER, A. (2019b). Robust pointwise correspondences for point cloud based deformation monitoring of natural scenes. In *4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2019), Athens, Greece, May 15-17, 2019*.
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., FRIEDMAN, J. (2013): *The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg.
- HELMBERG (1997): *Introduction to Spectral Theory in Hilbert Space*- Dover Books on Mathematics. Dover Publications, Inc., Mineola, New York.
- IGLESIAS, R., FABREGAS, X., AGUASCA, A., MALLORQUI, J. J., LOPEZ-MARTINEZ, C., GILI, J. A., COROMINAS, J. (2014): Atmospheric phase screen compensation in ground-based SAR with a multiple-regression model over mountainous regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5):2436-2449.
- LARKIN, F. (1972): Gaussian measure in Hilbert space and applications in numerical analysis. *Rocky Mountain J. Math.*, 2(3):379-422.

- LIN, Y., WANG, C., ZHAI, D., LI, W., LI, J. (2018): Toward better boundary preserved supervoxel segmentation for 3d point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 143:39 - 47. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Theme Issue "Point Cloud Processing".
- MARTINO, S. & MAZZANTI, P. (2014): Integrating geomechanical surveys and remote sensing for sea cliff slope stability analysis: the mt. pucci case study (italy). Natural Hazards and Earth System Sciences, 14:831-848.
- RIEGL (2017): 3D Terrestrial Laser Scanner RIEGL VZ-4000/ RIEGL VZ-6000. General Description and Data Interfaces. RIEGL Laser Measurement Systems.
- RIESEN, P., STROZZI, T., BAUDER, A., WIESMANN, A., FUNK, M. (2011): Short-term surface ice motion variations measured with a ground-based portable real aperture radar interferometer. Journal of Glaciology, 57(201):53-60.
- RÖODELSPERGER, S., BECKER, M., GERSTENECKER, C., LAEUFER, G., SCHILLING, K., STEINECK, D. (2010): Digital elevation model with the ground-based {SAR} ibis-l as basis for volcanic deformation monitoring. Journal of Geodynamics, 49(3/4):241 - 246. {WEGENER} 2008 -Proceedings of the 14th General Assembly of Wegener.
- STROZZI, T., WERNER, C., WIESMANN, A., WEGMULLER, U. (2012): Topography mapping with a portable real-aperture radar interferometer. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 9(2):277-281.
- TEZA, G., BALZANI, M., NOFERINI, L., GALGARO, A., LUZI, G., UCCELLI, F., PIERACCINI, M., SILVANO, S., ZALTRON, N., GENEVOIS, R., GALVANI, G., MECATTI, D., MACALUSO, G., PIERACCINI, M., ATZENI, C. (2008): Groundbased monitoring of high-risk landslides through joint use of laser scanner and interferometric radar. International Journal of Remote Sensing, 29(16):4735-4756.
- VOYTENKO, D., DIXON, T., WERNER, C., GOURMELEN, N., HOWAT, I., TINDER, P., HOOPER, A. (2012): Monitoring a glacier in southeastern iceland with the portable terrestrial radar interferometer. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, pages 3230-3232.

Kontakt

JEMIL BUTT

ZAN GOJCIC

LORENZ SCHMID

ANDREAS WIESER

Institut für Geodäsie and Photogrammetrie

ETH Zürich

CH-8093 Zürich

Schweiz

jemil.butt@geod.baug.ethz.ch